



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

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

**DETERMINACIÓN DE LA VIDA ÚTIL DEL FONDO DE UNA
EMBARCACIÓN CONSTRUIDA EN ALUMINIO, POR CARGA
VIBRATORIA DEL SISTEMA PROPULSIVO**

TESIS DE GRADO

Previa a la obtención del Título de

INGENIERO NAVAL

Presentado por

Carlos Andrés Cuenca Cabrera

Guayaquil - Ecuador

2014

AGRADECIMIENTO

Agradezco a mis padres y a mi familia por el apoyo y paciencia brindados durante mis años de estudio de pregrado, a mi prima Silvia por su colaboración en la adquisición de la computadora empleada para la elaboración de la presente tesis y al Ph.D. José R. Marín López por su gran ayuda y apoyo en el desarrollo de este trabajo.

DEDICATORIA

A mis padres por su constante apoyo y paciencia durante mi vida.
A mis hermanos y a mis amigos por los ánimos siempre brindados. A mis maestros por las enseñanzas, no solo académicas sino también de vida. Al Ing. Raúl Coello, quien ayudo a corregir algunas falencias que tenía en mi vida académica.

TRIBUNAL DE GRADUACIÓN

Marco Velarde Toscano, M.Sc.
Presidente del Tribunal

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

Eduardo H. Orcés Pareja, M.Sc.
Miembro Principal

DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad por los hechos, ideas y doctrinas expuestas en esta tesis, corresponden exclusivamente a su autor, y el patrimonio intelectual de la Tesis de Grado corresponderá a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE LLITORAL”.

(Reglamento de Exámenes y Títulos
Profesionales de la ESPOL)

Carlos Andrés Cuenca Cabrera

RESUMEN

La lancha “Guayas”, construida por ASTINAVE en aleación de Aluminio 5086 tiene 11 m de eslora total, es impulsada con un sistema propulsor constituido por dos motores de 493 HP cada uno y dos sistemas de chorro de agua, y, tiene una estructura con cuadernaje de tipo combinado. Para calcular la vida útil de la estructura del fondo de la lancha debida a la carga cíclica producida por el conjunto del sistema propulsor se procedió a realizar un modelo estructural con Elementos Finitos. La geometría del modelo, fue desarrollado en AutoCAD y posteriormente se importó este modelo desde el programa de análisis estructural SAP2000, donde se le agregaron las diferentes características de material y estructurales. Además, luego se incluyó la masa añadida debida a la interacción del fondo de la lancha con el fluido, el amortiguamiento estructural y se le incluyó las respectivas condiciones de frontera. El modelo numérico tiene un total de 28098 nodos y 34192 elementos, lo que equivale a un sistema de 168588 ecuaciones por resolver.

Luego se aplicaron cargas oscilatorias debidas al sistema propulsor: i) la componente crítica del Torque del motor, y, ii) el Empuje variable del propulsor. Estas cargas fueron aplicadas en la base del motor y en los agujeros de sujeción del ducto del Chorro de agua, respectivamente, y

se estimaron las amplitudes a diferentes frecuencias de excitación, equivalentes al rango entre 2000 y 2600 RPM del motor. Con las distribuciones de amplitudes de esfuerzos resultantes se seleccionaron seis detalles estructurales, en los que se presentan los máximos valores de esfuerzos alternativos, en donde se analizará la posibilidad del fallo por fatiga.

Para determinar el tiempo de vida útil se sigue el proceso descrito por la sociedad clasificadora DNV. De las distribuciones de esfuerzo se toman los valores nominales y se obtiene el número de ciclos que estos pueden soportar, empleando las curvas de Esfuerzo–vida corregidas por fatiga, dadas en EUROCODE 9 para detalles de aluminio. Posteriormente se asumió tres espectros para la Forma de operación, para, en combinación con la regla de daño lineal acumulativo de Miner, calcular el tiempo de vida útil total que tiene cada detalle referencial en una hora.

Finalmente, se consideraron diferentes porcentajes de uso de la embarcación y se determinó el tiempo de vida útil de la lancha por falla de cualquiera de los detalles seleccionados. El detalle crítico corresponde a la plancha del fondo ubicado bajo el motor propulsor. Se ha estimado que el fondo de la lancha tiene un tiempo de vida útil de 1.8, 2.7, o 5.4 años, navegando 18, 12, o 6 horas diarias, durante todo el año, respectivamente.

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
RESUMEN.....	V
ÍNDICE GENERAL.....	VII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	X
ÍNDICE DE TABLAS.....	XIX
ÍNDICE DE ANEXOS.....	XXV
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPITULO 1.....	5
MODELACIÓN ESTRUCTURAL DE LA EMBARCACIÓN.....	5
1.1. DESCRIPCIÓN DE LA EMBARCACIÓN UTILIZADA.....	5
1.2. SELECCIÓN DE LA ZONA ESTRUCTURAL A ANALIZAR.	
12	
1.3. DESARROLLO DEL MODELO ESTRUCTURAL	
DETALLADO.....	14
1.4. IMPORTACIÓN DEL MODELO A UN PROGRAMA DE	
ANÁLISIS ESTRUCTURAL.....	19

CAPITULO 2.....	23
ANÁLISIS DE ESFUERZOS VIBRATORIOS.....	23
2.1. MODELACIÓN DE LA CARGA VIBRATORIA POR APLICAR.....	23
2.2. MODELACIÓN DE LA CARGA DEBIDA A LA INFLUENCIA DE LA INTERACCIÓN FLUIDO-ESTRUCTURA.....	34
2.3. VISUALIZACIÓN Y DETERMINACIÓN DE ZONAS DE MÁXIMO ESFUERZO.	38
2.4. CÁLCULO DE ESFUERZOS EN LOS PUNTOS DE CONCENTRACIÓN.....	50
CAPITULO 3.....	62
CÁLCULO DE LA VIDA ÚTIL DEL FONDO DE LA EMBARCACIÓN....	62
3.1. ESTIMACIÓN DE LA CURVA ESFUERZO-VIDA.....	62
3.2. DETERMINACIÓN DE ESFUERZOS EN DETALLES ESTRUCTURALES REFERENCIALES.	69
3.3. CÁLCULO DE VIDA ÚTIL DE DETALLES ESTRUCTURALES REFERENCIALES.	76
3.4. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y ESTIMACIÓN DEL TIEMPO DE VIDA ÚTIL DEL FONDO DE LA EMBARCACIÓN.	94
CONCLUSIONES	97

RECOMENDACIONES..... 100

ANEXOS..... 102

ANEXO A..... 103

ANEXO B..... 106

ANEXO C..... 112

ANEXO D..... 127

ANEXO E..... 129

ANEXO F..... 146

ANEXO G 159

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura No. 1 Gráfica del sistema de propulsión de la lancha, [10].	7
Figura No. 2 Plano estructural de la lancha, [9].	8
Figura No. 3 Vista de la zona de Sala de Máquinas de la lancha “Guayas”, [Fuente: Elaboración Propia].	11
Figura No. 4 Plano 3D de la zona seleccionada realizada en Autocad, [Fuente: Elaboración Propia].	13
Figura No. 5 Bordas de los detalles estructurales superficiales, [Fuente: Elaboración Propia].	15
Figura No. 6 Modelo final de la estructura modelada en Autocad, [Fuente: Elaboración Propia].	17
Figura No. 7 Modelo final desarrollado en SAP2000, [Fuente: Elaboración Propia].	21
Figura No. 8 Comparación entre la estructura real y el modelo desarrollado en SAP2000, [Fuente: Elaboración Propia].	22

Figura No. 9 Estimación de la fuerza vibratoria equivalente al torque del motor, [Fuente: Elaboración Propia].	26
Figura No. 10 Carga debida al Torque del motor, aplicada en la estructura del fondo de la lancha, [Fuente: Elaboración Propia].....	28
Figura No. 11 Variaciones de fuerzas según número de palas de la hélice propulsora, [12], pág. 359.....	30
Figura No. 12 Estimación de la fuerza vibratoria equivalente al empuje del sistema propulsor, [Fuente: Elaboración Propia].....	31
Figura No. 13 Hélice modelo de 3 palas y diámetro $D=29$ [cm], en acero, [Fuente: Elaboración Propia].....	33
Figura No. 14 Curvas de valores de factor μ_{lnb} en función del número de paneles analizados, página 264, [14].....	36
Figura No. 15 Zonas de máximo esfuerzo según frecuencia de excitación y dirección para carga de torque de motor cíclico, [Fuente: Elaboración Propia].....	41
Figura No. 16 Zonas de máximo esfuerzo normal para carga de empuje cíclico, [Fuente: Elaboración Propia].....	45

Figura No. 17 Detalles estructurales seleccionados del modelo principal, [Fuente: Elaboración Propia].....	47
Figura No. 18 Detalles estructurales seleccionados, [Fuente: Elaboración Propia].....	49
Figura No. 19 Esfuerzo axial real e imaginario actuando sobre un elemento SHELL, [Fuente: Elaboración Propia].	52
Figura No. 20 Esfuerzos en los elementos que forman los detalles con el respectivo esfuerzo máximo, [Fuente: Elaboración Propia].	53
Figura No. 21 Esfuerzo total actuando a cada lado, sobre un elemento SHELL, [Fuente: Elaboración Propia].....	54
Figura No. 22 Detalle de soldadura con distribución de esfuerzos, esfuerzo crítico y esfuerzo nominal, [Fuente: Elaboración Propia].	56
Figura No. 23 Detalles de referencia tomados para selección de curvas de Esfuerzo-Vida, [15].	63
Figura No. 24 Curvas de Esfuerzo-vida para distintos detalles referenciales sometidos a carga cíclica de tipo axial, Anexo J, [15].	66
Figura No. 25 Curvas S-N finales seleccionadas, [Fuente: Elaboración Propia].....	69

Figura No. 26 Rango de esfuerzos para cada detalle, según RPM del motor, para carga cíclica debida al Torque del motor, [Fuente: Elaboración Propia].....	74
Figura No. 27 Rango de esfuerzos para cada detalle, según RPM del motor, para carga cíclica debida al Empuje, [Fuente: Elaboración Propia].	75
Figura No. 28 Porcentaje de uso del motor según RPM, para modo de trabajo 1, [Fuente: Elaboración Propia].....	77
Figura No. 29 Porcentaje de uso del motor según RPM, para modo de trabajo 2, [Fuente: Elaboración Propia].....	78
Figura No. 30 Porcentaje de uso del motor según RPM, para modo de trabajo 3, [Fuente: Elaboración Propia].....	79
Figura No. 31 Ciclos N para cargas cíclicas, Detalle 1, [Fuente: Elaboración Propia].....	80
Figura No. 32 Ciclos N para cargas cíclicas, Detalle 2, [Fuente: Elaboración Propia].....	81
Figura No. 33 Ciclos N para cargas cíclicas, Detalle 3, [Fuente: Elaboración Propia].....	82

Figura No. 34 Ciclos N para cargas cíclicas, Detalle 4, [Fuente: Elaboración Propia].....	83
Figura No. 35 Ciclos N para cargas cíclicas, Detalle 5, [Fuente: Elaboración Propia].....	84
Figura No. 36 Ciclos N para cargas cíclicas, Detalle 6, [Fuente: Elaboración Propia].....	85
Figura No. 37 Valores de daño acumulativo según regla de Miner para cada detalle en 1 hora, para cada modo de operación asumido, [Fuente: Elaboración Propia].....	92
Figura No. 38 Superficies varias realizadas en Autocad usando el comando “Edgesurf”, [Fuente: Elaboración Propia].	103
Figura No. 39 Superficies generadas usando el comando “Edgesurf” y “3dFace”, [Fuente: Elaboración Propia].	105
Figura No. 40 Superficie del Fondo de la Lancha “Guayas”, [Fuente: Elaboración Propia].....	106
Figura No. 41 Modelo con superficies correspondientes al refuerzo de la Base de motores, [Fuente: Elaboración Propia].....	107

Figura No. 42 Modelo superficial correspondiente al fondo con sus respectivos detalles estructurales, [Fuente: Elaboración Propia].	108
Figura No. 43 Modelo superficial preliminar correspondiente al espejo con sus detalles estructurales, [Fuente: Elaboración Propia].	109
Figura No. 44 Modelo con superficies completas realizado en Autocad, [Fuente: Elaboración Propia].	110
Figura No. 45 Modelo geométrico final con Superficies y elementos polilínea, [Fuente: Elaboración Propia].	111
Figura No. 46 Opciones de tipos de elementos a importar desde SAP2000, [Fuente: Elaboración Propia].	113
Figura No. 47 Capa perteneciente al fondo, importada desde Autocad al programa SAP2000, [Fuente: Elaboración Propia].	114
Figura No. 48 Opciones de Propiedades del Material, [Fuente: Elaboración Propia].	115
Figura No. 49 Opciones de propiedades de Sección superficial a utilizar, [Fuente: Elaboración Propia].	116
Figura No. 50 Ventana de Opciones de Elementos Frame, [Fuente: Elaboración Propia].	118

Figura No. 51 Ventana para agregar propiedades de Secciones tipo Frame, [Fuente: Elaboración Propia].	118
Figura No. 52 Fondo de la Lancha en SAP2000 con las propiedades de sección y material asignadas, [Fuente: Elaboración Propia].....	119
Figura No. 53 Modelo completo con características y condiciones de frontera realizadas en SAP2000, [Fuente: Elaboración Propia].	123
Figura No. 54 Gráfico final de modelo con masa de motor y ducto, [Fuente: Elaboración Propia].....	126
Figura No. 55 Modelo inicial, discretización uniforme, [Fuente: Elaboración Propia].....	128
Figura No. 56 Curva de BHP según RPM de trabajo del motor Cummins, [Fuente: Elaboración Propia].....	131
Figura No. 57 Gráfica de Esfuerzos tangenciales según la Presión indicada, [19].....	136
Figura No. 58 Esfuerzos tangenciales vs Presión indicada, para motores diésel de 4T, [Fuente: Elaboración Propia].	137

Figura No. 59 Gráfica de Torque del motor Vs. RPM de trabajo, [Fuente: Elaboración Propia].....	139
Figura No. 60 Fuerza equivalente aplicada en los refuerzos de la base del motor, [Fuente: Elaboración Propia].....	140
Figura No. 61 Carga debida al Torque del motor, aplicada en la estructura del fondo de la lancha, [Fuente: Elaboración Propia].....	142
Figura No. 62 Resistencia al avance con método de Savitsky, [20].....	146
Figura No. 63 Resistencia vs velocidad, con ecuaciones que las describen, [Fuente: Elaboración Propia].	148
Figura No. 64 Tablas de resultados de las pruebas realizadas a las lanchas 1 y 2, [20].....	148
Figura No. 65 Relación de las RPM del motor en función de la velocidad de la lancha, [Fuente: Elaboración Propia].	150
Figura No. 66 Gráfica de valores de fuerzas calculadas según RPM del motor, [Fuente: Elaboración Propia].	154
Figura No. 67 Modo de vibración 28 para el modelo estructural del fondo de la lancha, [Fuente: Elaboración propia].....	161

Figura No. 68 Modo de vibración 28, para el modelo estructural del fondo de la lancha, [Fuente: Elaboración propia]..... 162

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla No. I Características principales de la Lancha "Guayas", [9].	6
Tabla No. II Tabla de resumen de detalles estructurales analizados, [9].	10
Tabla No. III Resumen de capas utilizadas en el modelo desarrollado en Autocad, [Fuente: Elaboración Propia]	18
Tabla No. IV Carga vibratoria debida al torque del motor, [Fuente: Elaboración Propia].....	27
Tabla No. V Resumen de datos obtenidos para el cálculo de la carga debida al empuje, [Fuente: Elaboración Propia].	32
Tabla No. VI Zonas de máximos esfuerzos normales para carga cíclica debida al torque del motor, (Carga nodal de 1 [Kg]), [Fuente: Elaboración Propia].....	39
Tabla No. VII Zonas de máximos esfuerzos normales por carga de empuje cíclico, (Carga nodal de 1 [Kg]), [Fuente: Elaboración Propia]..	43
Tabla No. VIII Tipos de detalles seleccionados y tipos de elementos que lo conforman, [Fuente: Elaboración Propia].....	57

Tabla No. IX Esfuerzos resultantes, en dirección longitudinal y transversal, debido a cargas cíclicas nodales aplicadas de 1 [Kg], [Fuente: Elaboración Propia].....	58
Tabla No. X Tabla de factores de corrección debidos a tipo de carga, [Fuente: Elaboración Propia].....	59
Tabla No. XI Esfuerzos reales corregidos, en dirección longitudinal y transversal, debido a cargas cíclicas aplicadas, [Fuente: Elaboración Propia].	60
Tabla No. XII Correspondencias entre los detalles referenciales seleccionados y del Eurocode 9, [Fuente: Elaboración Propia].	64
Tabla No. XIII Curva S-N utilizada según tipo de detalle y carga cíclica analizada, [Fuente: Elaboración Propia].	67
Tabla No. XIV Características de las curvas S-N seleccionadas, [Fuente: Elaboración Propia].....	67
Tabla No. XV Amplitudes de esfuerzos en el punto de concentración, [Fuente: Elaboración Propia].....	72
Tabla No. XVI Rango de esfuerzos en el punto de concentración, [Fuente: Elaboración Propia].....	73

Tabla No. XVII Ciclos para la falla, [Fuente: Elaboración Propia].	86
Tabla No. XVIII Número de ciclos para un determinado nivel de esfuerzo que el fondo de la lancha soporta en 1 hora, [Fuente: Elaboración Propia].	88
Tabla No. XIX Contribución de daño por hora para cada detalle referencial, según el tipo de carga y según el modo de trabajo analizados, [Fuente: Elaboración Propia].	90
Tabla No. XX Valores de daño acumulativo por hora, [Fuente: Elaboración Propia].	92
Tabla No. XXI Valores de horas totales de vida útil, para cada detalle referencial analizado, según modo de trabajo asumido, [Fuente: Elaboración Propia].	93
Tabla No. XXII Horas de trabajo por año según carga asumida de trabajo diario, [Fuente: Elaboración Propia].	95
Tabla No. XXIII Años de vida útil según modo de trabajo y horas diarias de navegación de la lancha, [Fuente: Elaboración Propia].	96
Tabla No. XXIV Detalle del número de elementos empleado en las superficies del ejemplo de la Figura No. 38, [Fuente: Elaboración Propia].	104

Tabla No. XXV Tabla de dimensiones de solido de modelo para el motor con densidad equivalente, [Fuente: Elaboración Propia].	124
Tabla No. XXVI Tabla de resumen para masa, volumen y densidad equivalente de ducto de chorro de agua, [Fuente: Elaboración Propia].	125
Tabla No. XXVII Características generales del Motor Cummins QS8.3-500, [18].	129
Tabla No. XXVIII Consumo de combustible y BHP según RPM del motor, [18].	130
Tabla No. XXIX Características generales del Motor Cummins de la lancha "Guayas", [Fuente: Elaboración Propia].	130
Tabla No. XXX Rangos comunes de referencia para la presión efectiva en motores diésel, [19].	132
Tabla No. XXXI Presión media indicada según RPM del motor, [Fuente: Elaboración Propia].	135
Tabla No. XXXII Valores obtenidos de Torque según Esfuerzo tangencial y según RPM, [Fuente: Elaboración Propia].	138

Tabla No. XXXIII Tabla de Fuerzas equivalentes calculadas según RPM del motor, [Fuente: Elaboración Propia].....	141
Tabla No. XXXIV Tabla de resultados para velocidades del motor con las respectivas cargas en los apoyos, [Fuente: Elaboración Propia].....	142
Tabla No. XXXV Módulo de carga modelada a aplicar y frecuencia de excitación del motor, [Fuente: Elaboración Propia].....	143
Tabla No. XXXVI Tabla de factores de corrección para carga debido al torque del motor, [Fuente: Elaboración Propia].....	145
Tabla No. XXXVII Valores de resistencia en función de la velocidad para la lancha "Guayas", [Fuente: Elaboración Propia].	147
Tabla No. XXXVIII Velocidad promedio final de la lancha prototipo analizada, [Fuente: Elaboración Propia].	149
Tabla No. XXXIX Valores de RPM's de referencia para análisis de cargas, [Fuente: Elaboración Propia].....	151
Tabla No. XL Valores de Velocidad y resistencia según RPM del motor, [Fuente: Elaboración Propia].....	152
Tabla No. XLI Valores de Empuje según RPM de motor, [Fuente: Elaboración Propia].....	153

Tabla No. XLII Tabla de valores con cargas equivalentes según RPM del motor, [Fuente: Elaboración Propia].	154
Tabla No. XLIII Tabla de carga equivalente de Empuje a agregar en los nodos de los agujeros del modelo numérico, [Fuente: Elaboración Propia].	155
Tabla No. XLIV Tabla de resumen de carga de empuje modelada y de frecuencia de excitación calculada, [Fuente: Elaboración Propia].	156
Tabla No. XLV Factores de corrección para las cargas de empuje aplicadas, [Fuente: Elaboración Propia].	158
Tabla No. XLVI Modos de vibración del modelo estructural del fondo de la lancha, [Fuente: Elaboración Propia].	160

ÍNDICE DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A: USO DE COMANDOS EDGESURF Y 3DFACE PARA DESARROLLO DE SUPERFICIES.....	103
ANEXO B: DESARROLLO DEL MODELO GEOMÉTRICO EN AUTOCAD	106
ANEXO C: IMPORTACION DEL MODELO ESTRUCTURAL DESDE SAP2000.....	112
ANEXO D: SELECCIÓN DE TAMAÑO DE ELEMENTOS EN LA DISCRETIZACIÓN DEL MODELO	127
ANEXO E: DETERMINACION DE LA CARGA DEBIDA AL TORQUE VIBRATORIO DEL MOTOR.....	129
ANEXO F: DETERMINACION DE CARGA DEBIDA AL EMPUJE	146
ANEXO G: MODOS DE VIBRACION DEL FONDO DE LA LANCHAA..	159

INTRODUCCIÓN

En las bases de máquinas de las embarcaciones, se generan cargas debidas a la vibración propia del motor o sistema de propulsión, las cuales deben ser consideradas al realizar el análisis estructural, [1]. Estas fuerzas de naturaleza reversible, producen en el material el fenómeno denominado “Fatiga”, que provoca una reducción en la resistencia del material, pudiendo originar fisuras en la estructura.

