



Escuela Superior Politécnica del Litoral

Facultad de Ingeniería Marítima Y Ciencias del Mar

Reproducción y observación con microscopía del fallo interlaminar de una
unión híbrida de acero con GFRP.

INGE-2323

Proyecto Integrador

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero Naval

Presentado por:

Alex Freddy Bayas Sánchez

Salim Abdalá Domínguez Cedeño

Guayaquil - Ecuador

Año: 2024

Agradecimiento

Agradezco profundamente a Dios por sobre todas las cosas. Gracias al apoyo de mis familiares, por sus palabras alentadoras y colaboración. Mi gratitud a mi tutor PhD. Patrick Townsend, y cotutor y mentor PhD. Franklin Dominguez, por su orientación, paciencia y sabiduría. Mi más sincero agradecimiento a la ESPOL y a todas las personas que contribuyeron de manera significativa, cada aporte que ha enriquecido mi crecimiento académico.

Salim Abdalá Dominguez Cedeño

Agradezco a Dios por darme la salud y la vida para poder culminar un sueño tan anhelado. También agradezco a mi familia por apoyarme en los momentos difíciles que fueron de suma importancia para no desmayar en esta etapa de mi vida. Tengo el agrado de haber finalizado esta tesis con el apoyo incondicional de nuestro tutor PhD. Patrick Townsend y cotutor PhD. Franklin Dominguez. Finalmente quedo agradecido con la ESPOL por abrirme las puertas de la ciencia y haber formado un hombre de bien.

Alex Freddy Bayas Sánchez

Declaración Expresa

Nosotros Alex Freddy Bayas Sánchez y Salim Abdalá Dominguez Cedeño acordamos y reconocemos que:

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

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

Guayaquil, 26 de enero del 2024

Alex Freddy Bayas

Sánchez

Salim Abdalá

Dominguez Cedeño

Evaluadores

MSc. Tadea Quintuña

Profesor de Materia

PhD. Patrick Townsend

Tutor de proyecto

Resumen

En las construcciones de buques de ingeniería naval, el peso del buque representa un factor importante en el consumo de combustible, velocidad del buque y cargas en el buque. La superestructura representa el 40% del peso, en la mayoría de los casos. Por eso se propone sustituirla por una construcción de fibra de vidrio. Como objetivo principal se estudia un panel de 30 por 30 cm, de tubo de acero, analizando en laboratorio con ensayos mecánicos y comparando con software de elementos finitos los resultados. Los 5 modelos propuestos tienen un tubo vertical de acero negro con un tubo cruzado soldador, de 2 y 1 pulgadas respectivamente, acostado en una base de MDF con 3 capas de revestimiento de fibra de vidrio, MAT 450, Woven Roving 400 y Mat. Los resultados muestran un comportamiento lineal hasta 30 kN y el plástico y falla en los ensayos de flexión. En el caso de la tracción, parece mostrar cierta delaminación y nuevamente comportamiento lineal hasta 20 kN, plástico y falla de la probeta. Como conclusión, estos resultados muestran que supera la presión de diseño de un barco de 46 metros de eslora.

Palabras clave: Fibra de vidrio, tracción, flexión, delaminación.

Abstract

In naval engineering ship constructions, the weight of the ship represents an important factor in fuel consumption, ship speed and loads on the ship. The superstructure represents 40% of the weight, in most cases. That is why it is proposed to replace it with a fiberglass construction. The main objective is to study a 30 by 30 cm steel tube panel, analyzing it in the laboratory with mechanical tests and comparing the results with finite element software. The 5 proposed models have a black steel vertical tube with a welded cross tube, 2 and 1 inches respectively, lying on an MDF base with 3 layers of fiberglass coating, MAT 450, Woven Roving 400 and Mat. The results show a linear behavior up to 30 kN and the plastic and failure in the bending tests. In the case of tension, it seems to show some delamination and again linear behavior up to 20 kN, plastic and failure of the specimen. In conclusion, these results show that it exceeds the design pressure of a 46-meter-long ship.

Keywords: *Fiberglass, tensile, bending, delamination.*

Índice general

Abreviaturas	I
Simbología	II
Índice de figuras.....	III
Índice de tablas	VI
Capítulo 1.....	1
1.1 Introducción	2
1.2 Descripción del problema.....	4
1.3 Justificación del problema	5
1.4 Objetivos.....	6
1.4.1 Objetivo general.....	6
1.4.2 Objetivos específicos.....	7
1.5 Marco teórico	7
1.5.1. Materiales compuestos	9
1.5.2. Propiedades de la estructura Tubular	12
1.5.3. Unión híbrida, paneles compuestos con estructura tubular	13
Capítulo 2.....	14
2. Metodología	15
2.1. Espécimen	17
2.2. Materiales	18
2.3. Proceso de fabricación de probetas	18
2.4. ANSYS ACP, elementos finitos análisis	19
2.5. Análisis teórico.....	23
2.5.1. Análisis de laminado	28
2.5.2. Ecuaciones de Movimiento para el esfuerzo normal	30
2.5.3. Ecuaciones de Movimiento para el esfuerzo de corte	31
2.5.4. Escantillonado del panel de fibra de vidrio	34

2.5.5. Escantillado por capa de fibra de vidrio	35
Capítulo 3.....	36
3. Resultados y análisis	37
3.1. Pruebas de flexión	37
3.1.1. Galga extensiométrica en flexión	39
3.2. Prueba de tracción.....	43
3.3. Resultados ANSYS	48
3.3.1. Convergencia.....	48
3.3.2. Prueba de flexión.....	49
3.3.3. Prueba de tracción.....	51
3.4. Observación microscópica	53
Capítulo 4.....	57
4.1 Conclusiones y recomendaciones.....	58
4.1.1 Conclusiones	58
4.1.2 Recomendaciones	58
Referencias.....	60
Apéndice A	61

Abreviaturas

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
GFRP	Panel de fibra de vidrio reforzado
ACP	Ansys Composite PrepPost
DCN	DEPARTAMENTO DE CIENCIAS NUCLEARES
mm	Milímetro
Cm	Centímetros
kN	Kilo newtons
FIMCM	Facultad de Ingeniería Marítima Y Ciencias del Mar
FICT	Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra

Simbología

E	Módulo de elasticidad
G	Módulo de corte
ν	Coefficiente de Poisson
ε	Deformación unitaria
σ, Q	Esfuerzo cortante
M_x	Momento de flexión
p	Presión
m	Masa por unidad de longitud
M	Masa
ξ	Gravedad específica de las laminas de fibra.
δ	Deflexión
K_{db}	Constante del momento de flexión
K_{ds}	Constante de esfuerzo cortante
A_r	Relación de área del panel
t, T	Espesor
ζ_s	Esfuerzo de cada capa
γ_{xy}	Deformación transversal

Índice de figuras

Figura 1 <i>Especímenes 3D realizado en Rhino software</i>	4
Figura 2 <i>Fallo interlaminar en la fibra de vidrio expuesta en superficie debido a la delaminación.</i>	5
Figura 3 <i>Hangar para helicópteros en la fragata francesa clase La Fayette con muestra de unión híbrida</i>	8
Figura 4 <i>Propiedades Tubo Estructural Redondo Negro</i>	13
Figura 5 <i>Localización de la unión híbrida</i>	16
Figura 6 <i>Proceso para conseguir los resultados de la unión híbrida</i>	17
Figura 7 <i>Proceso de fabricación de probetas</i>	19
Figura 8 <i>Materiales utilizados en ANSYS software</i>	20
Figura 9 <i>Mallado del modelo 3D en ANSYS</i>	21
Figura 10 <i>Establecimiento del espesor de cada capa de laminado</i>	22
Figura 11 <i>Establecimiento de referencia de cada geometría</i>	23
Figura 12 <i>Elemento diferencial en un cuerpo elástico que muestra una dirección positiva de las tensiones</i>	24
Figura 13 <i>Cortante de un elemento diferencial.</i>	25
Figura 14 <i>Elemento diferencial de un cuerpo en flexión</i>	27
Figura 15 <i>Panel típico rectangular para laminados</i>	28
Figura 16 <i>Esquema de cortante y momento flector</i>	29
Figura 17 <i>Diagrama de unión entre adherentes y adhesivo</i>	30
Figura 18 <i>Esquema de cargas aplicadas para analizar la tensión de corte en un adhesivo, a) Imposición de tensión, b) Imposición de corte, c) Aplicación de momento</i>	32
Figura 19 <i>Resultados de pruebas de flexión, Fuerza versus desplazamiento de aplastamiento</i>	37
Figura 20 <i>Secuencia de prueba de flexión de probeta 1</i>	38
Figura 21 <i>Ubicación de las galgas extensiométricas en el espécimen físico</i>	39
Figura 22 <i>Resultados de galgas extensiométricas de la prueba de la probeta 1 en flexión</i> ..	40
Figura 23 <i>Resultados de galgas extensiométricas de la prueba de la probeta 2 en flexión</i> ..	40
Figura 24 <i>Resultados de galgas extensiométricas de la prueba de la probeta 3 en flexión</i> ..	41
Figura 25 <i>Resultados de galgas extensiométricas de la prueba de la probeta 4 en flexión</i> ..	41
Figura 26 <i>Resultados de galgas extensiométricas de la prueba de la probeta 5 en flexión</i> ..	42

Figura 27	<i>Nube de puntos de galgas extensiométrica en el valor del fallo interlaminar</i>	42
Figura 28	<i>Pruebas de las 5 probetas en tracción Fuerza vs desplazamiento</i>	43
Figura 29	<i>Resultado de galgas extensométricas de la prueba de la probeta 2 en tracción</i>	44
Figura 30	<i>Resultado de galgas extensométricas de la prueba de la probeta 3 en tracción</i>	45
Figura 31	<i>Resultado de galgas extensométricas de la prueba de la probeta 4 en tracción</i>	45
Figura 32	<i>Nube de puntos de galga extensométrica en tracción en el valor de fallo interlaminar</i>	46
Figura 33	<i>Nube de puntos de galga extensométrica en tracción en el valor de fallo interlaminar</i>	46
Figura 34	<i>Secuencia de pruebas de tracción de la probeta 1</i>	47
Figura 35	<i>Resultado de convergencia de mallado para prueba de flexión</i>	48
Figura 36	<i>Resultado de convergencia de mallado para prueba de tracción</i>	48
Figura 37	<i>Resultados la prueba de flexión de ANSYS en comparación con los resultados experimentales</i>	49
Figura 38	<i>Presión de diseño para superestructuras y casetas para todos los barcos</i>	50
Figura 39	<i>Resultados de la fuerza dentro del límite establecido</i>	50
Figura 40	<i>Resultados de la fuerza fuera del límite establecido</i>	51
Figura 41	<i>Resultados la prueba de tracción de ANSYS en comparación con los resultados experimentales</i>	51
Figura 42	<i>Estimación de fuerzas en unión entre costados y cubierta [6]</i>	52
Figura 43	<i>Resultados en elementos finitos a la fuerza típica de la unión de cubierta principal y superestructura</i>	53
Figura 44.	<i>Primer plano de la muestra en flexión en la zona de falla</i>	54
Figura 45.	<i>Aumento de 150x en área no dañada 1</i>	54
Figura 46.	<i>Aumento de 150x en área no dañada 1</i>	55
Figura 47.	<i>Aumento de 150x en el área dañada 1</i>	55
Figura 48.	<i>Aumento de 150x en el área dañada</i>	56
Figura 49	<i>Propiedad del acero negro establecido en ANSYS</i>	61
Figura 50	<i>Propiedades de MDF establecidos en ANSYS</i>	61
Figura 51	<i>Propiedades de MAT 450 establecido en ANSYS</i>	62
Figura 52	<i>Propiedades de Woven Roving 400 establecidas en ANSYS</i>	63
Figura 53	<i>Propiedades de resina poliéster establecidas en ANSYS</i>	64
Figura 54	<i>Máquinas de ensayo universales hidráulicas UH-X/FX Series</i>	64

Figura 55 <i>Instalación de galgas extensométricas</i>	65
Figura 56 <i>Pruebas de funcionamiento y registro de datos de galgas extensométricas</i>	65

Índice de tablas

Tabla 1	<i>Propiedades mecánicas para telas tipo Mat [7]</i>	9
Tabla 2	<i>Propiedades mecánicas para telas tipo Woven Roving [7]</i>	10
Tabla 3	<i>Reforzamiento mínimo de resina [8]</i>	10
Tabla 4	<i>SAE 1008 Propiedades para el tubo de acero negro</i>	12

Capítulo 1

1.1 Introducción

En un mundo que enfrenta desafíos sin precedentes, la agenda política sirve como un faro de esperanza y acción para el desarrollo sostenible y el cambio climático, y exige una acción concertada para construir un futuro más verde y sostenible para las generaciones futuras [4]. De esta manera, la industria naviera tendrá que operar barcos energéticamente eficientes que sean respetuosos con el medio ambiente. Una forma eficaz de reducir el consumo de combustible es reduciendo el peso de los buques, lo que en la industria de la construcción naval se hace posible al diseñar superestructuras de material compuesto y convertir los buques de acero o aluminio en transportes híbridos. Las ventajas de esta propuesta se vuelven más prominentes en los grandes buques de pasajeros, ya que las superestructuras constituyen un porcentaje significativo en el peso ligero, lo que se traduce en elevar varias cubiertas nuevas por encima de la cubierta de intemperie, sin afectar la estabilidad del barco.

Los materiales compuestos utilizados en las superestructuras de los barcos ofrecen una serie de ventajas significativas. En primer lugar, requieren menos mantenimiento en comparación con las estructuras de acero tradicionales, lo que reduce los costos operativos a lo largo del tiempo. Además, estos materiales muestran un comportamiento inerte en relación con la estructura de acero, lo que ayuda a prevenir la corrosión galvánica y prolonga la vida útil de la embarcación. Por último, los materiales compuestos permiten la creación de superficies con formas suavizadas y un acabado estético, lo que mejora la apariencia de la embarcación [2].

El acero, aunque ampliamente utilizado en la construcción naval, se ve limitado por su principal desventaja, el exceso de peso. Además, se requieren considerables gastos para mantener un acabado exterior adecuado a lo largo del tiempo. Por otro lado, el aluminio ofrece la ventaja de reducir el peso en comparación con el acero, pero presenta un desafío económico

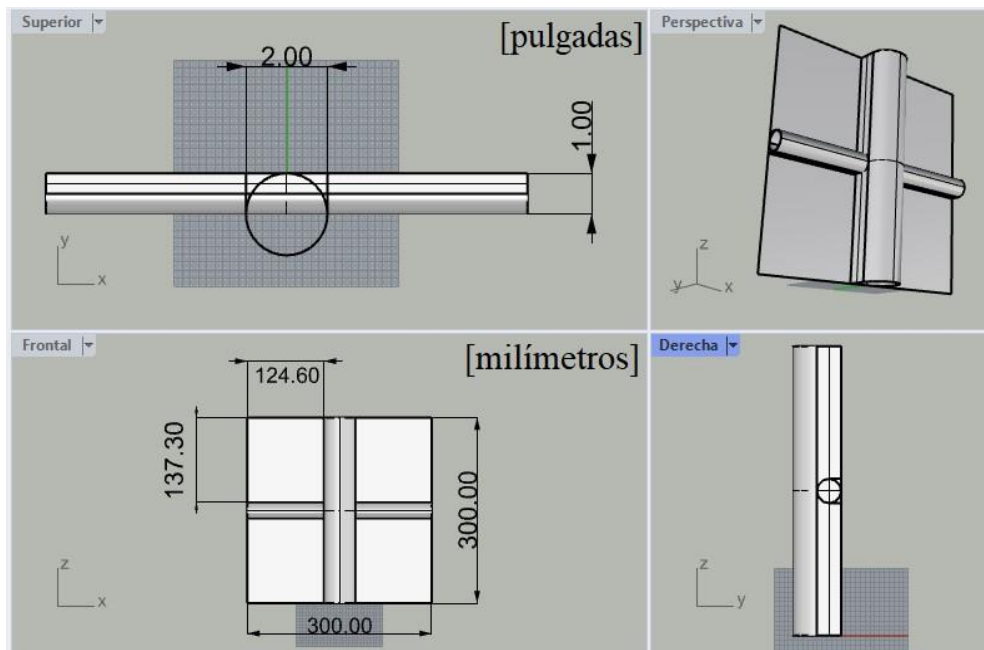
importante. El costo de conformar las superficies y lograr un acabado exterior de calidad supera, en muchos casos, el costo asociado con el acero.

Un material compuesto presenta ciertas características que han impulsado su extenso avance en los diseños estructurales en los barcos, tales como una alta resistencia mecánica, rigidez significativa, reducido peso y mayor resistencia a la fatiga y corrosión, en comparación al acero y aluminio, flexibilidad, estabilidad dimensional. Los materiales compuestos se constituyen de dos o más elementos, de modo que las propiedades del conjunto son superiores a las de cada elemento individual por separado. La complejidad en su análisis a menudo proviene de su tendencia a exhibir un comportamiento ortotrópico en sus propiedades mecánicas, ya que varían según la dirección de medición [1].

Uno de los desafíos que se presentan en este trabajo de investigación se presenta en la adherencia entre los adherentes. Por ello el objetivo principal será analizar el comportamiento y visualizar con microscopia el fallo interlaminar que se presenta en las pruebas teóricas y experimentales de probetas cuadradas sometidas a pruebas de tracción y flexión. Las uniones híbridas propuestas consisten en una estructura tubular de acero negro no cedulado. La estructura vertical está compuesta por un tubo de 2 pulgadas y un tubo soldador de 1 pulgada instalados en una placa de 30x30 cm, tal como se muestra en la imagen a continuación:

Figura 1

Especímenes 3D realizado en Rhino software



1.2 Descripción del problema

La problemática que surge en relación con el peso de la superestructura de acero o aluminio de un barco se centra en la búsqueda de alternativas para reducir significativamente su peso total y su costo de mantenimiento. Una de estas alternativas es la adopción de una construcción mixta que podría disminuir el peso hasta en un 50% [3]. Sin embargo, el desafío clave radica en garantizar una fuerte adherencia de la fibra de vidrio (GFRP) a la estructura de acero o aluminio existente. La unión híbrida entre estos materiales, aunque prometedora en términos de peso y rendimiento, presenta desafíos técnicos significativos que deben superarse para garantizar la seguridad y la durabilidad de la superestructura, ya que se pueden presentar fisuras en la parte externa del recubrimiento, como se muestra en la Figura 2 a continuación:

Figura 2

Fallo interlaminar en la fibra de vidrio expuesta en superficie debido a la delaminación.



Nota. Fuente: Fabjet1. (2013). Delamination problem! can U help? Recuperado de <https://www.thehulltruth.com/boating-forum/529436-delamination-problem-can-u-help.html>

1.3**Justificación del problema**

La necesidad imperante de encontrar soluciones innovadoras para abordar la problemática del peso excesivo de las superestructuras de barcos construidos en acero o aluminio. La adopción de una construcción mixta, que permite reducir significativamente el peso en un margen de hasta un 50% [3], emerge como una alternativa promisoriosa en la búsqueda de embarcaciones más eficientes y económicamente viables. No obstante, el reto principal que enfrenta este enfoque es garantizar una sólida adherencia de la fibra de vidrio (GFRP) a la estructura preexistente de acero o aluminio. La unión híbrida, aunque ofrece ventajas innegables en términos de peso y rendimiento, conlleva importantes desafíos técnicos que deben ser superados para asegurar la seguridad y durabilidad de la superestructura. Dado el impacto potencial de esta solución en términos de ahorro de costos operativos, eficiencia energética y sostenibilidad, la justificación de este problema radica en su capacidad para

abordar los desafíos técnicos y económicos actuales que enfrenta la industria de la construcción naval.

