



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

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

**ANÁLISIS DE LA CONEXIÓN ESTRUCTURAL DE UNA TOBERA  
INSTALADA EN POPA DE UN REMOLCADOR DE 8.5 TON. DE TIRO  
ESTÁTICO**

**TESIS DE GRADO**

Previa la obtención del Título de

**INGENIERO NAVAL**

**Presentada por:**

Bruno Diofanto Galárraga Wttermann

Guayaquil - Ecuador

2010

## **AGRADECIMIENTO**

Un agradecimiento muy especial para aquellos que impartieron sus conocimientos; a los profesores, a los compañeros y a todos los amigos que brindaron su confianza y apoyo incondicional para el desarrollo de esta tesis. A todos aquellos trabajadores del área naval que hicieron posible terminar un trabajo con excelencia y calidad.

## **DEDICATORIA**

Este trabajo se lo dedico a toda mi familia, especialmente a mi madre por su incansable apoyo y a mi hija Melina por darme fuerzas para terminar los retos. A aquel maestro que me guió como un padre con sus sabios conocimientos en estos años. También a las empresas que aportaron en este tiempo con su grano de arena para ir adquiriendo experiencia.

## DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad por los hechos, ideas y doctrinas expuestos en esta tesis, corresponden exclusivamente a su autor, y el patrimonio intelectual de la Tesis de Grado corresponderá a la **ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**”

(Reglamento de Exámenes y Títulos Profesionales de la ESPOL)



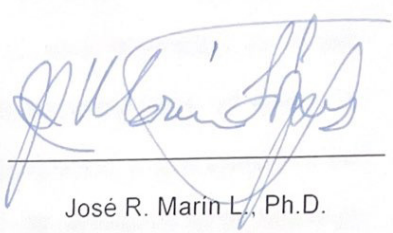
---

Bruno Diofanto Galárraga Wttermann

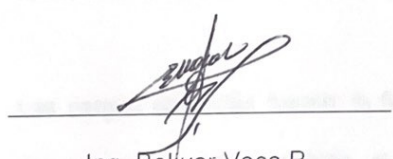
TRIBUNAL DE GRADO



Ing. Cristóbal Mariscal D.  
Presidente del Tribunal  
& Miembro Principal



José R. Marín L., Ph.D.  
Director de Tesis



Ing. Bolívar Vaca R.  
Miembro Alterno

## RESUMEN

Empleando el Método de Elementos Finitos, se analizaron dos modelos de la estructura de conexión de una tobera al casco del remolcador Suinli II de 8.5 toneladas de Tiro Estático. Se empezó representando en el espacio la estructura con el programa AutoCAD, y, para desarrollar el modelo estructural se utilizó el programa Sap2000, determinándose los niveles de esfuerzo y deflexión de la conexión original con cinco, y, una alternativa con tres planchas como soportes de la tobera. Se representó la estructura de Popa, los agarres, la tobera y el arbotante del eje, de un costado de la embarcación, y se restringió en traslación los nodos que conectaban con la estructura principal restante. Se redujo el espesor de las planchas de conexión en 1.5 mm para considerar el efecto de corrosión. En el primer modelo se utilizaron 27289, y en el segundo, 26317 elementos planos.

Las cargas aplicadas fueron: la fuerza hidrodinámica por movimiento lateral del buque, la carga debido al máximo Tiro Estático, y, la fuerza de desbalance de la hélice. La Fuerza hidrodinámica lateral fue estimada como de 1619 kg, la fuerza debida al Tiro Estático fue de 2240 Kg, y, la fuerza de desbalance de 10 Kg.

Los esfuerzos extremos encontrados en los dos casos fueron  $2.04E+07$  y  $2.67E+07$  Kg/m<sup>2</sup>, respectivamente, y se presentan en la conexión con el casco, en la plancha que está del costado donde se aplica la carga lateral. En ambos casos, este esfuerzo máximo se manifiesta en forma muy concentrada, esperándose, en la conexión alternativa, una pequeña zona de deformación permanente. En la estructura del Lazareto los esfuerzos resultaron bajos. Finalmente, en ambas conexiones, los desplazamientos relativos obtenidos para la tobera y el eje propulsor fueron menores a 1 mm en las tres direcciones, descartándose entonces la posibilidad de roce entre ellos.

## INDICE GENERAL

	<b>Pág.</b>
RESUMEN.....	VI
ÍNDICE GENERAL.....	XV
ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS.....	XI
ÍNDICE DE TABLAS.....	XV
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XVII
INTRODUCCIÓN.....	1
 <b>CAPÍTULO 1</b>	
 <b>MODELIZACIÓN ESTRUCTURAL DE LA CONEXIÓN DE LA TOBERA AL CASCO DEL REMOLCADOR</b>	
1.1 Descripción del Sistema Propulsor.....	3
1.2 Preparación 3D del Sistema Propulsor.....	9
1.3 Importación del plano desde Sap2000.....	16



## **CAPÍTULO 2**

### **ESTIMACIÓN DE LAS CARGAS**

2.1 Cargas debido al Desbalance de la Hélice.....	21
2.2 Estimación del Tiro Estático.....	24
2.3 Estimación de la Carga por Flujo Transversal.....	28

## **CAPÍTULO 3**

### **ANÁLISIS ESTRUCTURAL DEL CONJUNTO**

3.1 Aplicación de Cargas y Restricciones a los nodos.....	34
3.2 Análisis de Esfuerzos.....	37
3.3 Análisis de Deformaciones.....	45

## **CAPÍTULO 4**

### **ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE UNA ALTERNATIVA DE AGARRE**

4.1 Modelo de Agarre con Tres Soportes.....	55
4.2 Análisis de Esfuerzos de la Conexión Alternativa.....	56
4.3 Análisis de Deformaciones de la Conexión Alternativa.....	63
4.4 Comparación de los dos Sistemas de Conexión de la Tobera..	68
<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>71</b>
<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>73</b>

**APENDICE A**

NODOS Y ELEMENTOS USADOS EN EL MODELO.....	74
--	----

**APÉNDICE B**

DIAGRAMA DEL COEFICIENTE DE ARRASTRE EN FUNCION DEL NÚMERO DE REYNOLDS.....	77
--	----

**APÉNDICE C**

DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS EN CADA UNO DE LOS AGARRES DE LA TOBERA, ( CINCO SOPORTES).....	78
--	----

<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	83
---------------------------	----

## ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS

%	Porcentaje
$\Delta$	Desplazamiento
$^{\circ}\text{C}$	Grados Centígrados
$\nu$	Viscosidad Cinemática del Fluido
$\emptyset$	Diámetro
$\rho$	Densidad del Agua
$\sigma_1$	Esfuerzo Local en Dirección X
$\sigma_2$	Esfuerzo Local en Dirección Y
A	Área Lateral para un Cilindro
Bar	Bares
Bb	Babor

Bot	Cara Inferior de la Plancha
$C_A$	Coefficiente de Arrastre
cm	Centímetros
$\text{cm}^2$	Centímetros cuadrados
$C_Q(x,y)$	Polinomio para el Torque
$C_T(x,y)$	Polinomio para el Empuje Total (Hélice+tobera)
$C_{TN}(x,y)$	Polinomio para el Empuje desarrollado por la Tobera
D	Diámetro del Propulsor
d	Diámetro de la Tobera
dxg	Drawing interchange format
Eb	Estribor
$F_A$	Fuerza de Arrastre
Hp	Horsepower

J	Coeficiente de Avance
Kg	kilogramos
$K_Q$	Coeficiente de Torque
$K_T$	Coeficiente de Empuje del Conjunto
$K_{T-NOZ}$	Coeficiente de Empuje de la Tobera
LB	Línea Base
lbs	Libras
LC	Línea de Crujía
m	Metros
M	Mamparo
$m^2$	Metros Cuadrados
$m^3$	Metros Cúbicos
mm	Milímetros
N	Velocidad de Rotación del Motor Principal
P/D	Relación Paso Diámetro

plg	Pulgadas
Pt	Platina
Re	Número de Reynolds
Rfzos	Refuerzos
rpm	Revoluciones por minuto
$S_{11}$	Esfuerzo en la Cara 1 del Elemento Plano en la Dirección del Eje Local 1
$S_{12}$	Esfuerzo Cortante
$S_{22}$	Esfuerzo en la Cara 2 del Elemento Plano en la Dirección del Eje Local 2
seg	Segundos
$S_{MAX}$	Esfuerzo Máximo
$S_{MIN}$	Esfuerzo Mínimo
$\sigma_y$	Esfuerzo en Dirección Y de la plancha
$\sigma_z$	Esfuerzo en Dirección Z de la plancha

T	Temperatura
$\tau_{12}$	Esfuerzo Cortante
$T_{NOZ}$	Empuje desarrollado por la Tobera
$T_{NOZ(x)}$	Empuje desarrollado por la Tobera en dirección X
$T_{NOZ(z)}$	Empuje desarrollado por la Tobera en dirección Z
ton	Toneladas
Top	Cara Superior de la Plancha
U1	Desplazamiento del Nodo en Dirección X
U2	Desplazamiento del Nodo en Dirección Y
U3	Desplazamiento del Nodo en Dirección Z
V	Velocidad del Buque



## INDICE DE TABLAS

		<b>Pág.</b>
<b>Tabla I.</b>	Características Principales del Remolcador SUINLI II.....	4
<b>Tabla II.</b>	Características Principales del Sistema Propulsor.....	8
<b>Tabla III.</b>	Escantillonado del Lazareto.....	17
<b>Tabla IV.</b>	Características Principales de la Tobera.....	17
<b>Tabla V.</b>	Características Principales del Arbotante y Eje.....	18
<b>Tabla VI.</b>	Valores de Esfuerzo Máximos Positivos en cada uno de los Agarres, Kg/m <sup>2</sup> (5 Soportes).....	40
<b>Tabla VII.</b>	Valores de Esfuerzo Máximos Negativos en cada uno de los Agarres, Kg/m <sup>2</sup> (5 Soportes).....	40
<b>Tabla VIII.</b>	Desplazamientos de los nodos del Borde de la Tobera, mm (5 soportes).....	51
<b>Tabla IX.</b>	Desplazamientos Nodales del Extremo del Eje, mm.....	52
<b>Tabla X.</b>	Valores de Esfuerzos Extremos en cada uno de los Agarres, Kg/m <sup>2</sup> .....	61

<b>Tabla XI.</b>	Valores de Esfuerzos Extremos en cada uno de los Agarres, Kg/m <sup>2</sup> .....	62
<b>Tabla XII.</b>	Desplazamientos de los nodos en el borde de la tobera....	65
<b>Tabla XIII.</b>	Comparación de los desplazamientos del borde interior de la tobera.....	70

**INDICE DE FIGURAS**

		<b>Pág.</b>
<b>Figura 1.</b>	Plano de Distribución General.....	5
<b>Figura 2.</b>	Plano del Sistema de Propulsión.....	7
<b>Figura 3.</b>	Representación del Área del Lazareto.....	10
<b>Figura 4.</b>	Montaje de la Tobera Actual.....	11
<b>Figura 5.</b>	Plano de la Tobera.....	12
<b>Figura 6.</b>	Modelización 3D de conexión entre Tobera y Fondo.....	13
<b>Figura 7.</b>	Identificación de los Soportes.....	14
<b>Figura 8.</b>	Modelización 3D del Sistema Completo.....	15
<b>Figura 9.</b>	Modelo Estructural en Sap2000.....	19
<b>Figura 10.</b>	Estimación del Peso de la Hélice.....	22
<b>Figura 11.</b>	Aplicación de la Fuerza de Desbalance de la Hélice.....	23
<b>Figura 12.</b>	Carga debida al Tiro Estático aplicada a la Cara Interior de la Tobera.....	27

<b>Figura 13.</b>	Carga Lateral sobre un Cilindro.....	30
<b>Figura 14.</b>	Carga Lateral Aplicada debida al Flujo Transversal.....	31
<b>Figura 15.</b>	Cargas Actuantes sobre el Sistema.....	32
<b>Figura 16.</b>	Cargas Aplicadas al Sistema Simultáneamente.....	34
<b>Figura 17.</b>	Restricciones del Sistema.....	36
<b>Figura 18.</b>	Resumen General de Distribución de Esfuerzos, Kg/m <sup>2</sup> (5 Soportes).....	39
<b>Figura 19.</b>	Esfuerzos Extremos en los Agarres de la Tobera, kg/m <sup>2</sup>	41
<b>Figura 20.</b>	Distribución de Esfuerzos en interior del Lazareto, Kg/m <sup>2</sup> .....	43
<b>Figura 21.</b>	Distribución de Esfuerzos en el arbotante, Kg/m <sup>2</sup> .....	44
<b>Figura 22.</b>	Vistas del Sistema Deformado.....	46
<b>Figura 23.</b>	Deformación en los Agarres de la Tobera, m.....	47
<b>Figura 24.</b>	Desplazamientos de los nodos en la unión del agarre al fondo del remolcador.....	48

<b>Figura 25.</b>	Desplazamientos de los nodos en la unión del agarre a la tobera.....	49
<b>Figura 26.</b>	Nodos a Analizar en el Perfil Deformado de la Tobera...	50
<b>Figura 27.</b>	Desplazamientos en el Borde de la Tobera, Eje y Conexión del Arbotante, m. ....	53
<b>Figura 28.</b>	Sistema con Tres Soportes de la Tobera.....	55
<b>Figura 29.</b>	Identificación de los Tres Soportes.....	57
<b>Figura 30.</b>	Resumen General de Distribución de Esfuerzos, Kg/m <sup>2</sup> (3 Soportes).....	58
<b>Figura 31.</b>	Niveles de esfuerzo en el elemento más representativo (17309), kg/m <sup>2</sup> .....	60
<b>Figura 32.</b>	Máximos Esfuerzos en los Agarres de la Tobera, kg/m <sup>2</sup>	62
<b>Figura 33.</b>	Deformación de los agarres de la tobera (Sistema alternativo), m.....	64
<b>Figura 34.</b>	Vistas del Sistema Deformado con Tres Soportes.....	67

<b>Figura 35.</b>	Comparación de Niveles de Esfuerzo entre los dos sistemas de Agarre, Kg/m <sup>2</sup> .....	69
<b>Figura A-1</b>	Resumen de Elementos en el área de Lazareto.....	74
<b>Figura A-2</b>	Resumen de Elementos en el Eje Propulsor.....	75
<b>Figura A-3</b>	Resumen de Elementos en la Conexión de la Tobera.....	76
<b>Figura B-1</b>	Coeficiente de Arrastre para un Cilindro Circular Liso como una Función del Número de Reynolds.....	77
<b>Figura C-1</b>	Distribución de Esfuerzos en Rf-Tob-Bb2, Kg/m <sup>2</sup> .....	78
<b>Figura C-2</b>	Distribución de Esfuerzos en Rf-Tob-Bb1, Kg/m <sup>2</sup> .....	79
<b>Figura C-3</b>	Distribución de Esfuerzos en Rf-Tob-Ce, Kg/m <sup>2</sup> .....	80
<b>Figura C-4</b>	Distribución de Esfuerzos en Rf-Tob-Eb1, Kg/m <sup>2</sup> .....	81
<b>Figura C-5</b>	Distribución de Esfuerzos en Rf-Tob-Eb2, Kg/m <sup>2</sup> .....	82

## INTRODUCCION

Debido a que una tobera adaptada a un propulsor marino incrementa considerablemente su empuje a baja velocidad de avance, su uso es muy recomendable para un remolcador, [5]. Sin embargo, dada la alta concentración de fuerzas que se producen en el área de agarre de la tobera al casco de la embarcación, es necesario comprobar la rigidez del soporte. Debido a que no existe experiencia previa en el medio, sobre el cálculo de los niveles de esfuerzo y deflexión que aseguren una rigidez adecuada en la conexión, es recomendable analizar una estructura ya construida y que esté operando adecuadamente.

Uno de los últimos proyectos de propulsión con tobera en el medio es el remolcador "SUINLI II", con  $L=14.15$  m y  $\Delta=30$  ton que proporciona 8.5 ton de tiro estático y que fue desarrollado en ASTINAVE en el 2008. El sistema propulsivo consta de dos motores de 365 Hp, con ejes sólidos soportados por un arbotante, hélices tipo Kaplan y toberas tipo "Rice Thrust", y que se encuentra operando en "La Libertad". Debido a la información disponible, es un caso adecuado para ser analizado, [5].

En sistemas estructurales de complejidad geométrica alta, un método adecuado de análisis, es el de Elementos Finitos (MEF), [1]. Ahora bien, al modelar una estructura se la debe representar lo más cercano posible a la realidad, pero considerando las limitaciones del modelo, se podría analizar el área del Lazareto solamente, aplicando condiciones de frontera adecuadas en los mamparos limitantes. Dado que la tobera y la hélice forman un sistema integral, se deben considerar tanto fuerzas hidrodinámicas, [4] y [7], como de desbalance en los propulsores, [9] actuando sobre el sistema. De esta forma se podrá analizar simultáneamente la conexión de la tobera al casco y el arbotante del eje.



## **CAPITULO I**

### **MODELIZACIÓN ESTRUCTURAL DE LA CONEXIÓN DE LA TOBERA AL CASCO DEL REMOLCADOR.**

#### **1.1. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA PROPULSOR**

El trabajo a realizar en este proyecto de tesis es el Análisis de la conexión estructural de una tobera al fondo del remolcador "SUINLI II". Las toberas estarán ubicadas en la popa, tanto en Babor como Estribor. La embarcación posee dos líneas propulsoras independientes con una potencia total de 730 Hp y una capacidad de Tiro Estático de 8.5 toneladas. En cada eje propulsor se tienen hélices en toberas acelerantes, y cuyos ejes están soportados por arbotantes en V.

A continuación, en la Tabla I se presentan las características principales de la embarcación analizada. También en la Figura 1, se presenta el Plano de Distribución General y en la Figura 2, el Plano del Sistema de Propulsión.

Eslora Total:	14.15 m.
Manga:	4.67 m.
Puntal:	2.35 m.
Calado:	1.83 m.
Desplazamiento, [ $\Delta$ ]:	60 ton.
Cfte. de bloque:	0.51

**Tabla I.** Características Principales del Remolcador Suinli II.

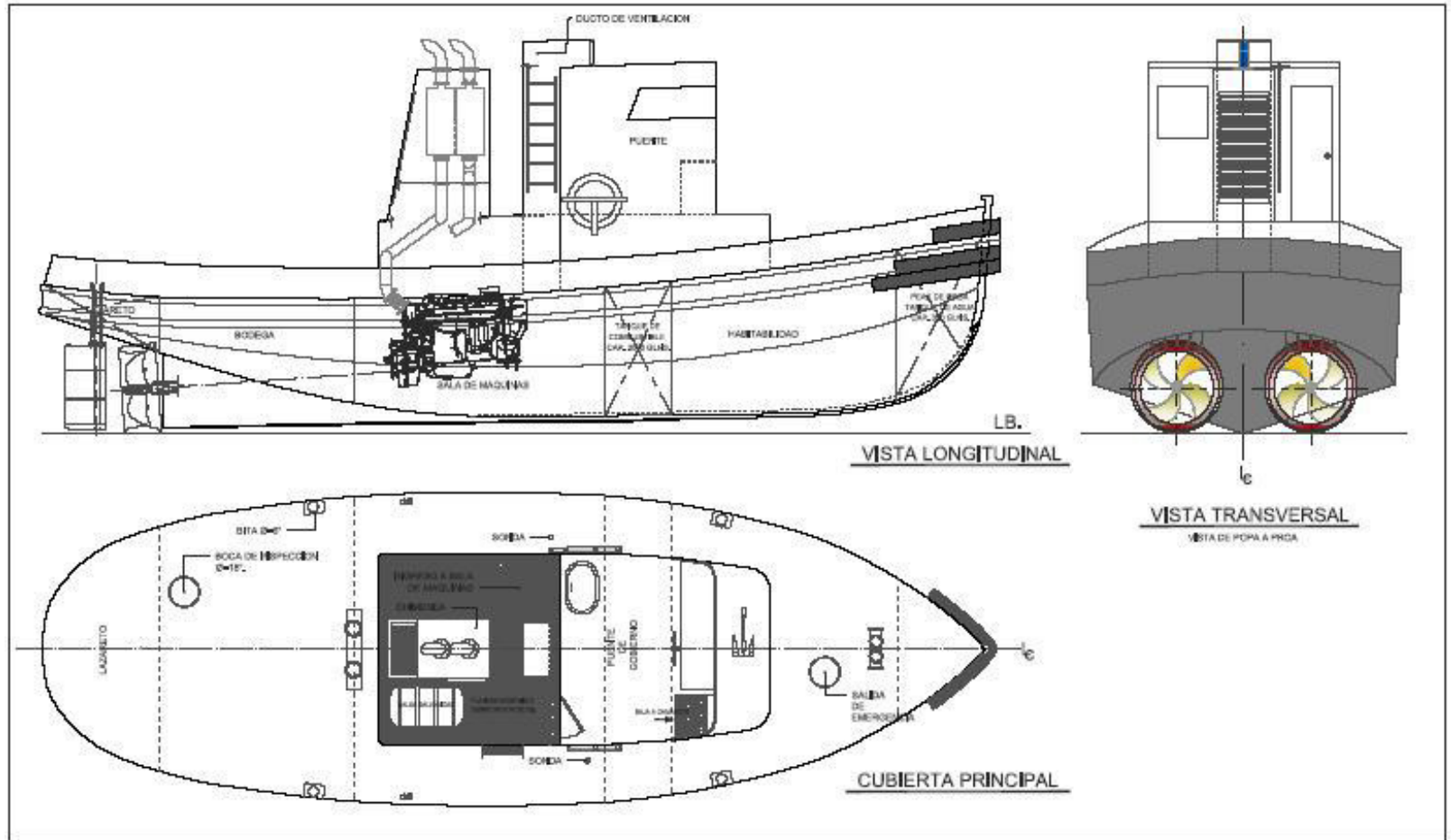


Figura 1.- Plano de Distribución General

El sistema propulsivo representado en el plano de la Figura 2, consta de dos motores Caterpillar de 365 Hp a 1800 rpm c/u, y hélices de Bronce tipo Kaplan de 4 palas y diámetro de 39.25". Cada propulsor incluye una tobera tipo Rice Thrust con  $\varnothing_{\text{exterior}}=48.34"$  y  $\varnothing_{\text{interior}}=39.96"$ .