En uniones estructurales, debido a las discontinuidades geométricas, se produce un aumento del esfuerzo nominal en dicho elemento, [2] y [3]. Esto se debe al cambio brusco que existe en la distribución de esfuerzos en la sección transversal en los puntos de discontinuidad, [4]. Debido al efecto de la fatiga mencionado en el párrafo anterior, esta concentración de esfuerzos afectará al detalle estructural, pudiendo acelerar la aparición de rajaduras. Estas fisuras comprometerían la resistencia de toda la estructura, después de un determinado número de ciclos, [5].

El proceso de iniciación de una rajadura, su propagación y falla estructural, toma un determinado tiempo en producirse. Esto es, el material de una estructura sometido a fatiga, falla luego de un número de ciclos, los cuales corresponden a un tiempo dado, que es a lo que se denomina Vida Útil, [5]. De manera que, es importante el estudio

del fenómeno de Fatiga, para estimar el tiempo que puede operar una embarcación, sin que ocurra ninguna fisura producida por esfuerzos debido a cargas reversibles.

Las Sociedades Clasificadoras ABS y DNV, [2] y [6], presentan métodos directos para determinar el tiempo de vida útil de las estructuras en buques. En estos especifican que se debe empezar por realizar un análisis de esfuerzos usando algún tipo de proceso reconocido por la sociedad (MEF). Además, se debe estimar la curva de Esfuerzo-Vida cíclica (S-N corregida) para el detalle estructural a examinar, [5]. Una vez calculados los esfuerzos críticos, se estima el tiempo de vida útil de los elementos analizados, haciendo uso del enfoque Esfuerzo-Vida (S-N), que relaciona el nivel de esfuerzo alternativo con el número de ciclos para que aparezca una fisura y empleando la regla de daño lineal de Miner.

Debido a que en nuestro medio, el análisis de fatiga no es un fenómeno comúnmente considerado durante el diseño de una embarcación, se ha tratado de implementar un proceso recomendado por una sociedad clasificadora, para determinar el tiempo de vida útil debido a fatiga. En el futuro este proceso puede ser utilizado para realizar cálculos más complejos, y así estimar de una manera más acertada el tiempo de vida

útil de un buque debido a cargas vibratorias ocasionadas por el sistema propulsor.

Esto se lograría considerando que el tiempo de vida útil del fondo de una embarcación, es afectado por las cargas variables del sistema propulsivo, puede ser determinado usando el método S-N recomendado por las casas clasificadoras.

El objetivo general de la presente tesis es determinar el tiempo de vida útil del fondo de la embarcación "Lancha Guayas", construida localmente en aleación de Aluminio, debido a la acción de carga vibratoria generada por el sistema propulsivo, lo cual incluye:

1. Desarrollar un modelo estructural detallado empleando el Método de Elementos Finitos (MEF) del fondo de la embarcación, [7], [8] y [9].
2. Determinar la distribución de esfuerzos en el fondo de la estructura de la embarcación usando el programa SAP2000, empleando el modelo sometido a la carga vibratoria del sistema de propulsión, [2], [8] y [5].
3. Calcular la vida útil del fondo de la lancha, tomando como referencia ciertos detalles estructurales y aplicando el Enfoque S-N, siguiendo las recomendaciones de la casa clasificadora DNV.

CAPITULO 1

Modelación estructural de la embarcación

1.1. DESCRIPCIÓN DE LA EMBARCACIÓN UTILIZADA.

La embarcación planeadora “Lancha Guayas” tiene una eslora de 11 metros y fue construida para ser usada por la Aduana del Ecuador alcanzando una velocidad máxima de 32 nudos. Está construida totalmente en aleación de Aluminio y tiene una estructura con cuadernaje de tipo combinado. Para su propulsión tiene 2 motores de 493 HP cada uno, y estos, mediante el uso de multiplicadores se unen a 2 sistemas de chorro de agua, los cuales trabajan a 3000 RPM. La estructura de la zona a analizar, es decir, el fondo de la embarcación en

la zona de la sala de máquinas, está formada por 4 cuadernas principales y 4 secundarias; además cuenta con 4 refuerzos longitudinales principales y 2 secundarios. El espejo de la embarcación cuenta con 3 refuerzos transversales, además de 6 verticales.

La embarcación "Lancha Guayas", construida por el astillero ASTINAVE en el año 2010, es una lancha rápida de tipo planeadora, construida en aleación de Aluminio 5086 y cuenta con las siguientes características principales:

Eslora Total	11.00	[metros]
Manga Máxima	3.80	[metros]
Puntal	1.70	[metros]
Calado a Máxima Carga	0.74	[metros]
Desplazamiento Máximo	14.90	[Toneladas]
Velocidad de Servicio	32.00	[Nudos]

Tabla No. I Características principales de la Lancha "Guayas", [9].

Para la propulsión, la lancha cuenta con dos motores Cummins QSC 8.3-500 los cuales entregan 493 BHP cada uno, trabajando a 2600 RPM; éstos van conectados, haciendo uso de un Multiplicador de 0.923:1, al cardán que se encuentra acoplado a dos propulsores del tipo Chorro de agua (Water Jet), como se muestra en la Figura No. 1, [10]. Los sistemas de chorros de agua son marca Hamilton Jet modelo HJ 292, se

encuentran ubicados uno a babor y otro a estribor, y trabajan a una velocidad máxima de 3000 RPM cada uno.

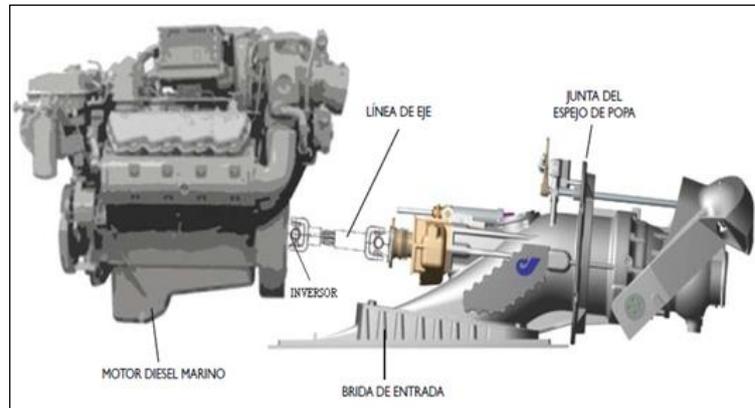


Figura No. 1 Gráfica del sistema de propulsión de la lancha, [10].

La estructura, del casco consta de dos zonas de cuadernaje bien diferenciados:

En la proa es de tipo longitudinal, mientras que en la popa, específicamente en la sala de máquinas, es de tipo transversal como se muestra en la Figura No. 2, [9]. La zona a analizar en el presente proyecto será la del fondo de la embarcación entre el mamparo que separa la proa de la sala de máquinas y el espejo, que es donde se presentan las cargas de tipo vibratoria de alta frecuencia.

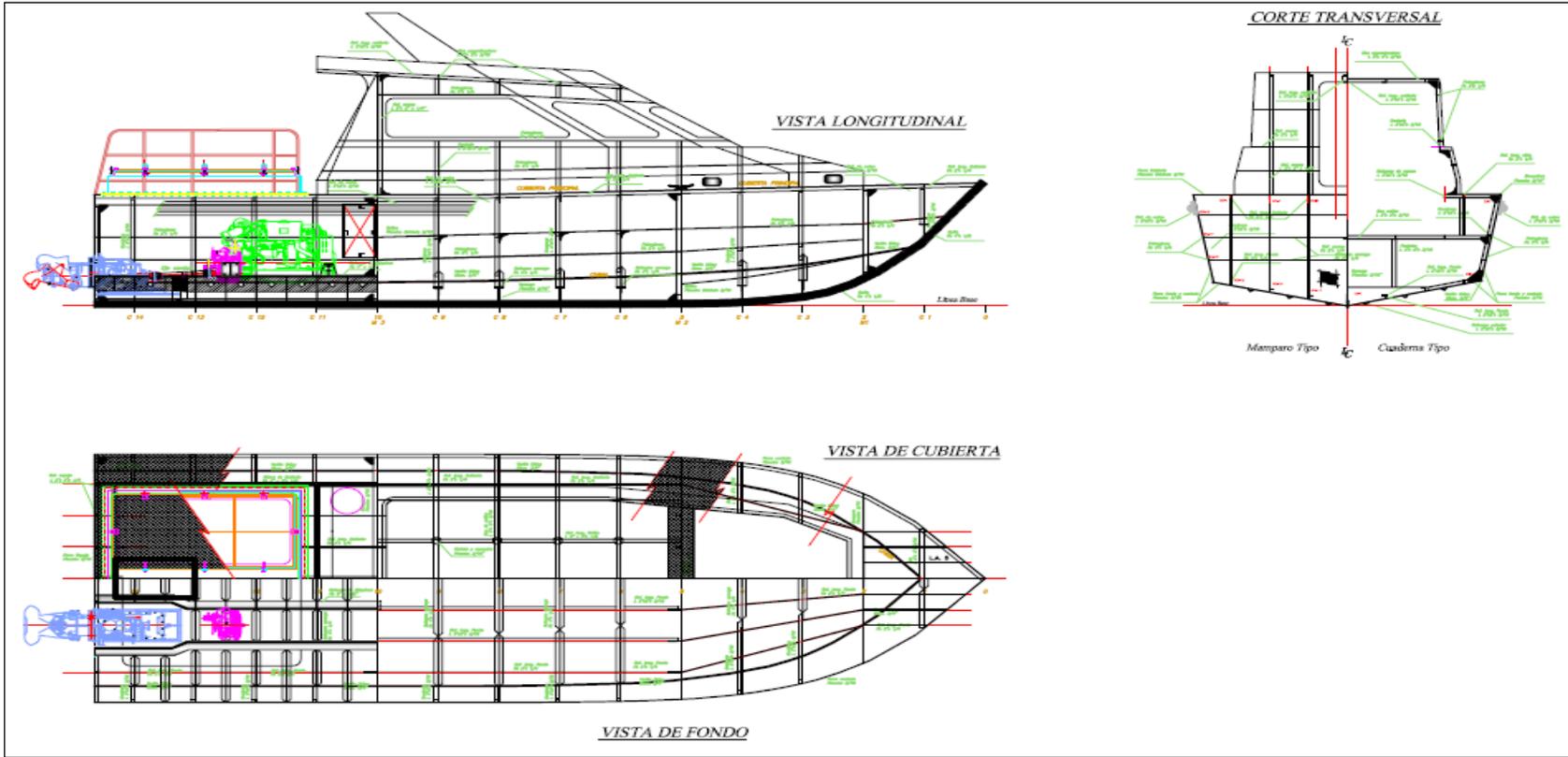


Figura No. 2 Plano estructural de la lancha, [9].

El planchaje del fondo de la lancha tiene 4.76 [mm] de espesor, y la estructura está formada por 4 cuadernas principales separadas 0.75 [m] entre ellas, con una cuaderna intermedia ubicada entre las principales. Las cuadernas, principales y secundarias, están formadas por Platinas de 4.76 [mm] reforzadas con Alas de 50.8 x 4.76 [mm], obteniendo todas una sección final de tipo "T". Además se tienen 6 refuerzos longitudinales, siendo 4 de ellos principales, que es donde se encuentran asentados los motores Cummins, los cuales tienen sección tipo "T", formados por una platina de Aluminio de 6.36 [mm] de espesor y reforzadas con una platina de 127 x 12.7 [mm]. Cada refuerzo longitudinal secundario se encuentra formado por una sección de tipo "L" de 50.8 x 50.8 x 6.36 [mm], y se encuentran ubicados a cada banda de la embarcación.

El espejo de la embarcación se encuentra formado por planchas de 4.76 [mm] de espesor, y consta de 3 refuerzos transversales de tipo platina de 50.8 x 6.36 [mm]. Además tiene 8 refuerzos verticales de los cuales 6 son de tipo "L" de 50.8 x 50.8 x 6.36 [mm] y los otros 2 refuerzos, secundarios, con platinas de 50.8 x 6.36 [mm]. Estos refuerzos verticales se encuentran conectados a los refuerzos longitudinales del fondo de la embarcación empleando escuadras de 4.76 [mm] de espesor.

A continuación se muestra una tabla de resumen con los detalles estructurales anteriormente mencionados:

Ubicación	Elemento	Sección	Dimensiones	Unidades
Fondo	Planchaje	-----	4.76	[mm]
	Cuaderna	Alma	4.76	[mm]
		Ala	50.8 x 4.76	[mm]
	Refuerzo Longitudinal Principal	Alma	6.36	[mm]
		Ala	127.0 x 12.7	[mm]
Refuerzo Long. Sec.	Ele	50.8 x 50.8 x 6.36	[mm]	
Espejo	Planchaje	-----	4.76	[mm]
	Refuerzo Transversal	Platina	50.8 x 6.36	[mm]
	Refuerzo Longitudinal	Platina	50.8 x 6.36	[mm]
	Refuerzo Longitudinal	Ele	50.8 x 50.8 x 6.36	[mm]
Unión	Escuadras	----	4.76	[mm]

Tabla No. II Tabla de resumen de detalles estructurales analizados, [9].

En la tabla anterior hay que tener en cuenta que en la columna "Dimensiones" se muestran las magnitudes dependiendo del tipo de detalle. Las celdas que solo contienen un número indican el espesor del Planchaje usado, las que contienen dos magnitudes denotan la magnitud de altura o base y el espesor, y las que contienen 3 magnitudes muestran base, altura y espesor.

En la Figura No. 3 se muestra una vista de la zona de la Sala de Máquinas, en donde se notan los detalles en el fondo y en el espejo de la lancha analizada.



Figura No. 3 Vista de la zona de Sala de Máquinas de la lancha “Guayas”,

[Fuente: Elaboración Propia]

1.2. SELECCIÓN DE LA ZONA ESTRUCTURAL A ANALIZAR.

De la estructura de la embarcación, se ha tomado la sección de la popa del fondo de la misma (Fondo y espejo), desde el mamparo que separa la sala de máquinas de la proa de la lancha, dado que es aquí donde se encuentran las fuentes vibratorias de interés para el presente análisis. En esta zona se consideran los detalles estructurales primarios y secundarios, incluyendo los agujeros en el planchaje para la succión y la descarga del agua, usados por el sistema propulsivo. Esta parte de la estructura tiene una longitud de 3.5 [m], tomados desde el mamparo de la sala de máquinas hasta el espejo de la lancha y un ancho equivalente a la semimanga de la lancha correspondiente a una distancia de 1.9 [m].

En el modelo estructural de la zona analizada de la embarcación se presentan tres elementos de interés, en donde se encuentran las cargas vibratorias con altas frecuencias, debido a que es aquí donde se encuentra el motor y la carga debida al chorro de agua. Estos elementos son, las bases de los motores, el agujero en el fondo correspondiente a la entrada de agua del sistema del Chorro de agua (*Water Jet*), y el agujero en el espejo para la descarga del agua.

En la Figura No. 4 se puede observar una vista tridimensional del fondo y del espejo de la lancha “Guayas”, con la que se puede tener una mejor idea de los detalles anteriormente mencionados.

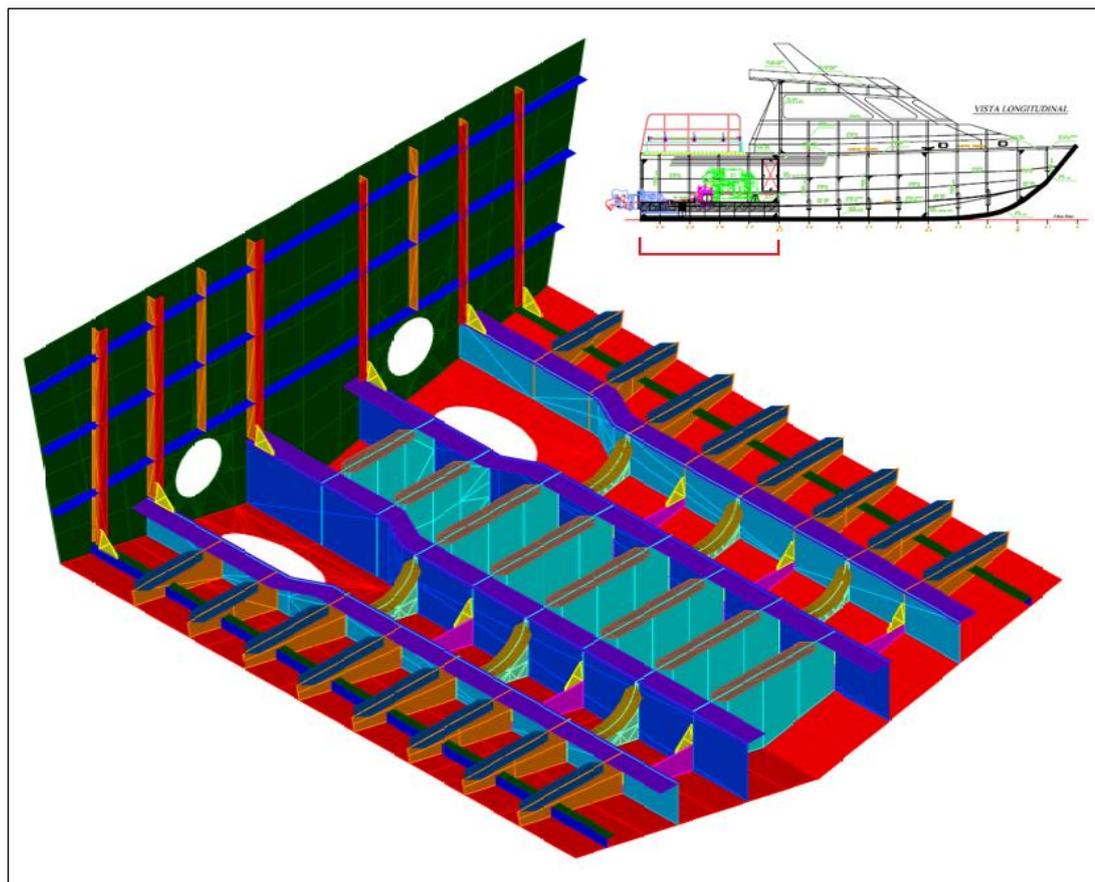


Figura No. 4 Plano 3D de la zona seleccionada realizada en Autocad,

[Fuente: Elaboración Propia]

1.3. DESARROLLO DEL MODELO ESTRUCTURAL DETALLADO.

El modelo geométrico de la zona de la estructura a analizar se realiza en diferentes etapas, usando el programa Autocad. Se usan elementos planos de tipo superficies para modelar el planchaje y las almas de los refuerzos, y, elementos tipo líneas para modelar las alas de los refuerzos, como se muestra en el Anexo. Dado el número de elementos y detalles a trabajar, se usan capas para ubicar en grupos los elementos, para luego poder identificarlos fácilmente. Al terminar el modelo en Autocad se cuenta con 13 capas de tipo superficies para el espejo y el fondo, y, de 11 capas de tipo líneas para las almas de los refuerzos del fondo y del espejo.

Para preparar el modelo geométrico de la estructura a analizar, se desarrolla únicamente la mitad de la sección de la sala de máquinas y se aprovecha luego la simetría del sistema. Debido al alto número de elementos estructurales a modelar, se realiza el trabajo en dos pasos:

1. Modelización de los bordes del planchaje y de los refuerzos estructurales, sin tomar en cuenta las alas de los mismos, como se muestra en la Figura No. 5.

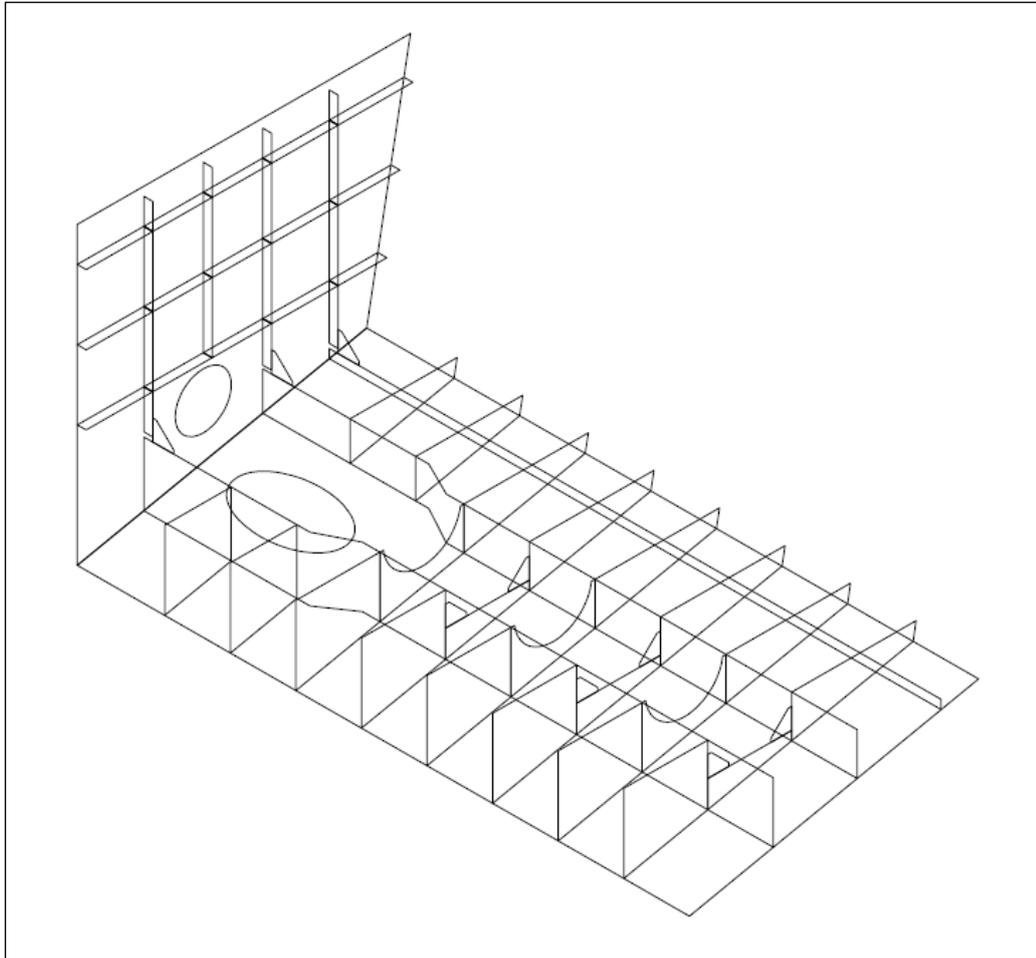


Figura No. 5 Bordos de los detalles estructurales superficiales,
[Fuente: Elaboración Propia].