Al realizar una inversión adicional en la construcción mixta que incluye la fibra de vidrio, respaldada por análisis de laboratorio adicionales, se abre la posibilidad de reducir significativamente el peso de la superestructura de los barcos y existe la ventaja de aumentar la capacidad de carga, combustible o pasajeros, además el costo de mantenimiento tanto en barcos de acero con construcción mixta se reduce notablemente ya que existe un comportamiento inerte con el acero que evita la corrosión galvánica. Esta mejora no solo se traduciría en un ahorro de costos operativos a largo plazo, sino que también permitiría a las empresas turísticas de yates ofrecer servicios más atractivos y competitivos. La capacidad de transportar más pasajeros o carga adicional podría ampliar el alcance de sus servicios y, en última instancia, aumentar sus ingresos y rentabilidad. Al equilibrar la inversión inicial con los beneficios a largo plazo, esta iniciativa podría tener un impacto positivo tanto en la eficiencia operativa como en la ventaja competitiva de las empresas en el sector.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Analizar y evaluar el fallo interlaminar en una unión híbrida tubular compuesta por acero negro y fibra de vidrio, a través de pruebas de tracción y flexión en paneles de 30x30 cm como unidades de estudio, con el propósito de proporcionar una base sólida para escalar los resultados de las pruebas a una superestructura completa de un buque, con la intención de reducir significativamente el peso total de las estructuras de los barcos y, en consecuencia, disminuir el consumo de energía, contribuyendo así a la sostenibilidad de la industria marítima.

1.4.2 Objetivos específicos

1.4.2.1. Creación del Modelo 3D. Desarrollar un modelo tridimensional preciso que represente una unión híbrida entre una estructura de acero tubular y GFRP, *este modelo se lo diseño en el software Rhinoceros 3D incorporando detalles geométricos y dimensionales. Con la finalidad de realizar un posterior análisis estructural en ACP ANSYS.*

1.4.2.2. Pruebas de Tracción y Flexión. Construir 10 probetas con una estructura tubular cubierta por paneles de GFRP, de estas probetas se van a ensayar 5 en tracción y 5 en flexión. Para obtener los resultados experimentales como son las fuerzas que soporta el material compuesto y las deformaciones que se van formando al ser sometidas a cargas cada una de las probetas. Además, en este objetivo se podrán visualizar con microscopía el fallo interlaminar.

1.4.2.3. Análisis en ANSYS. Realizar simulaciones teóricas en el software ACP ANSYS, esto se logra al ingresar las propiedades de cada material para crear las capas del panel superior e inferior, incluyendo la estructura tubular. Para evaluar el comportamiento de la unión bajo condiciones de carga, incluyendo tracción y flexión.

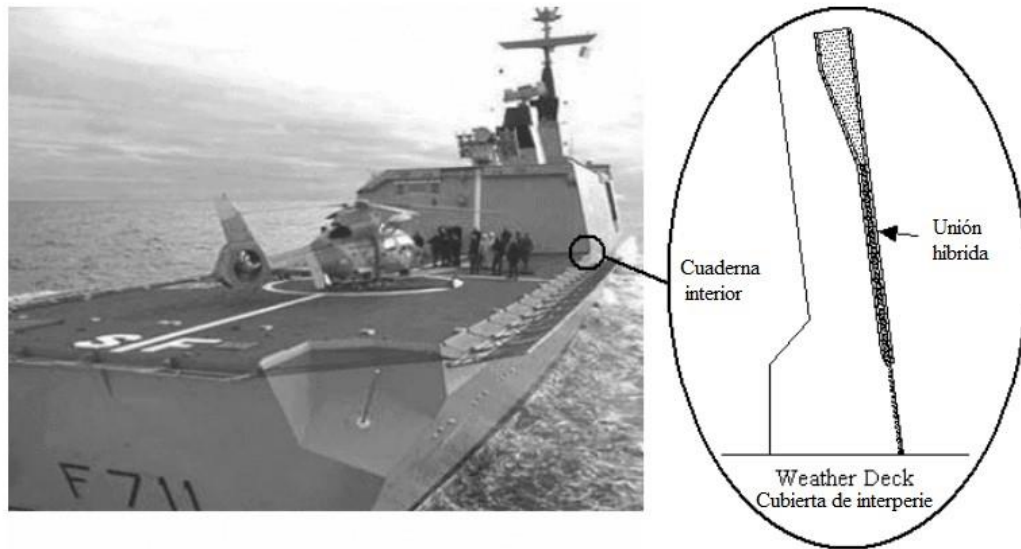
1.5 Marco teórico

En la búsqueda de soluciones para la construcción de superestructuras compuestas, se han realizado estudios desde la década de 1980. Un ejemplo destacado es la implementación de estas estructuras por la marina francesa en las Fragatas clase La Fayette, donde se incorporaron como hangares para helicópteros. Estos avances en la tecnología de unión y la estructura compuesta han sido sometidos a rigurosas pruebas de tensión, compresión y flexión lateral. Los resultados de estas pruebas revelaron importantes hallazgos, destacando la posibilidad de establecer conexiones adecuadas y subrayando la ventaja de utilizar uniones simétricas en lugar de asimétricas para mejorar significativamente las características de

resistencia y durabilidad de estas superestructuras. Estos estudios representan un paso importante en la evolución de la construcción de superestructuras compuestas, proporcionando valiosos conocimientos para futuros desarrollos en esta área [5].

Figura 3

Hangar para helicópteros en la fragata francesa clase La Fayette con muestra de unión híbrida



Nota. Imagen reproducida por cortesía de DCN. [5]

En Ecuador, la implementación de materiales compuestos en la construcción naval comenzó en 2004 con la transformación de un yate que originalmente tenía una superestructura de aluminio. Este enfoque innovador incluyó estructuras tubulares de acero negro para la construcción de superestructuras. El proceso se inició al modificar un yate de pasajeros, que previamente había sido diseñado con casco de acero negro y superestructura de aluminio, aumentando su longitud de 30.00 metros a 40.00 metros. Esta adaptación permitió la construcción de una superestructura de mayor dimensión con un peso menor. Como opción de construcción, se optó por utilizar capas de fibra de vidrio con un refuerzo tubular de acero. Este enfoque ha resultado en mejoras significativas en términos de peso y rendimiento en la construcción naval en Ecuador [6].

1.5.1. Materiales compuestos

Los laminados de fibra de vidrio en la construcción se benefician significativamente del uso fundamental de materiales compuestos. Estos incluyen Mat y Woven Roving impregnados con resina de poliéster, la cual está disponible en variantes ortoftálica e isoftálica. Para la estructura de fibra, se utiliza Mat de 450 gr/m², mientras que como capa de refuerzo ortogonal se emplea Woven Roving de 400 gr/m². [6].

Lloyd Register establece requisitos mínimos para las propiedades mecánicas de las fibras tipo E Mat utilizadas en laminados de fibra de vidrio con resina de poliéster. Estos requisitos varían según el tipo de tela de fibra de vidrio, siendo f_c la medida en gramos por metro cuadrado. [7].

Tabla 1

Propiedades mecánicas para telas tipo Mat [7]

Propiedades Mecánicas	N/mm²
Resistencia ultima de corte	$82 \cdot f_c + 40$
Módulo de corte	$(1.6 \cdot f_c + 3.0) \cdot 10^3$
Resistencia de flexión	$501 \cdot f_c^2 + 110$
Módulo de flexión	$(35 \cdot f_c^2 + 2.4) \cdot 10^3$
Resistencia de corte interlaminar	$24 - 12.8 \cdot f_c$ (min 15)
Resistencia de tensión	$202 \cdot f_c + 22$
Módulo de tensión	$(14 \cdot f_c + 4) \cdot 10^3$
Resistencia ultima de compresión	$152 \cdot f_c + 70$
Módulo de compresión	$(38 \cdot f_c - 6) \cdot 10^3$

Tabla 2*Propiedades mecánicas para telas tipo Woven Roving [7]*

Propiedades Mecánicas	N/mm²
Resistencia ultima de corte	$85.fc+28$
Medida de corte	$(1.69.fc+2.3) *10^3$
Resistencia ultima de flexión	$504.fc^2+110$
Medida de flexión	$(34.fc^2+1.9) *10^3$
Resistencia de corte interlaminar	$20-15.fc$ (min 15)
Resistencia ultima de tensión	$402.fc-10$
Medida de tensión	$(32.fc-0.5) *10^3$
Resistencia ultima de compresión	$154.fc+72$
Medida de compresión	$(41.fc-6) *10^3$

1.5.1.1. Cantidad sugerida de resina para la laminación de paneles, conforme se especifica a continuación.

Tabla 3*Reforzamiento mínimo de resina [8]*

Telas	Porcentaje de fibra	Porcentaje de resina
Resina Cobaltada	30%	70%
Mat 450	20%	80%
Woven Roving 400	55%	45%

Se aconseja un porcentaje de resina del 65% para el proceso de laminación de fibra de vidrio.

Las propiedades de los paneles compuestas dependen de:

- La limpieza y pulido de la superestructura.
- Porcentajes de resina y fibra a emplearse.
- Mezcla exacta de resina cobaltada, catalizador y estireno.
- Estado del clima preferible menor al 80%.

- El tiempo de secado debe ser de 7 días.

Se aconseja emplear láminas de fibra de vidrio para la laminación, siguiendo las normas de clasificación que limitan la aplicación a un máximo de dos capas simultáneas. En esta situación, se ha dispuesto Mat, WR, Mat, con la resina preparada entre las capas

1.5.1.2. El escantillado en fibra de vidrio se rige por fórmulas proporcionadas por las Sociedades Clasificadoras para la estructuración de barcos de casco único y cascos múltiples utilizando materiales compuestos. Al evaluar un panel y su refuerzo estructural asociado, se consideran parámetros como la deflexión, el contenido de fibra de vidrio y el esfuerzo del laminado. Además, se incorpora la restricción al esfuerzo de corte en el núcleo de los paneles.

Lloyd's Register ha establecido límites para los parámetros a evaluar. La deflexión se analiza mediante la relación de espaciamiento con respecto a la deflexión (span/deflexión), la cual debe ser de al menos 50 y, como máximo, 250. Esto varía según si el laminado es simple o sánduche. [8].

Los límites críticos del esfuerzo de flexión han sido empleados en conjunto con el concepto de capa crítica interlaminar. Estos parámetros han sido aplicados de manera integral entre el laminado y los refuerzos, estando plenamente vinculados al módulo de rigidez equivalente EI.

En el análisis de paneles y estructuras fabricadas con materiales de fibra de vidrio, se toman en cuenta los siguientes elementos.

- Las medidas del panel [a, b] son considerablemente superiores a su grosor [tf].
- Los esfuerzos conservan en un mismo plano.
- Con respecto a la dirección de las fibras, la composición se considera quasi-isotrópico.

- Las capas de fibra de vidrio debido a que tiene la misma dirección su ángulo son de 0 grados.
- En esta investigación, no se tomarán en cuenta las fluctuaciones de temperatura ni los efectos higroscópicos. [9].

1.5.2. Propiedades de la estructura Tubular

La superestructura del barco es diseñada con estructura tubular de 2'' y 1'' x 2mm de espesor, la cual es cubierta con fibra de vidrio. Para esto es necesario conocer las propiedades del material en la tabla siguiente.

Tabla 4

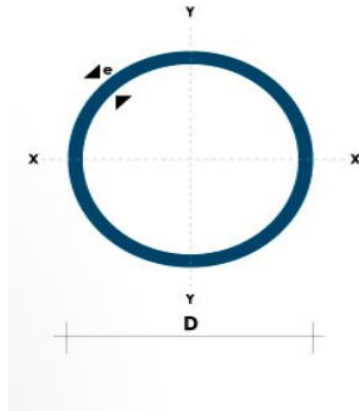
SAE 1008 Propiedades para el tubo de acero negro

Descripción		Unidades
Coefficiente de Poisson "v"	0,27-0,3	
Módulo de Young "E"	190-210	GPa
Densidad "ρ"	7,872	g/cm³
Alargamiento	0,2	mm
Resistencia a la tracción	340	MPa
Limite elástico	285	MPa

Nota. Fuente: Luz, G. (2020). SAE 1008 Propiedades (Mecánicas, Químicas y Clasificación) [Revisión 2022].

Figura 4

Propiedades Tubo Estructural Redondo Negro



(D) Diámetro	Espesor	Peso	Área	I	W	I
Pulgadas	mm	Kg/m	cm ²	cm ⁴	cm ³	cm ³
7/8"	1.50	0.77	0.98	0.53	0.47	0.73
1"	1.50	0.88	1.13	0.81	0.64	0.85
1 1/4"	1.50	1.12	1.43	1.63	1.03	1.07
1 1/2"	1.50	1.35	1.72	2.89	1.52	1.30
1 3/4"	1.50	1.59	2.02	4.67	2.10	1.52
2"	1.50	1.82	2.32	7.06	2.78	1.74
2 1/2"	1.50	2.29	2.92	14.05	4.42	2.19
3"	1.50	2.76	3.52	24.56	6.45	2.64
1"	2.00	1.15	1.47	1.01	0.80	0.83
1 1/4"	2.00	1.47	1.87	2.08	1.31	1.05
1 1/2"	2.00	1.78	2.27	3.71	1.95	1.29
1 3/4"	2.00	2.09	2.67	6.02	2.71	1.50
2"	2.00	2.41	3.07	9.14	3.60	1.73
2 1/2"	2.00	3.03	3.86	18.29	5.76	2.18
3"	2.00	3.66	4.66	32.11	8.43	2.62
2"	3.00	3.54	4.51	12.92	5.09	1.69
2 1/2"	3.00	4.48	5.70	26.15	8.24	2.14
3"	3.00	5.42	6.90	46.29	12.15	2.59

Nota. Fuente: Dipac, 2023. Tubo Estructural Redondo Negro. Recuperado de <https://dipacmanta.com/producto/tubos/tubo-estructural/tubo-estructural-redondo-negro/>

Estos factores se han utilizado a todos los materiales compuestos de la embarcación, y están directamente vinculados al módulo de rigidez equivalente, EI .

1.5.3. Conexión híbrida entre paneles compuestos y estructuras tubulares

Para calcular el módulo de rigidez equivalente, se suman los módulos de rigidez utilizados para formar la unión híbrida, que incluye el refuerzo tubular (EI_{Tubo}), la plancha que está junto al panel de fibra (EI_{PL}), las capas de fibra que están en contacto entre la estructura tubular y el panel "Boundary Bonding" (EI_B), y el laminado correspondiente del refuerzo tubular (EI_{LT}). La composición de los paneles dependerá variará según las dimensiones a analizada, sin tener en cuenta la contribución de los químicos para la acabado.

[6], Por lo que se expresa el equivalente de la siguiente manera $EI = EI_{tubo} + EI_{pl} + EI_b + EI_{lt}$.

Capítulo 2

2. Metodología

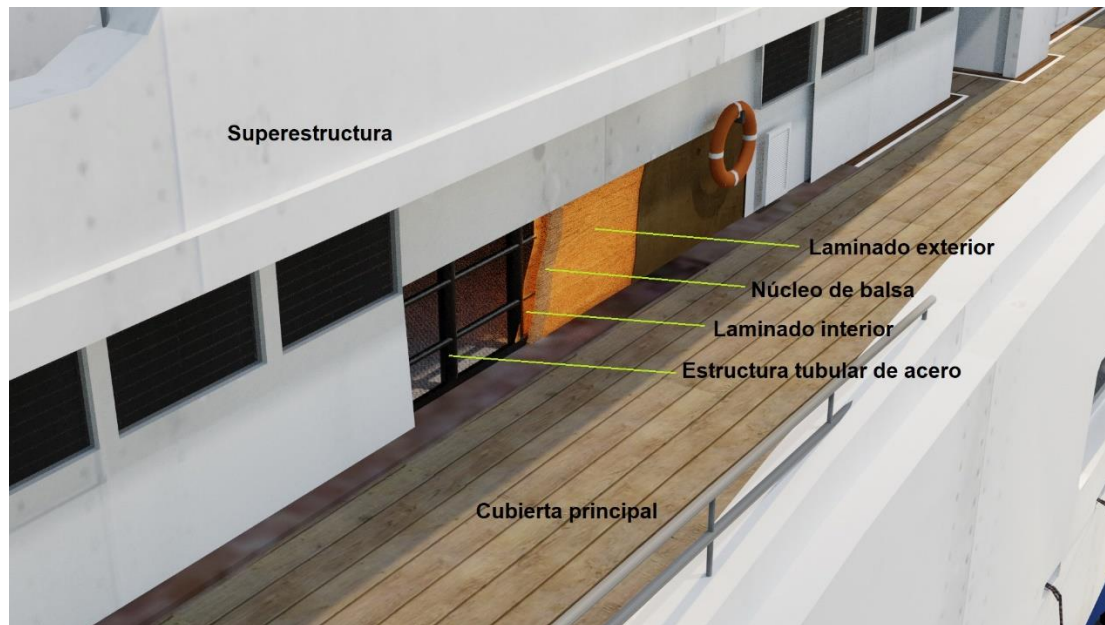
La metodología aplicada es la experimental y se centrará en la evaluación del fallo interlaminar entre la estructura tubular y la fibra de vidrio utilizando pruebas específicas. Se empleará un enfoque de ensayo de adherencia mediante técnicas de tracción y flexión de 3 puntas para determinar la resistencia de unión entre la estructura tubular y las capas de fibra de vidrio. Se prepararán especímenes compuestos por capas de fibra de vidrio adheridas a estructuras tubulares de geometría cruzada, utilizando como adhesivo la resina poliéster según las especificaciones del fabricante. Posteriormente, se llevarán a cabo pruebas mecánicas utilizando Máquinas de ensayo universales hidráulicas Serie UH-X/FX para tracción y flexión controlada por computadora para aplicar cargas gradualmente crecientes, a una velocidad de 2.5 mm por minuto de desplazamiento.

Las pruebas experimentales serán diseñadas y ejecutadas con el propósito de simular las condiciones extremas de movimientos del buque, así como las variaciones de presión ejercidas sobre la superestructura. Estas pruebas estarán meticulosamente estructuradas para emular con precisión las tensiones, movimientos y cargas que el buque podría enfrentar en condiciones extremas, permitiendo una evaluación exhaustiva y representativa de la respuesta estructural ante escenarios de alta exigencia y presión. Además, se emplearán técnicas de microscopía para analizar visualmente la morfología de la falla interlaminar, proporcionando una comprensión detallada de los modos de fallo y la propagación de grietas en la interfaz entre la estructura tubular y la fibra de vidrio.

La unión híbrida propuesta se sitúa entre la cubierta principal y la superestructura, presentándose como una alternativa a la construcción convencional del hangar en la fragata francesa clase La Fayette [5]. Este sistema de unión híbrida se compone de un tubo vertical principal y tubos soldados horizontales, como se ilustra en la Figura 5 adjunta.

