



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

**Facultad de Ingeniería Marítima, Ciencias Biológicas,  
Oceánicas y Recursos Naturales**

**“SIMULACIÓN NUMÉRICA DE LA RESPUESTA ESTRUCTURAL DEL  
CASCO DE UNA LANCHAS PLANEADORA DE 13 METROS POR  
SLAMMING”**

**INFORME DE PROYECTO INTEGRADOR**

Previa a la obtención del Título de:

**INGENIERA NAVAL**

**MABEL YOMAIRA SORIA CORTEZ**

**GUAYAQUIL – ECUADOR**

**AÑO: 2017**

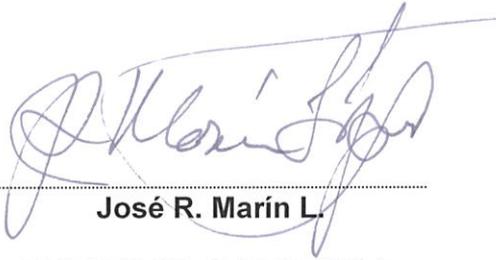
## AGRADECIMIENTOS

A Dios por todas las bendiciones derramadas, a mis padres Maritza y Cronwel que me apoyaron y dieron ánimos en todo momento, me dieron ejemplos claros de sacrificio y amor, a Aracy mi hermana que ha sido mi fiel compañera desde que nació, y a mis abuelos quienes fueron parte importante de mi proceso de crecimiento. Al PhD. Marín quien fue mi director y estuvo pendiente del desarrollo de este proyecto compartiendo conmigo sus conocimientos. A cada una de las personas que compartieron conmigo en las aulas de clases y se convirtieron en mis grandes amigos.

## DEDICATORIA

A Dios por guiarme en todo momento, a mis padres por entregarme la mejor educación posible, a mi hermana por su apoyo y al resto de mi familia por contribuir de una u otra manera en este proceso.

## TRIBUNAL DE EVALUACIÓN



Handwritten signature of José R. Marín L. in blue ink, written over a horizontal dotted line.

**José R. Marín L.**  
PROFESOR SUPERVISOR

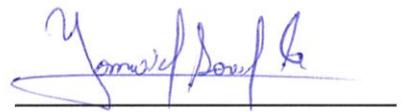


Handwritten signature of Rubén J. Paredes A. in blue ink, written over a horizontal dotted line.

**Rubén J. Paredes A.**  
PROFESOR REVISOR

## DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad y la autoría del contenido de este Trabajo de Titulación, me corresponde exclusivamente; y doy mi consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual”



Mabel Yomaira Soria Cortez

## RESUMEN

En el presente proyecto se analiza, empleando una simulación numérica, la variación de la respuesta estructural en tiempo de una lancha planeadora que soporta carga hidrodinámica debido a *slamming* en una sección del fondo hacia Proa. El modelo estructural se desarrolla con elementos finitos planos, de cuatro nodos, con un total de 26621 elementos y 31274 nodos, empleando el paquete computacional ANSYS y representándose únicamente un lado de la embarcación, para aprovechar la simetría de la estructura. La mayoría de los elementos planos tienen una razón de aspecto de 1.9, y en la zona de impacto, dimensión de 40 mm, satisfaciéndose de esta manera las recomendaciones de la sociedad clasificadora de buques ABS.

Para estimar la carga hidrodinámica por *slamming*, se emplean las fórmulas dadas por ABS para embarcaciones planeadoras, y se obtiene que la aceleración del CG es de 3.16 g, produciendo una presión equivalente máxima de 20.69 KN/m<sup>2</sup>. Calculando el período de vibración vertical del casco, 0.046 seg/ciclo, se estima que el valor máximo de presión se presenta 0.011 segundos luego del contacto; además se asume que la presión aumenta en forma lineal, hasta el valor máximo, de acuerdo a

lo mencionado por Heller y Jasper, y luego, dicho parámetro se reduce en forma similar a una exponencial.

Las simulaciones numéricas se desarrollan con el módulo *Explicit Dynamics* de ANSYS que permiten determinar la variación en tiempo de la respuesta, notándose que la zona del fondo alcanza elevados valores de esfuerzo compresivo, mayores que los tensionales que alcanza la cubierta. En general, se alcanzan valores que exceden los permisibles según ABS. El esfuerzo equivalente de von Mises es excedido en 1.3%, y el esfuerzo normal en dirección  $x$  es excedido en 27% en la zona del fondo. Los esfuerzos normales en dirección  $y$  y los cortantes, son de menor importancia.

A partir del desplazamiento de tres puntos ubicados en la zona de aplicación de la carga, se estiman numéricamente la velocidad y aceleración de la embarcación. La variación de la aceleración vertical muestra un comportamiento vibratorio local, pero permite observar un valor máximo en el orden del utilizado para estimar la presión equivalente siguiendo las recomendaciones de ABS.

Se comparan los resultados de la presente simulación en tiempo de la respuesta al golpe hidrodinámico, con los desarrollados en una referencia aplicando una representación Cuasiestática del fenómeno. Dicho análisis es computacionalmente más sencillo, pero no permite detectar la vibración del casco, conocida como *Whipping*, que puede observarse con la integración en tiempo desarrollada en este proyecto.

## ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS .....	ii
DEDICATORIA .....	iii
TRIBUNAL DE EVALUACIÓN .....	iv
RESUMEN .....	1
ÍNDICE GENERAL .....	3
INTRODUCCIÓN.....	4
CAPÍTULO 1 .....	7
1.1 Características de la Lancha .....	7
1.2 Simulación de cargas por impacto hidrodinámico.....	15
1.3 Modelo estructural empleando elementos finitos .....	22
CAPÍTULO 2 .....	30
2. SIMULACIÓN NUMÉRICA CON EL MÓDULO <i>EXPLICIT DYNAMICS</i> DE ANSYS .....	30
2.1 Secuencia del Análisis en Workbench.....	30
2.2 Datos de Ingeniería ( <i>Engineering Data</i> ) y Modelo Geométrico de la Lancha.....	33
2.3 Modelo Numérico en Explicit Dynamics .....	35
CAPÍTULO 3 .....	45
3. ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE LA RESPUESTA ESTRUCTURAL .....	45
3.1 Análisis Global de la Respuesta Estructural .....	45
3.2 Análisis Local de la Respuesta Estructural .....	56
3.3 Comparación entre el Análisis Cuasiestático y Dinámico de la Respuesta Estructural de la Lancha .....	60
CONCLUSIONES.....	71
RECOMENDACIONES.....	74
BIBLIOGRAFÍA:.....	75

## INTRODUCCIÓN

Las cargas generadas por impacto hidrodinámico en botes de alta velocidad pueden causar daños en el fondo estructural. Cuando la proa de un bote emerge del agua para después sumergirse se produce una presión hidrodinámica sobre el casco capaz de provocar deformaciones en la estructura global y local del fondo. La acción hidrodinámica y el término inercial, las fuerzas de superficie son parámetros que se combinan en la ecuación de equilibrio dinámica que permiten analizar la flexión local y las vibraciones del casco conocidas como "*Whipping*".

Investigadores y sociedades clasificadoras presentan diversas fórmulas empíricas para estimar las cargas hidrodinámicas que se generan en embarcaciones de gran velocidad debido a golpes con la superficie del agua. Estas cargas dependen de la aceleración resultante, las formas y velocidad de la embarcación; el valor de presión obtenido mediante estas ecuaciones es asumido como una presión estática equivalente que permite analizar la flexión local en forma cuasiestática al considerar el término inercial como parte del equilibrio estático del sistema. Sin embargo esto no permite realizar un análisis dinámico local, que se produce debido a la rápida acción de la fuerza hidrodinámica.

El cálculo de la respuesta estructural del casco de una embarcación debido a las cargas por impacto hidrodinámico, requiere de un análisis complejo. La estructura de un buque consta de un forro curvo formado con planchas de bajo espesor reforzadas en dirección transversal y longitudinal, por lo que el análisis teórico de la respuesta de la estructura resulta muy complejo. El Método de Elementos Finitos (MEF) a través de una adecuada discretización espacial permite realizar una simulación dinámica del fenómeno, y de esta manera se pueden obtener deformaciones y esfuerzos que se desarrollan dinámicamente en la estructura.

Ojeda en su investigación [3] presenta un análisis de la respuesta estructural de un catamarán rápido fabricado con material compuesto. En ese trabajo se aplica el MEF para estudiar la estructura cuando soporta cargas de impacto hidrodinámico (*slamming*) aplicando un análisis cuasiestático. En la investigación de Lei Jiang [4] se presenta un análisis sobre colapsos de paneles reforzados debido a *Whipping* que es inducido por cargas dinámicas o *slamming* en un buque tipo portacontenedor. Menéndez en su tesis de grado [1] estudia la respuesta estructural del fondo de una lancha planeadora cuando soporta cargas hidrodinámicas, mediante un análisis cuasi-estático. En el presente trabajo se realizará una simulación numérica de la respuesta en tiempo de la estructura del casco de una lancha planeadora debido a *slamming* aplicando un análisis dinámico, tratando de detectar vibraciones y posibles daños producto de estas cargas.

## OBJETIVO GENERAL

Analizar la respuesta dinámica estructural del casco de una embarcación planeadora de 13 metros debido a *slamming* mediante el método de elementos finitos.

## OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Comprender la acción de fenómenos ocasionados por cargas hidrodinámicas que pueden desembocar en el fenómeno de *Whipping* en una lancha planeadora.
- Aplicar el método de elementos finitos para simular en tiempo la respuesta estructural de una lancha planeadora debido a cargas por *slamming*.
- Comparar los resultados del análisis dinámico con los obtenidos empleando equilibrio cuasi-estático de la respuesta estructural de una embarcación planeadora sometida a *slamming*.

## HIPÓTESIS

Simular numéricamente la respuesta en tiempo permite analizar los detalles del comportamiento del casco de una embarcación planeadora sometida a cargas hidrodinámicas.

## BENEFICIOS

En el medio local marítimo ecuatoriano se conoce de daños en lanchas planeadoras sometidas a cargas de impacto hidrodinámico. Al realizar una simulación numérica en tiempo de la respuesta será posible analizar el comportamiento dinámico que no es posible capturar cuando se realiza un análisis cuasiestático. De esta manera el medio de la ingeniería naval ecuatoriano será capaz de comprender mejor los posibles daños que se producen en los cascos de este tipo de embarcaciones.

## METODOLOGÍA

- Se realizará una revisión bibliográfica de libros y artículos de investigación de manera que sea capaz de comprender los fenómenos ocasionados por cargas hidrodinámicas sobre la estructura de una lancha planeadora.
- Se adaptará el modelo en elementos finitos de una lancha planeadora analizada cuasi estáticamente para poder simular en tiempo la respuesta estructural cuando se aplica una función de carga hidrodinámica.
- El modelo adaptado para un análisis dinámico se resolverá mediante el uso de ANSYS de manera los resultados serán comparados con los obtenidos en análisis cuasi estáticos previos.

## CAPÍTULO 1

### 1. DESCRIPCION GENERAL DE LA LANCHA LP-AST 1304 Y DE LAS CARGAS HIDRODINÁMICAS

#### 1.1 Características de la Lancha

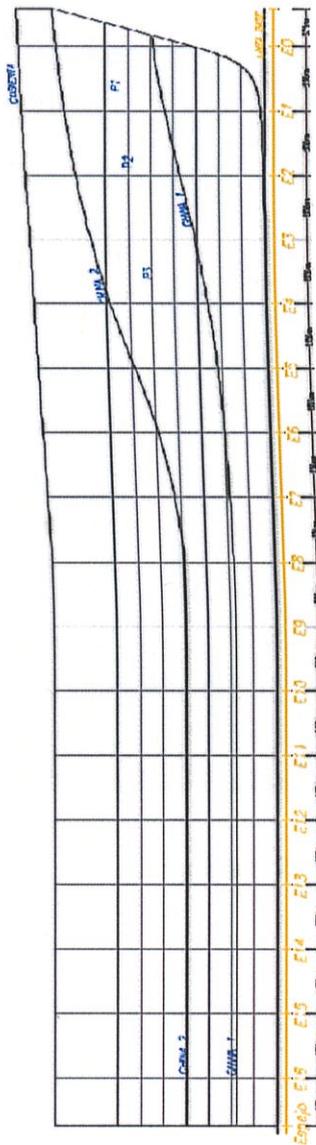
La empresa local ASTINAVE EP construyó en el año 2011 las lanchas guardacostas LP-AST 1304 para la Armada de nuestro país. Fueron destinadas a transporte de pasajeros y labores de patrullaje en la franja marítima entre la línea de costa y la imaginaria a 30 millas náuticas. Las embarcaciones tienen una eslora de 13 metros, desplazamiento total de 16.5 toneladas, y la velocidad máxima que alcanzan es de 25 nudos, por lo que son consideradas lanchas planeadoras. Para alcanzar la velocidad requerida se las equipó con dos motores estacionarios de 490 HP y con propulsión *waterjet*. Al navegar con velocidad máxima, la estructura está sometida a altas cargas de impacto hidrodinámico y su diseño se realizó de acuerdo a los criterios usados para las lanchas guardacostas de los Estados Unidos. Las características y dimensiones principales de la lancha se muestran en la tabla I.

Descripción	Dimensiones	Unidades
<b>Eslora total</b>	13	m
<b>Manga total</b>	3.8	m
<b>Puntal</b>	1.96	m
<b>Calado a carga completa</b>	0.68	m
<b>Desplazamiento total</b>	18	ton
<b>Capacidad de combustible</b>	500	gal
<b>Velocidad máxima</b>	25	nudos
<b>Autonomía</b>	400	millas
<b>Ángulo de astilla muerta</b>	12.32	°

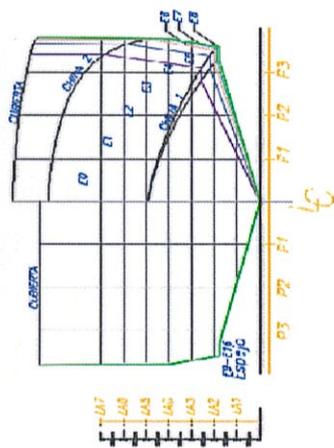
**Tabla 1: Características y dimensiones principales de LP-AST 1304**

En la siguiente figura se muestra el plano de líneas de formas de la lancha analizada en el que se observa que sus formas prismáticas desde sección media hacia popa. Cuenta con 3 chinás, donde las 2 primeras forman el deflector de espuma, y el ángulo de astilla muerta es de 12.32 grados. Secciones en V y presencia de chinás son características típicas de este tipo de embarcaciones.

VISTA LONGITUDINAL DE PERFIL



VISTA TRANSVERSAL



VISTA LONGITUDINAL DE PLANTA

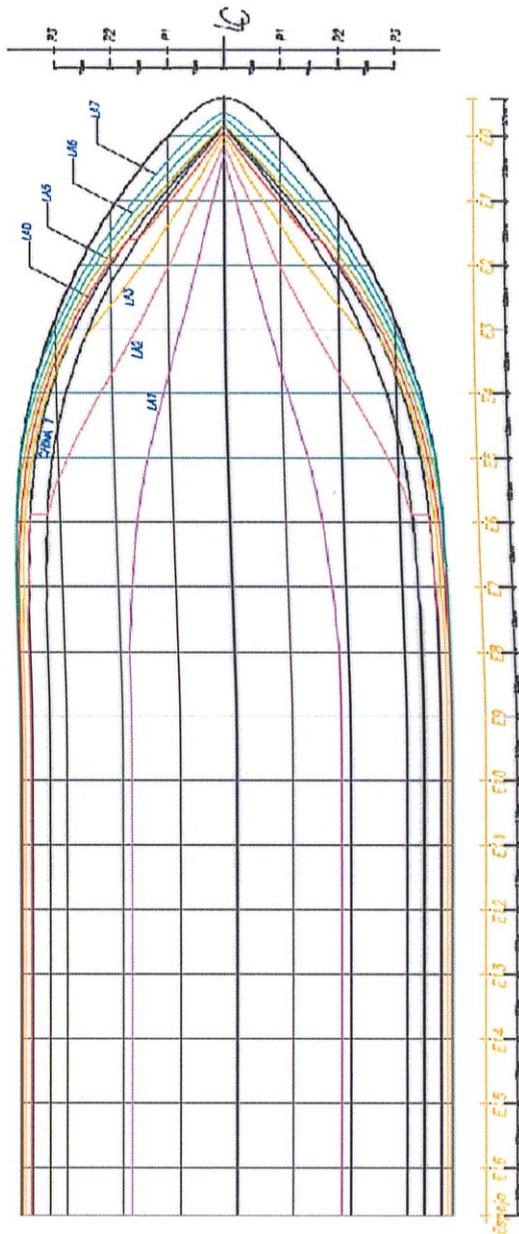


Figura 1.1: Plano de líneas de formas de LP-AST 1304, [7]

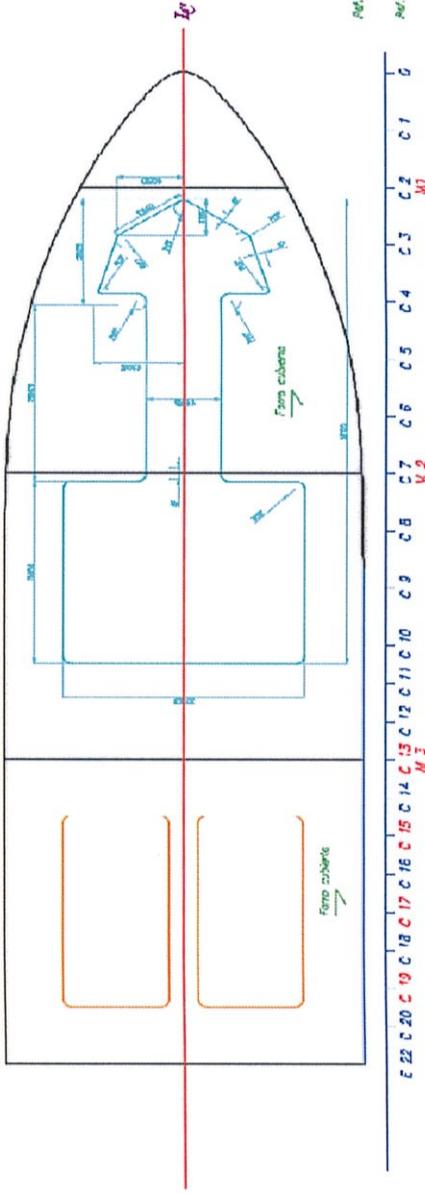
Las estructuras de las lanchas analizadas tienen una construcción tipo mixta, y se usa aleación de aluminio naval 5086. En la figura 2 se puede apreciar que la lancha desde sección media hasta popa se encuentra reforzada transversalmente ( $s_{\text{transv}} < s_{\text{long}}$ ) y desde sección media hasta proa tiene un reforzamiento longitudinal; el cuadernaje longitudinal aumenta la inercia en sección de proa de manera que la estructura es más resistente a las cargas de presión que se apliquen.



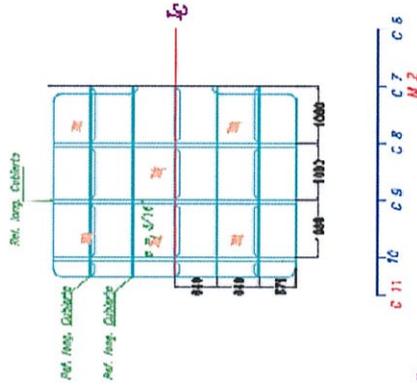
**Figura 1.2: Construcción de la lancha LP-AST 1304, [7]**

En la figura 1.3 se muestra el plano estructural de las lanchas LP-AST 1304, observándose la ubicación de los refuerzos que forman la estructura de la lancha. Las cuadernas están formadas por ángulos espaciados, 500 mm desde popa hasta sección Media, y 750 mm desde sección Media hasta Proa. El fondo está reforzado longitudinalmente por ángulos espaciados cada 500 mm y en sala de máquinas dos de estos refuerzos se convierten en las bases de cada motor. La estructura del costado en todo el buque está reforzado longitudinalmente por platinas espaciadas cada 450 mm. La cubierta está construida con plancha estriada de 4.76 mm de espesor. En la tabla 2 se presentan los escantillones de los estructurales de las lanchas.

VISTA EN PLANTA DE CUBIERTA



CUBIERTA DE PUENTE (CP)



ESTRUCTURALES DE CUBIERTA

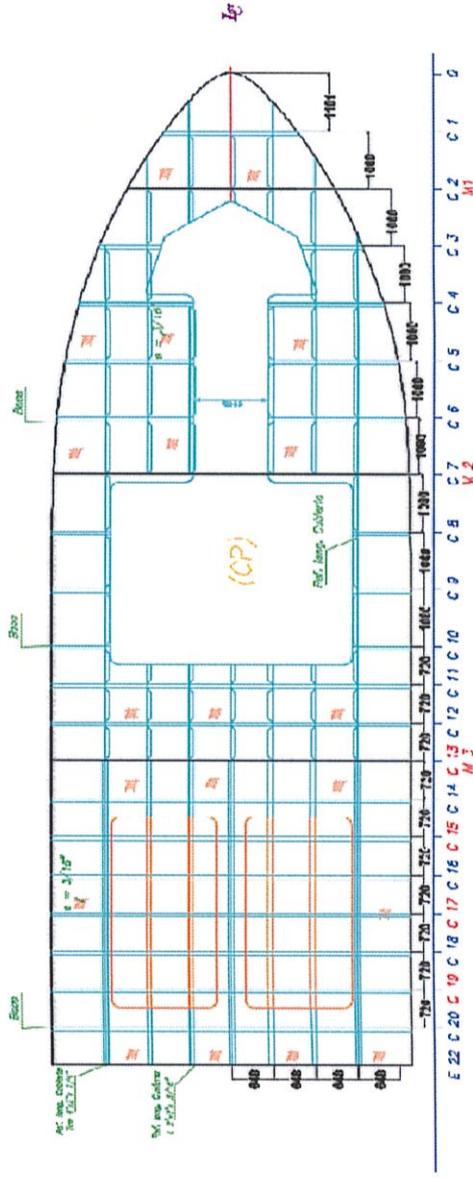


Figura 1.3: Plano estructural de la embarcación, [7]

	Ubicación	Elementos Estructurales	Descripción	Dimensiones [mm]
ENTRE ESPEJO Y MAMPARO 3	FONDO	Planchaje		6.35
		Varenga		Espesor: 12.7
		Base de Máquinas	Ángulo	348 x 127 x 12.7
		Refuerzo Longitudial	Ángulo	50.8 x 50.8 x 6.35
		Quilla	Rub Rail	127 x 25.4 x 12.7 x 8
	COSTADO	Planchaje		4.76
		Cuaderna	Ángulo	76.2 x 50.8 x 4.76
		Refuerzo Longitudial	Platina	76.2 x 6.35
	CUBIERTA	Planchaje		4.76
		Refuerzo Longitudial	T	101.6 x 50.8 x 6.35
		Bao	Ángulo	50.8 x 50.8 x 4.76
		Puntales	Tubo	76.2 x 6.35
ESPEJO	Planchaje		6.35	
	Refuerzo Vertical	Ángulo	76.2 x 76.2 x 6.35	
	Refuerzo Transversal	Platina	76.2 x 6.35	
ENTRE MAMPARO 3 Y PROA	FONDO	Planchaje		6.35
		Varenga		Espesor: 6.35
		Refuerzo Longitudial	Ángulo	50.8 x 50.8 x 6.35
		Quilla	Rub Rail	127 x 25.4 x 12.7 x 8
	COSTADO	Planchaje		4.76
		Cuaderna	Ángulo	50.8 x 50.8 x 4.76
		Refuerzo Longitudial	Platina	50.8 x 6.35
	CUBIERTA	Planchaje		4.76
		Refuerzo Longitudial	Ángulo	50.8 x 50.8 x 4.76
		Bao	Ángulo	50.8 x 50.8 x 4.76
		Puntales		50.8 x 4.76
	MAPAROS	Planchaje		4.76
		Refuerzo Vertical	Ángulo	50.8 x 50.8 x 6.35
		Refuerzo Transversal	Platina	50.8 x 6.35
	ESCUADRAS			Espesor : 6.35

**Tabla 2: Escantillones de elementos estructurales, [7]**

El material empleado para la construcción del casco y estructura de la lancha es una aleación de aluminio marino 5086-H116 cuyas características se muestran en la tabla III.