Estas líneas sirven como guía para posteriormente modelar las superficies que corresponden a la estructura de la embarcación lo cual se realiza usando los comandos “3DFace” y “Malla” disponibles en la pestaña Dibujo==> Modelar ==> Mallas. Se debe tener presente

que las direcciones de los ejes deben ser siempre equivalentes para todas las superficies, como se explica en el Anexo del presente trabajo.

2. Se empezó a desarrollar el modelo con una discretización en donde, se empezaba tomando elementos con dimensiones mayores en zonas de bajo esfuerzo, y se discretizaba con más detalle en las que se esperan mayores esfuerzos. Se pone énfasis en discretizar adecuadamente detalles como esquinas, juntas en 3 planos, y en intersecciones donde coinciden varios detalles estructurales.

Se desarrollaron las superficies y estas fueron agrupadas en capas diferentes, de acuerdo al detalle estructural al que pertenecían, lo que se indica en el Anexo del presente trabajo. El modelo final de la estructura se muestra en la Figura No. 6:

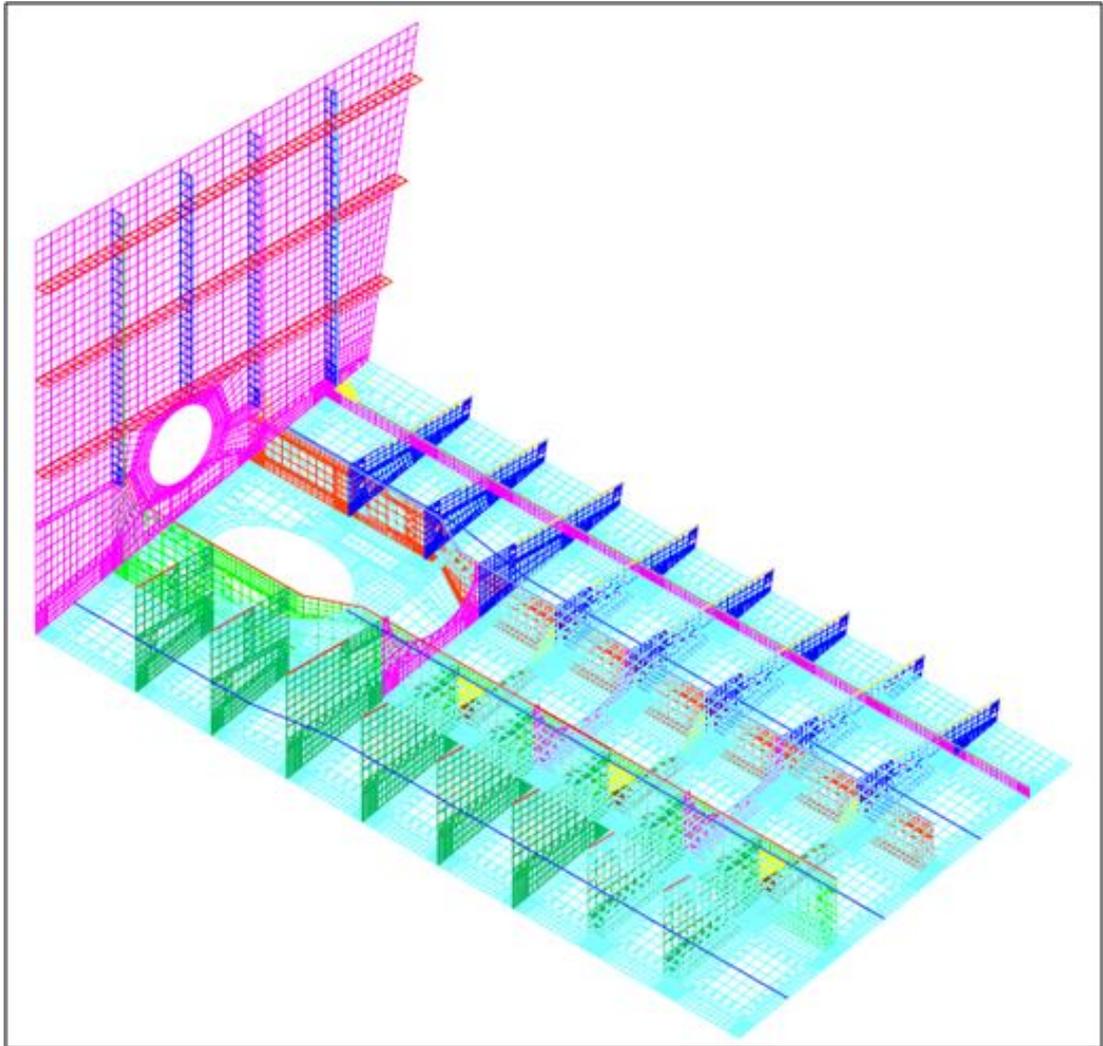


Figura No. 6 Modelo final de la estructura modelada en Autocad,
[Fuente: Elaboración Propia].

Al final se cuenta con 24 capas, como se muestra en la Tabla No. III, en donde se puede observar que en total para el fondo se tienen 17 capas de las cuales 8 son de tipo Frame y 9 son de tipo Superficie. Para el espejo se

tiene un total de 7 capas siendo 3 de éstas de tipo Frame y 4 de tipo Superficie:

#	CAPA	TIPO	ZONA
1	Frames_longitudinal_Costado_espejo	Frames	Espejo
2	Frames_Longitudinal_crujia_espejo	Frames	Espejo
3	Frames_Longitudinal_intermedio_espejo	Frames	Espejo
4	Sup_Escuadras_espejo	Superficie	Espejo
5	Sup_Espejo	Superficie	Espejo
6	Sup_Long_Espejo	Superficie	Espejo
7	Sup_Transversal_Espejo	Superficie	Espejo
8	Frames_Refuerzos_Fondo_Externos	Frames	Fondo
9	Frames_Cuaderna_Costado	Frames	Fondo
10	Frames_cuaderna_Intermedia	Frames	Fondo
11	Frames_Cuaderna_Principal_Crujia	Frames	Fondo
12	Frames_Cuaderna_Secundaria_Crujia	Frames	Fondo
13	Frames_longitudinal_fondo	Frames	Fondo
14	Frames_Refuerzo_1	Frames	Fondo
15	Frames_Refuerzo_2	Frames	Fondo
16	Sup_Cuaderna_principal_costado	Superficie	Fondo
17	Sup_Cuaderna_principal_crujia	Superficie	Fondo
18	Sup_Cuaderna_principal_intermedia	Superficie	Fondo
19	Sup_cuaderna_secunadria_intermdia	Superficie	Fondo
20	Sup_Escuadra_fondo	Superficie	Fondo
21	Sup_fondo	Superficie	Fondo
22	Sup_Long_pequeño_fondo	Superficie	Fondo
23	Sup_ref_long_1	Superficie	Fondo
24	Sup_ref_long_2	Superficie	Fondo

Tabla No. III Resumen de capas utilizadas en el modelo desarrollado en Autocad, [Fuente: Elaboración Propia]

Una vez realizado todo el proceso descrito, el modelo se encuentra listo para ser exportado a un programa de análisis estructural, lo cual será detallado en el siguiente subcapítulo.

1.4. IMPORTACIÓN DEL MODELO A UN PROGRAMA DE ANÁLISIS ESTRUCTURAL.

El modelo geométrico final detallado generado en Autocad, es importado desde el programa SAP2000, en donde se le agregarán las características estructurales de sección y material correspondientes. Como no todos los detalles tienen las mismas características, los elementos geométricos se van importando por capas, para luego unirlos en un solo archivo final con el modelo completo. Finalmente se le agregan las condiciones de fronteras adecuadas, en los bordes del modelo y en la zona de simetría.

Para importar el modelo geométrico desde el programa SAP2000, se necesita tenerlo desarrollado en un archivo con formato “.dxf”, además de que todas las Superficies y Polilíneas deben estar explotadas.

Luego, en este caso, se realiza el proceso de importación del archivo desde el programa de análisis estructural SAP2000, y se le agregan características tanto de tipo de material, como de espesores empleados, como se menciona

en el Anexo del presente documento, teniendo en cuenta que para el material se ha utilizado una rigidez de 0.02, siendo este un valor comúnmente usado para la rigidez. Se debe tener mucho cuidado con las características que se van agregando, tanto de materiales empleados, como de espesores asignados, puesto que se debe recordar que cada detalle estructural tiene un espesor propio.

El modelo final, una vez que se han importado todas las capas desarrolladas en Autocad, se le ha asignado las condiciones de frontera "Simplemente soportadas" en los bordes puesto que este tipo de condición permitirá simular la rigidez que tienen los detalles circundantes. Se debe mencionar que debido a esta asunción de condiciones de frontera se pierden algunos modos de vibración, los cual debe ser considerado al momento de realizar el análisis.

Se debe considerar que todos los elementos deben tener una relación de aspecto de no más de 3, [11], normalizado por ABS, cumpliéndose este requisito en el modelo generado para el presente análisis.

El modelo una vez realizado lo anteriormente mencionado, queda como se muestra en la Figura No. 7:

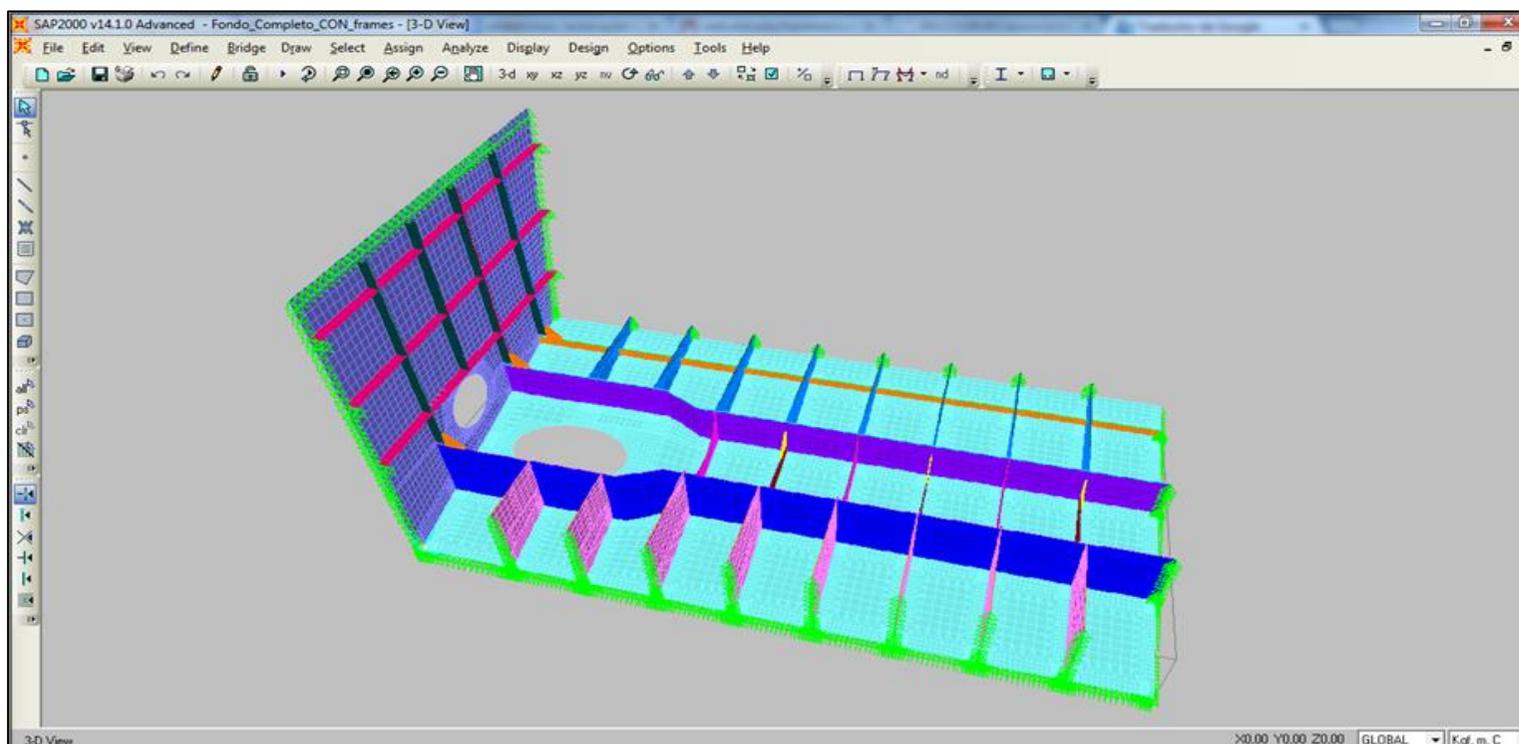


Figura No. 7 Modelo final desarrollado en SAP2000, [Fuente: Elaboración Propia].

Para tener una idea de qué tan bueno es el modelo realizado, a continuación en la Figura No. 8 se muestra una fotografía con los detalles estructurales en la lancha real, y una gráfica del modelo correspondiente a la misma zona realizada en SAP2000.

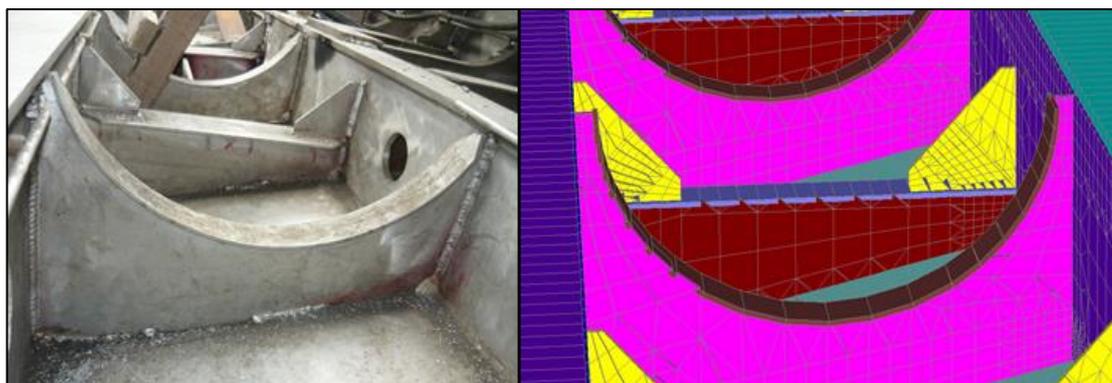


Figura No. 8 Comparación entre la estructura real y el modelo desarrollado en SAP2000, [Fuente: Elaboración Propia].

Se debe mencionar que para facilidad del modelo estructural realizado, se han omitido los agujeros (aligeramientos) realizados en la estructura de la lancha, señalando que se espera que estos no afecten en los cálculos de distribución de Esfuerzos.

Una vez finalizado el procedimiento anteriormente realizado, se observa que se tiene un total de 28098 nodos y 34192 elementos (1448 Frames, 32732 Áreas, 12 Sólidos), lo que equivale a un sistema de 168588 ecuaciones por resolver.

CAPITULO 2

Análisis de Esfuerzos Vibratorios

2.1. MODELACIÓN DE LA CARGA VIBRATORIA POR APLICAR.

En la zona de la sala de máquinas de la Lancha “Guayas” se encuentran situados los motores propulsores asentados sobre los refuerzos longitudinales primarios; también sobre dichos elementos estructurales se encuentran los sistemas de chorro de agua, que van sujetos al fondo y al espejo de la embarcación. Estos dos elementos producen carga vibratoria directamente sobre la estructura de la lancha, provocando esfuerzos

alternativos que afectarán la vida útil de la embarcación. En este trabajo se considerará la carga debido al torque cíclico del motor que producen los cilindros a una frecuencia correspondiente al armónico mayor (6to.), mientras que el Chorro de agua producirá una carga debido a la variación que tiene el empuje con la frecuencia de razón de las palas.

En el fondo de la Lancha "Guayas" están actuando dos tipos de cargas debidas: al Torque vibratorio que producen los motores, y, al Empuje variable generado por el sistema de chorro de agua. Estas cargas van a ser modeladas de la siguiente manera:

1. Las bases del motor principal soportan las cargas equivalentes que multiplicadas por la separación entre soportes producen el Torque alternativo del motor. Esta fuerza es estimada a varias velocidades de rotación en el rango de RPM_{Vacio} hasta las $RPM_{Máxima}$ según el fabricante. Dicha carga equivalente se obtendrá a la frecuencia del armónico que más importancia tiene en este caso, el cual es el 6to, debido a que es un motor de 6 cilindros.
2. El agujero del fondo y el del espejo de la lancha por donde se alimenta y descarga el chorro de agua soportan carga debido al Empuje variable que genera el propulsor. Estos valores de carga dependerán de las velocidades de navegación que tenga la lancha; además su frecuencia

corresponde a la razón de las palas (“blade rate”), el cual se relaciona al producto de la velocidad de rotación del eje por el número de palas del propulsor.

El agujero del fondo y el del espejo de la lancha también soportan carga debido al desbalance del Impulsor del sistema del chorro de agua. Sin embargo el valor de esta carga es muy pequeña comparada con los otros y fue finalmente despreciada.

Se debe notar que todas las fuerzas son referidas a la velocidad del motor, que van a comprender valores entre 2000 a 2600 RPM.

Las fuerzas van a ser calculadas como se detalla a continuación.

Fuerzas vibratorias generadas por el motor principal

Las bases del motor soportan un torque variable, el cual es equivalente a una pareja de cargas cíclicas en dirección vertical, que actúan en forma desfasada sobre los longitudinales del fondo de la estructura de la embarcación. El armónico más importante es el 6to, debido a que siendo el motor de 6 cilindros, dicha componente de cada cilindro están en fase entre sí. Esta carga debe ser calculada para diferentes velocidades de rotación del motor, para posteriormente, aplicándola de manera adecuada sobre la estructura de interés, obtener los esfuerzos que produce.

El proceso para el cálculo de la fuerza debido al torque del motor principal es el que se muestra en el siguiente diagrama de flujo:

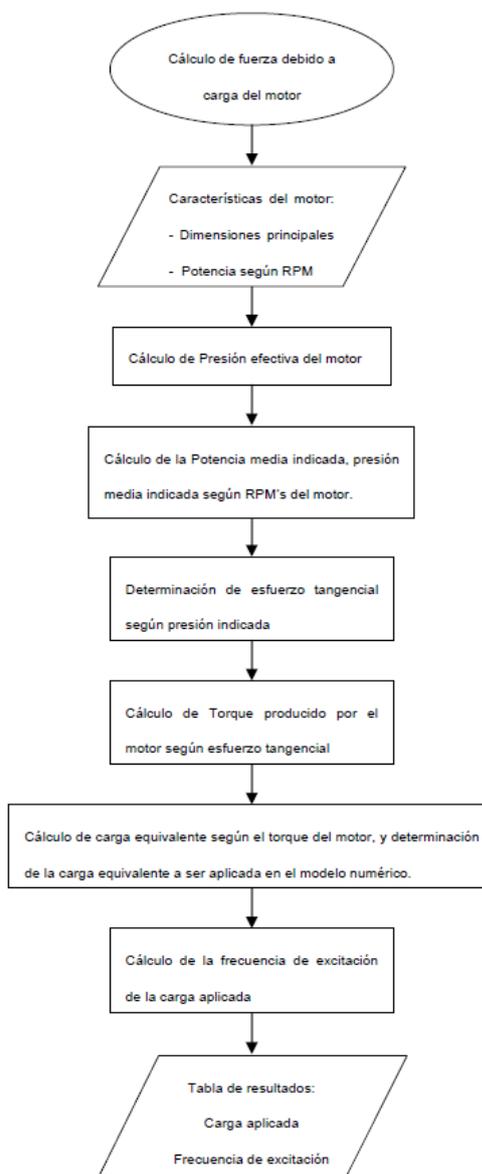


Figura No. 9 Estimación de la fuerza vibratoria equivalente al torque del motor, [Fuente: Elaboración Propia].

El procedimiento y los resultados detallados de los cálculos mencionados en el flujograma para el cálculo de la carga debida al torque del motor, se encuentran en el anexo del presente documento, y la tabla de resultados es la siguiente:

Velocidad Motor RPM	Frecuencia del 6to armónico [CPS]	Amplitud del armónico del torque [kg*m]	Fuerza equivalente total [Kg]	# Momentos: 5
				F_Apoyos [Kg]
2000	100.00	107.31	223.56	44.71
2150	107.50	112.34	234.03	46.81
2300	115.00	116.73	243.19	48.63
2450	122.50	120.56	251.17	50.23
2600	130.00	123.90	258.12	51.62

Tabla No. IV Carga vibratoria debida al torque del motor,

[Fuente: Elaboración Propia].