Figura 5

Localización de la unión híbrida



Nota. Fuente: Propia

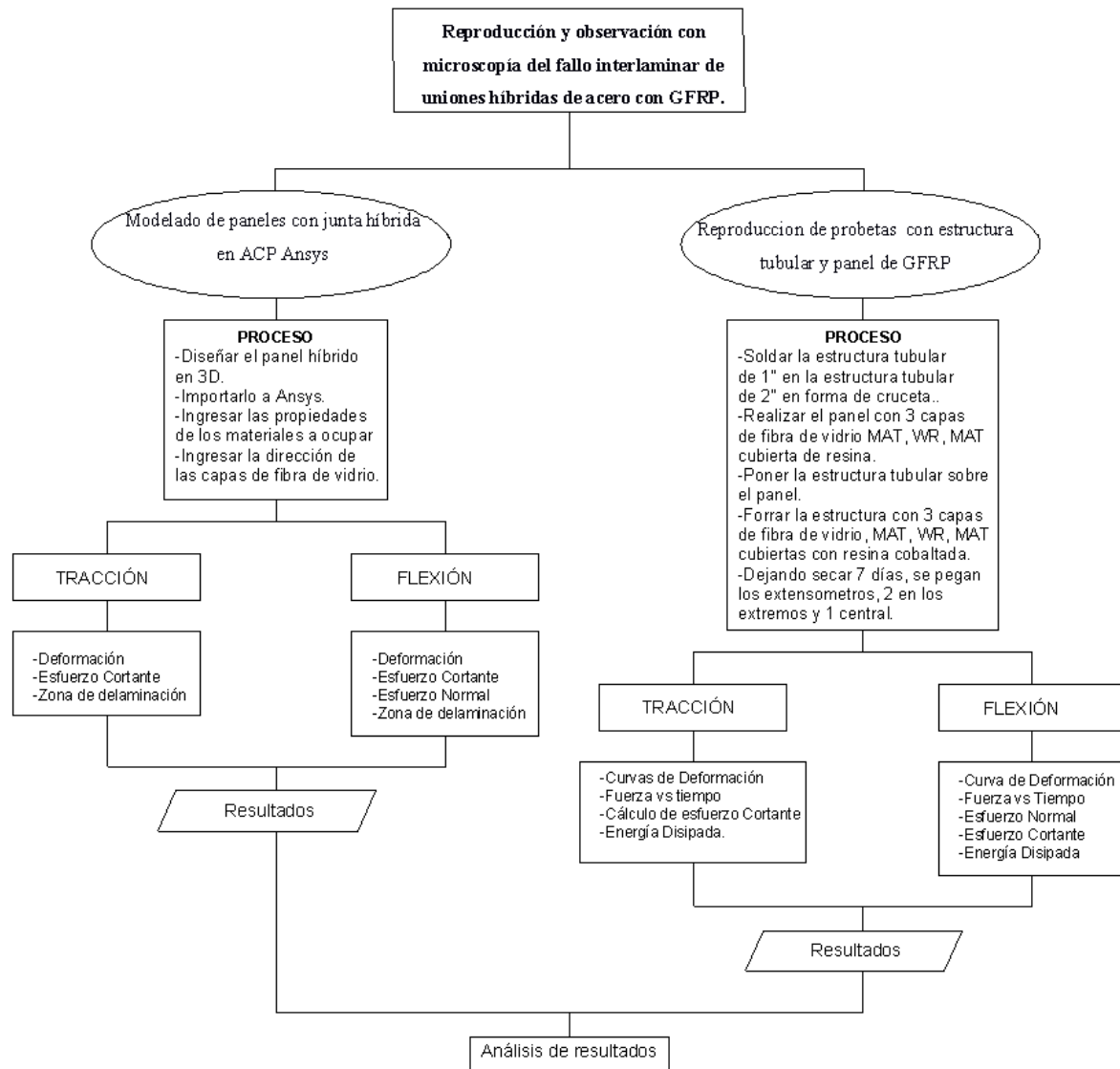
En el Flujograma de la Figura 6, se da a conocer el proceso de la reproducción de probetas y del modelo matemático empleado para comparar y analizar los resultados.

En la gráfica de Fuerza vs Tiempo se observará en qué momento la zona elástica cambia a la zona plástica, por lo que hará el primer salto con pérdida de energía.

Las probetas de tracción y Flexión se modelarán en ACP ANSYS. Se comparará los resultados obtenidos para realizar el Análisis.

Figura 6

Proceso para conseguir los resultados de la unión híbrida



Nota. Fuente: Autor propio

2.1. Espécimen

Para reproducir el panel híbrido de la superestructura de un buque, se realizó un modelo a escala con estructura tubular de acero de 2 mm de espesor, cubierta por capas de fibra de vidrio que se menciona a continuación:

2.2. Materiales

- Resina Cobaltada
- Estireno
- Catalizador
- Fibra de vidrio Mat 450
- Fibra de vidrio Woven Roving 400
- Cera Desmoldante
- Alcohol Desmoldante
- Plywood

2.3. Proceso de fabricación de probetas

Se creó la estructura tubular la cual está compuesta por un tubo de 2 pulgadas de Diámetro y 2mm de espesor y transversalmente se soldó un tubo de 1 pulgada de diámetro por 2mm de espesor. El largo de esta estructura tubular es de 30 cm, como se aprecia en la Figura 7 a.

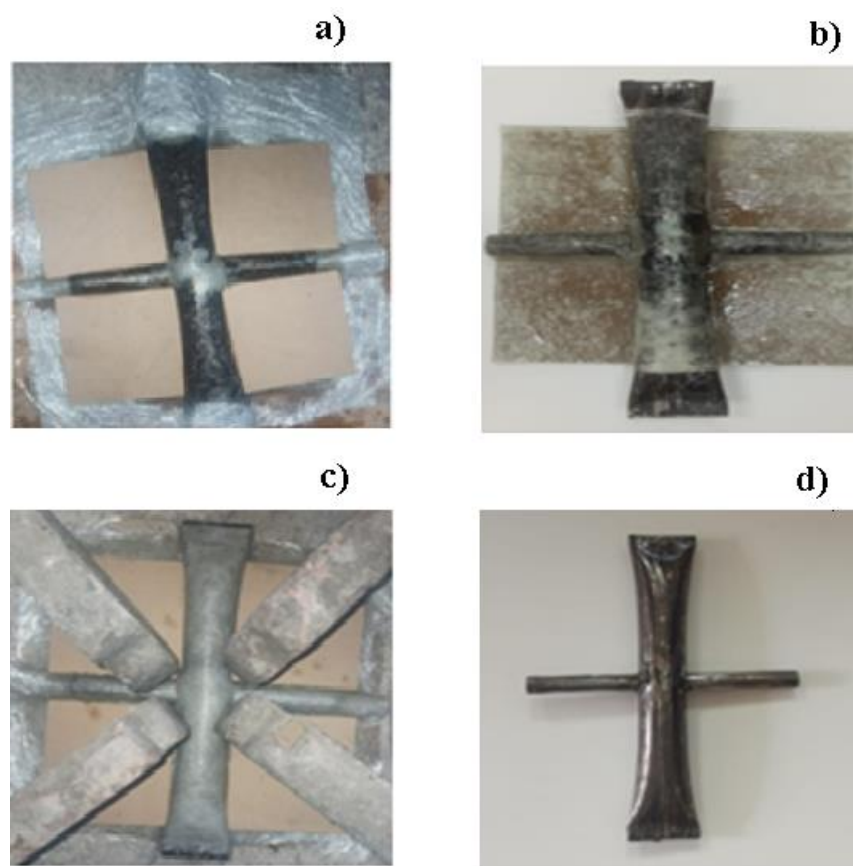
A continuación, se cortó una plancha de plywood de 30 x 30 cm, sobre esta se puso la resina cobaltada mezclada con el catalizador. Se puso una capa de fibra de vidrio Mat 400 sobre la resina y se cubrió con más resina preparada, con el mismo procedimiento se colocó la capa de fibra Woven Roving 400 y sobre esta la Mat 450.

Finalmente se cubrió la estructura tubular con resina y sobre esta se tendió nuevamente el pliego de fibra de vidrio Mat 450, luego se roció resina con la nueva tela de fibra de vidrio Woven Roving 400 y finalmente se añadió el pliego de fibra de vidrio Mat 400 cubriendo con más resina preparada, como se aprecia en la Figura 7 b.

Para que tenga una buena consistencia el panel híbrido, se puso planchas de plywood enceradas y con alcohol desmoldante para presionar la fibra de vidrio, como se mira en la Figura 7 c. Dejando secar 7 días se desmonto las placas de plywood, como se observa en la Figura 7 d. Se pegó 3 extensómetros sobre la fibra de vidrio de la estructura tubular de 2 pulgadas para analizar el comportamiento del panel híbrido.

Figura 7

Proceso de fabricación de probetas



Nota. Fuente: Autor propio





















2.4. ANSYS ACP, elementos finitos análisis

Se utilizará la herramienta de ANSYS ACP, por sus siglas Advanced Composite PrepPost, que proporciona un entorno integral para la creación, análisis y optimización de

estructuras compuestas, permitiendo a los ingenieros evaluar con precisión el comportamiento de materiales avanzados como fibra de vidrio, laminados y otros compuestos. Facilita la modelización detallada de capas y geometrías complejas, así como la simulación de cargas y condiciones de contorno realistas. Al integrar capacidades avanzadas de análisis estructural con herramientas específicas para materiales compuestos, permitiendo a los ingenieros llevar a cabo estudios detallados de tensiones, deformaciones, y fallos potenciales en estructuras compuestas, lo que resulta crucial para el diseño y la optimización de productos en una amplia gama de aplicaciones industriales.

Figura 8

Materiales utilizados en ANSYS software

Outline of Schematic D2, F2: Engineering Data				
	A	B	C	D
1	Contents of Engineering Data			Source
2	Material			
3	 Black steel			Granta_Design_Typical_Materials.xml
4	 block flexion test			General_Materials.xml
5	 Mat 450			Composite_Materials.xml
6	 MDF			Granta_Design_Typical_Materials.xml
7	 Resin Polyester			Composite_Materials.xml
8	 Rooving 400			Composite_Materials.xml

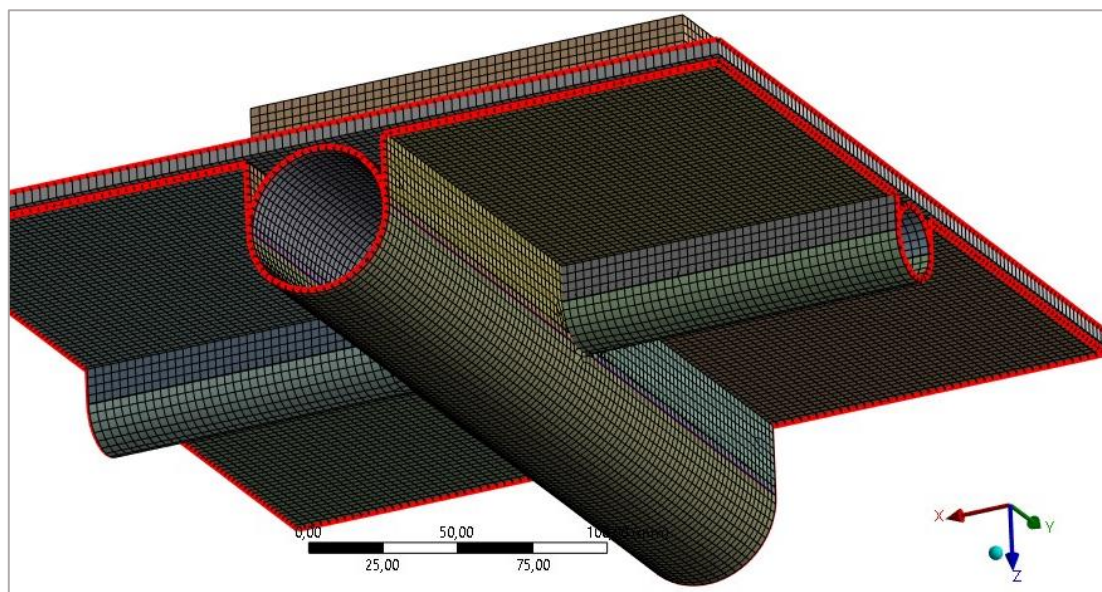
Nota. Fuente: Propia

Los propiedades de los materiales se mostrarán en Apéndice A desde la Figura 49.

El mallado es uno de los factores más importantes por lo que para ello es importante establecer en la ventana de “mechanical”, como se muestra en la Figura 9, las conexiones de contacto entre superficies o elementos separados, mallado general y mallado manual en caso de que el sistema no detecte. De esta manera al momento de hacer la prueba de flexión exista el despazamiento por contacto y no haya ninguna condición de penetración.

Figura 9

Mallado del modelo 3D en ANSYS

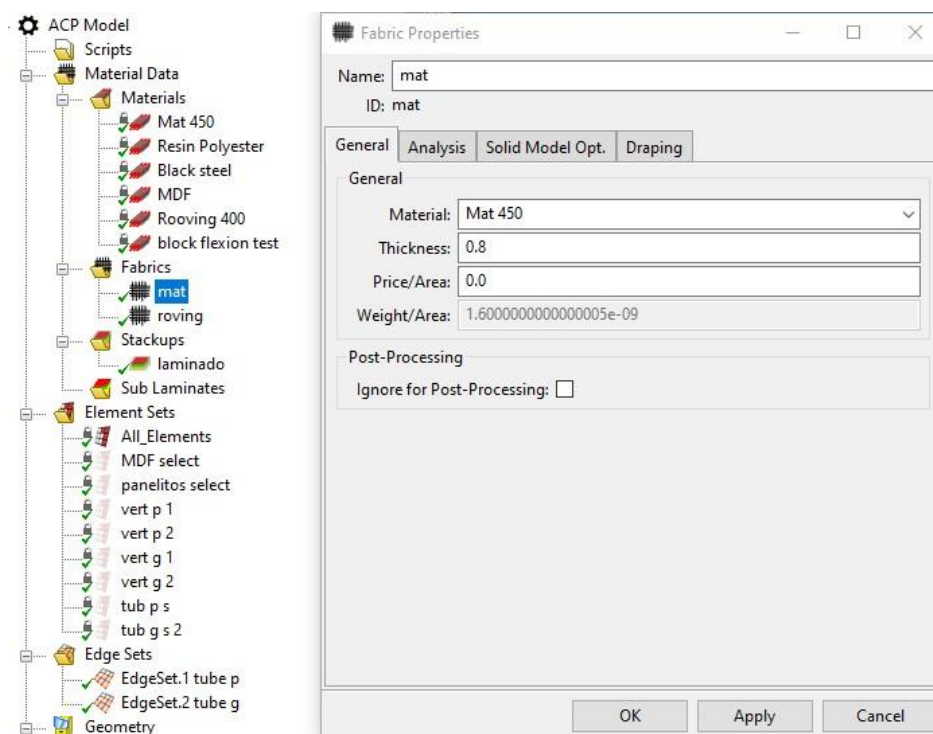


Nota. Fuente: Propia

La ventana de ACP pre, presenta ciertos elementos que son precargados una vez que se hayan configurado los materiales, el modelo y el mallado, por lo que lo más importante de configurar en esta nueva etapa es el espesor de cada capa tal como se muestra en la Figura 10.

Figura 10

Establecimiento del espesor de cada capa de laminado

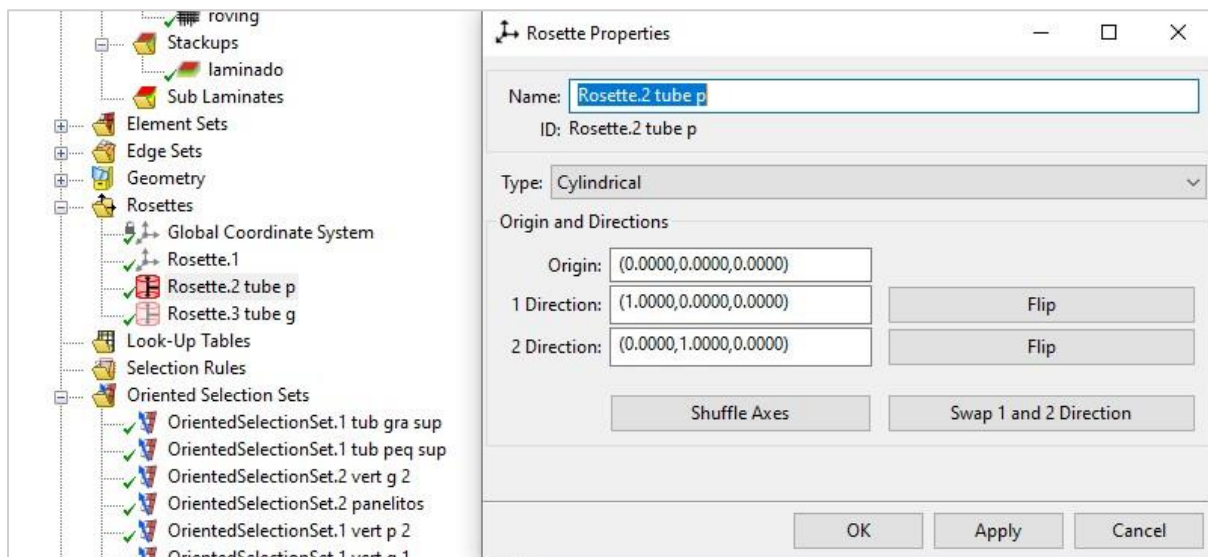


Nota. Fuente: Propia.

Otra de las características de laminado importante es el sistema de coordenadas de cada geometría, ya que el sistema no puede detectar automáticamente las formas de laminado de cada elemento por lo que se establece a los tubos una sección cilíndrica de laminado, y los otros elementos el sistema normal.

Figura 11

Establecimiento de referencia de cada geometría



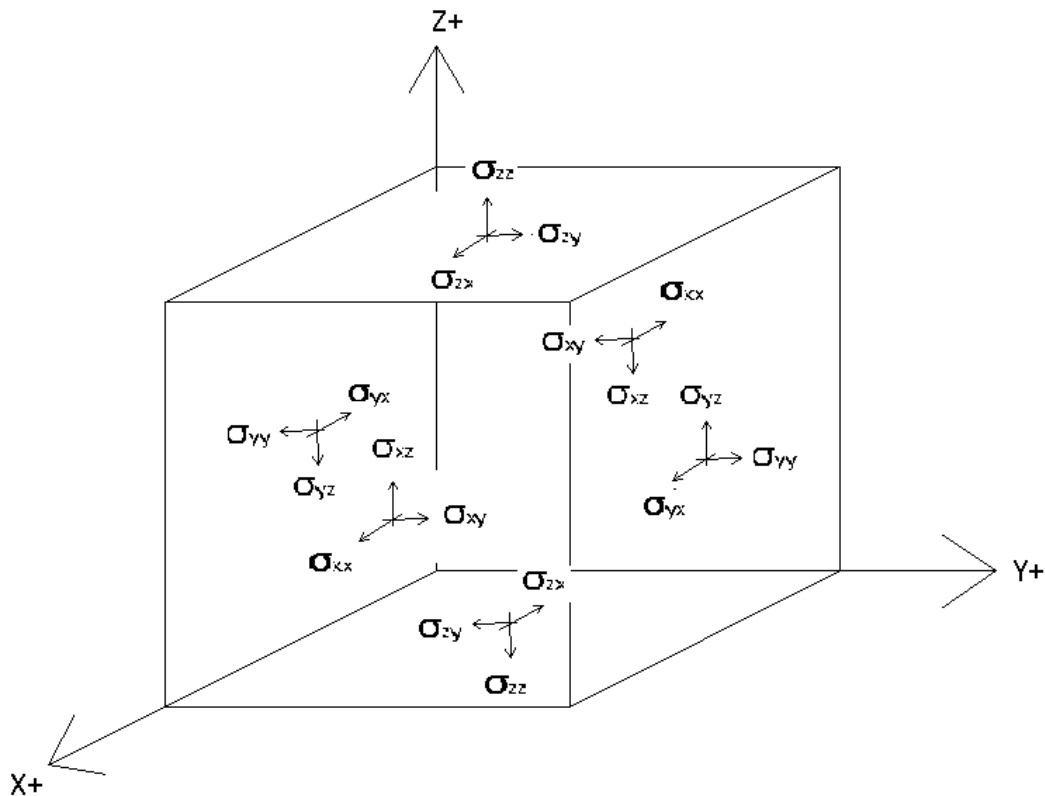
Nota. Fuente: Propia.