Características		Dimensiones	Unidades
Densidad	$\rho$	2660	Kg/m <sup>3</sup>
Límite Elástico	$\sigma_y$	207.8	N/mm <sup>2</sup>
Resistencia al Corte	$\tau$	55	N/mm <sup>2</sup>
Módulo de Elasticidad	E	7.10E+04	N/mm <sup>2</sup>
Módulo de Corte	G	2.50E+04	N/mm <sup>2</sup>
Razón de Poisson	$\nu$	0.33	-

**Tabla 3: Propiedades mecánicas y físicas del Aluminio 5086 H116**

Fuente: Alcoa, Propiedades Monotónicas del Aluminio Naval,

[www.alcoa.com/emp/nautical](http://www.alcoa.com/emp/nautical)

## 1.2 Simulación de cargas por impacto hidrodinámico

En una embarcación planeadora las cargas por impacto hidrodinámico son las más importantes para su diseño estructural. Estas fuerzas actúan durante periodos muy cortos de tiempo y se las ha modelado con una variación lineal hasta alcanzar su valor máximo, y después de esto el valor de la carga disminuye de manera exponencial. Debido a las elevadas presiones y al cortísimo periodo de tiempo en el que estas cargas actúan, los efectos dinámicos generados sobre la estructura pueden producir vibraciones estructurales globales y locales. Estas vibraciones del casco se las conoce como *Whipping* y se caracterizan por tener una baja frecuencia durante un largo periodo de duración debilitando las estructuras [10].

Como lo describen algunos autores, la carga de presión sobre el fondo de la estructura debido al impacto hidrodinámico crece en un corto instante de tiempo y luego se reduce lentamente. En la figura 4 se presenta la variación con respecto al tiempo de la presión que se aplica sobre el fondo de la estructura en función del tiempo [6]. Entonces, para definirla se deben calcular los parámetros  $P_0$ ,  $t_0$  y  $t_1$ . Para la presión máxima  $P_0$ , en este trabajo se emplea la ecuación dada por la sociedad de clasificación American Bureau of Shipping (ABS) para embarcaciones planeadoras [9]. Los valores  $t_0$  y  $t_1$  se obtienen usando como referencia el artículo de Heller y Jasper [6] el cual los relaciona como porcentajes del periodo fundamental de vibración del casco.

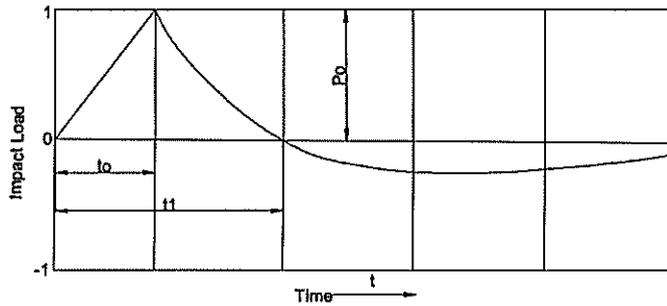


Figura 1.4: Distribución en tiempo de cargas de impacto, [6]

### Cálculo de Presión Máxima

El valor de la presión máxima  $P_0$  se determina usando las reglas de ABS parte 3, capítulo 2 para embarcaciones rápidas, [9]:

$$P_{bxx} = \frac{N_1 \Delta}{L_w B_w} [1 + n_{cg}] F_D F_V \quad , KN/m^2 \quad (1.1)$$

donde:

$L_w$ : eslora en la línea de flotación al desplazamiento de diseño

$B_w$ : Manga máxima en la línea de flotación

$n_{cg}$  : Aceleración vertical del centro de gravedad en g's

V: Velocidad de diseño de la embarcación

$L$ : Eslora total

$F_D$ : factor de área de diseño

$F_V$ : factor de distribución de la aceleración vertical

$N_f$ : Constante cuyo valor es 0.1

A su vez:

$$n_{cg} = 1.39 + k_n \frac{V}{\sqrt{L}} \quad (1.2)$$

$$k_n = 0.256 \quad (1.3)$$

El valor calculado de presión debido a cargas por impacto hidrodinámico es 20.69 KN/m<sup>2</sup> o bien 0.02069 N/mm<sup>2</sup>, con una velocidad de diseño de 25 nudos y un valor de  $n_{cg}$  igual a 3.16. En las reglas mencionadas para lanchas con esloras menores a 25 metros, el mínimo valor que el factor  $F_D$  puede tomar es 0.75 para un espaciado de 500 mm, valor usado en este trabajo. El factor de distribución de la aceleración vertical  $F_V$ , tiene valores diferentes dependiendo de la posición a lo largo de la eslora; en la siguiente gráfica se muestra el valor de presión máxima debido a *Slamming* a lo largo de la eslora:

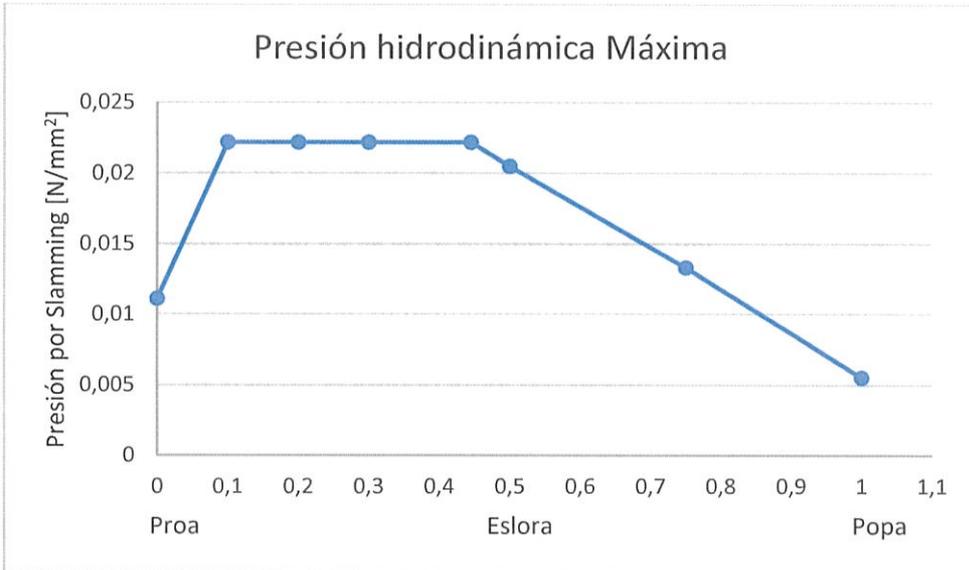


Figura 1.5: Presión debido a *Slamming* a lo largo de la eslora de la lancha.

### Cálculo de $t_0$ y $t_1$

De acuerdo al artículo de Heller y Jasper [6], para el cálculo de  $t_0$  y  $t_1$  se necesita conocer el periodo de vibración vertical del casco de la lancha. Para determinar este se realizó un cálculo simplificado haciendo la suposición de que la lancha es una viga con extremos libres. Una vez determinada la frecuencia natural del modelo simplificado de la lancha con este valor se determina el periodo de vibración, y con éste finalmente los valores de  $t_0$  y  $t_1$ . La ecuación que se presenta a continuación tomada de Thomson [10], fue usada para calcular la frecuencia considerando al casco como una viga prismática libre-libre.

$$\omega = (\beta L)^2 \sqrt{\frac{EI}{ML^3}} = (\beta L)^2 \sqrt{\frac{EIg}{\Delta L^3}} \quad (1.4)$$

Donde:

$E$ : Módulo de Young es  $0.71E10 \text{ kg/m}^2$

$\Delta'$ : Desplazamiento virtual de la lancha igual a 36000 kg.

$L$ : eslora de la lancha igual a 13 m

$I$ : Momento de Inercia de la lancha igual a  $0.042\text{m}^4$

El desplazamiento efectivo o virtual ( $\Delta'$ ), se considera aproximadamente 2 veces el desplazamiento seco el cual es 18000 kg. La inercia de la sección media de la lancha se determina considerando los elementos longitudinales en la vista transversal de la cuaderna 12 que se muestra en la figura 6.

## C11 - C12

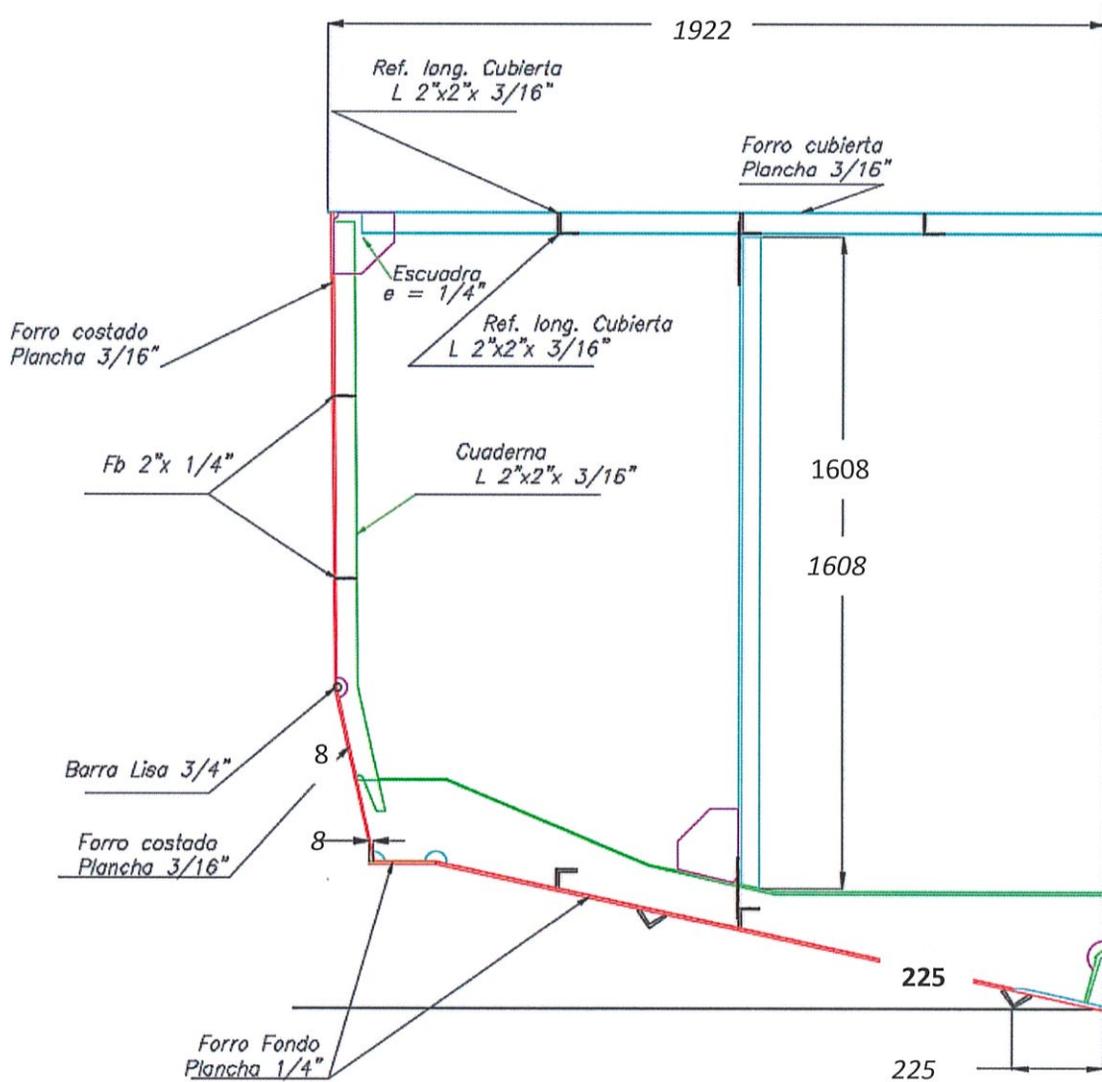


Figura 1.6: Sección transversal a la altura de la cuaderna 11 y 12, [7].

La siguiente tabla resume el cálculo realizado para determinar la inercia seccional de la estructura de la lancha:

	# Elemento	Area [cm <sup>2</sup> ]	y [cm]	Ay [cm <sup>3</sup> ]	Ay <sup>2</sup> [cm <sup>4</sup> ]	I [cm <sup>4</sup> ]
Longitudinales de fondo	1	6.5	13.08	84.37	1103.27	13.87
	2	5.6	15.30	86.37	1321.39	0.19
	3	6.5	22.90	147.71	3381.81	13.87
	4	5.6	25.12	141.79	3561.46	0.19
	5	6.5	32.72	211.06	6904.96	13.87
	6	5.6	34.94	197.23	6890.63	0.19
Cubierta	7	17.8	194.12	3451.42	669982.37	38.24
	8	16.0	191.83	3075.00	589871.64	0.33
Costado	9	6.4	106.64	687.08	73272.57	0.22
	10	6.4	151.65	977.01	148159.84	0.22
Plancha cubierta	11	192.2	196.91	37845.72	7452124.56	4.00
Plancha costado	12	116.2	138.55	16099.07	2230542.52	130735.1
Plancha de fondo	13	20.7	36.33	750.77	27278.32	0.69
Planchas inclinadas	14	219.3	21.11	4628.98	97703.84	20114.98
	15	43.1	58.21	2508.98	146055.27	6477.99
	16	18.6	7.79	144.68	1127.6	39.5
<b>total</b>		693.0	1247.2	71037.2	11459282.1	157453.5

$\bar{z}$	102.5	cm
$I_x$	11616735.6	cm <sup>4</sup>
$I_{xg}$	4335120.8	cm <sup>4</sup>
$I_{xg}$	0.043	m <sup>4</sup>

**Tabla 4: Cálculo de Inercia de la Viga Buque.**

Tomando del libro de Thomson [10], un valor de  $\beta L$  igual a 22.4 para el caso de una viga prismática libre-libre, y con los datos anteriores el valor de la primera frecuencia natural de vibración de la lancha es 21.86 ciclos/s. Por lo tanto, el periodo de vibración que es el inverso de la frecuencia es igual a 0.046 s/ciclo. El valor del tiempo  $t_1$  según [6] es alrededor de diez veces el periodo de la lancha, esto es 0.46 segundos. El valor  $t_0$  según dicha referencia es aproximadamente un cuarto del periodo de la lancha de esta manera el valor calculado para este parámetro es 0.011 segundos.

Con los valores antes obtenidos se simulará la carga debido a impacto hidrodinámico usando el software ANSYS esperando capturar la vibración global del casco, el *Whipping*. Los valores que representan la variación de la presión son ingresados de manera tabular y el programa de simulación se encarga de realizar una interpolación para obtener los valores en los instantes de tiempo no especificados en la tabla.

### 1.3 Modelo estructural empleando elementos finitos

El modelo estructural de la lancha LP-AST 1304 que se analiza en este trabajo, para simular el golpe hidrodinámico empleando elementos finitos se basa en la geometría desarrollada en [8]. Se importa la geometría desde el módulo *Explicit Dynamics* en Workbench del paquete ANSYS, y se le asignan propiedades de material y espesor a las planchas y estructuras del casco. Debido a que el análisis a realizar se encuentra dentro del área lineal solo se ingresó densidad, coeficiente de Poisson y módulo de Young para el material que se usará en la simulación. Los elementos que se usan para la discretización del modelo son planchas y vigas. En la figura 7 se muestra el modelo estructural desarrollado con elementos finitos; el origen del sistema de referencia se encuentra ubicado en el fondo del espejo sobre la línea de crujía, con el eje x apuntando hacia proa, el eje y apuntando hacia babor y el eje z apuntando hacia arriba.

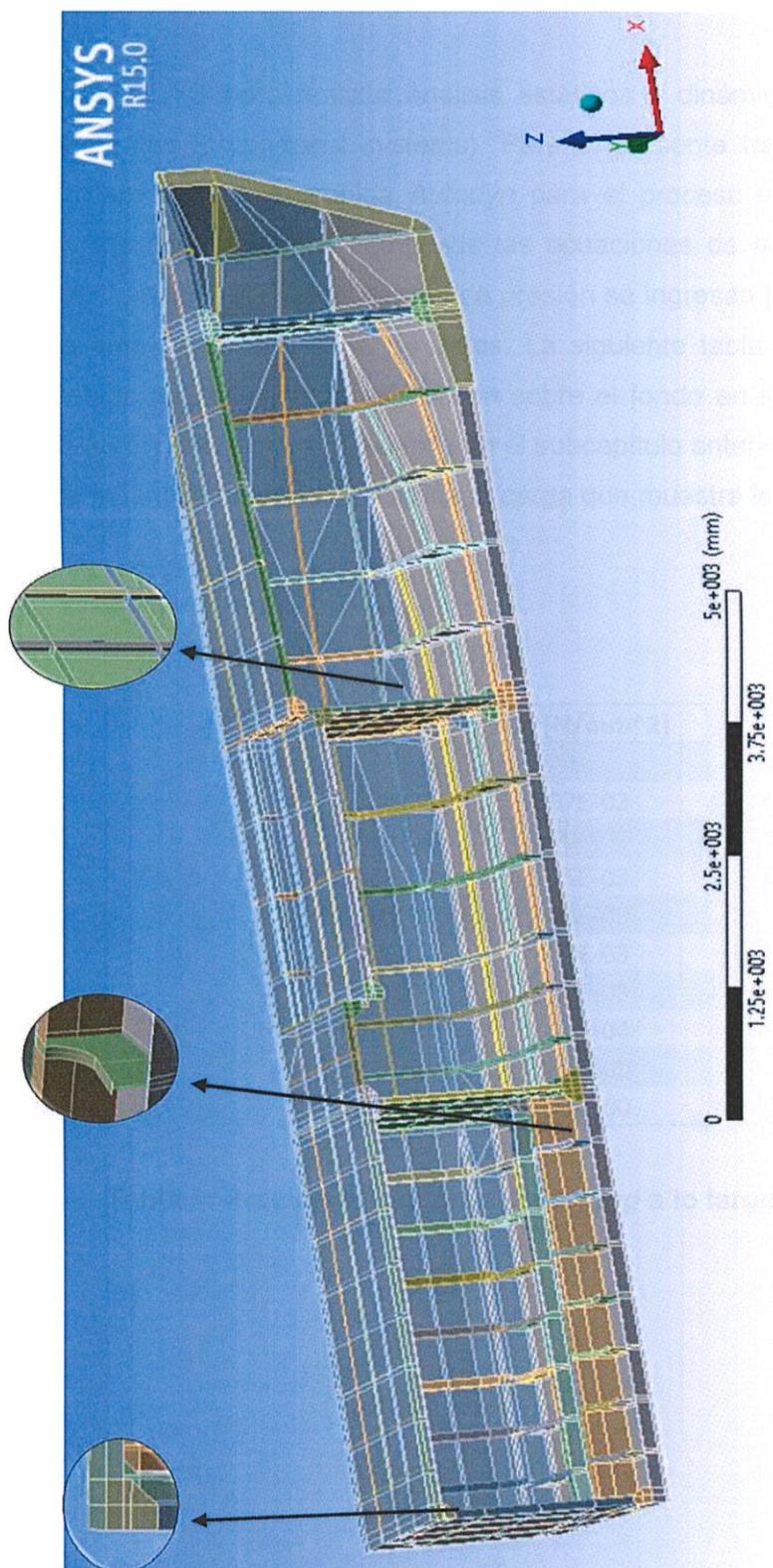
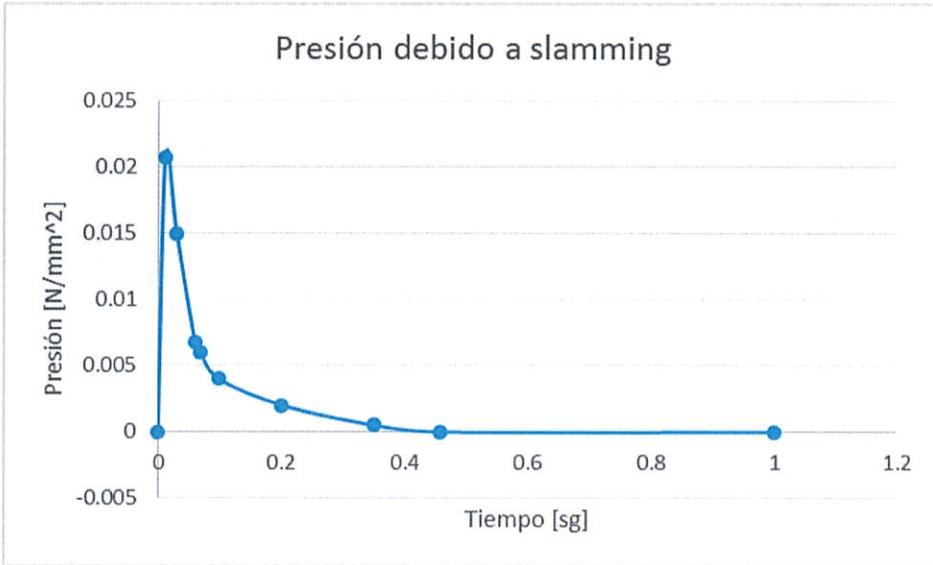


Figura 1.7: Modelo empleando elementos finitos de la lancha LP-AST 1304

El software ANSYS para realizar análisis estáticos y dinámicos emplea motores de cálculo diferentes (*component systems*). Para el presente trabajo se usa el módulo *Explicit Dynamics* el cual emplea *Autodyn* para el proceso de cálculo. Este módulo desarrolla una integración en tiempo de las ecuaciones de movimiento discretizadas espacialmente con el MEF. Las cargas de presión se ingresan para diferentes instantes de tiempo empleando una serie de datos. La siguiente tabla muestra los valores de presión debido a *Slamming* que se aplica sobre el fondo en la sección de proa de la lancha LP-AST 1304, y que fue definida en el subcapítulo anterior. La figura 9 muestra la sección de la lancha en donde se aplica la carga que muestra la figura 8.

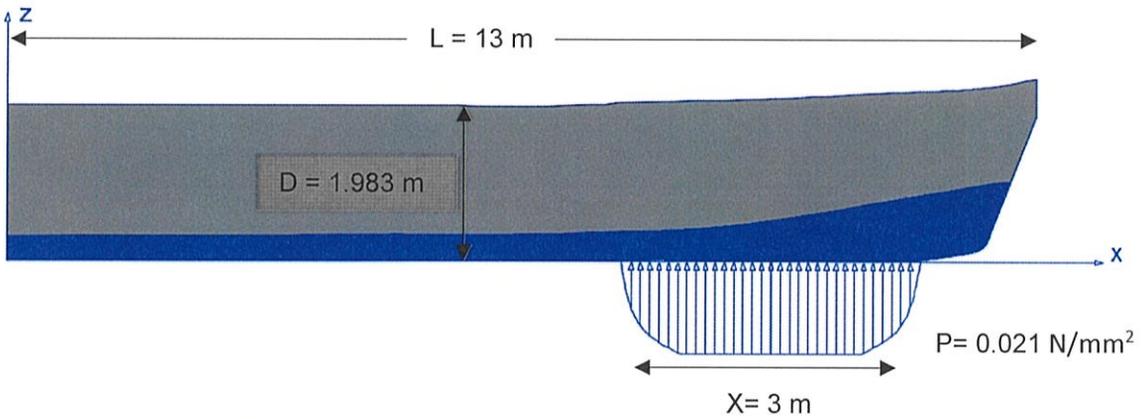
t [sg]	Presión [N/mm <sup>2</sup> ]
0	0
1.10E-02	2.07E-02
3.00E-02	1.50E-02
6.00E-02	6.75E-03
6.80E-02	6.02E-03
9.90E-02	4.00E-03
2.00E-01	2.00E-03
3.50E-01	5.00E-04
4.57E-01	0.00E+00
1.00E+00	0.00E+00

**Tabla 5: Presiones debido a *Slamming* a lo largo del tiempo**



**Figura 1.8: Distribución en tiempo de la Presión en Proa debido a Slamming**

El análisis dinámico a realizarse exige un gran esfuerzo computacional debido a que el proceso incluye integración en tiempo de la respuesta de la estructura discretizada con elementos finitos. En el presente trabajo se aprovecha la simetría de la embarcación para ahorrar recursos computacionales al desarrollar la solución del modelo. Entonces en el modelo se restringe el movimiento de los nodos en la línea de crujía, impidiendo su rotación en dirección  $X$  y  $Z$ , y, su desplazamiento en dirección  $Y$ .