De la Tabla No. IV, los valores de la columna “F_Apoyos” son los que se deberán aplicar en el modelo numérico a su correspondiente frecuencia de excitación para obtener los esfuerzos alternativos. Se considera que la distancia transversal entre los puntos de aplicación es de 0.48 [m] y el número de nodos es de 10, por lo que se tienen 5 pares de fuerzas o momentos, como se observa en la siguiente gráfica:

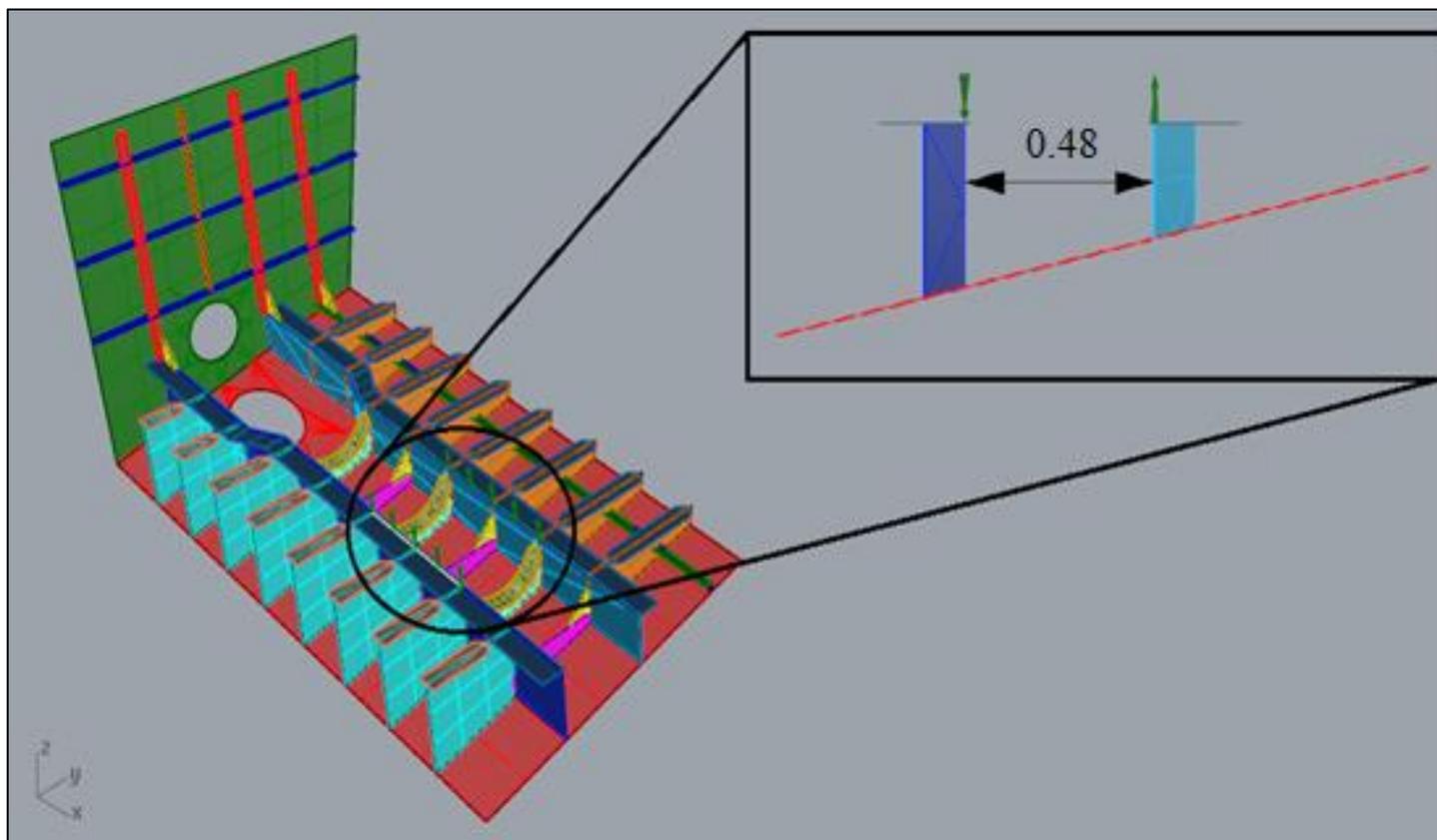


Figura No. 10 Carga debida al Torque del motor, aplicada en la estructura del fondo de la lancha, [Fuente: Elaboración Propia].

Fuerza debido al empuje de la embarcación

Las palas de la hélice al rotar en un flujo no uniforme generan una fuerza de sustentación variable. La componente axial de la sustentación, la fuerza de empuje variable se puede representar como una función periódica que va a actuar en los puntos de sujeción del propulsor al casco. La fuerza de empuje periódica puede tener una variación tan alta como el 15% del empuje total, como se menciona en Marine Engineering, [12], para hélices abiertas, véase la Figura No. 11.

En el presente caso, hélice en un ducto, se ha asumido que la variación del empuje corresponde a un 15% del Empuje total, considerando al Impulsor con 3 palas.

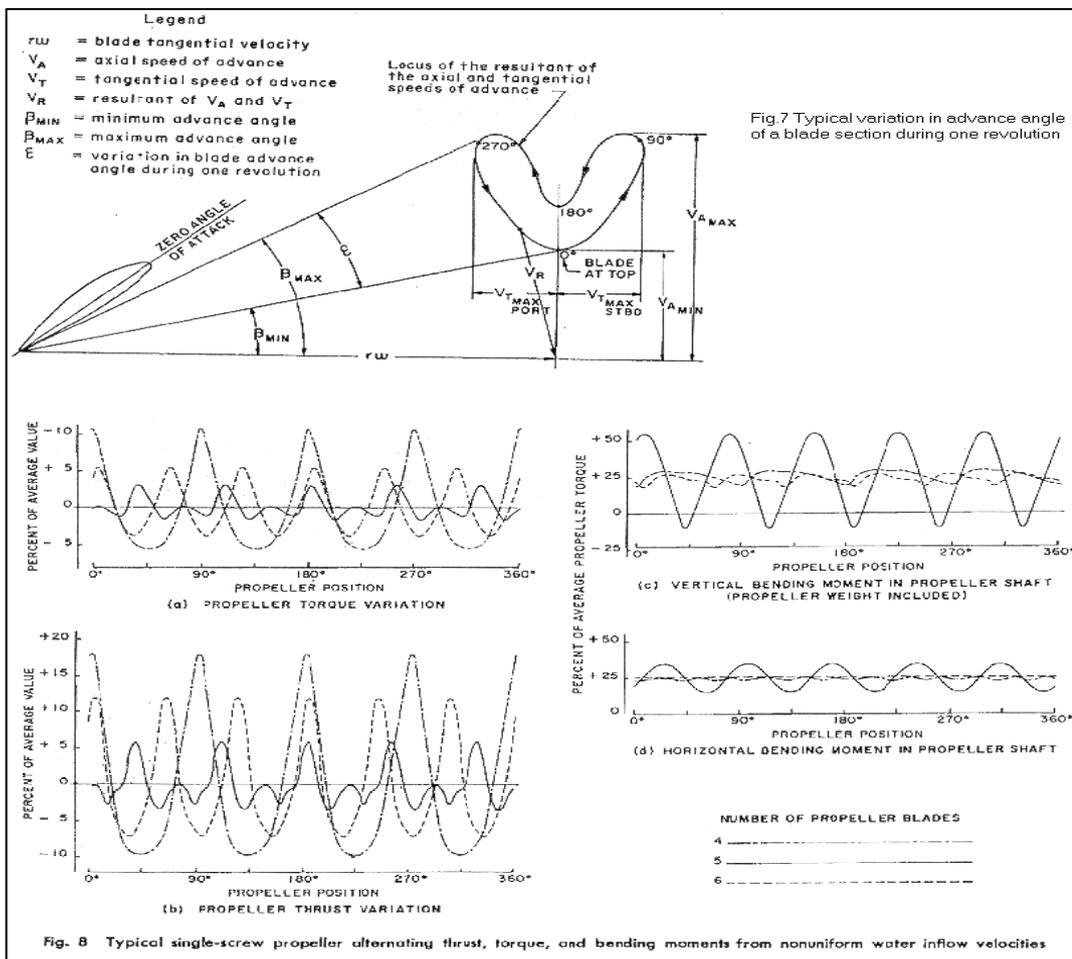


Figura No. 11 Variaciones de fuerzas según número de palas de la hélice propulsora, [12], pág. 359.

Luego para la determinación de la carga equivalente debida al empuje de la embarcación, se realiza el procedimiento que se resume en el siguiente diagrama de flujo:

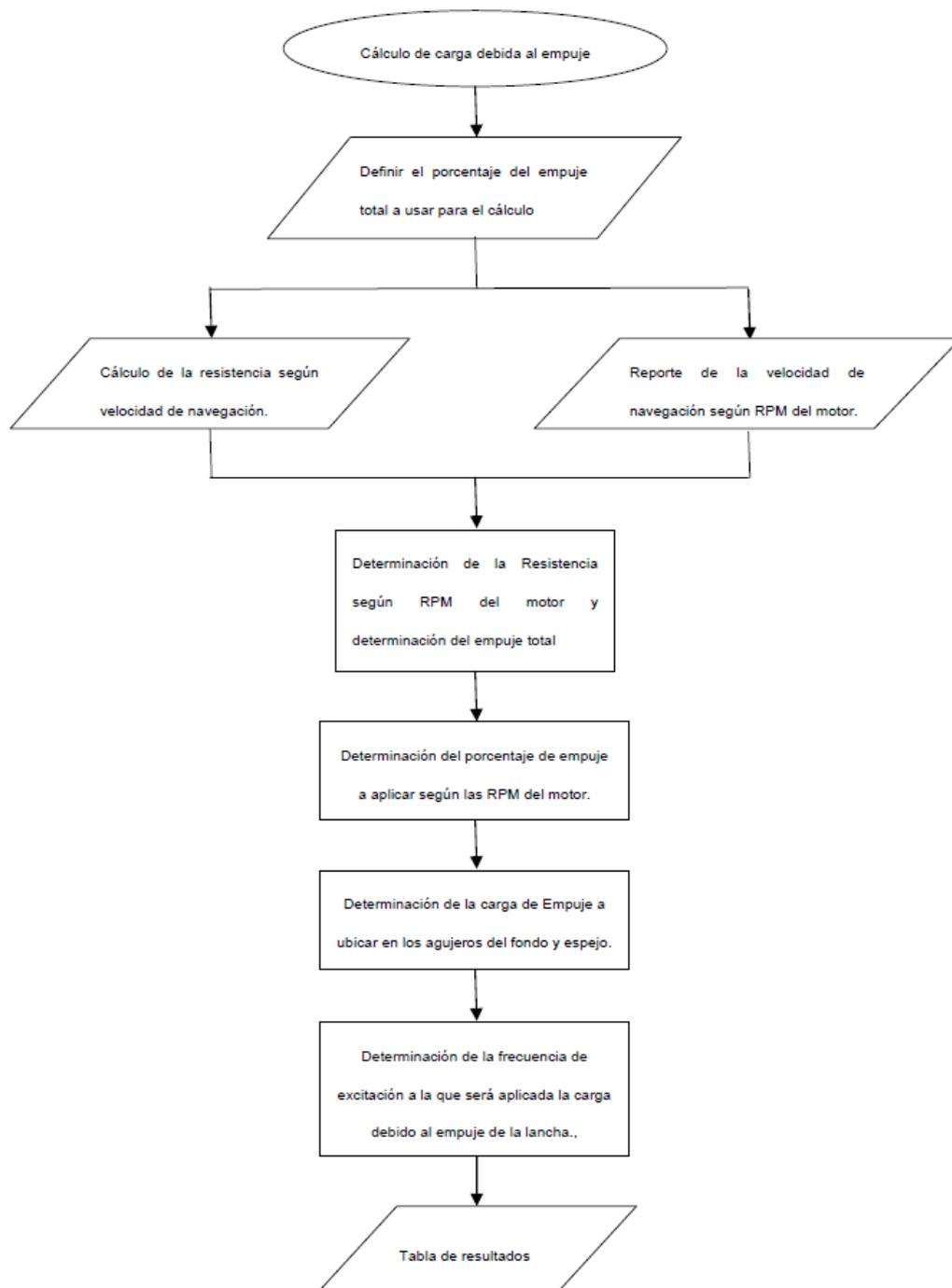


Figura No. 12 Estimación de la fuerza vibratoria equivalente al empuje del sistema propulsor, [Fuente: Elaboración Propia].

En el presente caso se considera que se tienen 2 sistemas propulsores con chorro de agua. Además que las fuerzas vibratorias se transmiten a la estructura a través de un número finito de nodos. Una vez realizados los cálculos, los cuales se muestran de manera detallada en el anexo del presente documento, se obtiene la siguiente tabla de resultados:

				Nodos_Espejo	Nodos_Fondo		
				112	86		
	Fuerza Total	Carga total Espejo	Carga Total Fondo				
RPM Motor	10% (T/2) [Kg]	10% (T/2)/2 [Kg]	10% (T/2)/2 [Kg]	Fuerza_E/No.Nodos [Kg]	Fuerza_F/No.Nodos [Kg]	f _{excitación}	
2000	102.74	51.37	51.37	0.459	0.597	108.3	
2150	143.38	71.69	71.69	0.640	0.834	116.5	
2300	156.13	78.07	78.07	0.697	0.908	124.6	
2450	101.26	50.63	50.63	0.452	0.589	132.7	
2600	94.13	47.06	47.06	0.420	0.547	140.8	

Tabla No. V Resumen de datos obtenidos para el cálculo de la carga debida al empuje, [Fuente: Elaboración Propia].

De la Tabla No. V se usan los valores que se encuentran en las columnas “Fuerza_E/No.Nodos”, “Fuerza_F/No.Nodos” y “f_{excitación}”, que son los que definen el valor de la carga aplicada a los nodos de los agujeros del fondo y espejo de la embarcación, así como a las frecuencias a las que actúan.

Fuerza debida al desbalance del impulsor

Para la carga debida al desbalance del impulsor se tomó el 10% de la masa de éste, modelado como una hélice de 3 palas de diámetro $D=29$ [cm] de acero, [13], la cual es mostrada a continuación:



Figura No. 13 Hélice modelo de 3 palas y diámetro $D=29$ [cm], en acero,

[Fuente: Elaboración Propia]

Del modelo realizado se determinó el volumen y con este se calculó la masa, obteniendo que la hélice tiene $masa_{Hélice} = 2.57$ [Kg], y, como se nota que este valor es muy pequeño, entonces la carga debido al desbalance de la hélice será aún más pequeña. Es por esto que se decide despreciar el análisis debido a la carga por desbalance de la hélice, puesto que se presume no producirá esfuerzos importantes en la zona de la lancha analizada.

2.2. MODELACIÓN DE LA CARGA DEBIDA A LA INFLUENCIA DE LA INTERACCIÓN FLUIDO-ESTRUCTURA

El fondo de la lancha analizada, al estar sumergida en agua, soporta el efecto hidrodinámico, denominado masa añadida, generado por la interacción entre la plancha vibrante del fondo con el fluido en la que se encuentra inmersa. Esta masa añadida por unidad de área, tiene un valor resultante de $140.22 \left[\frac{Kg}{m^2} \right]$, que se obtuvo utilizando la ecuación para planchas con refuerzos con bordes empotrados tomados del libro “Added masses of ship structures”, [14], utilizando las dimensiones de un panel de la plancha del fondo de la embarcación. Este valor será añadido a la masa propia de la plancha del fondo de la lancha en la zona analizada.

Cuando una estructura se mueve en forma oscilatoria en un fluido, se desarrolla una fuerza hidrodinámica proporcional y opuesta a la aceleración. El coeficiente de proporcionalidad, que se lo llama efecto de Masa añadida, depende de las dimensiones de la estructura que está siendo analizada además de la densidad del medio en el que está oscilando, y de la forma de la sección que se encuentra en movimiento.

En el presente caso la plancha del fondo de la lancha al estar vibrando debido a las cargas del motor y del chorro de agua, genera un efecto de

masa añadida, que es calculado con la ecuación tomada del libro “Added masses of ship structures” en la página 265:

$$m = \mu \left(\frac{l}{nb} \right) \frac{l}{n} (\rho + \rho_1) \left[\frac{Kg}{m^2} \right] \quad \text{Ec. 1}$$

donde:

m : Es la masa añadida por unidad de área del elemento planar analizado.

$\mu \left(\frac{l}{nb} \right)$: Es un factor que depende de la relación de dimensiones del panel.

l : Es la longitud del panel analizado.

b : Es el ancho del panel analizado.

n : Es el número de paneles entre refuerzos, en este análisis se toma el caso mínimo de un panel entre refuerzos, $n=1$.

ρ, ρ_1 : Son las densidades del fluido en los lados externo e interno de la plancha analizada. En este caso $\rho_1 = 0$, puesto que del lado interno no hay fluido.

En el presente caso se tienen dos zonas planas vibrando en el agua, la plancha del espejo y la del fondo de la embarcación. La plancha correspondiente al espejo no se verá afectada inercialmente por el efecto de masa añadida, debido a que se encuentra en posición vertical, y fuera del agua durante el planeo.

Para el panel del fondo de 0.38×0.48 [m], se determina el factor $\mu \left(\frac{1}{nb} \right)$, considerando: $l=0.38$, $b=0.48$ y $n=1$, usando la siguiente figura que es para paneles empotrados en los bordes:

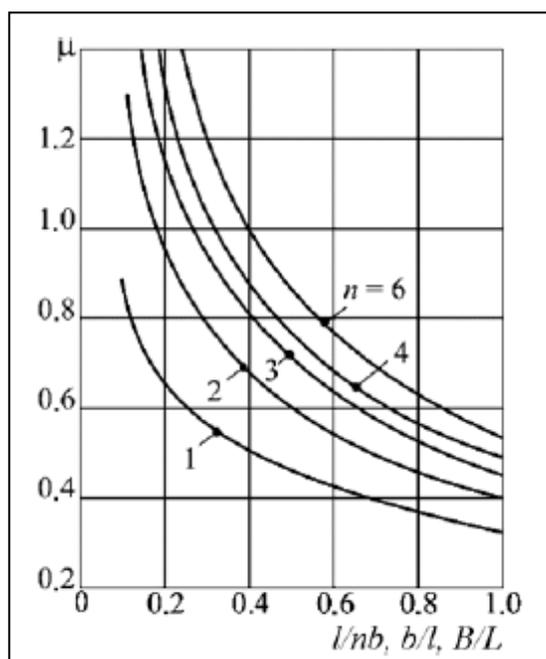


Figura No. 14 Curvas de valores de factor $\mu \left(\frac{1}{nb} \right)$ en función del número de paneles analizados, página 264, [14].

De la Figura No. 14, se obtiene que el valor del factor $\mu\left(\frac{1}{nb}\right) = 0.36$, obteniendo una masa añadida por unidad de área de $140.22 \left[\frac{Kg}{m^2}\right]$. Luego se debe calcular el valor de masa añadida equivalente por unidad de volumen, por lo que se divide este valor para el espesor de la plancha del fondo, $t = 4.76$ [mm], obteniendo:

$$\rho_{añadida} = \left(\frac{m}{A}\right)\frac{1}{t} = 29443 \text{ [Kg/m}^3\text{]}$$

Esta densidad añadida equivalente debe ser agregada al modelo realizado en el análisis estructural, es decir, debe ser agregado en las propiedades del material empleado para la plancha del fondo de la lancha, adicionándole este valor al Aluminio, con lo que se obtiene un total de:

$$\rho_{Total} = \rho_{Aluminio} + \rho_{Masa\ añadida} = 32103 \left[\frac{Kg}{m^3}\right]$$

Tomando en cuenta que para el Aluminio 5086 el valor de la densidad es de $2660 \text{ [kg/m}^3\text{]}$, el valor de densidad añadida corresponde a 11 veces el de la densidad de la plancha del fondo de la estructura. Este valor resulta bastante elevado, y probablemente necesite en el futuro una confirmación experimental.

2.3. VISUALIZACIÓN Y DETERMINACIÓN DE ZONAS DE MÁXIMO ESFUERZO.

Los resultados de las distribuciones de esfuerzos normales muestran que para la carga debida al torque cíclico del motor, el valor máximo se presenta a 2150 RPM. Para la carga debida al empuje cíclico se tiene un esfuerzo máximo también a 2150 RPM. Según estos resultados, se seleccionaron seis detalles estructurales para el análisis de fatiga: i) la plancha del fondo entre los refuerzos longitudinales, bajo el motor; ii) el refuerzo principal longitudinal cerca de la unión entre el fondo y el espejo; iii) el planchaje del fondo bajo el refuerzo principal del costado, en la unión con la discontinuidad en dirección hacia popa; iv) el planchaje del fondo bajo el refuerzo principal hacia la quilla, en la unión con la discontinuidad en dirección hacia popa; v) el planchaje superior del borde del agujero de sujeción del ducto en el espejo, y, vi) el planchaje del fondo bajo el refuerzo principal hacia la quilla, cercano a la popa. Debe notarse que las amplitudes de respuesta, dada la presencia del amortiguamiento, son de tipo complejo (Parte real e imaginaria).

Una vez que se aplican al modelo estructural las cargas cíclicas debidas al torque del motor y al empuje del propulsor, por separado, se obtienen las diferentes distribuciones de esfuerzos a cada frecuencia analizada. Con estos valores se puede determinar en qué zonas de la estructura analizada se presentan los mayores esfuerzos y en donde se procederá en el capítulo

final a estimar la vida útil del detalle estructural considerando el fenómeno de fatiga. Los valores de esfuerzos considerados fueron solo los de tipo normal, puesto que los cortantes tenían un valor muy bajo en comparación con los primeros.