2.5. Análisis teórico.

Para la parte teórica de formulación se tomó en consideración un cuerpo elástico de forma general. El material es continuo, omitiendo su estructura cristalina y los límites de grano. Además, se asumió que el continuo era homogéneo, lo que significa que las propiedades del material no variaban con respecto a las coordenadas espaciales. Luego, se eligió un punto material en cualquier parte del interior del cuerpo elástico. Se utilizó un sistema de referencia cartesiano con ejes x , y , y z , como se ilustra en la Figura 12, y se asoció un paralelepípedo rectangular al punto material, denominándolo un "elemento diferencial". Este elemento de control se definió como infinitesimal en comparación con el tamaño del cuerpo elástico, pero considerable en relación con los elementos de la estructura molecular, para poder tratar el material como continuo [2][10].

Figura 12

Elemento diferencial en un cuerpo elástico que muestra una dirección positiva de las tensiones



Nota. Fuente: Vinson, J. (2005). Plate and Panel Structures of Isotropic, Composite and Piezoelectric Materials.

Los desplazamientos (u, v, w) están en dirección paralela a los ejes coordenados (x, y, z) respectivamente.

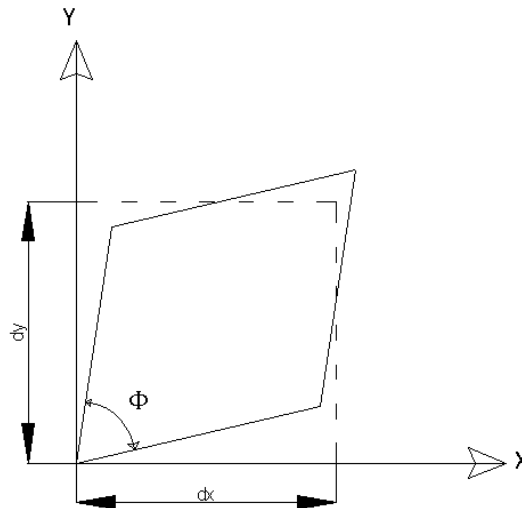
Las deformaciones se producen en la misma dirección que cada uno de los ejes respectivos y representan el cambio en las dimensiones del volumen de control en esa dirección, causado por las tensiones normales que actúan en todas las superficies del volumen de control, y se calcula mediante la ecuación (2.2). Por otro lado, las deformaciones cortantes pueden definirse según lo ilustra la Figura 13 [2] [10].

$$\gamma_{xy} = \frac{\pi}{2} - \Phi \quad (2.1)$$

$$\epsilon_{xy} = \frac{1}{2} \gamma_{xy} \quad (2.2)$$

Figura 13

Cortante de un elemento diferencial.



Nota. Fuente: Propia

La formulación de las ecuaciones esenciales de elasticidad para un elemento diferencial de un cuerpo elástico en un sistema de referencia cartesiano requería tres componentes esenciales. Se especifica que el material debe ser isotrópico, lo que implica que sus propiedades mecánicas y físicas no varían en función de la orientación. Dentro del contexto del modelado matemático de un material isotrópico, se hacía uso del módulo de elasticidad, identificado como E , para representar la constante de proporcionalidad entre una tensión normal y la deformación resultante debida a las pruebas de tracción. En términos de la mecánica de materiales, el módulo de corte, denominado G como se muestra en la ecuación (2.3), se utilizaba para describir la relación entre el esfuerzo cortante y el ángulo resultante γ_{ij} en un estado de corte puro. Además, se consideraba fundamental definir el índice de Poisson, expresado como ν , el cual se calculaba como la relación entre la deformación negativa en la

dirección j y la deformación en la dirección i , causada por una tensión en la dirección i , σ_{ii} . Este índice, aplicable a todos los materiales isotrópicos, que siempre tenía un valor positivo y se encontraba en el rango de $0 \leq \nu \leq 0.5$. [2][10]

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (2.3)$$

Realizando la sumatoria de fuerzas en cada dirección se obtiene.

$$\sigma_{ki,k} + F_i \quad i, k = x, y, z \quad (2.4)$$

$$\frac{d\sigma_x}{dx} + \frac{d\sigma_{yx}}{dy} + \frac{d\sigma_{zx}}{dz} + P_x A = 0 \quad (2.5)$$

$$\frac{d\sigma_{xy}}{dx} + \frac{d\sigma_y}{dy} + \frac{d\sigma_{zy}}{dz} + P_y A = 0 \quad (2.6)$$

$$\frac{d\sigma_{xz}}{dx} + \frac{d\sigma_{yz}}{dy} + \frac{d\sigma_z}{dz} + P_z A = 0 \quad (2.7)$$

Se asume un comportamiento lineal del laminado estructural, en conformidad con la Ley de Hooke en cada dirección del plano, como se muestra en las ecuaciones (2.5), (2.6 y (2.7). Además, se desestimaban las deformaciones transversales debidas a esfuerzos cortantes (γ_{xy} y γ_{yz}) y se suponía que las deformaciones variaban de manera lineal a lo largo del espesor, observar la ecuación (2.8), (2.9) y (2.10). En esta perspectiva, la deformación unitaria en la dirección vertical (ϵ_z) se consideraba insignificante en comparación con las elongaciones unitarias en los planos horizontales (ϵ_x) y (ϵ_y) [2][10].

$$\epsilon_x = \frac{du}{dx} \quad , \quad \epsilon_y = \frac{dv}{dy} \quad (2.8)$$

$$\epsilon_z = \frac{dw}{dz} \quad , \quad \epsilon_{xy} = \frac{1}{2} \left(\frac{du}{dy} + \frac{dv}{dx} \right) \quad (2.9)$$

$$\epsilon_{xz} = \frac{1}{2} \left(\frac{du}{dz} + \frac{dw}{dx} \right) \quad , \quad \epsilon_{yz} = \frac{1}{2} \left(\frac{dv}{dz} + \frac{dw}{dy} \right) \quad (2.10)$$

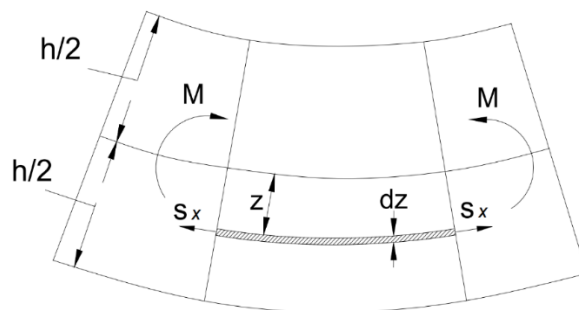
$$\begin{pmatrix} \epsilon_{xx} \\ \epsilon_{yy} \\ \epsilon_{zz} \\ \epsilon_{yz} \\ \epsilon_{zx} \\ \epsilon_{xy} \end{pmatrix} = \frac{1}{E} \begin{pmatrix} 1 & -\nu & -\nu & 0 & 0 & 0 \\ -\nu & 1 & -\nu & 0 & 0 & 0 \\ -\nu & -\nu & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1+\nu & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1+\nu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1+\nu \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} \\ \sigma_{xy} \end{pmatrix} \quad (2.11)$$

De manera compacta se representa las deformaciones en todas las direcciones mediante la matriz (2.11), en función del coeficiente de poisson y del esfuerzo.

Un panel, como se muestra en la Figura 14, no solo esta sometido a cargas coplanares sino tambien a cargas normales.

Figura 14

Elemento diferencial de un cuerpo en flexión



Nota. Fuente: Propia

Las ecuaciones de equilibrio para un panel sometido a carga normal corresponden a [2][10]:

$$\frac{dM_x}{dx} + \frac{dM_{xy}}{dy} - Q_x = 0 \quad (2.12)$$

$$\frac{dM_{xy}}{dx} + \frac{dM_x}{dy} - Q_y = 0 \quad (2.13)$$

$$\frac{dQ_x}{dx} + \frac{dQ_y}{dy} - p(x, y) = 0 \quad (2.14)$$

Donde Q es el esfuerzo Cortante en las diferentes direcciones.

$$Q_i = \int_{-\frac{h}{2}}^{+\frac{h}{2}} \sigma_{xz} dz \quad i = x, y \quad (2.15)$$

Reemplazando las ecuaciones (2.12), (2.13), (2.14), (2.15) obtenemos de manera compacta la siguiente ecuación.

$$\frac{d^2 M_x}{dx^2} + 2 \frac{d^2 M_{xy}}{dx dy} + \frac{d^2 M_y}{dy^2} = -p(x, y) \quad (2.16)$$

Reescribiendo la ecuación (2.16), en función de la deflexión del panel w .

$$D1 \frac{d^4 w}{dx^4} + 2D3 \frac{d^4 w}{dx^2 dy^2} + D2 \frac{d^4 w}{dy^4} = p(x, y) \quad (2.17)$$

$$D11 = D1 \quad (D12 + 2D66) = D3$$

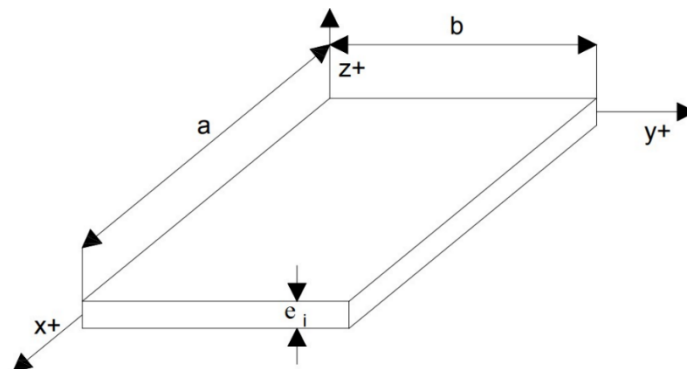
$$D_{i,j} = \frac{h^3 \cdot E_{i,j}}{12 \cdot (1 - \nu^3)} \quad (2.18)$$

2.5.1. Análisis de laminado

En la Figura 15 se representa el panel que se sometió a cargas para observar las deformaciones en las distintas direcciones. [2][10].

Figura 15

Panel típico rectangular para laminados



Nota. Fuente: Propia

Las fórmulas para el esfuerzo cortante Q son las siguientes:

$$Q_{11} = \frac{E_{11}}{(1-\nu_{12}\nu_{21})} \quad (2.19)$$

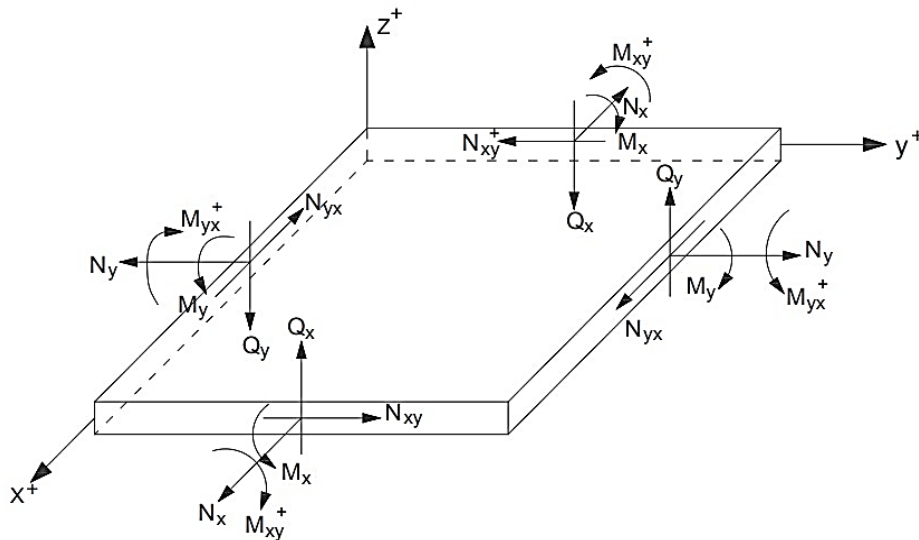
$$Q_{22} = \frac{E_{22}}{(1-\nu_{12}\nu_{21})} \quad (2.20)$$

$$Q_{12} = Q_{66} = Q_{21} = \frac{\nu_{21}E_{11}}{(1-\nu_{12}\nu_{21})} = \frac{\nu_{12}E_{22}}{(1-\nu_{12}\nu_{21})} \quad (2.21)$$

Tomando como referencia una de las capas que conforma el laminado, como se muestra en la Figura 16, que está sometida a tensiones N_{ij} , tensiones de corte Q_i y a pares de momentos M_{ij} se tiene las siguientes ecuaciones.

Figura 16

Esquema de cortante y momento flector



Nota. Fuente: Propia

$$\frac{d\sigma_x}{dx} + \frac{d\sigma_{yx}}{dy} + \frac{d\sigma_{zx}}{dz} + N_x = 0 \quad (2.22)$$

$$\frac{d\sigma_{xy}}{dx} + \frac{d\sigma_y}{dy} + \frac{d\sigma_{zy}}{dz} + N_y = 0 \quad (2.23)$$

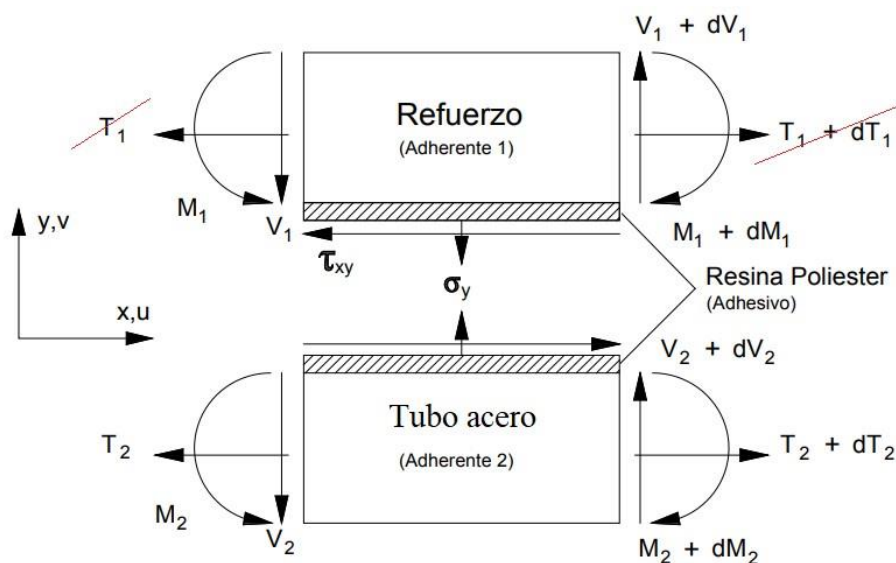
$$\frac{d\sigma_{xz}}{dx} + \frac{d\sigma_{yz}}{dy} + \frac{d\sigma_z}{dz} + N_z = 0 \quad (2.24)$$

Los refuerzos en un panel se conectan mediante una resina de poliéster actuando como adhesivo. Para este análisis, los esfuerzos en entre las láminas, tanto de corte como normales,

se han diseñado siguiendo la metodología descrita por Bigwood y Crocombe [11], modificado al aplicar fuerzas solamente en el adherente 2. Además, se considera un comportamiento lineal de los adherentes en los cálculos de esfuerzos como se muestra en la ecuaciones (2.22),(2.23) y (2.24). La junta entre la estructura y a unión híbrida se abordará utilizando la teoría de elasticidad y se asume que está compuesta por materiales isotrópicos, permitiendo variaciones en el espesor de los adherentes. Un diagrama ilustrativo de la junta entre la estructura y a unión híbrida se presenta en la Figura 17.

Figura 17

Diagrama de unión entre adherentes y adhesivo



Nota. Fuente: Propia

2.5.2. Representación matemática del desplazamiento para el esfuerzo normal

Considerando que el cambio de esfuerzo de corte sobre la unión es insignificante como se muestra en la ecuación (2.25), [2][10].

$$\frac{d^4 \sigma_y}{dx^4} + 4K_5^4 \sigma_y = 0 \quad (2.25)$$

Donde la constante K se encuentra mediante la siguiente ecuación (2.26):

$$K_5^4 = \frac{E_a}{4.t} \left(\frac{1}{D_1} + \frac{1}{D_2} \right) \quad (2.26)$$

Utilizando las siguientes constantes que satisface el cálculo de esfuerzo normal.

$$\beta_1 = \frac{12 E_a (1-\nu^2)}{E_1 . h_1^3 . t} \quad (2.27)$$

Con respecto a las fórmulas anterior ecuación (2.27), se ha obtenido los máximos esfuerzos normales Cortante y Momento.

$$\sigma_V = \frac{-2^{0.5} . \beta_1 . V}{(B_1 . B_2)^{0.5}} \quad (2.28)$$

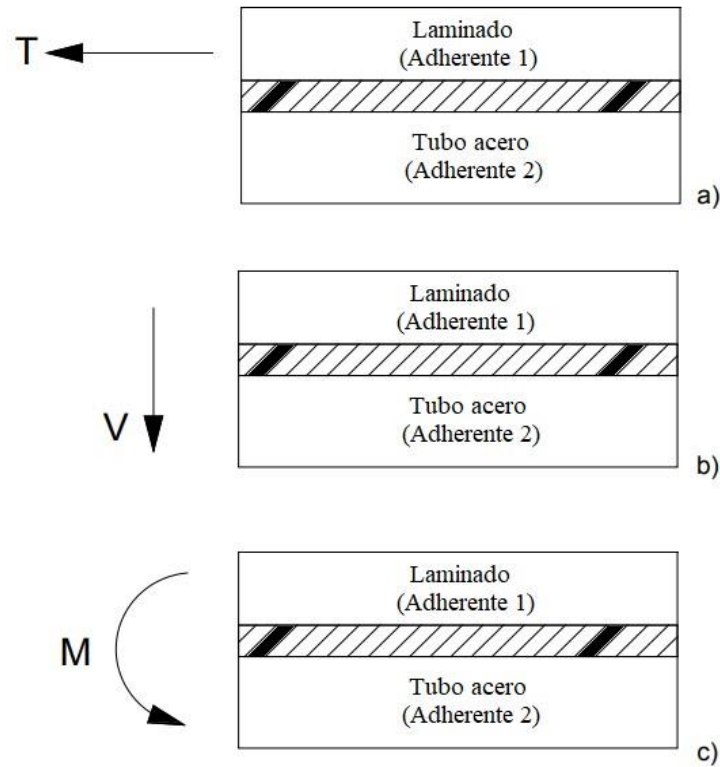
$$\sigma_M = \frac{-\beta_1 . M}{(B_1 . B_2)^{0.5}} \quad (2.29)$$

2.5.3. Ecuaciones de Movimiento para el esfuerzo de corte

Se ha desarrollado una formulación simplificada para el análisis del esfuerzo de corte como se muestra en la Figura 18, fundamentada en la premisa de que la alteración del esfuerzo normal en el panel compuesto [2][10].

