

**UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA METALURGICA  
Y DE MATERIALES**



**UNIVERSIDAD TECNICA  
FEDERICO SANTA MARIA**

**MODELACIÓN NUMÉRICA DEL REEMPLAZO DEL MATERIAL DE  
FABRICACIÓN DEL ESPEJO DE BOTE NEUMÁTICO PUMAR  
MEDIANTE EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS**

**Trabajo de memoria de titulación presentado en conformidad a los  
requisitos y reglamentos requeridos para obtener el título de Ingeniero  
Civil Metalúrgico**

**Profesor Guía: Flavio De Barbieri**

**GUILLERMO IGNACIO SALAS SEPÚLVEDA  
2024**

## RESUMEN

Actualmente, ASMAR fabrica botes militares de alta velocidad con espejos de madera, pieza donde se ancla el o los motores a utilizar. Debido a la prohibición de la extracción de la madera de fabricación, ASMAR ha tenido que importar este material desde el extranjero, aumentando los costos de fabricación de sus botes. Por este motivo, han decidido buscar una alternativa de material para la fabricación de los espejos que pueda suplir todas las necesidades de sus embarcaciones, como los distintos esfuerzos aplicados, además de tener resistencia a la corrosión, temperaturas extremas, entre otros factores. En este trabajo se realiza la modelación numérica del espejo de un bote PUMAR MI 585 A, utilizando distintas opciones de materiales poliméricos, los cuales han sido utilizados anteriormente en embarcaciones y que presentan un buen comportamiento en el área náutica.

Mediante la modelación realizada en el software ANSYS, utilizando el método de elementos finitos, se evaluó el comportamiento del espejo a nivel estructural estático y dinámico con el fin de poder escoger un nuevo material de fabricación, el cual puede variar en las dimensiones, en comparación al material actual de fabricación utilizado por ASMAR, con el fin de optimizar los costos y asegurar un correcto funcionamiento.

Los resultados indican que el material POM C resultó ser el más adecuado para el caso, con un factor de seguridad mayor al del material original de fabricación, mostrando un comportamiento estructural estático y dinámico satisfactorios bajo las condiciones de estudio. En contraste, el material Technyl resultó no ser adecuado para el caso, ya que no cumplió con los requisitos mecánicos esperados obteniendo valores de factor de seguridad menores a los del material original de fabricación. Bajo estos resultados, se procede a la selección de un nuevo material de fabricación que cumpla con los criterios de rendimiento y costos establecidos por ASMAR, ofreciendo así una solución viable para el problema planteado.

## TABLA DE CONTENIDOS

|                                                                                           |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1. RESUMEN .....                                                                          | 2  |
| 2. TABLA DE CONTENIDOS .....                                                              | 3  |
| 3. CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN .....                                                         | 5  |
| 1.1 Introducción al tema de memoria .....                                                 | 5  |
| 1.2 Objetivos.....                                                                        | 7  |
| 1.2.1 Objetivo general .....                                                              | 7  |
| 1.2.2 Objetivos específicos.....                                                          | 7  |
| 4. CAPÍTULO II: ANTECEDENTES BIBLIOGRÁFICOS.....                                          | 8  |
| 2.1 Estudio estructural estático del reemplazo de un espejo .....                         | 8  |
| 2.1.1 Estructura y modelación del espejo inicial .....                                    | 8  |
| 2.1.2 Diagrama de fuerzas del espejo y el motor.....                                      | 11 |
| 2.1.3 Estructura y modelación de nuevo espejo .....                                       | 12 |
| 2.2 Estudio estructural estático para distintos tipos de fibra de vidrio con resina ..... | 15 |
| 2.2.1 Estructura y modelación del espejo .....                                            | 16 |
| 2.2.2 Diagrama de fuerzas del espejo y el motor.....                                      | 16 |
| 2.2.3 Resultados: Esfuerzos de Von Mises y desplazamiento .....                           | 17 |
| 2.3 Estudio estructural dinámico .....                                                    | 21 |
| 2.3.1 Análisis de distintos fenómenos actuando alrededor del bote.....                    | 22 |
| 5. CAPÍTULO III: METODOLOGÍA DE TRABAJO.....                                              | 24 |
| 3.1 Modelación del espejo .....                                                           | 24 |
| 3.2 Preprocesamiento.....                                                                 | 24 |
| 3.2.1 Creación de los materiales para la fabricación del espejo .....                     | 24 |
| 3.1.2 Generación de malla .....                                                           | 25 |
| 3.2 Post procesamiento .....                                                              | 26 |
| 3.2.1 Análisis de esfuerzos de Von Mises y desplazamiento total .....                     | 26 |
| 3.3 Análisis estructural dinámico.....                                                    | 26 |
| 3.3.1 Factores a considerar en análisis estructural dinámico.....                         | 26 |
| 6. CAPÍTULO IV: RESULTADOS.....                                                           | 28 |
| 4.1 Modelación del espejo .....                                                           | 28 |
| 4.2 Preprocesamiento.....                                                                 | 31 |

|                                                                                   |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.2.1 Creación de los materiales para la fabricación del espejo .....             | 31 |
| 4.2.2 Generación de Malla .....                                                   | 31 |
| 4.3 Procesamiento.....                                                            | 34 |
| 4.3.1 Simulación y Análisis Estructural: Contactos, fuerzas y restricciones ..... | 34 |
| 4.4 Análisis estructural dinámico.....                                            | 40 |
| 7. CAPÍTULO V: DISCUSIÓN.....                                                     | 44 |
| 8. Capítulo VI: CONCLUSIONES.....                                                 | 47 |
| 9. REFERENCIAS .....                                                              | 49 |

## **CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN**

### **1.1 Introducción al tema de memoria**

Los botes neumáticos PUMAR son diseñados y fabricados a mano por la empresa ASMAR, utilizando materiales de estándar militar. Existen de distintos tamaños, para distintas capacidades de carga máxima y cantidad de personas a bordo. Estos botes, también denominados botes de alta velocidad, están sometidos a distintos esfuerzos, debido a la acción de los motores, y al medio marino.

Debido a lo mencionado anteriormente, los materiales utilizados en la construcción de estos botes deben tener distintas propiedades tales como la resistencia a la abrasión producido por el contacto con agua de mar a altas velocidades, además, por su uso militar, deben tener resistencia a las temperaturas extremas, tanto muy altas como muy bajas, resistencia al fuego y a la radiación UV.

Estos botes militares de alta velocidad se utilizan en distintas operaciones costeras, incluyendo maniobras que requieren que los botes sean llevados hasta la orilla de la playa, donde la rapidez con la que arriban en la arena provoca también fuerzas dinámicas adicionales, debido al impacto con el suelo, además de la exposición con la arena, lo cual puede dañar parte de la superficie del espejo.

Los materiales utilizados en su fabricación varían según el modelo de cada bote, y son principalmente PVC para el verduguete, aluminio en la cubierta y la placa de anclaje del motor en el espejo, el espejo de madera terciada, y algunas piezas de acero inoxidable.

En la Figura 1 se pueden apreciar las distintas vistas del bote neumático PUMAR MI 585 Asalto, donde en la zona superior derecha, se muestra el espejo de este bote, el cual se encuentra en la parte trasera del bote, soportando el motor.

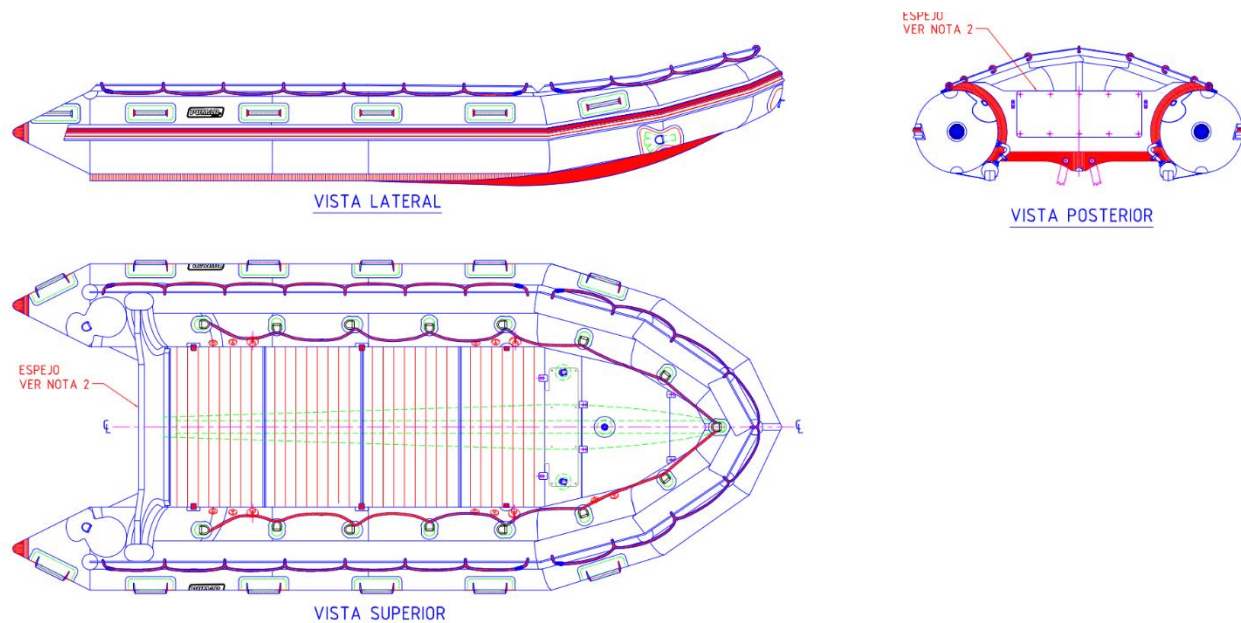


Figura 1 Esquema de bote neumático PUMAR MI 470 DANUBIO [1]

El espejo, es una parte fundamental en cualquier embarcación de este tipo, debido a que en esta pieza se ancla el o los motores, dependiendo de la potencia requerida en cada bote. Esto implica que, en esta sola pieza, actuarán una cantidad de esfuerzos significantes, lo cual la convierte en una zona muy propensa a fallas.

Actualmente, como se mencionó anteriormente, estos espejos son fabricados por ASMAR con madera terciada nativa, en tres formatos, de 40, 45 y 46 [mm] de espesor dependiendo de los requerimientos del bote. En este espejo pueden ir 1 o 2 motores anclados, los cuales tienen una masa entre 100 y 130 [kg] cada uno.

El problema actual que tiene ASMAR surge cuando se prohíbe la extracción de la madera nativa, por lo tanto, se debe buscar otro proveedor, dejando como única opción, la importación de esta madera, lo cual aumenta los costos de fabricación del bote, debido al costo de envío en relación con el proveedor anterior. De este problema surge la solución de reemplazar el material de fabricación, el cual debe suplir todas las necesidades mencionadas anteriormente para el uso de estos botes.

El material que se quiere utilizar en primera instancia es fibra de vidrio con resina, el cual se adapta muy bien a las condiciones de uso de este espejo, sin embargo, debido a que no se cuenta con las matrices para realizar espejos de distinto espesor, se ha decidido cambiar la propuesta de material a polímeros, específicamente el POM C (Polyacetal copolymer) y el Technyl poliamida

6, los cuales, se pueden conseguir mediante distribuidores en el país. Se analizarán estos 2 materiales con una simulación numérica utilizando el software ANSYS mediante método de elementos finitos, donde se pondrá a prueba la nueva pieza realizando un estudio tanto a nivel estático como dinámico con esta nueva pieza diseñada, la cual puede variar en espesor, dependiendo de su comportamiento frente al material anterior, logrando de esta manera poder reducir tanto el volumen como la masa del nuevo espejo a fabricar en el futuro y reduciendo los costos.

En esta simulación se deben tomar en cuenta distintos factores tanto para el material como para la misma modelación. Para el caso del material se deben tomar en cuenta principalmente, la abrasión, los esfuerzos a los que está sometido por las distintas cargas y la corrosión que se puede provocar en el ambiente marino. Mientras que para la modelación se considerarán las distintas cargas mediante el estudio dinámico y las distintas fuerzas producidas por el motor, tanto la fuerza producida por el peso de este en los puntos de anclaje del espejo, como la fuerza generada por el mismo motor al poner en marcha el bote.

Esta investigación es muy útil para estudios en la industria náutica, en caso de buscar un reemplazo de material de distintas piezas de alguna embarcación.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo general**

Proponer un material alternativo para la construcción del espejo de un bote PUMAR que cumpla con las condiciones de sollicitaciones mecánicas proporcionadas por el entorno marino y las exigencias operativas.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

- Evaluar el comportamiento mecánico estático y dinámico del espejo del bote PUMAR considerando la actual configuración de materiales del espejo y la nueva propuesta de material de fabricación.
- Comparar el comportamiento mecánico estructural estático y dinámico del espejo fabricado de madera terciada con el nuevo espejo fabricado de material polimérico parametrizando su espesor.

## **CAPÍTULO II: ANTECEDENTES BIBLIOGRÁFICOS**

Existen distintos estudios en donde se realizan simulaciones para embarcaciones y se analizan tanto del punto de vista estático como dinámico. En muchos de estos, se buscan mejoras mediante el cambio en las dimensiones de estos.

### **2.1 Estudio estructural estático del reemplazo de un espejo**

El primer antecedente [2] que se analizará es de un análisis estructural, donde se busca redimensionar el espejo de un bote con el fin de aumentar la potencia del motor EVINRUDE E90DSL de 90 HP a un motor EVINRUDE E130DSL de 130 HP, manteniendo la velocidad de giro de la hélice, por lo tanto, no se modifica la velocidad a la que opera el bote.

El bote estudiado en la investigación tiene un largo total de 4,52 metros, y es de tipo RIB “Rigid inflatable boat” al igual que los botes PUMAR fabricados por ASMAR. Para la simulación se utiliza el software COSMOS/M.

#### **2.1.1 Estructura y modelación del espejo inicial**

En la Figura 2 se muestra el espejo inicial con sus respectivas medidas, mientras que en la Figura 3 se muestra la estructura de este espejo, la cual está construida a partir de láminas de madera de teca y de láminas de GRP “Glass reinforced plastic”, conocido en español como plástico reforzado con fibra de vidrio o fibra de vidrio con resina.