Distribución de esfuerzos debido al torque cíclico

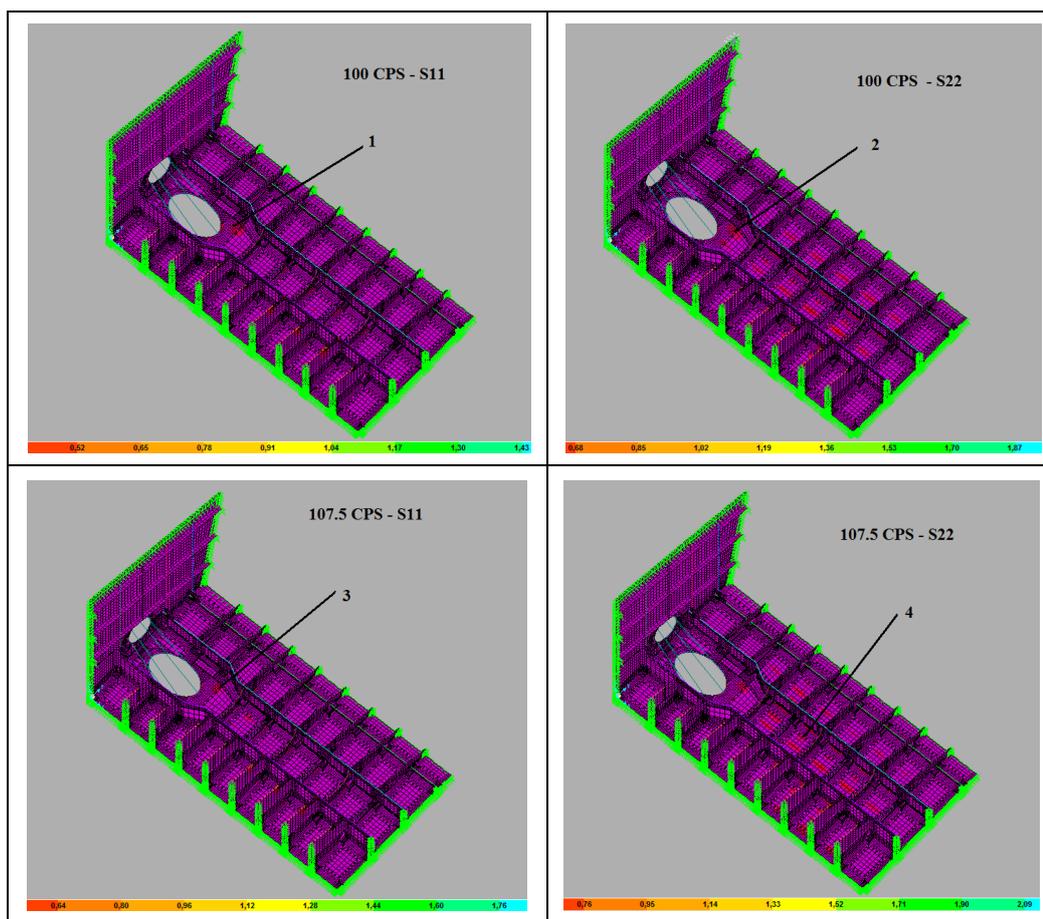
Una vez aplicada la carga debido al torque cíclico del motor a las diferentes frecuencias, se tienen los siguientes resultados para el esfuerzo normal:

Carga debida a Torque del motor						
Ítem	N_motor RPM	f_Excitación CPS	Nodo	Dirección	Esfuerzo [Kg/cm ²]	Zona
1	2000	100.0	6440	S11	6.34E-2	Plancha en la zona posterior cerca del refuerzo principal del costado.
2			6440	S22	4.46E-2	Plancha en la zona posterior cerca del refuerzo principal del costado.
3	2150	107.5	6440	S11	8.07E-2	Plancha en la zona posterior cerca del refuerzo principal del costado.
4			122-16	S22	4.30E-1	Plancha del fondo entre refuerzos principales bajo el motor.
5	2300	115.0	122-16	S11	5.80E-2	Plancha del fondo entre refuerzos principales bajo el motor.
6			122-16	S22	-1.90E-1	Plancha del fondo entre refuerzos principales bajo el motor.
7	2450	122.5	13738	S11	3.15E-1	Plancha del fondo entre el refuerzo principal longitudinal del costado y el refuerzo longitudinal secundario.
8			13738	S22	3.12E-1	Plancha del fondo entre el refuerzo principal longitudinal del costado y el refuerzo longitudinal secundario.
9	2600	130.0	122-16	S11	-8.47E-1	Plancha del fondo entre refuerzos principales bajo el motor.
10			122-16	S22	2.80E-1	Plancha del fondo entre refuerzos principales bajo el motor.

Tabla No. VI Zonas de máximos esfuerzos normales para carga cíclica debida al torque del motor, (Carga nodal de 1 [Kg]),

[Fuente: Elaboración Propia].

En la Tabla No. VI se puede observar la dirección del esfuerzo normal extremo (S11 para dirección longitudinal, y S22 para dirección transversal) y la zona en la que se presenta, para las diferentes velocidades de rotación del motor a las que fueron analizadas las cargas, con la respectiva frecuencia de excitación. En la columna “Ítem” se muestra el numeral de la zona a la que corresponde el esfuerzo mostrado, el cual se observa en las gráficas que se muestran a continuación.



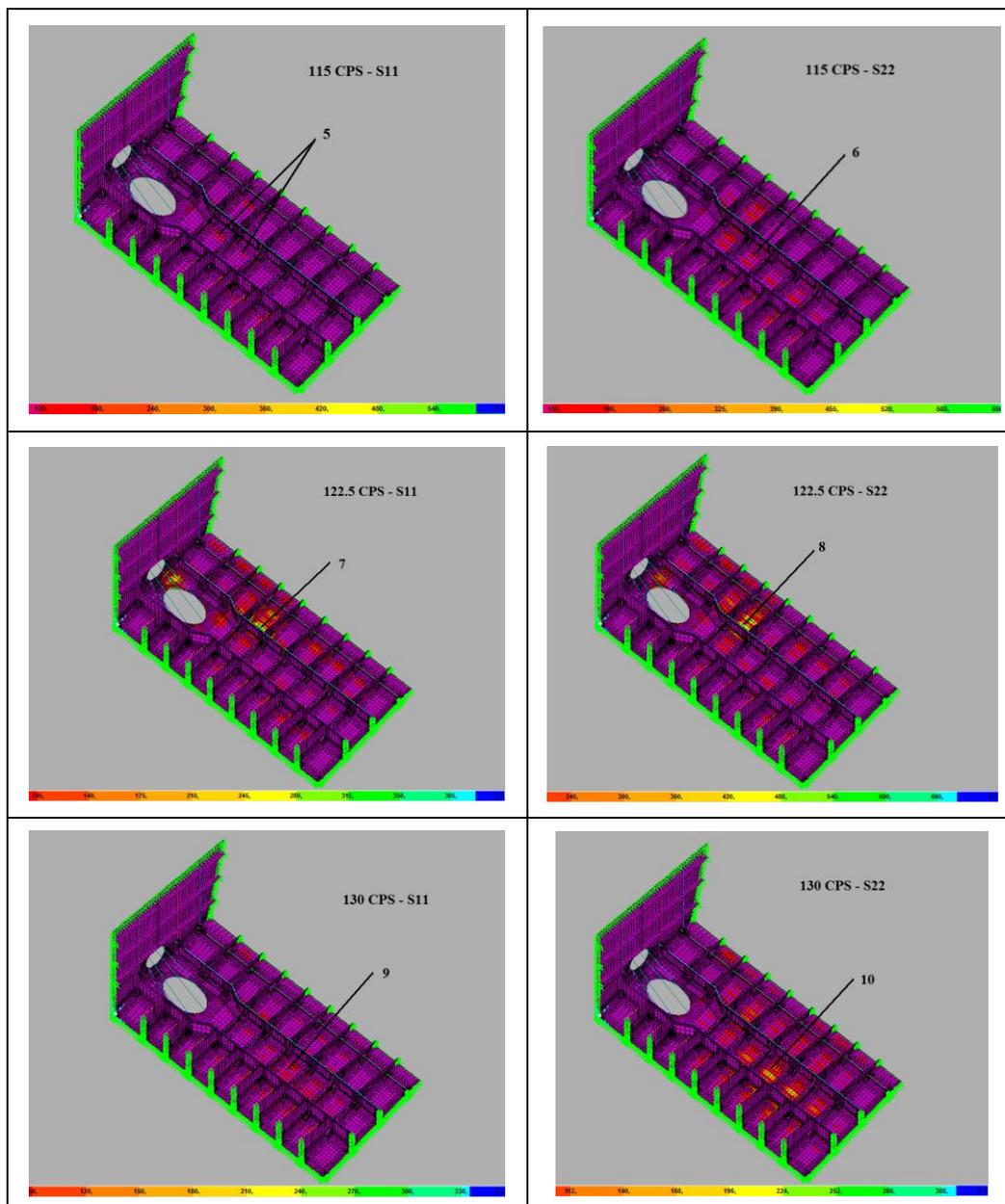


Figura No. 15 Zonas de máximo esfuerzo según frecuencia de excitación y dirección para carga de torque de motor cíclico,

[Fuente: Elaboración Propia].

De la Tabla No. VI y la Figura No. 15 se observa que los mayores esfuerzos se presentan en el planchaje del fondo, cerca del refuerzo principal ubicado hacia el costado, en la discontinuidad dirigida hacia popa; esto se debe al ensanchamiento para ubicar el ducto del chorro de agua. Además también se presenta una zona de esfuerzo de importancia en el planchaje entre los refuerzos principales donde va asentado el motor.

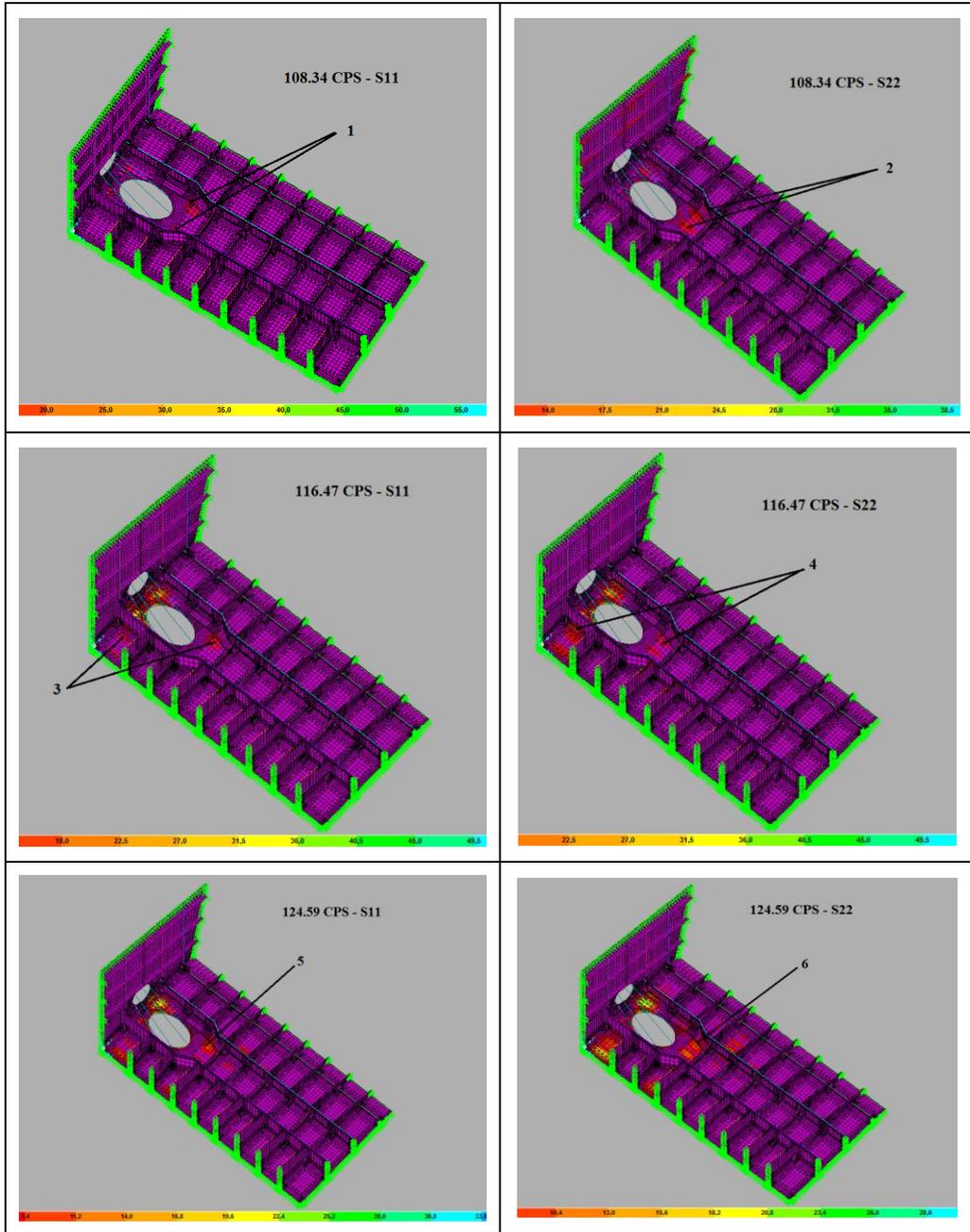
Distribución de esfuerzos debido al empuje cíclico

Luego de aplicar la carga por Empuje cíclico en los bordes de los agujeros del espejo y el fondo a las distintas frecuencias de excitación, se obtiene la siguiente tabla de resultados:

Carga debida a empuje						
Ítem	N_motor RPM	f_Excitación CPS	Nodo	Dirección	Esfuerzo [Kg/cm2]	Zona
1	2000	108.34	6440	S11	-2.24	Plancha en la zona posterior cerca del refuerzo principal del costado.
2			6440	S22	-2.07	Plancha en la zona posterior cerca del refuerzo principal del costado, y cerca del refuerzo principal hacia la quilla.
3	2150	116.47	6440	S11	-3.75	Plancha en la zona posterior cerca del refuerzo principal del costado.
4			5452	S22	4.89	Plancha en la zona posterior cerca del refuerzo principal del costado.
5	2300	124.59	6440	S11	-1.21	Plancha en la zona posterior cerca del refuerzo principal del costado.
6			5452	S22	2.40	Plancha en la zona posterior cerca del refuerzo principal del costado.
7	2450	132.72	6440	S11	2.35	Plancha en la zona posterior cerca del refuerzo principal del costado.
8			5452	S22	-2.77	Plancha en la zona posterior cerca del refuerzo principal del costado.
9	2600	140.85	122-16	S11	2.83	Plancha en la zona donde se asienta el motor entre los refuerzos longitudinales.
10			122-16	S22	1.43	Plancha en la zona donde se asienta el motor entre los refuerzos longitudinales.

Tabla No. VII Zonas de máximos esfuerzos normales por carga de empuje cíclico, (Carga nodal de 1 [Kg]), [Fuente: Elaboración Propia].

Las zonas de esfuerzos máximos normales mostradas en la Tabla No. VII se pueden observar en la siguiente gráfica:



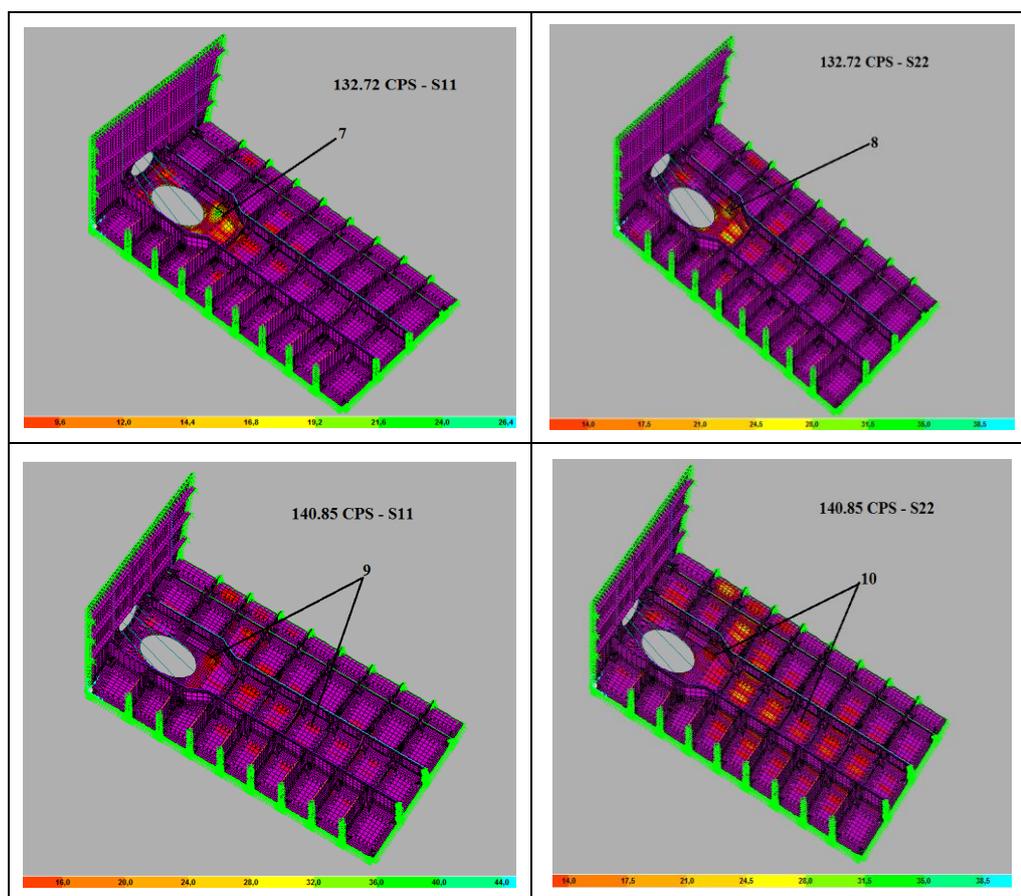


Figura No. 16 Zonas de máximo esfuerzo normal para carga de empuje cíclico, [Fuente: Elaboración Propia].

En la Figura No. 16 se observa que existe similitud en las zonas de máximo esfuerzo entre el presente y el caso de carga debida a torque cíclico. Para la presente carga aplicada, los valores máximos se presentan en el planchaje de la zona de popa cerca de los refuerzos principales y en la zona del planchaje del fondo donde va asentado el motor.

Entonces, de las distribuciones de esfuerzo a las diferentes velocidades y para las dos excitaciones consideradas, se procede a determinar los detalles estructurales que se analizarán en fatiga. Dichos elementos seleccionados son:

1. La plancha del fondo que se encuentra entre los refuerzos longitudinales principales, a la altura del motor.
2. El refuerzo principal longitudinal del fondo, cercano a la quilla, cerca de la escuadra que une el fondo con el espejo.
3. El planchaje del fondo que se encuentra bajo el refuerzo principal longitudinal del costado, en unión con la discontinuidad, hacia popa.
4. El planchaje del fondo que se encuentra bajo el refuerzo principal longitudinal hacia la quilla, en unión con la discontinuidad, hacia popa.
5. El planchaje superior del borde del agujero de sujeción del ducto en el espejo.
6. El planchaje del fondo, bajo el refuerzo longitudinal principal hacia la quilla, cercano a la popa

Estos seis detalles estructurales se muestran en la siguiente figura.