En el remolcador Suinli II cada línea propulsora incluye un eje sólido de acero inoxidable de 3" de diámetro, asentados en popa en un bocín de material Thordon, y en proa en el bocín de caucho y bronce del prensaestopa; tanto el bocín Thordon como el bocín de caucho y bronce son de 25 cm de longitud. El soporte de Popa está sujeto al casco por arbotantes tipo "V" fabricados con plancha de acero de 25 mm de espesor. Además, los dos cojinetes del eje tienen lubricación por agua. A continuación se incluye en la Tabla II las características principales del sistema propulsor.

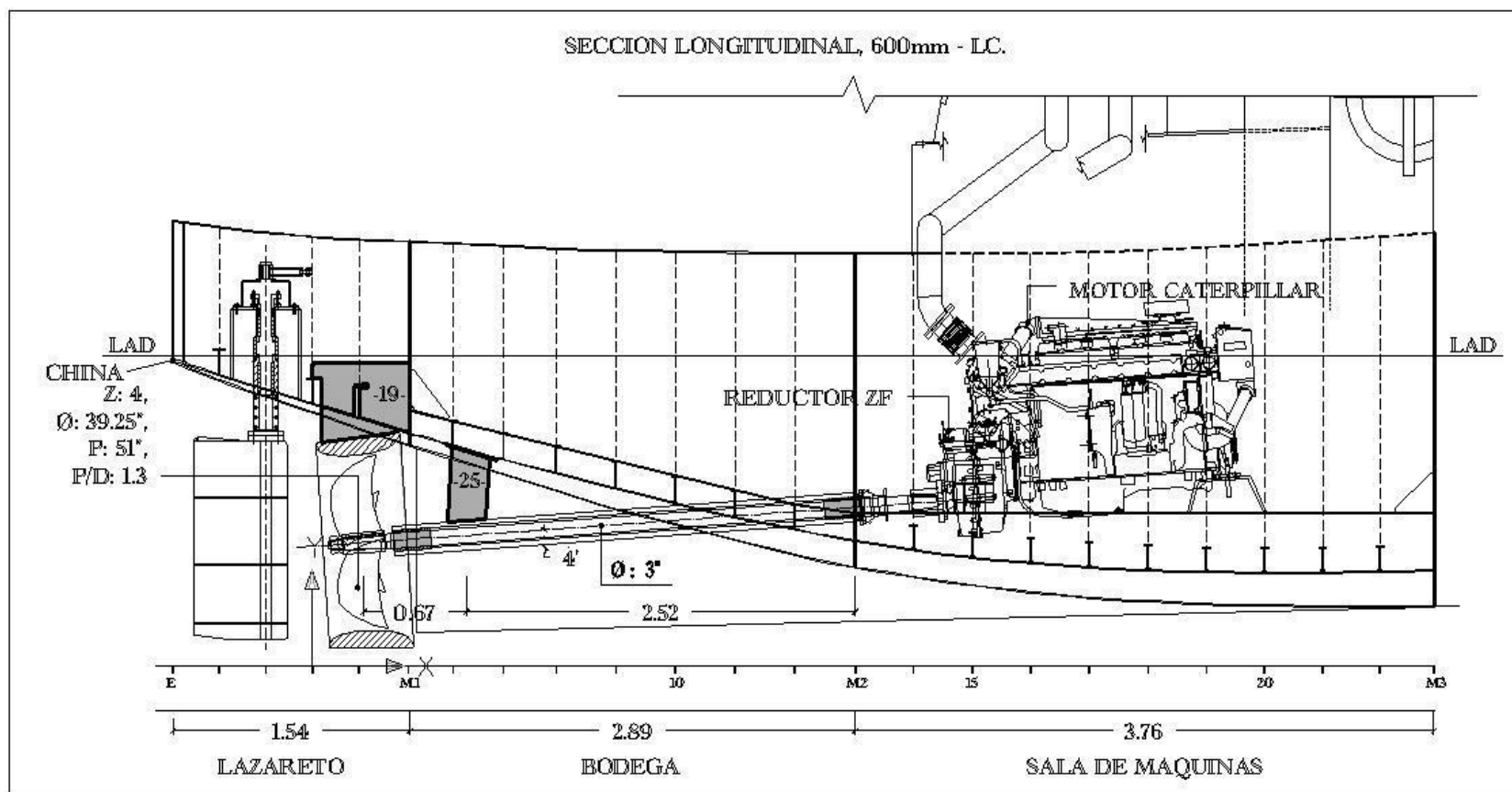


Figura 2.- Plano del Sistema de Propulsión

Ejes propulsivos	Acero Inox, Ø: 3" (0.076 m.)
Prensa Estopa	Bronce, Ø: 3" (0.076 m.)
Hélice:	Bronce, Ø: 39.25" (0.997 m.)
	Tipo Kaplan, 4 palas
	Paso: 51" (1.296 m.)
	Relación de Área: 0.91
	P/D: 1.3

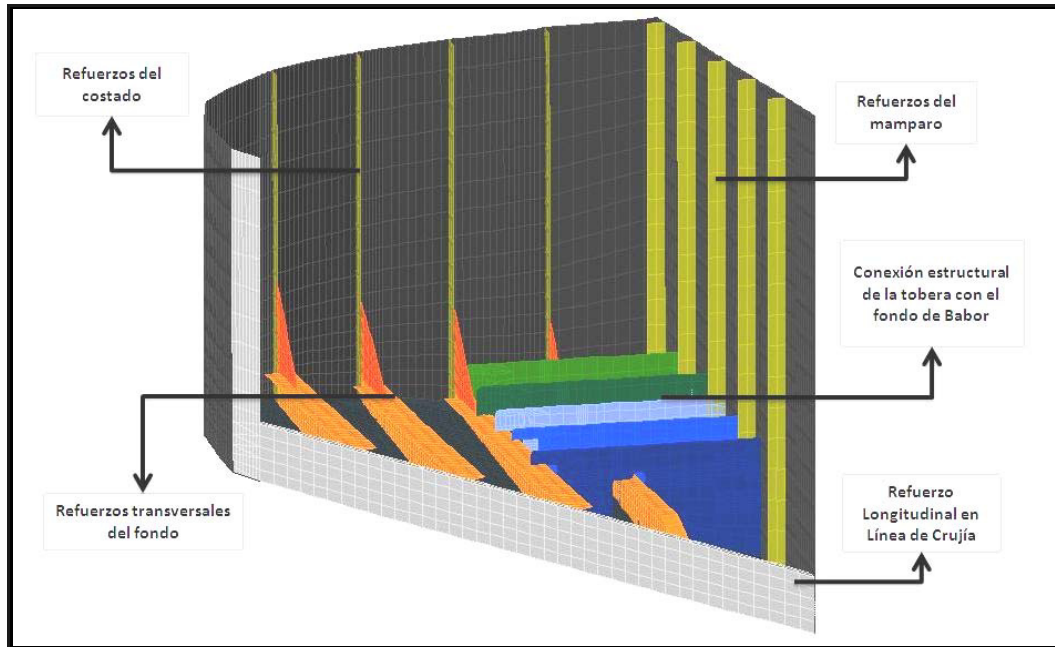
**Tabla II.** Características Principales del Sistema propulsor.

## **1.2. PREPARACION 3D DEL SISTEMA PROPULSOR.**

La modelización 3D del sistema con elementos planos fue desarrollada con el programa Autocad. Debido a la complejidad de este sistema se representó únicamente el área del Lazareto de la embarcación, ya que debajo de ésta se encuentran ubicadas inmediatamente las toberas, véase la Figura 2.

Haciendo uso del programa Autocad con visualización 3D, la tobera con su agarre, el fondo y costados con sus respectivos refuerzos fueron representados por superficies planas "3D face". Estos elementos planos servirán para representar el planchaje, mamparos, y todos los refuerzos del remolcador. El eje propulsor está representado con elementos Línea.

La conexión de la tobera con el casco del remolcador consta de cinco elementos planchas, agarrados a la estructura transversal del fondo del casco tal como se presenta en la Figura 3, y, en la Figura 4 se presenta el montaje de la tobera del costado de Babor, durante los trabajos de instalación del sistema propulsor en ASTINAVE, [5].



**Figura 3.** Representación del área de Lazareto.





**Figura 4.** Montaje de la tobera actual, [5],

Para modelar la estructura de la tobera se tomó como base el plano constructivo de uno similar, [3], que se muestra a continuación dado que no se disponía información sobre el caso actual:

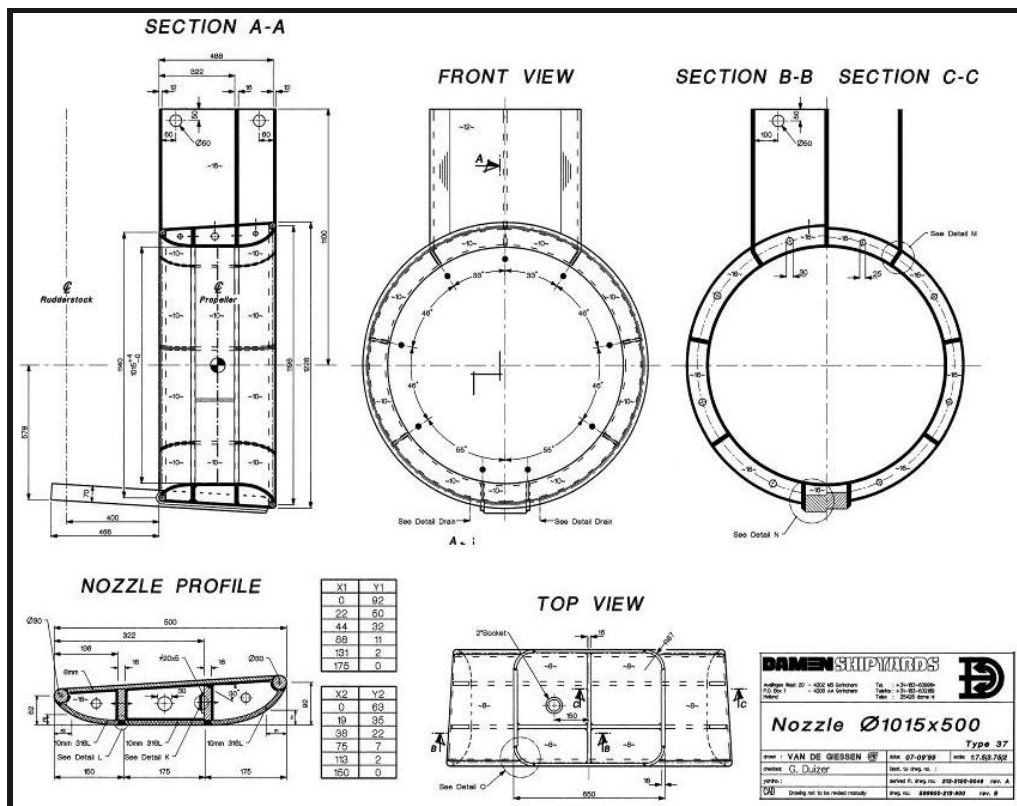
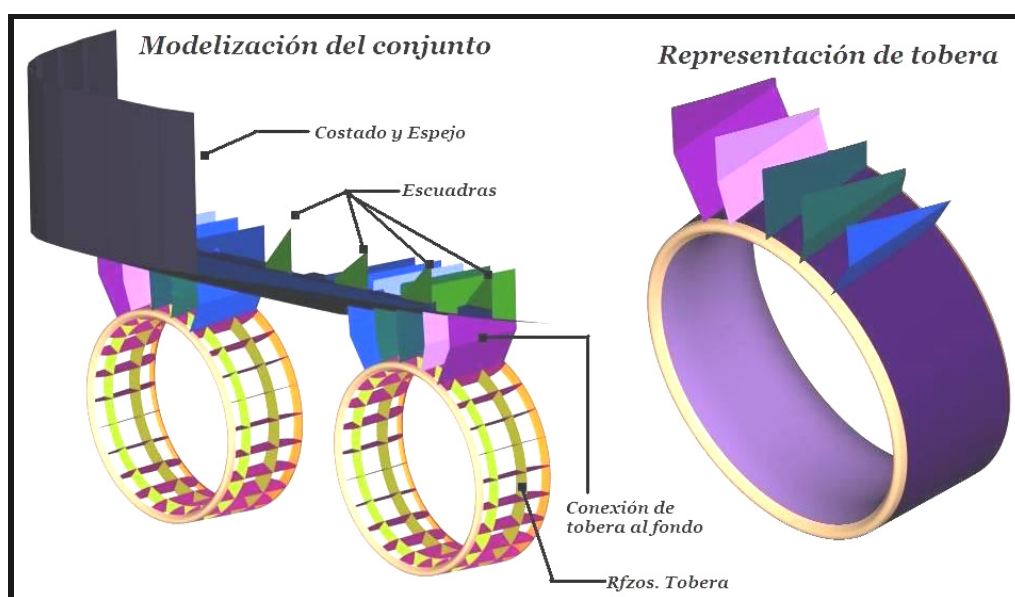


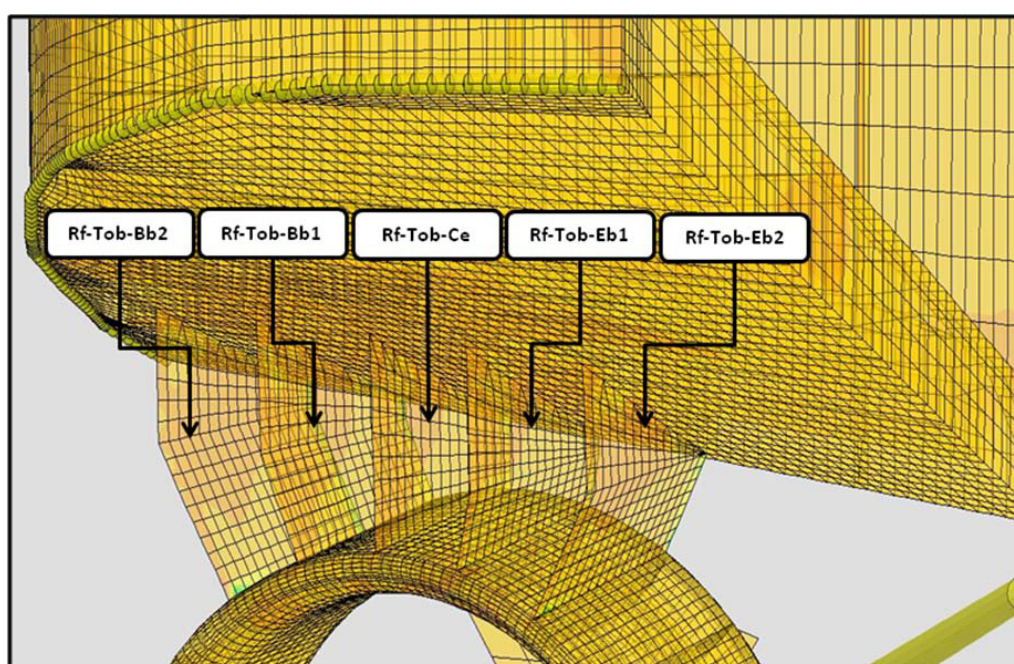
Figura 5. Plano de la Tobera, [3].

La tobera estructuralmente tiene dos anillos circunferenciales y veinticuatro elementos transversales de 16 mm de espesor que forman los refuerzos internos. Además, el área de Lazareto posee cuatro elementos transversales separados 300 mm cada uno con sus respectivas escuadras, y un elemento longitudinal en línea de crujía, todos ellos montados en el fondo con plancha de 8 mm. Cabe indicar que para el modelo de los agarres de la tobera, se consideró un desgaste en el espesor de la plancha de 1.5 mm por efectos de la corrosión. Hay que recordar que el montaje original de los agarres de la tobera que se realizó en el remolcador Suinli II fue con plancha de 19 mm.



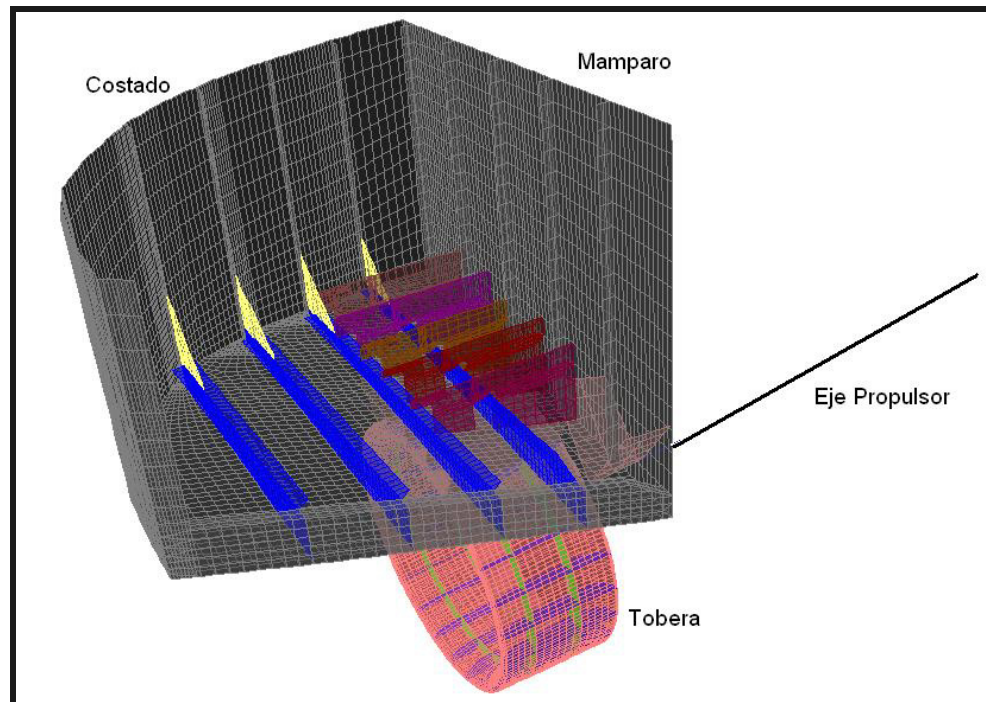
**Figura 6.** Modelización 3D de Conexión entre Tobera y Fondo.

Los agarres de la tobera al fondo del remolcador Suinli II, van a ser identificados como: “Rf-Tob-Bb2”, “Rf-Tob-Bb1”, “Rf-Tob-Ce”, “Rf-Tob-Eb1”, y, “Rf-Tob-Eb2”. A continuación en la Figura 7 se presenta la conexión con los cinco soportes.



**Figura 7.** Identificación de los soportes

Finalmente, se presenta el modelo completo de todo el sistema modelado en Autocad, que va a ser importado al programa Sap2000 para completar su modelaje estructural y, posterior análisis:



**Figura 8.** Modelación 3D del Sistema Completo

### 1.3. IMPORTACION DEL PLANO DESDE SAP2000

Una vez que el modelo geométrico de todo el sistema fue preparado en el programa AutoCAD, se guarda en un archivo con formato dxf. Luego desde el programa Sap2000 se importa el modelo geométrico y se lo transforma en un modelo estructural asignándole propiedades mecánicas y del material (espesores, Modulo de Young, Razón de Poisson, etc.).

Las capas definidas en AutoCAD, al ser importadas se les designará diferentes Secciones de área para poder registrarlas en el programa Sap2000. Las once capas registradas en el área interior del Lazareto están identificadas como: “Bulárcamas”, “Mamparo”, “Costados”, “Fondo”, “Escuadras”, “Laz\_Bb2”, “Laz\_Bb1”, “Laz\_Ce”, “Laz\_Eb1”, “Laz\_Eb2”, y “Long\_Lc” . Las doce capas registradas para estructurar la tobera son identificadas como: “Anillopp”, “Anillopr”, “RfTobBb2”, “RfTobBb1”, “RfTobCe”, “RfTobEb1”, y, “RfTobEb2”. A continuación, en la Tabla III y IV se presentan los escantillones y características tanto del Lazareto, [5], como de la Tobera, [3].

Fondo	Plancha, 8 mm.
	Transversales, T:(155x180x8) mm.
	Long. de Quilla, T:(250x180x8) mm.
Costado	Plancha, 8 mm.
	Pt: (70x8) mm.
	China, ø: 20 mm.
Mamparo (Peak de popa).	Rfzos. Verticales, Pt: (70x8) mm.
Escuadras	Plancha, 8 mm.

**Tabla III.** Escantillonado del Lazareto

Material	Acero Grado A, 42.2 DIN 17100 $\sigma_y$ : 2400 Kg/cm <sup>2</sup>
	Interior, Acero Inox. 316L
	Presión de soldadura Interior, 0.2 Bar.
Escantillón	Cara Exterior, Plancha: 8 mm.
	Cara Interior, Plancha: 10 mm.
	Anillos Interiores, Plancha: 16 mm.
	Transversales, Plancha: 16 mm.