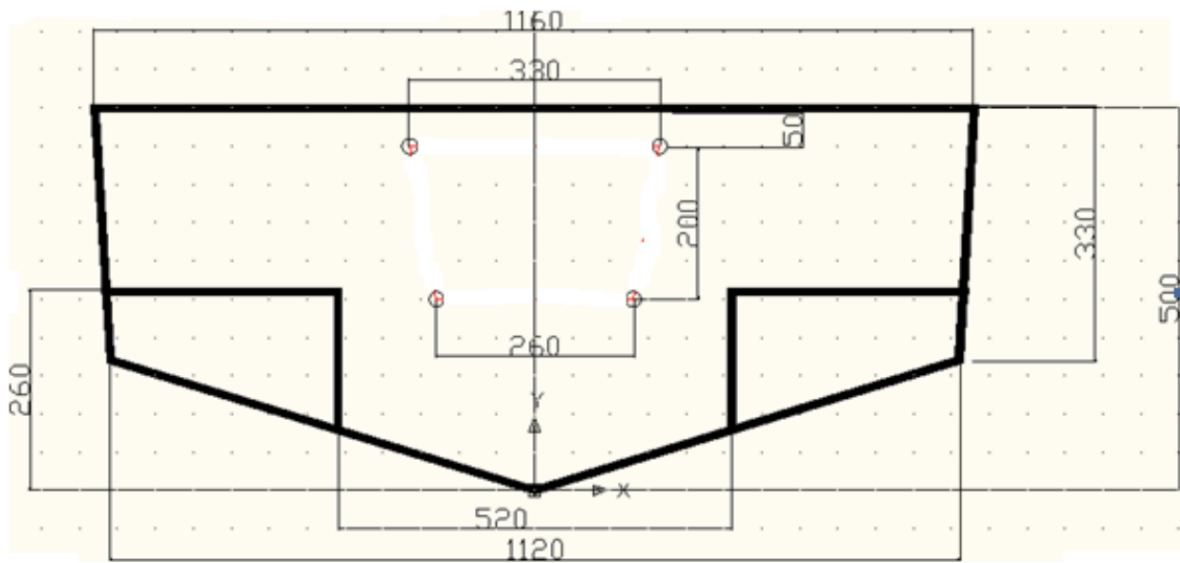


Figura 2 Espejo inicial [2]

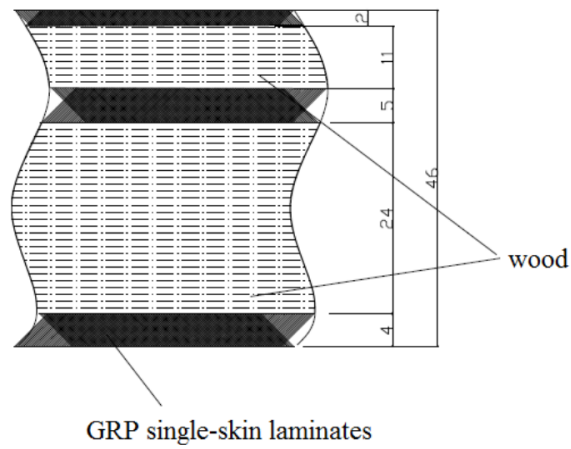


Figura 3 Estructura del material del espejo inicial [2]

Las propiedades de la madera, la fibra de vidrio y el acero que se utiliza más adelante para la construcción del nuevo espejo se muestran en la Tabla 1

Tabla 1 Propiedades de los materiales de construcción del espejo [2]

| Características               | Unidad de medida  | Madera de teca | GRP ISO-12215-5 | Acero inoxidable |
|-------------------------------|-------------------|----------------|-----------------|------------------|
| Módulo elástico E1            | MPa               | 10500 – 15600  | 45000           | 210000           |
| Módulo elástico E2            | MPa               | 3000           | 12000           | 210000           |
| Módulo elástico E3            | MPa               | 1000           | 10000           | 210000           |
| Coeficiente de Poisson 1      | -                 | 0.32           | 0.32            | 0.32             |
| Coeficiente de Poisson 2      | -                 | 0.08           | 0.32            | 0.32             |
| Coeficiente de Poisson 3      | -                 | 0.06           | 0.32            | 0.32             |
| Módulo de corte G             | MPa               | 5000           | 4800            | 80000            |
| Esfuerzo máximo de tracción   | MPa               | 95 – 155       | 95              | 400              |
| Esfuerzo máximo de compresión | MPa               | 48 – 91        | 95              | 400              |
| Esfuerzo máximo de flexión    | MPa               | 86 – 170       | 140             | 450              |
| Densidad                      | kg/m <sup>3</sup> | 400            | 1900            | 7800             |

En la Figura 4 se muestran las reacciones actuando sobre el espejo los cuales se definen como G1, G2, T, I y P. Tanto G1 como G2 corresponden al peso del motor que se representa en la Figura 4 en 2 puntos, uno superior y otro inferior. El valor de la fuerza peso G es de 1840 [N].

### 2.1.2 Diagrama de fuerzas del espejo y el motor

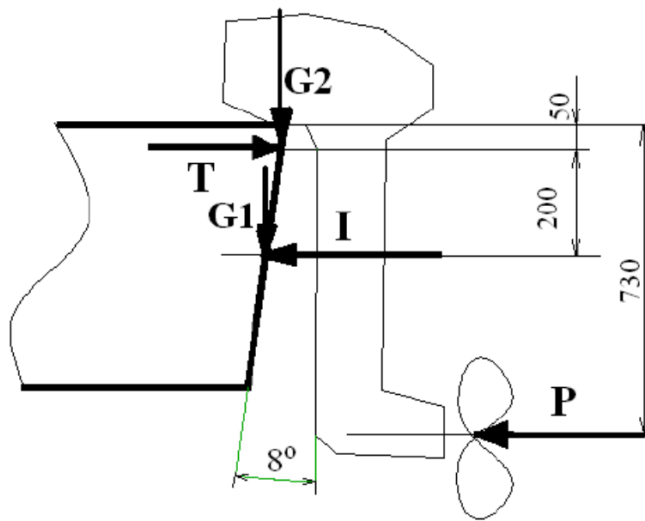


Figura 4 Diagrama de reacciones actuando en el espejo [2]

$$G1/2 = G2/2 = 460 \text{ N}$$

$$T/2 = 23935.35 \text{ N}$$

$$I/2 = 33935.35 \text{ N}$$

$$P = 20000 \text{ N}$$

Estos valores fueron calculados utilizando el software COSMOS/M, mediante el método de elementos finitos, con una cantidad de 14920 elementos y 16110 nodos.

En la Tabla 2 se tienen los resultados de la simulación en cada capa del espejo inicial ilustrado en la Figura 5, donde se entregó el valor del esfuerzo de Von Mises para cada uno de estos y se comparó con el esfuerzo permisible para la madera y el GRP. En esta figura se representa el esfuerzo en distintos colores, donde el valor más alto de esfuerzo se presenta en los puntos de apoyo de los motores en el espejo, y va disminuyendo en las zonas más alejadas a estos, llegando a un máximo de aproximadamente 60 [MPa]

Tabla 2 Esfuerzos de Von mises y permisibles para cada capa del espejo inicial con el nuevo motor de 130 HP [2]

| Capa | Espesor [mm] | Material | Esfuerzo equivalente (Von Mises) [MPa] | Esfuerzo permisible [MPa] |
|------|--------------|----------|----------------------------------------|---------------------------|
| 1    | 4            | GRP      | 68.36                                  | 47.0                      |
| 2    | 24           | Madera   | 42.78                                  | 47.5                      |
| 3    | 5            | GRP      | 49.77                                  | 47.0                      |
| 4    | 11           | Madera   | 44.91                                  | 47.5                      |
| 5    | 2            | GRP      | 77.01                                  | 47.0                      |

En la capa 1, 3 y 5 se excedió el esfuerzo permisible, esto quiere decir que, al utilizar el nuevo motor de 130 HP, el espejo podría no soportar la fuerza del nuevo motor. Al aplicar los distintos esfuerzos en el espejo, se tuvo una flexión máxima de 4.54 [mm] en el centro de este.

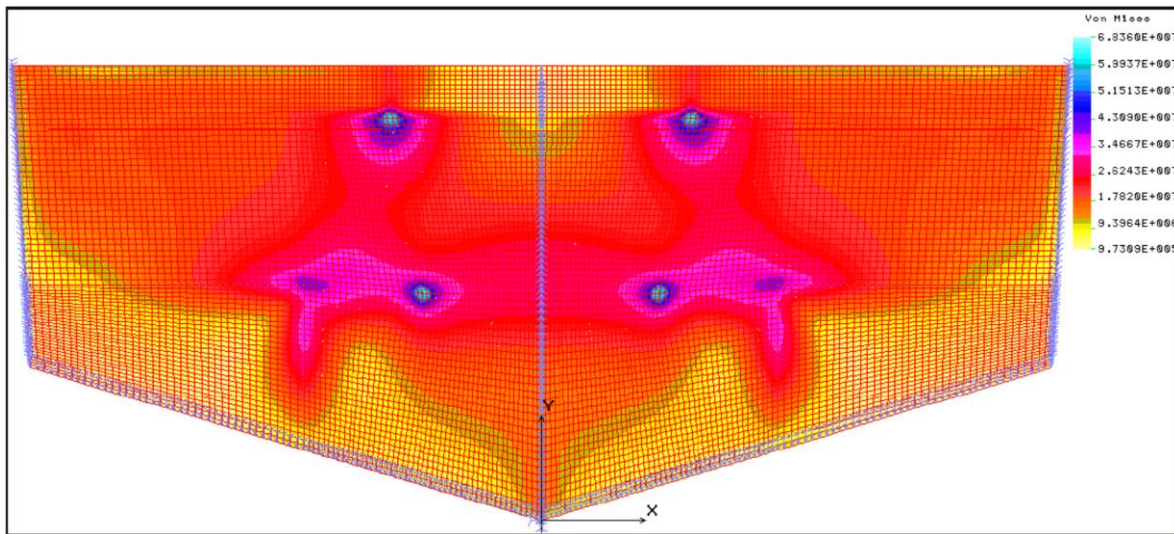


Figura 5 Diagrama de esfuerzos de Von Mises [Pa] en la primera capa del espejo inicial [2]

### 2.1.3 Estructura y modelación de nuevo espejo

Debido a que se excede el valor del esfuerzo permisible, se fabrica un nuevo espejo donde se aumenta el espesor agregando en ambos extremos capas de acero inoxidable de 5 [mm] como se muestra en la Figura 6.

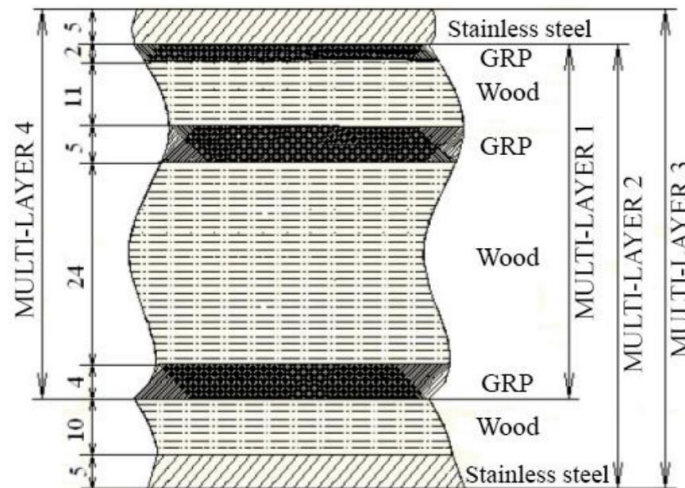


Figura 6 Capas del nuevo espejo [2]

Los resultados de esfuerzos de Von Mises se muestran en la Tabla 3, donde para el nuevo espejo, no se excede para ninguna capa el esfuerzo máximo permisible, por lo tanto, el nuevo diseño del espejo cumplirá con los requerimientos.

Tabla 3 Esfuerzos de Von mises y permisibles para cada capa del nuevo espejo con el nuevo motor de 130 HP [2]

| Capa | Espesor [mm] | Material | Esfuerzo equivalente (Von Mises) [MPa] | Esfuerzo permisible [MPa] |
|------|--------------|----------|----------------------------------------|---------------------------|
| 1    | 5            | Acero    | 68.87                                  | 200                       |
| 2    | 2            | GRP      | 7.48                                   | 47.0                      |
| 3    | 11           | Madera   | 10.80                                  | 47.5                      |
| 4    | 5            | GRP      | 8.22                                   | 47.0                      |
| 5    | 24           | Madera   | 21.79                                  | 47.5                      |
| 6    | 4            | GRP      | 17.51                                  | 47.0                      |
| 7    | 10           | Madera   | 47.35                                  | 47.5                      |
| 8    | 5            | Acero    | 40.48                                  | 200                       |

A continuación, en la Figura 7 se representa en 3D la flexión del nuevo espejo, con una flexión máxima de 0.19 [mm] localizada en el centro de este, donde se encuentran los puntos de anclaje del motor. El valor máximo de flexión del espejo inicial es de 4,54 [mm]

En la Figura 8 se tiene el diagrama de esfuerzos de Von Mises para la primera capa del nuevo espejo, es decir, la capa de acero inoxidable de 5 [mm] de espesor. En este diagrama se tiene un máximo de 68.87 [MPa] en las zonas inferiores de anclaje del motor, valor que no alcanza, ni se acerca al valor de esfuerzo permisible.

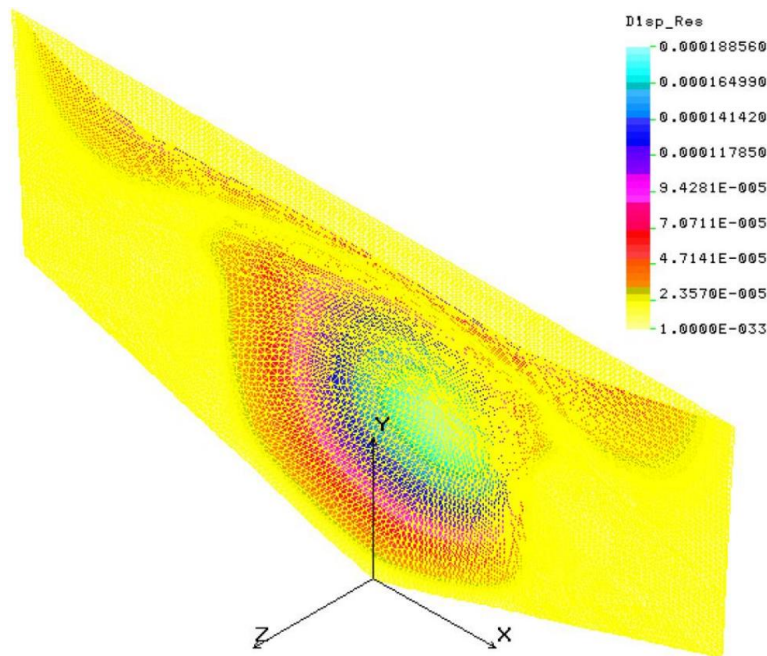


Figura 7 Representación en 3D de la deformación para el nuevo espejo [2]

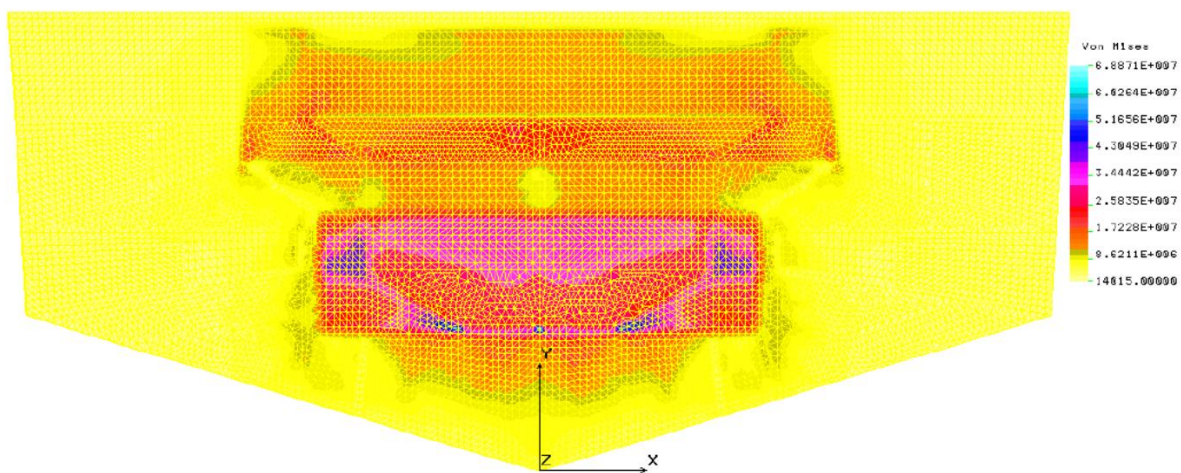


Figura 8 Diagrama de Von Mises [Pa] para la primera capa del nuevo espejo [2]

Finalmente, fue necesario aumentar el espesor del espejo para el cambio del motor, el cual posee una mayor potencia, agregando más capas tanto de madera y GRP, como una nueva capa de acero inoxidable en los extremos, haciendo así efectivo el cambio propuesto en este caso.

Se reporta en el artículo que, a 2 años de realizado el cambio en las dimensiones del espejo, no se han presentado problemas en el uso de este bote neumático, el cual no ha sufrido deformación permanente ni fracturas en ninguna zona del espejo.

## 2.2 Estudio estructural estático para distintos tipos de fibra de vidrio con resina

Para comprender el comportamiento de distintos materiales compuestos en el espejo de un bote, se analizó el espejo de un yate de alta velocidad mostrado en la Figura 9, mediante el software ANSYS utilizando el método de elementos finitos.