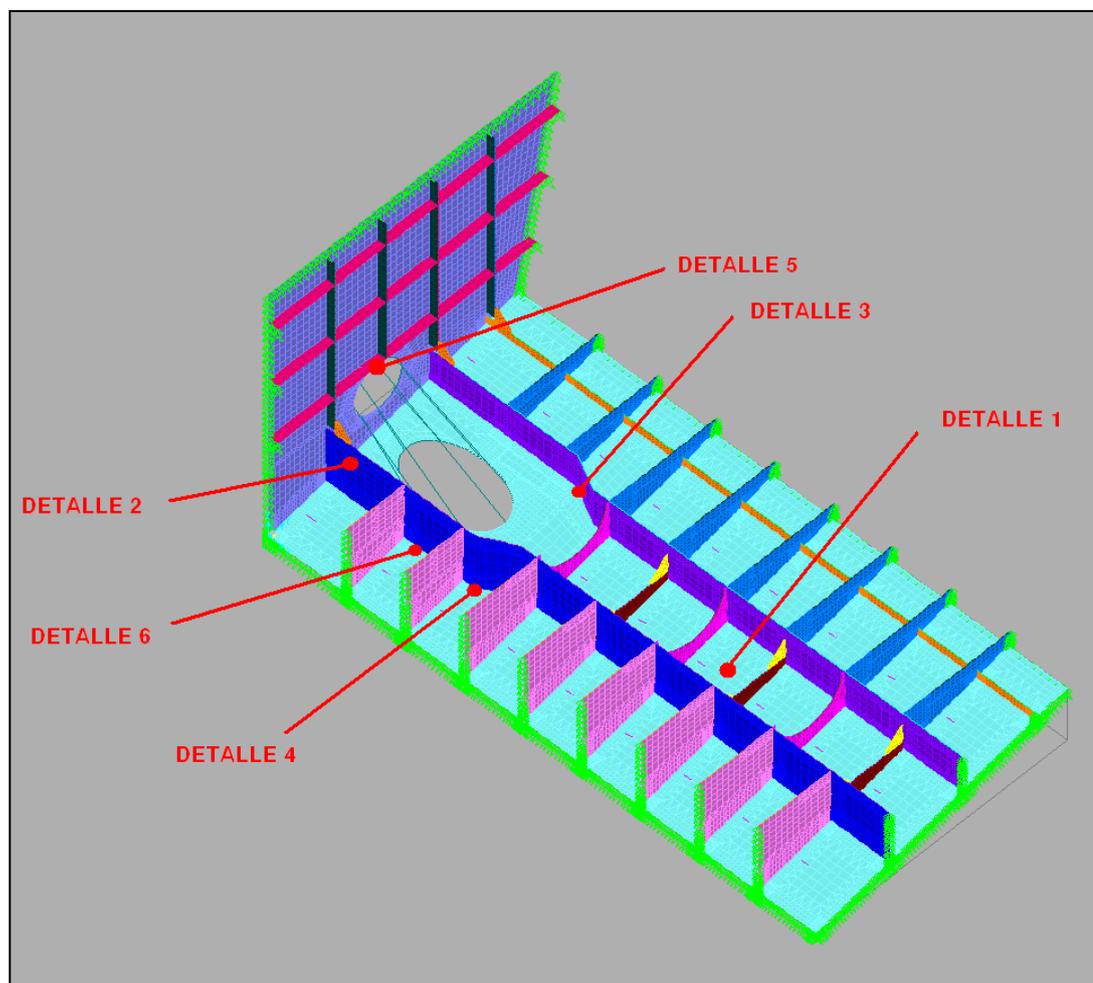
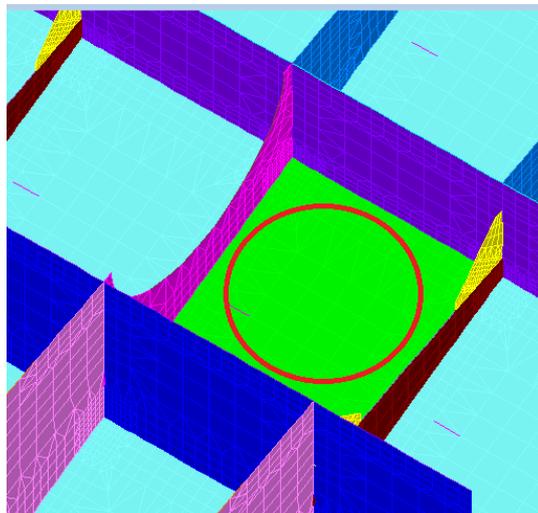


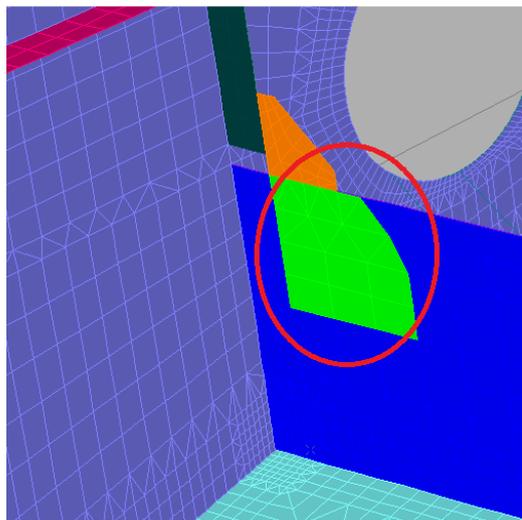
Figura No. 17 Detalles estructurales seleccionados del modelo principal,
[Fuente: Elaboración Propia].

En la siguiente figura se muestran los detalles seleccionados por separado:

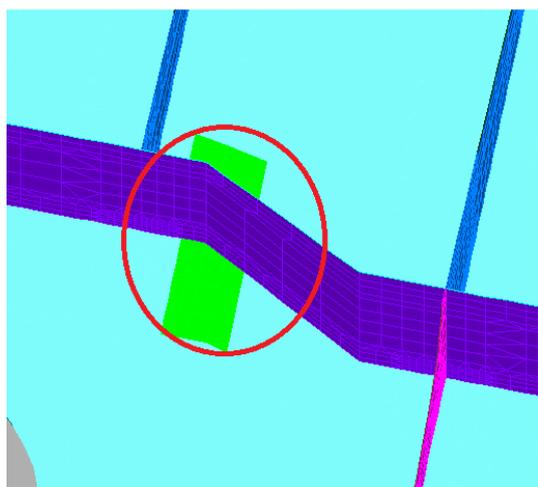
DETALLE 1



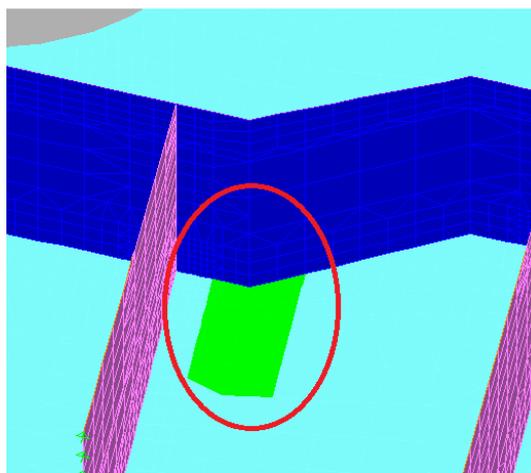
DETALLE 2



DETALLE 3



DETALLE 4



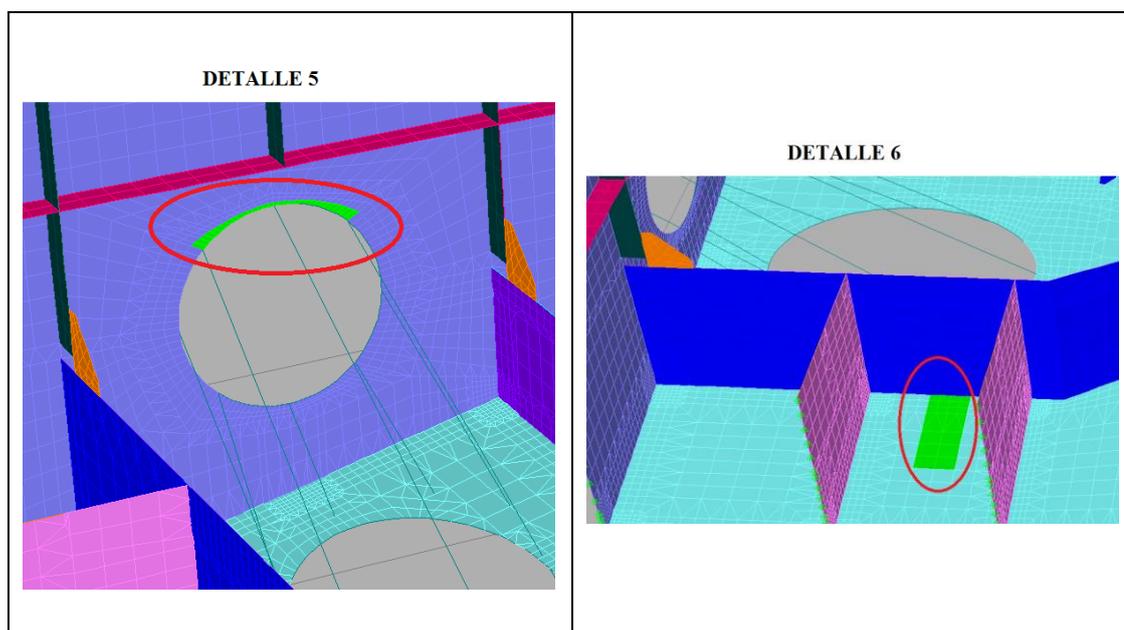


Figura No. 18 Detalles estructurales seleccionados,

[Fuente: Elaboración Propia]

Estos son los detalles de donde se tomarán las distribuciones de esfuerzos producto de las cargas cíclicas analizadas.

2.4. CÁLCULO DE ESFUERZOS EN LOS PUNTOS DE CONCENTRACIÓN

En el fondo de la lancha analizada se ha realizado un análisis estructural aplicando cargas cíclicas asumidas de 1 [Kg], generadas por el torque del motor y por el empuje del propulsor. Debido a que se está trabajando en el campo lineal, estos valores fueron modificados con un factor de corrección proporcional entre la carga asumida aplicada en cada nodo y la carga real para obtener el esfuerzo real (Complejo) en los detalles. De estos resultados se determina que el mayor esfuerzo se produce para la carga cíclica debida al torque del motor, en el “Detalle 1”, a una frecuencia de 107.5 CPS con un valor de 23.7 [Kg/cm²]. Para la carga debida al empuje se obtiene que en el máximo esfuerzo se presenta en el “Detalle 5” a una frecuencia de excitación de 108.34 CPS con un valor de 11.9 [Kg/cm²]. Además, se obtiene que en general la carga debida al empuje genera esfuerzos menores en comparación con los obtenidos debidos a la carga del torque cíclico del motor.

Una vez que se obtienen tablas de resultados en las que se muestran las distribuciones de esfuerzos y fuerzas, para determinar los máximos esfuerzos en los detalles seleccionados en el subcapítulo 2.3, se realiza el siguiente procedimiento, dependiendo si es tipo plancha o detalle de soldadura. En los primeros el valor extremo se toma directamente de los

resultados de las distribuciones de esfuerzo; para los detalles estructurales se debe determinar primero el esfuerzo nominal, el que multiplicado por un factor de corrección de esfuerzo producirá el “Hot spot stress” que servirá para el análisis de fatiga.

Para determinar los esfuerzos a utilizar para posteriormente calcular el tiempo de vida útil del fondo de la lancha se sigue el siguiente proceso:

- 1) Se determinan los máximos esfuerzos, dependiendo de si las distribuciones son de tipo axial o flexional, y de si son para detalles de soldadura o de tipo plancha, por lo que se realiza lo siguiente:

PARA DETALLES TIPO PLANCHA

Estos detalles pueden estar sometidos a dos tipos diferentes de carga, los cuales pueden ser de tipo axial o flexional, por lo que sigue el siguiente procedimiento:

Para una distribución de esfuerzos de tipo axial

En este caso, los esfuerzos en ambas caras de la plancha se asemejan entre sí.

- a) Se toman los componentes reales e imaginarios de los esfuerzos axiales, en [Kg/cm²], generados en ambos lados de los elementos **SHELL**, debidos a las carga asumidas de 1 [Kg], y se obtuvo el valor promedio para cada componente.

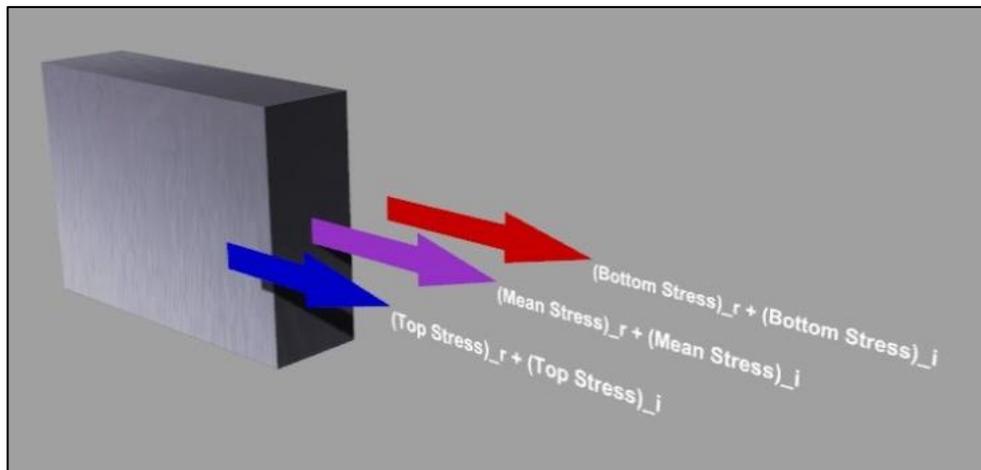


Figura No. 19 Esfuerzo axial real e imaginario actuando sobre un elemento **SHELL**, [Fuente: Elaboración Propia].

- b) Luego se obtiene el módulo del esfuerzo en los elementos que conforman el detalle analizado usando la ecuación:

$$\sigma_{Total} = \sqrt{(\sigma_{Real\ promedio})^2 + (\sigma_{Imaginario\ promedio})^2} \quad \text{Ec. 2}$$

- c) Después, una vez obtenidos los esfuerzos netos, se determina el máximo esfuerzo generado en el detalle analizado, como se muestra en el ejemplo en la Figura No. 20. Este proceso fue realizado para cada carga aplicada a las distintas frecuencias de excitación.

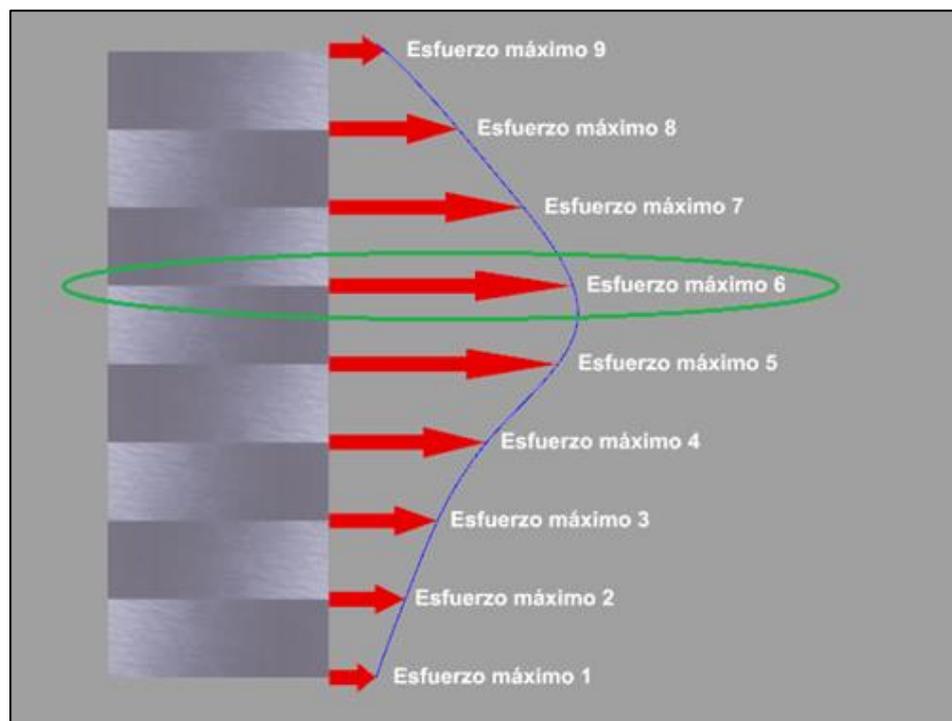


Figura No. 20 Esfuerzos en los elementos que forman los detalles con el respectivo esfuerzo máximo, [Fuente: Elaboración Propia].

Para una distribución de esfuerzos de tipo flexional

En este caso los valores de los esfuerzos en las caras de la plancha son opuestos entre sí.

- a) Para las cargas de tipo flexional se toman las componentes del esfuerzo real e imaginario, generados en los elementos `SHELL`, debidos a las carga asumidas de 1 [Kg], y se obtiene el módulo del esfuerzo neto en cada lado del elemento analizado.

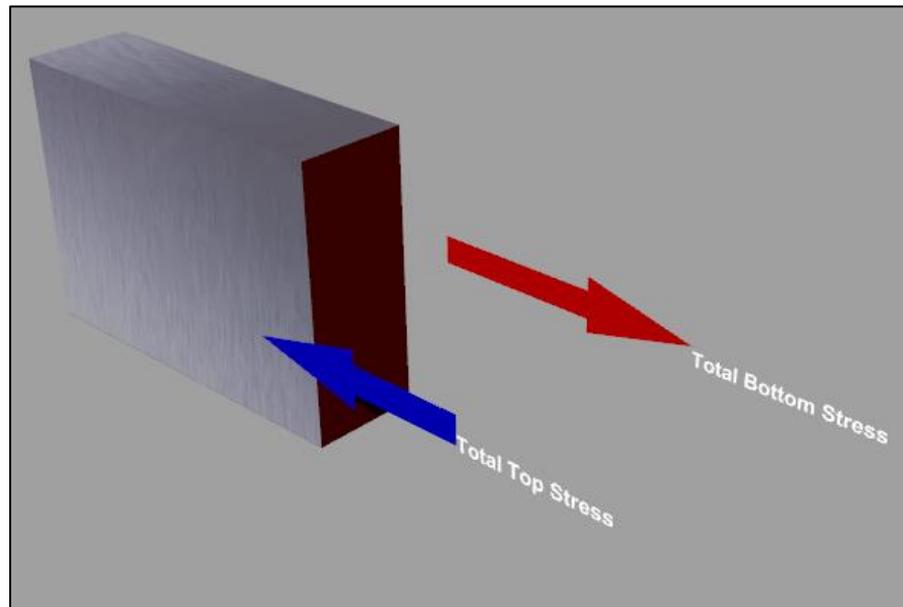


Figura No. 21 Esfuerzo total actuando a cada lado, sobre un elemento `SHELL`, [Fuente: Elaboración Propia].

- b) Luego se selecciona el máximo esfuerzo de entre los valores obtenidos para el lado inferior y superior de la plancha.
- c) Finalmente se realiza la misma acción para todos los elementos que conforman cada detalle y se selecciona el que genera el máximo esfuerzo. Este valor es considerado como el máximo esfuerzo del detalle como se muestra en la Figura No. 20. Este proceso fue realizado para cada carga aplicada a las distintas frecuencias de excitación.

PARA DETALLES DE SOLDADURA

Estos detalles pueden estar representados de dos maneras, con elementos `SHELL` y con elementos `FRAME`. Estos últimos se emplearon para modelar el ala de los refuerzos de la estructura. Los esfuerzos fueron determinados según se menciona a continuación:

- a) De la misma forma que en los detalles de tipo plancha, estos detalles pueden soportar dos tipos de carga, las cuales pueden ser axiales o flexionales, siendo la diferencia que para los detalles de soldadura no se determina el máximo esfuerzo, sino el esfuerzo nominal. Debido a esto el proceso de determinación de esfuerzos es el mismo, y la

diferencia se nota al momento de calcular el esfuerzo en el punto de concentración.

- b) Una vez obtenidos los máximos esfuerzos para cada elemento, de la misma manera que en los detalles de tipo plancha, se toma el valor del esfuerzo en las zonas circundantes del esfuerzo máximo, cuando su valor se estabiliza como se muestra en la Figura No. 22. A este esfuerzo se le conocerá como Nominal:

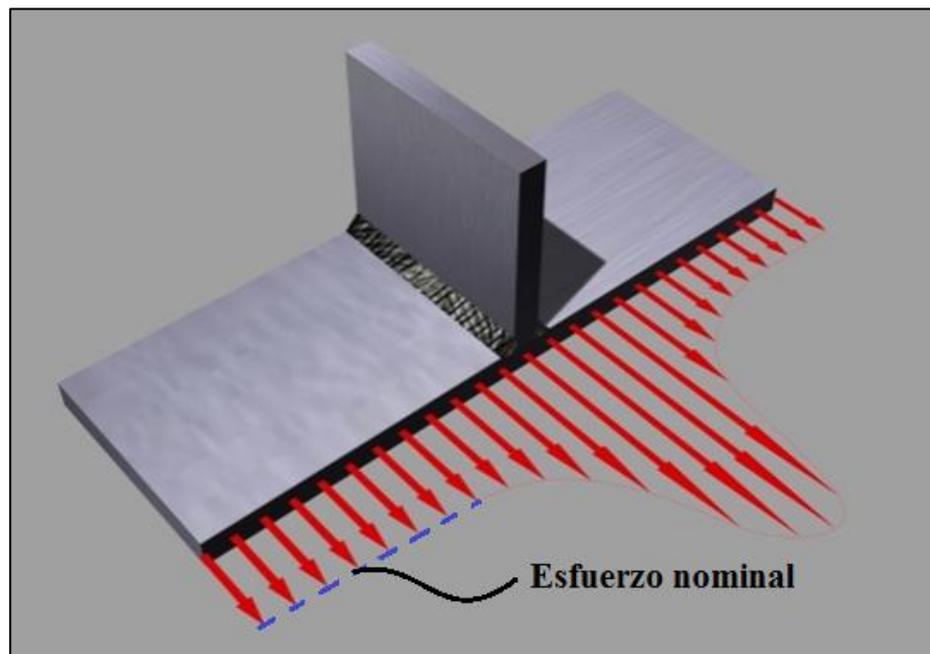


Figura No. 22 Detalle de soldadura con distribución de esfuerzos, esfuerzo crítico y esfuerzo nominal, [Fuente: Elaboración Propia].

En caso de tratarse de elementos de tipo `FRAME`, se realiza el mismo procedimiento, dividiendo las fuerzas axiales resultantes para el área de la sección del elemento.