**Figura 1.9: Carga aplicada en el fondo de la sección de Proa.**

### **Análisis de la Malla del Modelo Estructural**

Los resultados de un análisis con elementos finitos dependen de qué tan buena es la malla que se usa en el modelo. Siguiendo las recomendaciones dadas por ABS en [9] y que se mencionan a continuación, se genera una malla con elementos más pequeños en la sección donde se aplica la carga debido a impacto hidrodinámico, tabla 6; finalmente el modelo estructural está formado por 26621 elementos y 31274 nodos. En la figura 9 se muestra la partición resultante del dominio de la lancha LP-AST 1304 de acuerdo a las recomendaciones dadas en [9] y que se mencionan a continuación:

- Para un análisis usando el método de elementos finitos de una lancha planeadora con las características de la LP-AST 1304 el tamaño de los elementos que forman la malla no puede ser mayor al espaciamiento entre los elementos longitudinales del fondo que en este caso es de 450 mm. Para el desarrollo de este proyecto se usa 170 mm para los elementos más grandes y 40 mm para los elementos en la zona de contacto.
- La relación de aspecto de los elementos planos de la malla debe estar entre 1.0 y 2.0.

La tabla V muestra el tamaño y relación de aspecto de los elementos que forman la malla aplicada al modelo con elementos finitos de la lancha LP-AST 1304:

	Ubicación	Tamaño de los Elementos [mm]	Razón de Aspecto
ENTRE ESPEJO Y MAMPARO 3	FONDO	170	1.9
	COSTADO	170	1.9
	CUBIERTA	170	1.9
ENTRE MAMPARO 3 Y MAMPARO 2	FONDO	170	1.9
	COSTADO	170	1.9
	CUBIERTA	170	1.9
ENTRE MAMPARO 2 Y MAMPARO 1	FONDO	40	1.9
	COSTADO	170	1.9
	CUBIERTA	170	1.9
ENTRE MAMPARO 1 Y PROA	FONDO	170	1.9
	COSTADO	170	1.9
	CUBIERTA	170	1.9

**Tabla 6: Características de los elementos de la malla**

De acuerdo al tamaño y razón de aspecto de los elementos que forman la malla, el modelo estructural desarrollado se considera que es adecuado para el análisis que se realiza en este trabajo.

Para capturar de mejor forma la respuesta dinámica en la región de impacto, los elementos más pequeños del modelo estructural con un tamaño de 40 mm se encuentran en la zona de aplicación de la carga, como se observa en la figura 10. En el resto de la lancha los elementos de la malla tienen un tamaño de 170 mm tal como se menciona en la tabla V.

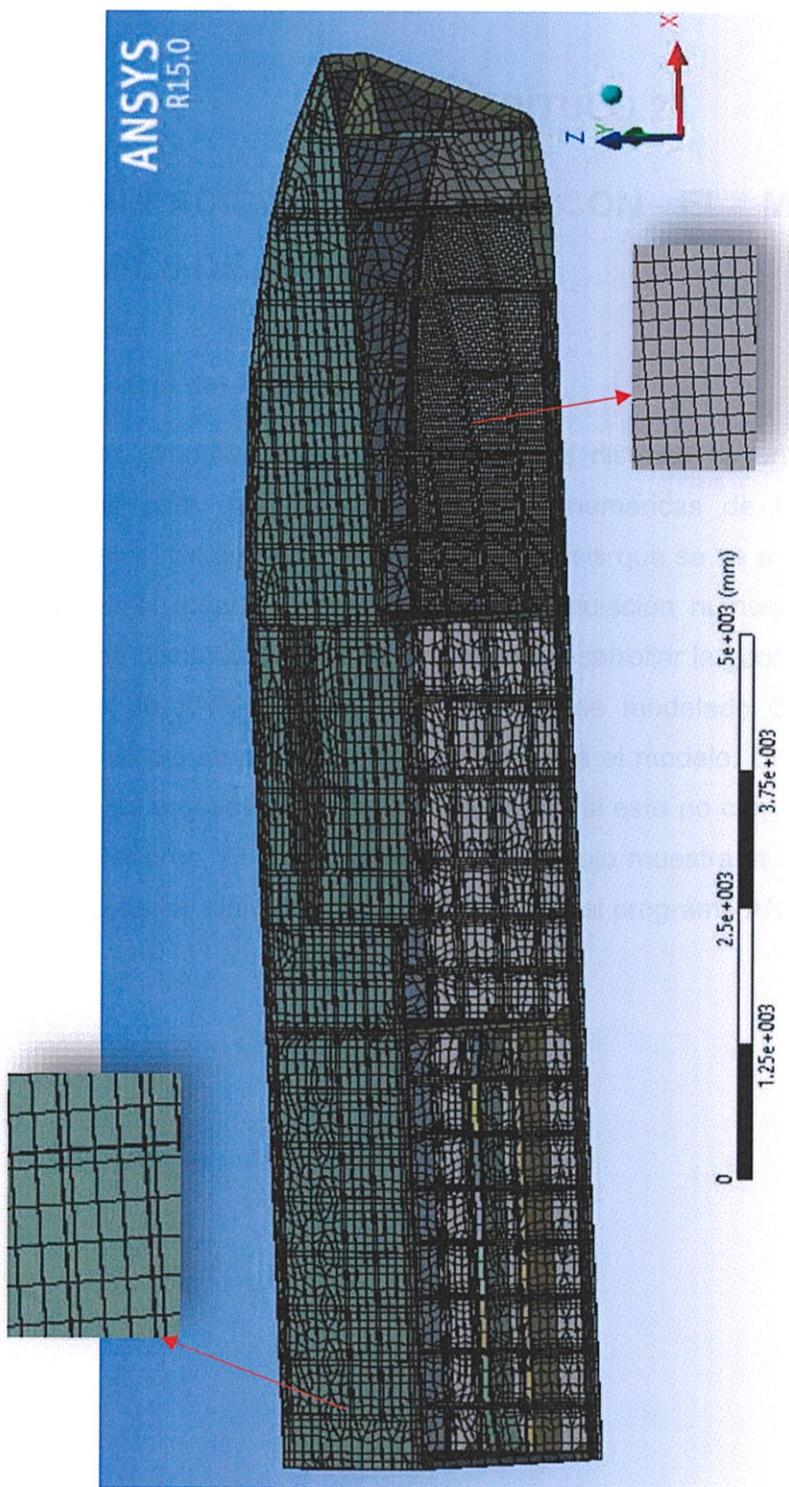


Figura 1.10: Detalle del tamaño de los elementos de la Malla del modelo estructural

## CAPÍTULO 2

### 2. SIMULACIÓN NUMÉRICA CON EL MÓDULO *EXPLICIT DYNAMICS* DE ANSYS

#### 2.1 Secuencia del Análisis en Workbench

La interfaz *Workbench* del programa Ansys dispone de una secuencia de procesos ordenados para desarrollar simulaciones numéricas de la respuesta de modelos estructurales. Se debe definir el tipo de análisis que se va a realizar de manera que se seleccione el módulo adecuado para la simulación numérica. Para continuar con el proceso de discretización primero se debe desarrollar la geometría ya sea en la interfaz de dibujo de ANSYS o en otro software de modelado CAD, para así aplicar las condiciones del sistema y cargas que soporta el modelo. Una vez desarrollados estos procesos se procede al proceso de solución; si este no converge se deberá revisar los pasos anteriores. El siguiente diagrama de flujo muestra la secuencia seguida para el desarrollo de las simulaciones numéricas con el programa ANSYS.

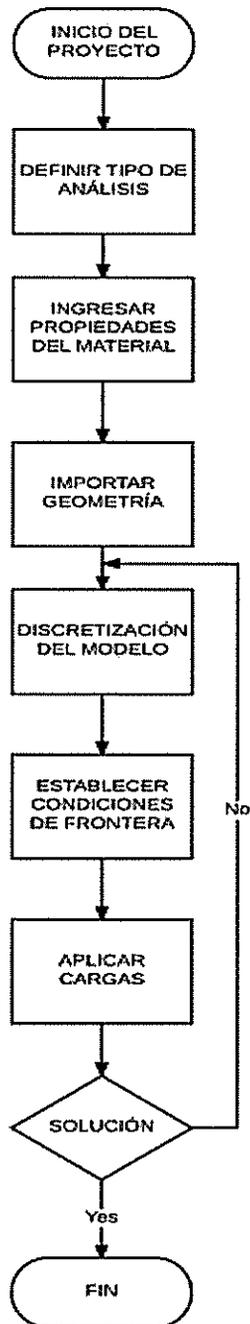


Figura 2.1: Diagrama de Flujo para una simulación numérica en *Explicit Dynamics*.

Para desarrollar una simulación numérica con el programa ANSYS se sigue la misma secuencia de pasos, independiente del tipo de análisis. En la etapa de desarrollo del modelo o discretización del modelo es donde se encuentran las diferencias entre los distintos análisis que se pueden realizar, ya que las condiciones del sistema y las cargas que se pueden aplicar dependen de variables diferentes de acuerdo al tipo de estudio que se desarrolla. Como se mencionó en el capítulo anterior para simulaciones dinámicas la carga varía con el tiempo lo que no sucede con un análisis estático donde se mantiene constante.

### Tipo de Análisis Realizado

El paquete computacional *Workbench* permite realizar diferentes tipos de análisis dependiendo del estudio que se desee realizar. Al ingresar a esta interfaz se encuentra un menú llamado Sistemas de Análisis (*Analysis Systems*) que contiene una lista con diferentes análisis que el software permite desarrollar. Para el desarrollo de este proyecto se usa el módulo *Explicit Dynamics*, y cuya característica principal es que las cargas aplicadas varían en el tiempo. A continuación, se describe el proceso realizado en cada sub menú de *Explicit Dynamics*.

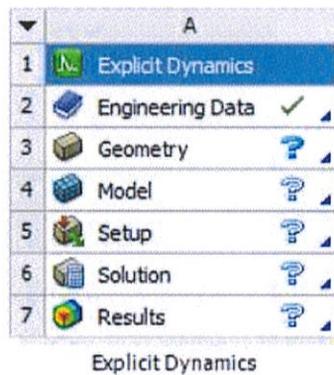


Figura 2.2: Pasos para el desarrollo de una análisis dinámico.

## 2.2 Datos de Ingeniería (*Engineering Data*) y Modelo Geométrico de la Lancha

La interfaz *Workbench* cuenta con el menú *Engineering data*, en donde se encuentra una biblioteca de materiales predefinidos usados para los diferentes análisis posibles. Esta biblioteca contiene una lista limitada de materiales, de manera que es común que en un nuevo análisis se deban ingresar sus propiedades mecánicas. Se debe tener claro qué propiedades serán ingresadas, debido a que estas definirán la linealidad o no linealidad del problema. Al seleccionar datos de ingeniería se abre una ventana que muestra un menú llamado *Toolbox*, donde se ingresa la densidad y se especifican las propiedades isotrópicas del material. La siguiente ilustración muestra la generación del material usado en este trabajo al cual corresponde al aluminio naval.

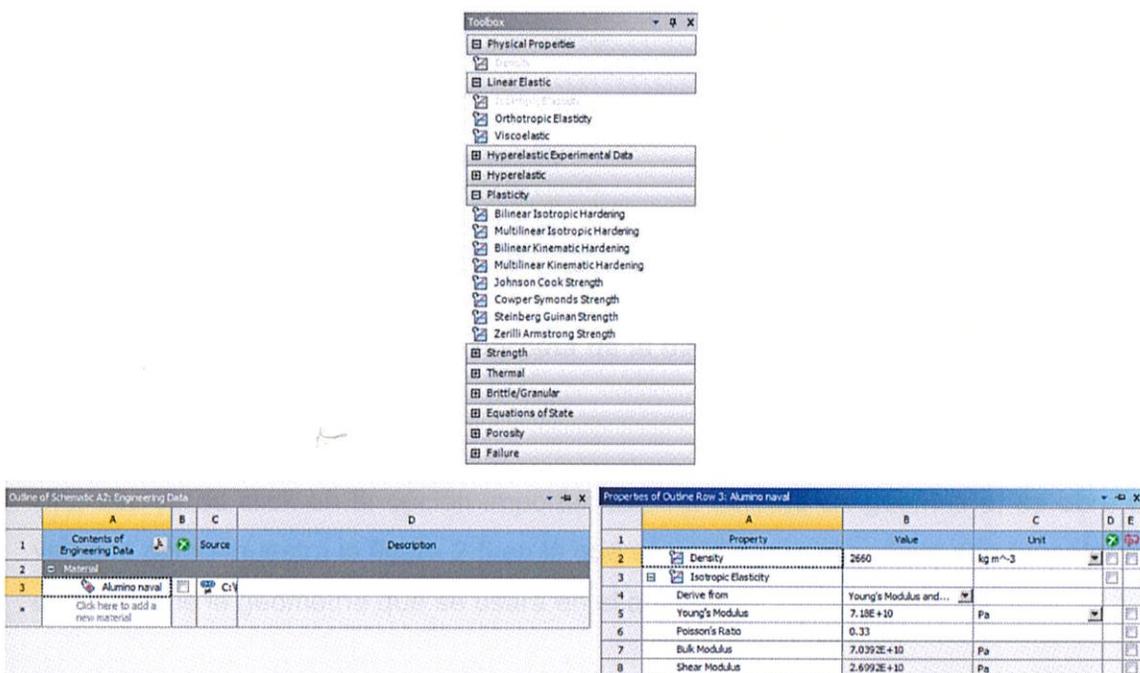
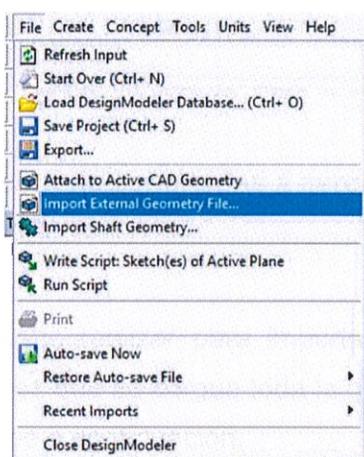


Figura 2.3: Menú de propiedades del material en ANSYS.

Una vez ingresadas las propiedades mecánicas del material, estará disponible en la biblioteca de ANSYS y podrá ser usado en la definición del modelo estructural.

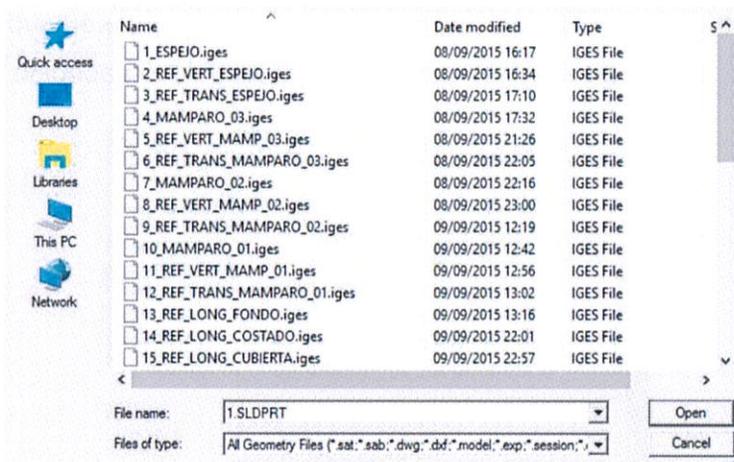
## Modelo Geométrico

La interfaz de dibujo de ANSYS llamada *Geometry* permite importar modelos 3D para análisis con elementos finitos. Al ingresar en esta interfaz se presenta la pestaña carpeta (*file*) dentro de la barra de menús y al seleccionarla se despliega un lista de opciones en la cual se encuentra importar carpeta externa de geometría (*import external geometry file*) como se muestra en la figura 2.4.



**Figura 2.4: Menú carpeta de la barra de herramientas.**

Una vez se da click en la opción importar carpeta externa de geometría, se abre una ventana como muestra la figura 2.5 en la que se selecciona el archivo con formato *.iges* que contiene la geometría que se usará en el análisis.



**Figura 2.5: Selección de geometrías a cargar para el modelo.**

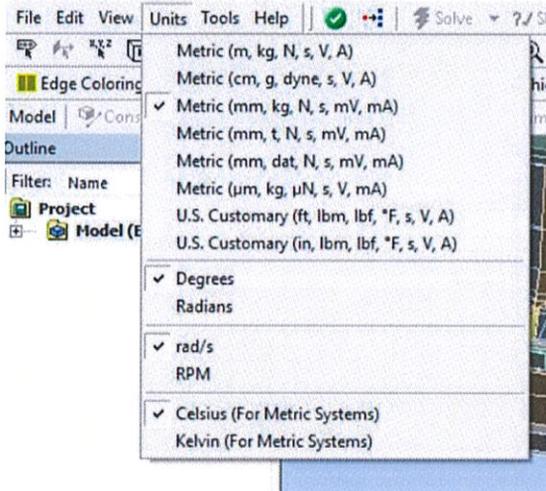
Este mismo proceso se lo debe realizar para importar los diferentes archivos que contengan la geometría; una vez que se cargue toda la geometría es posible entrar a la interfaz modelo, que se describe a continuación.

### 2.3 Modelo Numérico en *Explicit Dynamics*

La etapa de desarrollo del modelo numérico de una estructura es importante ya que de esta depende la convergencia del análisis y la confiabilidad de los resultados. En esta interfaz se definen las unidades con las que trabajará el módulo *Explicit dynamics*, las características de la geometría, conexiones de la geometría, restricciones del modelo y las cargas que se aplicarán al sistema. A continuación se explica cómo se desarrolló el modelo estructural de la lancha LP-AST 1304.

La unidades con las que se trabaja en este proyecto se definen siguiendo las recomendaciones dadas por el software en su manual de usuario [5]. Ansys recomienda que para un análisis dinámico realizado en el módulo “Explicit dynamics” las unidades que se deben usar son mm, kg, N, s, mV, mA. Para definir estas unidades se debe ir a la

pestaña “*units*” que se encuentra en la barra de herramientas de la interfaz modelo y se seleccionan las unidades mencionadas tal como muestra la figura 2.6.



**Figura 2.6:** Pestaña unidades de *Explicit Dynamics*.

En el proceso de preparación del modelo se requiere definir las propiedades de la geometría importada. Ya que en este proyecto el modelo 3D de la lancha fue desarrollado con superficies, es indispensable asignarles espesor y material. Para esto se ingresa a la ventana desplegable geometría que se encuentra dentro de la carpeta modelo, en la ventana “*outline*”, mostrando todas las superficies que fueron importadas. Al seleccionar una de las superficies se abre una ventana llamada “*details of*” donde se seleccionará el material y se dará espesor a la geometría; esto se puede observar mejor en la figura 2.7.

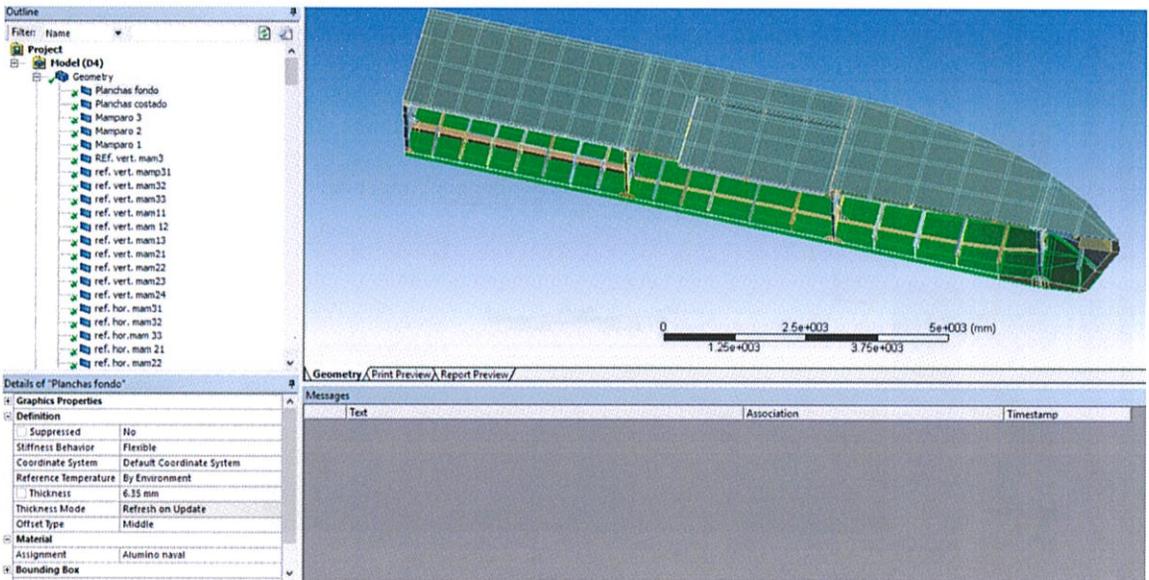
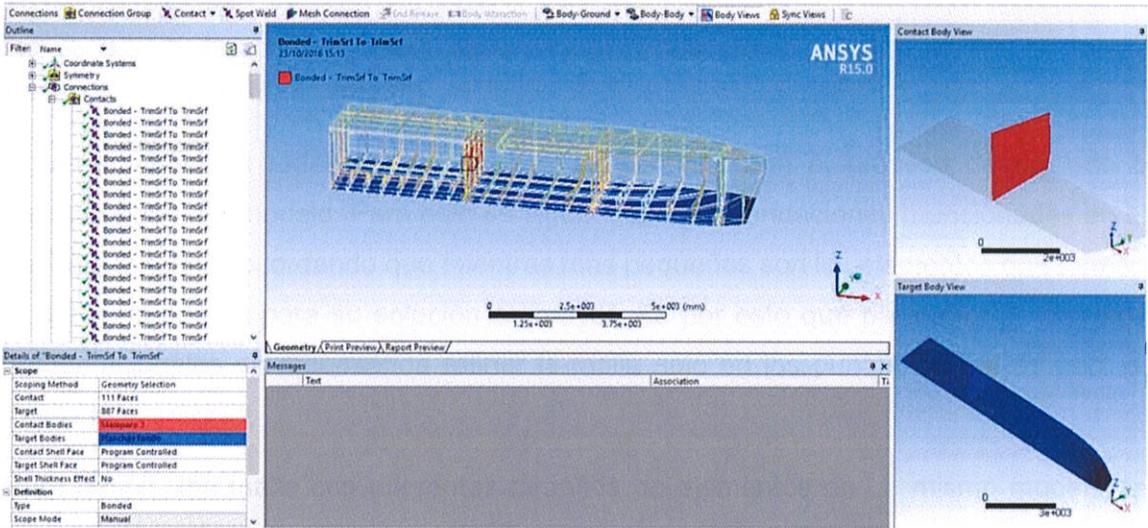


Figura 2.7: Detalles del planchaje de fondo.

Se puede apreciar en la imagen anterior que el material asignado a las planchas del fondo es Aluminio Naval y tienen un espesor de 6.35 mm. De esta manera se debe ir asignando el material y espesor a cada uno de elementos estructurales de la lancha.

### Conexiones (*connections*)

Conexiones, es la opción que ofrece ANSYS para definir el tipo de unión que existe entre dos elementos, que para el caso del modelo desarrollado en este trabajo permite simular la soldadura entre estos. Es por esto que al preparar el modelo geométrico es importante definir las conexiones entre los elementos, que se realizan de la siguiente manera: se da click derecho sobre la ventana desplegable "*connections*" y en la opción insertar se selecciona *manual contact region*; de esta manera en la ventana "*details of*", el software pide se seleccionen los elementos a conectar como se muestra en la figura 2.8.