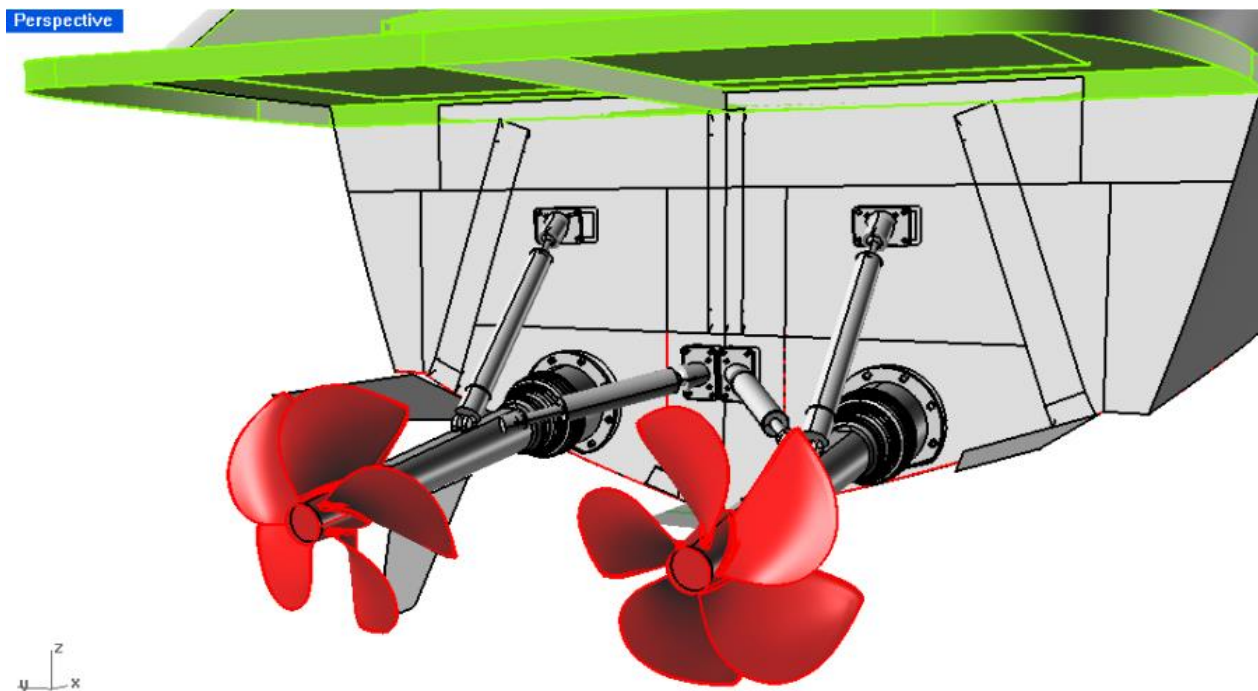


Figura 9 Modelo de espejo de yate de alta velocidad [3]

### 2.2.1 Estructura y modelación del espejo

La estructura de la embarcación completa fue diseñada mediante distintas capas. Para el diseño del espejo se utilizó para la primera capa, acero inoxidable, una segunda capa de fibra de vidrio  $0^\circ/90^\circ$ , una tercera capa de fibra de vidrio  $45^\circ$  y la última capa de fibra de vidrio  $0^\circ/90^\circ$ . Cada una de estas capas tiene un espesor de 19 [mm]. Luego, al igual que en el caso anterior, se realizó el mallado de este modelo, el cual se presenta en la Figura 10.

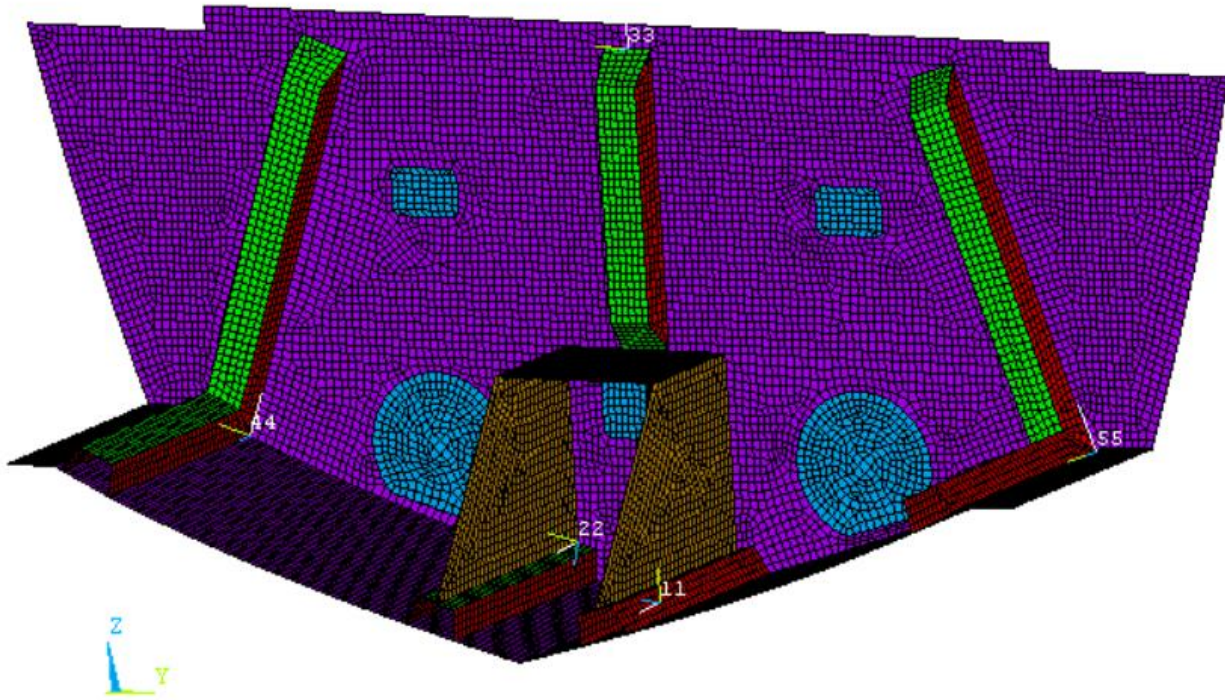


Figura 10 Mallado espejo de yate [3]

### 2.2.2 Diagrama de fuerzas del espejo y el motor

Para la simulación, se utilizó el diagrama de fuerzas aplicados sobre este espejo que muestra la Figura 11, donde se muestran las fuerzas aplicadas en los puntos de apoyo y la fuerza de propulsión del motor

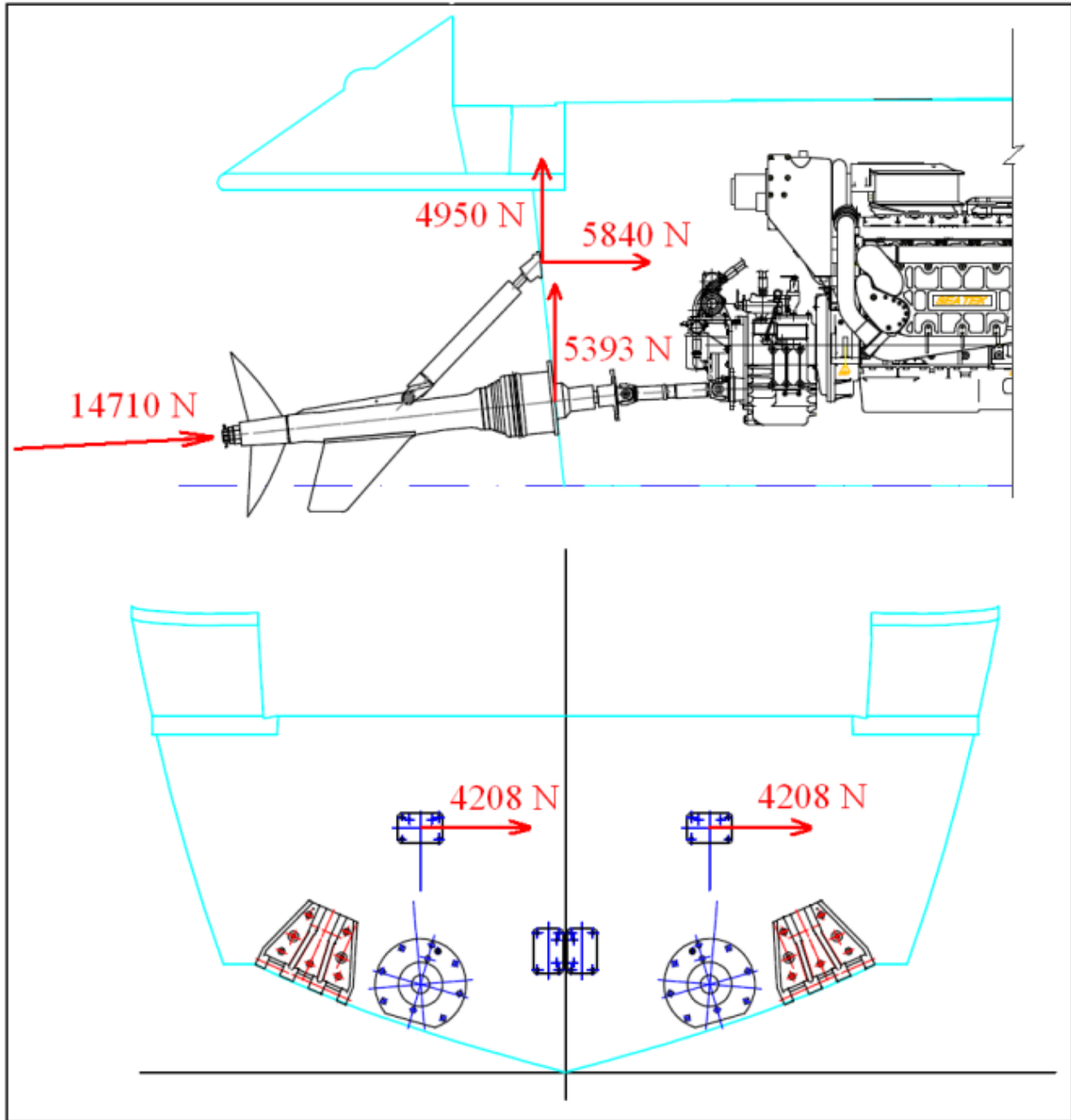


Figura 11 Diagrama de fuerzas en el espejo del yate [3]

### 2.2.3 Resultados: Esfuerzos de Von Mises y desplazamiento

Finalmente, para el post procesamiento, se midió tanto los esfuerzos de Von Mises para cada capa como el desplazamiento total de la estructura del espejo, es decir, de todas las capas juntas.

En la Figura 12 se muestra el desplazamiento total del espejo, donde se tiene que el máximo valor de desplazamiento corresponde a 19 [mm] aproximadamente. Este valor está dentro del rango esperado.

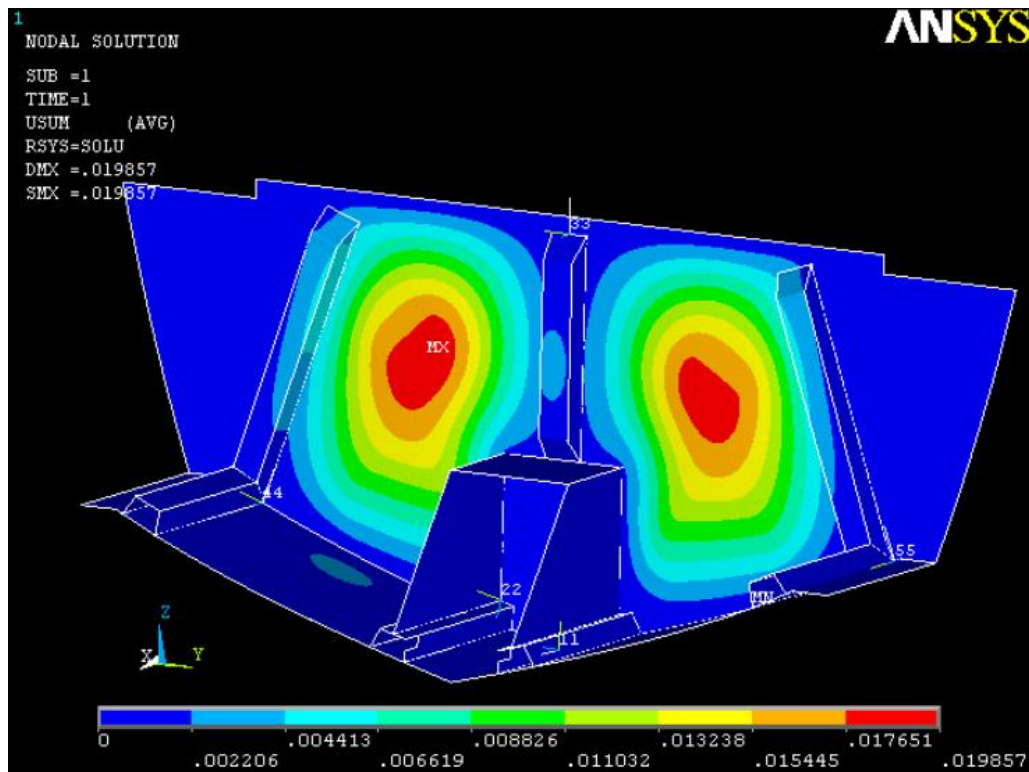


Figura 12 Desplazamiento total [m] [3]

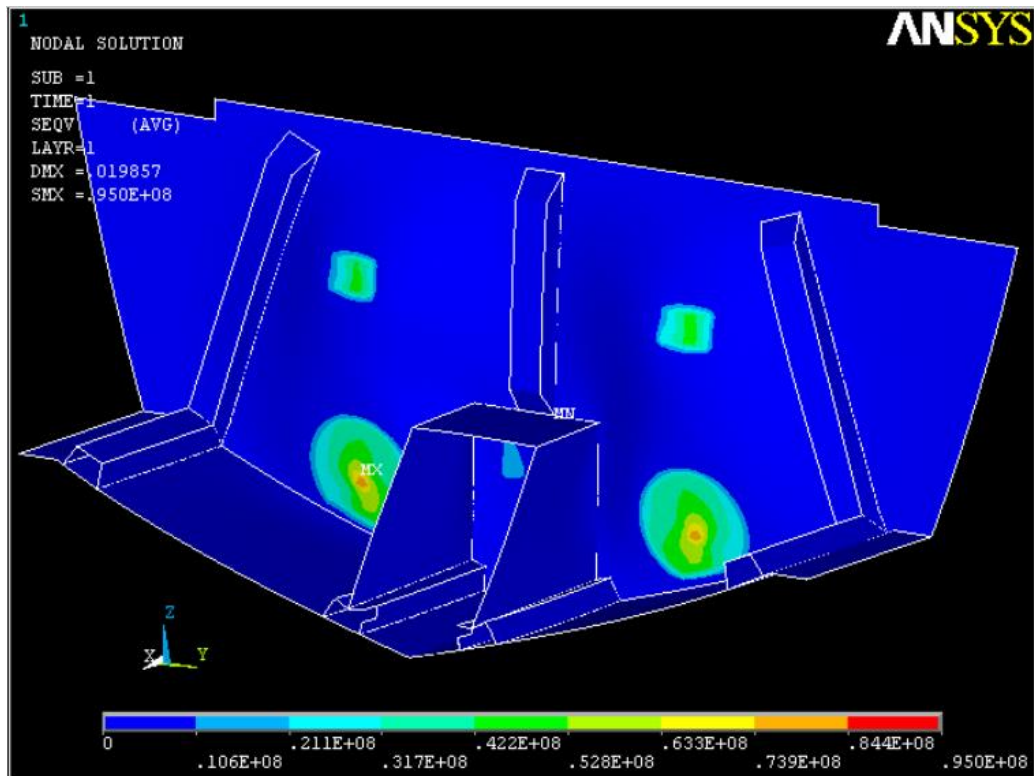


Figura 13 Distribución de esfuerzos de Von Mises en la capa 1 [Pa] [3]