**Tabla IV.** Características Principales de la Tobera.

Además, las cinco capas registradas para los agarres de la tobera se definen como: “RfTobBb2”, “RfTobBb1”, “RfTobCe”, “RfTobEb1”, “RfTobBb2”. Finalmente, el arbotante y el eje propulsor están registrados con una capa cada uno con el nombre de: “Arbotante” y “Eje”, respectivamente. Todos estos registros forman parte del modelo estructural para luego ser analizado. A continuación, en la Tabla V se presentan las características de estos dos elementos.

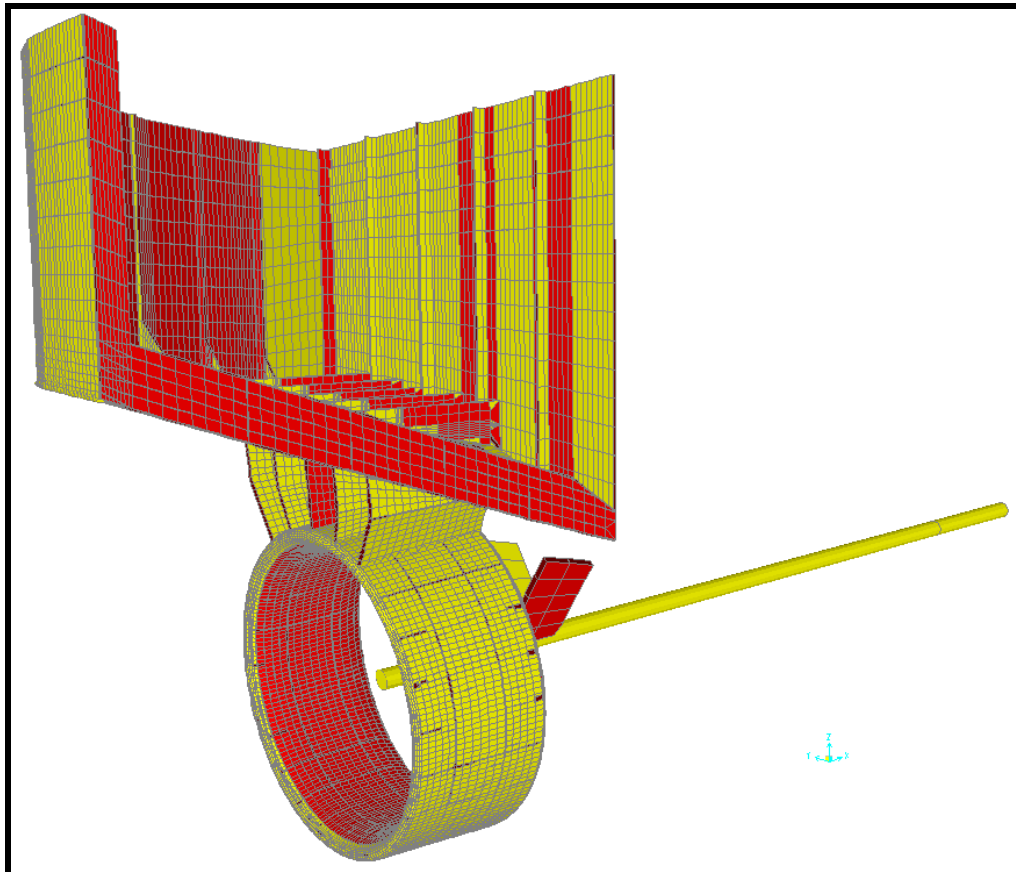
Arbotante	Plancha: 25 mm.
Eje Propulsor	Viga, sólida: Acero Inox, Ø: 3” (0.076 m.)

**Tabla V.** Características Principales del Arbotante y Eje.

Cabe destacar que el Eje Propulsor está formado por 4 elementos “Frame”, y, el Arbotante de 20 elementos “Shell”. La tobera con sus agarres han sido modelados con 14254 elementos “Shell”. El área de Lazareto consta de una china que une el costado de Babor con el Fondo, discretizado con 104 elementos “Frame”. Finalmente, la estructura del Lazareto consta de 9175 elementos “Shell”. (Véase, Apéndice A)



A continuación, se presenta el modelo que será utilizado para el análisis estructural con el programa Sap2000.



**Figura 9.** Modelo Estructural en Sap2000

## **CAPITULO II**

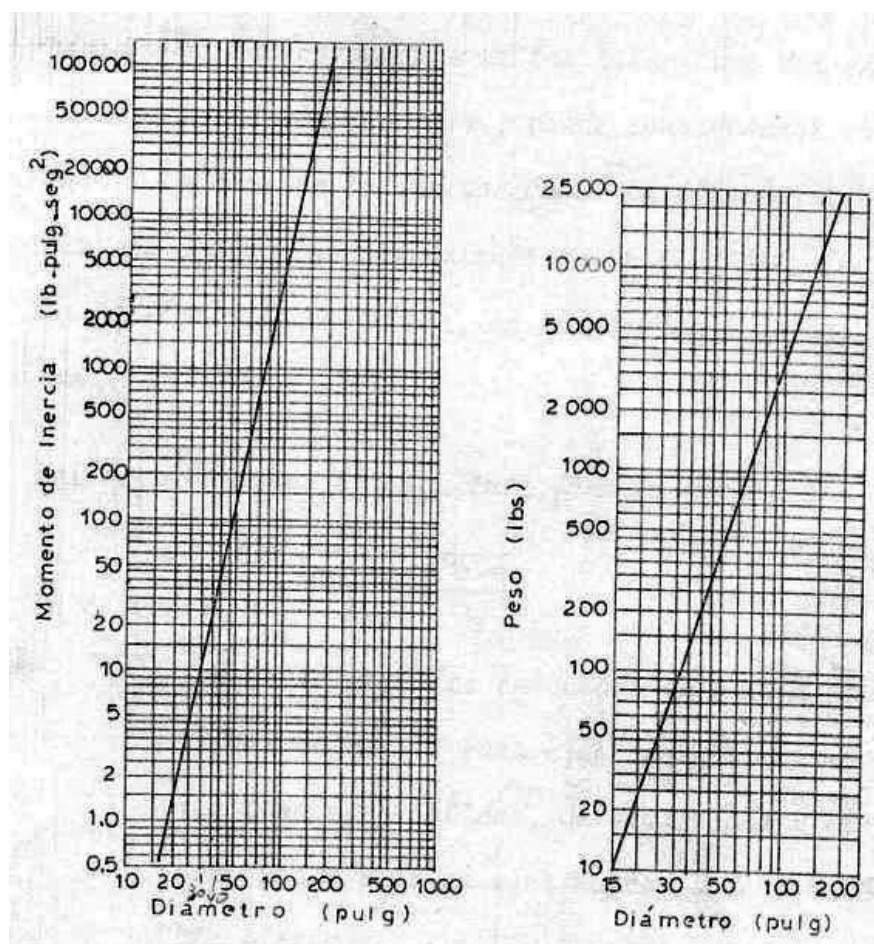
### **ESTIMACIÓN DE LAS CARGAS**

En este capítulo se analizan las cargas que se aplican al conjunto hélice tobera montada en la estructura de popa del remolcador Suinli II. Se estimaron la fuerza debida al desbalance de la hélice, y, las cargas en la tobera producidas por el máximo Tiro Estático desarrollado por la hélice. Finalmente se estimaron también cargas en la cara lateral de la tobera debidas a las Fuerzas Hidrodinámicas que se producirían cuando la embarcación navega a su máxima velocidad y se desliza transversalmente. Para ello se considera a la tobera como un cilindro inmerso en el agua desplazándose normal a la corriente con esa velocidad.

## **2.1. CARGAS DEBIDO AL DESBALANCE DE LA HÉLICE.**

Se hizo una pequeña investigación bibliográfica, y se encontró que las referencias clásicas como las reglas de Construcción y Clasificación de las sociedades más conocidas como ABS y Lloyd's Register no proporcionan información para la estimación de la fuerza de desbalance de hélices propulsoras. Por ello, se utilizó la referencia [9], que recomienda tomar la fuerza de desbalance como el 1% del peso del propulsor.

A su vez dado que no se disponía del peso en la información técnica disponible, se utilizó una figura encontrada en la referencia [10], reproducida en la Figura 10, que presenta una curva para la estimación del peso de hélices de acuerdo a su diámetro. Se trata de una figura con escala log-log, útil para efectos de estimaciones generales, dado que incluye únicamente la dependencia de un parámetro de la hélice. Por lo que, si el propulsor del remolcador Suinli II tiene un diámetro de 39.25 plg. (0.997m) el peso del propulsor aproximadamente es de 200 lbs que equivale a (91 kg).

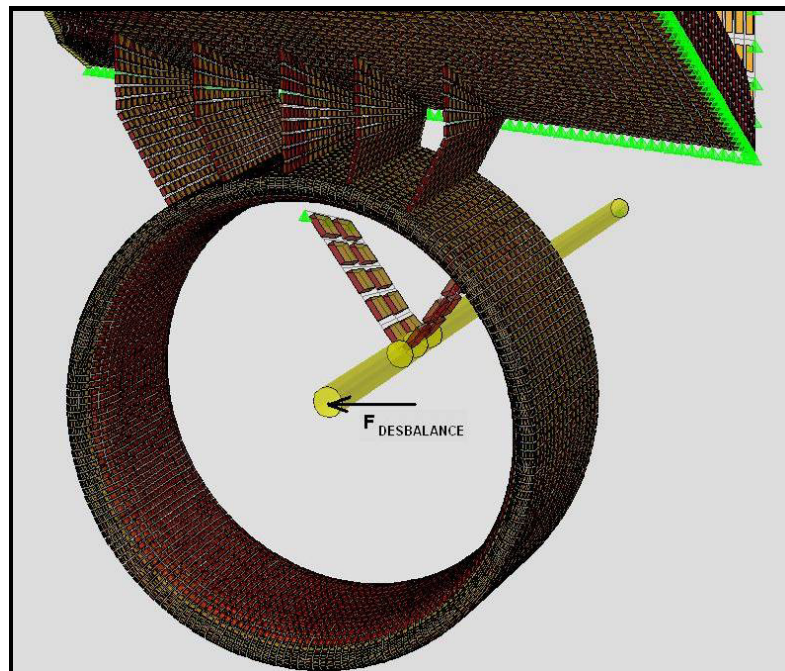


**Figura 10.** Estimación del peso de la hélice, [10]

Por lo tanto, si se considera el 1% x  $W_{\text{HELICE}}$  se obtiene una fuerza de 0,91 Kg. Dado que es un valor muy pequeño, se va a aplicar, en forma arbitraria, una fuerza de desbalance de 10 kg. Este valor será aplicado en el extremo de popa del eje (Manzana de la hélice) para poder estimar la deflexión del mismo, y, para

analizar la posibilidad de que se toquen las palas de la hélice con la superficie interior de la tobera, se va aplicar dicha fuerza en dirección lateral.

A continuación se representa la fuerza de desbalance aplicada en el modelo de Elementos Finitos en el eje propulsor:



**Figura 11.** Aplicación de la Fuerza de desbalance de la hélice

A continuación se presenta la siguiente carga a aplicar en el borde interior de la tobera.

## 2.2. ESTIMACION DEL TIRO ESTÁTICO.

En la referencia [11] se han desarrollado polinomios para las características de operación de modelos de hélices en tobera. Estas funciones corresponden a un tipo de tobera, teniendo la hélice un número de palas y razón de área desarrollada. En el caso de hélices en tobera se presentan los coeficientes de tres polinomios, para el Empuje total (Hélice más Tobera),  $C_T(x,y)$ , el Torque,  $C_Q(x,y)$ , y, el Empuje desarrollado por la tobera,  $C_{TN}(x,y)$ . Este último parámetro servirá para desarrollar el análisis estructural detallado sobre la sujeción de la tobera al casco.

Para estimar el Tiro Estático desarrollado por el conjunto hélice + tobera montado en el remolcador Suinli II, se considera que la embarcación hala sin avanzar, y por tanto el coeficiente de avance,  $J$ , es nulo. Entonces, se debe estimar el coeficiente de Empuje,  $K_T$ , para  $J=0$ , y a partir de este, el Tiro Estático. La fórmula a aplicar es:

$$T = K_T \rho N^2 D^4 \quad (1)$$

formulación que servirá para evaluar el Tiro Estático de la embarcación

donde  $\rho$  es la densidad del agua,  $N$ , es la velocidad de rotación del propulsor, y,  $D$ , es el diámetro del propulsor. Para la evaluación del Tiro Estático es necesario utilizar los datos del sistema propulsor indicados en el Subcapítulo 1.1.

Los resultados obtenidos para  $J=0$ , son  $K_T = 0.78$ ,  $K_{T-NOZ} = 0.405$ , y,  $K_Q = 0.08$ . Si se toma  $\rho = 1.025 \text{ ton/m}^3$  y la velocidad máxima de la hélice ( $N_{MOTOR}/\text{Reducción}$ ) =  $N_{HÉLICE} = 439$  [rpm], se tiene un Tiro Estático de 4.31 Ton por cada hélice y tobera. Esto confirma el Tiro Estático nominal de la embarcación de 8.5 ton que se pudo obtener al montaje final de la tobera.

El empuje generado por la tobera se calcula evaluando la siguiente fórmula:

$$T_{NOZ} = K_{T-NOZ} \rho N^2 D^4 \quad (2)$$

Por lo tanto:  $T_{NOZ} = 2.24 \text{ ton}$  (2240 kg), que es el empuje generado por la tobera neto.

Así mismo, debido a la inclinación del sistema propulsor analizado ( $4^\circ$ ), la fuerza estimada será descompuesta en las direcciones horizontal, X, y, vertical, Y.

$$T_{\text{TOB}(Z)} = T_{\text{TOB}} \times \text{Sen}(\varnothing) = 2.24 \text{ Ton} \times \text{Sen}(4^\circ) = 0.156 \text{ Ton. (156 Kg)}$$

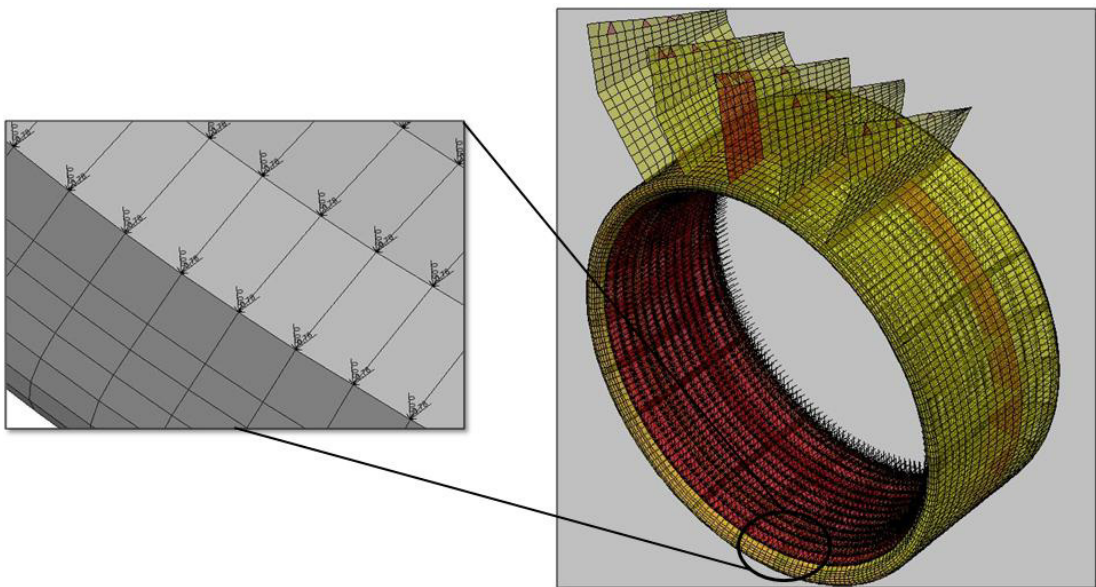
$$T_{\text{TOB}(X)} = T_{\text{TOB}} \times \text{Cos}(\varnothing) = 2.24 \text{ Ton} \times \text{Cos}(4^\circ) = 2.230 \text{ Ton. (2230 kg)}$$

Estos valores serán aplicados a los nodos de la cara interior de la tobera, tanto en dirección vertical como longitudinal.

Se aplicaron las fuerzas previamente mencionadas en forma distribuida en 2880 nodos, resultando valores de 0.054 Kg/nodo en dirección Z, y, 0.775 kg/nodo en X. A continuación se presentan en la Figura 12 las fuerzas distribuidas que actúan en la cara interior del modelo estructural de la tobera, con una ampliación de las fuerzas que actúan en cada uno de los nodos, tanto en la dirección X (longitudinal), y la dirección Z (Vertical) para ambos casos respectivamente. Recordemos que las



cargas actuantes solo se las aplican en el contorno interior de la tobera, para representar su fuerza neta calculada.



**Figura 12.** Carga debida al Tiro Estático aplicada a la cara interior de la tobera

### 2.3. ESTIMACION DE LA CARGA POR FLUJO TRANSVERSAL.

Ahora la atención se encuentra en las fuerzas generadas cuando la tobera se mueve en dirección transversal respecto del fluido. Para este caso, se consideró a la embarcación avanzando y por algún efecto la hélice se desplaza transversalmente a una velocidad de 12 Nudos, que corresponde a la máxima velocidad del buque.

Para estimar las cargas debido al flujo transversal se necesitó calcular el número de Reynolds, mediante la siguiente formulación:

$$Re = Vd/\nu \quad (3)$$

donde,  $d$  es el diámetro de la tobera y  $\nu$  es la viscosidad cinemática del fluido.

Aplicando los siguientes valores para el caso del remolcador,  $D_{EXT. TOBERA} = 1.228$  m. y  $V_{LATERAL} = 12$  nudos,  $\nu = 0.80E-06$  m<sup>2</sup>/seg y  $T = 30^{\circ}C$  se obtuvo un  $Re = 9.28E+06$ .

Con este número de Reynolds, se puede aproximar el coeficiente de arrastre obtenido de la gráfica del Apéndice B.

Una vez establecido el número de Reynolds, se calculó la Fuerza de arrastre mediante la siguiente ecuación que define el Coeficiente de arrastre,  $C_A$ :

$$C_A = F_A / [\frac{1}{2} \rho V^2 A] \quad (4)$$

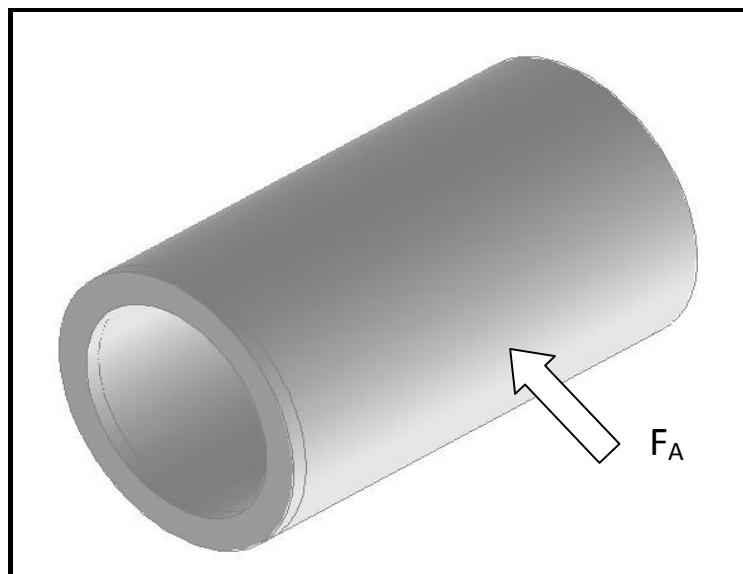
de manera que la Fuerza de arrastre se puede estimar con la siguiente ecuación:

$$F_A = \frac{1}{2} C_A \rho V^2 A, \quad (5)$$

donde,  $C_A$  representa el coeficiente de arrastre con un valor de 0.35.

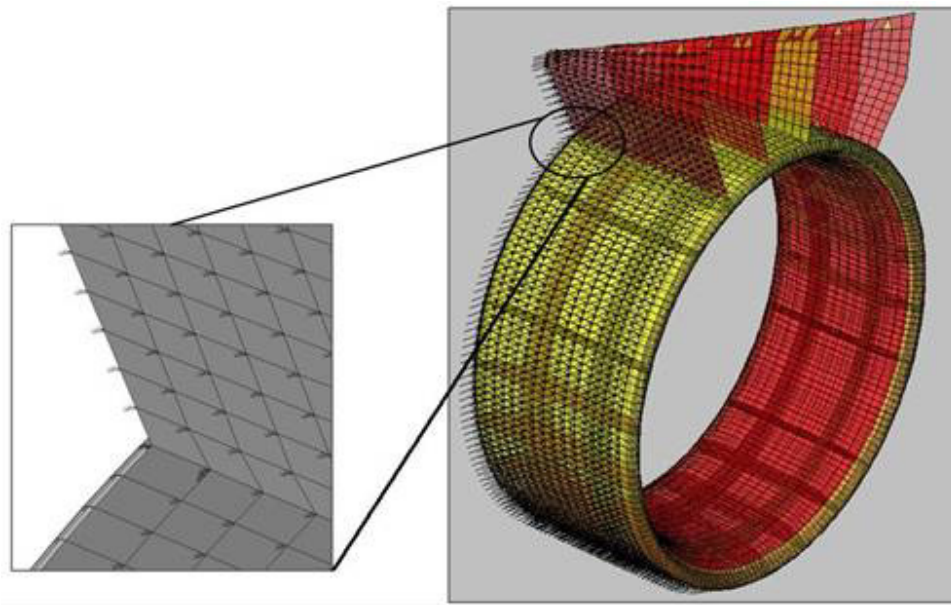
En el Apéndice B, se puede obtener el Coeficiente de arrastre para un cilindro circular liso como una función de  $Re$ .  $A$ , es el área lateral para el cilindro, considerando una longitud de 0,50 m,  $V$ , es la velocidad de 12 nudos, y,  $\rho = 1.025 \text{ Ton/m}^3$ . Donde, el valor de la velocidad considerada es un valor extremo de operación. Asimismo, se asemeja a que la embarcación se mueve transversalmente en un momento imprevisto.