Figura 18

Diseño de cargas aplicadas para examinar la tensión de corte en un adhesivo, a) Imposición de tensión, b) Imposición de corte, c) Aplicación de momento



Nota. Fuente: Propia

Basándose en la ecuación (2.30) del esfuerzo normal sobre el panel compuesto.

$$\frac{d^3 \tau_{xy}}{dx^3} - k_6^2 \cdot \frac{d\tau_{xy}}{dx} = 0 \quad (2.30)$$

$$k_6^2 = \frac{4Ga}{t} \left(\frac{1-\nu_1^2}{E_1 \cdot h_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2 \cdot h_2} \right) \quad (2.31)$$

Usamos los siguientes cumplimientos para aproximar el esfuerzo de corte.

$$\alpha_1 = \frac{G_a(1-\nu_1^2)}{E_1 \cdot h_1 \cdot t} \quad (2.32)$$

$$\alpha_2 = \frac{G_a(1-\nu_2^2)}{E_2 \cdot h_2 \cdot t} \quad (2.33)$$

Con esto se ha obtenido la formulación para los máximos esfuerzos de corte como se describe en las ecuaciones (2.34), (2.35) y (2.36).

$$\tau_T = \frac{-\alpha_1 T}{2.(\alpha_1 + \alpha_2)^{0.5}} \quad (2.34)$$

$$\tau_V = \frac{3.V}{4.h_1} \quad (2.35)$$

$$\tau_M = \frac{3.\alpha_1.M}{h_1.(\alpha_1 + \alpha_2)^{0.5}} \quad (2.36)$$

El grosor de una capa del laminado se calcula utilizando la siguiente ecuación. (2.37).

$$t_i = \frac{m_{Fi} \cdot \left[\frac{\xi_{Fi}}{f_{ci}} - (\xi_{Fi} - \xi_{Ri}) \right]}{1000 \cdot \xi_{Fi} - \xi_{Ri}} \quad (2.37)$$

m_{Fi} = Masa por unidad de área [g/m^2]

ξ_{Fi} = es la gravedad específica de la capa de fibra.

ξ_{Ri} = es la gravedad específica de la resina.

f_{ci} = el contenido de fibra de la capa individual.

La reacción de tensión para un análisis macroestructural se estima con la ecuación (2.38).

$$E_{tps} = \frac{\sum E_{ti} t_i}{\sum t_i} \quad (2.38)$$

Ahora para calcular el eje neutro X_s mostrado en la ecuación (2.39), desde la línea base asumida en mm.

$$X_s = \frac{\sum E_{ti} \cdot t_i \cdot X_i}{\sum E_{ti} \cdot t_i} \quad (2.39)$$

Donde X_i es el eje neutro de cada lamina del panel compuesto.

2.5.4. Composición del panel compuesto.

2.5.4.1. Capa crítica Se analiza la relación entre el esfuerzo de flexión inducido en cada capa del laminado y el esfuerzo extremo, como se muestra en la ecuación. (2.40), garantizando que esta proporción no exceda el factor de límite de esfuerzo predefinido. [2][10].

$$\sigma_{ti} = \frac{E_{ti} \cdot y_i \cdot M_i}{\sum E_{ti} \cdot I_i} \quad (2.40)$$

σ_{ti} = Esfuerzo producido en cada lamina en [N/mm²]

E_{ti} = Valor absoluto de la elasticidad de cada lamina respecto al eje de rotación [N/mm²].

Y_i = Dimension entre el eje de rotacion y la frontera de la capa de fibra [m].

M_i = Momento de flexión [N-m].

EI = Módulo de rigidez del material compuesto.

$$M_i = \frac{k \cdot p \cdot b}{12} \quad (2.41)$$

$$k = \frac{\gamma^3 + 1}{\gamma + 1} \quad k = \frac{b_w}{b}$$

p = presión de diseño [KN/m²]

b = Dimensión horizontal del panel en[m]

b_w = Grosor del panel [m]

2.5.4.2. Deflexión.

Se va a usar la siguiente ecuación.

$$\delta = \frac{p \cdot b}{8} \cdot \left(\frac{b \cdot k_{db}}{48 \cdot D_s} + \frac{K_{ds}}{G \cdot t_c} \right) * 10^{-3} \quad (2.42)$$

$$k_{db} = 1.5 - \frac{1}{A_R} \quad k_{ds} = 1.2 - \frac{0.6}{A_R}$$

$$D_s = \frac{E_{pi} \cdot t_{int} - E_{po} \cdot t_o}{E_{pi} \cdot t_{int} + E_{po} \cdot t_o} (t_c + t_s) \quad (2.43)$$

D_s = Rigidez a la flexión del panel en N-mm

K_{db} = Factor del momento de flexión.

K_{ds} = Factor de esfuerzo cortante.

A_r = Relación de área del material compuesto.

G = Módulo de corte del núcleo en N/mm^2

T_c = Espesor del núcleo [mm]

T_{int} t_o = espesor interior y exterior del panel en [mm]

E_{pi} y E_{po} : Módulo de elasticidad del laminado interior y exterior.

2.5.5. Escantillado por capa de fibra de vidrio

Para escantillonar debe cumplir los parámetros de deflexión t esfuerzo por cada capa, la cual se calcula con la siguiente ecuación [2][10].

$$\zeta_s = \frac{\delta s \cdot l e^4}{(EI)_s} * 10^5 \quad (2.44)$$

Donde la ecuación (2.44) se describe mediante las siguientes variables: ζ_s es la deflexión de la lámina de FGRP, s es el distancia entre las estructuras tubulares, le es la dimension entre los lados libres, δs coeficiente por esfuerzo de corte y EI es el módulo de rigidez equivalente.

Tomando en cuenta las reglas de clasificación Lloyd's Register [7].

$$\frac{le}{\zeta_s} > \text{valores de Lloyd's}$$

Utilizando la ecuación de capa critica (1.4.1) siendo esta un momento flector denotado con la siguiente ecuación.

$$M_s = \frac{s \cdot l e \cdot p}{12} \quad (2.45)$$

Capítulo 3

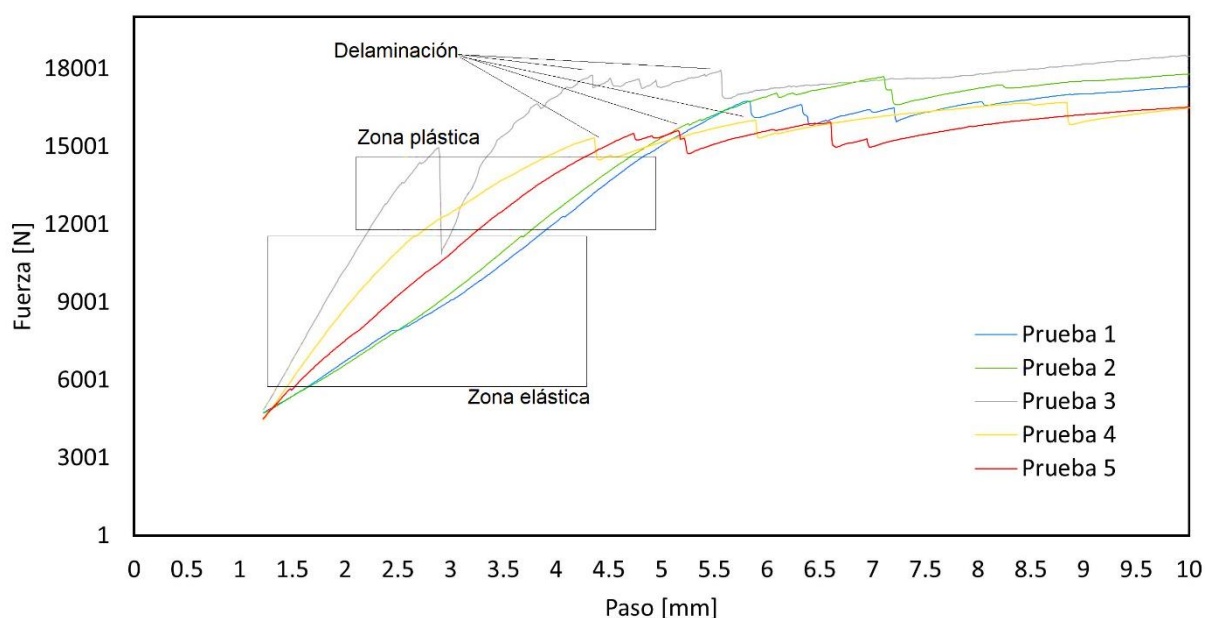
3. Resultados y análisis

3.1. Pruebas de flexión

En la Figura 19, se identificaron tres zonas distintas que reflejan variaciones significativas en la respuesta estructural del material. En la primera zona, se observa una región de comportamiento lineal. La segunda zona, se detecta el inicio de delaminación y fisuras en las fibras del laminado de fibra de vidrio. Esta transición marca el límite de la capacidad de carga sostenible. Finalmente, una tercera zona muestra una disminución más pronunciada en la fuerza de fluencia a medida que la delaminación y las fisuras se propagan, llevando al material a un punto crítico de falla

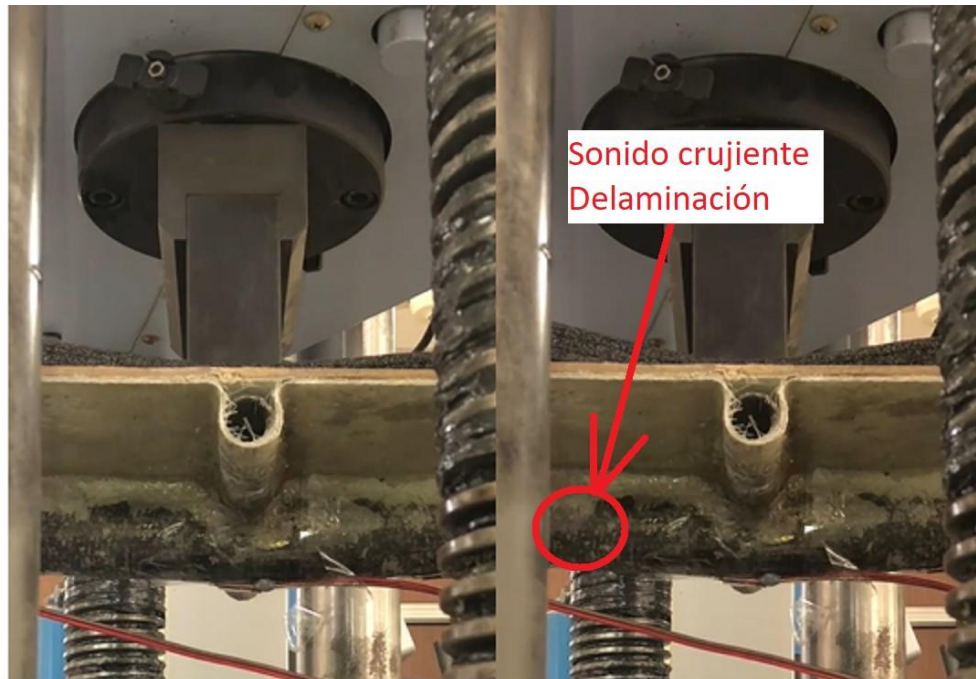
Figura 19

Resultados de pruebas de flexión, Fuerza versus desplazamiento de aplastamiento



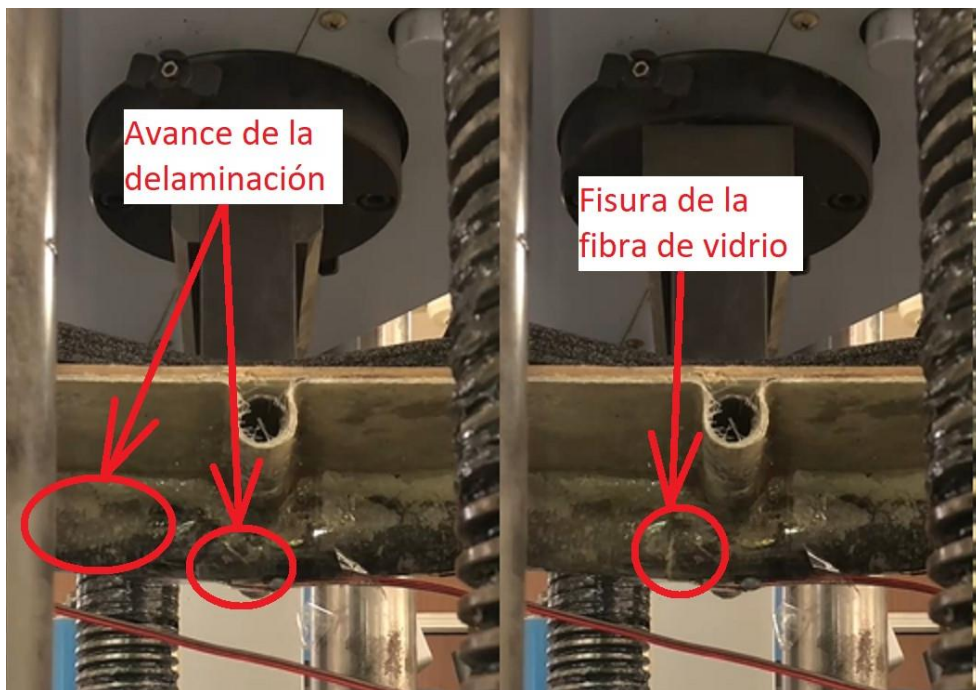
Nota. Fuente: Propia.

A continuación, se muestra un paso a paso del transcurso de la prueba de flexión de la primera probeta donde se muestran los diferentes tipos de daños en la unión híbrida.

Figura 20*Secuencia de prueba de flexión de probeta 1*

(a)

(b)



(c)

(d)

Nota. Las diferentes etapas se muestran en diferentes líneas de tiempo donde al incrementar el desplazamiento de aplastamiento la fibra se debilita mostrando separación del tubo, delaminación y fisuras. Fuente: Propia

3.1.1. Galga extensiométrica en flexión

Los resultados obtenidos de las galgas extensiométricas revelan una serie de factores influyentes en la medición de la deformación unitaria, tal como se muestra en la Figura 21.

Figura 21

Ubicación de las galgas extensiométricas en el espécimen físico



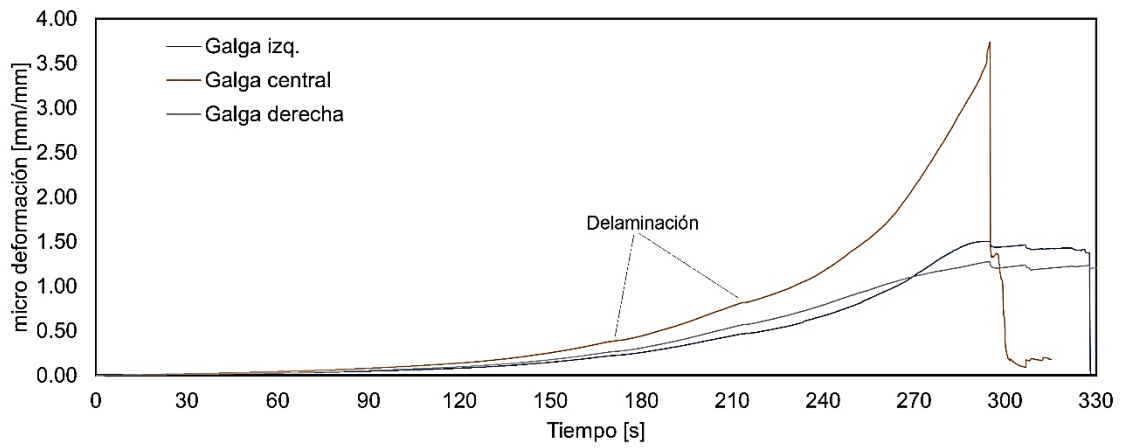
Nota. Probeta ya experimentada en prueba de flexión muestra en los círculos verdes los extensiométrico. Fuente: Propia.

A pesar de estas variaciones, se observó una tendencia notable de flexión en ambas galgas, tanto en la ubicada en el centro como en las situadas en los extremos. Aunque se advierte una diferencia marcada entre ambas mediciones, en el rango cercano a 1.50 micro deformaciones unitarias, se detecta una tendencia constante antes de que la galga ubicada en los extremos falle.

Las gráficas, a partir de la Figura 22, evidencian claramente la presencia de delaminación en determinados intervalos de tiempo, representada por líneas que interrumpen la secuencia ascendente de la deformación registrada.

Figura 22

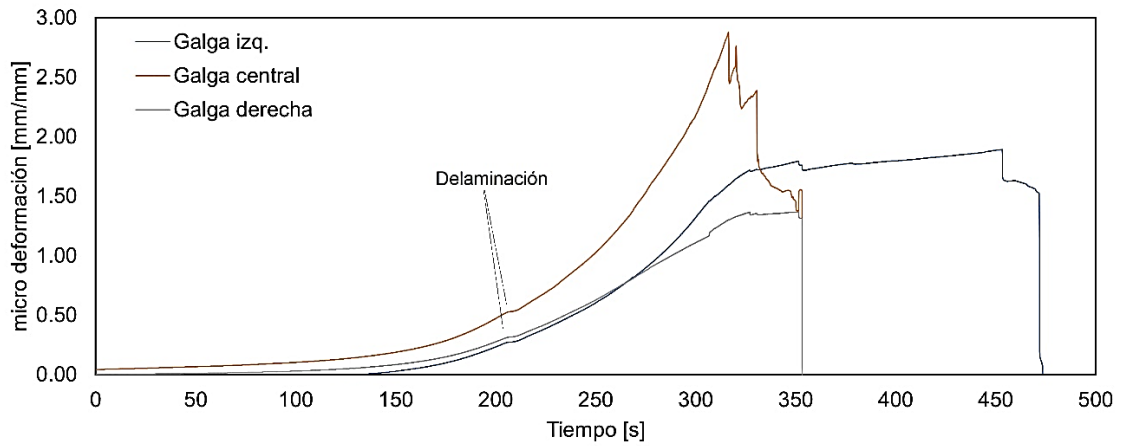
Resultados de galgas extensiométricas de la prueba de la probeta 1 en flexión



Nota. Fuente: Propia

Figura 23

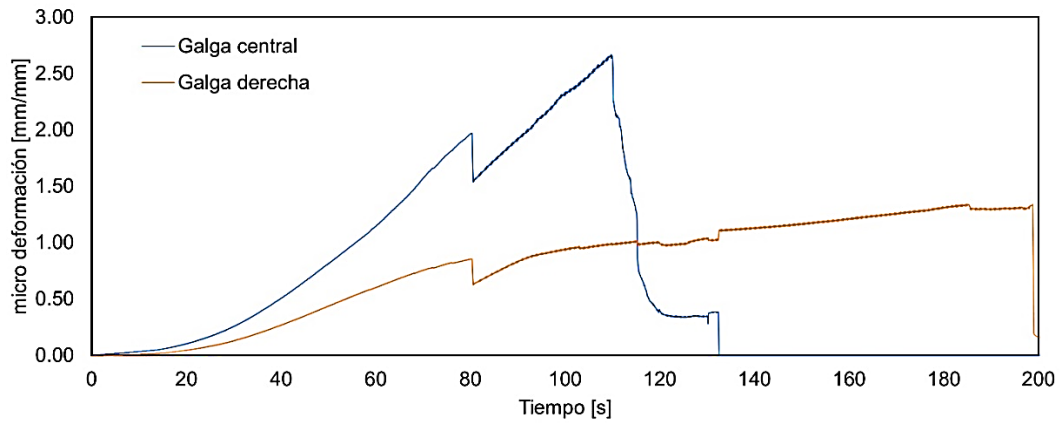
Resultados de galgas extensiométricas de la prueba de la probeta 2 en flexión



Nota. Fuente: Propia

Figura 24

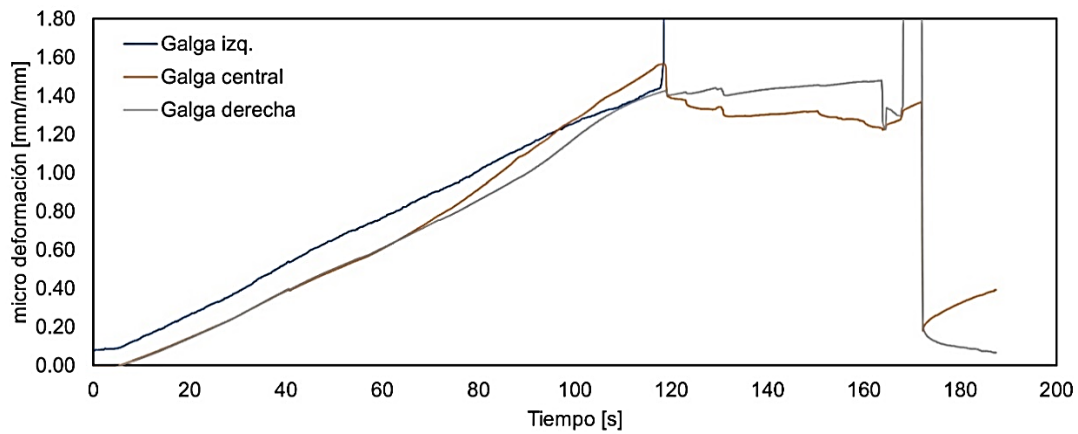
Resultados de galgas extensiométricas de la prueba de la probeta 3 en flexión



Nota. Comportamiento similar a las pruebas uno y dos, con desprendimiento de galga izquierda. Fuente: Propia.