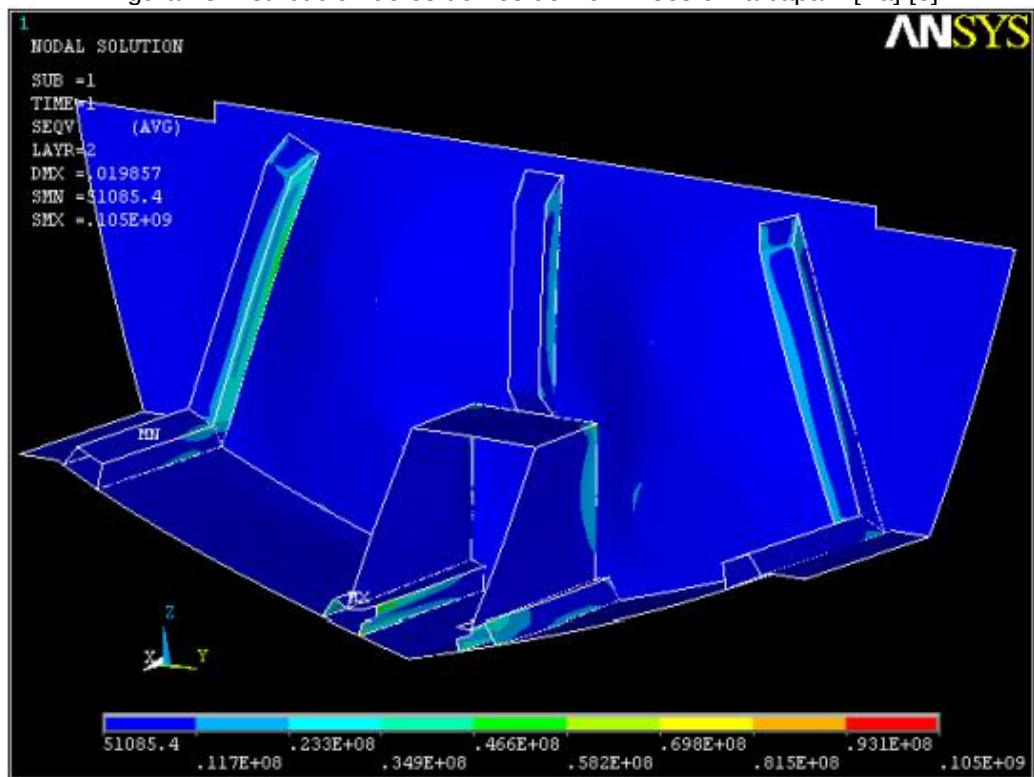


Figura 14 Distribución de esfuerzos de Von Mises en la capa 2 [Pa] [3]

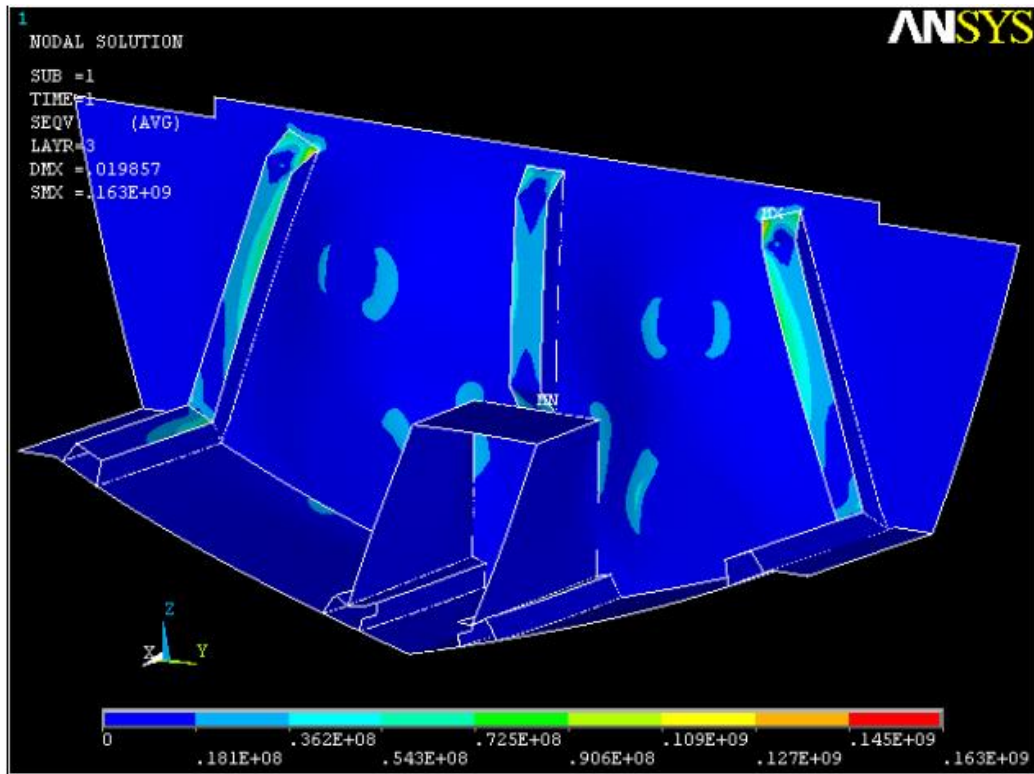


Figura 15 Distribución de esfuerzos de Von Mises en la capa 3 [Pa] [3]

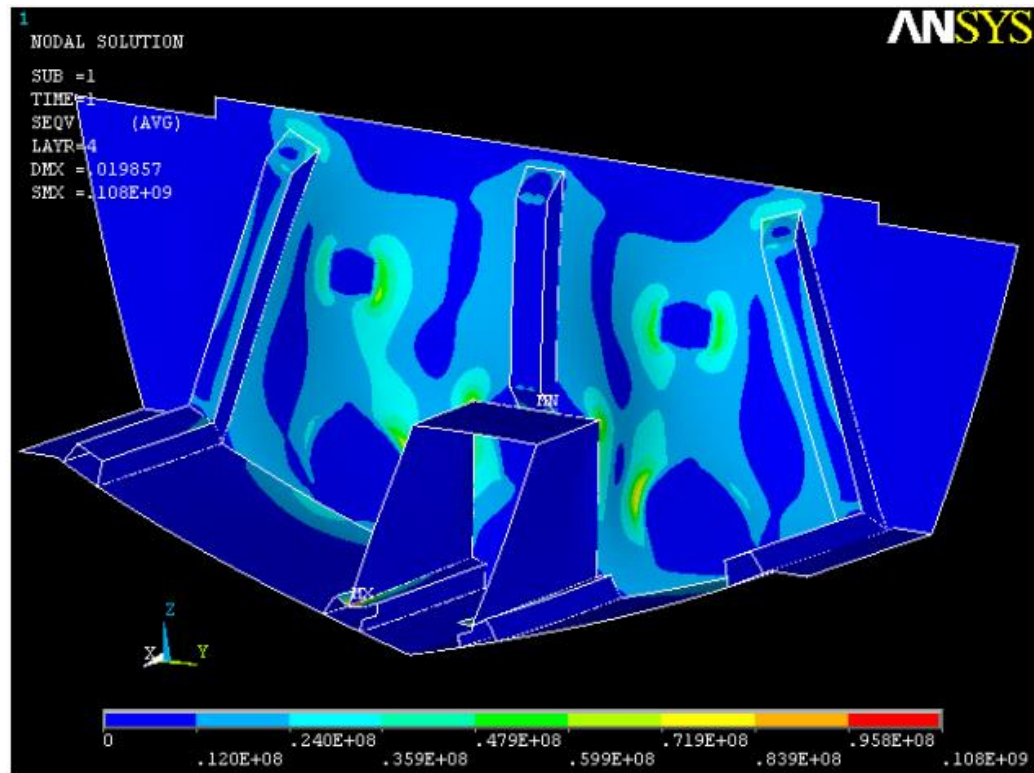


Figura 16 Distribución de esfuerzos de Von Mises en la capa 4 [Pa] [3]

### 2.3 Estudio estructural dinámico

Los espejos de los botes, además de estar sujetos a distintos esfuerzos generados por el motor, también hay otros factores del entorno, como el contacto con el agua de mar, el cual, en este caso al tratarse de un bote de alta velocidad se generan distintos fenómenos dinámicos. Es por esto que es necesario realizar un estudio dinámico del bote a su velocidad de operación en el mar.

En el estudio dinámico del casco de un barco mediante distintos modelos CFD (Computational Fluid Dynamics) [4], se analizan distintos aspectos hidrodinámicos variando parámetros para comparar los resultados obtenidos.

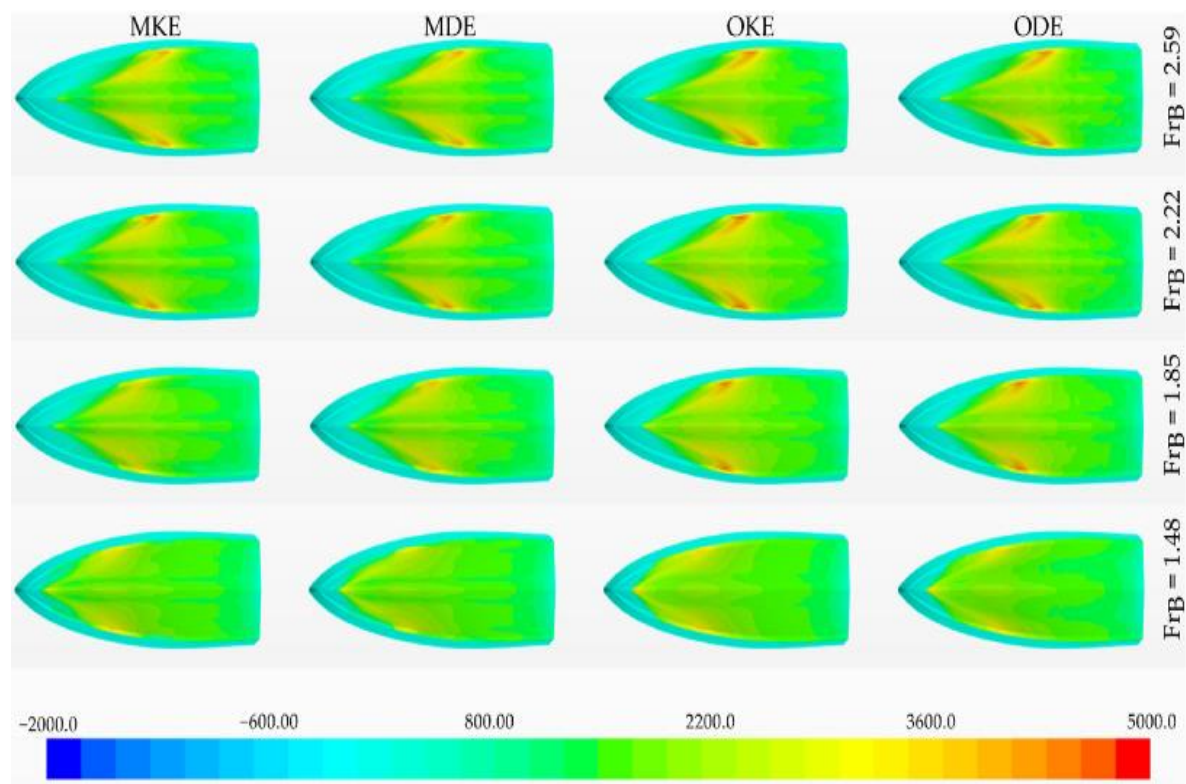


Figura 17 Presión hidrodinámica [Pa] para cada modelo de mallado [4]

### 2.3.1 Análisis de distintos fenómenos actuando alrededor del bote

Al tratarse de un bote de alta velocidad, existen variaciones en el nivel del agua de mar que rodea al bote. Como se muestra en la Figura 18, se tienen valores positivos que corresponden a elevaciones en el nivel del mar alrededor del bote, como valores negativos, que corresponden a una disminución del nivel del mar, específicamente en la zona trasera del bote, justo detrás del espejo debido a la acción del motor.

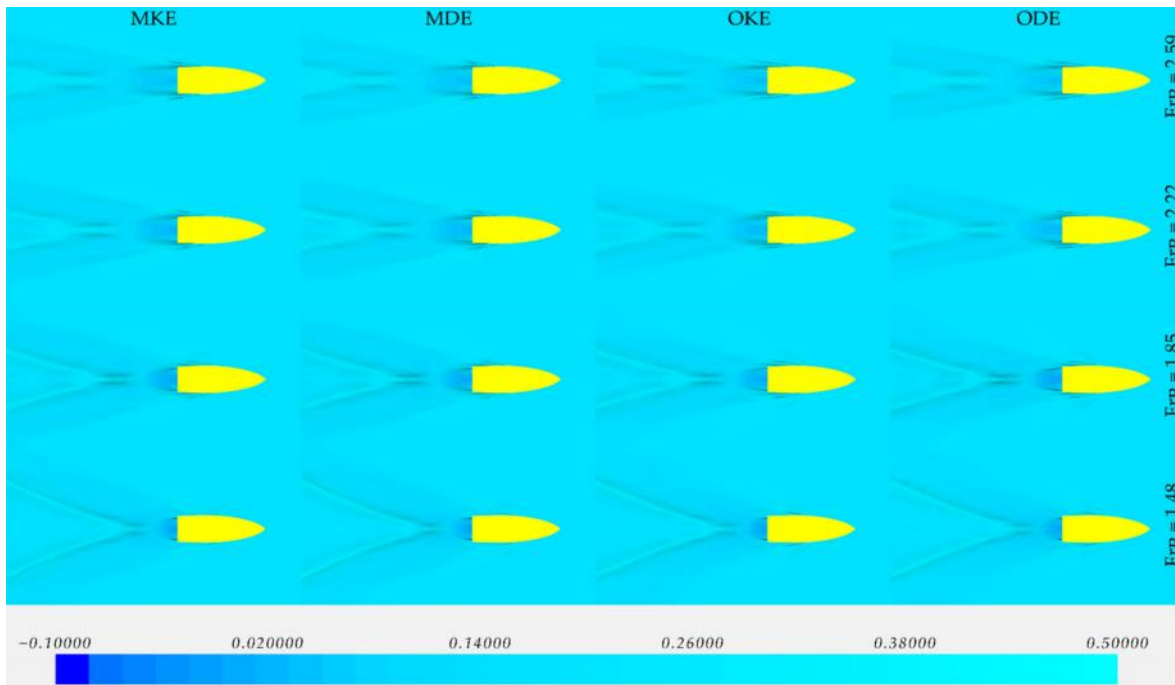


Figura 18 Variación en la superficie del agua [m] a distintas velocidades [4]

El motor, al impulsar una gran cantidad de agua detrás del bote, genera una vorticidad que afecta directamente al espejo del bote, al ser la zona más cercana al motor. La Figura 19 muestra la representación de la vorticidad generada a distintas velocidades, la cual se debe analizar al momento de considerar el comportamiento dinámico del espejo del bote en la simulación a realizar en ANSYS.

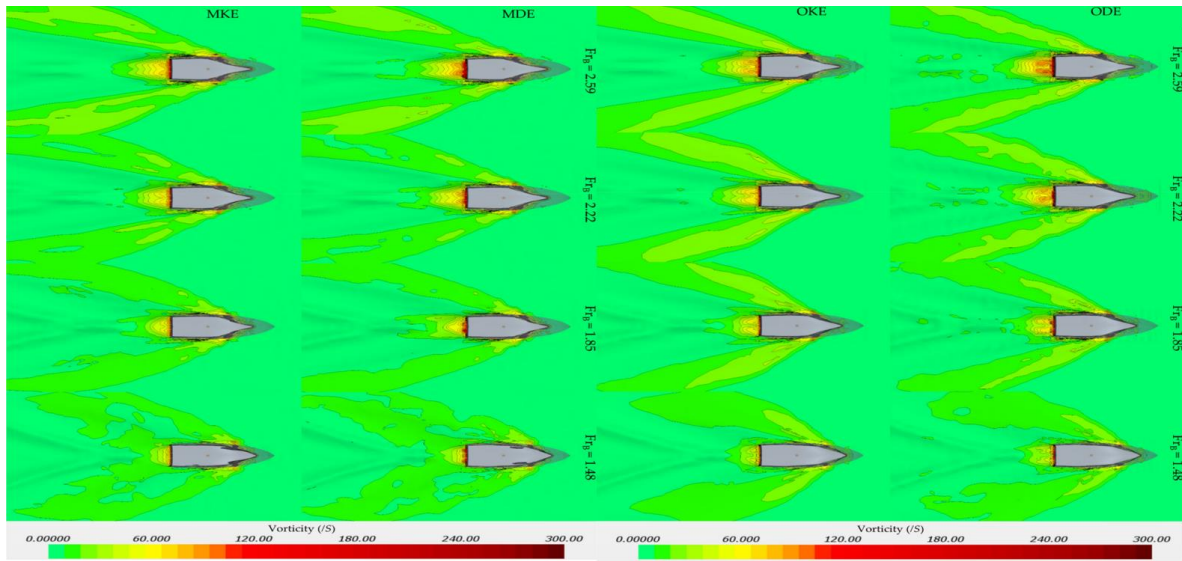


Figura 19 Vorticidad generada por el motor [1/S] a distintas velocidades [4]

## CAPÍTULO III: METODOLOGÍA DE TRABAJO

### 3.1 Modelación del espejo

Para poder realizar la simulación se deben identificar los factores a analizar, en este caso se analizará el comportamiento del espejo del bote neumático PUMAR tanto a nivel estático como a nivel dinámico. Para esto se debe, en primera instancia, diseñar el espejo del bote con las medidas especificadas en el documento entregado por ASMAR. Este se realizará mediante la herramienta de diseño SpaceClaim de Ansys.