Cabe recalcar que para el cálculo de la fuerza de arrastre se consideró a la tobera como un cilindro inmerso en el agua desplazándose transversalmente a través del fluido. A continuación se muestra un esquema de la fuerza de arrastre sobre un cilindro.



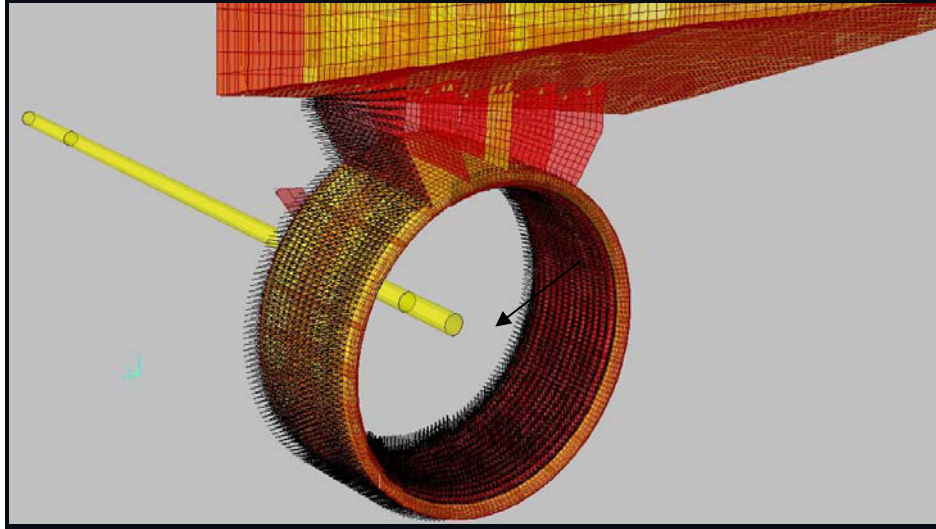
**Figura 13.** Carga lateral sobre un cilindro

Reemplazando estos valores en la Ecuación (5), se obtiene una fuerza de arrastre de 1619 Kg. Esta fuerza será distribuida sobre los 1579 nodos que sirven para modelar la cara lateral de la tobera, resultando valores de 1.025 Kg/nodo en dirección (-Y). A continuación se presenta en la Figura 14 las fuerzas distribuidas que actúan en la cara lateral de la tobera.



**Figura 14.** Carga Lateral Aplicada debida al Flujo Transversal

De manera resumida, se presentan en la Figura 15 las cargas que se van a aplicar simultáneamente en el sistema, esto es, para poder analizar las deformaciones en el eje propulsor y los niveles de Esfuerzo que se producen en los Agarres de la tobera. Esta Figura representará el modelo esquemático para poder analizar el sistema con cinco soportes en el Capítulo III, y analizar el sistema para tres soportes, que es el caso de análisis del Capítulo IV.



**Figura 15.** Cargas actuantes sobre el sistema

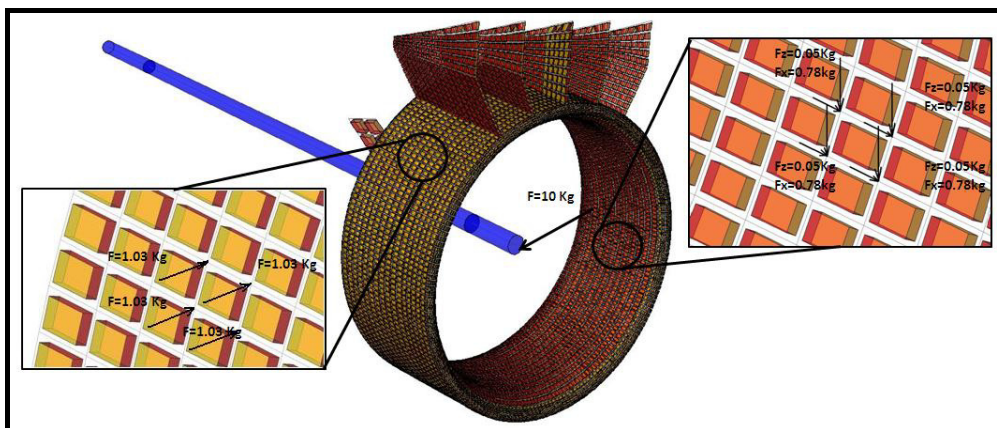
## **CAPITULO III**

### **ANÁLISIS ESTRUCTURAL DEL CONJUNTO**

En este capítulo se analiza la estructura de conexión original de la tobera, con cinco planchas de agarre, al fondo del remolcador Suinli II. Se aplicarán las cargas que se calcularon en el Capítulo II, una vez completado el modelo estructural. Se analizan los niveles de Esfuerzo en cada uno de los agarres y en ciertos elementos representativos en el sistema, como el Lazareto y el Arbotante. Así mismo, se analiza la deflexión que se produce en el extremo de popa del eje propulsor y en la cara interior de la tobera para determinar la posibilidad de roce entre estos dos elementos.

### 3.1. APLICACIÓN DE CARGAS Y RESTRICCIONES A LOS NODOS

La Fuerza de desbalance de la hélice, la Fuerza hidrodinámica lateral, y, las Fuerzas debida al Tiro Estático de la tobera, son aplicadas en los nodos de los elementos estructurales del eje propulsor y la tobera respectivamente, tal como se calculó y mostró gráficamente en el Capítulo II. Estas cargas son aplicadas simultáneamente al sistema utilizando el programa Sap2000. La Figura 16, muestra la distribución de cargas que se aplican al sistema.



**Figura 16.** Cargas aplicadas al sistema simultáneamente.

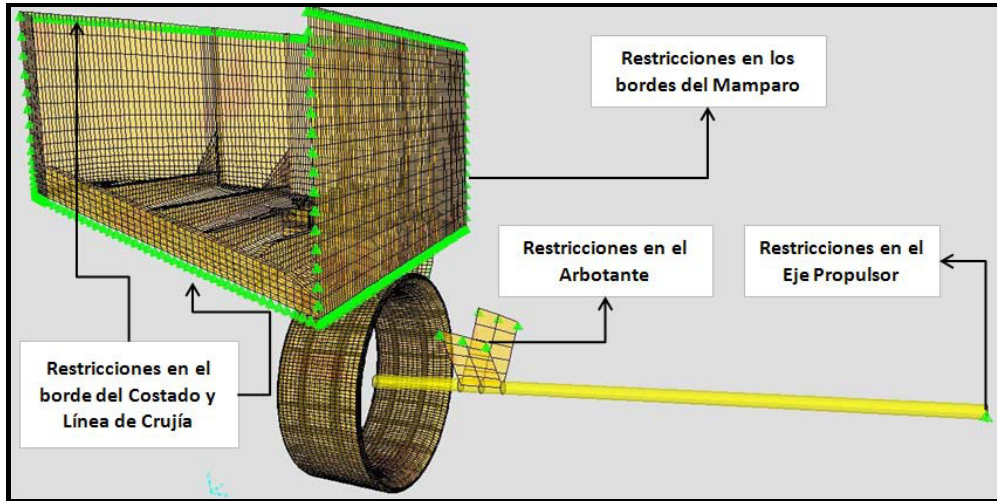
Por el pequeño tamaño de los elementos, la distribución en forma de fuerzas concentradas semeja la distribución de presión continua.



Ya que se ha modelado únicamente la estructura del área del Lazareto, se van a aplicar restricciones en los límites del modelo, y que corresponden a las conexiones con la estructura principal de la embarcación. Estas restricciones ayudan a representar el modelo lo más cercano posible a la realidad.

Se restringió el desplazamiento lineal en las tres direcciones de los nodos en los bordes del mamparo, los bordes superiores del costado de Babor y los bordes que conforman el longitudinal de línea de crujía. El eje propulsor se soporta en el arbotante, por medio de su nodo intermedio, y además se le restringe la posibilidad de desplazamiento en el extremo de proa, que representaría el soporte en el prensa estopa. Así mismo, se restringe la posibilidad de desplazamiento de los bordes superiores de cada brazo del arbotante que conectan con el fondo de la embarcación. Estas restricciones son requeridas para evitar modelar la embarcación completa, ya que solo se pretende analizar las conexiones de la tobera al casco.

A continuación se presenta en la Figura 17, el modelo con las restricciones descritas.



**Figura 17.** Restricciones del Sistema

### 3.2. ANÁLISIS DE ESFUERZOS

Luego de haber aplicado las cargas y las restricciones que actúan sobre el sistema, se procede a calcular los niveles de esfuerzos que se producen en la conexión de cada uno de los agarres de la tobera con cinco soportes, establecidos en el modelo original. Se desarrollará este análisis de la distribución de esfuerzos por etapas: en los agarres, en la estructura del Lazareto, específicamente en la estructura del fondo (conexión con la estructura transversal), y, en el arbotante.

#### **Esfuerzos en los agarres de la tobera**

En primer lugar, se analizaron las cinco planchas de agarre de la tobera con la estructura del Fondo, resumiendo la distribución de Esfuerzos para cada una de las conexiones en la Figura 18. Se determina que en el elemento 1905 que pertenece al agarre identificado como: "Rf-Tob-Bb2", se presentan los valores extremos de esfuerzo:  $S_{22} \cong (+\sigma_z)$  de  $2.04E+07 \text{ Kg/m}^2$ , y,  $S_{22} \cong (-\sigma_z)$   $-1.11E+07 \text{ Kg/m}^2$ , en la cara superior e inferior del elemento respectivamente; estos valores están 1.17 y 2,16 veces, respectivamente, por debajo del esfuerzo de fluencia del acero A36

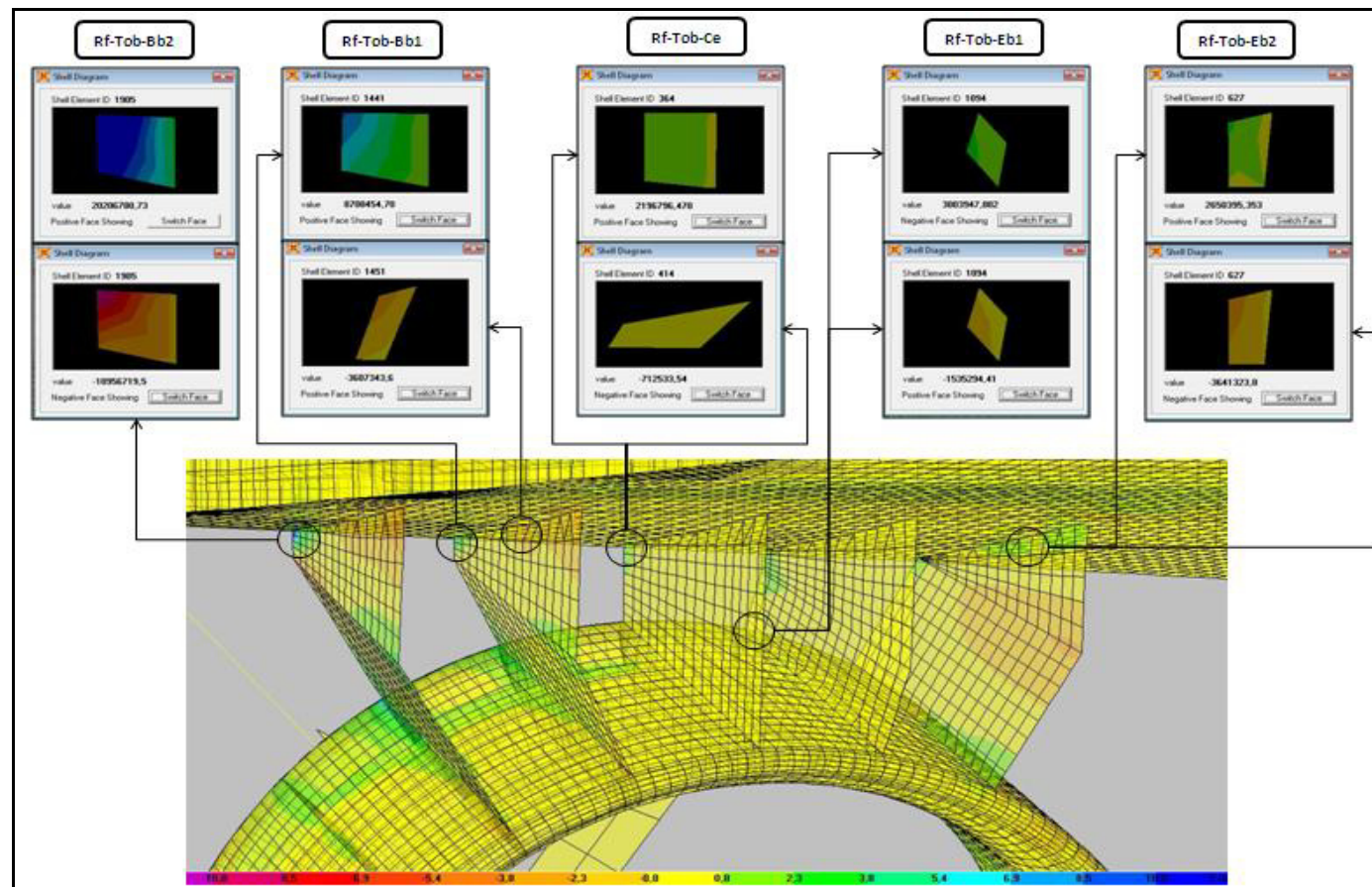
(2.40E+07 kg/m<sup>2</sup>). Además dado que el cambio de signo es notable, es señal de que la flexión es el efecto más importante en este elemento estructural. Esto significa que la Fuerza Hidrodinámica lateral es la causa principal de los esfuerzos desarrollados (la dirección local 2 en los agarres corresponden a la dirección vertical).

Finalmente en las Tablas VI y Tabla VII, se presentan los valores de esfuerzos máximos y mínimos<sup>1</sup> que se producen en los agarres de la tobera, y en la figura 19, se muestra esta distribución de Esfuerzos. En el Anexo 2, se desarrolla un análisis detallado para cada uno de los agarres.

---

<sup>1</sup> Los valores máximos y mínimos en caso de esfuerzo en el plano se calculan como:

$$(\sigma'_1)_{MAX}^{MIN} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2}\right)^2 + \tau_{12}^2}, [11]$$



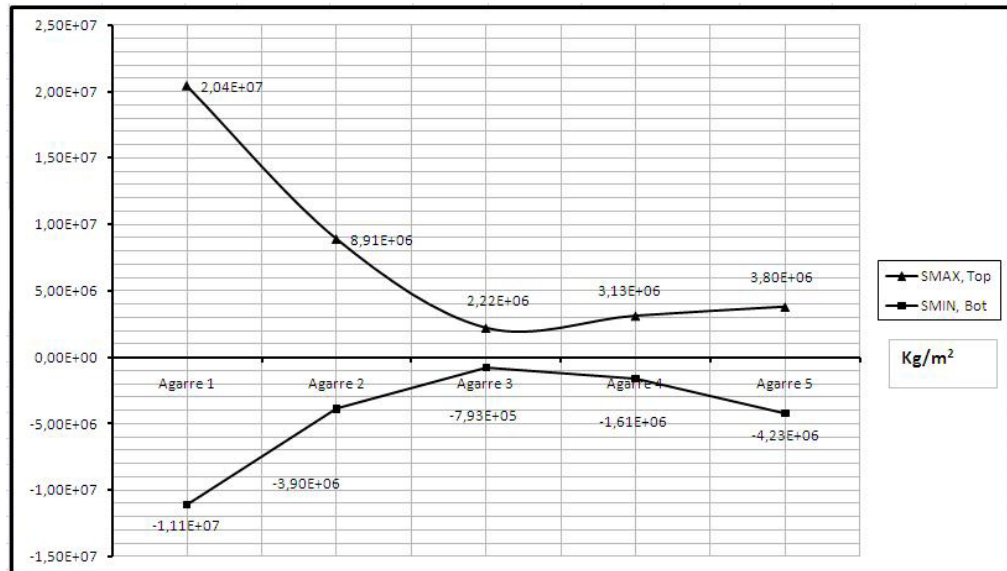
**Figura 18.** Resumen General de Distribución de Esfuerzos,  $\text{Kg/m}^2$

	Agarre 1			Agarre 2			Agarre 3			Agarre 4			Agarre 5		
	Rf-Tob-Bb2.			Rf-Tob-Bb1.			Rf-Tob-Ce.			Rf-Tob-Eb1.			Rf-Tob-Eb2.		
	Max. Esf.	Elemento	Nodo	Max. Esf.	Elemento	Nodo	Max. Esf.	Elemento	Nodo	Max. Esf.	Elemento	Nodo	Max. Esf.	Elemento	Nodo
S11, Top															
S22, Top	2,03E+07	1905	2118	8,82E+06	1441	1610	2,20E+06	364	223	2,25E+06	1003	1125	2,72E+06	627	707
S12, Top															
SMAX, Top	2,04E+07	1905	2118	8,91E+06	1441	1610	2,22E+06	364	223	2,53E+06	1003	1124	3,01E+06	627	707
SMIN, Top															
SVM, Top															
S11, Bot															
S22, Bot										3,06E+06	1094	1223			
S12, Bot															
SMAX, Bot										3,13E+06	1094	1223	2,34E+06	629	519
SMIN, Bot															
SVM, Bot													3,80E+06	627	707

**Tabla VI.** Valores de Esfuerzos Máximos Positivos en cada uno de los Agarres, Kg/m<sup>2</sup>

	Agarre 1			Agarre 2			Agarre 3			Agarre 4			Agarre 5		
	Rf-Tob-Bb2.			Rf-Tob-Bb1.			Rf-Tob-Ce.			Rf-Tob-Eb1.			Rf-Tob-Eb2.		
	Max. Esf.	Elemento	Nodo	Max. Esf.	Elemento	Nodo	Max. Esf.	Elemento	Nodo	Max. Esf.	Elemento	Nodo	Max. Esf.	Elemento	Nodo
S11, Top															
S22, Top				-3,67E+06	1451	1617	-7,43E+05	414	430	-1,57E+06	1094	1223	-3,18E+06	629	519
S12, Top															
SMAX, Top															
SMIN, Top				-3,90E+06	1451	1617	-7,93E+05	414	430	-1,61E+06	1094	1223	-3,36E+06	629	519
SVM, Top															
S11, Bot															
S22, Bot	-1,10E+07	1905	2118							-1,32E+06	1004	1126	-3,76E+06	627	707
S12, Bot															
SMAX, Bot															
SMIN, Bot	-1,11E+07	1905	2118							-1,32E+06	1004	1126	-4,23E+06	627	707
SVM, Bot															

**Tabla VII.** Valores de Esfuerzos Máximos Negativos en cada uno de los Agarres, kg/m<sup>2</sup>



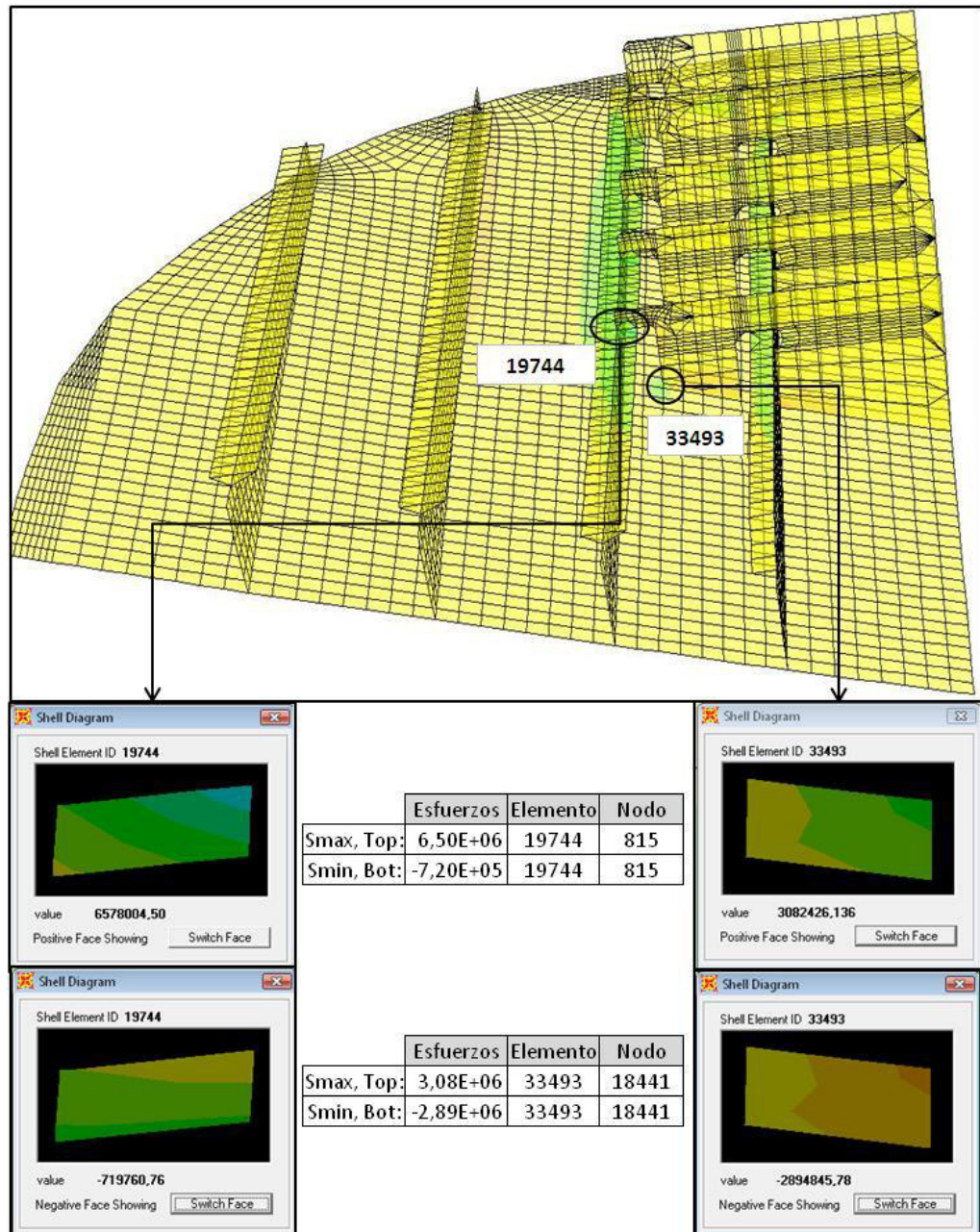
**Figura 19.** Esfuerzos Extremos en los Agarres de la Tobera, kg/m<sup>2</sup>

En general, el máximo esfuerzo está por debajo del límite de Fluencia, y, no se esperaría falla alguna en esta parte de la estructura. Además el agarre en el lado de aplicación de la carga es el que más esfuerzo desarrolla.