Figura 25

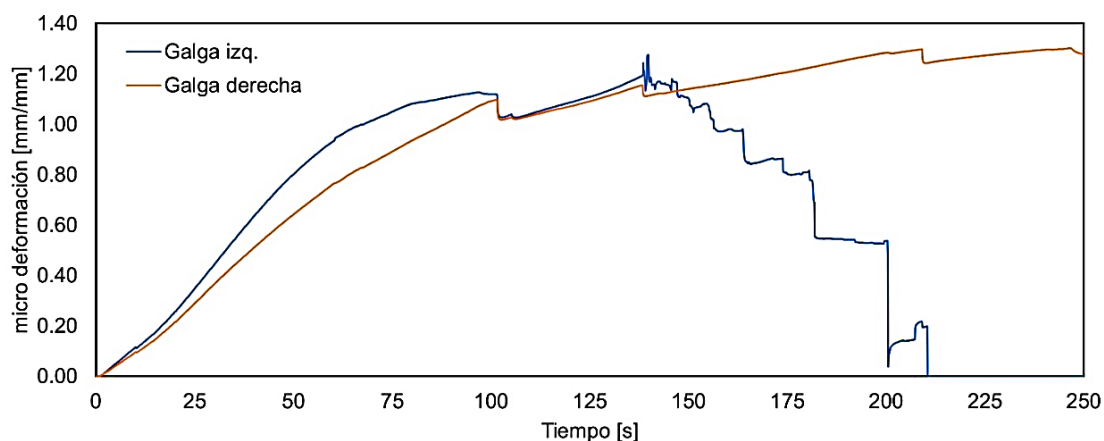
Resultados de galgas extensiométricas de la prueba de la probeta 4 en flexión



Nota. Comportamiento extraordinario y fallo marcado en el desprendimiento de las galgas. Fuente: Propia.

Figura 26

Resultados de galgas extensiométricas de la prueba de la probeta 5 en flexión

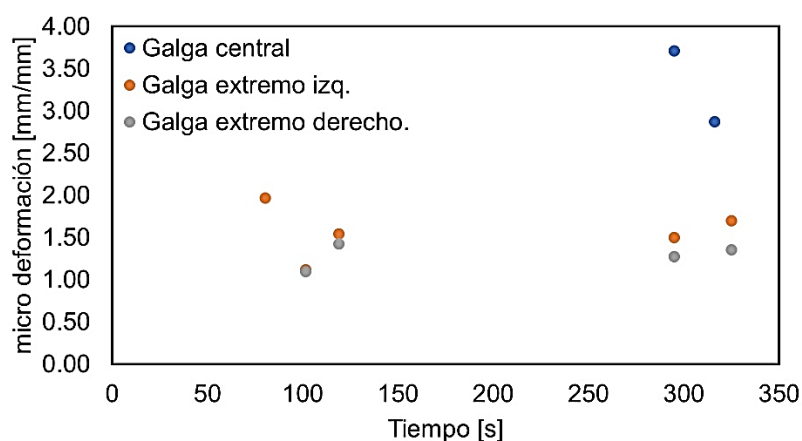


Nota. Fallo de galga central, comportamiento de galgas de los extremos similar. Fuente: Propia.

Esta nube de puntos mostrada en la Figura 27, reveló una correlación, en forma de resumen, entre los valores aproximados de fallo interlaminar y los momentos de delaminación y fisuración observados durante las pruebas.

Figura 27

Nube de puntos de galgas extensiométrica en el valor del fallo interlaminar



Nota. Se han omitido resultados atípicos de las pruebas experimentales. Fuente: Propia

Permite visualizar la relación entre la resistencia estructural y la integridad del material híbrido ante cargas específicas, resaltando la importancia de considerar la delaminación y la

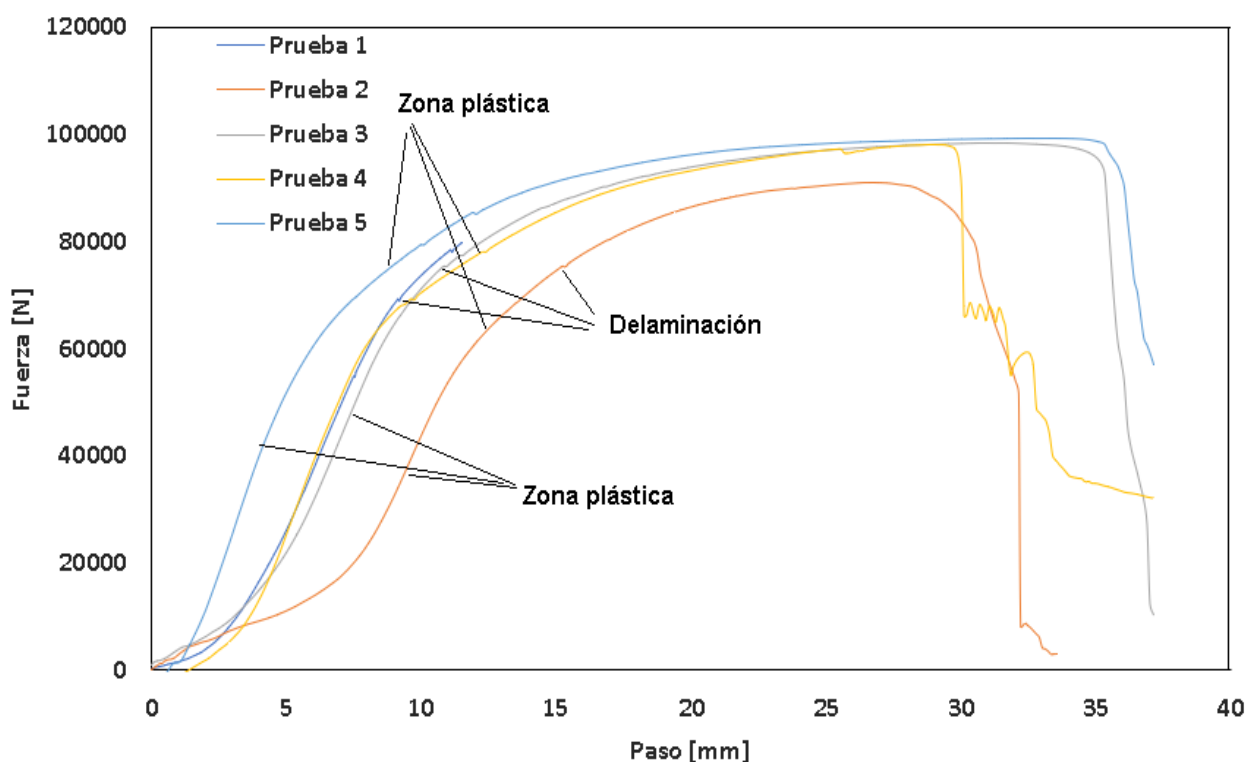
deformación para evaluar la resistencia interlaminar de estos materiales compuestos en esta configuración particular.

3.2. Prueba de tracción

En los resultados se identificó la zona elástica, en donde la fuerza y la deformación tenía un comportamiento lineal. A medida que la fuerza seguía estirando la probeta paso a la zona plástica, donde se observa que tiene discontinuidades, decrementando la magnitud de la fuerza como se presenta en la Figura 28. Finalmente se da la ruptura del material compuesto, tanto estructural como la delaminación del panel de fibra de vidrio, decayendo totalmente la fuerza aplicada.

Figura 28

Pruebas de las 5 probetas en tracción Fuerza vs desplazamiento



Nota. Fuente: Propia

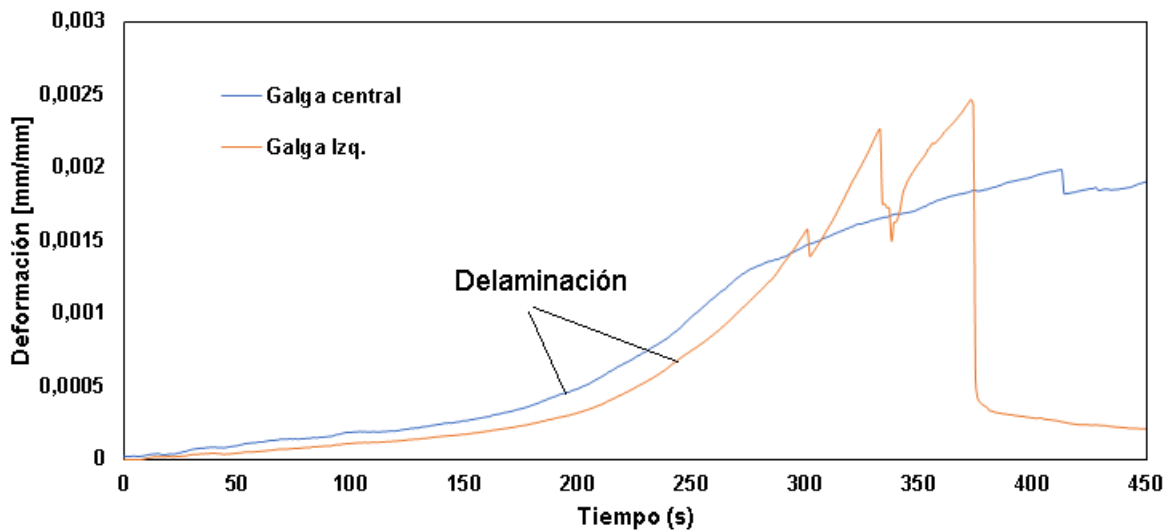
Con estos resultados se observa el comportamiento del material compuesto, para poder estimar las propiedades de mismo.

3.2.1. Galgas extensiométricas

En el ensayo de tracción se colocó 3 extensómetros ubicados 2 en los extremos de la estructura compuesta y 1 en el centro de la cruceta. Estos extensómetros nos dan los resultados de las deformaciones, para observar la delaminación de las capas de fibra de vidrio. En las diferentes probetas como se observa las Figura 29, Figura 30 y Figura 31 se aprecia las discontinuidades de las gráficas lo que indica el despegamiento de las capas de fibra de vidrio.

Figura 29

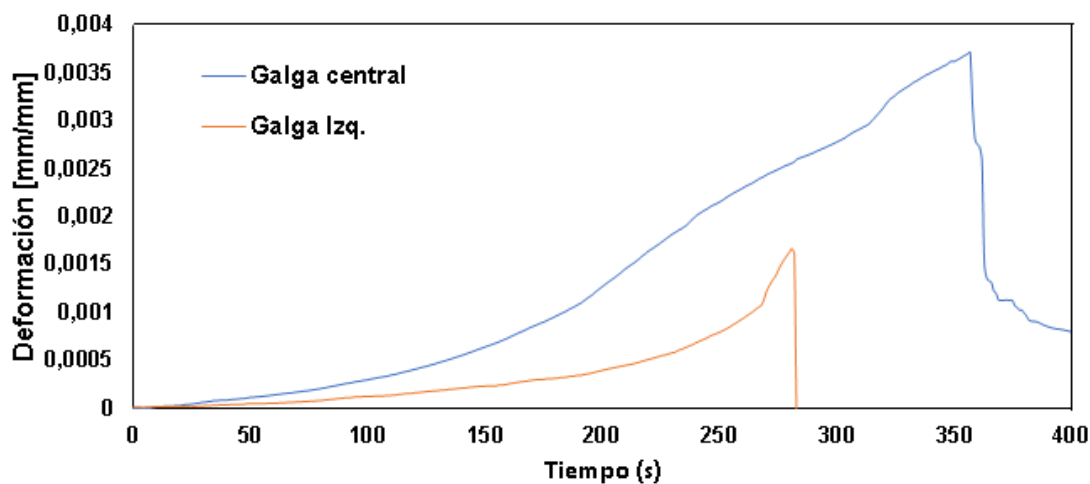
Resultado de galgas extensométricas de la prueba de la probeta 2 en tracción



Nota. Fuente: Propia

Figura 30

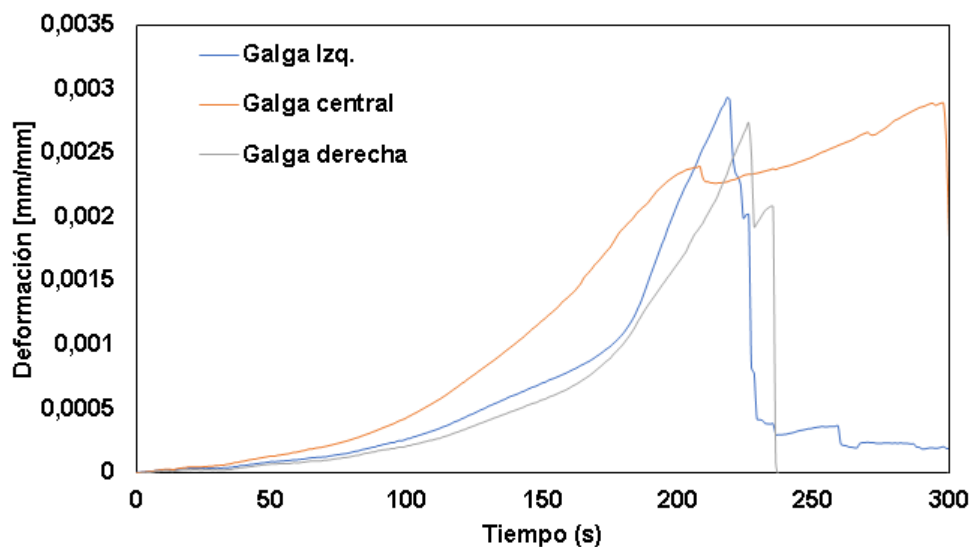
Resultado de galgas extensométricas de la prueba de la probeta 3 en tracción



Nota. Fuente: Propia

Figura 31

Resultado de galgas extensométricas de la prueba de la probeta 4 en tracción



Nota. Fuente: Propia

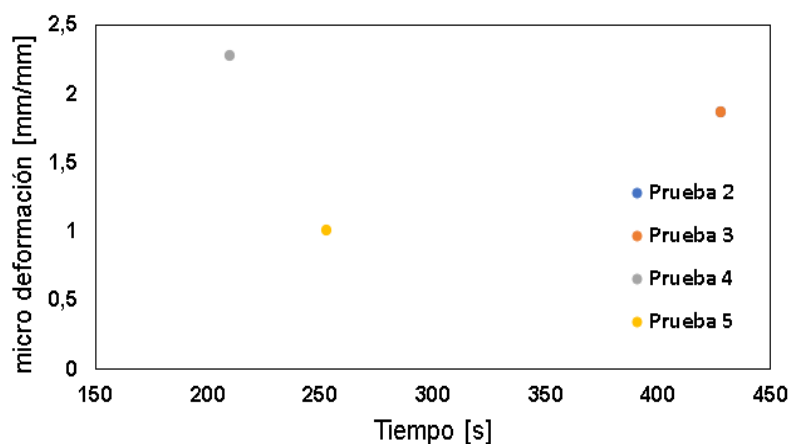
Para tener una mejor comprensión de los resultados obtenidos por las galgas extensométricas, se realizó dos graficas con una lluvia de puntos de las deformaciones cuando llegan a fallar, es decir cuando se forma el primer pico.

En la Figura 30, se aprecia los puntos de deformación de los extensómetros colocados en el centro de la estructura, cuando falla el material compuesto produciéndose la delaminación.

En la Figura 31, se observa los puntos de deformación de los extensómetros colocados en los extremos de la estructura, cuando falla el material compuesto llamándoles a estos fallos delaminaciones.

Figura 32

Nube de puntos de galga extensométrica en tracción en el valor de fallo interlaminar

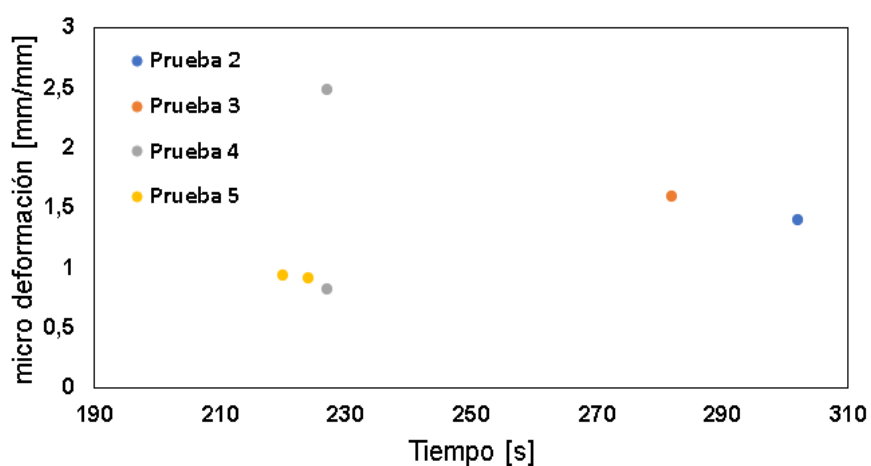


Nota. Fuente: Propia

En la Figura 32, se aprecia los puntos donde se produce el fallo de los extensómetros centrales de las 4 probetas, la prueba 2 coincide justamente con la prueba 4, es por ello por lo que no aparece en la figura. Por otro lado, la primera prueba no se ve reflejada con los extensómetros ya que fue la prueba para la calibración de los equipos.