Según el tipo de detalle y de elementos que lo conforman, se tiene la siguiente tabla:

ITEM	Tipo	Elemento
Detalle 1	Plancha	Shell
Detalle 2	Soldadura	Frame
Detalle 3	Soldadura	Shell
Detalle 4	Soldadura	Shell
Detalle 5	Plancha	Shell
Detalle 6	Soldadura	Shell

Tabla No. VIII Tipos de detalles seleccionados y tipos de elementos que lo conforman, [Fuente: Elaboración Propia]

Los valores obtenidos para los máximos esfuerzos tomados del programa SAP2000 según el tipo de detalle estructural a las distintas frecuencias, para los dos tipos de cargas cíclicas asumidos, son los siguientes:

	N_motor [RPM]	Carga cíclica del torque del motor			Carga cíclica del empuje del propulsor		
		f_Excitación [CPS]	Dirección longitudinal [Kg/cm2]	Dirección transversal [Kg/cm2]	f_Excitación [CPS]	Dirección longitudinal [Kg/cm2]	Dirección transversal [Kg/cm2]
DETALLE 1	2000	100.00	1.87E-01	4.46E-01	108.34	0.67	0.77
	2150	107.50	2.16E-01	5.07E-01	116.47	0.61	2.09
	2300	115.00	8.09E-02	1.91E-01	124.60	0.75	0.97
	2450	122.50	1.45E-01	2.69E-01	132.73	0.93	3.81
	2600	130.00	1.30E-01	2.91E-01	140.86	6.03	15.60
DETALLE 2	2000	137.50	2.87E-03	---	108.34	0.20	---
	2150	145.00	1.43E-03	---	116.47	0.05	---
	2300	152.50	2.22E-03	---	124.60	0.03	---
	2450	160.00	1.52E-03	---	132.73	0.08	---
	2600	167.50	1.79E-04	---	140.86	0.12	---
DETALLE 3	2000	100.00	1.11E-02	1.23E-01	108.34	1.13	0.56
	2150	107.50	1.87E-02	1.13E-01	116.47	2.23	3.00
	2300	115.00	8.30E-03	3.55E-02	124.60	1.54	1.79
	2450	122.50	2.08E-02	5.40E-02	132.73	1.54	0.97
	2600	130.00	6.66E-03	8.95E-03	140.86	3.11	4.47
DETALLE 4	2000	137.50	1.35E-02	2.48E-02	108.34	0.84	1.12
	2150	145.00	1.29E-02	2.65E-02	116.47	0.89	1.19
	2300	152.50	3.44E-03	9.13E-03	124.60	0.95	1.84
	2450	160.00	1.77E-03	1.11E-02	132.73	1.01	2.85
	2600	167.50	1.52E-03	1.12E-03	140.86	1.18	1.00
DETALLE 5	2000	100.00	1.28E-01	4.45E-02	108.34	22.81	7.71
	2150	107.50	4.01E-01	1.40E-01	116.47	4.00	1.24
	2300	115.00	6.43E-02	2.15E-02	124.60	2.80	0.88
	2450	122.50	1.68E-02	5.28E-03	132.73	3.36	1.03
	2600	130.00	4.48E-03	1.56E-03	140.86	4.34	1.33
DETALLE 6	2000	100.00	9.54E-03	1.62E-02	108.34	0.45	1.23
	2150	107.50	9.28E-03	2.11E-02	116.47	0.46	1.15
	2300	115.00	2.89E-03	8.11E-03	124.60	0.48	2.47
	2450	122.50	9.85E-03	1.60E-02	132.73	0.62	3.83
	2600	130.00	4.44E-03	6.25E-03	140.86	0.73	1.55

Tabla No. IX Esfuerzos resultantes, en dirección longitudinal y transversal,
debido a cargas cíclicas nodales aplicadas de 1 [Kg],

[Fuente: Elaboración Propia].

- 2) Se deben utilizar los factores de corrección, proporcionales a la carga asumida de 1 [Kg] y la carga real en cada nodo para obtener los esfuerzos reales, mostrados en Tabla No. X:

	Motor	Empuje
N_motor [RPM]	FC Carga	FC Carga
2000	44.71	0.52
2150	46.81	0.72
2300	48.64	0.79
2450	50.23	0.51
2600	51.62	0.48

Tabla No. X Tabla de factores de corrección debidos a tipo de carga,

[Fuente: Elaboración Propia]

Una vez realizadas las correcciones se tienen los siguientes valores para esfuerzos reales, según el tipo de carga para cada detalle analizado:

	N_motor [RPM]	Carga cíclica del torque del motor			Carga cíclica del empuje del propulsor		
		f_Excitación [CPS]	Dirección longitudinal	Dirección transversal	f_Excitación [CPS]	Dirección longitudinal	Dirección transversal
			Esfuerzo Real [Kg/cm2]	Esfuerzo Real [Kg/cm2]		Esfuerzo Real [Kg/cm2]	Esfuerzo Real [Kg/cm2]
DETALLE 1	2000	100.00	8.37	19.96	108.34	0.35	0.40
	2150	107.50	10.13	23.73	116.47	0.44	1.51
	2300	115.00	3.94	9.29	124.60	0.59	0.77
	2450	122.50	7.27	13.50	132.73	0.47	1.95
	2600	130.00	6.73	15.00	140.86	2.89	7.49
DETALLE 2	2000	137.50	0.13	---	108.34	0.10	---
	2150	145.00	0.07	---	116.47	0.04	---
	2300	152.50	0.11	---	124.60	0.03	---
	2450	160.00	0.08	---	132.73	0.04	---
	2600	167.50	0.01	---	140.86	0.06	---
DETALLE 3	2000	100.00	0.50	5.50	108.34	0.59	0.29
	2150	107.50	0.87	5.30	116.47	1.60	2.16
	2300	115.00	0.40	1.73	124.60	1.22	1.41
	2450	122.50	1.05	2.71	132.73	0.78	0.49
	2600	130.00	0.34	0.46	140.86	1.49	2.15
DETALLE 4	2000	137.50	0.60	1.11	108.34	0.43	0.58
	2150	145.00	0.60	1.24	116.47	0.64	0.86
	2300	152.50	0.17	0.44	124.60	0.75	1.46
	2450	160.00	0.09	0.56	132.73	0.51	1.46
	2600	167.50	0.08	0.06	140.86	0.57	0.48
DETALLE 5	2000	100.00	5.73	1.99	108.34	11.86	4.01
	2150	107.50	18.76	6.56	116.47	2.88	0.89
	2300	115.00	3.13	1.04	124.60	2.21	0.69
	2450	122.50	0.85	0.27	132.73	1.71	0.53
	2600	130.00	0.23	0.08	140.86	2.08	0.64
DETALLE 6	2000	100.00	0.43	0.72	108.34	0.23	0.64
	2150	107.50	0.43	0.99	116.47	0.33	0.83
	2300	115.00	0.14	0.39	124.60	0.38	1.95
	2450	122.50	0.49	0.80	132.73	0.31	1.95
	2600	130.00	0.23	0.32	140.86	0.35	0.75

Tabla No. XI Esfuerzos reales corregidos, en dirección longitudinal y transversal, debido a cargas cíclicas aplicadas, [Fuente: Elaboración Propia].

De la tabla anterior se observan los valores de esfuerzos con dos colores, siendo el amarillo para esfuerzos de tipo axial y el color verde para el tipo flexional, lo que nos servirá para realizar una corrección y obtener el esfuerzo de fatiga, en el Capítulo 3.

CAPITULO 3

Cálculo de la Vida útil del fondo de la embarcación

3.1. ESTIMACIÓN DE LA CURVA ESFUERZO-VIDA.

Para el análisis de fatiga del fondo de la lancha Guayas, se selecciona las curvas de Esfuerzo-Vida, S-N, para la aleación de aluminio 5086 publicados en el EUROCODE. En el presente trabajo se han seleccionado las curvas S-N de acuerdo al tipo de detalle (plancha, y de unión de soldadura, descritos en el Capítulo 2), sometidos a carga de tipo flexional y axial, publicadas en la referencia mencionada.

Para determinar la vida útil del fondo de la lancha analizada, se debe disponer de las curvas de Esfuerzo-Vida, S-N, que se ajusten al material, geometría y carga de los detalles analizados previamente. Para esto se utiliza como referencia el documento “Eurocode 9: Design of aluminum structures”, [15], en el cual se pueden encontrar varias curvas para algunos tipos de detalles estructurales, sometidos a carga de tipo cíclico axial. Analizando los detalles mostrados en la referencia mencionada, se seleccionan aquellos que tengan una mayor similitud con los detalles referenciales obtenidos en el subcapítulo 2.3, tomados del Anexo J.

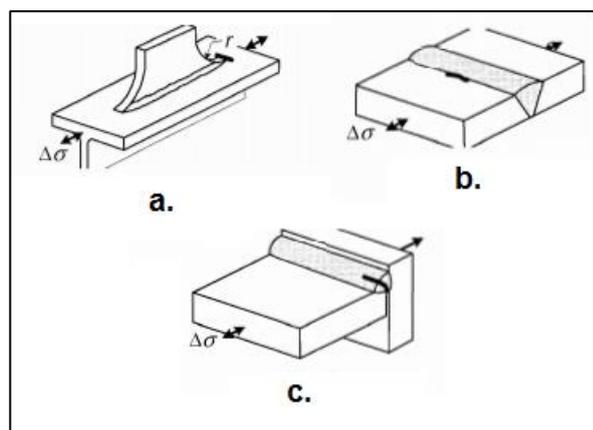


Figura No. 23 Detalles de referencia tomados para selección de curvas de Esfuerzo-Vida, [15].

Relacionando los detalles de la Figura No. 23, con los detalles seleccionados para el presente trabajo, en la Figura No. 18, se tienen las siguientes correspondencias:

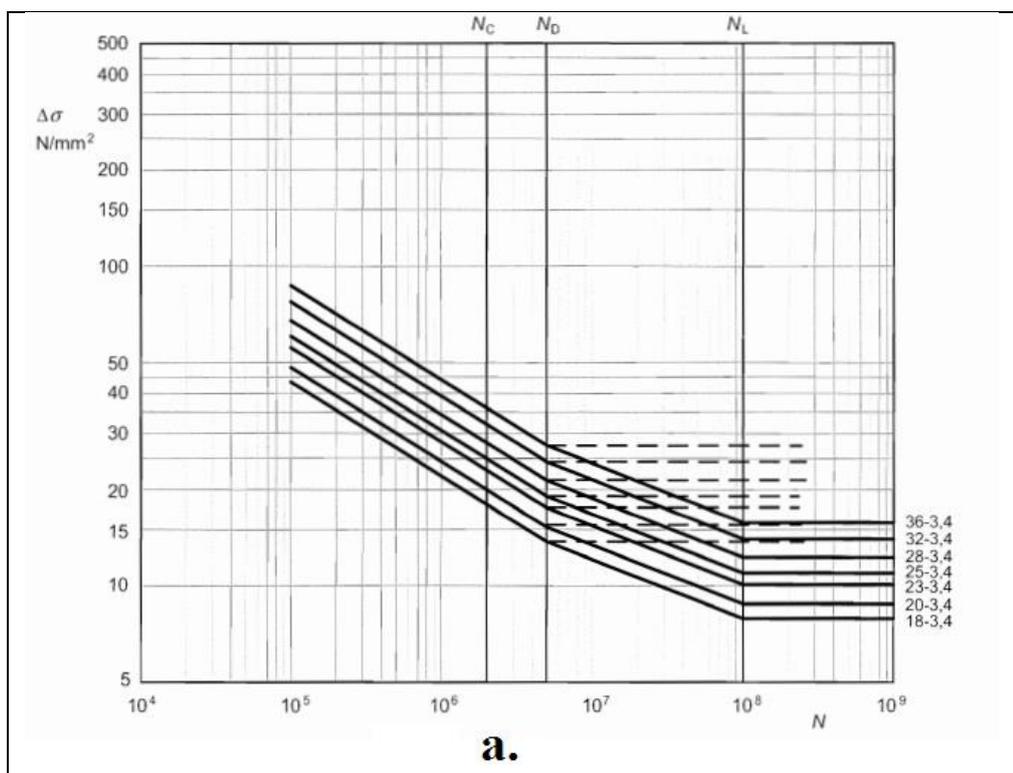
EUROCODES	Referencia	Detalle referencial
a.	Tabla J.3 – Detalle 3.7	Detalle 2
b.	Tabla J.7 – Detalle 7.4.2	Detalle 1
c.	Tabla J.9 – Detalle 9.3	Detalle 3
		Detalle 4
		Detalle 5
		Detalle 6

Tabla No. XII Correspondencias entre los detalles referenciales seleccionados y del Eurocode 9, [Fuente: Elaboración Propia].

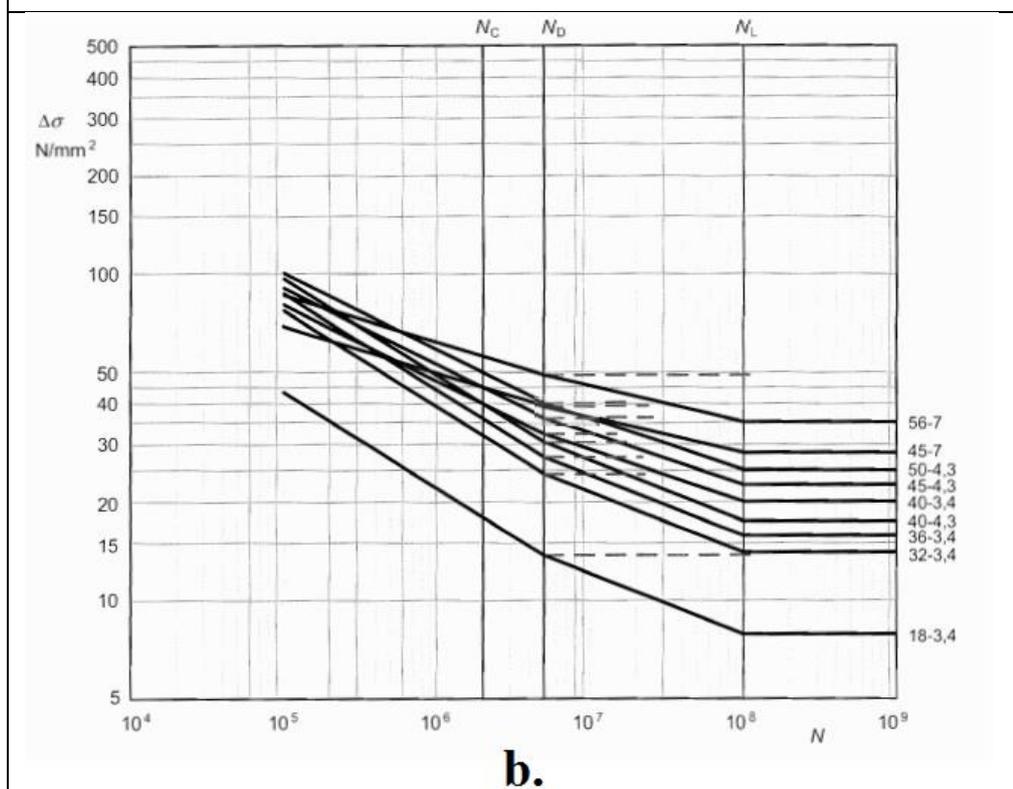
Las curvas correspondientes a los detalles “a”, “b”, y, “c”, sometidas a carga cíclica de tipo Axial, son las correspondientes a las denominaciones “36-3.4”, “40-4.3”, y, “12-3.4”, y, corresponden a:

$$N = k * \Delta\sigma^{\frac{1}{m}} \quad \text{Ec. 3}$$

donde, k y m son valores constantes que dependen del detalle y del tipo de carga aplicada, N es el número de ciclos para la falla, y $\Delta\sigma$ es el rango de esfuerzo cíclico actuante. Estas funciones de tipo exponencial son generalmente graficadas en escalas de tipo logarítmicas, obteniendo rectas, que se muestran a continuación:



a.



b.

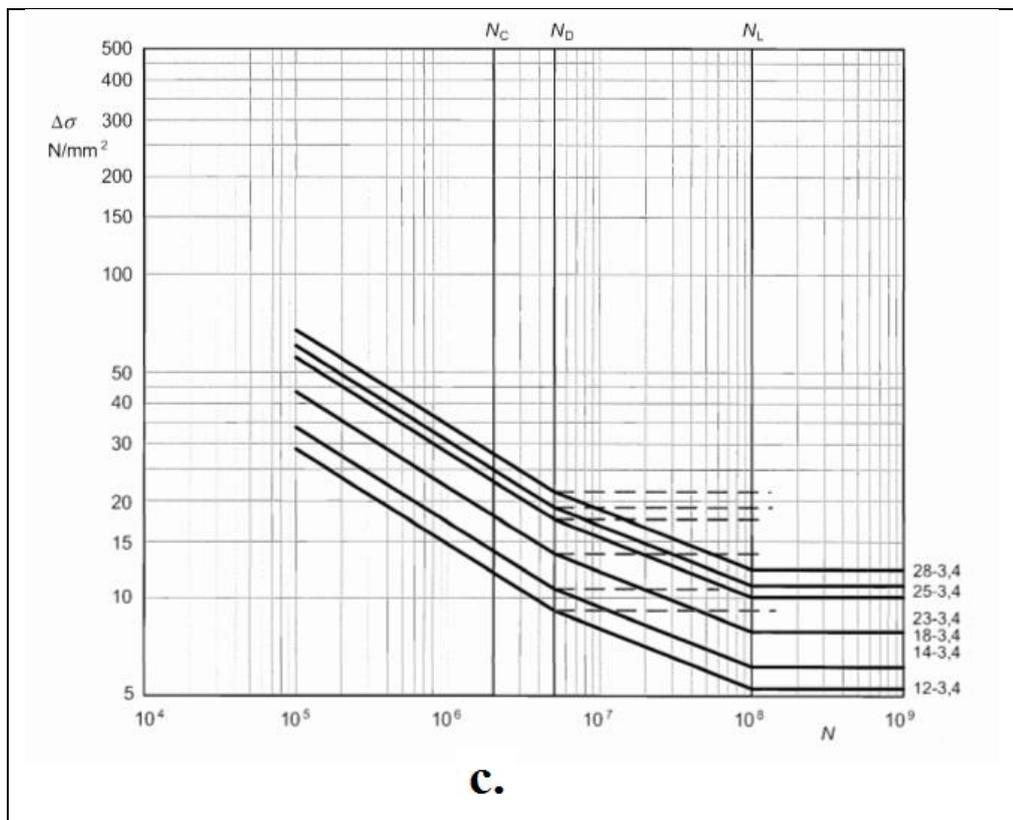


Figura No. 24 Curvas de Esfuerzo-vida para distintos detalles referenciales sometidos a carga cíclica de tipo axial, Anexo J, [15].

Estas curvas se pueden a su vez modificar para analizar los detalles estructurales sometidos a cargas cíclicas de tipo flexional, para lo cual, según la referencia mencionada, se debe “subir cada detalle dos niveles”. Es decir, en caso flexional se debe seleccionar otra curva con mayor exigencia, debido a la forma diferente de aplicar la carga. Luego de realizar esto, se observa que las curvas a utilizar según el tipo de carga y para los diferentes detalles de referencia son las siguientes:

EUROCODES	Curva Esfuerzo-Vida empleada	
	Carga Axial	Carga Flexional
a.	36-3.4	23-3.4
b.	40-4.3	18-3.4
c.	12-3.4	18-3.4

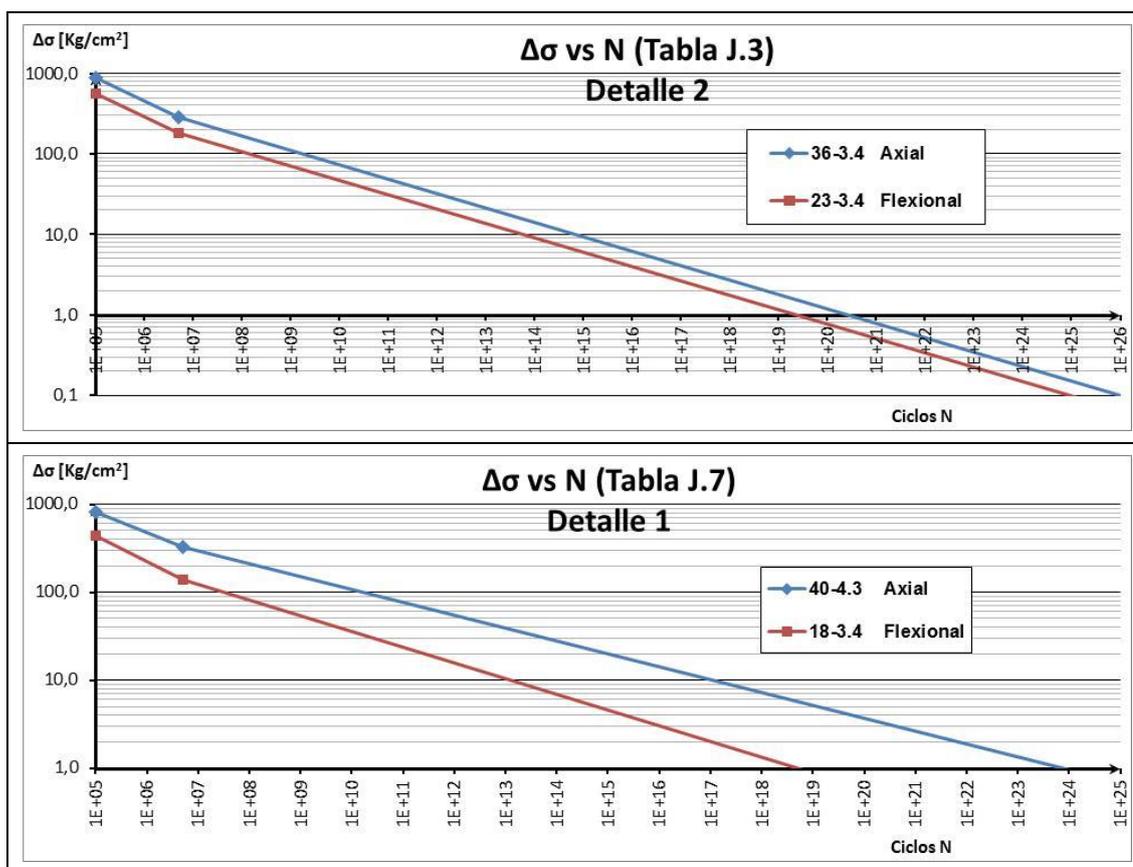
Tabla No. XIII Curva S-N utilizada según tipo de detalle y carga cíclica analizada, [Fuente: Elaboración Propia].