### **Esfuerzos en la estructura del Lazareto**

Luego se analizó la distribución de esfuerzos que se producen en la estructura interior, en el área de Lazareto, y que se presenta en la Figura 19. Se observa claramente que en el refuerzo transversal 2 del fondo, se presenta el valor máximo  $S_{22} \cong (+\sigma_y)$  de  $6.5E+06 \text{ Kg/m}^2$ , y,  $S_{22} \cong (-\sigma_y)$  de  $-7.20E+05 \text{ Kg/m}^2$ , en la cara superior e inferior del elemento 19744; estos valores están 3.69 y 33.3 veces, respectivamente, por debajo del esfuerzo de fluencia. Igualmente, en el elemento 33493, que pertenece al planchaje de fondo, se presentan esfuerzos  $S_{22} \cong (+\sigma_y)$  de  $3.08E+06 \text{ Kg/m}^2$ , y,  $S_{22} \cong (-\sigma_y)$  de  $-2.89E+06 \text{ Kg/m}^2$ , en la cara superior e inferior de este elemento; estos valores están muy por debajo del esfuerzo de fluencia, lo que quiere decir que la estructura no falla.

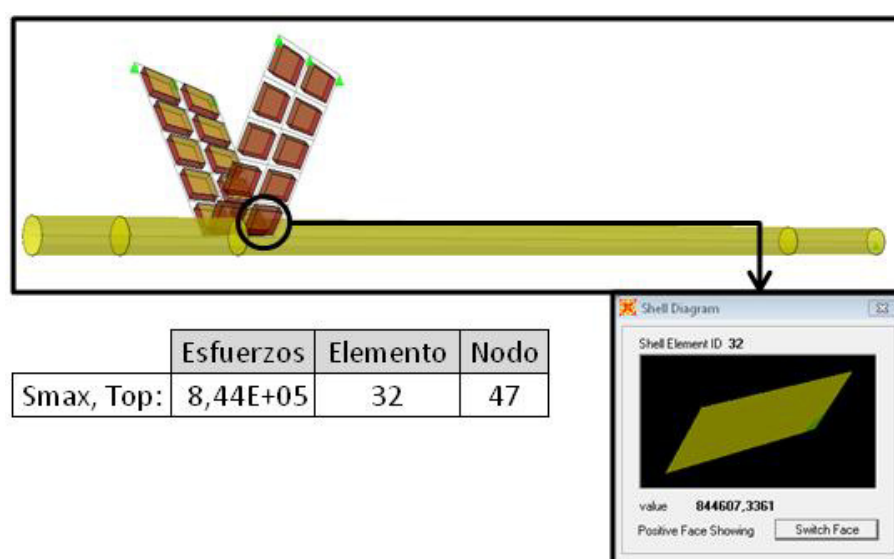




**Figura 20.** Distribución de Esfuerzos en la estructura interior del Lazareto, Kg/m<sup>2</sup>

### Esfuerzos en los brazos del arbotante

Finalmente se analizó el nivel de esfuerzos que se produjeron en el arbotante tipo "V". Esta distribución se representa en la Figura 21.



**Figura 21.** Distribución de Esfuerzos en el arbotante, Kg/m<sup>2</sup>

Se nota claramente que el nivel de Esfuerzo máximo  $S_{22} \cong (+\sigma_z)$  es de  $8.44E+05 \text{ Kg/m}^2$ , que se presenta en la zona de conexión de los brazos y que representaría la unión con el bocín del arbotante. Este valor está muy por debajo del Esfuerzo de Fluencia del Acero.

### 3.3. ANALISIS DE DEFORMACIONES

A continuación se analizan las deformaciones que se producen en el sistema. Se analiza primero las deformaciones que ocurren en cada uno de los agarres, y luego la deformación en la cara interior de la tobera. Estos valores se comparan con el desplazamiento en dirección Y del extremo de popa del eje propulsor debido a la aplicación de la carga de desbalance. Esto se hace para poder determinar si existe la posibilidad de rozamiento entre los bordes de la hélice y la cara interior de la tobera. Además, se determinó también la máxima deformación que ocurre en los elementos de conexión interior en el área de Lazareto.

El perfil deformado del sistema completo se presenta en la Figura 22, mientras que en la Figura 23, se muestran las deformaciones en el sistema de agarre de la tobera cuando se aplican simultáneamente la Fuerza Hidrodinámica lateral y el Máximo Tiro Estático.

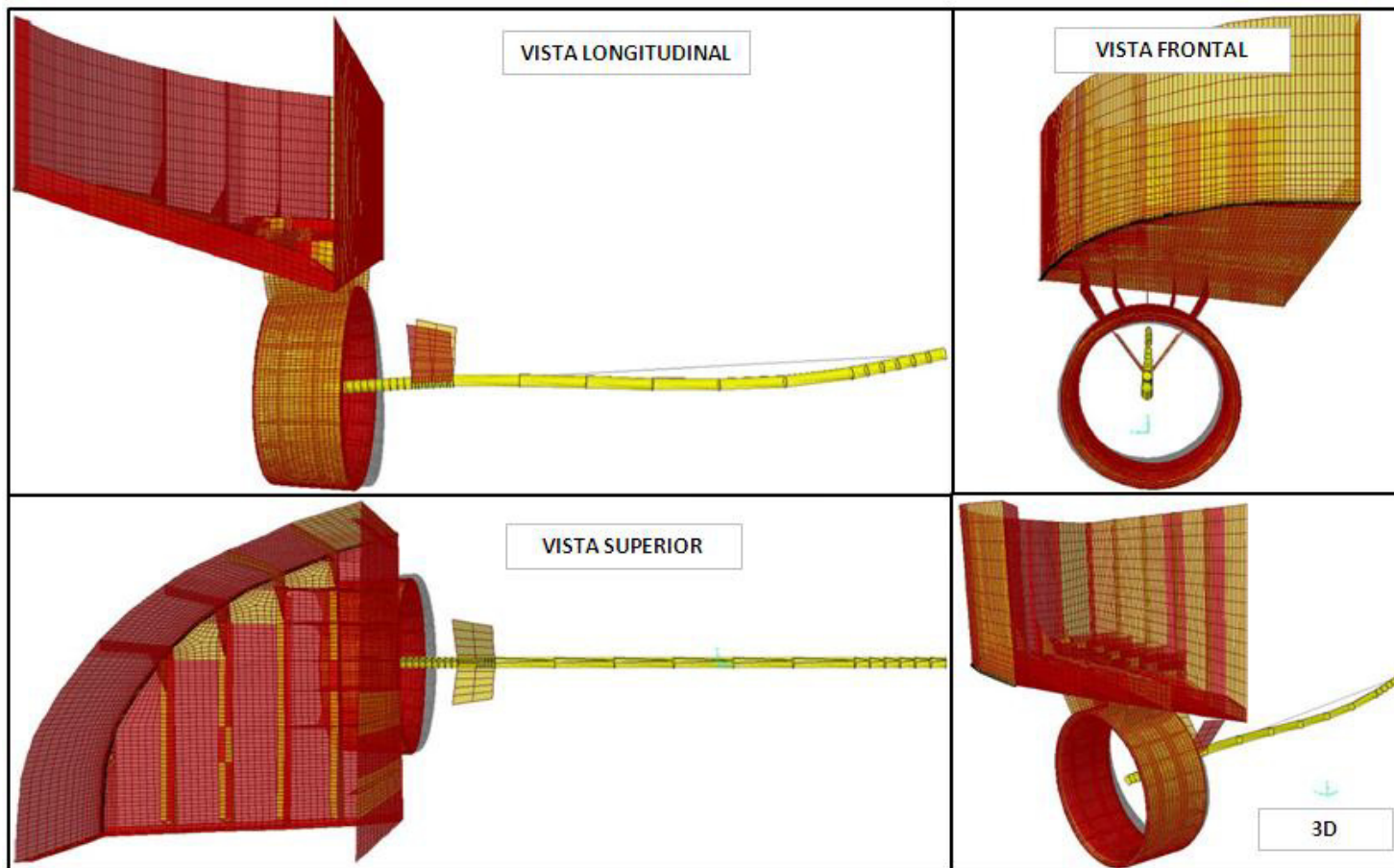


Figura 22. Vistas del Sistema Deformado.

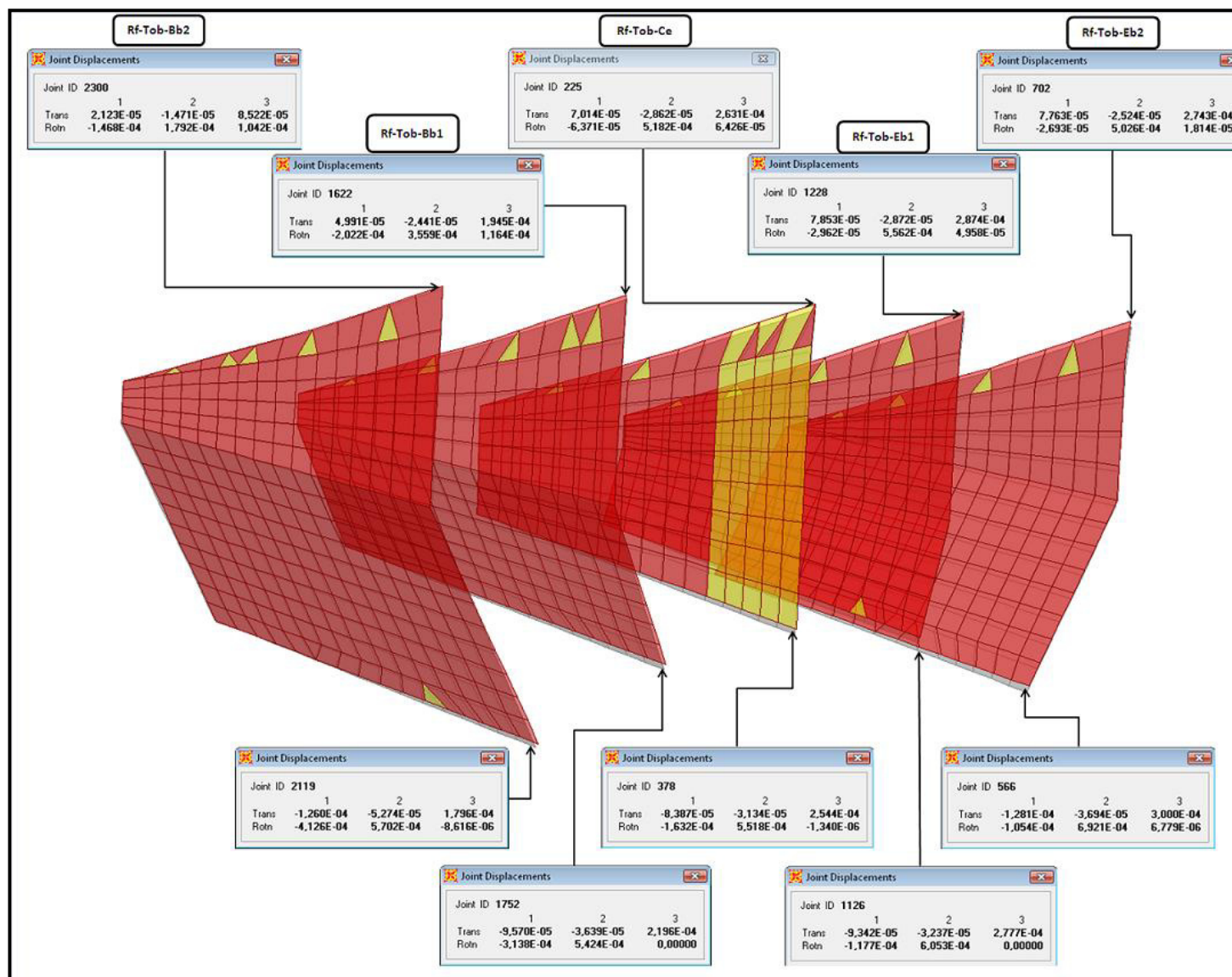
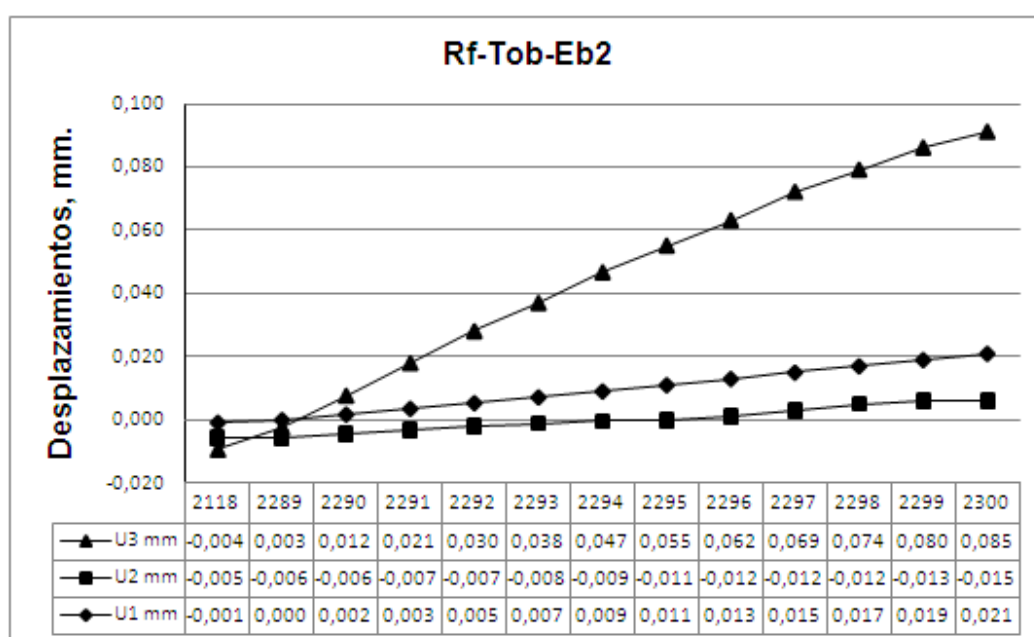


Figura 23. Deformación en los Agarres de la Tobera, m

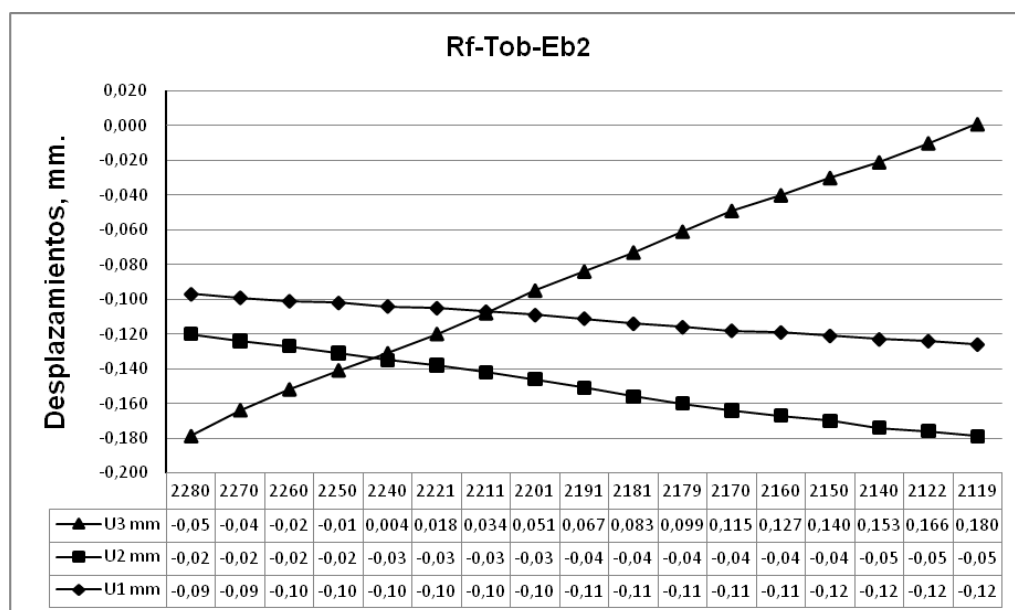
Se ha escogido como referencia al “Rf-Tob-Bb2”, ya que en este agarre se produce el mayor nivel de esfuerzo. Se van a graficar los desplazamientos de los nodos que forman la línea de conexión de este agarre a la estructura del fondo del remolcador en la figura 24 y es el que se muestra a continuación:



**Figura 24.** Desplazamientos de los nodos en la unión del agarre al fondo del remolcador.

De este gráfico se nota que los desplazamientos en las tres direcciones son menores a 1 mm.

Asimismo, en la figura 25 se muestra el desplazamiento de los nodos de este mismo agarre en la línea de conexión con la tobera.



**Figura 25.** Desplazamientos de los nodos en la unión del agarre a la tobera.

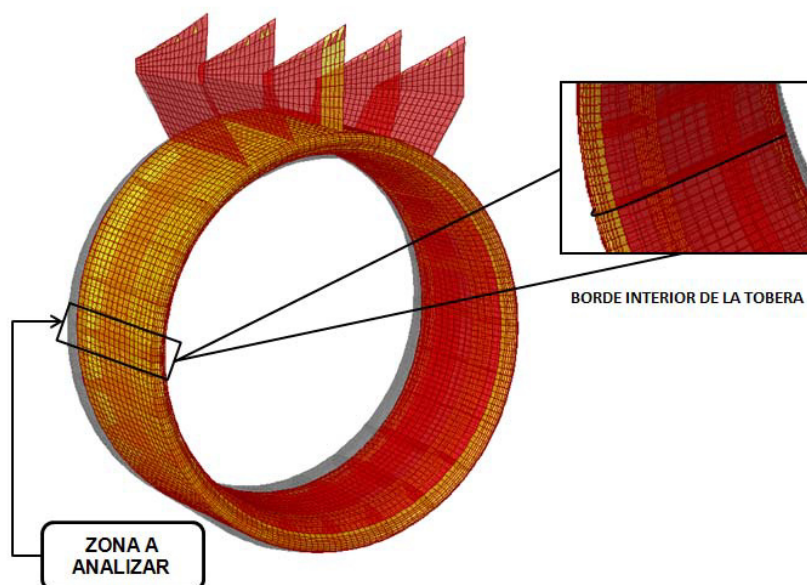
De estos gráficos, se nota claramente que los desplazamientos de los nodos en dirección vertical es más pronunciada, con un valor máximo de 0.18 mm en el nodo 2119, que pertenece a la conexión entre el agarre y la estructura superior de la tobera.

Asimismo, los desplazamientos en las tres direcciones son menores a 1 mm.

De estos dos gráficos que representan los desplazamientos de los nodos del agarre que conectan tanto la estructura del fondo como la estructura de la

tobera, quieren decir que el agarre de la tobera se desplaza mucho más en sentido longitudinal por efecto de la carga axial del máximo Tiro Estático.

A continuación, se analiza la deformación que se produce en la tobera cuando son aplicadas simultáneamente las cargas debida al Tiro Estático y Fuerzas Hidrodinámicas. En la Figura 26, se muestra el perfil deformado de la tobera.



**Figura 26.** Nodos a analizar en el Perfil deformado de la tobera.

Los valores de los desplazamientos nodales del borde analizado se presentan en la Tabla VIII notándose que es muy similar para todos los nodos, lo que indica que la tobera no se deforma. De acuerdo a esta tabla, se observa que en la dirección longitudinal X se produce mayor deformación por efecto de la carga



del Tiro Estático, sin dejar de lado la deformación por efecto de la carga lateral en dirección lateral Y. En la Tabla VIII, se presentan los desplazamientos nodales del eje propulsor.