Figura 33

Nube de puntos de galga extensométrica en tracción en el valor de fallo interlaminar



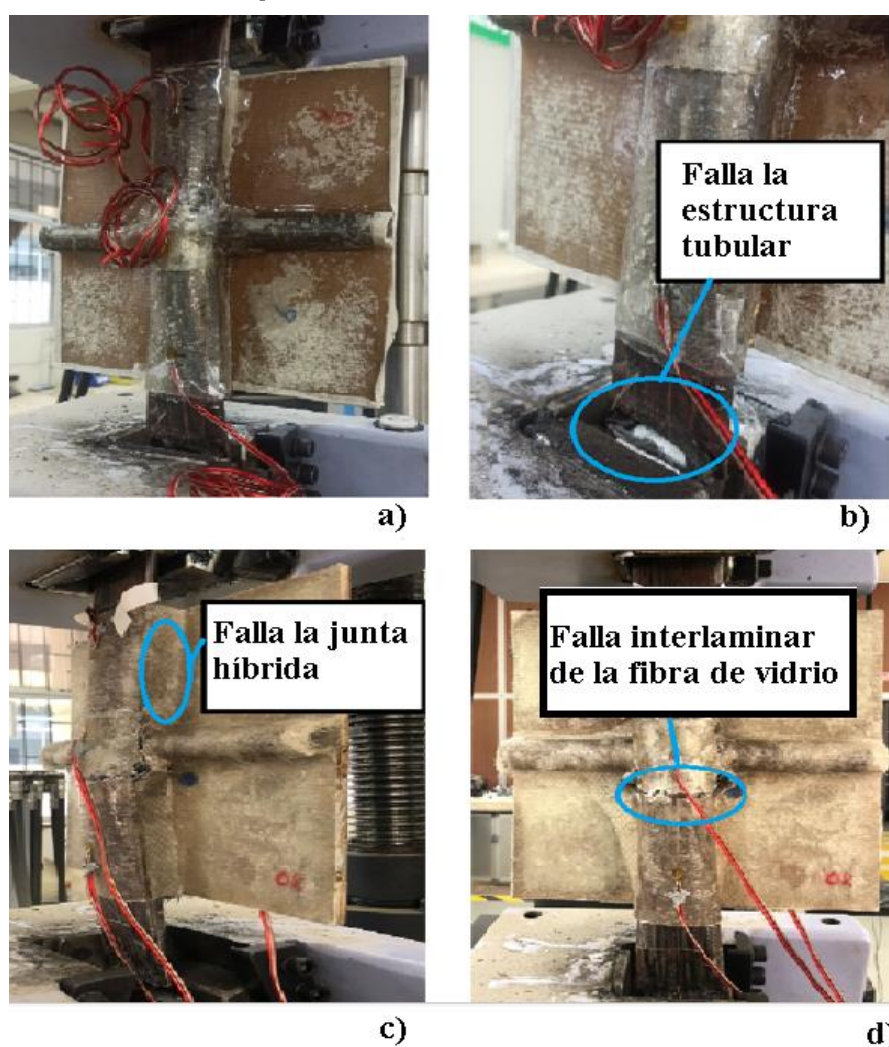
Nota. Fuente: Propia

En la Figura 33, se observa los puntos de fallo de los extensómetros en los extremos de las 4 probetas ensayadas, igual que el caso anterior la primera probeta no se pudo obtener los resultados de las deformaciones por la calibración de los equipos. Por otro lado, durante los ensayos 2 extensómetros no funcionaron correctamente por lo que se obvio estos resultados.

En la Figura 34, se muestra las fases por las que paso la probeta hasta llegar a fallar.

Figura 34

Secuencia de pruebas de tracción de la probeta 1



Nota. Fuente: Propia

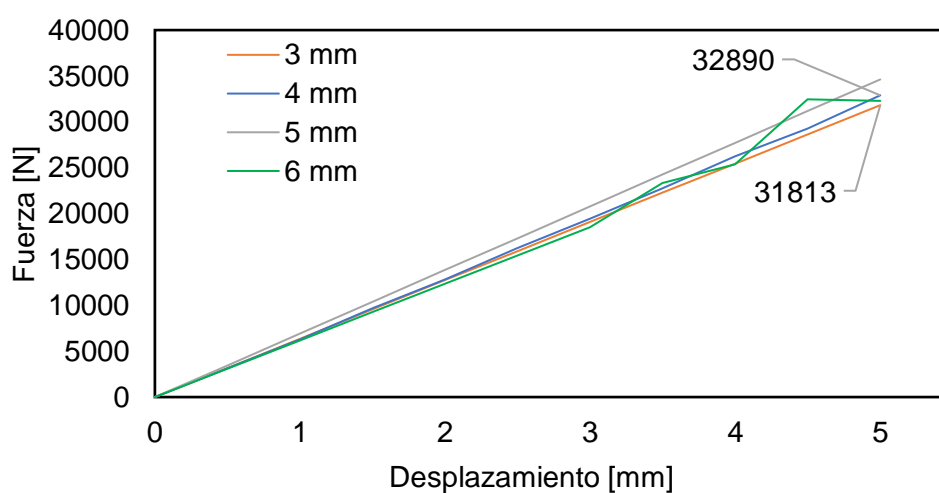
3.3. Resultados ANSYS

3.3.1. Convergencia

El resultado de la convergencia en el mallado del modelo 3D se desarrolló en base al desplazamiento de aplastamiento en el caso de flexión y estiramiento en el caso de tracción. Estos resultados reflejan un error de 3% para flexión y 1% para tracción en los dos últimos mallados.

Figura 35

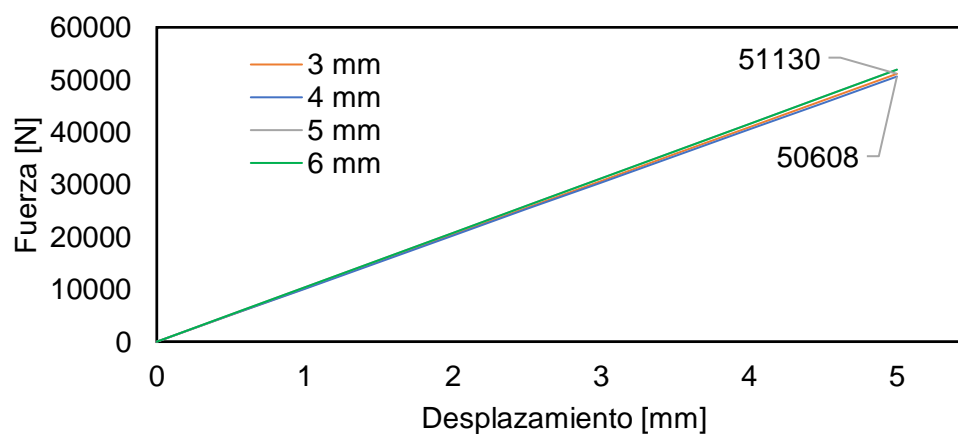
Resultado de convergencia de mallado para prueba de flexión



Nota. Fuente: Propia.

Figura 36

Resultado de convergencia de mallado para prueba de tracción



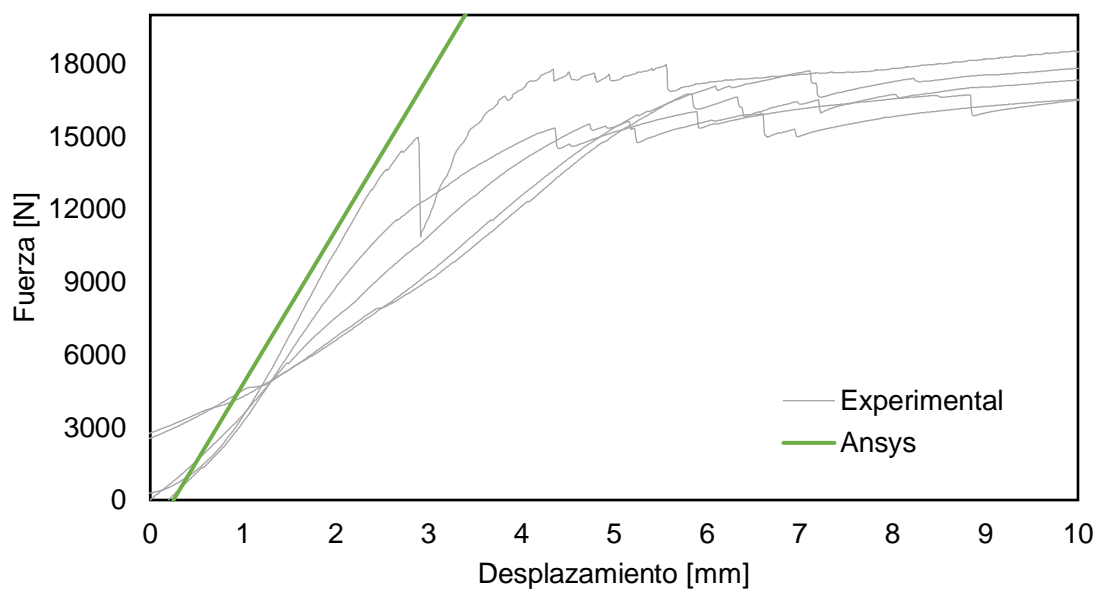
Nota. Fuente: Propia.

3.3.2. Prueba de flexión

La curva obtenida refleja una misma tendencia que las pruebas experimentales por lo que se podría predecir el comportamiento de otras combinaciones sin utilizar la parte experimental.

Figura 37

Resultados la prueba de flexión de ANSYS en comparación con los resultados experimentales



Nota. Fuente: Propia.

Para esta investigación, al estar interesado en no sobrepasar la fisura que se encuentra en el primer sonido de crujido, o primer fallo interlaminar, se puede calcular la fuerza de la superestructura establecido por formulaciones para buques en general donde se establece los límites para la fuerza, en esta ocasión al analizar en ANSYS dentro del límite de la presión más grande de la figura a continuación, no se presentan fisuras, tanto en el software como en el experimental.

Figura 38

Presión de diseño para superestructuras y casetas para todos los barcos

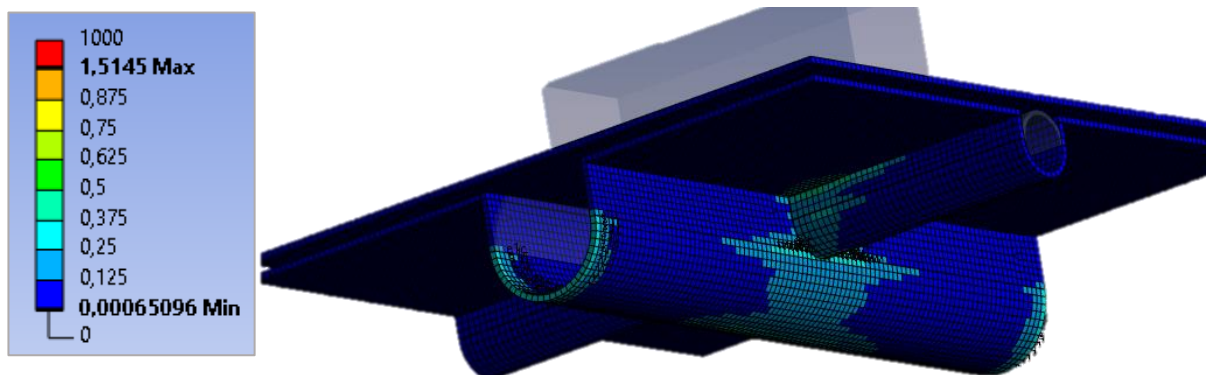
SUPERSTRUCTURES AND DECKHOUSES - All Craft		3-2-2/7
Superstructure and Deckhouse Front Plating		
P_d =	37.9	kN/m ²
Superstructure and Deckhouse Front Stiffeners		
P_d =	24.1	kN/m ²
Superstructure and Deckhouse Aft End and House Side Plating		
P_d =	13.8	kN/m ²
Superstructure and Deckhouse Aft End and House Side Stiffeners		
P_d =	10.3	kN/m ²
House Tops, Forward of Midships, Plating and Stiffeners		
P_d =	8.6	kN/m ²
House Tops, Aft of Midships, Plating and Stiffeners		
P_d =	6.9	kN/m ²

Nota. Fuente: L/V PICAROONS' BINNACLE, 2018

Se empleó el criterio de falla de Tsai-Wu que propone un rango de 0 a 1 donde no existen falla en el laminado creado en ACP.

Figura 39

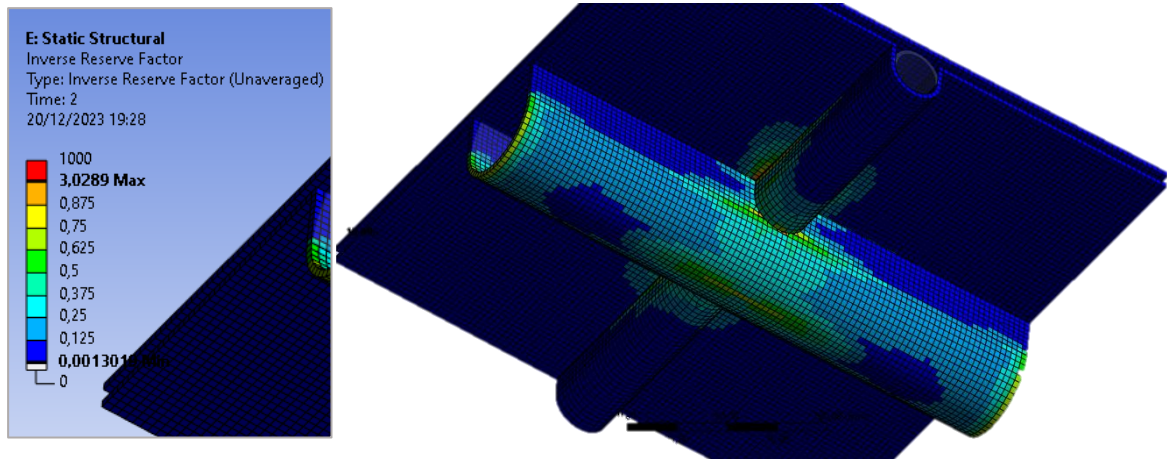
Resultados de la fuerza dentro del límite establecido



Nota. Fuente: Propia.

Figura 40

Resultados de la fuerza fuera del límite establecido



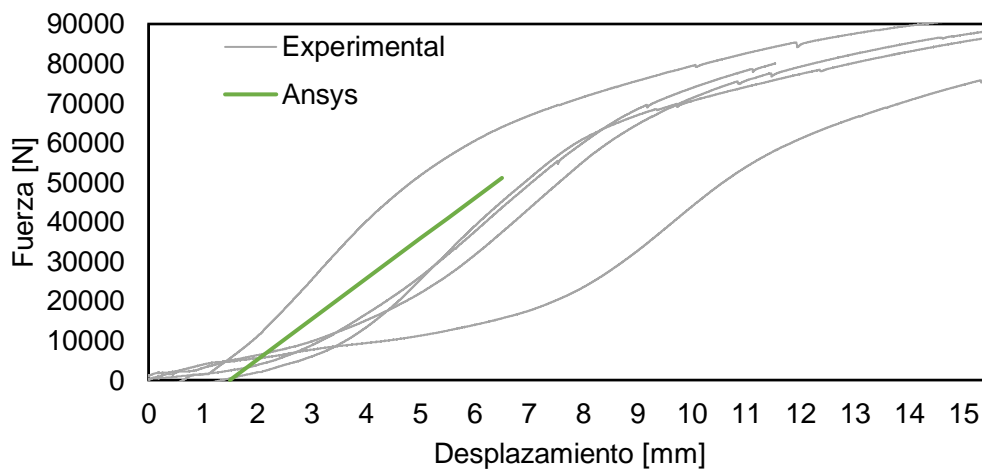
Nota. Fuente: Propia.

3.3.3. Prueba de tracción

De esta manera al incorporar la recta de resultado de ANSYS en la gráfica de la Figura 41 se observa la misma tendencia de 3 de las 5 pruebas realizadas en el laboratorio. Para estos resultados obtenidos se utilizó un factor divisor de 10 para escalar la gráfica a los valores experimentales.

Figura 41

Resultados la prueba de tracción de ANSYS en comparación con los resultados experimentales

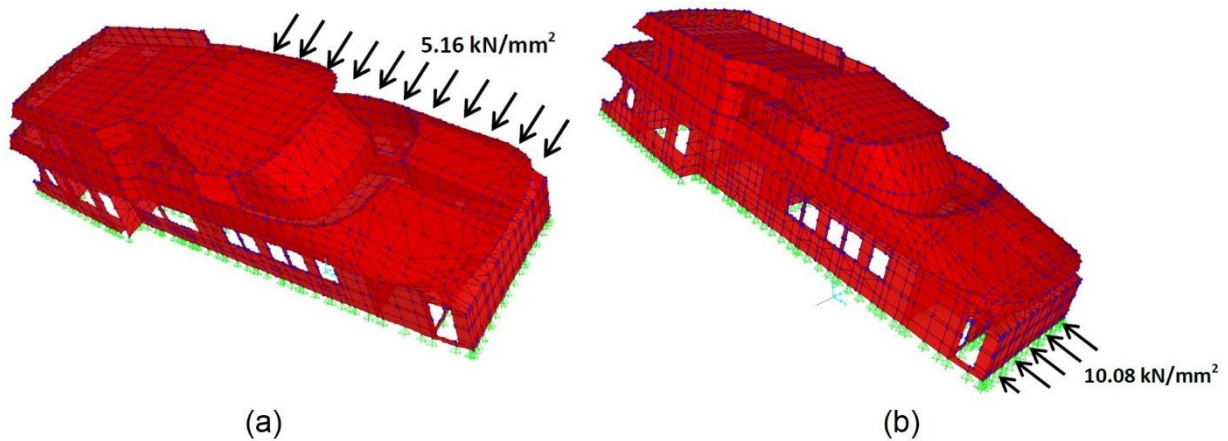


Nota. Fuente: Propia.

De esta manera podemos evaluar la resistencia en el diseño de la superestructura al calcular presiones de diseño y fuerzas típicas como se desarrolló en una investigación que se muestra en la Figura 42, al obtener una fuerza típica de 5 KN en la adhesión entre la cubierta principal y la superestructura.

Figura 42

Estimación de fuerzas en unión entre costados y cubierta [6]

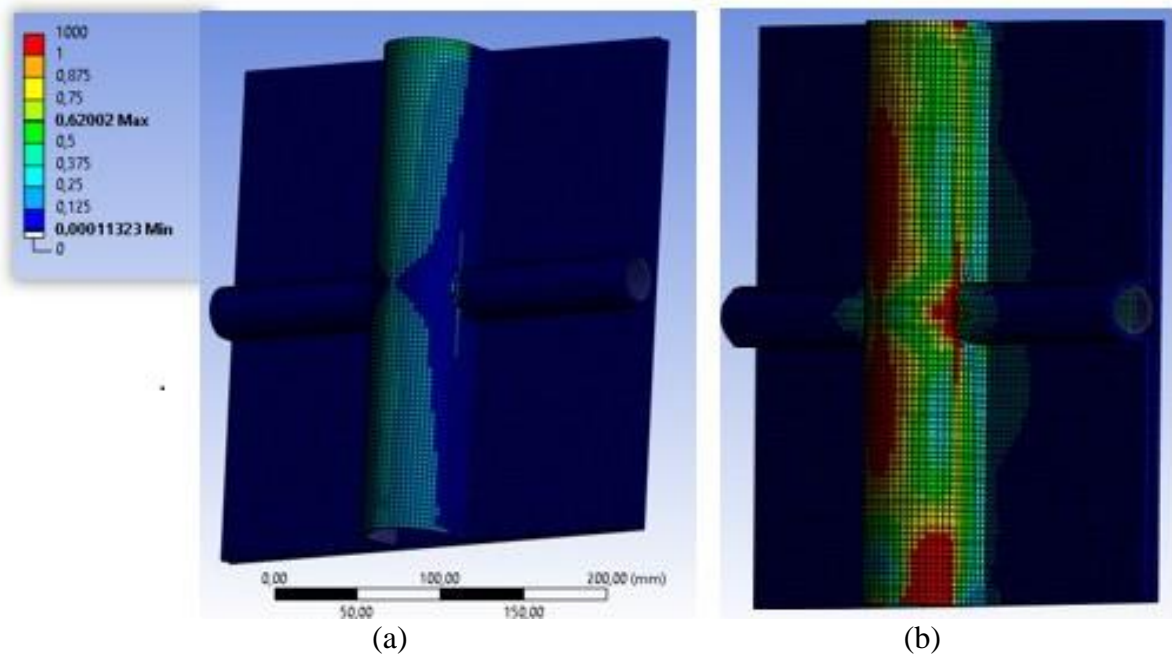


Nota. La imagen (a) se evaluó a 30 grados de ángulo de escora crítico y la imagen (b) se evaluó a 15 grados de ángulo de trimado crítico. Fuente: Domínguez Ruiz, F. J. (2020). superestructura de buques. Tesis doctoral. Universidad de A Coruña.