### 3.2 Preprocesamiento

#### 3.2.1 Creación de los materiales para la fabricación del espejo

Una vez que se diseña el espejo, se debe seleccionar el material utilizado para la fabricación de botes PUMAR actualmente, donde se utilizarán las distintas propiedades mecánicas de este, como el módulo de elasticidad en las distintas direcciones, módulo de corte, coeficiente de Poisson, etc. [5]

Se debe considerar, al momento de aplicar las propiedades, que la madera es un material ortotrópico, es decir, las propiedades mecánicas son distintas dependiendo de cada una de sus direcciones perpendiculares entre ellas como se muestra en la Figura 20.

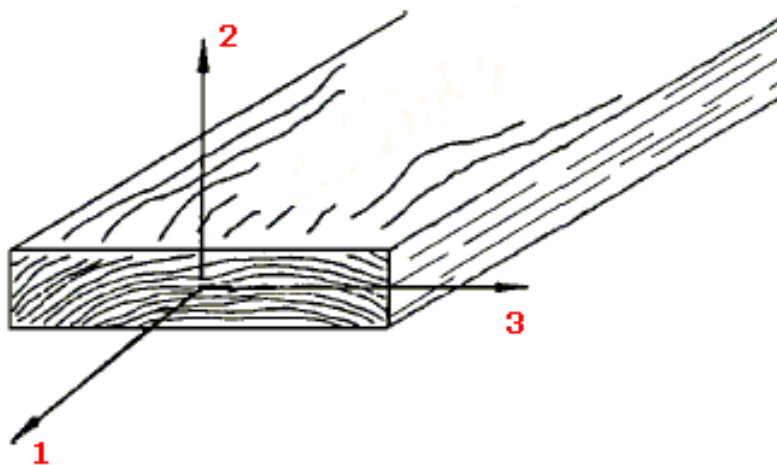


Figura 20 Ejes perpendiculares en madera [6]

Por sugerencia de la empresa ASMAR, los nuevos materiales a utilizar corresponden a Technyl y POM C, con el propósito de crear estos materiales poliméricos, se utilizará la información de los distintos proveedores en Chile acerca de las propiedades mecánicas de estos materiales,

para así poder realizar las simulaciones tomando en cuenta distintas opciones, considerando también, las propiedades químicas y térmicas de estos materiales bajo las condiciones específicas deseadas.

Para la creación de la madera, también se utilizará información bibliográfica acerca de sus propiedades mecánicas necesarias para realizar la simulación. Esta información se comparará con la información entregada por ASMAR, la cual consta de un ensayo de flexión realizado para distintas probetas de madera de 40, 45 y 46 [mm] bajo la norma EN310-93. No se utilizará solamente la información entregada por la empresa, ya que, para los requerimientos del software, la información no es suficiente, por lo que se complementará con los datos obtenidos de bibliografía para las placas de madera terciada de Okoume.

### **3.1.2 Generación de malla**

Con los materiales ya fabricados, se genera una malla apropiada para el análisis posterior, que cumpla con un estándar de calidad determinado por el método de “Element Quality” y “Skewness”

Es estrictamente necesario disponer de una buena malla, debido a que todas las condiciones establecidas como fijar las superficies, contactos, análisis de esfuerzos y deformación, se aplican sobre esta malla, la cual cuenta con nodos y elementos. Cada nodo de esta malla transmite la información a los nodos adyacentes, por lo tanto, se debe tener un tamaño de malla apropiado, en especial en las zonas donde puede haber una mayor cantidad de concentradores de esfuerzos, tales como las uniones del espejo con el bote, los puntos de anclaje del motor en el espejo o las geometrías muy pronunciadas.

Una vez creada la malla, se puede realizar el análisis estructural para el espejo fabricado con ambos materiales. Se debe tener en cuenta las condiciones de contorno, donde se deben definir los tipos de contacto entre las distintas piezas, como también las superficies fijas, y los esfuerzos aplicados en las distintas zonas del espejo por la acción del motor, donde se debe considerar la potencia del motor y el peso en los distintos puntos de anclaje.

## **3.2 Post procesamiento**

### **3.2.1 Análisis de esfuerzos de Von Mises y desplazamiento total**

Finalmente, en el post procesamiento, se debe realizar un análisis de los esfuerzos actuando en la pieza mediante el criterio de Von Mises, donde se entregará el esfuerzo máximo y la zona donde se encuentra este esfuerzo máximo.

El esfuerzo de Von Mises se utiliza como referencia para determinar la falla de un material dúctil. Este criterio toma en cuenta tanto el esfuerzo normal, como el esfuerzo cortante en todas las direcciones.

También se evaluará la deformación total al momento de aplicar estos esfuerzos con el fin de poder visualizar de manera más directa la acción de los distintos esfuerzos en el espejo del bote.

Luego de este análisis final, se puede volver a realizar el mismo procedimiento con un espesor distinto el cual puede ser menor en caso de que el valor del esfuerzo de Von Mises esté muy por debajo del esfuerzo permisivo del material. En caso de que el esfuerzo de Von Mises sobrepase el esfuerzo permisivo del material compuesto, una posible solución es aumentar el espesor del espejo diseñado.

## **3.3 Análisis estructural dinámico**

### **3.3.1 Factores a considerar en análisis estructural dinámico**

En el estudio dinámico, se empleará la herramienta de simulación de Ansys “Transient Structural” para analizar el comportamiento del espejo del bote en respuesta a cargas dinámicas, en contraste con el análisis estático previamente realizado. A diferencia del estudio estático, que examina el equilibrio de fuerzas en condiciones de reposo, el análisis dinámico considera las fuerzas que varían con el tiempo, como las generadas por la operación del motor, las olas o los movimientos del bote.

En primer lugar, se deben considerar las fuerzas dinámicas generadas por la operación del motor que ya se consideraron en el estudio estático, que corresponden a la fuerza ejercida por la hélice y el peso del motor, además de poder examinar posibles fuerzas externas como vibraciones o movimientos del bote. Además, se considerará la fuerza ejercida por el mar sobre la superficie sumergida del espejo.

Estos factores permitirán analizar y observar la respuesta transitoria del espejo frente a cambios en las condiciones de carga, proporcionando una visión más completa de su comportamiento en este medio.

Se utilizará la misma configuración de malla tanto para el análisis estático como para el dinámico, por lo tanto, no es necesario modificar ningún parámetro.

Al ser un estudio dinámico, es necesario especificar distintos parámetros de tiempo antes de realizar la simulación, tales como el tiempo de simulación, el número de pasos y distintos periodos de tiempo, estos se deben manejar en un rango donde se tenga un equilibrio entre el tiempo computacional y la calidad de los resultados entregados.

## CAPÍTULO IV: RESULTADOS

### 4.1 Modelación del espejo

El diseño del espejo se llevó a cabo mediante la herramienta de Ansys “SpaceClaim”, una plataforma de modelado 3D que permite la creación de geometrías complejas. Este proceso se basó en planos suministrados por la empresa para el caso particular del espejo del bote “MI 585 A” que se muestra en la Figura 21, los cuales detallan medidas generales, ángulos y los agujeros de la zona inferior.

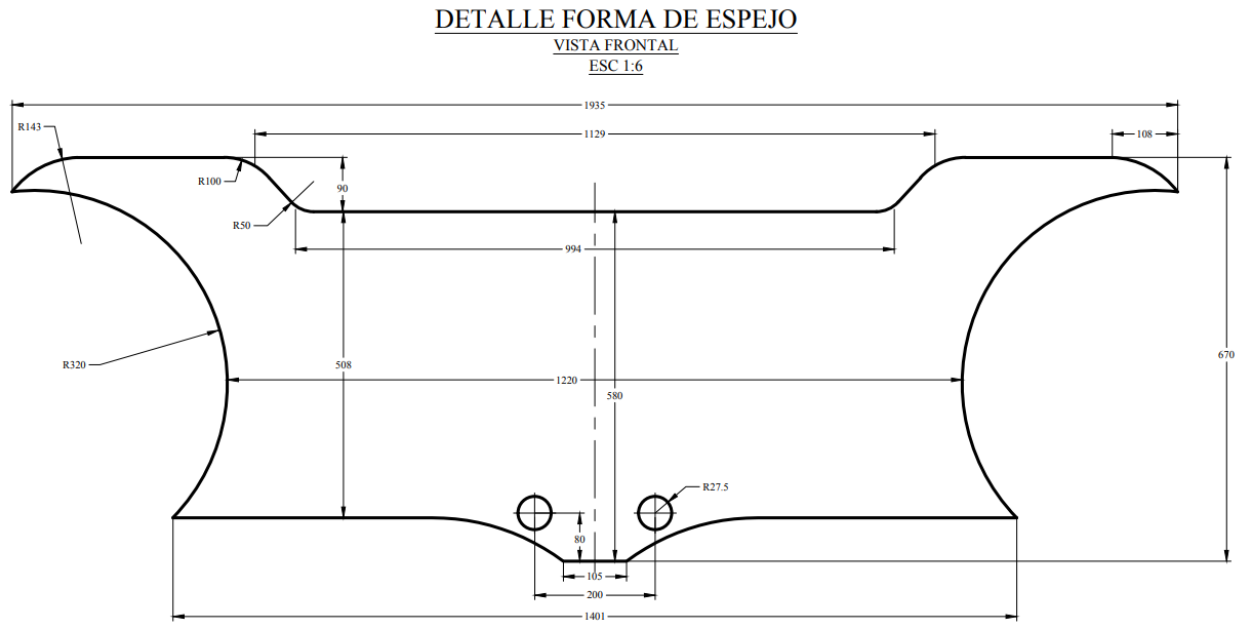


Figura 21 Plano general medidas espejo de bote PUMAR MI 585 A, vista frontal [7]

En la Figura 22 se especifican las medidas de las placas de 3 milímetros de espesor de acero inoxidable 316L, las cuales van en ambas caras del espejo con pernos avellanados pasantes AC AISI-316L de cabeza hexagonal  $\frac{1}{4}$ " x  $2\frac{1}{2}$ ".

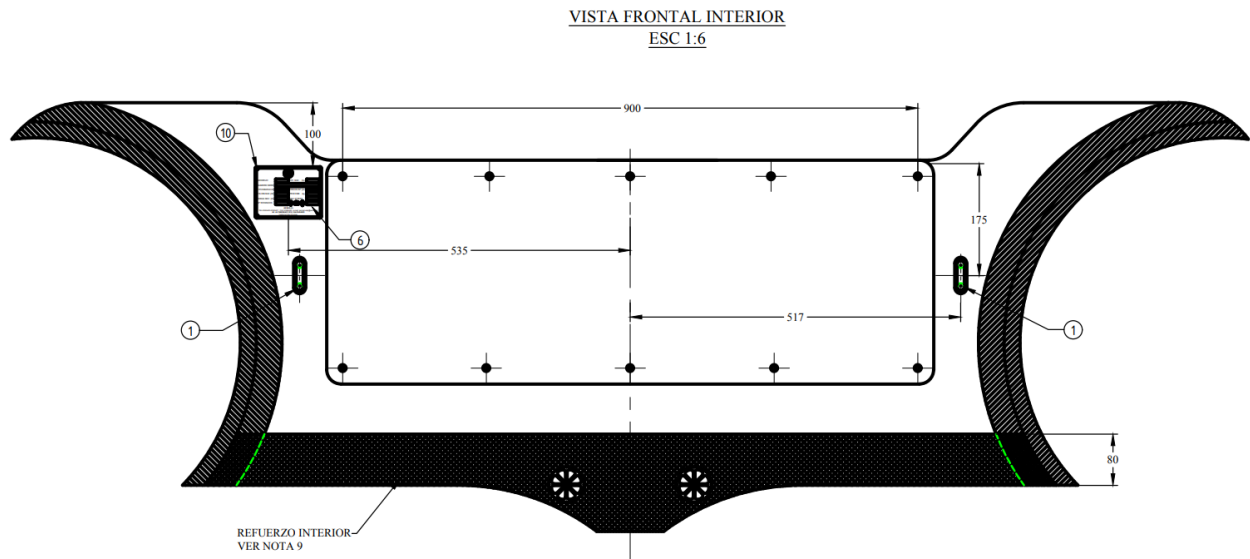


Figura 22 Detalles medidas placas de acero 316L para espejo de bote PUMAR MI 585 A, vista frontal interior [7]

Adicional a esta información proporcionada por ASMAR, se tomaron medidas directas en los talleres de montaje de los motores en los espejos, esto con el fin de poder construir el soporte que se apoya en el espejo, que es donde se aplicarán las fuerzas provocadas por el motor en la simulación.



Figura 23 Medidas apoyo soporte de motor Mercury SeaPro 60 HP

Con toda la información obtenida, se construyó mediante SpaceClaim el modelo que será utilizado tanto para el estudio estático y dinámico que se puede apreciar en la Figura 24. Este mismo modelo se realizó tanto en 40 [mm], 38 [mm] y 36 [mm] de espesor para poder analizar su comportamiento posteriormente.

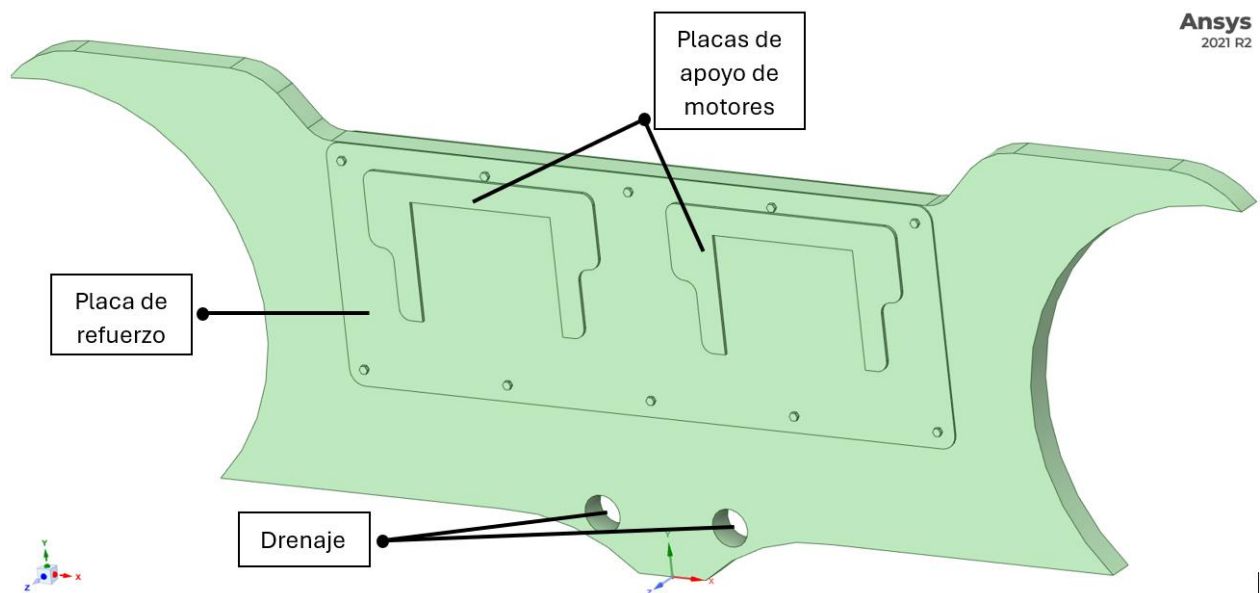


Figura 24 Diseño final espejo

## 4.2 Preprocesamiento

### 4.2.1 Creación de los materiales para la fabricación del espejo

Los materiales utilizados en el estudio fueron seleccionados mediante una búsqueda de distribuidores en Chile de los polímeros “Technyl” [8] y “POM C” [9]. Las fichas técnicas de estos materiales proporcionaron información crucial sobre sus propiedades mecánicas, que fueron incorporadas a la biblioteca de Ansys para su posterior uso en las simulaciones. Mediante el mismo proceso, se agregó el acero inoxidable 316 L [10]

Respecto a la madera, se empleó una opción suministrada por ASMAR. Este proceso aseguró que los materiales utilizados en las simulaciones estuvieran debidamente caracterizados y representaran con precisión las propiedades mecánicas de los materiales reales.

Todos los valores de las propiedades mecánicas pertinentes se encuentran en la Tabla 4.