Nodos	U1	U2	U3
	mm	mm	mm
6040	-0,439	-0,271	0,067
9926	-0,440	-0,275	0,053
9934	-0,440	-0,279	0,036
9942	-0,439	-0,283	0,017
9950	-0,437	-0,287	-0,003
9958	-0,436	-0,292	-0,026
9966	-0,434	-0,297	-0,049
9974	-0,433	-0,303	-0,071
9982	-0,431	-0,308	-0,094
9990	-0,430	-0,312	-0,117
9998	-0,428	-0,317	-0,139
10006	-0,426	-0,323	-0,167
10014	-0,423	-0,329	-0,197
10022	-0,419	-0,334	-0,228
8035	-0,414	-0,339	-0,260
7970	-0,407	-0,343	-0,290

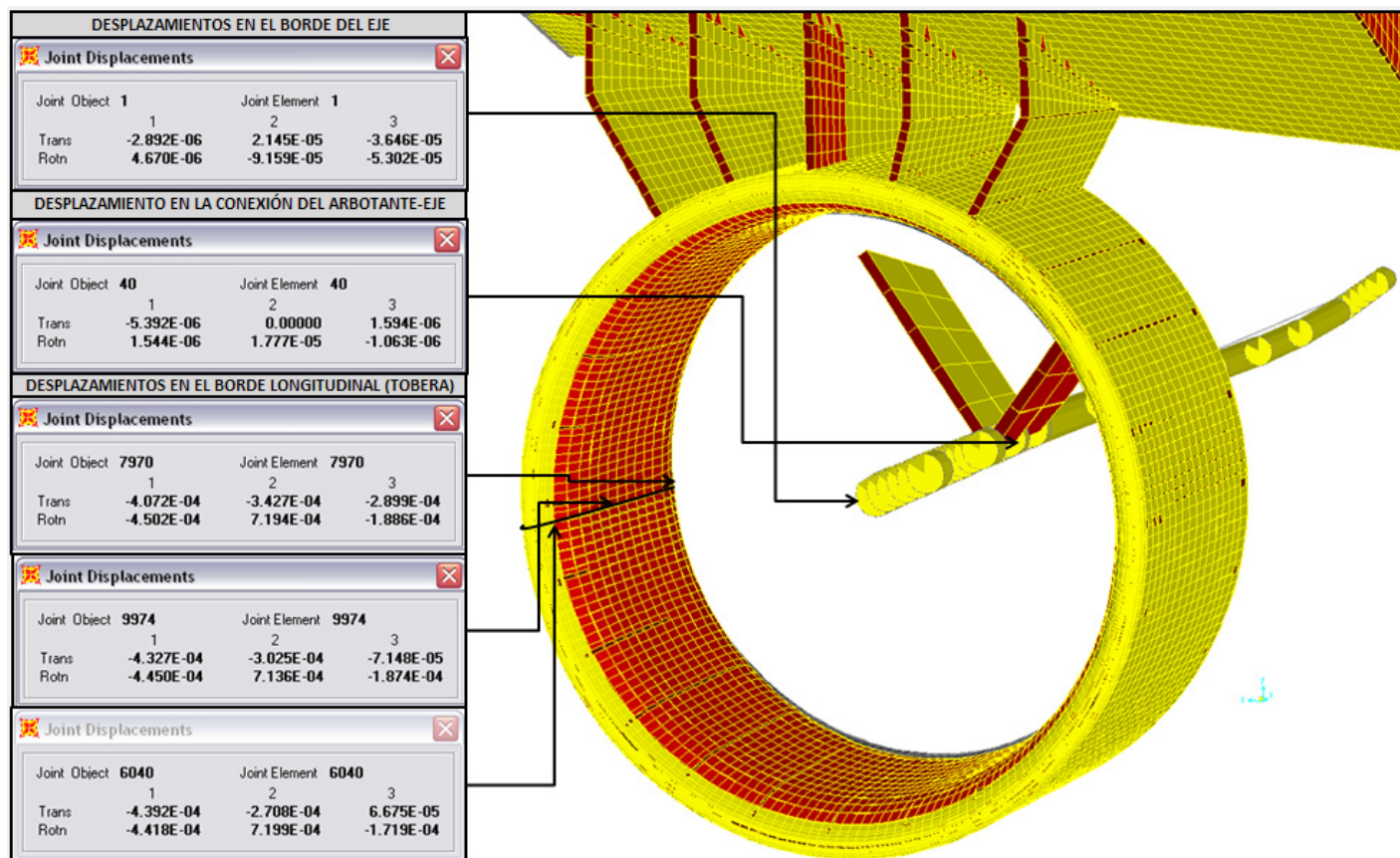
**Tabla VIII.** Desplazamientos de los nodos del Borde de la Tobera, mm

Nodo	U1	U2	U3
	[mm]	[mm]	[mm]
1	-0.0029	0.021	-0.036

**Tabla IX.** Desplazamientos Nodales del Extremo del Eje.

De la Tabla IX, se observa que los máximos desplazamientos son de 0.44 en dirección X, mientras que en dirección Y el desplazamiento es muy pequeño. Para poder determinar la posibilidad de roce entre la cara interior de la tobera y el borde de la pala de la hélice, la suma de los valores absolutos en dirección  $U_2$  debe ser mayor de 9 mm (claro de la hélice en la tobera), que en cuyo caso no se da. El valor obtenido de esta suma es menor que 1 mm, por lo que se podría decir que no se espera que el conjunto Hélice y Tobera rocen entre sí.

Finalmente, en la Figura 27 se muestra un resumen de los desplazamientos obtenidos por el programa Sap2000 para cada uno de los nodos analizados.



**Figura 27.** Desplazamientos en el Borde de la Tobera, Eje y Conexión del Arbotante, m

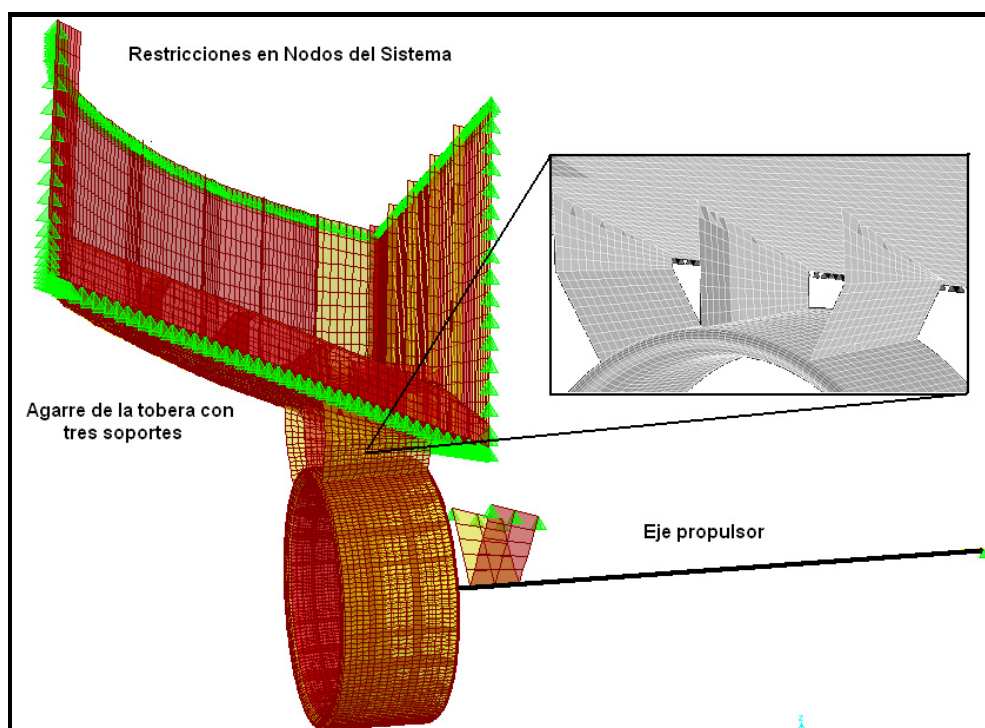
## **CAPITULO IV**

### **ANALISIS ESTRUCTURAL DE UNA ALTERNATIVA DE AGARRE**

En este capítulo se analiza la estructura de conexión con tres agarres de la tobera al fondo del remolcador Suinli II, como modelo alternativo. Se aplican las mismas restricciones y cargas calculadas en el Capítulo II. Se analizan los niveles de Esfuerzo que ocurren en este modelo estructural; asimismo, la deformación que ocurre en el conjunto hélice+tobera, es considerada con la deformación en el extremo del eje propulsor para determinar la posibilidad de roce. Finalmente, se comparan los niveles de esfuerzos y deformaciones entre los dos sistemas de conexión de la tobera (cinco y tres soportes).

### 5.1. MODELO DE AGARRE CON TRES SOPORTES

Para analizar este modelo de agarre de la tobera al fondo del remolcador, se debió completar primero el modelo estructural con los tres soportes. Se aplicaron luego las restricciones y cargas calculadas en el Capítulo II, y, además, se consideraron los mismos efectos de corrosión en los agarres. A continuación en la Figura 28, se presenta un esquema del nuevo modelo con tres agarres de la tobera y sus respectivas restricciones.



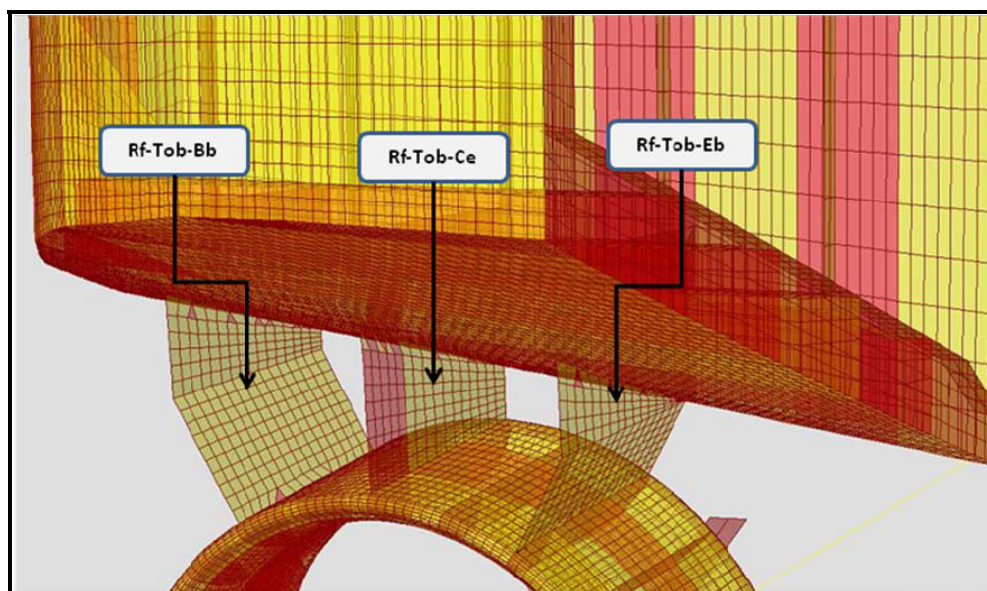
**Figura 28.** Sistema con tres soportes de la tobera

## 5.2. ANÁLISIS DE ESFUERZOS DE LA CONEXIÓN ALTERNATIVA

Luego de aplicar las restricciones y las cargas que actúan sobre este sistema, se procedió a analizar los niveles de esfuerzos que se produjeron en la conexión de cada uno de los agarres de este modelo alternativo. En este capítulo no se considerará el análisis de la distribución de esfuerzos en el interior del área de Lazareto y la conexión del arbotante al eje propulsor, ya que sus niveles de esfuerzos están por debajo del esfuerzo de fluencia del acero A36, de acuerdo a los resultados obtenidos en el Capítulo III.

### **Esfuerzos en los agarres de la tobera con tres soportes.**

Para el análisis de los niveles de Esfuerzos que se produjeron en los agarres de la tobera del modelo alternativo, se le designaron nombres a las tres conexiones, estos son: “Rf-Tob-Bb”, “Rf-Tob-Ce”, y, “Rf-Tob-Eb”. A continuación en la Figura 29, se muestran los nombres designados a cada uno de los agarres de la tobera.



**Figura 29.** Identificación de los tres soportes

Los resultados referentes a los niveles de Esfuerzos obtenidos con el programa Sap2000 que se presentan en este tipo de conexión, se presenta en la Figura 30.

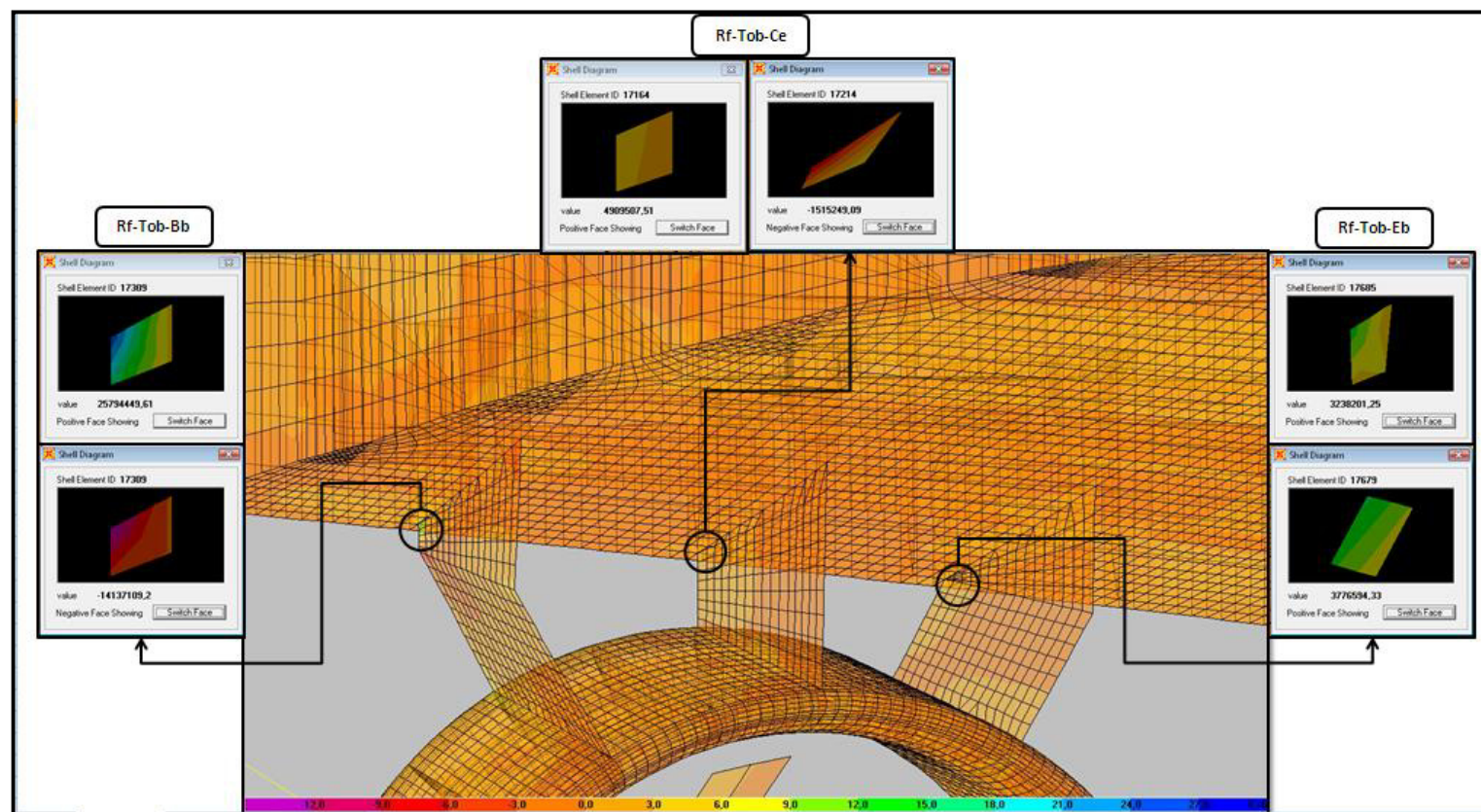


Figura 30. Resumen General de Distribución de Esfuerzos, Kg/m<sup>2</sup>



De la Figura 30, se determina que en el elemento 17309 que pertenece al agarre identificado como "Rf-Tob-Bb", tiene valores de esfuerzo  $S_{22} \cong (+\sigma_z)$  de  $2.67E+07 \text{ Kg/m}^2$ , y,  $S_{22} \cong (-\sigma_z)$   $-1.46E+07 \text{ Kg/m}^2$ , en la cara superior e inferior respectivamente. En el agarre identificado como: "Rf-Tob-Ce", se tienen valores de esfuerzo  $S_{22} \cong (+\sigma_z)$  de  $4.88E+06 \text{ Kg/m}^2$ , en la cara superior del elemento 17164, y,  $S_{22} \cong (-\sigma_z)$   $-1.65E+06 \text{ Kg/m}^2$ , en la cara inferior del elemento 17214, respectivamente. Finalmente en el agarre identificado como: "Rf-Tob-Eb", se tienen valores de esfuerzo  $S_{22} \cong (+\sigma_z)$  de  $4.12E+06 \text{ Kg/m}^2$ , y,  $S_{22} \cong (-\sigma_z)$  de  $-5.56E+06 \text{ Kg/m}^2$ , en la cara superior e inferior respectivamente. Se observa claramente que el agarre identificado como: "Rf-Tob-Bb" sufre un nivel de esfuerzo mayor al esfuerzo de fluencia  $2.40E+07 \text{ kg/m}^2$ , por lo que la estructura fallaría.

Sin embargo, la distribución de esfuerzos que se presenta en el elemento más representativo (17309), y que se presenta en la Figura 31, muestra que la zona de potencial falla está muy concentrada en la esquina. De manera que lo adecuado sería hacer en el futuro un análisis detallado, considerando que la soldadura incrementa el espesor en el punto de conexión, lo que reduciría el nivel de esfuerzo.

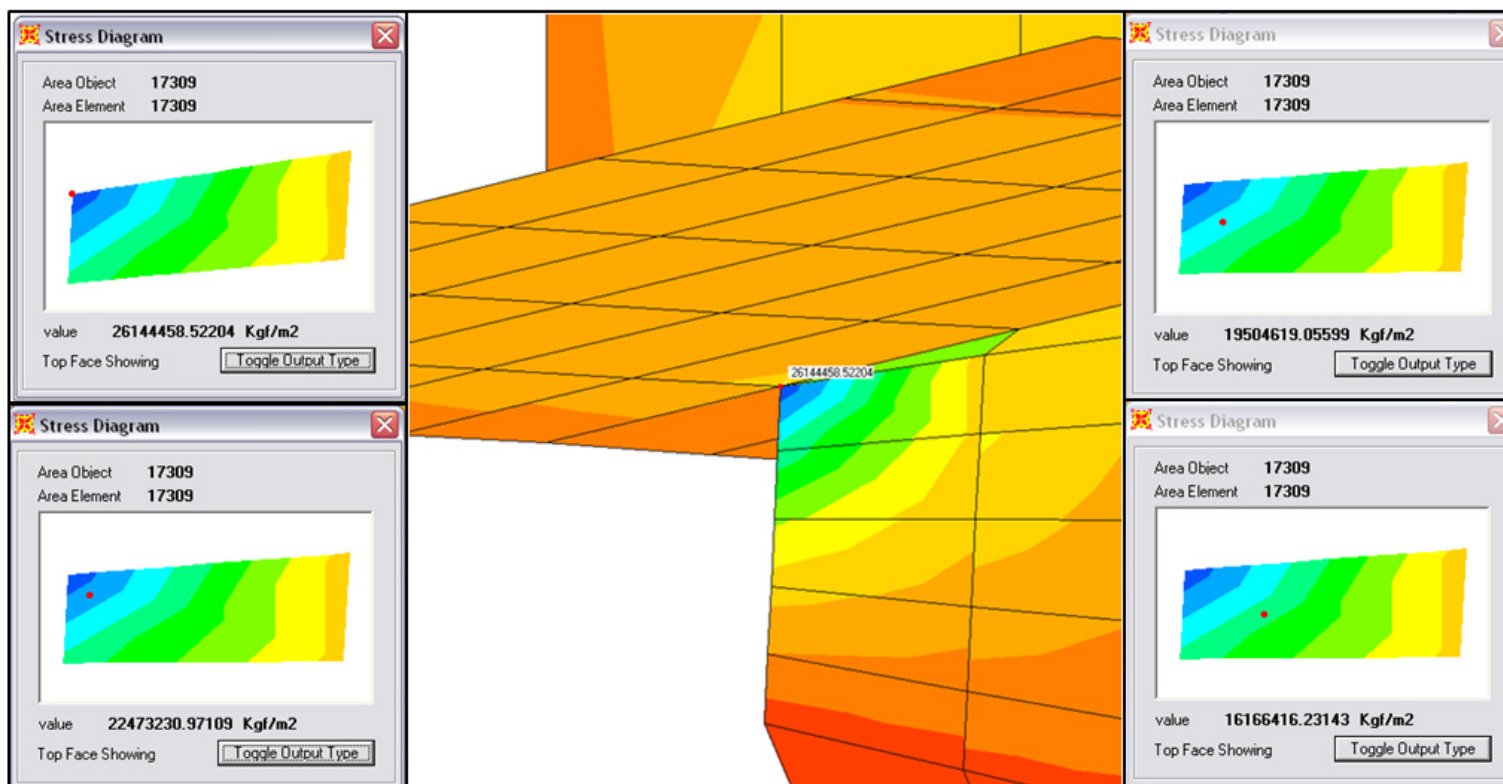


Figura 31. Niveles de esfuerzo en el elemento mas representativo (17309), kg/m<sup>2</sup>

Finalmente en la Tabla X y Tabla XI, se resumen los valores de los Máximos y Mínimos Esfuerzos que se producen en las tres conexiones de la tobera. Adicionalmente, se presenta en la figura 32, la distribución de los esfuerzos, se desarrolla el análisis para cada uno de los agarres.