**Figura 2.8: Conexión entre Mamparo 3 y planchaje del fondo.**

En el presente proyecto las conexiones entre elementos de la lancha se realizan de la siguiente manera:

- Se define al elemento más pequeño entre los dos elementos a conectar como el *Contact bodies*.
- El elemento más grande entre los dos elementos a conectar se lo definió como *target bodies*.

Debido a que el modelo a analizar está formado por varias superficies, es importante seguir un orden para realizar las conexiones, de esta manera se asegura no dejar ningún elemento sin conectar. Si bien es cierto el software da la opción de realizar conexiones automáticamente, para casos como el de una estructura compleja se ha comprobado que al usar esta opción algunos elementos quedan sin conectar.

## Generación de la Malla (*mesh*)

Una vez definidas todas las conexiones se continúa con el proceso de mallado o discretización del modelo. Para esto se siguen las recomendaciones mencionadas en el capítulo anterior, recordando que mientras más pequeños son los elementos que forman la malla, el tiempo para su solución es mayor. Es por esto que para ahorrar recursos computacionales se recomienda refinar la malla solo en los puntos de interés para el análisis.

Para definir una malla con diferentes tamaños de elementos en un mismo modelo se recurre al menú *mesh*, y, en insertar se escoge la opción *sizing* como se muestra en la figura 2.9.

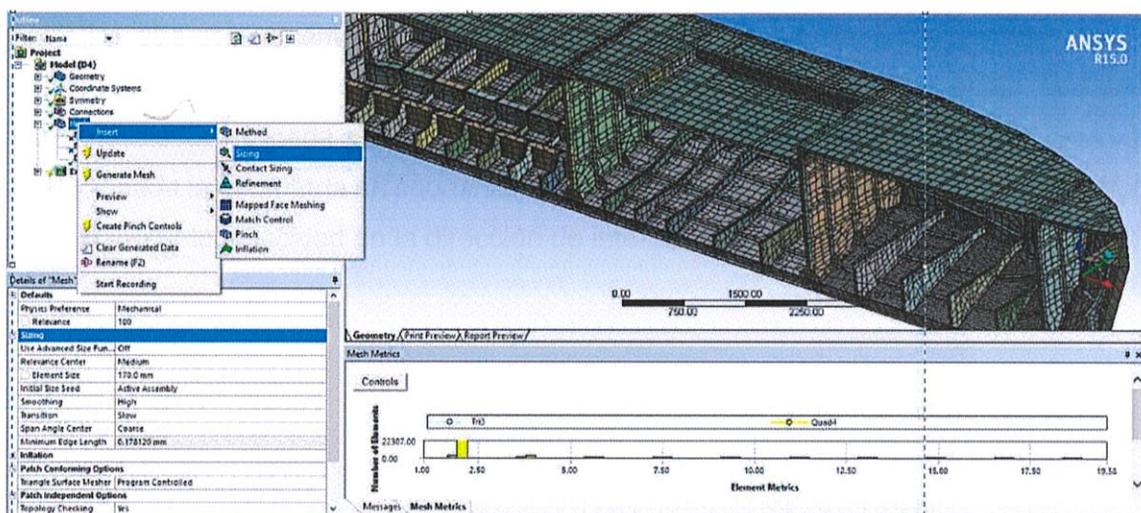


Figura 2.9: Proceso de mallado de la lancha LP-AST 1304

En la ventana *details of* se encuentra la opción *geometry* que permite seleccionar los elementos a los que se les asigna el tamaño de malla deseada. Después de seleccionar los elementos se encuentra la opción *element size*, Una vez definido el tamaño de los elementos para las diferentes secciones seleccionadas, se genera la malla del modelo.

### **Definición de Cargas, Condiciones Iniciales y de Frontera**

A continuación se muestra como ingresar las condiciones iniciales, las cargas y las condiciones de fronteras del sistema, que luego permiten resolver el modelo numérico. Para definir la velocidad inicial del modelo se selecciona en el menú desplegable *initial conditions* la opción *velocity* que aparece dentro del menú mencionado. Al seleccionar esta pestaña se muestra en la ventana *details of "velocity"* varios ítems modificables, entre los que se encuentra una pestaña denominada geometría. Esta pestaña permite definir los elementos a los que se le aplicará la velocidad vertical hacia abajo, que para este análisis fue aplicada a toda la embarcación como se aprecia en la figura 20. Una vez seleccionada la geometría en *coordinate system* se selecciona *Global Coordinate System* para ingresar la velocidad en la dirección de interés.

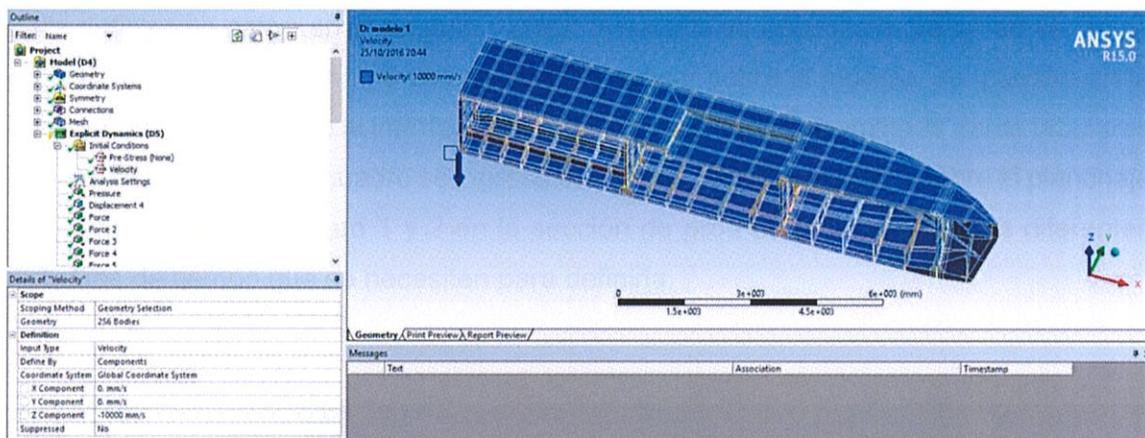


Figura 2.10: Ingresando condiciones iniciales del modelo.

Definidas las condiciones iniciales se procede a ingresar las restricciones y cargas sobre el sistema. Para esto se da click derecho sobre la pestaña *Explicit Dynamics* que se encuentra dentro de la ventana *outline*. Luego al ubicarse sobre la opción *insert* se despliega una lista de todas las restricciones y tipos de carga que se pueden definir en este módulo. De manera que dependiendo de las restricciones a las que esté sometido el modelo se asignará las condiciones de frontera adecuadas.

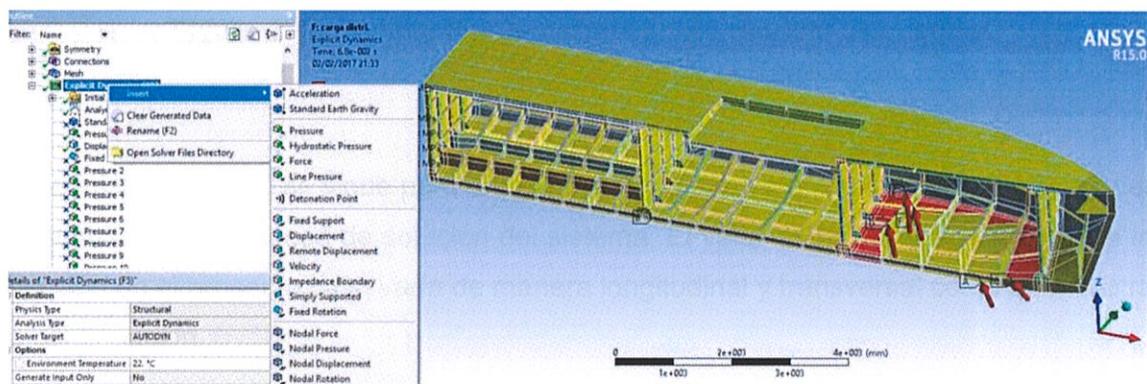


Figura 2.11: Condiciones de fronteras y cargas sobre modelo estructural.

Para definir una carga en el módulo *explicit dynamics* se necesita ingresar su variación en el tiempo. Al seleccionar el tipo de carga a aplicar sobre el modelo, se muestra en la parte inferior izquierda de la interfaz de trabajo, una ventana denominada datos tabulares (*tabular data*). En este recuadro se ingresa el valor de la carga aplicada sobre el planchaje de fondo entre el mamparo 1 y 2 en la sección de proa de la lancha, en los diferentes instantes de tiempo que se necesiten para definirla.

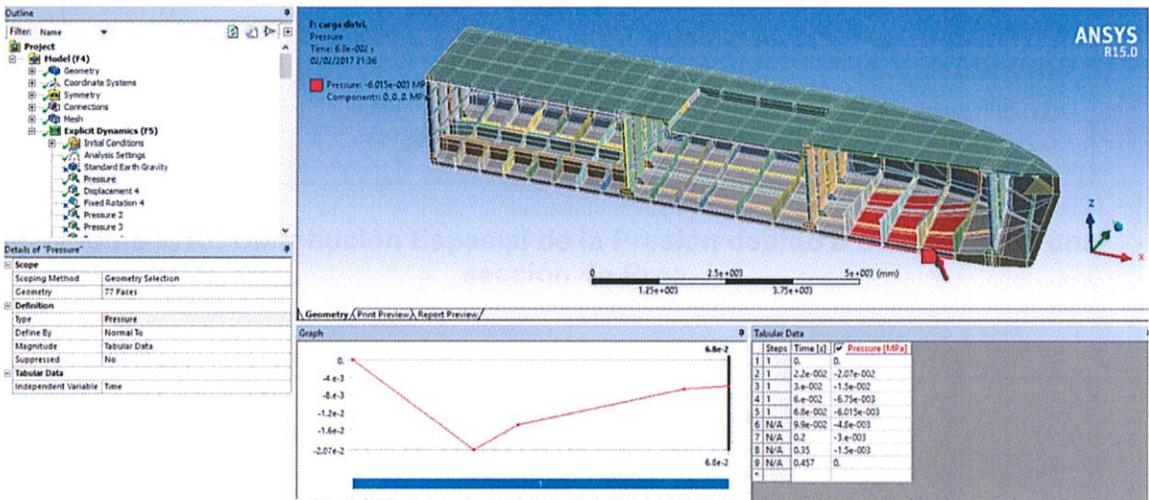
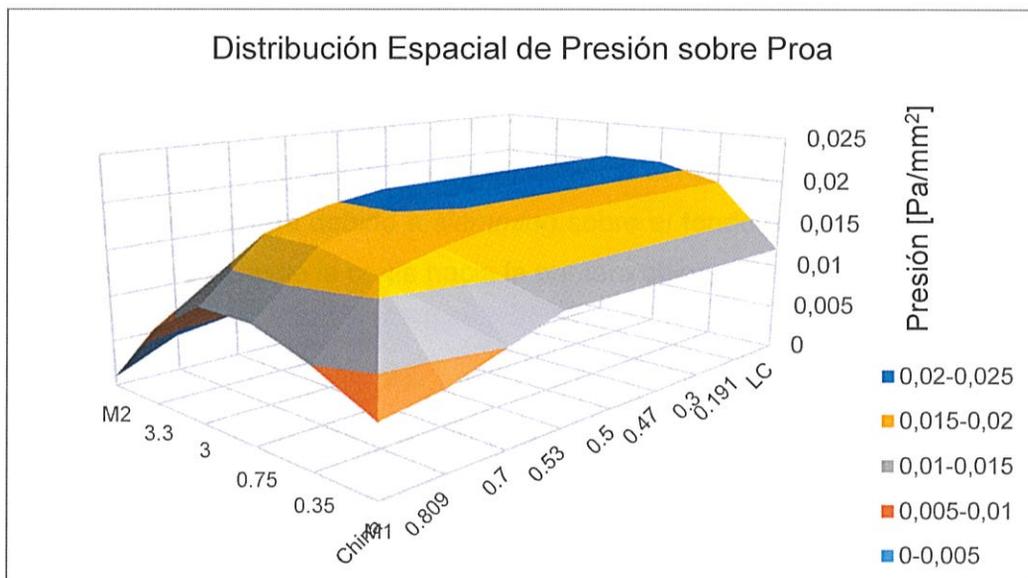
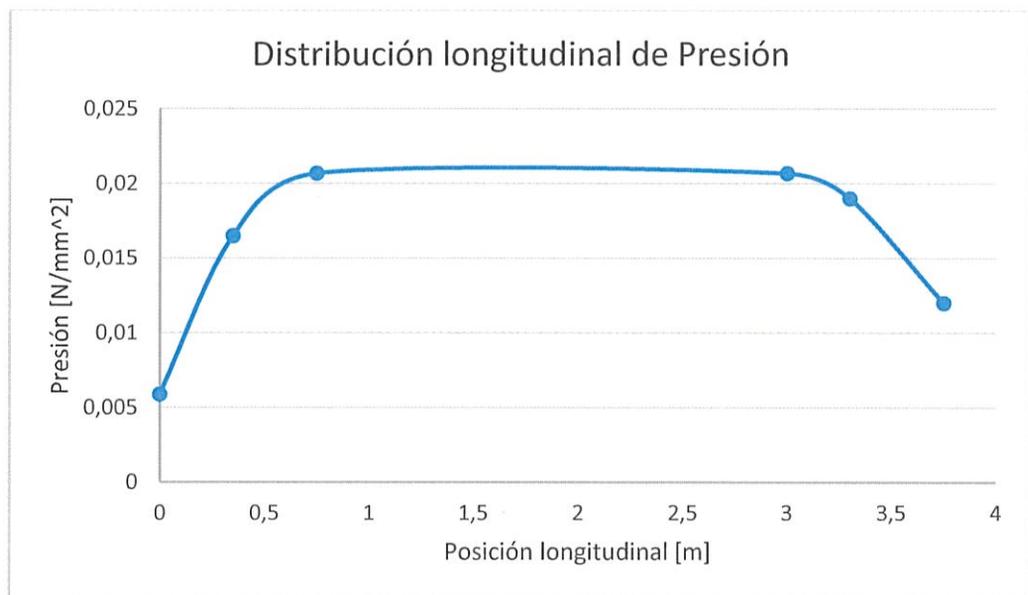


Figura 2.12. Aplicación de cargas sobre modelo estructural

Este mismo proceso se sigue para todas las cargas que se necesiten definir y así poder continuar con el proceso de solución del sistema. El valor de la carga aplicada sobre la sección en el presente caso varía de manera longitudinal y transversal como se muestra a continuación.

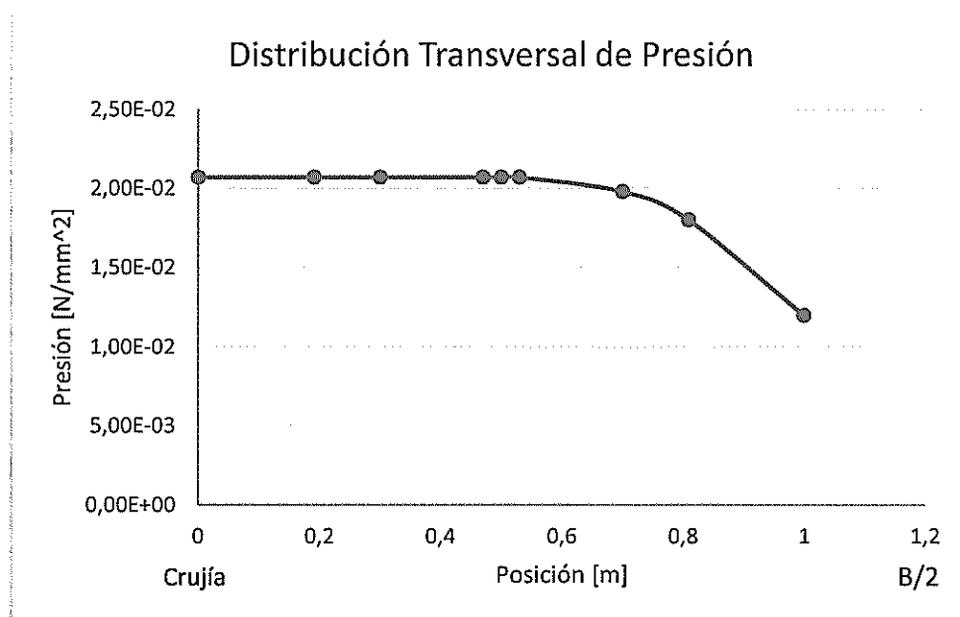


**Figura 2.13: Distribución Espacial de la Presión debido a *Slamming* en una sección de Proa.**



**Figura 2.14: Variación de la Carga en dirección Longitudinal**

En la figura 2.13, se muestra la distribución de la carga debido a *slamming* sobre el fondo de la sección de proa en dirección longitudinal desde el mamparo 2 hasta el mamparo 1. La distribución de la carga debido a *slamming* sobre el fondo de la sección de proa, en dirección transversal desde la crujía hacia la primera china se presenta en la figura 2.15.



**Figura 2.15: Variación de la Carga en sentido transversal sobre la zona de aplicación**

## CAPÍTULO 3

### 3. ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE LA RESPUESTA ESTRUCTURAL

#### 3.1 Análisis Global de la Respuesta Estructural

Los esfuerzos y deformaciones que experimenta la viga buque cuando es sometida a cargas de impacto hidrodinámico varían en el tiempo y de acuerdo a la posición en que se encuentran. Un análisis global permite observar cómo se comporta la estructura después de que ha sido sometida a algún tipo de carga, además de que es posible determinar las zonas más sensibles a falla. Para análisis globales la sociedad de clasificación ABS explica, que las estructuras que se deben evaluar son: costado, cubierta, fondo, mamparos transversales y mamparos longitudinales. Por ello para el desarrollo de este proyecto se analiza el comportamiento de la estructura de fondo, cubierta y costado.

La sociedad de clasificación ABS en la referencia [9], establece criterios de aceptación para la estructura de una lancha rápida construida en aluminio. Los esfuerzos equivalentes (Hencky von-Mises) para el aluminio deben ser menores o iguales a 176.6 [N/mm<sup>2</sup>], también establece que el esfuerzo de fluencia del aluminio cuando es sometido a algún proceso de soldadura varía entre 96.6 y 131 [N/mm<sup>2</sup>].

#### Esfuerzos sobre la Viga Buque

Una vez obtenidos los resultados numéricos de la respuesta de la embarcación es importante revisar los niveles de esfuerzos que se están desarrollando en la estructura. En las figuras 3.1, 3.2, 3.3 se muestra, respectivamente, el comportamiento de los esfuerzos equivalentes (Hencky von-Mises), esfuerzos normales en dirección "x" y esfuerzos de corte en el plano "xy" en la estructura de la lancha.

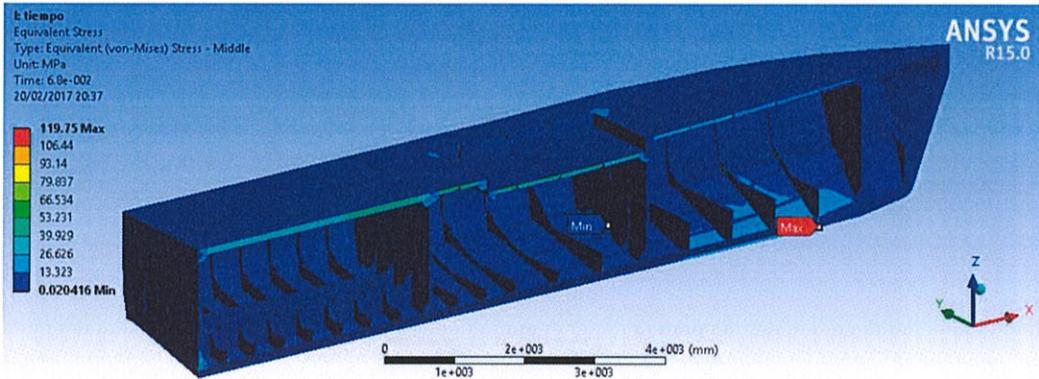


Figura 3.1. Distribución de Esfuerzo de von-Mises en la LP-AST 1304

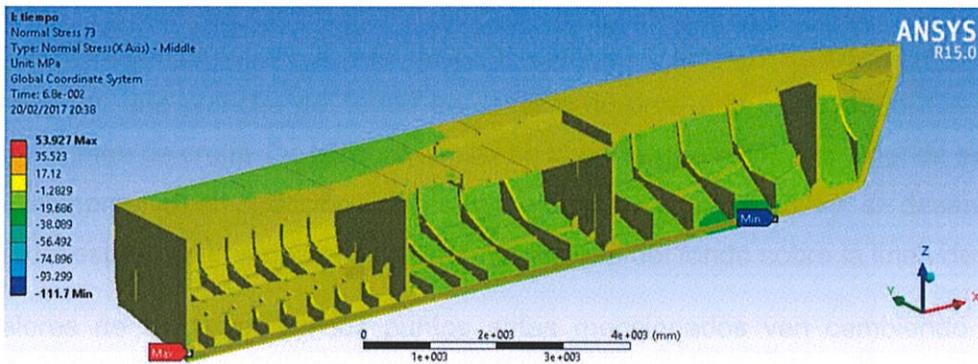
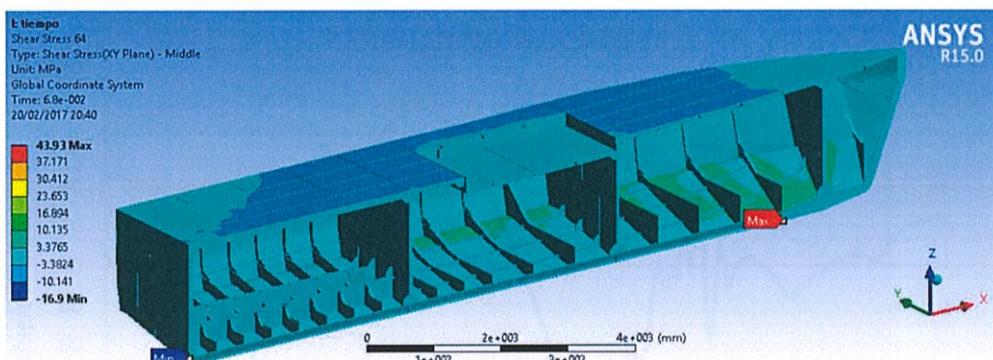


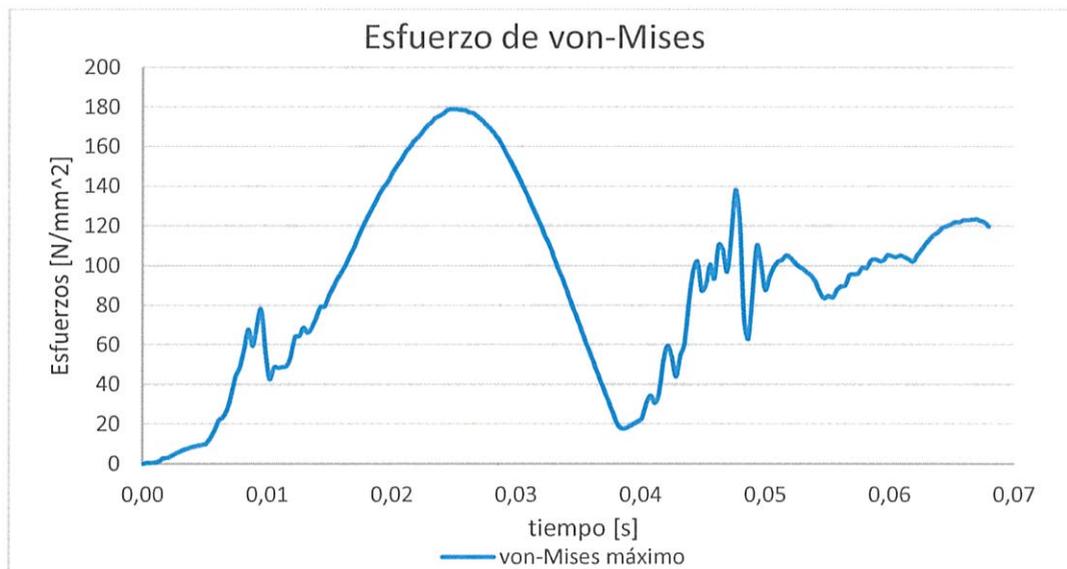
Figura 3.2. Distribución de Esfuerzo Normal en dirección "x" en la LP-AST 1304



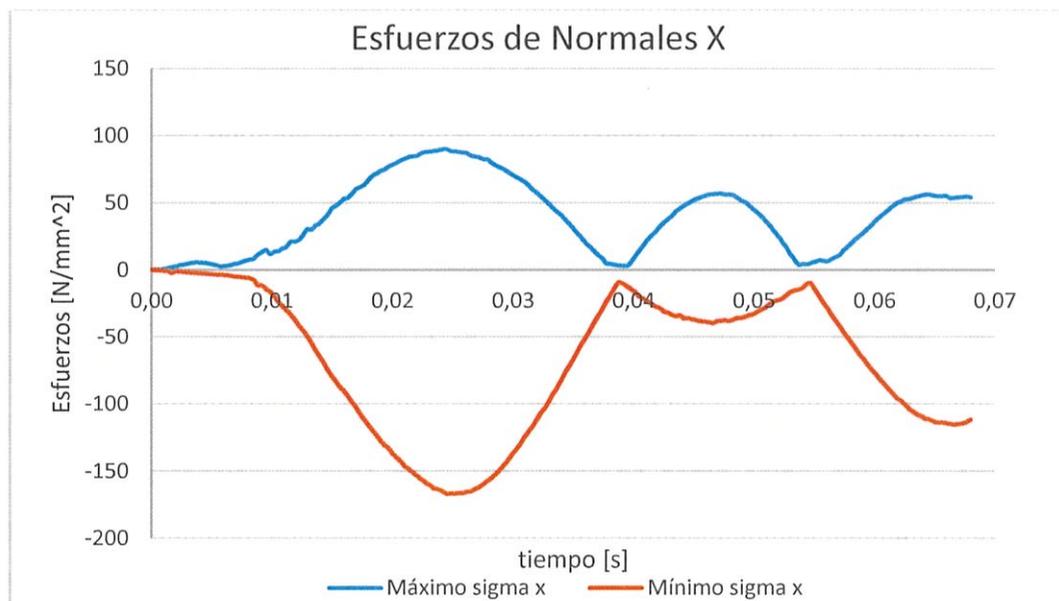
**Figura 3.3. Distribución de Esfuerzo de corte**

En las figuras 3.1, 3.2 y 3.3 se puede observar que el máximo esfuerzo de von-Mises, esfuerzo normal en dirección "x" y esfuerzo de corte en el plano "xy, respectivamente, se desarrollan en una plancha del fondo en sección de proa a la altura de la cuaderna 2 cerca de la línea de crujía. De manera similar se observa que el mínimo valor de esfuerzo normal (compresivo) en dirección "x" y esfuerzo de corte en el plano "xy" se desarrolla en la zona del espejo de la embarcación, en una plancha del fondo sobre la línea de crujía.