Tabla 4 Propiedades mecánicas de materiales utilizados

| Propiedad                            | Unidad de medida  | Madera Okoume | Technyl | POM C  | Acero inoxidable 316L |
|--------------------------------------|-------------------|---------------|---------|--------|-----------------------|
| Módulo elástico (E)                  | MPa               | 5400          | 1372,9  | 2800   | 193000                |
| Coeficiente de Poisson               | -                 | 0,3           | 0,35    | 0,29   | 0,3                   |
| Módulo de compresión                 | MPa               | 4500          | 1525,5  | 2300   | 160830                |
| Módulo de corte                      | MPa               | 2076,9        | 508,49  | 1079,3 | 74231                 |
| Resistencia a la tracción (Fluencia) | MPa               | 35,7          | 44,1    | 67     | 205                   |
| Esfuerzo máximo de tracción (UTS)    | MPa               | -             | -       | 67     | 485                   |
| Densidad                             | kg/m <sup>3</sup> | 703           | 1140    | 1410   | 7980                  |

### 4.2.2 Generación de Malla

La calidad de la malla desempeña un papel crucial en la precisión de los resultados obtenidos durante la simulación estructural. Una malla bien generada garantiza que el comportamiento mecánico del espejo para los distintos materiales sea lo más fiel posible a la realidad permitiendo una evaluación realista de los esfuerzos y deformaciones de las distintas partes del espejo.

Además de esto, la calidad de la malla también influye en la eficiencia computacional del análisis, debido a esto, una malla muy refinada, si bien permite resultados correctos, aumenta exponencialmente el tiempo de cálculo, por lo tanto, se busca un equilibrio entre los distintos parámetros de calidad de la malla.

El método de criterio para determinar la calidad de la malla fue el de “Element Quality”, donde se alcanzó un máximo de aproximadamente 81%. Otro parámetro utilizado para determinar es el Skewness, el cual es una herramienta de calidad que evalúa la uniformidad de los ángulos entre los nodos de la malla. Mientras menor es el valor de este parámetro, sugiere una malla de mejor calidad, siendo así un caso idea cuando este parámetro toma el valor de 0, en caso contrario, si se tiene un valor muy alto puede indicar la necesidad de mejorar la discretización de la geometría de la malla para obtener resultados más precisos en el análisis estructural, es por esto que se ha escogido un valor entre 0,2 y 0,25.

Se probaron distintas opciones mostradas en la Tabla 5, donde varía el tamaño de la malla general, y un mallado especial (Sizing) para los 10 pernos de 2 [mm], debido a que con un tamaño de malla igual a 8 o 10 [mm] no se alcanzó a cubrir bien la superficie de estos al ser muy pequeños.

Tabla 5 Configuraciones de calidad según tamaño de malla

| N° Prueba | Tamaño malla general [mm] | Tamaño malla pernos [mm] | Element Quality | Skewness | Nodos     |
|-----------|---------------------------|--------------------------|-----------------|----------|-----------|
| 1         | 10                        | 2                        | 81,4%           | 0,262    | 1.154.101 |
| 2         | 8                         | 7                        | 81%             | 0,26     | 1.170.310 |
| 3         | 8                         | 5                        | 81,5%           | 0,259    | 1.225.026 |
| 4         | 8                         | 3                        | 81,3%           | 0,257    | 1.461.116 |
| 5         | 8                         | 2                        | 81,6%           | 0,255    | 1.577.968 |
| 6         | 10                        | 10 (Sin aplicar Sizing)  | 81,1%           | 0,265    | 1.130.345 |

Si bien los resultados para la calidad de malla según el parámetro de Element Quality y Skewness no varían mucho cambiando el tamaño de malla, se mantuvo los tamaños ocupados en la prueba 5, debido a que con estos se obtuvo la mejor calidad sin tener una cantidad excesiva de nodos que genere una complicación en el tiempo de respuesta del software en el análisis posterior.

Se prestó atención a la variación del parámetro “Span Angle Center”, que desempeña un papel importante en la generación de la malla. Este parámetro determina el ángulo de los elementos que conforman la malla, particularmente en superficies curvas. Al ajustar el ángulo de los elementos, se puede mejorar la geometría y la calidad de la malla. Se puso énfasis en este

parámetro en particular debido a la cantidad de curvas que contiene el diseño. Las distintas pruebas variando este parámetro se aprecian en la Tabla 6.

Tabla 6 Variación parámetro de malla Span Angle Center

| N° Prueba | Span Angle Center | Element Quality | Nodos     |
|-----------|-------------------|-----------------|-----------|
| 1         | Coarse (Grueso)   | 81,6%           | 1.577.968 |
| 2         | Medium (Medio)    | 81,6%           | 1.718.046 |
| 3         | Fine (Fino)       | 81,7%           | 3.321.548 |

Al variar muy poco la calidad de la malla con las distintas opciones de este parámetro nos da el indicio de que los elementos finitos de esta malla tienen una buena calidad y geometría, por lo que se utilizó este parámetro en “Medium”, debido a que la cantidad de nodos aumenta casi al doble al utilizar la opción “Fine”, lo que aumentaría demasiado el tiempo de respuesta del software.

Si bien no hay prácticamente diferencia en la calidad de la malla con cada una de estas opciones, este parámetro influye en gran medida en la forma que adopta la malla en las zonas curvas del diseño, por lo tanto, no se utilizó “Coarse” ya que el espejo cuenta con diversas regiones curvas, que necesitan ser bien representadas.

Finalmente, la malla que se utilizó para el análisis estructural estático del espejo es la que se puede apreciar en la Figura 25.

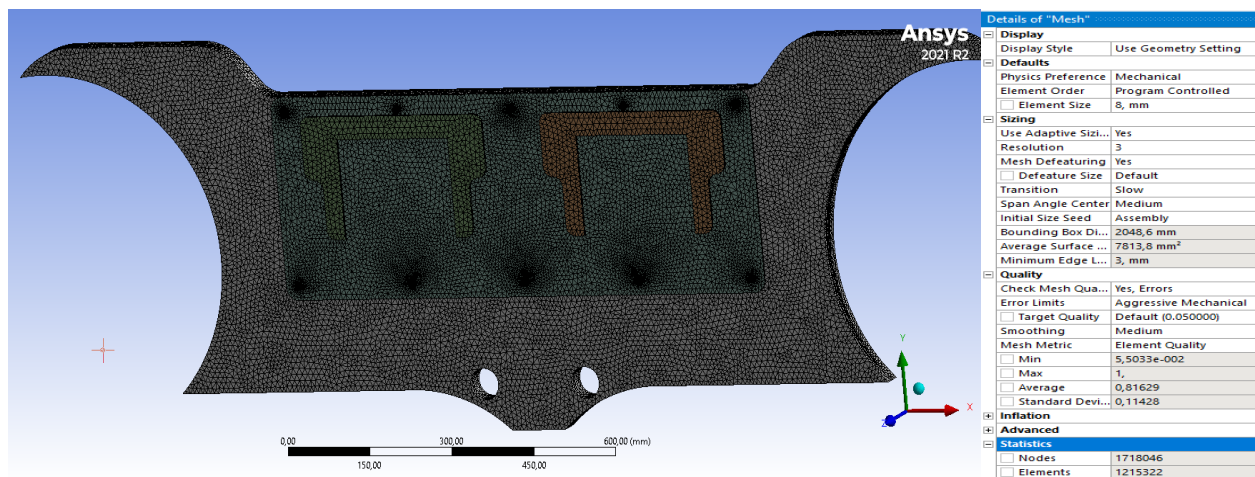


Figura 25 Malla final espejo 40 [mm]

## 4.3 Procesamiento

### 4.3.1 Simulación y Análisis Estructural: Contactos, fuerzas y restricciones

En esta parte del estudio, se aborda la simulación del comportamiento estructural del espejo del bote, centrándose en la configuración de cargas (fuerzas), restricciones y contactos. La metodología empleada para la simulación considera la aplicación de fuerzas externas generadas por ambos motores, la implementación de restricciones fijas en áreas específicas y la modelación de contactos que existen entre las distintas piezas, tales como los pernos, los soportes de los motores, las placas de acero inoxidable 316L y el espejo. Esta herramienta de Ansys, permite definir el tipo de contacto entre estos, dando distintas opciones dependiendo de la interacción que queramos dar a estas piezas entre sí.

Primero, se debe comenzar por los contactos, los cuales si bien, se pueden realizar manualmente, se ha utilizado la función de Ansys para generar contactos automáticos entre sus piezas, generando así 30 contactos, entre los cuales se toman en cuenta tanto vértices como caras de distintas piezas que se encuentran en contacto, como por ejemplo los 6 vértices de parte hexagonal de los pernos, con una de las placas, otro contacto para los 6 vértices de la tuerca de el mismo perno con la otra placa, repitiendo esto para cada perno, además de los pernos pasantes de las placas de ambos motores, y los contactos entre las placas y pernos con el espejo.

Existen distintas opciones de formulación para utilizar en estos contactos, tales como Bonded, Frictionless, entre otros. En este caso se ha utilizado Frictional para todos los contactos, lo cual permite definir un factor de coeficiente de roce estático entre las piezas, pudiendo definir un factor entre 0 y 1, donde 0 significa que no existe fricción, y 1 donde la fricción es tan alta que no existe el deslizamiento entre las piezas. El coeficiente apropiado para este tipo de contactos como el de un perno es entre 0 y 0,2 lo cual se considera bajo y se utiliza para situaciones donde hay una pequeña cantidad de fricción deseada, pero aún se permite cierto deslizamiento, por lo tanto, se asignó un valor de 0,15.

La única restricción que existe para este modelo es el contacto de las partes laterales del espejo, las cuales van pegadas a la estructura de goma del bote, para generar esta restricción de movimiento, se utilizó en estas caras exteriores la condición de “Displacement”, la cual permite restringir el movimiento traslacional y rotacional de la pieza en uno, dos o tres ejes, para que no tenga movimiento independiente de las fuerzas aplicadas. En este caso se restringió el movimiento en el eje X e Y, y se permitió un máximo de 1 [mm] en el eje Z, debido al pequeño

movimiento que existe en el espejo en la práctica debido a la fuerza del motor y a la flexibilidad de la tela a la que va anclado el espejo.

Finalmente, se debe aplicar la fuerza ejercida por las hélices de los motores y por el peso de cada uno, para esto, se utilizó tanto un estudio realizado por ASMAR, como la información del motor entregada por la misma empresa y las medidas tomadas directamente de los motores. Para poder aplicar las distintas fuerzas en el modelo, se necesita la magnitud de la fuerza, la dirección en que se aplica y la posición o coordenada desde donde se aplica esta fuerza.

Para poder obtener la posición de donde se aplica la fuerza, se utilizó el diseño del motor utilizado en el bote de estudio, donde se especifica las dimensiones mostrado en la Figura 26.

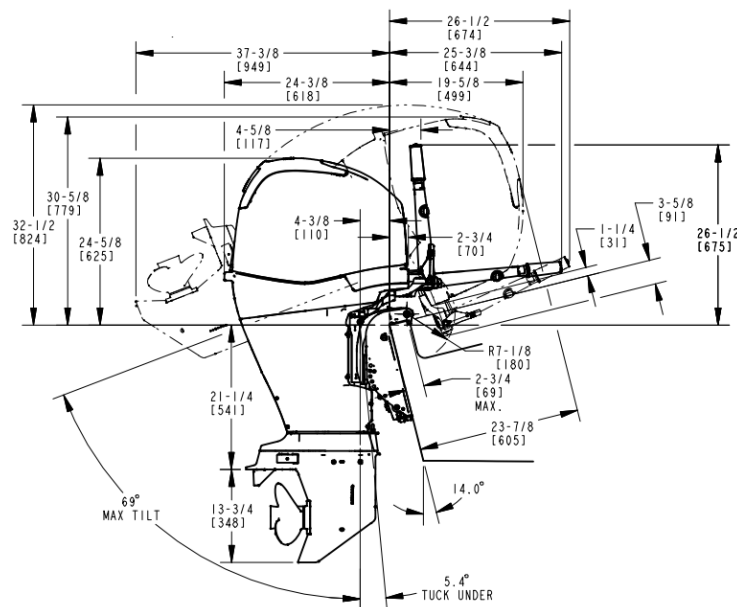


Figura 26 Medidas motor Mercury de 40/50/60HP Four Stroke

Se debe tomar en cuenta también que la aleta que evita la cavitación del motor debe ir máximo 1 pulgada por debajo que la zona más baja del espejo con el fin de proteger la hélice del motor fuera de borda, además de tener la medida desde la aleta de cavitación hasta el centro de la hélice, que corresponde al punto donde se aplicará la fuerza del motor en la simulación.



Figura 27 Distancia entre aleta de cavitación y hélice

Considerando todas las medidas mencionadas anteriormente, se debe agregar a esto, que el espejo tiene una inclinación de  $14^\circ$  con respecto a la vertical, por lo tanto, mediante “SpaceClaim” se dibujó utilizando la opción de “construction line” la cual sirven de guía y por lo tanto no afectan al diseño. Esto con el fin de poder encontrar las coordenadas en el eje Y y Z como se ve en la Figura 28 y Figura 29.

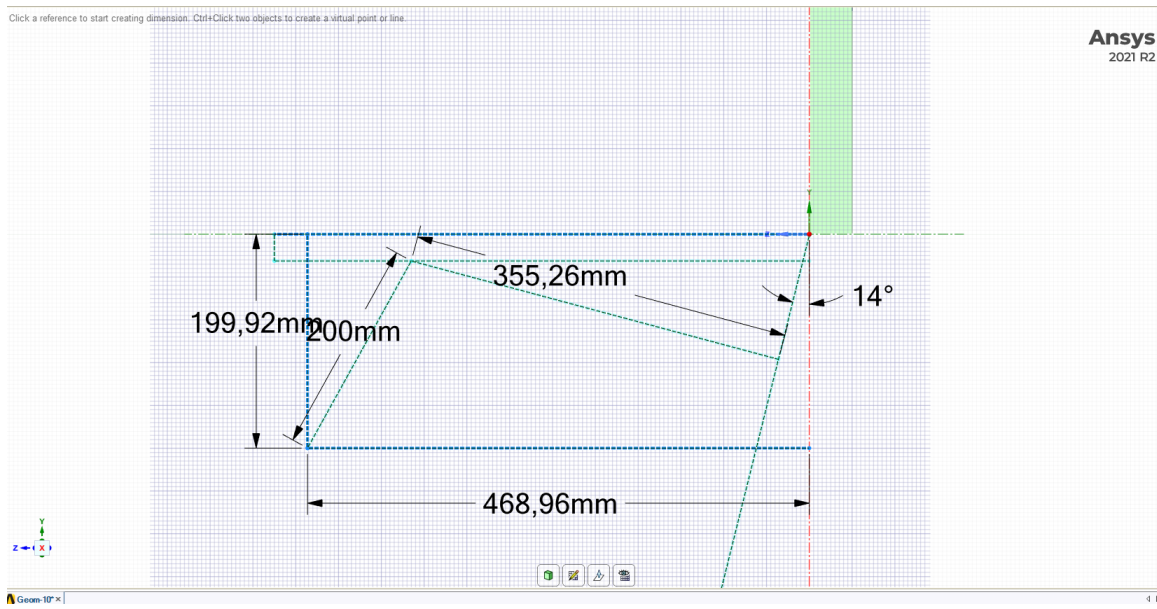


Figura 28 Cálculo coordenadas hélice del motor, ejes Y y Z

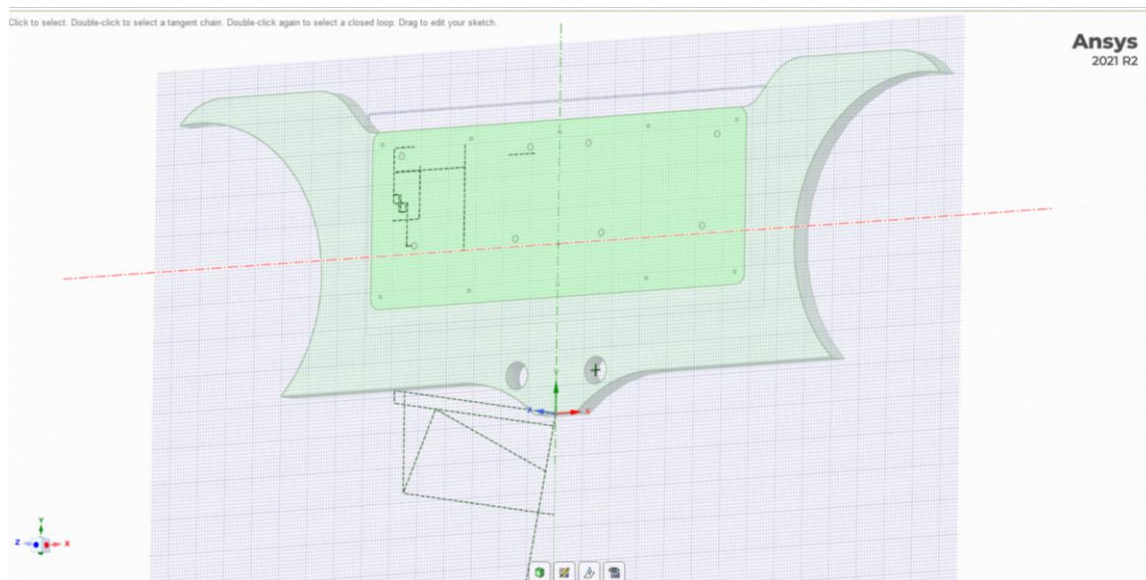


Figura 29 Cálculo coordenadas hélice del motor, vista general

Las coordenadas del eje X se determinó de la misma manera, utilizando construction lines para poder obtener la medida, en este caso desde el centro del espejo ( $x = 0$ ) hasta el centro de los apoyos de cada motor como se muestra en la Figura 30.