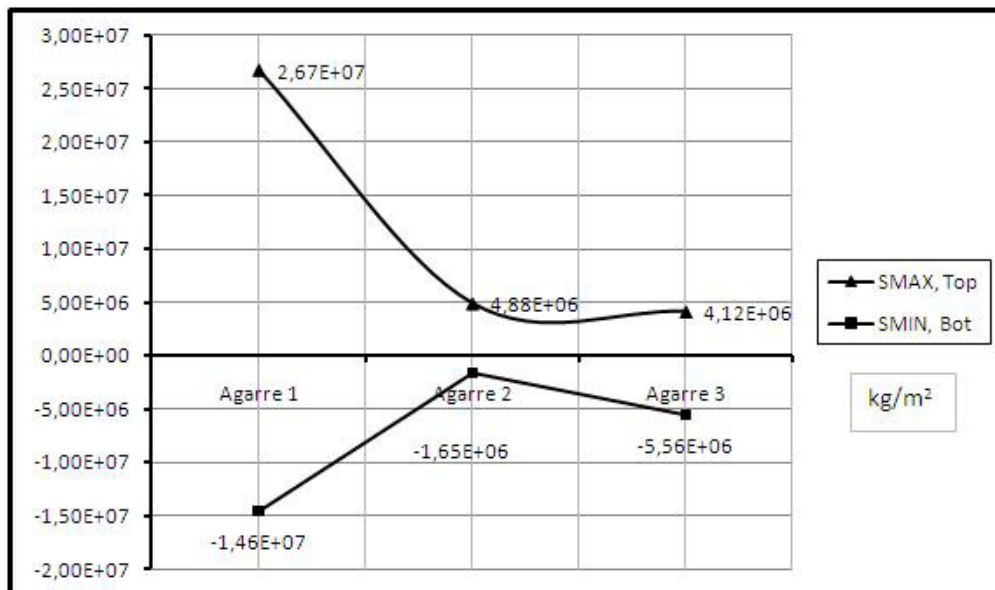
	Agarre 1			Agarre 2			Agarre 3		
	Rf-Tob-Bb.			Rf-Tob-Ce.			Rf-Tob-Eb.		
	Max. Esf.	Elemento	Nodo	Max. Esf.	Elemento	Nodo	Max. Esf.	Elemento	Nodo
S11, Top				1,43E+06	17164	15805	1,46E+06	17511	16159
S22, Top	2,66E+07	17309	15959	4,82E+06	17164	15805	4,02E+06	17679	16205
S12, Top									
SMAX, Top	2,67E+07	17309	15959	4,88E+06	17164	15805	4,12E+06	17685	16330
SMIN, Top				1,36E+06	17164	15805	1,18E+06	17679	16205
SVM, Top	17309	17309	15959	4,36E+06	17164	15805	3,84E+06	17687	16159
S11, Bot				1,34E+06	17157	15798	1,79E+06	17687	16159
S22, Bot	1,23E+07	17469	15955	4,15E+06	17157	15798	2,76E+06	17559	16125
S12, Bot							1,46E+06	17685	16330
SMAX, Bot	1,25E+07	17469	15955				3,20E+06	17687	16159
SMIN, Bot				1,27E+06	17157	15798	1,34E+06	17687	16159
SVM, Bot	1,32E+07	17309	15959	3,76E+06	17157	15798			

**Tabla X.** Valores de Esfuerzos Extremos en cada uno de los Agarres,

$\text{Kg/m}^2$

	Agarre 1			Agarre 2			Agarre 3		
	Rf-Tob-Bb.			Rf-Tob-Ce.			Rf-Tob-Eb.		
	Min. Esf.	Elemento	Nodo	Min. Esf.	Elemento	Nodo	Min. Esf.	Elemento	Nodo
S11, Top							-2,18E+06	17687	16159
S22, Top				-1,25E+06	17117	3228	-4,16E+06	17687	16159
S12, Top							-1,09E+06	17685	16330
SMAX, Top							-1,92E+06	17687	16159
SMIN, Top				-1,26E+06	17117	3228	-1,92E+06	17687	16159
SVM, Top									
S11, Bot							-2,15E+06	17685	16330
S22, Bot	-1,45E+07	17309	15959	-1,49E+06	17214	15846	-4,93E+06	17685	16330
S12, Bot									
SMAX, Bot							-1,64E+06	17511	16159
SMIN, Bot	-1,46E+07	17309	15959	-1,65E+06	17214	15846	-5,56E+06	17685	16330

**Tabla XI.** Valores de Esfuerzos Extremos en cada uno de los Agarres,  
Kg/m<sup>2</sup>



**Figura 32.** Máximos Esfuerzos en los Agarres de la Tobera, kg/m<sup>2</sup>

Otra vez se determina que el esfuerzo en el lado de aplicación de la carga es el que desarrolla mayores esfuerzos.

### **5.3. ANALISIS DE DEFORMACIONES DE LA CONEXIÓN ALTERNATIVA**

Para este capítulo se analizan las deformaciones que se producen en los agarres de la conexión alternativa. También se analiza la deformación en la cara interior de la tobera que se produce por efectos de la carga hidrodinámica lateral y Máximo Tiro Estático. Asimismo, se determinará la posibilidad de rozamiento entre los bordes de la hélice y la cara interior de la tobera.

En la Figura 33, se muestran las deformaciones obtenidas de los agarres de la conexión alternativa (3 soportes). De esta figura se observa que las deformaciones en la línea de conexión de los agarres “Rf-Tob-Bb” como en “Rf-Tob-Eb”, a la tobera son de 0.15 mm, y, 0.14 mm respectivamente. Valores que son muy pequeños en relación del movimiento de la tobera.

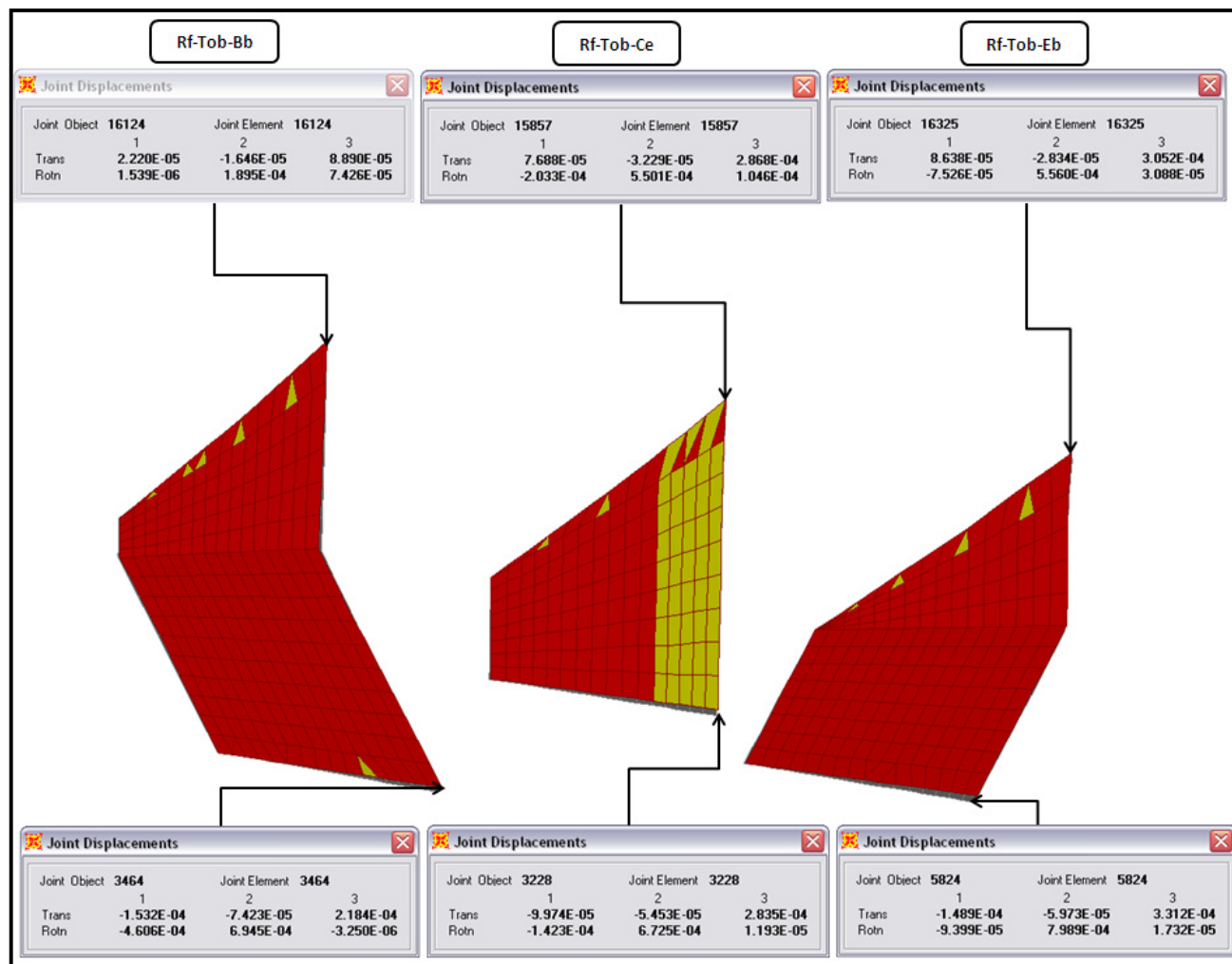


Figura 33. Deformación de los agarres de la tobera (Sistema alternativo), m

Se ha seguido el procedimiento descrito en el Capítulo III, para determinar el desplazamiento de los nodos del borde interior de la tobera, tal como se presentó en la Figura 19. Los valores de los desplazamientos de los nodos del borde se presentan en la Tabla XII, en donde se muestra que en la dirección longitudinal X se produce mayor desplazamiento.

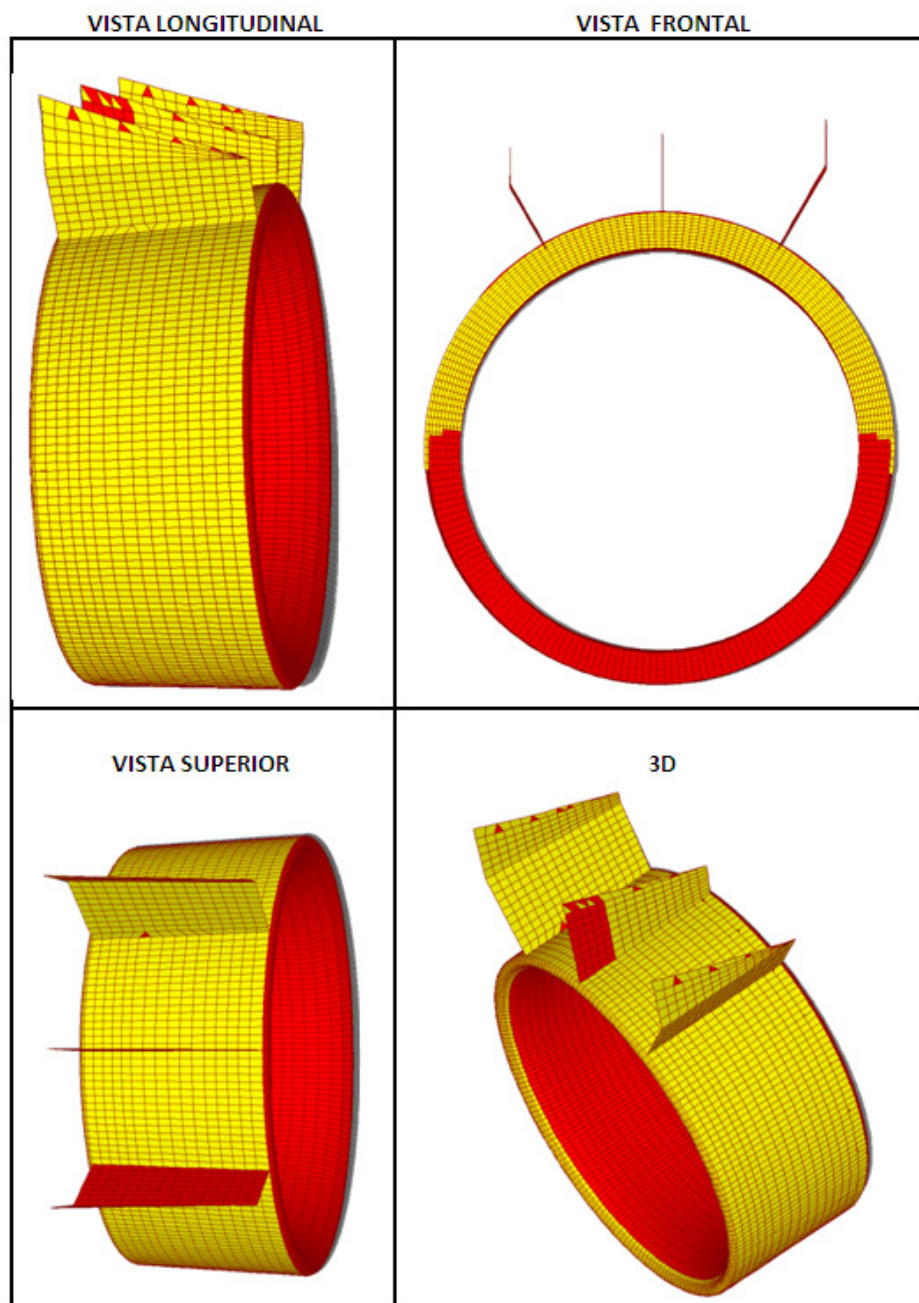
Nodos	U1	U2	U3
	mm	mm	mm
3963	-0.524	-0.289	0.102
3964	-0.524	-0.292	0.085
3974	-0.524	-0.296	0.065
3984	-0.523	-0.300	0.044
3994	-0.521	-0.303	0.021
6251	-0.519	-0.308	-0.006
6271	-0.516	-0.317	-0.058
6281	-0.514	-0.322	-0.084
6291	-0.512	-0.326	-0.110
4013	-0.510	-0.330	-0.136
4014	-0.508	-0.336	-0.168
4024	-0.505	-0.341	-0.201
4034	-0.501	-0.346	-0.237
4044	-0.496	-0.350	-0.272
4053	-0.489	-0.354	-0.304

**Tabla XII.** Desplazamientos de los nodos en el borde de la tobera, mm

De la Tabla XII, se observa claramente que los valores de los desplazamientos en las tres direcciones X, Y, y Z, son relativamente

pequeños con un valor extremo de  $-0.52$  mm en dirección longitudinal. Los desplazamientos del borde de la cara interior de la tobera, son muy pequeños para que roce con los bordes de las palas de la hélice. El desplazamiento del extremo del eje propulsor ( $+0.021$  mm) está considerado en el análisis del Capítulo III. De manera general, la deformación que sufre la tobera con tres soportes se presenta en la Figura 34. De esta figura se puede notar las vistas de la tobera deformada con un color plomo, que representan los elementos desplazados longitudinal, transversal y verticalmente.

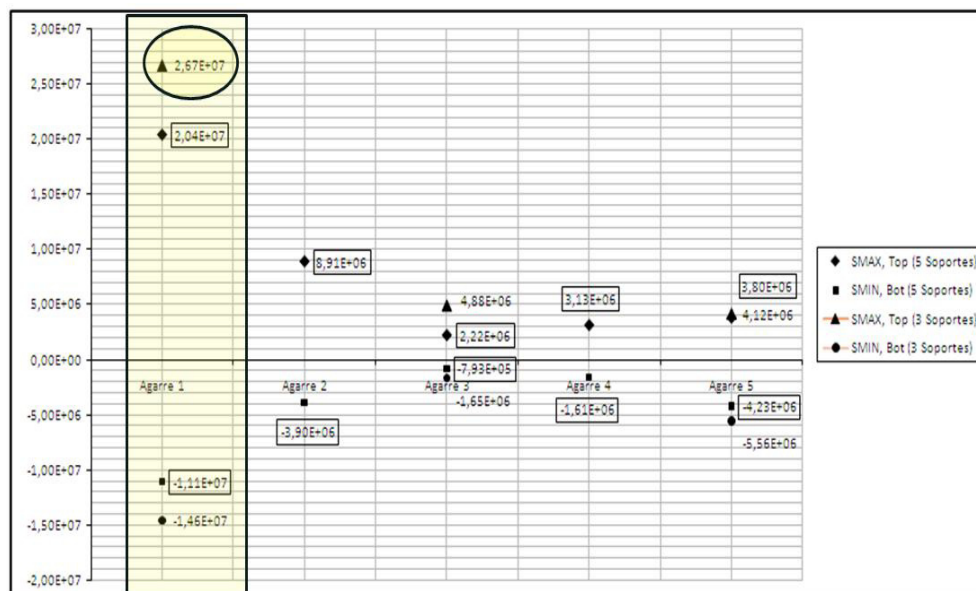




**Figura 34.** Vistas del sistema deformado con tres soportes.

#### **5.4.COMPARACIÓN DE LOS DOS SISTEMAS DE CONEXIÓN DE LA TOBERA**

Una vez analizados los dos sistemas de conexión de los agarres de la tobera al fondo del remolcador Suinli II, se procede a comparar los resultados obtenidos. En el análisis del modelo original (cinco soportes), se obtuvieron altos niveles de esfuerzo ( $S_{22}$ ) en cada uno de los agarres de la tobera (dirección vertical) debida a la flexión del elemento básicamente. Para este modelo, el máximo valor del esfuerzo ( $S_{22}$ ) se encuentra en el agarre identificado como “Rf-Tob-Bb2” con un valor que está por debajo del esfuerzo de fluencia del acero; mientras que, en el análisis de conexión del modelo alternativo (tres soportes), se produjeron niveles de esfuerzo ( $S_{22}$ ) superiores al esfuerzo de fluencia en un 11% identificado en el elemento “Rf-Tob-Bb”; asimismo, debido a la flexión del elemento básicamente. A continuación se presenta en la siguiente figura la comparación de los valores obtenidos entre los dos sistemas de agarre.



**Figura 35.** Comparación de Niveles de Esfuerzo entre los dos sistemas de Agarre, Kg/m<sup>2</sup>

De esta figura se puede observar que existe un nivel de esfuerzo muy elevado en el sistema de agarre con tres soportes de la tobera, con un valor de 2.67E+07 Kg/m<sup>2</sup>. Se puede observar claramente que son los dos agarres del costado de la tobera, en los dos casos, que soportan mayores cargas, en cuanto a los agarres siguientes no lo es, ya que su nivel de esfuerzo es bajo en comparación con los primeros.

El nivel de esfuerzo que se alcanzó en el área de Lazareto y arbotante, fueron bajos, por lo que no se los consideró en el segundo análisis.

Las deformaciones en las tres direcciones X, Y, y Z, obtenidas en la cara interior de la tobera debida a la carga hidrodinámica lateral, y, la deformación en el extremo del eje propulsor debida a la Fuerza de desbalance, para los dos casos de análisis de conexión de la tobera son muy pequeñas. Los desplazamientos en las tres direcciones son menores a 1 mm, y se puede decir que no existe la posibilidad de rozamiento entre el borde interior de la tobera y el borde de la pala con ninguna de las dos opciones. A continuación presentamos una tabla comparativa de los desplazamientos que se desarrollan en la dirección transversal del borde de la cara interior de la tobera para los dos casos analizados.

SOPORTES		NODOS	U <sub>2</sub> (5 SOPORTES)	U <sub>2</sub> (3 SOPORTES)
CINCO	TRES			
6040	3963	1	-0.271	-0.289
9926	3964	2	-0.275	-0.292
9934	3974	3	-0.279	-0.296
9942	3984	4	-0.283	-0.300
9950	3994	5	-0.287	-0.303
9958	6251	6	-0.292	-0.308
9966	6271	7	-0.297	-0.317
9974	6281	8	-0.303	-0.322
9982	6291	9	-0.308	-0.326
9990	4013	10	-0.312	-0.330
9980	4014	11	-0.317	-0.336
10006	4024	12	-0.323	-0.341
10014	4034	13	-0.329	-0.346
10022	4044	14	-0.334	-0.350
8035	4053	15	-0.339	-0.354

**Tabla XIII.** Comparación de los desplazamientos del borde interior de la tobera, mm

## CONCLUSIONES

Empleando el FEM se ha analizado la estructura de conexión de una tobera al fondo del remolcador "SUINLI II", con cinco agarres. El modelo fue sometido a Fuerzas extremas de operación para analizar los esfuerzos y las deformaciones de la estructura. El modelo empleado representó únicamente el área del Lazareto, y al aplicar las debidas restricciones se pudo simplificar el modelaje completo de la embarcación, por lo que se puede concluir lo siguiente:

1. Se ha podido modelar la estructura de conexión de la tobera con cinco y tres soportes, tratando de representar el sistema lo más cercano posible a la realidad modelando todos los miembros estructurales con elementos plancha ("Shell"). Los espesores han sido tomados incluyendo el efecto de corrosión. En los modelos se han utilizado 25857 nodos, 108 elementos vigas y 27289 elementos planos; y, 24862 nodos, 108 elementos vigas y 26317 elementos planos, respectivamente. Además, se ha resumido el sistema en 154092 y 148119 ecuaciones de equilibrio, respectivamente. De manera que se considera que el modelo desarrollado es adecuado para el análisis propuesto.

2. En el caso de cinco soportes, se han alcanzado esfuerzos en la plancha de agarre máximo en dirección vertical y vale  $2.04E+07$  kg/m<sup>2</sup>. En la estructura interior del área del Lazareto  $6.50E+06$  kg/m<sup>2</sup>. En el arbotante  $8.44E+05$  kg/m<sup>2</sup>. Los desplazamientos tanto en la cara interior de la tobera como el desplazamiento en el extremo del eje son menores a 1 mm, por lo que se deduce que no existe roce entre el borde de la pala de la hélice y la cara interior de la tobera.
  