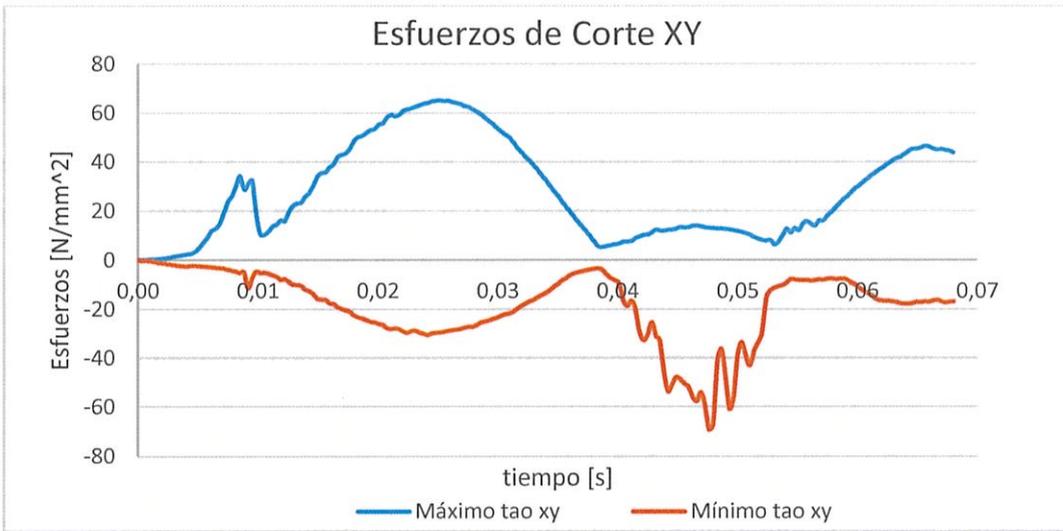
Los valores de esfuerzos en los puntos antes mencionados van cambiando con el transcurso del tiempo como se observa en las figuras 3.4, 3.5 y 3.6 que se muestran a continuación.



**Figura 3.4. Variación en tiempo del Esfuerzo de von-Mises de la lancha**



**Figura 3.5. Variación en tiempo del esfuerzo normal en dirección "x"**



**Figura 3.6. Variación en tiempo del esfuerzo de corte.**

Al analizar las figuras 3.2 y 3.5 la zona del fondo que se encuentra delante del mamparo número 3 está en compresión mientras que el resto del fondo se encuentra en tensión, es decir el casco adopta una deflexión tipo viga “triste”.

El esfuerzo de von-Mises máximo que se desarrolla en la estructura es de 179 [N/mm<sup>2</sup>], que es 1.3% mayor que el que ABS especifica como permitido. De este mismo modo se obtiene que el máximo valor de esfuerzo normal que experimenta la estructura se desarrolla en dirección “x” y es de 167 [N/mm<sup>2</sup>], en compresión, este esfuerzo es 27% mayor que el recomendado por ABS. Esto indica que la flexión de la viga buque es más importante que la flexión terciaria del elemento debido a la carga de impacto hidrodinámico. Estos valores de esfuerzos normales sugieren que la estructura es propensa a fallas en planchas que se encuentren ubicadas en el fondo de la sección de proa cerca de la línea de crujía.

### Análisis de Esfuerzos Normales en el Fondo Estructural

Las figuras 3.7 y 3.8 muestran las distribuciones de esfuerzos normales sobre la estructura del fondo en dirección "x" y "y", respectivamente.

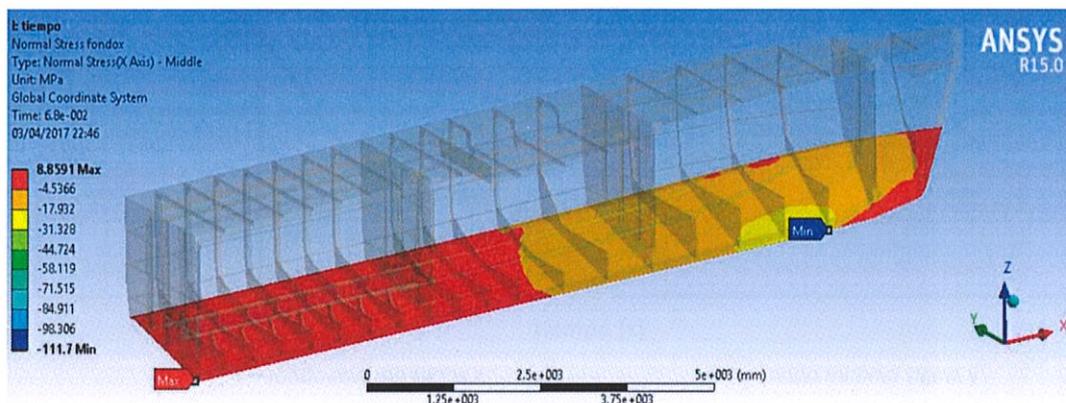


Figura 3.7. Distribución de Esfuerzo normal en dirección "x" en el fondo estructural

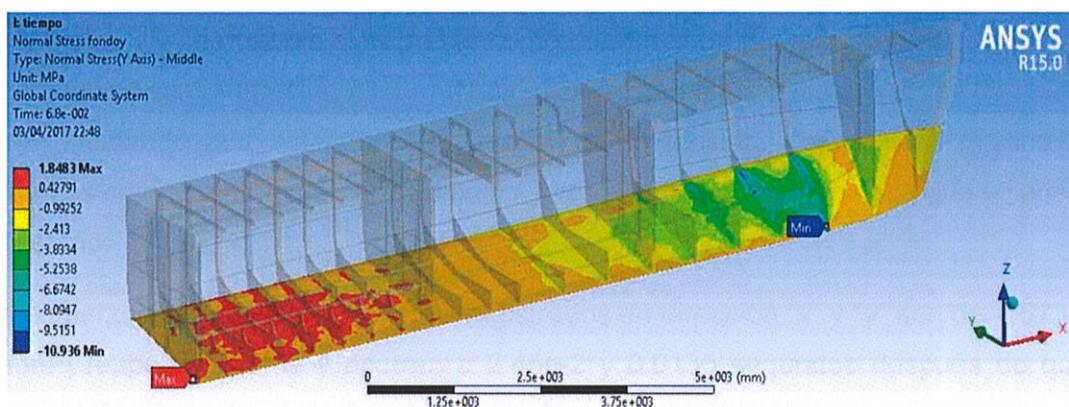
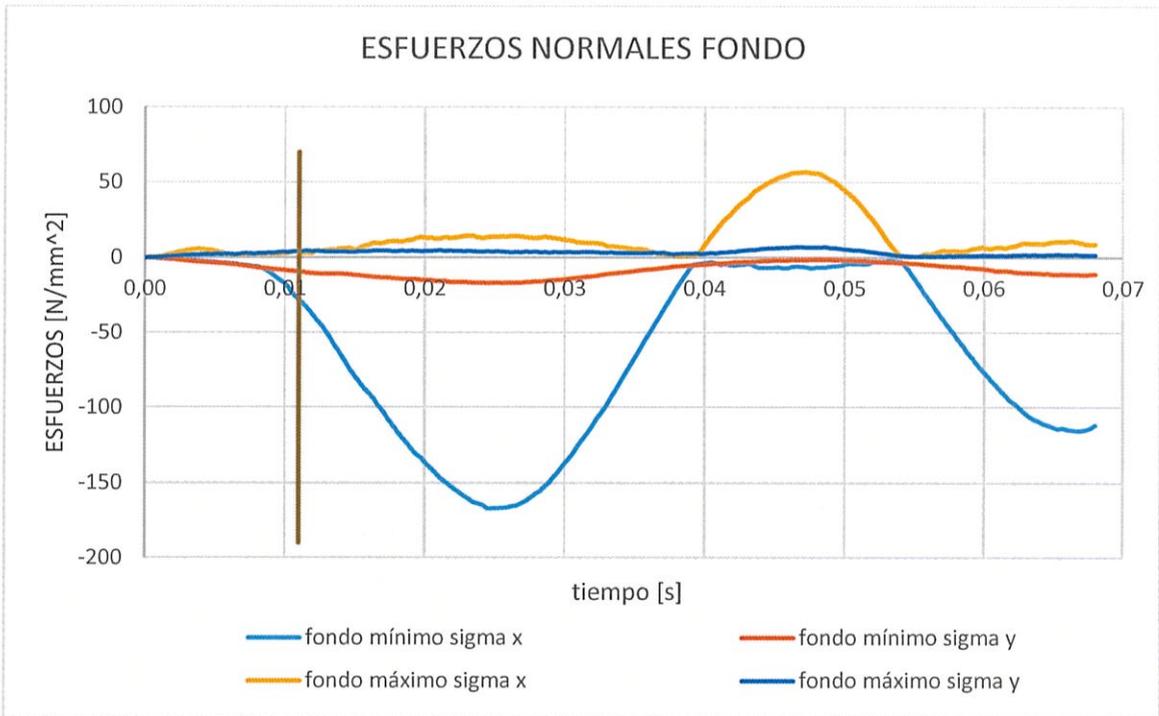


Figura 3.8. Distribución de Esfuerzo normal en dirección "y" en el fondo estructural



**Figura 3.9. Variación en tiempo de los Esfuerzos normales en dirección "x" y "y"**

En la figura 3.9 se observa claramente como la estructura del fondo en sección de proa se encuentra en compresión mientras que al acercarse a popa los esfuerzos cambian de signo, indicando que esta zona se encuentra en tensión. Los valores máximos de esfuerzos se encuentran cercanos a crujía y van disminuyendo a medida que se acercan al costado.

Los esfuerzos compresivos extremos registrados en dirección "x" y "y" son de -167 y -17 [N/mm<sup>2</sup>] respectivamente y ocurren a 2.45e-2 y 0.0135 segundos después de que la carga máxima ha actuado sobre el fondo de la estructura. El esfuerzo normal en dirección x supera en 27% al esfuerzo de fluencia del material cuando ha sido sometido a algún proceso de soldadura.

### Análisis de Esfuerzos Normales en el Costado Estructural

En las figuras 3.10 y 3.11 se muestran las distribuciones de esfuerzos normales en la estructura de costado de la embarcación. Los esfuerzos varían de compresión a tensión conforme se encuentran más cerca de la cubierta.

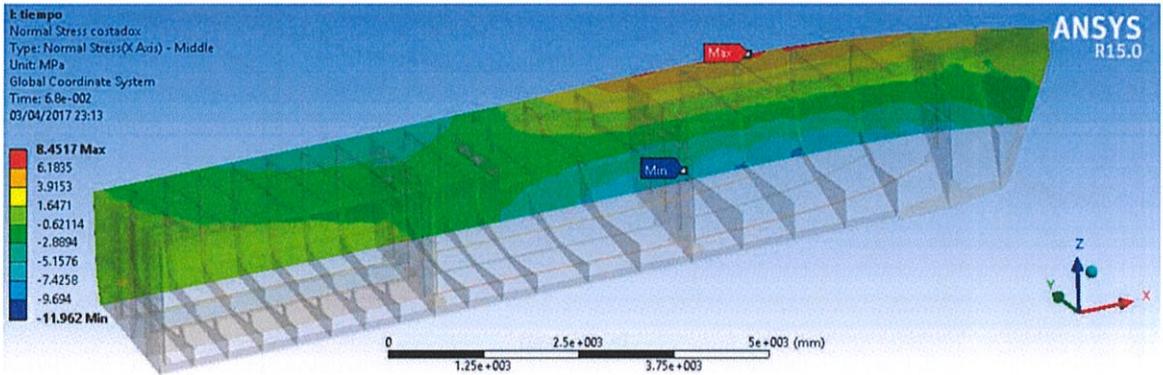


Figura 3.10. Esfuerzo normales en dirección "x" en el costado estructural

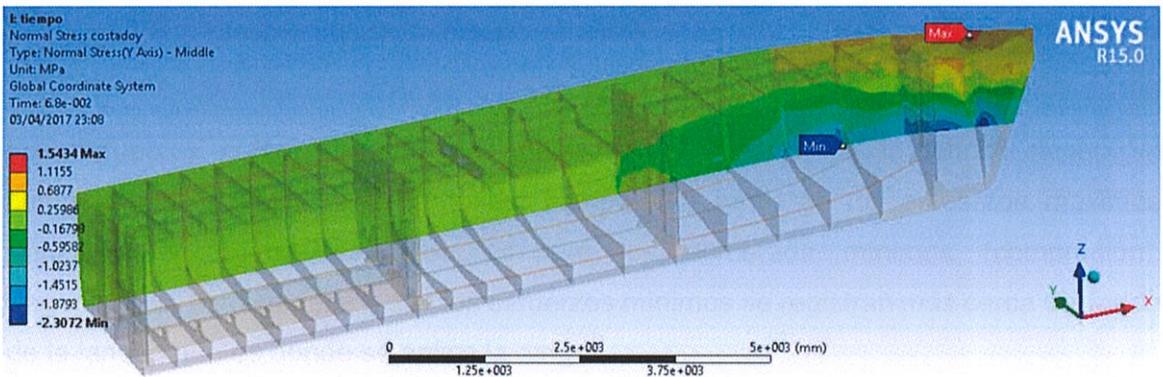
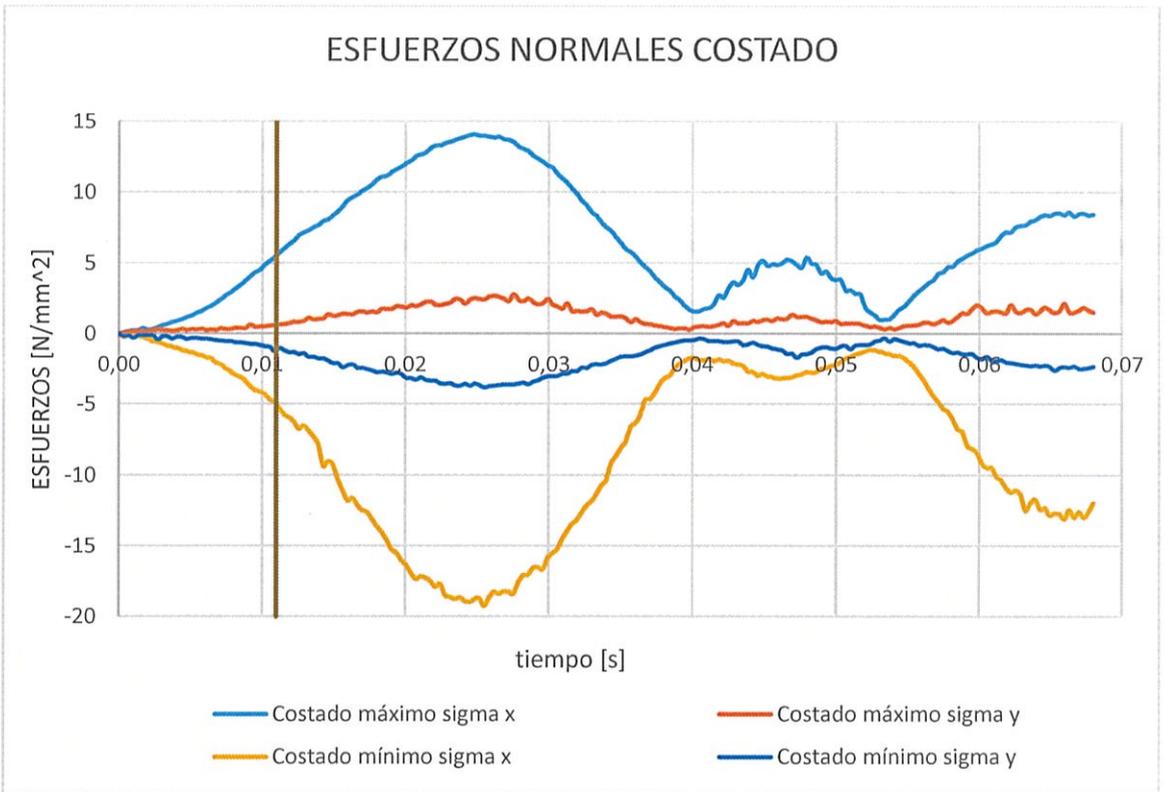


Figura 3.11. Esfuerzos normales en dirección "y" en el costado estructural



**Figura 3.12. Variación en tiempo de los Esfuerzos normales en dirección "x" y "y" en la estructura de costado**

Los esfuerzos compresivos y tensionales en el costado de la lancha tienen un comportamiento similar a lo largo del tiempo. Sin embargo los esfuerzos máximos (tensión) registrados son menores que los esfuerzos mínimos (compresión). Seguramente esto se debe a que los esfuerzos mínimos se registran más cerca del fondo de la lancha que es donde se aplica la carga.

### Análisis de Esfuerzos Normales en la Cubierta Estructural

Se espera que estos esfuerzos sean menores debido a que la estructura del fondo absorbe gran parte de la energía producida durante el impacto, y, de signo opuesto a los esfuerzos desarrollados en el fondo estructural. En las figuras 3.13 y 3.14 se muestra como los esfuerzos sobre cubierta pasan de estar en tensión en la sección de proa a compresión al acercarse a popa exactamente lo contrario al comportamiento observado en el fondo de la estructura manifestándose así la flexión de la viga-buque.

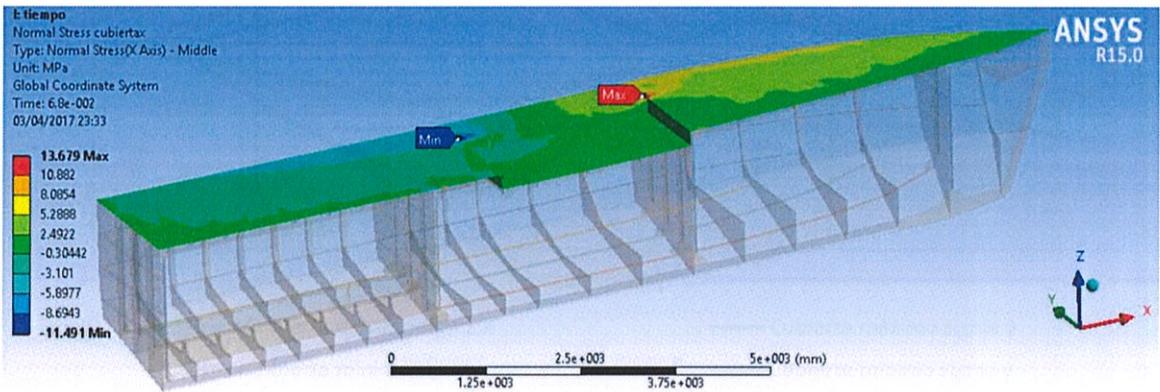


Figura 3.13. Distribución de Esfuerzos normales en "x" en la cubierta.

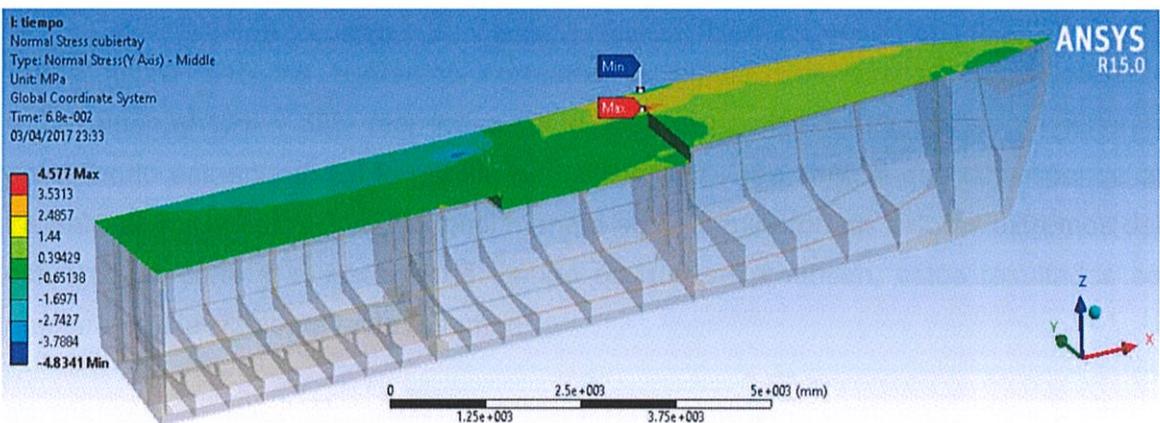
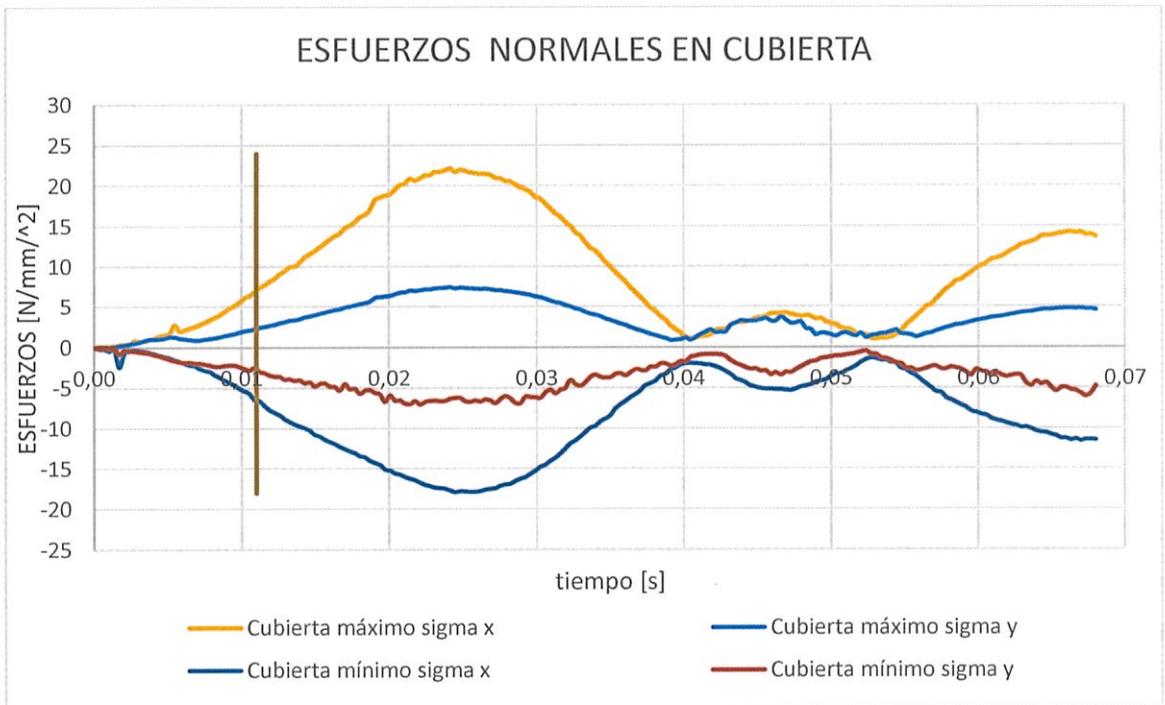


Figura 3.14. Distribución de Esfuerzos normales en "y" en la cubierta.