No se muestran fallas en el laminado de acuerdo con el criterio de rotura de Tsai-Wu, tal como se muestra en la Figura 43, parte (a), mientras que en la parte (b) al ser evaluado fuera del límite se muestra una zona roja donde indica un fallo interlaminar de acuerdo con el criterio de materiales compuestos.

Figura 43

Resultados en elementos finitos a la fuerza típica de la unión de cubierta principal y superestructura



Nota. Fuente: Propia.

De esta manera se logró con éxito evaluar el modelo en 3D en físico en el laboratorio y en virtual en el software ANSYS con las pruebas mecánicas de flexión y tracción, obteniendo una clara tendencia entre los resultados teóricos y experimentales.

3.4. Observación microscópica

Se capturaron fotografías de microscopía óptica con un aumento de 150x. Este nivel de aumento permite una visualización detallada de la estructura microscópica de las fibras de vidrio, ofreciendo la capacidad de examinar con precisión la disposición y las características de las fibras a una escala que proporciona información valiosa sobre la calidad e integridad del material compuesto. Un primer plano de la muestra como se muestra en la Figura 44 nos ayudó a interpretar la falla interlaminar de estos experimentos.

Figura 44.

Primer plano de la muestra en flexión en la zona de falla



La elección de un aumento de 150x permite revelar detalles específicos que pueden ser cruciales para la evaluación y comprensión de la morfología de las fibras de vidrio en el contexto de la investigación o análisis en cuestión. En la Figura 45 y Figura 46, magnificada con microscopía se muestra la sección donde el laminado se encuentra sin daños.

Figura 45.

Aumento de 150x en área no dañada 1



Figura 46.

Aumento de 150x en área no dañada 1



En la Figura 47 y Figura 48, magnificada con microscopía se muestra la sección donde el laminado está dañado. Donde se pueden ver las tres capas del laminado, este se muestra como un sándwich donde se muestra la tela mat 450 encima de Woven Roving 400, que es la que más resalta.

Figura 47.

Aumento de 150x en el área dañada 1

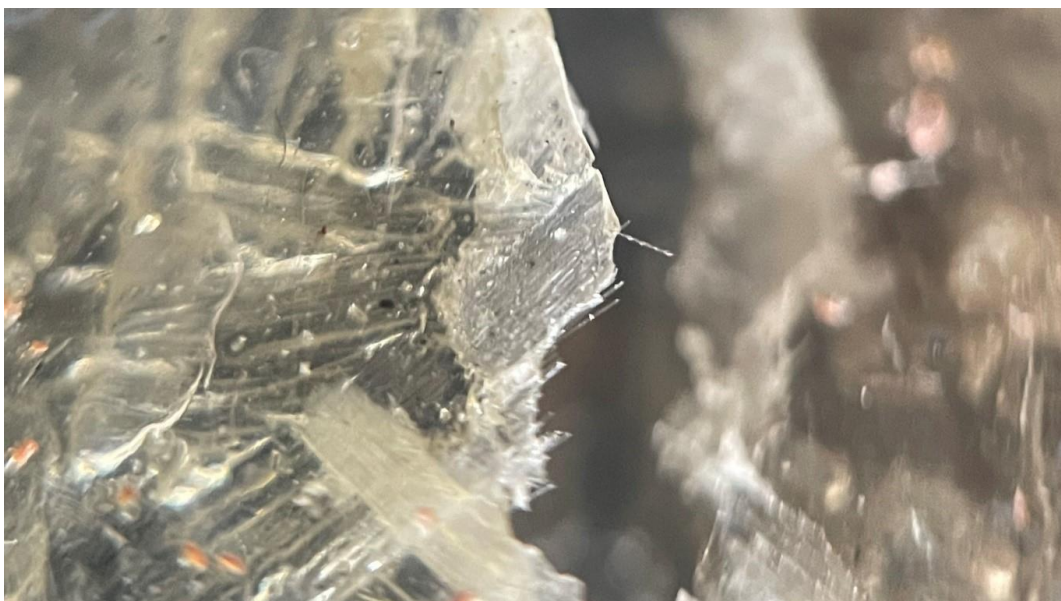


Figura 48.

Aumento de 150x en el área dañada



Se muestran cortes mayoritariamente limpios, como se referencia en los gráficos donde se muestra delaminación, una fuerte caída y grietas continuas.

Capítulo 4

4.1 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1.1 Conclusiones

La elaboración del modelo exacto de los paneles en 3D, nos facilita la identificación de los objetos que utilizamos para formar la unión híbrida. Pese a que no se puede modelar las capas de resina, esta se le asume en el programa de análisis ACP ANSYS.

Las pruebas experimentales de los paneles híbridos, nos permite corroborar la diferencia de pesos entre un panel de acero convencional con un panel de fibra de vidrio y estructura tubular, reduciéndose hasta un 24%. Esta ventaja nos ayuda a aumentar la cantidad de pasajeros en los yates de turismo, mediante el aumento de niveles en la sobrecubierta, y por ende aumenta los ingresos para los dueños de los yates.

Al realizar los ensayos de tracción y flexión se aprecia que los paneles híbridos tienen una buena resistencia y adherencia, pese a que se sometió a cargas que sobrepasan los 60 kilonewtons en tracción y 14 kilonewtons en flexión, las uniones híbridas continuaron en la zona elástica, esto nos garantiza que cuando los yates tengan movimientos bruscos, los paneles compuestos de la superestructura difícilmente fallaran.

La convergencia entre teoría y práctica valida la utilidad y precisión del enfoque numérico proporcionado por ANSYS en la evaluación del comportamiento estructural de materiales compuestos bajo diferentes cargas mecánicas. Esto no sólo confirma la eficacia del software, sino que también ofrece una valiosa herramienta para futuros diseños y evaluaciones de resistencia estructural en aplicaciones de ingeniería.

4.1.2 Recomendaciones

Se recomienda como próximas investigaciones de la unión híbrida, pruebas en un “shaker” con el objetivo de evaluar las frecuencias naturales de un panel y estudiar la unión híbrida entre

acero y fibra de vidrio, se sugiere implementar un diseño experimental que contemple factores clave. Se debe considerar la variación de parámetros como la amplitud de vibración, la frecuencia de excitación y las condiciones ambientales, para obtener resultados representativos y reproducibles. Es crucial incorporar medidas de control para mitigar posibles interferencias externas, como vibraciones generadas por motores u otros artefactos, que podrían afectar las frecuencias naturales del barco.

Para futuras investigaciones se propone variar las condiciones de frontera y construir un marco para el que pueda reproducir empotrado o simplemente soportado para temas de investigación, además de utilizar nuevas máquinas de laboratorio que puedan replicar cargas cíclicas.

REFERENCIAS

- [1] Aquim, E. V. (2022). Simulación numérica de la de laminación en materiales compuestos usando esquemas cohesivos. *Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 9(2).
- [2] Dominguez, F., & Carral, L. (2018). Superstructure Design: Combination of Fiberglass Panel and Tubular Structure with Naval Steel Hull. *COPINAVAL*, 81-92. doi:10.1007/978-3-319-89812-4_8
- [3] Johansson, H. (2016). SUPERSTRUCTURES IN FRP COMPOSITES. *E-LASS*. Obtenido de <https://e-lass.eu/media/2016/08/Superstructures-in-FRP-composites-Henrik-Johansson.pdf>
- [4] Naciones Unidas (2018), La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible: una oportunidad para América Latina y el Caribe (LC/G.2681-P/Rev.3), Santiago.
- [5] Boyd, S. W., Blake, J. I. R., Sheno, R. A., & Kapadia, A. (2004). Integrity of hybrid steel-to-composite joints for marine application. *Proc. Instn Mech. Engrs*, 218(Part M: J. Engineering for the Maritime Environment). Enlace al artículo
- [6] Domínguez Ruiz, F. J. (2020). Metodología para combinar fibra de vidrio reforzada con estructuras de acero aplicado a superestructura de buques. Tesis doctoral. Universidad de A Coruña.
- [7] Lloyds Register. (2016). Hull Construction in Composite. Rules and Regulations for the Classification of Special Service Craft.
- [8] Lindblom, F. (2003). Use of composites in the Visby class Stealth corvette. En *ACMC/SAMPE Conference on Marine Composites Plymouth* (ISBN 1-870918-02-9).
- [9] Clark, J. L. (1996). *Structural Design of Polymer Composites - Eurocomp Design Code and Handbook*. Halcrow Polymerics Ltd.
- [10] Vinson, J. (2005). *Plate and Panel Structures of Isotropic, Composite and Piezoelectric Materials, Including Sandwich Construction*. Springer. Department of Mechanical Engineering, Center for Composite Materials and College of Marine Studies, Newark, Delaware, USA. ISBN 978-1-4020-3110-6.
- [11] Bigwood, D., & Crocombe, A. (1989). Elastic analysis and engineering design formulae for bonded joints. *Adhesion and Adhesives*, 9, University of Surrey, UK.

APÉNDICE A

A continuación, se presentan los materiales y propiedades utilizadas en ANSYS.

Figura 49

Propiedad del acero negro establecido en ANSYS

Properties of Outline Row 3: Black steel			
	A	B	C
1	Property	Value	Unit
2	Material Field Variables	Table	
3	Density	7850	kg m ⁻³
4	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion		
5	Coefficient of Thermal Expansion	1,22E-05	C ⁻¹
6	Isotropic Elasticity		
7	Derive from	Young's Modulu...	
8	Young's Modulus	2,1E+11	Pa
9	Poisson's Ratio	0,29	
10	Bulk Modulus	1,6667E+11	Pa
11	Shear Modulus	8,1395E+10	Pa
12	Tensile Yield Strength	Tabular	
13	Tensile Ultimate Strength	Tabular	
14	Isotropic Thermal Conductivity	52	W m ⁻¹ C ⁻¹
15	Specific Heat Constant Pressure, C _p	485	J kg ⁻¹ C ⁻¹
16	Isotropic Resistivity	1,44E-07	ohm m

Nota. Fuente: Propia.

Figura 50

Propiedades de MDF establecidos en ANSYS

Properties of Outline Row 6: MDF			
	A	B	C
1	Property	Value	Unit
2	Material Field Variables	Table	
3	Density	0,75	g cm ⁻³
4	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion		
5	Coefficient of Thermal Expansion	4,69E-06	C ⁻¹
6	Isotropic Elasticity		
7	Derive from	Young's Modulu...	
8	Young's Modulus	5,8396E+05	psi
9	Poisson's Ratio	0,25	
10	Bulk Modulus	2,6842E+09	Pa
11	Shear Modulus	1,6105E+09	Pa
12	Tensile Yield Strength	Tabular	
13	Compressive Yield Strength	1500	psi
14	Tensile Ultimate Strength	Tabular	
15	Isotropic Thermal Conductivity	0,4528	W m ⁻¹ C ⁻¹
16	Specific Heat Constant Pressure, C _p	1685	J kg ⁻¹ C ⁻¹
17	Isotropic Electric Loss Tangent	Tabular	
18	Isotropic Resistivity	1,095E+06	ohm m
19	Isotropic Relative Permittivity	10,12	

Nota. Fuente: Propia.

Figura 51

Propiedades de MAT 450 establecido en ANSYS

Properties of Outline Row 5: Mat 450			
	A	B	C
1	Property	Value	Unit
2	Density	2000	kg m ⁻³
3	Orthotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion		
4	Coefficient of Thermal Expansion		
5	Coefficient of Thermal Expansion X direction	2,2E-06	C ⁻¹
6	Coefficient of Thermal Expansion Y direction	2,2E-06	C ⁻¹
7	Coefficient of Thermal Expansion Z direction	1E-05	C ⁻¹
8	Orthotropic Elasticity		
9	Young's Modulus X direction	20,7	GPa
10	Young's Modulus Y direction	6,89	GPa
11	Young's Modulus Z direction	6,89	GPa
12	Poisson's Ratio XY	0,26	
13	Poisson's Ratio YZ	0,26	
14	Poisson's Ratio XZ	0,3	
15	Shear Modulus XY	1,52	GPa
16	Shear Modulus YZ	1,52	GPa
17	Shear Modulus XZ	2,65	GPa
18	Orthotropic Stress Limits		
19	Tensile X direction	1,632E+09	Pa
20	Tensile Y direction	3,4E+07	Pa
21	Tensile Z direction	3,4E+07	Pa
22	Compressive X direction	-7,04E+08	Pa
23	Compressive Y direction	-6,8E+07	Pa
24	Compressive Z direction	-6,8E+07	Pa
25	Shear XY	8E+07	Pa
26	Shear YZ	5,5E+07	Pa
27	Shear XZ	8E+07	Pa
28	Orthotropic Strain Limits		
29	Tensile X direction	0,0092	
30	Tensile Y direction	0,0092	
31	Tensile Z direction	0,0078	
32	Compressive X direction	-0,0084	
33	Compressive Y direction	-0,0084	
34	Compressive Z direction	-0,011	
35	Shear XY	0,02	
36	Shear YZ	0,015	
37	Shear XZ	0,015	
38	Tsai-Wu Constants		
39	Coupling Coefficient XY	-1	
40	Coupling Coefficient YZ	-1	
41	Coupling Coefficient XZ	-1	
42	Puck Constants		
43	Material Classification	Carbon	
44	Compressive Inclination XZ	0,3	
45	Compressive Inclination YZ	0,25	
46	Tensile Inclination XZ	0,35	
47	Tensile Inclination YZ	0,25	
48	LaRc03/04 Constants		
49	Fracture Toughness Ratio	0.35	

Nota. Fuente: Propia.

Figura 52




Propiedades de Woven Roving 400 establecidas en ANSYS

Properties of Outline Row 8: Roving 400			
	A	B	C
1	Property	Value	Unit
2	Density	2050	kg m ⁻³
3	Orthotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion		
4	Coefficient of Thermal Expansion		
5	Coefficient of Thermal Expansion X direction	-4,5E-07	C ⁻¹
6	Coefficient of Thermal Expansion Y direction	3E-05	C ⁻¹
7	Coefficient of Thermal Expansion Z direction	3E-05	C ⁻¹
8	Orthotropic Elasticity		
9	Young's Modulus X direction	36,3	GPa
10	Young's Modulus Y direction	10,8	GPa
11	Young's Modulus Z direction	10,8	GPa
12	Poisson's Ratio XY	0,28	
13	Poisson's Ratio YZ	0,09	
14	Poisson's Ratio XZ	0,28	
15	Shear Modulus XY	4	GPa
16	Shear Modulus YZ	3	GPa
17	Shear Modulus XZ	4	GPa
18	Orthotropic Stress Limits		
19	Tensile X direction	596	MPa
20	Tensile Y direction	55	MPa
21	Tensile Z direction	55	MPa
22	Compressive X direction	-550	MPa
23	Compressive Y direction	-120	MPa
24	Compressive Z direction	-120	MPa
25	Shear XY	86	MPa
26	Shear YZ	44	MPa
27	Shear XZ	86	MPa
28	Orthotropic Strain Limits		
29	Tensile X direction	0,0143	
30	Tensile Y direction	0,0026	
31	Tensile Z direction	0,0026	
32	Compressive X direction	-0,006	
33	Compressive Y direction	-0,0146	
34	Compressive Z direction	-0,0146	
35	Shear XY	0,016	
36	Shear YZ	0,012	
37	Shear XZ	0,016	
38	Tsai-Wu Constants		
39	Coupling Coefficient XY	-1	
40	Coupling Coefficient YZ	-1	
41	Coupling Coefficient XZ	-1	
42	Ply Type		
43	Type	Woven	

Nota. Fuente: Propia.

Figura 53

Propiedades de resina poliéster establecidas en ANSYS

Properties of Outline Row 7: Resin Polyester			
	A	B	C
1	Property	Value	Unit
2	 Density	1200	kg m ⁻³ ▼
3	 Isotropic Elasticity		
4	Derive from	Young's Modulu... ▼	
5	Young's Modulus	3E+09	Pa ▼
6	Poisson's Ratio	0,316	
7	Bulk Modulus	2,7174E+09	Pa
8	Shear Modulus	1,1398E+09	Pa
9	 Ply Type		
10	Type	Isotropic ▼	

Nota. Fuente: Propia.

A continuación, se presenta el equipo que se prestó del laboratorio de FICT.

Figura 54

Máquinas de ensayo universales hidráulicas UH-X/FX Series

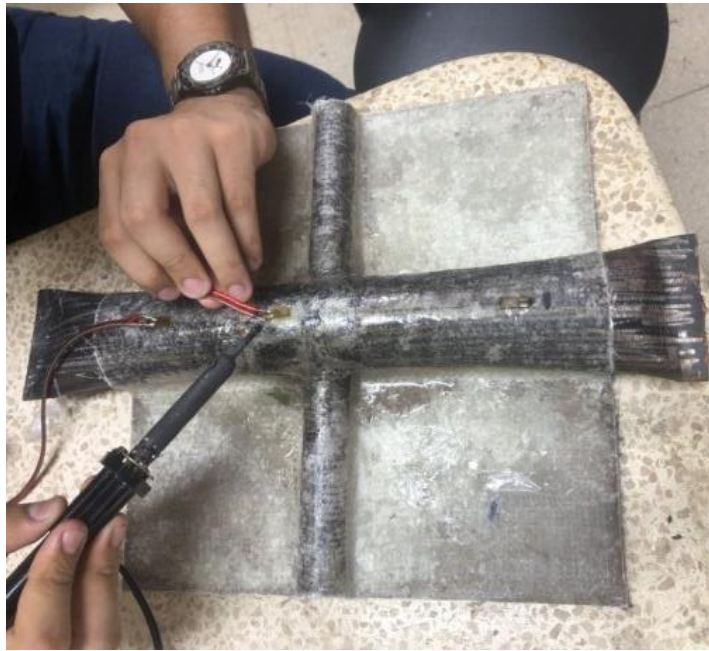


Nota. Fuente: Shimadzu (2023)

A continuación, se presenta parte el proceso para la instalación de las galgas extensiométricas.

Figura 55

Instalación de galgas extensométricas



Nota. En la foto se aprecia, el caudín, estaño, y la galga pegada previamente con pegamento. Fuente: Propia

A continuación, se presenta el equipo que se prestó del laboratorio de SIMAR, FIMCM.

Figura 56

Pruebas de funcionamiento y registro de datos de galgas extensométricas.



Nota. Fuente: Propia.