3. Los niveles de esfuerzo y deformaciones obtenidos para el sistema con tres soportes, aplicando las mismas condiciones de carga, restricciones y situaciones pesimistas consideradas, fueron analizadas determinando que en el agarre del extremo del costado del buque, básicamente el que soporta la carga hidrodinámica lateral sufre niveles de esfuerzos muy altos debido a la flexión del agarre, sobrepasando el esfuerzo de fluencia del acero,  $2.4E+07$  kg/m<sup>2</sup>, en un 11%.

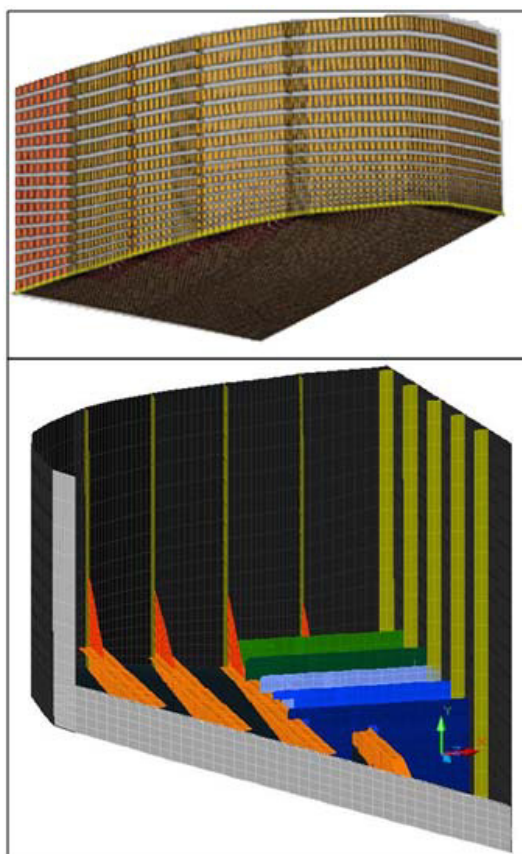
## RECOMENDACIONES

1. Para reducir el nivel de esfuerzo en la conexión de las planchas de agarre a la estructura del fondo, se podría construir los agarres de forma hidrodinámica, dado que esto aumentaría su módulo seccional y reduciría el esfuerzo flexural. Se podría analizar una estructura con dos agarres únicamente.
2. Se puede considerar para futuros análisis el determinar cómo influye el cordón de soldadura que existe entre la plancha de agarre de la tobera con el planchaje de fondo, ya que este aumentaría el espesor en esta zona, y por tanto, aumentaría la rigidez del soporte. Esto a su vez reduciría el nivel local de esfuerzos.




## APÉNDICE A

### NODOS Y ELEMENTOS USADOS EN EL MODELO



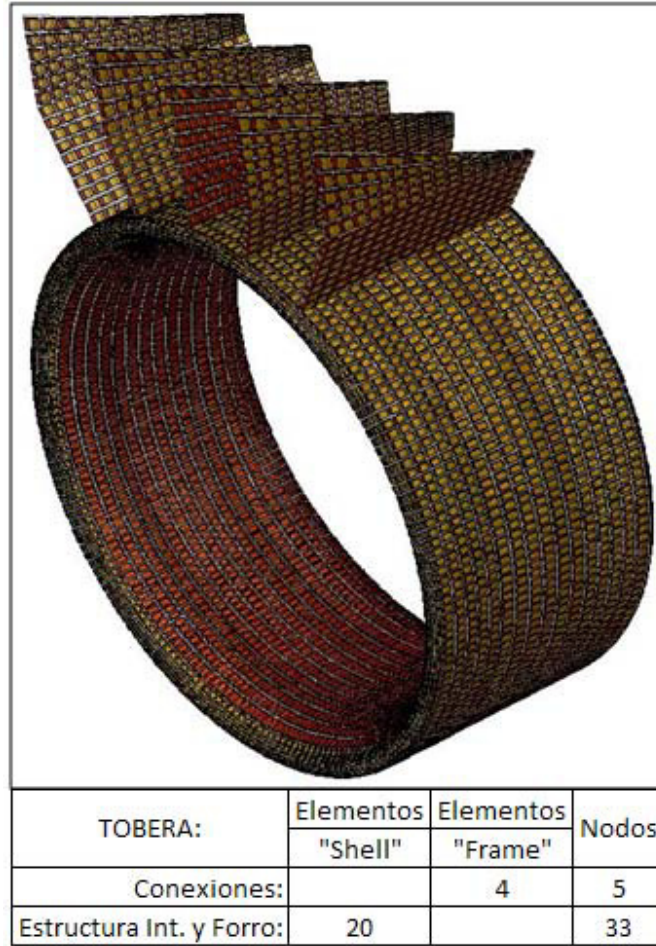
AREA DE LAZARETO:	Elementos	Elementos	Nodos
	"Shell"	"Frame"	
China:		104	105
Fondo con Rfzos:	4141		4105
Costado con Rfzos:	1790		1919
Mamparo con Rfzos:	1312		1406
Escuadras:	221		289
Rfzo. Lc:	431		490
Agarres Int. Tobera:	1280		1437
<b>Total:</b>	<b>9175</b>	<b>104</b>	<b>9751</b>

Figura A-1. Resumen de Elementos en el área de Lazareto.



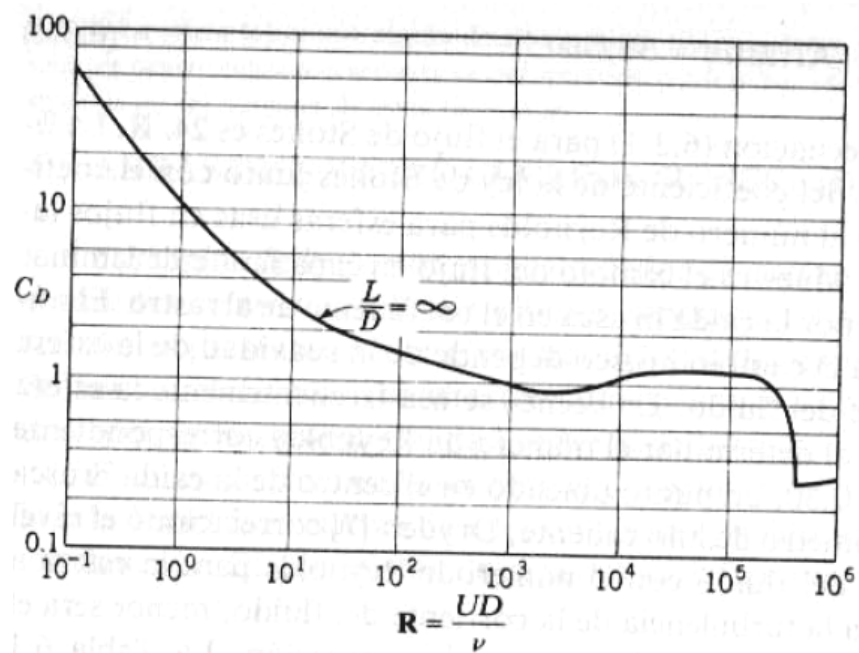
SISTEMA PROPULSOR:	Elementos	Elementos	Nodos
	"Shell"	"Frame"	
Eje propulsor:		4	5
Arbotante:	20		33

**Figura A-2.** Resumen de Elementos en el Eje Propulsor.



**Figura A-3.** Resumen de Elementos en la conexión de la Tobera.

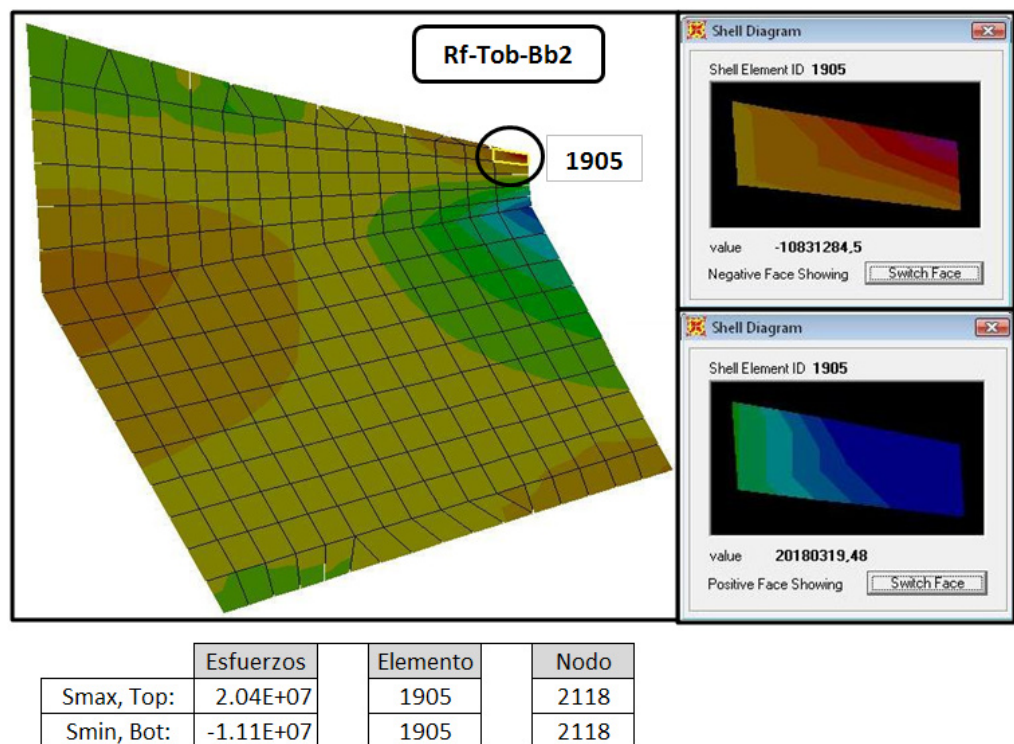
## APÉNDICE B

DIAGRAMA DEL COEFICIENTE DE ARRASTRE EN FUNCION DEL NÚMERO  
DE REYNOLDS

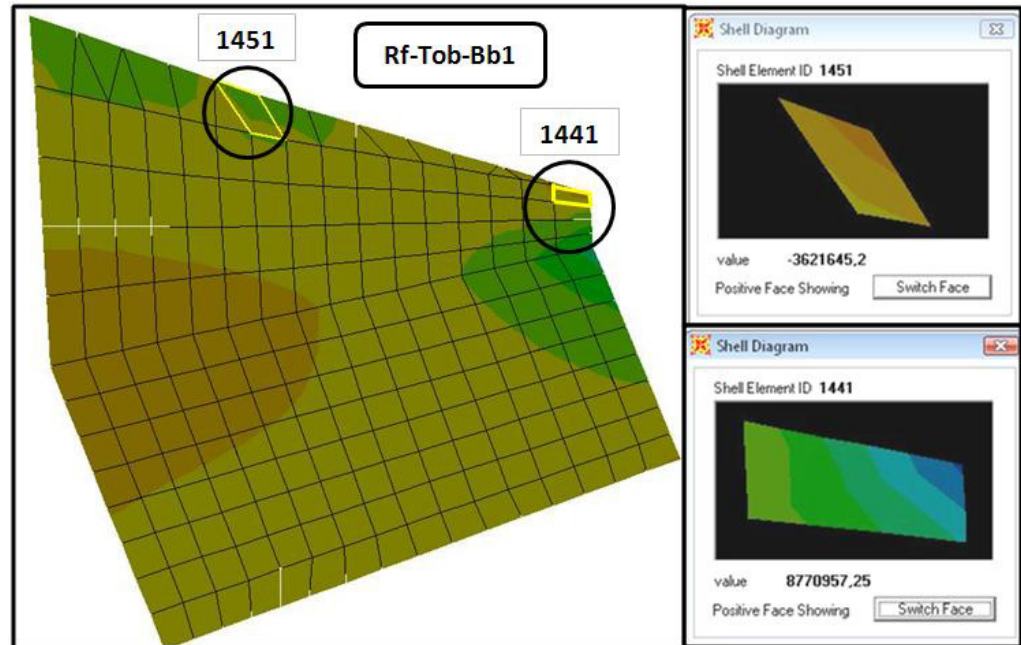
**Figura B-1.** Coeficiente de Arrastre para un cilindro circular liso como una función del Número de Reynolds.

## APÉNDICE C

### DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS EN CADA UNO DE LOS AGARRES DE LA TOBERA, ( CINCO SOPORTES)

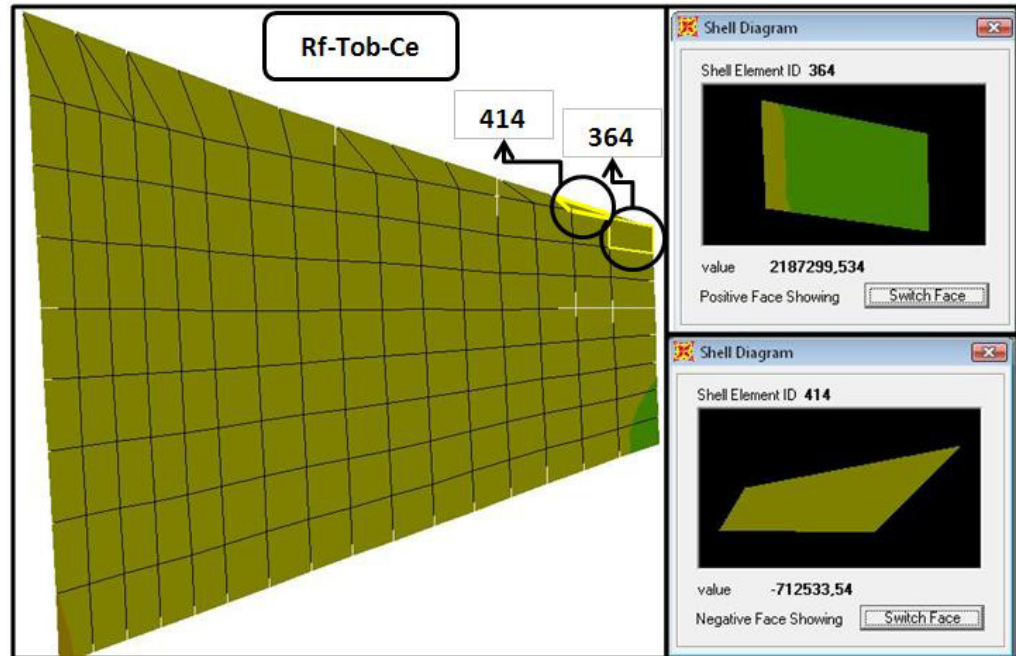


**Figura C-1.** Distribución de Esfuerzos en Rf-Tob-Bb2, Kg/m<sup>2</sup>



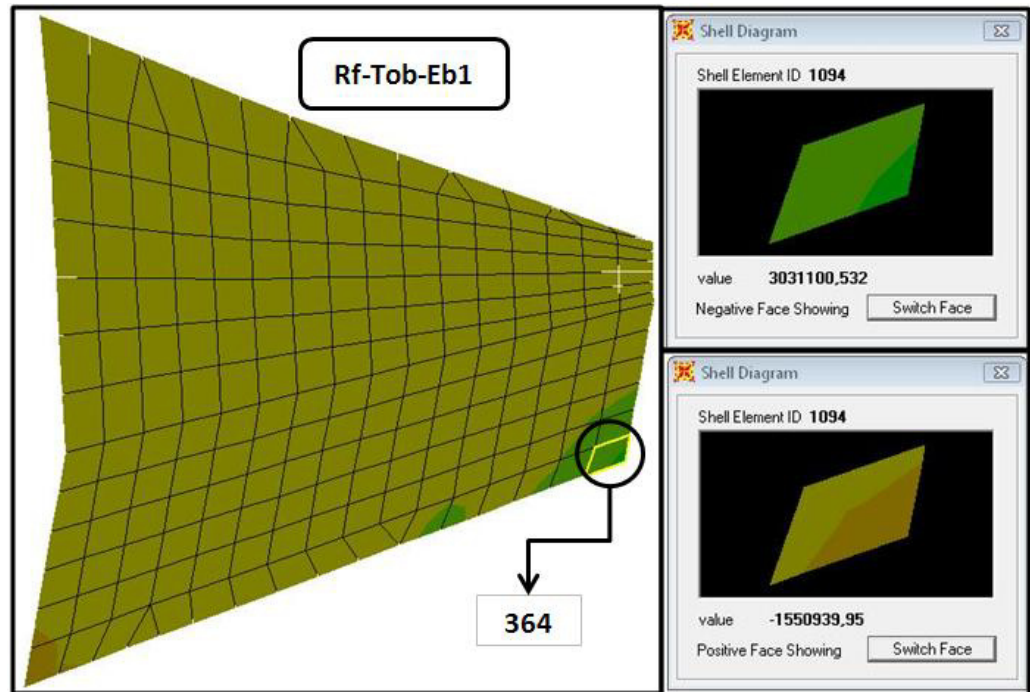
	Esfuerzos	Elemento	Nodo
Smax, Top:	8.91E+06	1441	1610
Smin, Bot:	-3.90E+06	1451	1617

**Figura C-2.** Distribución de Esfuerzos en Rf-Tob-Bb1, Kg/m<sup>2</sup>



	Esfuerzos	Elemento	Nodo
Smax, Top:	2.22E+06	364	223
Smin, Bot:	-7.93E+05	414	430

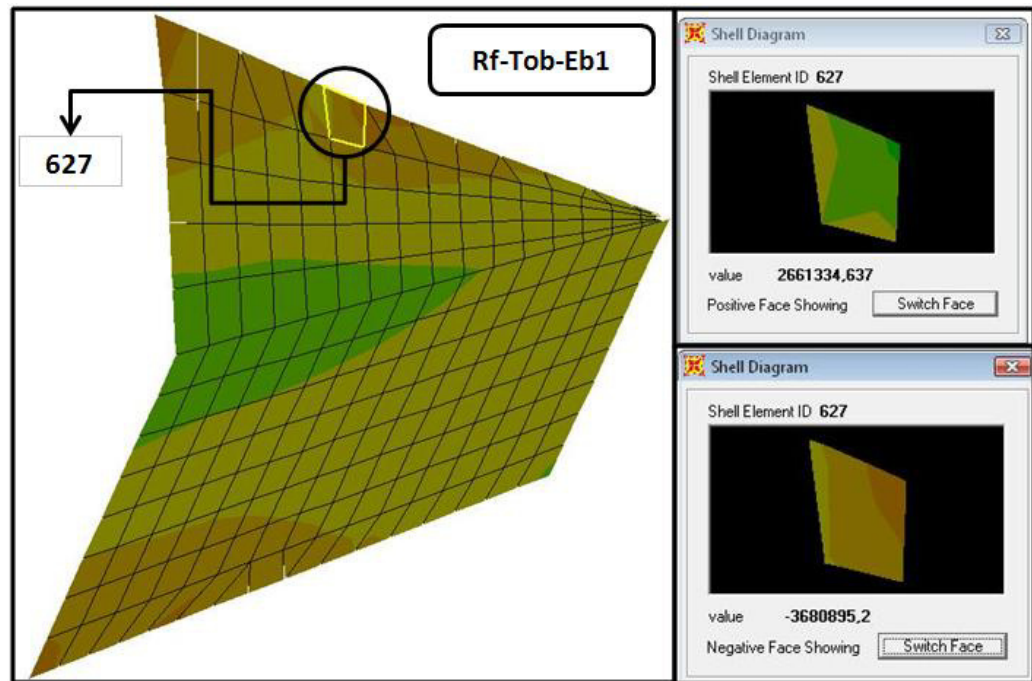
**Figura C-3.** Distribución de Esfuerzos en Rf-Tob-Ce, Kg/m<sup>2</sup>



	Esfuerzos	Elemento	Nodo
Smax, Top:	3.13E+06	1094	1223
Smin, Bot:	-1.61E+06	1094	1223

**Figura C-4.** Distribución de Esfuerzos en Rf-Tob-Eb1, Kg/m<sup>2</sup>





	Esfuerzos	Elemento	Nodo
Smax, Top:	3.80E+06	627	707
Smin, Bot:	-4.23E+06	627	707

**Figura C-5.** Distribución de Esfuerzos en Rf-Tob-Eb2, Kg/m<sup>2</sup>

## BIBLIOGRAFÍA

- [1], Computers and Structures, Inc. Sap2000. Linear and Nonlinear Static and Dynamic Analysis and Design of Three-Dimensional Structures, Version 10. CSI, Septiembre 2005.
  
- [2], C.C.Hermosilla, Autocad 2006, Manual práctico.  
Web: Copia gratuita del manual disponible en  
<http://www.santacompanha.org>
  
- [3], DAMEN Shipyards Gorinchem, Drwg. N°: 599900-213-900 Nozzle  
ø1015x500. DAMEN, Netherland, 1999.
  
- [4], VAN GENT W. y OOSTERVELTD M.W.C., Ducted Propeller Systems and Energy Saving. Canal de Experiencias Hidrodinámicas El Pardo, Publicación N°108, Septiembre 1983.
  
- [5], Astilleros Navales Ecuatorianos, Información Técnica R“SUINLI II”.  
ASTINAVE, 2008

- [6], Web: <http://www.manbw.com/files/news/files8082/1510-0078.pdf>
- [7], FOX, R. é Mc. DONALD, A., Introducción a la Mecánica de Fluidos. Mc. Graw-Hill, 1995.
- [8], VAN MANEN, J., y VAN OOSSANEN, Resistance, Propulsion and Vibration
- [9], LONG, CH., Propellers, Shafting, and Shafting System Vibration Analysis, Cap. X en Marine Engineering, editado por R. Harrington. SNAME, 1992
- [10], MARIN, José. Metodología para Determinar Problemas Vibracionales en Buques Pesqueros, Tesis de Grado de Ingeniero Naval, Guayaquil – Ecuador, 1982
- [11], Popov, Egor P., Introducción a la Mecánica de Sólidos, LIMUSA, Segunda Edición, 2000