**Figura 3.15. Variación en tiempo de los Esfuerzos normales en direcciones "x" y "y" en la estructura de cubierta.**

En la figura 3.15 los esfuerzos normales extremos desarrollados en la cubierta representan el 13% y 32% respectivamente, respecto de los esfuerzos que se generan en el fondo estructural. En la gráfica se incluye una línea vertical que corresponde al instante de máxima presión. De igual manera se determinaron los valores extremos del esfuerzo de corte y el instante de tiempo en que se producen, estos resultados se muestran en la siguiente tabla resumen.

		Fondo		Costado		Cubierta	
		tiempo [s]	Esfuerzo	tiempo [s]2	Esfuerzo3	tiempo [s]4	Esfuerzo5
Esfuerzo Normal [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_x$ max	4.73E-02	56.737	2.48E-02	14.091	2.41E-02	22.127
	$\sigma_x$ min	2.45E-02	-166.87	2.55E-02	-19.253	2.45E-02	-17.896
	$\sigma_y$ max	4.66E-02	7.1195	2.75E-02	2.8049	2.41E-02	7.4285
	$\sigma_y$ min	2.45E-02	-17.087	2.55E-02	-3.8105	2.21E-02	-7.0382
Esfuerzo cortante [N/mm <sup>2</sup> ]	$\tau_{xy}$ max	2.52E-02	65.145	2.55E-02	6.7435	2.38E-02	3.819
	$\tau_{xy}$ min	4.69E-02	-22.128	2.72E-02	-3.9505	2.48E-02	-15.988

**Tabla 7. Esfuerzos normales y cortantes extremos sobre sobre fondo, costado y cubierta.**

Se espera que los esfuerzos en dirección “y” en la sección de proa sean mayores que los esfuerzos en dirección “x” debido que en esta sección el reforzamiento en longitudinal. Sin embargo en la tabla se observa que el máximo esfuerzo normal se desarrolla en dirección “x” lo que significa que la flexión de la viga buque es más importante que la flexión generada localmente. El valor máximo de esfuerzo que se genera es de tipo normal en dirección “x” y se presenta en el fondo de la lancha a 2.45 E-2 segundos.

### 3.2 Análisis Local de la Respuesta Estructural

Se analiza la respuesta en tiempo de 3 puntos sobre la quilla en la sección de aplicación de la carga. El estudio del desplazamiento de esos nodos provee una idea general del comportamiento de la lancha luego del impacto. Se hace uso de las ecuaciones dadas en el libro de Análisis Numérico de Curtis F. Gerald [11], para determinar la primera y segunda derivadas del desplazamiento de los nodos, que corresponden a la velocidad y aceleración respectivamente. A continuación se presenta la ecuación para determinar la primera derivada de un conjunto de datos obtenida de la referencia [11], en un instante  $X_0$ :

$$f'(x_0) = \frac{-f_2 + 8f_1 - 8f_{-1} + f_{-2}}{12h} + O(h^4) \quad (3.1)$$

donde:

$h$ , es el intervalo en tiempo,  $3.4E-4$  seg.

$f_2, f_1, f_{-2}, f_{-1}$ , son los valores instantes luego y antes de  $x_0$ , de la función  $f(x)$  que se está evaluando.

### Desplazamiento en dirección “z”

Los puntos en la estructura analizados se encuentran ubicados longitudinalmente entre el mamparo 1 y 2 de la lancha. El primer punto se encuentra sobre la quilla muy cerca al mamparo 1 (mamparo de colisión), el punto 2 está ubicado en el centro entre el mamparo 1 y 2, y, finalmente el punto 3 se encuentra muy cerca del mamparo 2. En la figura 3.16 se muestra la posición espacial de los nodos a analizar.

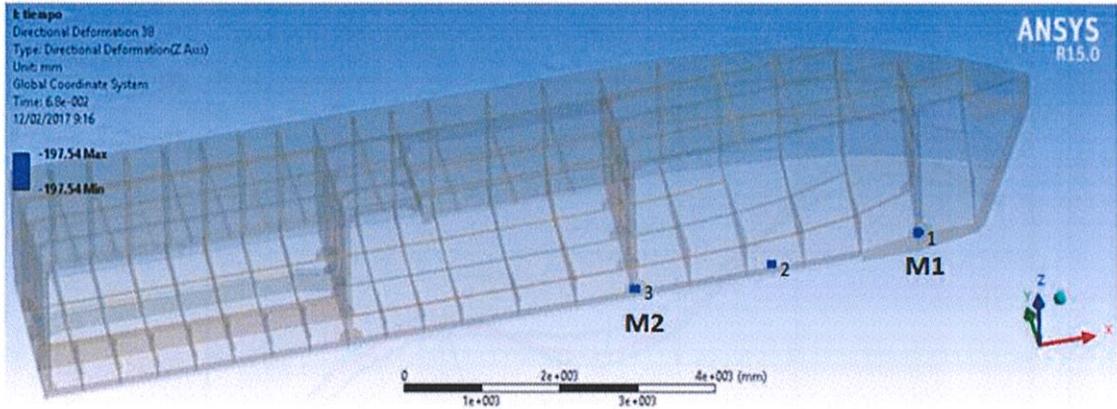
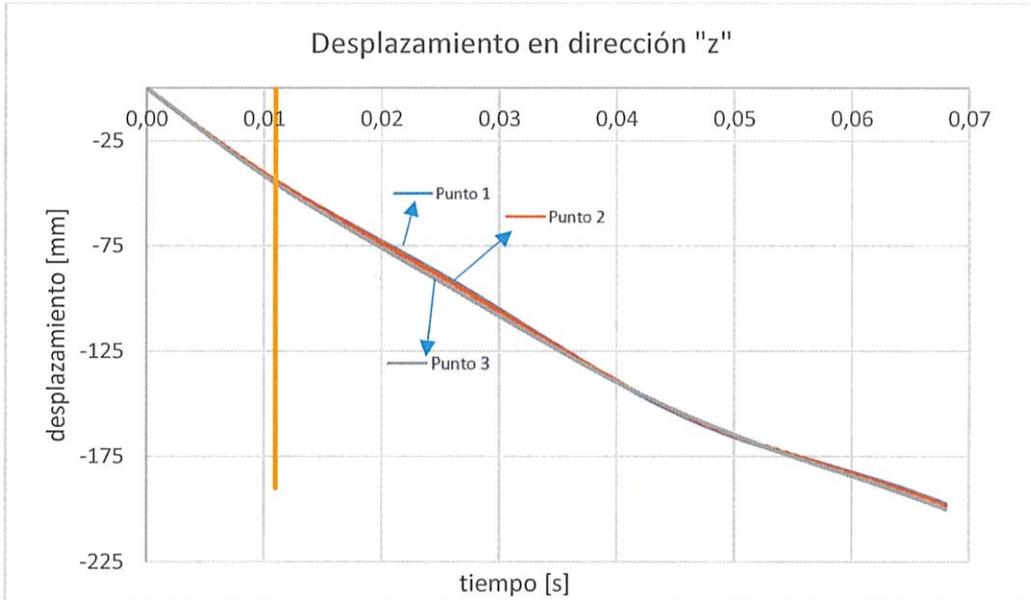
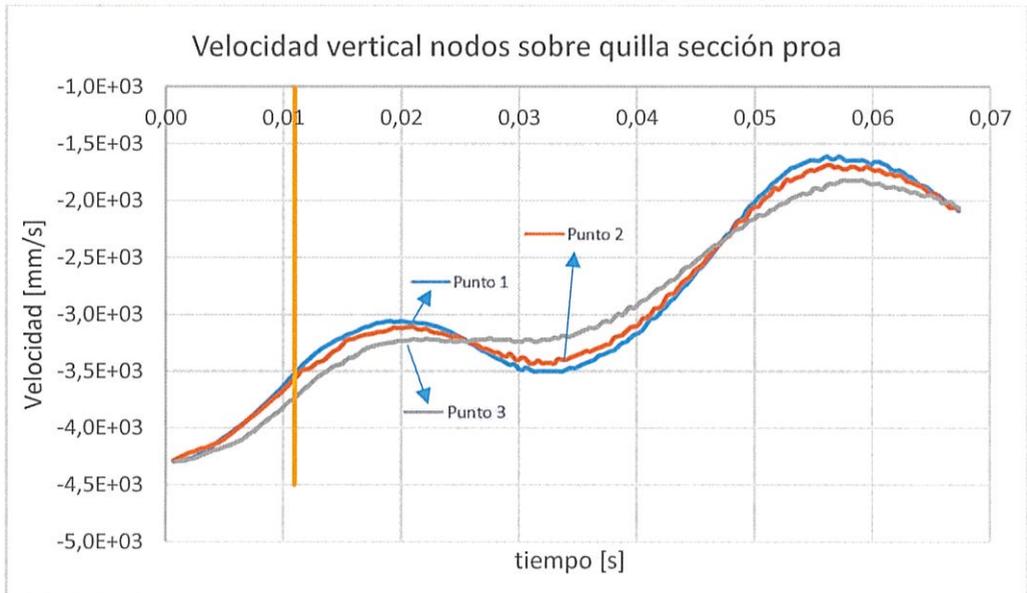


Figura 3.16. Posición longitudinal de los puntos 1, 2 y 3.

En la figura 3.17, 3.18 y 3.19 se presentan el desplazamiento, velocidad y aceleración de los nodos analizados.

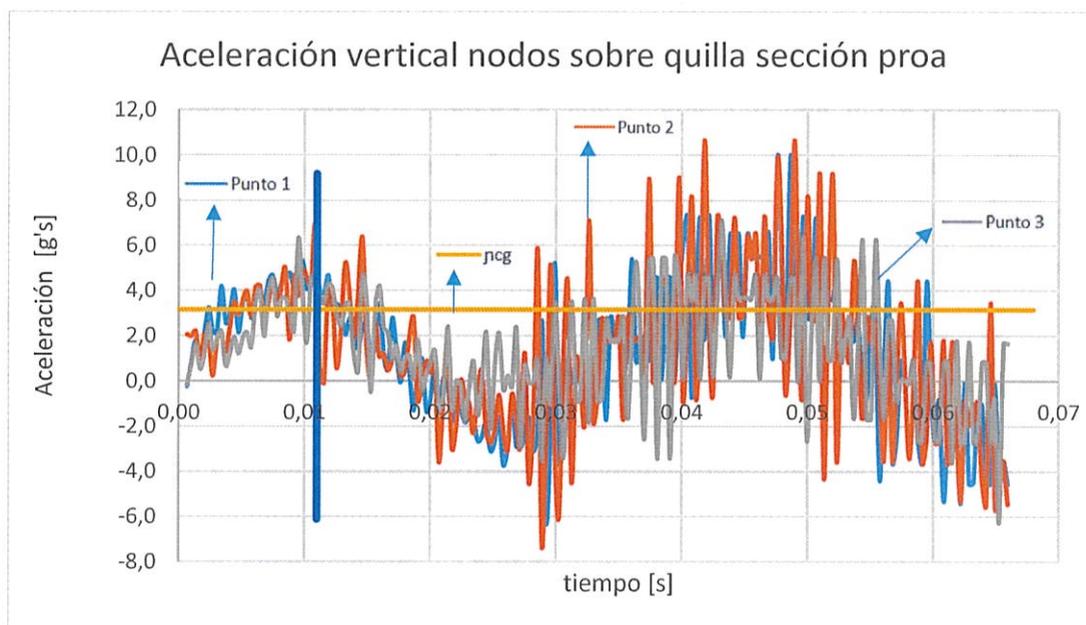


**Figura 3.17. Desplazamiento en dirección "z" de los nodos 1, 2 y 3.**



**Figura 3.18. Velocidad vertical de los nodos 1, 2 y 3.**

En la gráfica 3.18 se observa como el punto 1 tiene una velocidad vertical mayor en comparación al punto 2 y 3 que se encuentran más cerca de popa. Esto indica que la lancha tiene un pequeño movimiento de rotación.



**Figura 3.19. Aceleración vertical de los nodos 1, 2 y 3.**

En la figura 3.19 se incluye la aceleración vertical del centro de gravedad de la lancha de acuerdo a las ecuaciones dadas por ABS [9] que sirvió para estimar la presión por *slamming*, que es alrededor de 3.16 g's. En esta gráfica es complicado distinguir la diferencia entre la aceleración vertical de cada uno de los puntos de interés para este análisis. Sin embargo, si se puede apreciar que en los 3 puntos la aceleración tiene un comportamiento similar, además en el instante en que se genera la presión máxima producto del impacto la aceleración se mantiene cerca del valor calculado por las reglas.

### 3.3 Comparación entre Análisis Cuasiestático y Dinámico de la Respuesta Estructural de la Lancha

En forma simplificada se puede estudiar la respuesta al golpe hidrodinámico considerando la respuesta inercial como parte del equilibrio estático. Esto lo aplican Menéndez [1] y Terranova [8] en sus trabajos de graduación, aplicando una presión equivalente en toda la eslora de la embarcación. Terranova en su trabajo [8] realizó 3 cortes transversales en la estructura de la lancha para estudiar el comportamiento de los esfuerzos en el fondo, costado y cubierta a 21% L, 50% L y 74% L. En vista de que por cada punto que Terranova analiza de forma cuasiestática se obtiene una gráfica, en el presente estudio dinámico solo se compararán los resultados obtenidos en la zona donde se aplicó la carga, es decir alrededor de 74% L. Los puntos analizados en este corte se encuentran ubicados como se indica en la siguiente tabla:

	Punto	Posición
FONDO	Punto 1	0.05 de crujía
	Punto 2	0.5 entre Quilla y costado
	Punto 3	b/2
COSTADO	Punto 1	Cerca a la china
	Punto 2	0.5 D
	Punto 3	D
CUBIERTA	Punto 1	0.05 del costado
	Punto 2	0.5 entre crují y costado
	Punto 3	Crujía

**Tabla 8. Posición transversal de los puntos de análisis.**

### **Comparación de la respuesta de la Estructura del Fondo**

En las figuras 3.21, 3.22 y 3.23 se grafican los esfuerzos normales en dirección  $x$  obtenidos de los análisis cuasiestático y dinámico, se grafica también el esfuerzo de corte en el plano "xy" obtenido en el análisis dinámico. El valor obtenido en el análisis cuasiestático se grafica como una constante debido a que no tiene variación en el tiempo. Terranova reportó los valores absolutos máximos desarrollados de esfuerzos normales en la lancha, los cuales son 59.0, 27.8 y 30.6 [N/mm<sup>2</sup>] en dirección "x", "y", y "z" respectivamente, sin embargo no indica la sección donde se desarrollan estos esfuerzos. Por esto se realiza una comparación de los nodos que presentan los valores de esfuerzos máximos en el corte realizado a  $0.7L$  medido desde el espejo hacia proa. En la figura 3.20 se presenta la cuaderna 8 con la posición en la cual se encuentra cada uno de los puntos analizados.

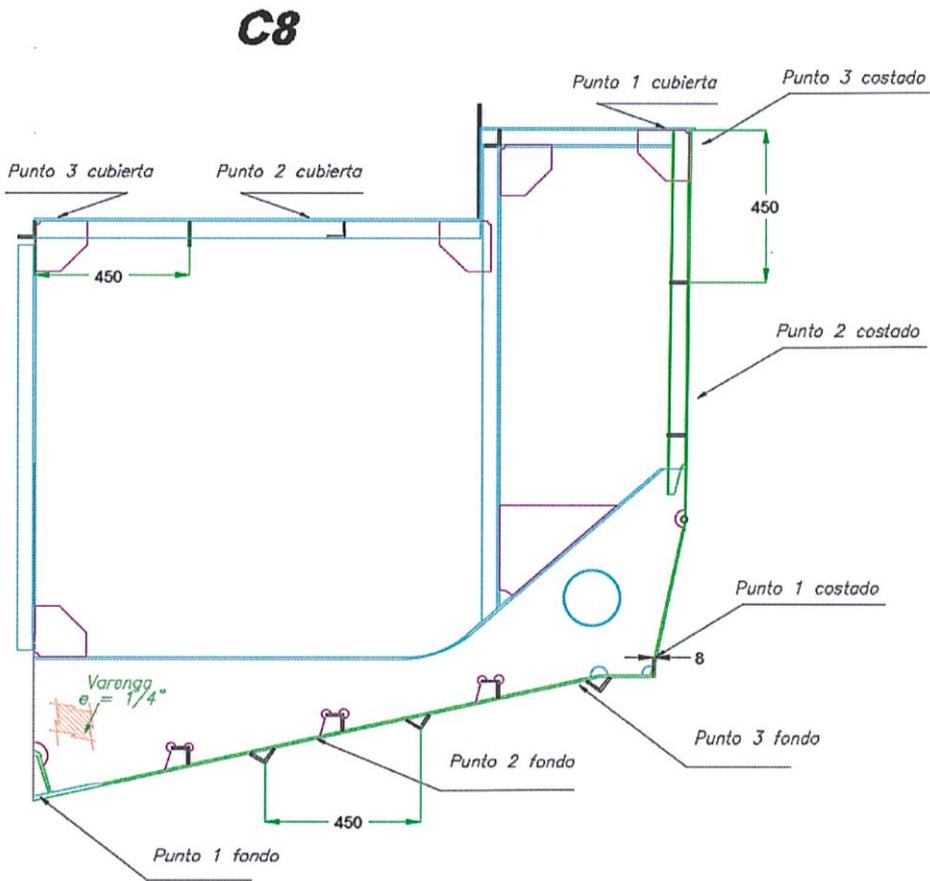
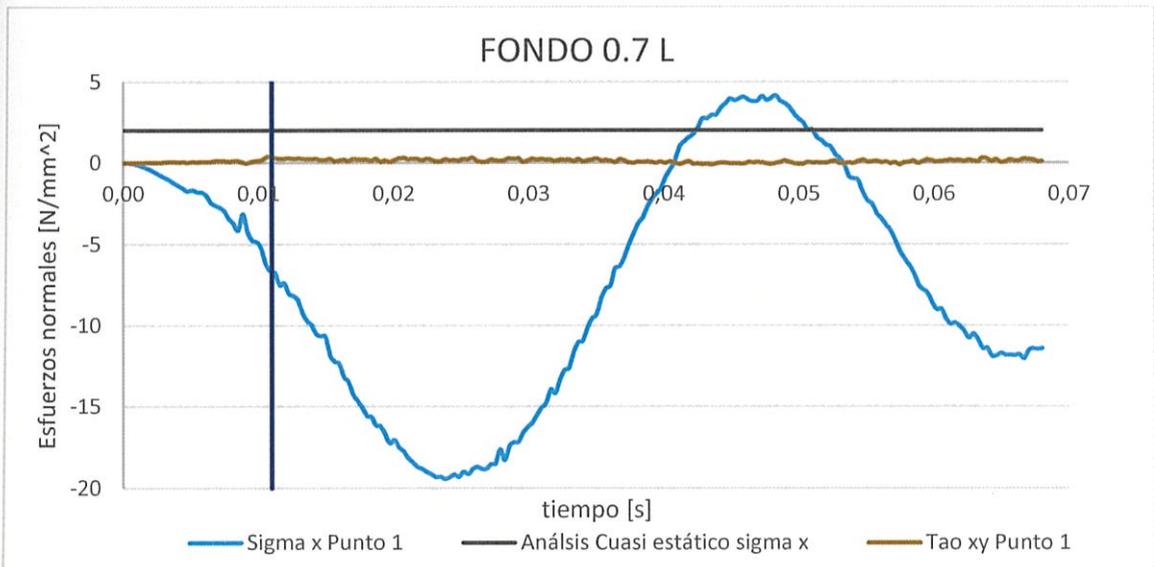
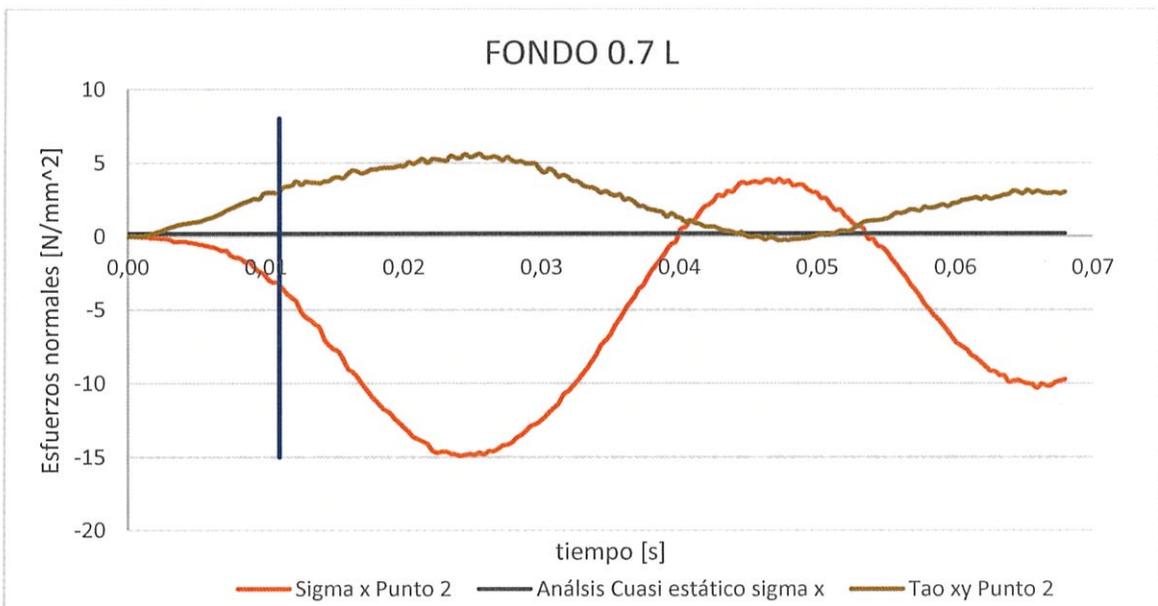


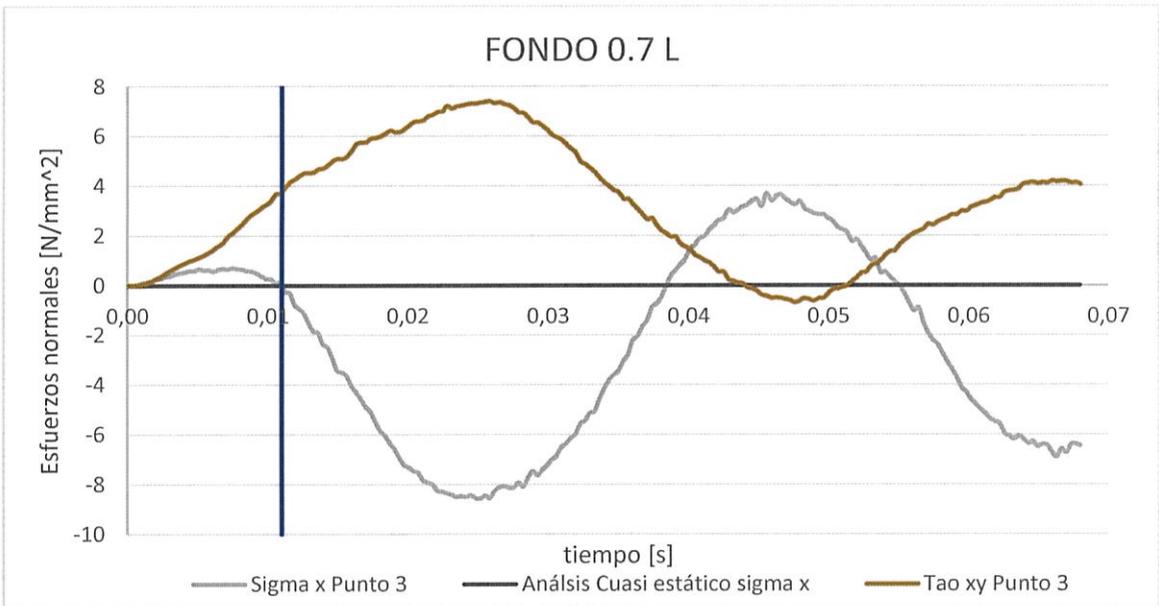
Figura 3.200. Posición transversal de los puntos 1, 2 y 3 sobre fondo, costado y cubierta.