Figura 30 Cálculo coordenadas hélice del motor eje X

Las coordenadas del centro de masa del motor, se obtuvo mediante el estudio realizado por ASMAR, donde también mediante geometría y trigonometría, calculando en base al ángulo de inclinación del espejo, se obtuvo las coordenadas para cada motor

Coordenadas para cada fuerza (X, Y, Z) en milímetros:

- Fuerzas hélice de cada motor ( $F_e$ ): (237,5; -200; 469) y (-237,5; -200; 469)
- Fuerzas peso de cada motor ( $P$ ): (237,5; 429,72; 312) y (-237,5; 429,72; 312)

Una vez obtenidas las coordenadas se necesita conocer la magnitud de la fuerza ejercida por la hélice del motor. En este caso, esta fuerza está calculada anteriormente en el documento proporcionado por la empresa, donde se realiza el cálculo de resistencia del espejo MI 585 A de 46 [mm], utilizando los mismos motores, es decir, 2 motores Mercury de 60 [HP] Four Stroke.

La magnitud de la fuerza ejercida por la hélice ( $F_e$ ) es igual a 296 [Kg], además se tiene por la ficha técnica del motor, el peso de cada uno ( $P$ ), que corresponde a 118 [Kg], por lo tanto, al multiplicar este valor por la aceleración, en este caso, la gravedad (9,81 [ $\text{m/s}^2$ ]), tenemos los valores en unidad de fuerza (Newton)

$$F_e = 296 \text{ [Kg]} * 9,81 \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right] = 2903,76 \text{ [N]}$$

$$P = 118 \text{ [Kg]} * 9,81 \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right] = 1157,58 \text{ [N]}$$

Para poder aplicar estos valores en la simulación, se debe descomponer cada fuerza en el eje Y y Z, considerando siempre el ángulo de 14° de inclinación con respecto al eje de coordenadas utilizado en el diseño. Por lo tanto, por trigonometría.

$$Fe_y = Fe * \sin(\alpha)$$

$$Fe_y = -2903,76 [N] * \sin(14^\circ) = -702,48 [N]$$

$$Fe_z = -2903,76 [N] * \cos(14^\circ) = -2817,42 [N]$$

El valor final de la fuerza en ambos casos se utiliza con signo negativo, debido a que la fuerza se aplica en dirección contraria al eje de coordenadas.

$$P_y = -1157,58 [N] * \cos(14^\circ) = -1123,19 [N]$$

$$P_z = 1157,58 [N] * \sin(14^\circ) = 280,04 [N]$$

Al igual que el caso de la fuerza de la hélice, se agrega el signo negativo en el caso del peso en el eje Y, mientras que para el eje Z, se mantiene el valor positivo debido a la geometría.

Todas estas fuerzas se aplican sobre la placa de los motores por separado utilizando la opción de “Remote Force”, donde se puede especificar una ubicación externa al diseño, y además se puede agregar la fuerza por componentes (X, Y y Z), estas se aplican en la cara exterior ilustrado de color rojo en la Figura 31, y de color amarillo las superficies con “Displacement”. Además, se aplicó sobre los 10 pernos un “Bolt pretensión” de 5000 [N],

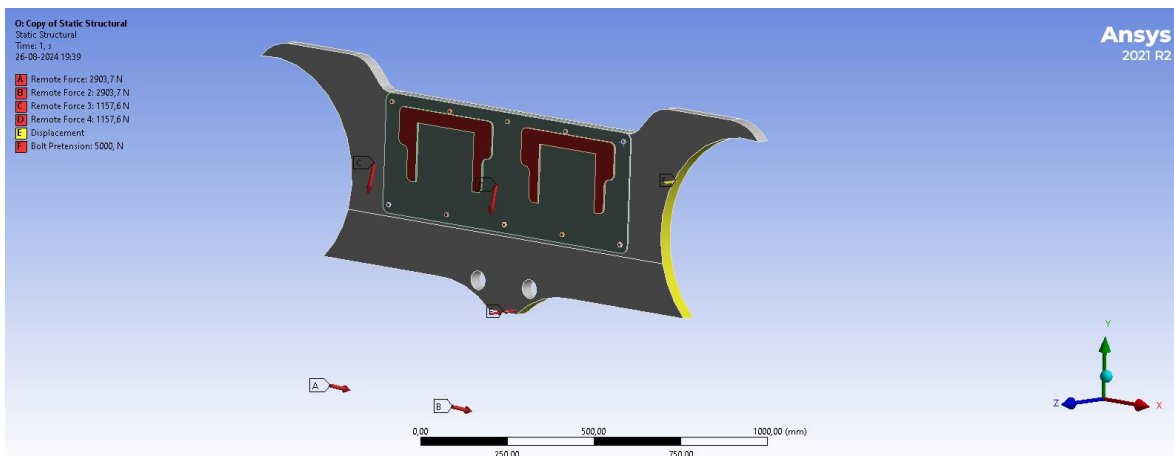


Figura 31 Fuerzas y condiciones aplicadas

#### 4.4 Análisis estructural dinámico

Para el análisis dinámico, se mantuvo la coherencia en la metodología empleada en el caso del análisis estático, conservando tanto la geometría de este como los parámetros de contacto, selección de materiales, configuración de la malla, los soportes fijos a los costados del espejo, y la aplicación de fuerzas ejercidas por la hélice de los motores y el peso total de estos.

En esta iteración del estudio, se incorporó un nuevo componente esencial, la consideración de la presión hidrostática inducida por la superficie sumergida en el agua de mar (utilizando Hydrostatic Pressure en Ansys). Esta presión fue aplicada en todas las caras exteriores del espejo, es decir, las que están en contacto con el agua de mar, incluyendo la zona expuesta del espejo y las placas de apoyo de los motores, utilizando los parámetros de densidad del agua de mar (1,027 kg/m<sup>3</sup>) y la correspondiente aceleración gravitacional (9,81 m/s<sup>2</sup>).

Adicionalmente, se abordó la influencia de la fuerza generada por las olas durante la navegación a alta velocidad. Este valor se determinó mediante la ecuación de fuerza de arrastre presentada a continuación

$$F_d = \frac{1}{2} * \rho * v^2 * C_d$$

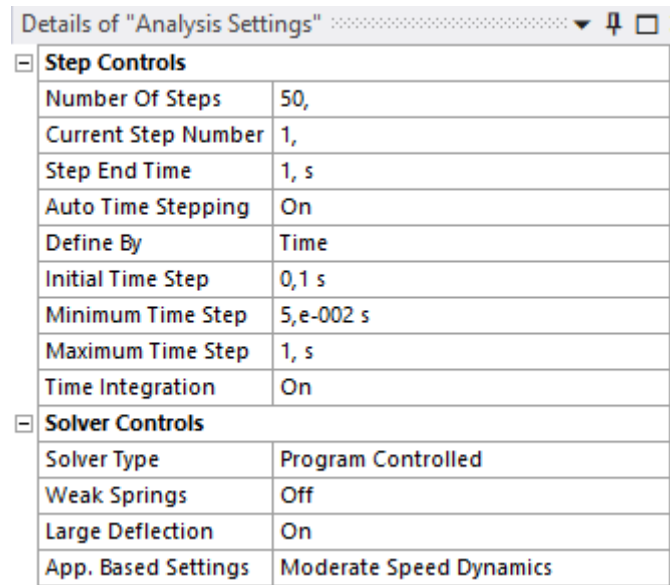
Donde  $F_d$ : Fuerza de arrastre,  $\rho$ : Densidad del agua de mar [kg/m<sup>3</sup>],  $v$ : Velocidad del bote [m/s],  $C_d$ : Coeficiente de arrastre,  $A$ : Área del espejo expuesta al agua de mar [m<sup>2</sup>].

La densidad de agua de mar utilizada fue de 1025 [kg/m<sup>3</sup>], se consideró que el bote navega a 25 nudos, lo que equivale a 12,9 [m/s], el coeficiente de arrastre utilizado para estos botes suele tener un valor entre 0,2 y 0,5, con el fin de llevar la modelación a un valor extremo, se utilizó el mayor valor posible, es decir un factor de 0,5, y finalmente el área del espejo expuesta al agua de mar se estimó como el área inferior del espejo correspondiente a 1/3 de la altura del espejo, resultando un área de 0,203 [m<sup>2</sup>].

Esta fuerza se distribuyó de manera uniforme en el área sumergida, en la cara exterior del espejo, la cual se encuentra en contacto con el agua de mar, con dirección normal a las superficies aplicadas, considerando los 14° de inclinación del espejo con respecto al eje horizontal del diseño.

Como el módulo Structural Transient considera la variable del tiempo, se deben asignar valores a distintos parámetros antes de realizar cualquier simulación, estos proporcionan información al software acerca del número de pasos en que se realiza la simulación, el tiempo total, etc. En la

Figura 32 se tienen todos los valores que se utilizaron para todas las simulaciones en Structural Transient con distintos materiales y espesores del espejo.



| Details of "Analysis Settings" |                         |
|--------------------------------|-------------------------|
| <b>Step Controls</b>           |                         |
| Number Of Steps                | 50,                     |
| Current Step Number            | 1,                      |
| Step End Time                  | 1, s                    |
| Auto Time Stepping             | On                      |
| Define By                      | Time                    |
| Initial Time Step              | 0,1 s                   |
| Minimum Time Step              | 5,e-002 s               |
| Maximum Time Step              | 1, s                    |
| Time Integration               | On                      |
| <b>Solver Controls</b>         |                         |
| Solver Type                    | Program Controlled      |
| Weak Springs                   | Off                     |
| Large Deflection               | On                      |
| App. Based Settings            | Moderate Speed Dynamics |

Figura 32 Parámetros utilizados en Structural Transient

**Número de pasos (Number of steps):** Este parámetro determina la cantidad de pasos de tiempo en los que se dividirá el análisis dinámico. Un mayor número de pasos proporciona una resolución temporal más fina, lo que puede capturar mejor el comportamiento transitorio del sistema. Se escoge un valor de 50 para este caso, lo que permite una discretización adecuada del tiempo sin generar una cantidad excesiva de pasos que aumenten significativamente el tiempo de cálculo.

**Número de paso actual (Current step number):** Este parámetro indica en qué paso de tiempo se encuentra actualmente el análisis. En la configuración inicial, el valor es 1, ya que el análisis comienza desde el primer paso de tiempo.

**Tiempo final del paso (Step end time):** Este parámetro especifica la duración total del análisis dinámico. Para este estudio, se fija en 1 segundo, lo que define el intervalo de tiempo durante el cual se simulará el comportamiento del sistema.

**Paso de tiempo inicial (Initial time step):** Este parámetro determina la duración del primer paso de tiempo en el análisis. Se escoge un valor de 0.1 segundos para proporcionar una buena resolución temporal inicial sin necesidad de pasos de tiempo demasiado pequeños que puedan aumentar innecesariamente el tiempo de cálculo.

Paso de tiempo mínimo (Minimum time step): Este parámetro establece el valor mínimo permitido para un paso de tiempo durante el análisis. Se selecciona un valor de 0.05 segundos para garantizar que los pasos de tiempo no se vuelvan demasiado pequeños, lo que podría afectar negativamente la estabilidad del análisis o aumentar el tiempo de cálculo.

Paso de tiempo máximo (Maximum time step): Este parámetro define el valor máximo permitido para un paso de tiempo durante el análisis. Se elige un valor de 1 segundo para limitar el tamaño máximo de los pasos de tiempo, lo que ayuda a evitar pasos de tiempo excesivamente grandes que podrían perder detalles importantes del comportamiento dinámico del sistema.

Estos valores se seleccionaron cuidadosamente para equilibrar la precisión del análisis con la eficiencia computacional, asegurando que el estudio dinámico proporcione resultados confiables y significativos en un tiempo razonablemente corto.

Los resultados obtenidos del análisis estructural estático se presentan en la Tabla 7, mientras que en la Tabla 8 se presentan los resultados obtenidos del análisis estructural dinámico para. En estas tablas se presenta tanto el esfuerzo de Von Mises máximo como el desplazamiento tanto para el espejo, como para el total, es decir espejo, pernos y placas.

Tabla 7 Resultados análisis estructural estático.

| Prueba        | Espejo                 |                            | Total                  |                            |
|---------------|------------------------|----------------------------|------------------------|----------------------------|
|               | Von Mises máximo [MPa] | Desplazamiento máximo [mm] | Von Mises máximo [MPa] | Desplazamiento máximo [mm] |
| Okoume 40 mm  | 11,64                  | 2,38                       | 77,48                  | 2,38                       |
| POM C 40 mm   | 12,09                  | 3,03                       | 98,90                  | 3,03                       |
| POM C 38 mm   | 13,7                   | 3,28                       | 94,83                  | 3,28                       |
| POM C 36 mm   | 14,54                  | 3,57                       | 99,80                  | 3,57                       |
| Technyl 40 mm | 13,48                  | 4,19                       | 136,7                  | 4,19                       |
| Technyl 38 mm | 15,04                  | 4,58                       | 127,9                  | 4,58                       |
| Technyl 36 mm | 15,69                  | 5,06                       | 134,05                 | 5,06                       |

Tabla 8 Resultados estudio estructural dinámico.

| Prueba        | Espejo                 |                            | Total                  |                            |
|---------------|------------------------|----------------------------|------------------------|----------------------------|
|               | Von Mises máximo [MPa] | Desplazamiento máximo [mm] | Von Mises máximo [MPa] | Desplazamiento máximo [mm] |
| Okoume 40 mm  | 12,8                   | 2,43                       | 75,67                  | 2,43                       |
| POM C 40 mm   | 13,44                  | 3,18                       | 98,59                  | 3,18                       |
| POM C 38 mm   | 14,15                  | 3,31                       | 91,82                  | 3,31                       |
| POM C 36 mm   | 15,17                  | 3,67                       | 97,38                  | 3,67                       |
| Technyl 40 mm | 14,51                  | 4,35                       | 115,87                 | 4,35                       |
| Technyl 38 mm | 15,45                  | 4,69                       | 126,24                 | 4,69                       |
| Technyl 36 mm | 16,09                  | 5,51                       | 135,15                 | 5,51                       |

## CAPÍTULO V: DISCUSIÓN

La realización tanto de estudios estáticos como dinámicos reviste una importancia fundamental en esta investigación, ya que cada uno aborda aspectos específicos del comportamiento estructural de un sistema. El análisis estructural estático es valioso para comprender la respuesta de una estructura bajo cargas en equilibrio, lo que permite evaluar la distribución de esfuerzos y deformaciones en condiciones estacionarias. Por otro lado, los estudios dinámicos son esenciales para analizar la respuesta de un sistema frente a distintas cargas considerando la variable de tiempo, proporcionando una visión más completa de su comportamiento en situaciones no estacionarias y complementando el estudio estructural estático. Es importante destacar que los resultados obtenidos en ambos tipos de análisis pueden diferir debido a las distintas condiciones de carga y al comportamiento no lineal de ciertos materiales o estructuras bajo cargas dinámicas. Estas diferencias pueden surgir, por ejemplo, debido a la inercia del sistema, la presencia de amortiguamiento o la respuesta no lineal de los materiales, lo que evidencia la necesidad de realizar ambos tipos de estudios para obtener una comprensión completa del comportamiento estructural del espejo analizado.