**Figura 3.211. Comparación del esfuerzo normal "x" del 1er punto en el fondo.**



**Figura 3.222. Comparación del esfuerzo normal "x" del 2do punto en el fondo.**



**Figura 3.233. Comparación del esfuerzo normal "x" del 3er punto en el fondo.**

El valor de esfuerzo normal en dirección  $x$  que se obtuvo del análisis cuasiestático graficado en las figuras 3.21, 3.22 y 3.23 es pequeño comparado con los presentes resultados. En el presente análisis dinámico se observan esfuerzos máximos de hasta  $-19 \text{ N/mm}^2$ , milésimas de segundo después de que la carga máxima ha actuado en el fondo. En casi todo el instante de tiempo estudiado los esfuerzos normales en estos 3 puntos son negativos excepto en el rango de tiempo entre  $[0.04 \text{ s} - 0.055 \text{ s}]$ , mientras que en el análisis cuasiestático los nodos en esta zona se encuentran en tensión. El comportamiento de los esfuerzos, descrito anteriormente, está directamente relacionado con el periodo de vibración de la lancha el cual es  $0.046 \text{ s/ciclo}$ . Es por esto que después de este tiempo se observa un comportamiento de los esfuerzos similar al que se da entre  $[0 \text{ s} - 0.046 \text{ s}]$ , esta misma tendencia se reflejará en los esfuerzos sobre el costado y cubierta de la lancha.

### Comparación de la respuesta de la Estructura del Costado

De manera similar a la comparación realizada para el fondo de la estructura, se compara el comportamiento de los esfuerzos normales resultantes en el costado de la lancha con análisis cuasiestático y dinámico. En las figuras 3.24, 3.25 y 3.26 se muestra el comportamiento de los esfuerzos normales en dirección "x" sobre el costado de la lancha en los 3 puntos de análisis:

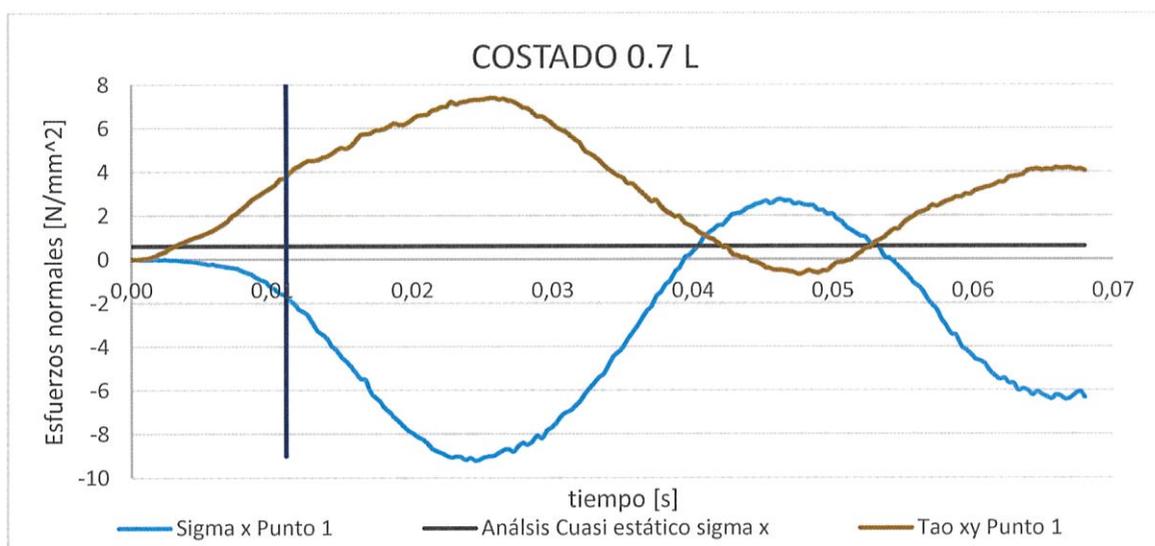
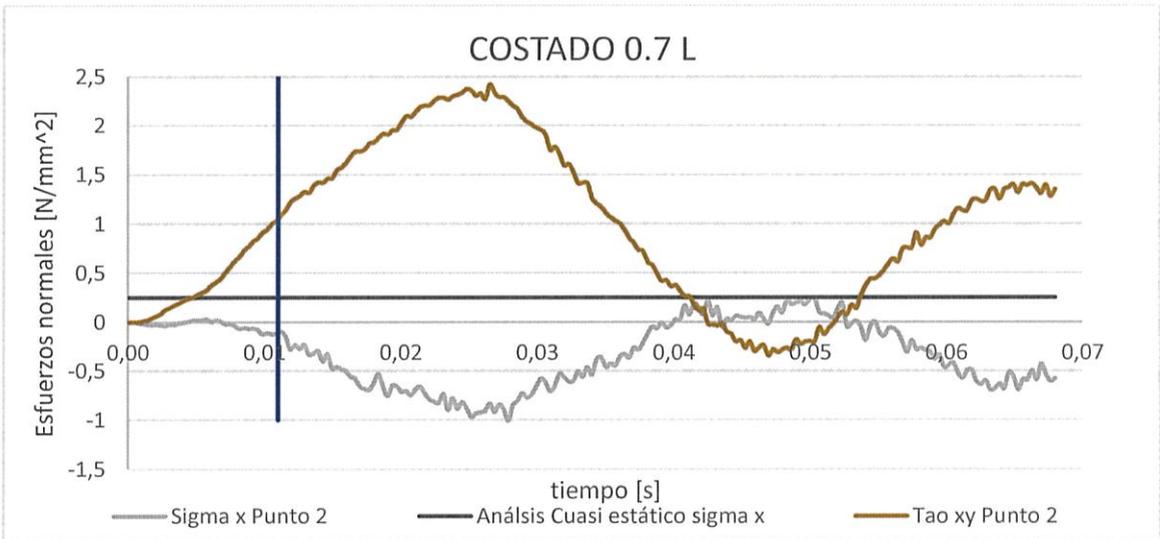
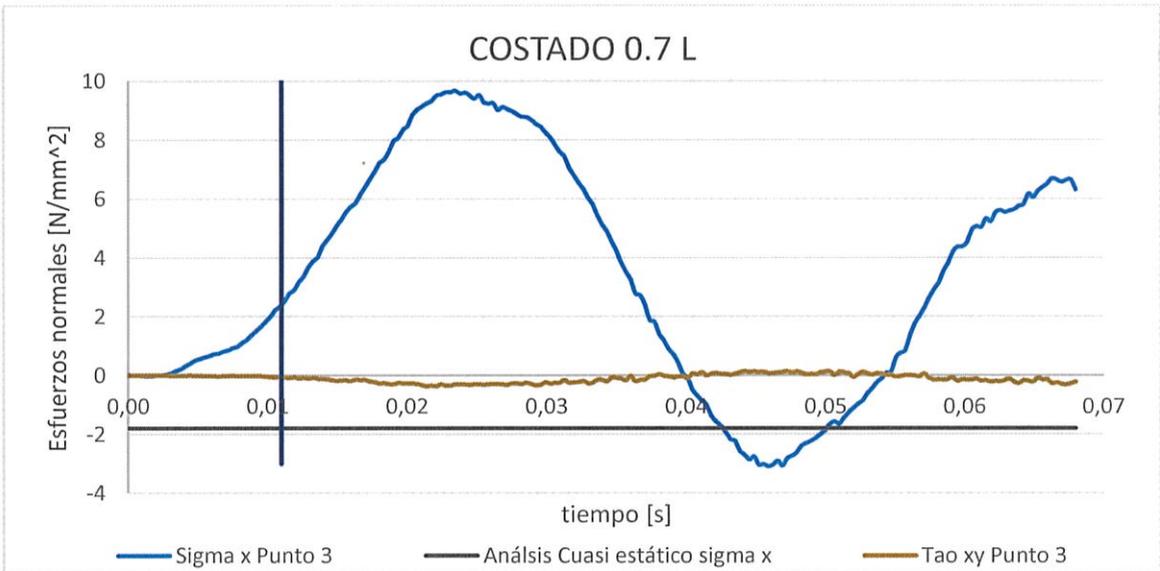


Figura 3.244. Comparación del esfuerzo normal "x" del 1er punto, en el costado.



**Figura 3.255. Comparación del esfuerzo normal "x" del 2do punto en costado.**

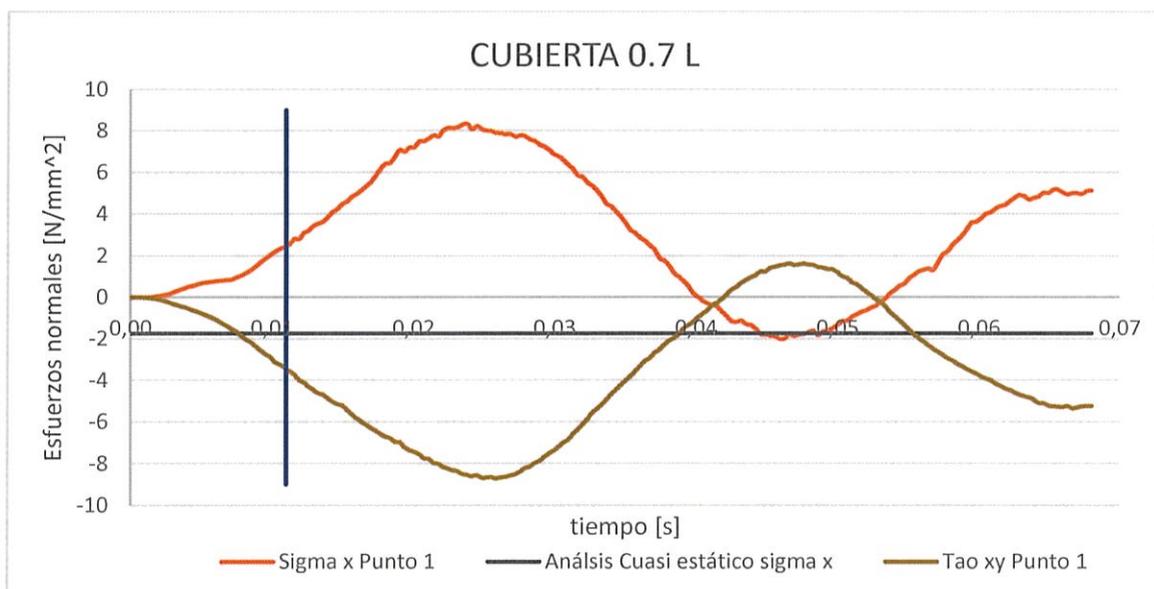


**Figura 3.266. Comparación del esfuerzo normal "x" del 3er punto en el costado.**

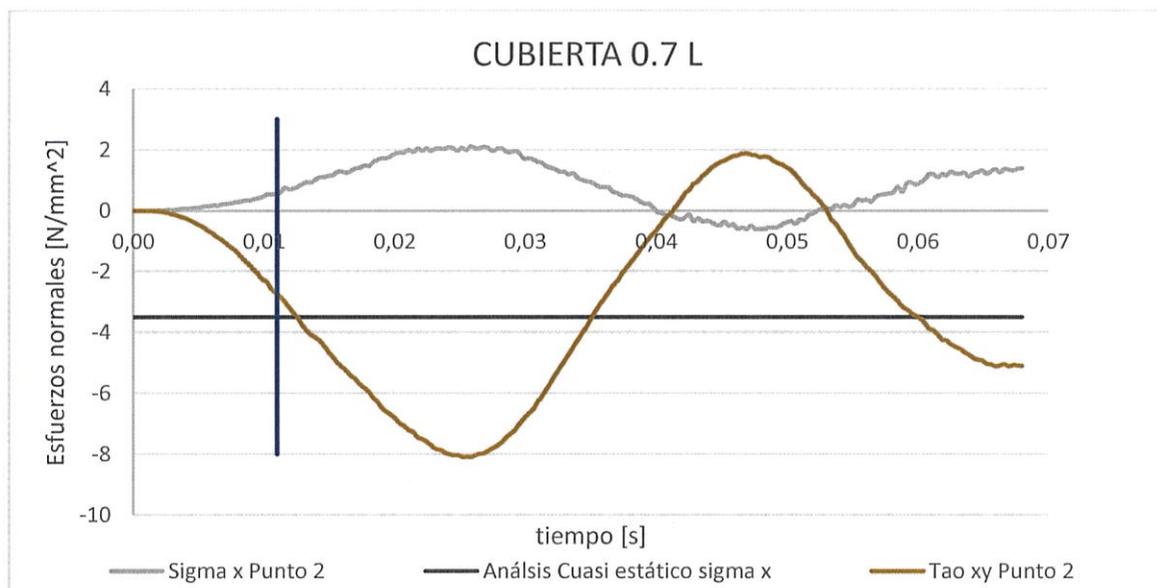
En las gráficas 3.24 y 3.25 correspondientes al comportamiento de los esfuerzos normales en los puntos 1 y 2 se observa que en el análisis dinámico esos nodos se encuentran en compresión, con valores de esfuerzos mínimos de  $-9 \text{ N/mm}^2$  y  $-1 \text{ N/mm}^2$  respectivamente. A diferencia, los resultados del análisis cuasiestático indican que esos nodos se encuentran en tensión con valores de  $0.5 \text{ N/mm}^2$  y  $0.25 \text{ N/mm}^2$  en el nodo 1 y 2 respectivamente. Al analizar dinámicamente el nodo que se encuentra cerca de proa, como es el caso del punto 3, los esfuerzos son tensionales con un valor máximo de esfuerzo normal de  $9.5 \text{ N/mm}^2$ ; mientras que en el análisis cuasiestático se presenta un valor de esfuerzo normal igual a  $-1.8 \text{ N/mm}^2$ .

### **Comparación de la respuesta de la Estructura de Cubierta**

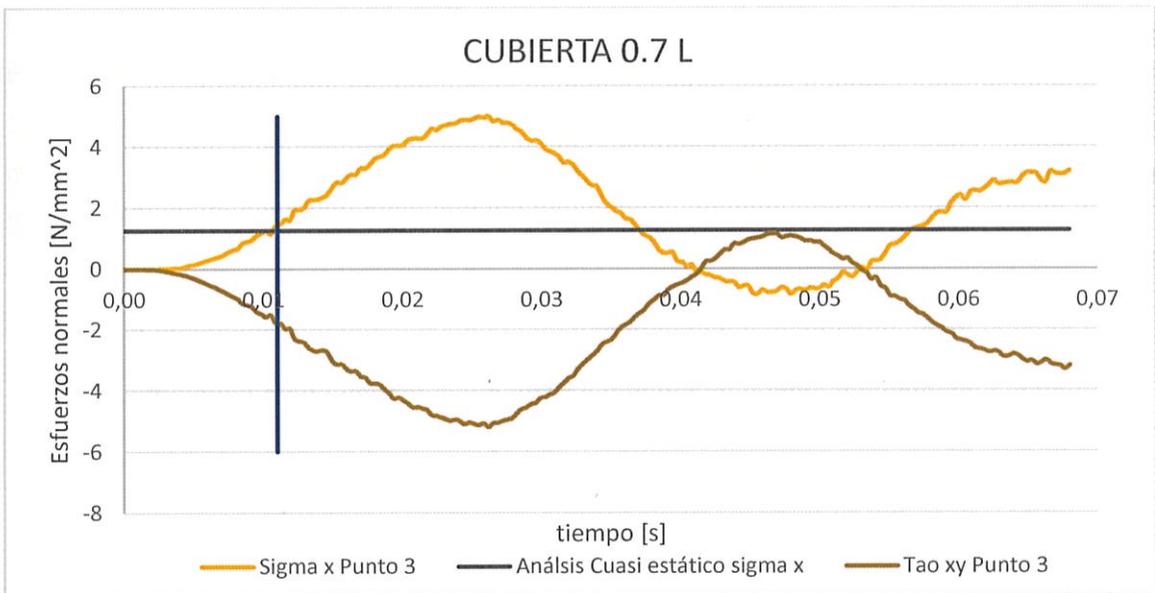
Las figuras 3.27, 3.28 y 3.29 muestran el valor de esfuerzos normales en dirección "x" en los nodos 1, 2 y 3 obtenidos del análisis cuasiestático tomados del trabajo [8] y dinámico obtenido en este documento.



**Figura 3.277. Comparación del esfuerzo normal "x" del 1er punto en cubierta.**



**Figura 3.288. Comparación del esfuerzo normal "x" del 2do punto en cubierta.**



**Figura 3.299. Comparación del esfuerzo normal "x" del 3er punto en cubierta.**

Debido a la diferente partición del dominio no se tiene la certeza de que los elementos seleccionados en el análisis dinámico correspondan exactamente a los que se seleccionaron en el análisis cuasiestático; sin embargo se espera que las diferencias sean pequeñas y no eviten hacer una comparación entre los dos análisis. Al observar el comportamiento dinámico de los nodos 1, 2 y 3 en las figuras 3.27, 3.28 y 3.29 se observa que estos nodos se encuentran en tensión de acuerdo al signo de los esfuerzos normales generados, excepto en el intervalo de tiempo de [0.04 s a 0.055 s] donde el signo de los esfuerzos normales es negativo, indicando que en este instante de tiempo los nodos se encuentran en compresión. Los valores extremos de esfuerzos normales son  $8.1 \text{ N/mm}^2$ ,  $2.1 \text{ N/mm}^2$  y  $5 \text{ N/mm}^2$  para los nodos 1, 2 y 3 respectivamente, que en los tres casos se dan alrededor de los 0.025 s. Para los nodos 1 y 2 correspondientes a las figuras 3.26 y 3.27 los resultados obtenidos del análisis cuasiestático indican que se encuentran en compresión al contrario de lo reportado para el nodo 3 el cual indica que se encuentra en tensión. La figura 3.30 es una ilustración que representa el comportamiento en tiempo de

la viga buque de acuerdo a los datos obtenidos durante el desarrollo de este proyecto. Esto significa que existen una flexión en toda la embarcación, al observar los tiempos que se muestran en la figura, se puede deducir que el comportamiento de los esfuerzos normales está directamente relacionada con el periodo fundamental de la lancha (0.046seg).

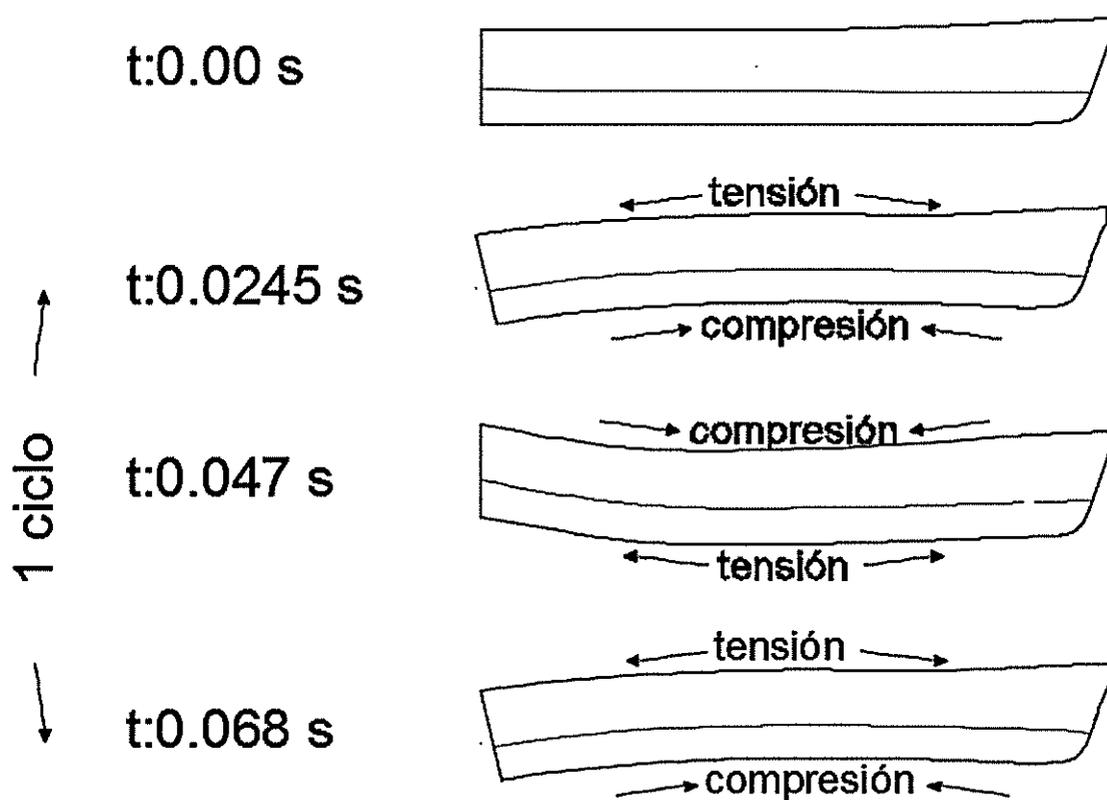


Figura 3.3030. Comportamiento de la viga buque en el tiempo.

## CONCLUSIONES

En este trabajo se determina la respuesta de la estructura de una lancha planeadora debido a cargas de impacto hidrodinámico aplicadas en una sección de proa. Los elementos finitos usados en la discretización estructural del modelo corresponden a elementos planos de 4 nodos. La presión hidrodinámica por impacto se estima aplicando las formulaciones de una sociedad clasificadora de buques, y su variación en tiempo se ingresa con valores discretos. Una vez analizado el comportamiento de la estructura se puede llegar a las siguientes conclusiones:

1. Para valorar la calidad de un modelo estructural discretizado se debe desarrollar un análisis de convergencia de los resultados. Debido al gran esfuerzo computacional que se necesita para el desarrollo de un análisis dinámico y el tiempo que representaría desarrollar la simulación, no fue viable desarrollar dicho análisis de convergencia. De manera que se siguieron las recomendaciones dadas por la sociedad clasificadora de buques ABS para el buen desarrollo de una malla. La discretización del modelo se realizó con elementos planos de cuatro nodos, que tienen resistencia a cargas en el plano y flexurales; de ellos, el 85% tienen una relación de aspecto entre 1.0 y 2.0, y el 8% de los elementos tienen una relación de aspecto de 3.7. Además el tamaño de los elementos es menor

que el máximo permitido por las reglas. Por lo tanto se concluye que el modelo discretizado es adecuado para el desarrollo de la simulación dinámica propuesta.

2. En general, los esfuerzos en dirección "x", es decir, longitudinales (Proa-popa), son mayores que los esfuerzos en dirección "y", es decir transversales. Ahora bien en el presente caso, con un cuadernaje longitudinal, la menor dimensión de los paneles de plancha se presenta en dirección transversal, y en esa dirección se esperan los mayores esfuerzos normales. Esto permite concluir que la deformación primaria de la viga buque, producto del golpe hidrodinámico en sección de proa es más importante que la deformación local en la zona de análisis.
3. Los esfuerzos máximos desarrollados después de que la estructura de la embarcación ha sido sometida a la carga debido a *slamming* se presentan en el fondo de la lancha. Los esfuerzos máximos de von Mises superan en 1.3% los valores recomendados por ABS; además los esfuerzos normales en dirección "x" superan en 27% los valores recomendados por dichas reglas. De manera que, esto indica que es probable encontrar fallas en las secciones donde se estén desarrollando estos niveles de esfuerzos, y además las rajaduras resultantes se producirían en dirección transversal.
4. A partir de la variación en tiempo del desplazamiento de tres puntos de la estructura, se puede determinar numéricamente la variación de la velocidad y aceleración. La aceleración muestra un comportamiento muy variable en el tiempo, posiblemente resultado de la vibración local. Sin embargo es posible reconocer, luego de que se ha producido la máxima presión sobre el casco, un valor de aceleración muy cercana al obtenido al inicio de esta investigación al aplicar las reglas de ABS para estimar la presión hidrodinámica equivalente. De manera que esto comprueba la adecuada representación dinámica de la acción equivalente resumida en las reglas de la sociedad de clasificación mencionada.

5. La comparación de los resultados obtenidos en el presente proyecto empleando una simulación dinámica de la estructura luego del impacto hidrodinámico, con los resultados obtenidos aplicando un esquema cuasiestático muestran resultados muy diferentes. Posiblemente esto se deba a diferencias en la forma de aplicar la carga dinámica, que en el presente caso ocurrió únicamente en una zona de Proa, mientras que en el caso Cuasiestático fue en todo el fondo de la embarcación. Estas diferencias necesitan ser investigadas.

## RECOMENDACIONES

No hay duda que el análisis desarrollado en este trabajo es mucho más rico que uno de tipo Cuaestático, pero ello exige mayores recursos computacionales. Una forma de reducir este requerimiento es el desarrollar modelos estructurales con elementos finitos de tamaño óptimo, es decir elementos lo más grande posible dentro de las recomendaciones dadas; esto reduciría el número de nodos del modelo y el tamaño de las matrices del sistema discreto. De esta forma se podrían desarrollar simulaciones más largas en tiempos razonables. Además, definitivamente que la correlación entre resultados de los dos tipos de análisis mencionados es una incógnita que debe investigarse en el futuro.

**BIBLIOGRAFÍA:**

- [1] Menéndez, C., Respuesta del Fondo Estructural de una Embarcación Planeadora de 11m debida a la presión de impacto. Tesis de Grado de Ingeniería Naval, FIMCBOR-ESPOL, 2014.
- [2] Henry J.R. y Bailey F.C., Slamming of Ships: A Critical Review of the Current State of Knowledge, Ship Structure Committee, 1970.
- [3] Ojeda, R., Gangadhara Prusty, B. y Salas M., Finite Element Investigation on the Static Response of a Composite Catamaran under Slamming Loads. Ocean Engineering, 2004
- [4] Jiang Lei, Shengming Zhang y White Nigel, Nonlinear Finite Element Dynamic Collapse Analyses of Stiffened Panels, Lloyds's Register, 2012
- [5] ©SAS IP, Inc. ANSYS help viewer, version 15.0.0, 2013.
- [6] Heller S.R y Jasper N.H., On the Structural Design of Planing Craft, Transactions of the Royal Institution of Naval Architects, 1960
- [7] ASTINAVE EP, Memoria Técnica de la Lancha de Patrullaje LP AST1304. ASTINAVE EP, 2011.
- [8] Terranova, C., Análisis de la Estructura Primaria de una Lancha Planeadora de 13m sometida a golpe Hidrodinámico. Tesis de Grado de Ingeniería Naval FIMCBOR-ESPOL, 2016
- [9] American Bureau of Shipping, High Speed Craft, Part 3, Chapters 1 and 2, ABS, 2014.
- [10] Thomson, W., Theory of Vibration with Applications, Prentice Hall, 5ta edic.
- [11] Curtis F. Gerald, Análisis Numérico, Alfa-omega, 2da edición

## **ANEXOS**

## ANEXO 1

### VALORES DE ESFUERZOS NORMALES Y CORTANTES EN SECCIÓN MEDIA DEBIDO A LA APLICACIÓN DE UNA CARGA POR SLAMMING EN SECCIÓN DE PROA

Es de interés para este proyecto analizar la respuesta de la estructura de la lancha en sección media y de popa después de que se ha aplicado una carga de naturaleza hidrodinámica en sección de proa. Las figuras A1.2, A1.3, A1.4 muestran los esfuerzos normales de 3 elementos ubicados a  $0.5 L$ , cerca de la cuaderna número 10 en las posiciones que se muestran en la figura A1.1.

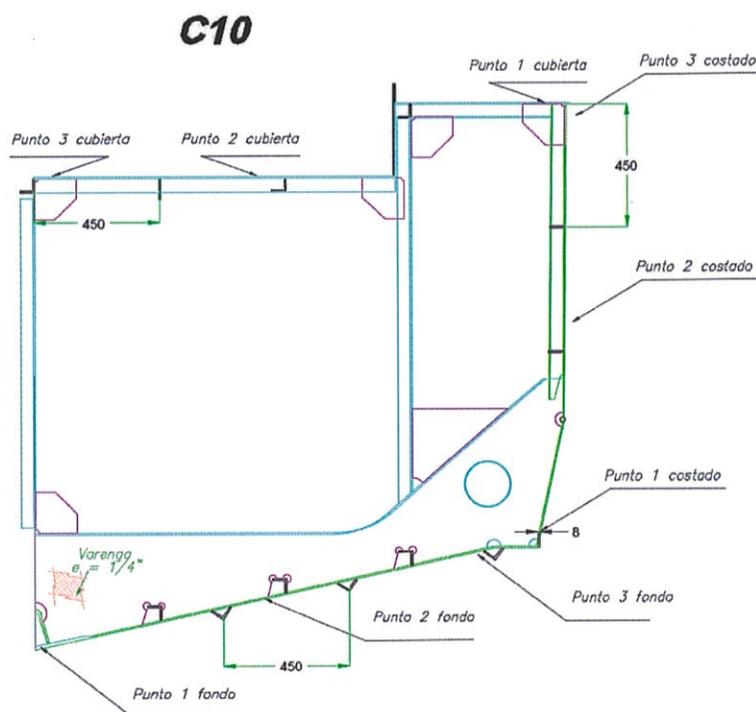
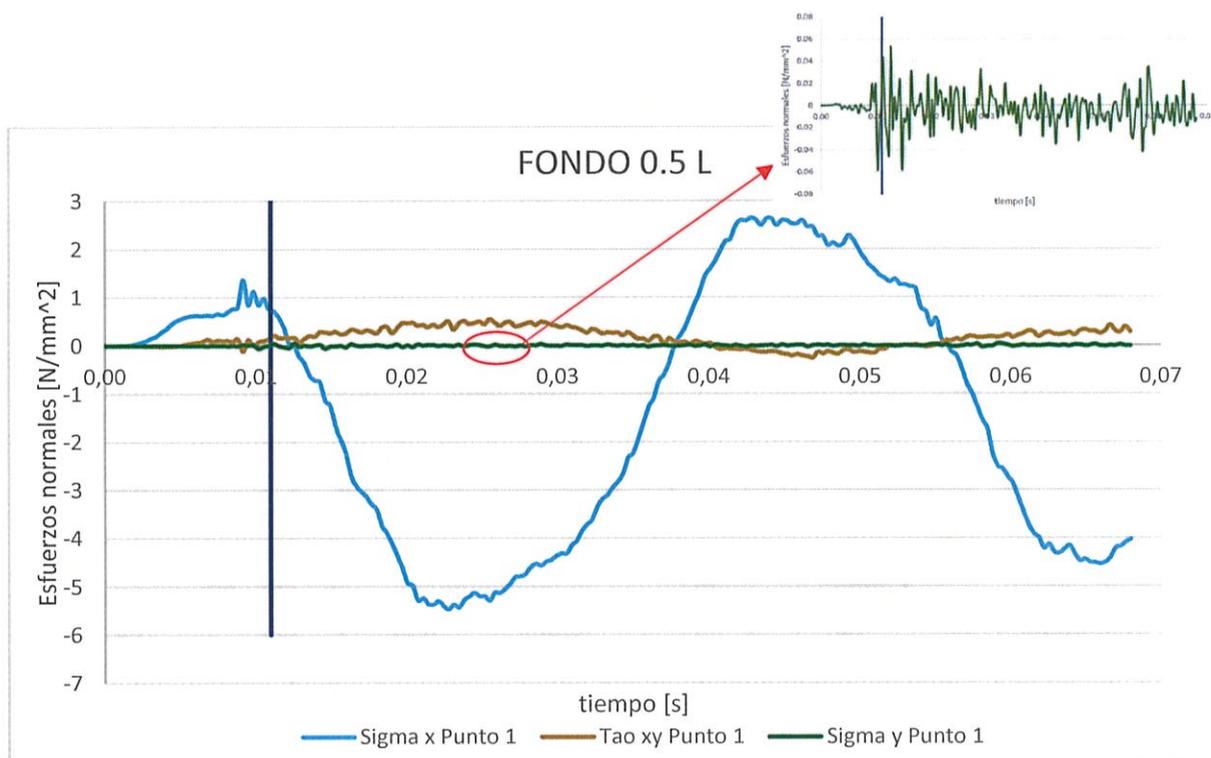


Figura A1.1. Posición transversal de los puntos 1, 2 y 3 sobre fondo, costado y cubierta en sección media.

### ***Esfuerzos Normales y de Corte sobre el fondo en sección media.***

Las figuras A1.2, A1.3 y A1.4 que corresponden al comportamiento de los esfuerzos normales y de corte en los puntos 1, 2 y 3 muestran que en el análisis dinámico esos nodos se encuentran en compresión. Considerando que en esta sección el reforzamiento de la lancha es transversal se espera que los esfuerzos normales en dirección “x” sean mayores en comparación con los esfuerzos normales en dirección “y” tal como se aprecia en las figuras. Los esfuerzos máximos normales en los puntos 1, 2 y 3 se dan instantes después de que la carga máxima ha actuado con valores de 5.4, 5.3 y 4.8 [N/mm<sup>2</sup>] respectivamente, en compresión.



**Figura A1.2. Esfuerzo Normal y de Corte del punto 1, sobre el fondo.**

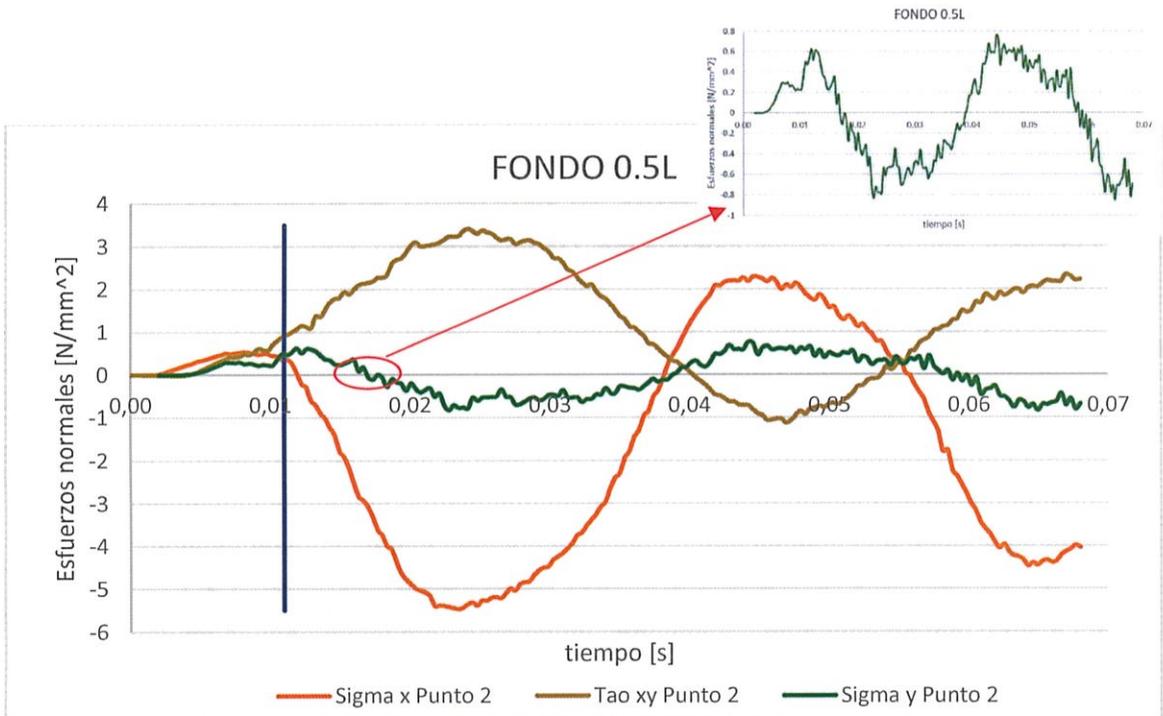


Figura A1.3. Esfuerzo Normal y de Corte del punto 2, sobre el fondo.

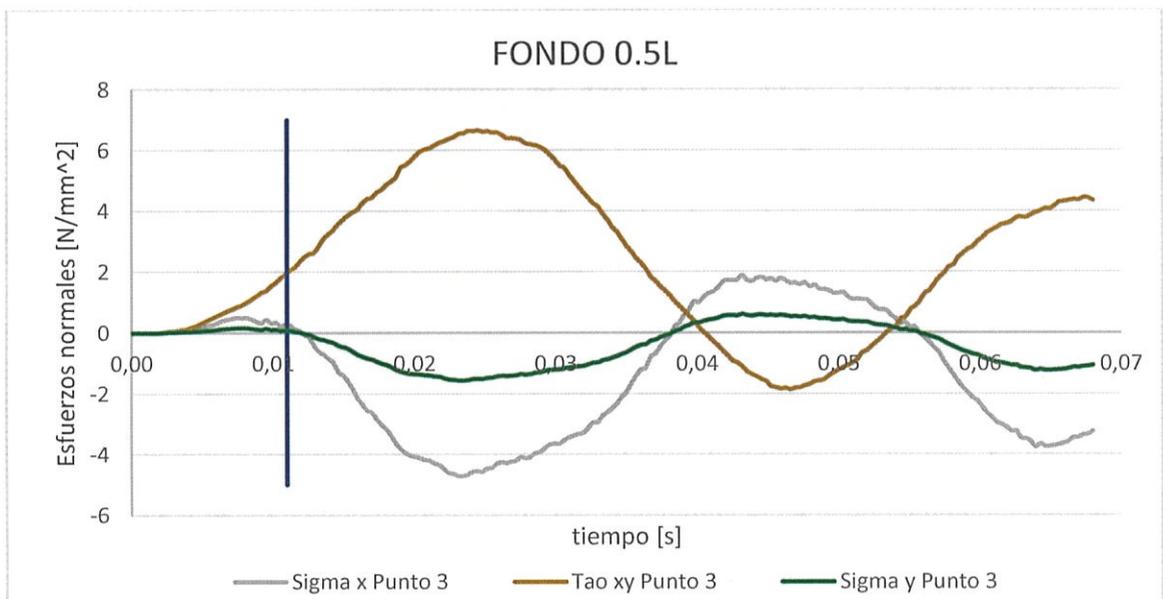


Figura A1.4. Esfuerzo Normal y de Corte del punto 3, sobre el fondo.

## ANEXO 2

### VALORES DE ESFUERZOS NORMALES Y CORTANTES EN SECCIÓN DE POPA DEBIDO A LA APLICACIÓN DE UNA CARGA POR SLAMMING EN SECCIÓN DE PROA

La figura A2.1 muestra la posición de los puntos 1,2 y 3 sobre el fondo, costado y cubierta en una cuaderna ubicada en sección de popa.

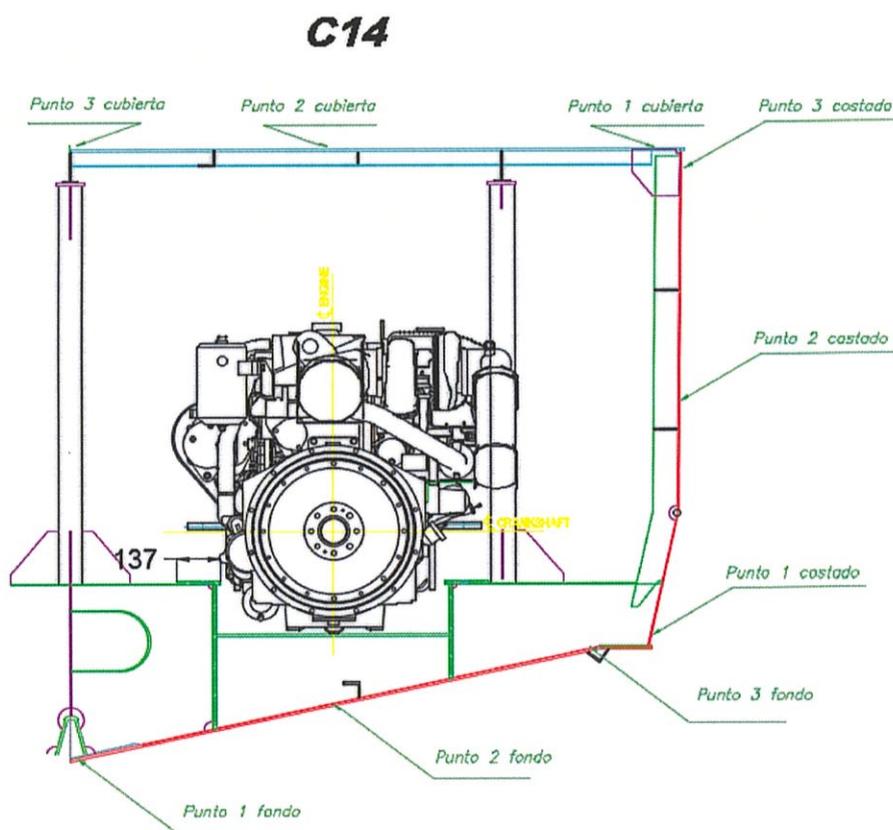
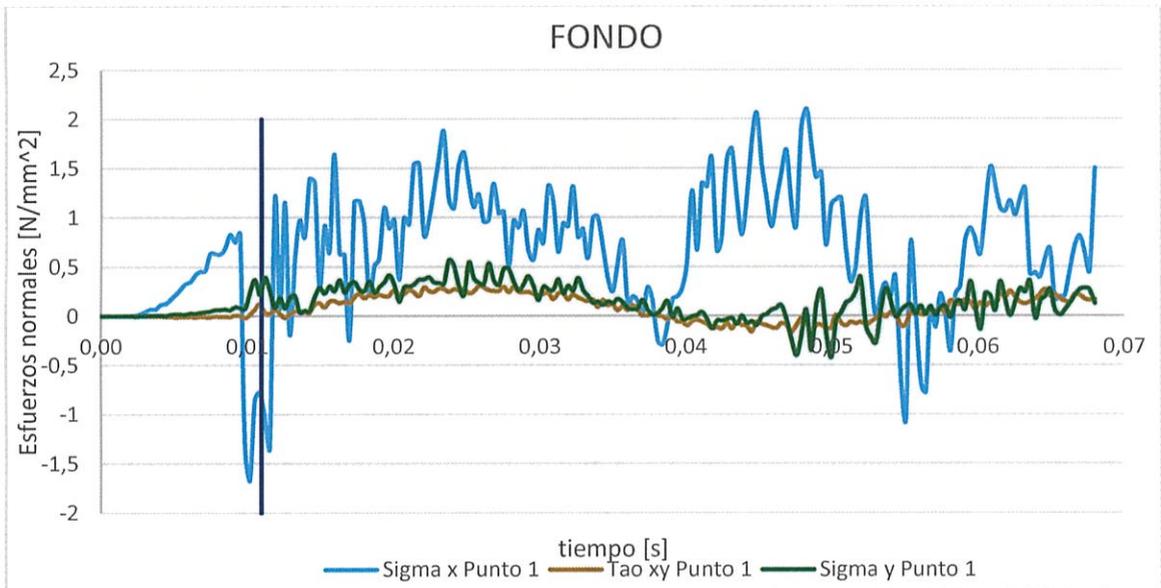


Figura A2.1. Posición transversal de los puntos 1, 2 y 3 sobre fondo, costado y cubierta en sección de popa.

El comportamiento de los esfuerzos normales sobre el fondo de la estructura en sección de popa se aprecia en las figuras A2.2, A2.3 y A2.4. El signo de los esfuerzos indica que en esta sección los elementos se encuentran sometidos a tensión, con esfuerzos normales en dirección "x" de 2.1, 1.7 y 1.4 [N/mm<sup>2</sup>] en los puntos 1, 2 y 3 respectivamente. En las gráficas se observa que los elementos poseen una vibración local con un periodo correspondiente a 1.36e-3 el elemento 1, 3.06e-3 el elemento 2 y 3, que el periodo de vibración del elemento 1 sea menos que el periodo de vibración del elemento 2 y 3 puede deberse a que este elementos se encuentra cerca de la línea de crujía que es donde se aplicaron las condiciones de simetría para el análisis.



**Figura A2.2. Esfuerzo Normal y de Corte del punto 1, sobre el fondo.**

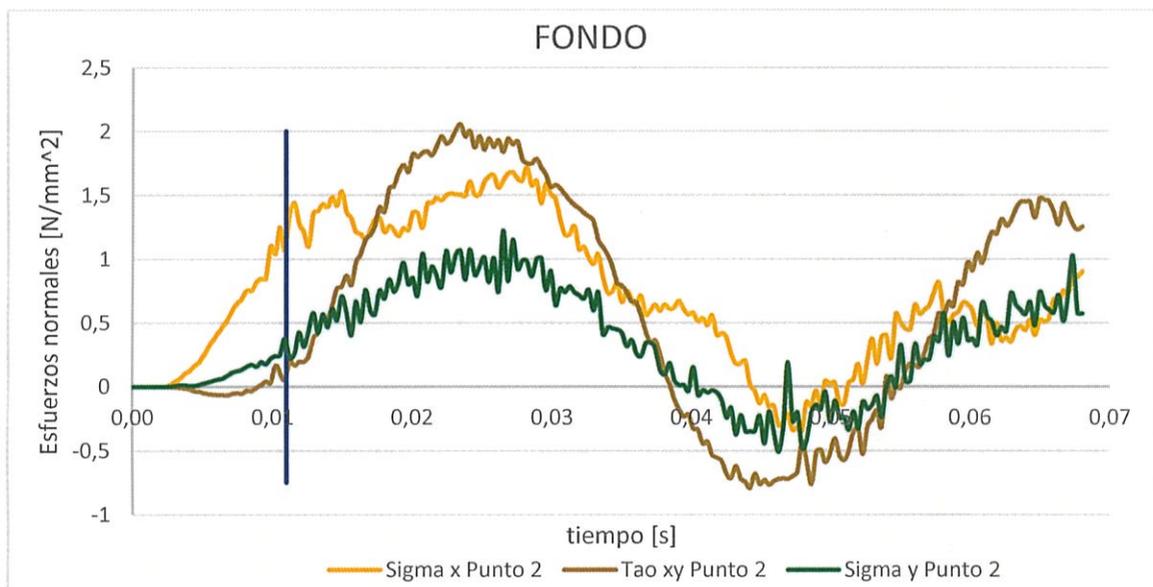


Figura A2.3. Esfuerzo Normal y de Corte del punto 2, sobre el fondo.



Figura A2.4. Esfuerzo Normal y de Corte del punto 3, sobre el fondo.