Con los resultados obtenidos se puede calcular el factor de seguridad, el cual está determinado por la siguiente ecuación.

$$F.S. = \frac{\sigma_0}{\sigma_{max}}$$

Donde F.S. corresponde al factor de seguridad,  $\sigma_0$  al esfuerzo de fluencia del material o esfuerzo permisible, y  $\sigma_{max}$  es el esfuerzo máximo obtenido en la simulación, en este caso el esfuerzo de Von Mises. Es decir, este factor es una medida utilizada en ingeniería para evaluar la capacidad de un componente o estructura de resistir cargas sin experimentar fallas, por lo tanto, se utilizará este criterio para comparar resultados para cada material.

El cálculo del factor de seguridad para el estudio estático se encuentra en la Tabla 9, mientras que en la Tabla 10 se presenta el cálculo del factor de seguridad para el estudio estructural dinámico.

Tabla 9 Cálculo de factor de seguridad para estudio estructural estático.

| Material      | Espesor [mm] | Esfuerzo máximo Von Mises [MPa] | Esfuerzo permisible [MPa] | Factor de seguridad [-] |
|---------------|--------------|---------------------------------|---------------------------|-------------------------|
| Madera Okoume | 40           | 11,64                           | 35,7                      | 3,07                    |
| POM C         | 40           | 12,09                           | 67                        | 5,54                    |
| POM C         | 38           | 13,7                            | 67                        | 4,89                    |
| POM C         | 36           | 14,54                           | 67                        | 4,61                    |
| Technyl       | 40           | 13,48                           | 44,1                      | 3,27                    |
| Technyl       | 38           | 15,04                           | 44,1                      | 2,93                    |
| Technyl       | 36           | 15,69                           | 44,1                      | 2,81                    |

Tabla 10 Cálculo de factor de seguridad para estudio estructural dinámico.

| Material      | Espesor [mm] | Esfuerzo máximo Von Mises [MPa] | Esfuerzo permisible [MPa] | Factor de seguridad [-] |
|---------------|--------------|---------------------------------|---------------------------|-------------------------|
| Madera Okoume | 40           | 12,8                            | 35,7                      | 2,79                    |
| POM C         | 40           | 13,44                           | 67                        | 4,99                    |
| POM C         | 38           | 14,15                           | 67                        | 4,73                    |
| POM C         | 36           | 15,17                           | 67                        | 4,42                    |
| Technyl       | 40           | 14,51                           | 44,1                      | 3,04                    |
| Technyl       | 38           | 15,45                           | 44,1                      | 2,85                    |
| Technyl       | 36           | 16,09                           | 44,1                      | 2,74                    |

Al comparar el valor del factor de seguridad obtenido para el material original (madera Okoume) con el valor de los materiales propuestos, se puede evaluar la idoneidad de estos polímeros. Si el valor del factor de seguridad para el nuevo material es similar o superior al de la madera, sugiere una posible viabilidad y seguridad en su aplicación como reemplazo, mientras que un valor inferior podría indicar limitaciones significativas en su uso práctico.

Si bien el esfuerzo máximo de Von Mises para los 3 materiales son similares, el valor de factor de seguridad varía mucho para cada material, esto debido al esfuerzo permisible (fluencia) de cada uno de estos materiales, teniendo un valor de 3,07 y 2,79 para el material original en el estudio estructural estático y dinámico respectivamente. En todos los casos, incluyendo los de menor espesor, el POM C resultó tener un comportamiento mucho mejor que el material original y el Technyl, llegando a valores de factor de seguridad mucho mayores que el material original incluso para el espejo de 36 [mm] el cual se espera que tenga un peor comportamiento mecánico. En el caso del Technyl, se obtuvo valores de factor de seguridad muy cercanos a los de la madera, sin embargo, para el espejo de 36 [mm], se llegó a un resultado menor que el del material original de fabricación.

En las todas las simulaciones, se evaluó tanto el esfuerzo equivalente de Von Mises como la deformación para el espejo por sí solo y además para todos los cuerpos, es decir, el espejo, los pernos y las distintas placas. Estos valores si bien nunca se excedieron el esfuerzo permisible del acero utilizado para el estudio estático, para el estudio dinámico excedió el valor cuando se utilizó con el espejo de “Technyl”, específicamente para el caso de 36 [mm], debido, entre otros factores, a la alta deformación de este material cuando es sometido a la presión ejercida por la acción del agua de mar.

Estos valores de esfuerzo equivalente en las placas de acero que van apernadas al espejo corresponden a los valores de esfuerzo máximo “total” en las tablas de resultados, donde se incluye todo el diseño, es decir, el espejo, las placas y los pernos. Este valor máximo se presentó en el contacto entre las placas de apoyo del motor y las placas del espejo.

Como se aprecia en la Figura 33, el máximo esfuerzo en el espejo en todas las simulaciones se genera en el borde de contacto entre el espejo y la placa de acero, por este motivo, se debe tener un especial cuidado y observación al momento de evaluar el material en estas zonas en particular

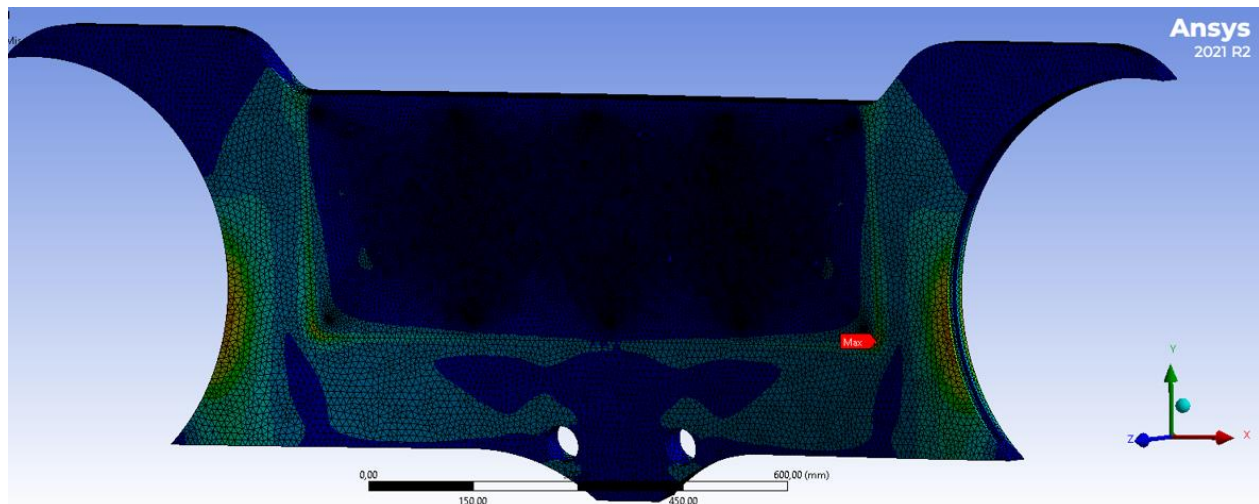


Figura 33 Máximo esfuerzo de Von Mises en espejo

## Capítulo VI: CONCLUSIONES

Observando los resultados y realizando la comparación de factor de seguridad para los distintos materiales, se sugiere utilizar el material polimérico POM C, el cual resultó tener un factor de seguridad mayor que el del material original incluso cuando se comparó los resultados de la madera de Okoume de 40 [mm] de espesor, con los obtenidos para el espejo fabricado con POM C de 36 [mm]. En cambio, el material polimérico Technyl resultó tener un peor comportamiento que el material actual, estando por debajo del factor de seguridad de la madera en el caso del espejo de 36 [mm] de espesor, por lo que no se recomienda utilizar en esos casos en particular.

Se destaca que diversos parámetros, como el valor de la fuerza aplicada para los casos de estudio estructural dinámico, fueron seleccionados con un cuidadoso margen de seguridad en consideración. Este enfoque asegura que en ningún momento se exceda el límite establecido, lo que sugiere la posibilidad de emplear valores menores si se dispusiera de información precisa sobre las condiciones operativas específicas. La obtención de tal conocimiento podría derivarse de pruebas realizadas en entornos marinos utilizando equipos de medición avanzados o mediante ensayos controlados en laboratorios especializados. Del mismo modo, el análisis a través de la dinámica de fluidos computacional (CFD) requiere el respaldo de recursos computacionales sofisticados para garantizar la precisión de los resultados, subrayando la necesidad de disponer de infraestructuras tecnológicas avanzadas para llevar a cabo estas evaluaciones con la debida meticulosidad y exactitud.

Si bien el material Technyl no tuvo un buen comportamiento en las distintas simulaciones, esto no descarta que se pueda utilizar a futuro. ASMAR fabrica distintos tipos de embarcaciones para distintas capacidades con motores que varían tanto en su masa como en potencia, sin embargo, bajo el correcto estudio, se puede utilizar tanto este como distintos materiales a futuro, ya sea en la fabricación del espejo u otra pieza del bote que necesite ser reemplazada con el fin de mejorar y optimizar el diseño del bote, o bien disminuir los costos de fabricación.

Algunos de los distintos modelos que fabrica ASMAR, utilizan espejos de 45 o 46 [mm] de espesor, es decir, existe la posibilidad de realizar el espejo del bote MI 585 A de 45 o 46 [mm], en este caso, probablemente se podría utilizar un espejo fabricado con Technyl para asegurar su correcto funcionamiento, ya que disminuiría el esfuerzo equivalente de Von Mises en este espejo, aumentando así el factor de seguridad, pudiendo llegar a valores superiores al del material actual.

Esto se podría simular si la empresa quisiera utilizar este material u otro material con propiedades mecánicas similares.

Se debe considerar que el material polimérico POM C, el cual resultó tener el mejor comportamiento, tiene una densidad de aproximadamente el doble de la densidad del material original de fabricación, por lo tanto, la masa del espejo aumenta el doble, en el caso de utilizar el mismo espesor, lo que modifica tanto el centro de masa del bote, y puede variar el peso máximo permitido en el bote. En el caso del Technyl, la densidad es similar a la del material original, por lo que, si se decide utilizar, no varía en gran medida el peso total, ni el centro de masa del bote.

Finalmente, este estudio ha contribuido al campo de la ingeniería, al proporcionar una evaluación detallada del comportamiento estructural de los espejos de botes, particularmente en lo que respecta a la sustitución de materiales tradicionales como la madera por polímeros modernos. Los hallazgos obtenidos no solo ofrecen una comprensión más profunda de los factores que influyen en la resistencia y durabilidad de estos componentes críticos, sino que también abren nuevas oportunidades para la innovación en el diseño y la fabricación de embarcaciones marítimas. Además, este estudio establece una base para investigaciones futuras, que podrían explorar aún más las propiedades de los materiales poliméricos en entornos marinos y desarrollar métodos avanzados de análisis y simulación para mejorar la seguridad y eficiencia de las estructuras navales. En última instancia, se espera que los conocimientos adquiridos aquí inspiren avances significativos en la ingeniería naval, contribuyendo así al desarrollo sostenible y la seguridad de quienes utilizan estas embarcaciones para sus actividades en el mar.

## REFERENCIAS

- [1] “[PDF] P U M A R M I 470 DANUBIO - Free Download PDF.” Accessed: Jul. 19, 2022. [Online]. Available: [https://documen.site/download/p-u-m-a-r-m-i-470-danubio\\_pdf](https://documen.site/download/p-u-m-a-r-m-i-470-danubio_pdf)
- [2] I. Chirică and D. Lupașcu, “TRANSOM STRENGTHENING OF A RIGID INFLATABLE BOAT (RIB) TO INCREASE PROPULSION POWER,” 2014.
- [3] M. Katalinie, “Structural Design of an High Speed Motor Yacht in GRP by Rules and direct FEM analysis,” University of Genoa, Genoa, 2012.
- [4] A. Hosseini, S. Tavakoli, A. Dashtimanesh, P. K. Sahoo, and M. Körgeaar, “Performance Prediction of a Hard-Chine Planing Hull by Employing Different CFD Models,” *Journal of Marine Science and Engineering* 2021, Vol. 9, Page 481, vol. 9, no. 5, p. 481, Apr. 2021, doi: 10.3390/JMSE9050481.
- [5] J. Oh, S. Cho, and B. Ham, “Structural design of transom pod for outboard motor in polyethylene boat,” *Journal of Mechanical Science and Technology* 2017 31:12, vol. 31, no. 12, pp. 5761–5767, Dec. 2017, doi: 10.1007/S12206-017-1118-9.
- [6] “Materiales isotrópicos y ortotrópicos - 2010 - Ayuda de SOLIDWORKS.” Accessed: Aug. 19, 2022. [Online]. Available: [https://help.solidworks.com/2010/spanish/SolidWorks/cworks/LegacyHelp/Simulation/Materials/Isotropic\\_and\\_Orthotropic\\_Materials.htm](https://help.solidworks.com/2010/spanish/SolidWorks/cworks/LegacyHelp/Simulation/Materials/Isotropic_and_Orthotropic_Materials.htm)
- [7] N. Cruz and ASMAR, “Detalle Espejo PUMAR MI 585 ASALTO,” 2012.
- [8] “Technyl Poliamida.” Accessed: Mar. 04, 2024. [Online]. Available: <https://www.plastec.cl/site/index.php/novedades>
- [9] “POM-C - Plásticos y Metales.” Accessed: Mar. 04, 2024. [Online]. Available: <https://www.plasticosymetales.cl/pom-c/>
- [10] “316/L, 317 – CHILEXPO.” Accessed: Mar. 04, 2024. [Online]. Available: <https://www.chilexpo.com/calidad/316-l-317/>
- [11] J. Suneela, P. Krishnankutty, and V. Anantha Subramanian, “Numerical investigation on the hydrodynamic performance of high-speed planing hull with transom interceptor,” *Ships*

- and Offshore Structures*, vol. 15, no. S1, pp. S134–S142, 2021, doi: 10.1080/17445302.2020.1738134.
- [12] E. V. Lewis and Society of Naval Architects and Marine Engineers (U.S.), *Principles of naval architecture. Volume I, Stability and strength*.
- [13] J. TOWNSEND, “The application of computational fluid dynamics to the modelling and design of high-speed boats,” Jan. 2021, doi: 10.23889/SUTHESES.58462.
- [14] “(PDF) Hydrodynamic Aspects of Transom Stern Optimisation.” Accessed: Mar. 04, 2024. [Online]. Available: [https://www.researchgate.net/publication/319260916\\_Hydrodynamic\\_Aspects\\_of\\_Transom\\_Stern\\_Optimisation](https://www.researchgate.net/publication/319260916_Hydrodynamic_Aspects_of_Transom_Stern_Optimisation)
- [15] A. Eslamdoost, L. Larsson, and R. Bensow, “On transom clearance,” *Ocean Engineering*, vol. 99, pp. 55–62, May 2015, doi: 10.1016/J.OCEANENG.2015.02.008.
- [16] “A Detailed Study of Transom Breaking Waves.” Accessed: Mar. 04, 2024. [Online]. Available: <https://apps.dtic.mil/sti/citations/ADA499067>
- [17] K. J. Maki, L. J. Doctors, R. F. Beck, and A. W. Troesch, “Transom-stern flow for high-speed craft,” *Australian Journal of Mechanical Engineering*, vol. 3, no. 2, pp. 191–199, Jan. 2006, doi: 10.1080/14484846.2006.11464508
- [18] A. Eslamdoost, L. Larsson, and M. Brown, “A device for reducing the resistance of transom stern hulls,” *Ocean Engineering*, vol. 235, p. 109351, Sep. 2021, doi: 10.1016/J.OCEANENG.2021.109351.
- [19] F. Bedoui and B. Fayolle, “POM Mechanical Properties,” *Polyoxymethylene Handbook: Structure, Properties, Applications and their Nanocomposites*, pp. 241–255, Mar. 2014, doi: 10.1002/9781118914458.CH9.
- [20] D. L. Jarvis, “Polyacetals,” in *Brydson’s Plastics Materials: Eighth Edition*, Butterworth-Heinemann, 2017, pp. 513–526. doi: 10.1016/B978-0-323-35824-8.00019-0.
- [21] S. Yu, W. M. Yek, S. Y. Ho, S. A. D. Rannou, and S. H. Lim, “Microstructure and impact strength of polyamide 6 composites,” in *Materials Today Communications*, vol. 4, Elsevier, 2015, pp. 199–203. doi: 10.1016/J.MTCOMM.2015.08.004.