Las curvas mostradas en la Tabla No. XIII tienen las siguientes características de pendiente y ordenadas correspondientes a los puntos críticos que las describen:

	Tabla J.3		Tabla J.7		Tabla J.9	
	Pendiente		Pendiente		Pendiente	
	$m_1 = 3.4$	$m_1 = 3.4$	$m_1 = 4.3$	$m_1 = 3.4$	$m_1 = 3.4$	$m_1 = 3.4$
	$m_2 = 5.4$	$m_2 = 5.4$	$m_2 = 6.3$	$m_2 = 5.4$	$m_2 = 5.4$	$m_2 = 5.4$
	36-3.4	23-3.4	40-4.3	18-3.4	12-3.4	18-3.4
	[Kg/cm ²]					
Ciclos N	$\Delta\sigma$	$\Delta\sigma$	$\Delta\sigma$	$\Delta\sigma$	$\Delta\sigma$	$\Delta\sigma$
1E+05	886.73	566.33	819.39	442.86	295.92	442.86
5E+06	280.61	179.59	329.59	139.80	93.88	139.80
1.10E+26	0.10	0.06	0.67	0.08	0.61	0.90

Tabla No. XIV Características de las curvas S-N seleccionadas, [Fuente: Elaboración Propia].

De la tabla anterior se debe mencionar que los valores m_1 y m_2 corresponden al inverso del valor de la pendiente de las curvas “log $\Delta\sigma$ vs log N ”. Además, se decidió utilizar las curvas solamente hasta el segundo tramo, es decir que para el presente análisis se asumió que las curvas son continuas hasta que se intersecan con el eje horizontal, luego del primer cambio de pendiente, esto debido a que generalmente las curvas de Esfuerzo-vida se encuentran formados por rectas con dos tramos. Finalmente se obtienen las siguientes gráficas modificadas:



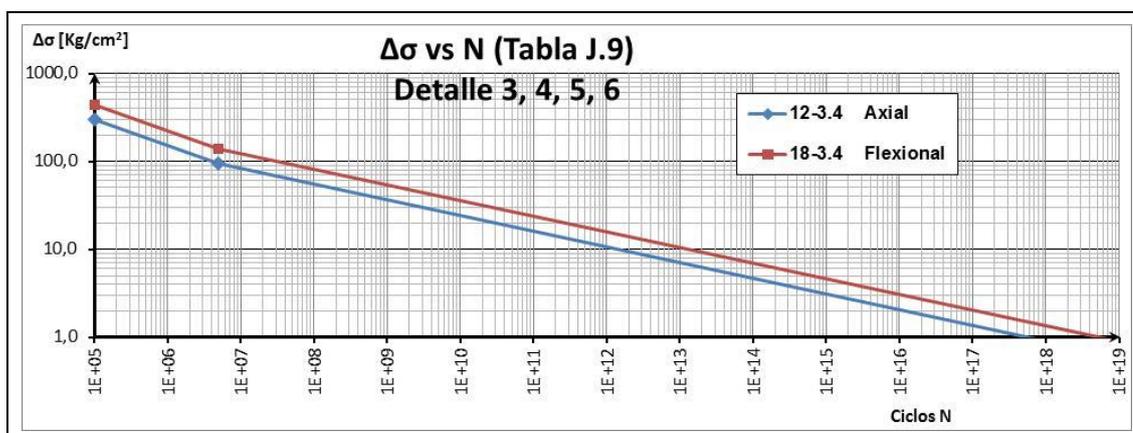


Figura No. 25 Curvas S-N finales seleccionadas,

[Fuente: Elaboración Propia].

3.2. DETERMINACIÓN DE ESFUERZOS EN DETALLES ESTRUCTURALES REFERENCIALES.

Se calculan los llamados esfuerzos en el punto de concentración (“Hot Spot Stress, HSS”) para los detalles analizados, dependiendo del tipo de carga Axial o de Flexión. Luego, duplicando los valores de las amplitudes de los esfuerzos corregidos calculados en el subcapítulo 2.4, se determinan los rangos de esfuerzos para cada detalle. Se encontró que los máximos rangos de esfuerzos se presentan para la carga debida al Torque cíclico del motor en el “Detalle 5” con un valor de $\Delta\sigma = 37.51 \left[\frac{Kg}{cm^2} \right]$, y, para la carga cíclica del Empuje en el “Detalle 5” con un valor de $\Delta\sigma = 23.72 \left[\frac{Kg}{cm^2} \right]$.

Una vez determinados los valores de las amplitudes de los esfuerzos corregidos en el subcapítulo 2.4, se procede a determinar los rangos de esfuerzos para finalmente estimar el número de ciclos para su falla. Para esto, se deben calcular los valores de los esfuerzos en los puntos de concentración de esfuerzos para los detalles de soldadura, lo que se puede lograr de dos maneras diferentes, dependiendo de si se van a usar curvas S-N de probetas estándar o curvas S-N corregidas según detalles estructurales sometidos a fatiga, como se muestra a continuación:

- i. Usando curvas S-N obtenidas de probetas estándar sometidos a cargas cíclicas, la corrección de los esfuerzos obtenidos para los detalles de soldadura de la Tabla No. XI se realiza utilizando un factor de fatiga tomado de las reglas de DNV, [2] , el cual depende del material, tipo de carga (axial o flexión). Para esfuerzos por carga axial se usa un factor de fatiga de 1.6, y para esfuerzos de tipo flexional es 1.8. Estos rangos de esfuerzos modificados se usarán en las curvas S-N del material analizado, para determinar el número de ciclos para la falla.
- ii. Usando curvas S-N obtenidas para los detalles estructurales sometidos a cargas cíclicas, se usa directamente el rango de esfuerzo nominal para determinar el número de ciclos para la falla.

Para el presente análisis se utilizó el segundo método, es decir, se usarán curvas de S-N para detalles estructurales sometidos a cargas cíclicas para determinar el número de ciclos de vida útil que tiene cada detalle referencial, según la carga a la que se encuentran sometidos. La tabla siguiente muestra los valores de amplitudes de esfuerzos a utilizar:

	N_motor [RPM]	Carga cíclica del torque del motor			Carga cíclica del empuje del propulsor		
		f_Excitación [CPS]	Dirección longitudinal	Dirección transversal	f_Excitación [CPS]]	Dirección longitudinal	Dirección transversal
			Esfuerzo Real Corregido [Kg/cm ²]	Esfuerzo Real Corregido [Kg/cm ²]		Esfuerzo Real Corregido [Kg/cm ²]	Esfuerzo Real Corregido [Kg/cm ²]
DETALLE 1	2000	100.00	8.37	19.96	108.34	0.35	0.40
	2150	107.50	10.13	23.73	116.47	0.44	1.51
	2300	115.00	3.94	9.29	124.60	0.59	0.77
	2450	122.50	7.27	13.50	132.73	0.47	1.95
	2600	130.00	6.73	15.00	140.86	2.89	7.49
DETALLE 2	2000	137.50	0.13	---	108.34	0.10	---
	2150	145.00	0.07	---	116.47	0.04	---
	2300	152.50	0.11	---	124.60	0.03	---
	2450	160.00	0.08	---	132.73	0.04	---
	2600	167.50	0.01	---	140.86	0.06	---
DETALLE 3	2000	100.00	0.50	5.50	108.34	0.59	0.29
	2150	107.50	0.87	5.30	116.47	1.60	2.16
	2300	115.00	0.40	1.73	124.60	1.22	1.41
	2450	122.50	1.05	2.71	132.73	0.78	0.49
	2600	130.00	0.34	0.46	140.86	1.49	2.15
DETALLE 4	2000	137.50	0.60	1.11	108.34	0.43	0.58
	2150	145.00	0.60	1.24	116.47	0.64	0.86
	2300	152.50	0.17	0.44	124.60	0.75	1.46
	2450	160.00	0.09	0.56	132.73	0.51	1.46
	2600	167.50	0.08	0.06	140.86	0.57	0.48
DETALLE 5	2000	100.00	5.73	1.99	108.34	11.86	4.01
	2150	107.50	18.76	6.56	116.47	2.88	0.89
	2300	115.00	3.13	1.04	124.60	2.21	0.69
	2450	122.50	0.85	0.27	132.73	1.71	0.53
	2600	130.00	0.23	0.08	140.86	2.08	0.64
DETALLE 6	2000	100.00	0.43	0.72	108.34	0.23	0.64
	2150	107.50	0.43	0.99	116.47	0.33	0.83
	2300	115.00	0.14	0.39	124.60	0.38	1.95
	2450	122.50	0.49	0.80	132.73	0.31	1.95
	2600	130.00	0.23	0.32	140.86	0.35	0.75

Tabla No. XV Amplitudes de esfuerzos en el punto de concentración,

[Fuente: Elaboración Propia]

Finalmente, utilizando las amplitudes de los Esfuerzos en el punto de concentración (Hot Spot Stress) de los detalles, se los duplica para obtener el rango de esfuerzos, para los dos tipos de carga aplicadas.

	N_motor [RPM]	Carga cíclica del torque del motor			Carga cíclica del empuje del propulsor		
		f_Excitación [CPS]	Dirección longitudinal	Dirección transversal	f_Excitación [CPS]	Dirección longitudinal	Dirección transversal
			Rango Esfuerzo [Kg/cm ²]	Rango Esfuerzo [Kg/cm ²]		Rango Esfuerzo [Kg/cm ²]	Rango Esfuerzo [Kg/cm ²]
DETALLE 1	2000	100.00	16.75	39.92	108.34	0.70	0.80
	2150	107.50	20.26	47.46	116.47	0.88	3.02
	2300	115.00	7.87	18.59	124.60	1.18	1.53
	2450	122.50	14.54	26.99	132.73	0.95	3.89
	2600	130.00	13.45	30.00	140.86	5.79	14.98
DETALLE 2	2000	137.50	0.26	---	108.34	0.21	---
	2150	145.00	0.13	---	116.47	0.07	---
	2300	152.50	0.22	---	124.60	0.05	---
	2450	160.00	0.15	---	132.73	0.08	---
	2600	167.50	0.02	---	140.86	0.11	---
DETALLE 3	2000	100.00	1.00	10.99	108.34	1.18	0.59
	2150	107.50	1.75	10.60	116.47	3.21	4.32
	2300	115.00	0.81	3.46	124.60	2.43	2.83
	2450	122.50	2.09	5.42	132.73	1.57	0.99
	2600	130.00	0.69	0.92	140.86	2.99	4.29
DETALLE 4	2000	137.50	1.21	2.22	108.34	0.87	1.17
	2150	145.00	1.21	2.48	116.47	1.28	1.71
	2300	152.50	0.33	0.89	124.60	1.50	2.91
	2450	160.00	0.18	1.11	132.73	1.03	2.91
	2600	167.50	0.16	0.12	140.86	1.13	0.96
DETALLE 5	2000	100.00	11.47	3.98	108.34	23.72	8.02
	2150	107.50	37.51	13.13	116.47	5.76	1.78
	2300	115.00	6.25	2.09	124.60	4.42	1.38
	2450	122.50	1.69	0.53	132.73	3.43	1.05
	2600	130.00	0.46	0.16	140.86	4.17	1.27
DETALLE 6	2000	100.00	0.85	1.45	108.34	0.47	1.28
	2150	107.50	0.87	1.97	116.47	0.66	1.66
	2300	115.00	0.28	0.79	124.60	0.76	3.90
	2450	122.50	0.99	1.61	132.73	0.63	3.90
	2600	130.00	0.46	0.65	140.86	0.70	1.49

Tabla No. XVI Rango de esfuerzos en el punto de concentración,

[Fuente: Elaboración Propia].

Considerando que para el Aluminio 5086 el Límite de fatiga es 1529 [Kg/cm²], tomado de la Ficha técnica 800 398-4345 de la Especificación de metales aeroespaciales, [16], se nota que los esfuerzos debido al Torque y al Empuje cíclico son pequeños.

Graficando los rangos de esfuerzos de cada detalle debidos al torque y empuje cíclico, calculados en la Tabla No. XVI, se tienen:

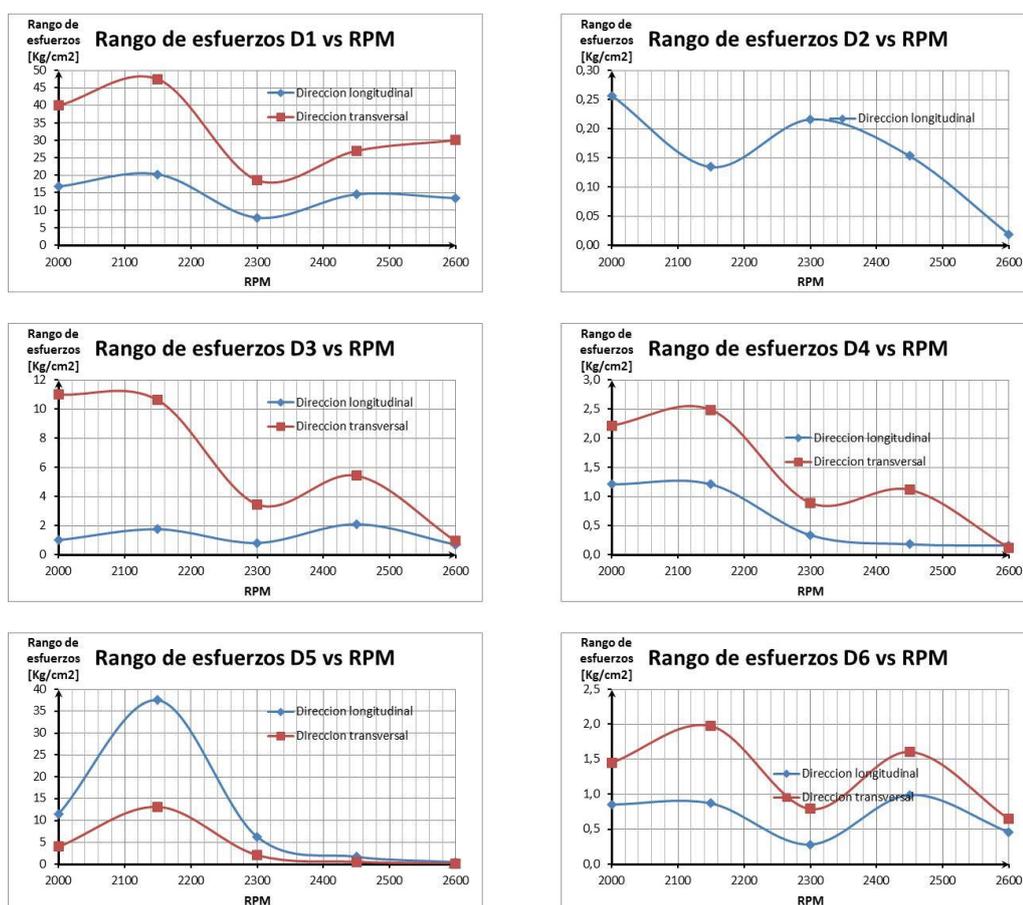


Figura No. 26 Rango de esfuerzos para cada detalle, según RPM del motor, para carga cíclica debida al Torque del motor, [Fuente: Elaboración Propia].

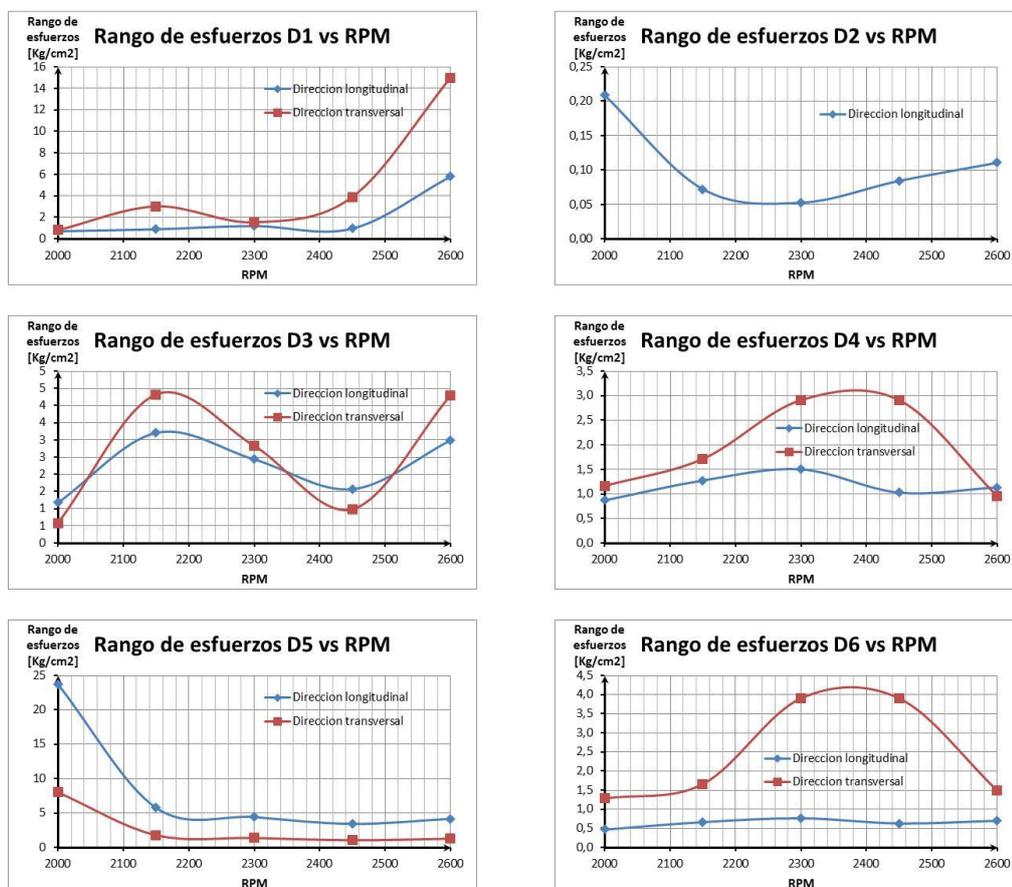


Figura No. 27 Rango de esfuerzos para cada detalle, según RPM del motor, para carga cíclica debida al Empuje, [Fuente: Elaboración Propia].

De estas gráficas se observa que los valores de rangos de esfuerzos máximos se presentan para el “Detalle 5”, que representa al agujero de descarga del chorro de agua ubicado en el espejo de la lancha. Esto tanto para la carga debida al torque cíclico del motor como para el empuje cíclico del propulsor. Luego le siguen los rangos de esfuerzos obtenidos para el “Detalle 1” que se corresponde al planchaje del fondo debajo del motor principal.

3.3. CÁLCULO DE VIDA ÚTIL DE DETALLES ESTRUCTURALES REFERENCIALES.

Se determina la vida útil de los detalles referenciales utilizando los rangos de esfuerzos determinados en el subcapítulo 3.2 y las curvas de Esfuerzo-Vida seleccionadas en el subcapítulo 3.1. Una vez determinado el número de ciclos para la falla, se analizarán tres formas de operación de la lancha: i) La navegación mucho tiempo a baja velocidad, ii) navegación poco tiempo a baja velocidad, y iii) Un promedio de las 2 situaciones anteriores. Luego aplicando la regla de daño lineal acumulativo de Miner se determina el tiempo de vida útil consumido, para cada detalle referencial analizado. Se observa que el elemento referencial que ve disminuida en mayor porcentaje su vida útil es el Detalle 1, para el modo de trabajo 1. Finalmente se estima el número de años que le tomaría a cada detalle estructural para alcanzar su falla.

Para determinar la vida útil de los elementos referenciales seleccionados del fondo de la lancha, se debe emplear las curvas de Esfuerzo-Vida en combinación con los rangos de esfuerzos presentes en los detalles seleccionados previamente. El problema radica en que el tiempo de vida útil depende de la exigencia de uso que tiene el motor, y esto a su vez dependerá del modo de trabajo que tenga la lancha, siendo esto último de

muchas posibilidades. Para el presente análisis se ha tomado tres casos representativos:

i. Lancha navegando mucho tiempo a baja velocidad

Se asume que la lancha zarpa y navega la mitad del tramo a velocidad baja (2000 RPM), recibiendo una llamada de auxilio y por ello aumentar su velocidad hasta alcanzar su objetivo. Según esto se tiene la siguiente gráfica de exigencia al motor según el modo de trabajo de la lancha:

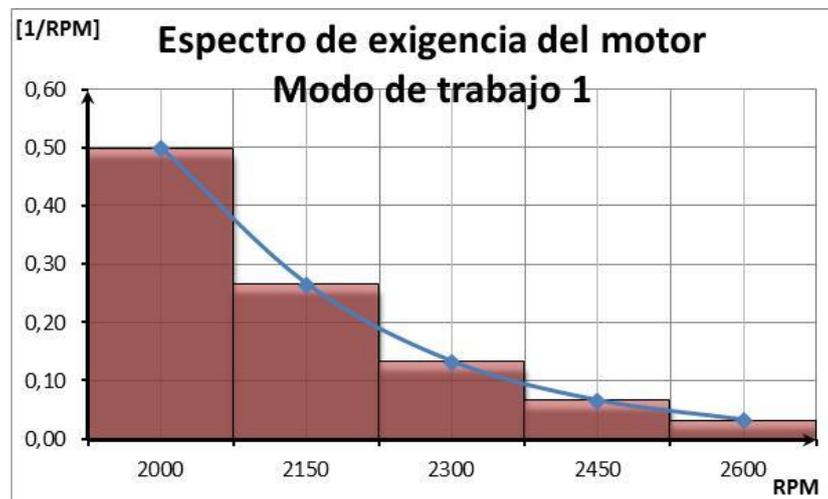


Figura No. 28 Porcentaje de uso del motor según RPM, para modo de trabajo 1, [Fuente: Elaboración Propia].

ii. Lancha navegando mucho tiempo a velocidad alta

Se asume que la lancha zarpa y luego de poco tiempo recibe una llamada de auxilio, por lo que acelera y navega con una velocidad alta, manteniéndola durante la mayor parte del recorrido, como se muestra en la Figura No. 29:

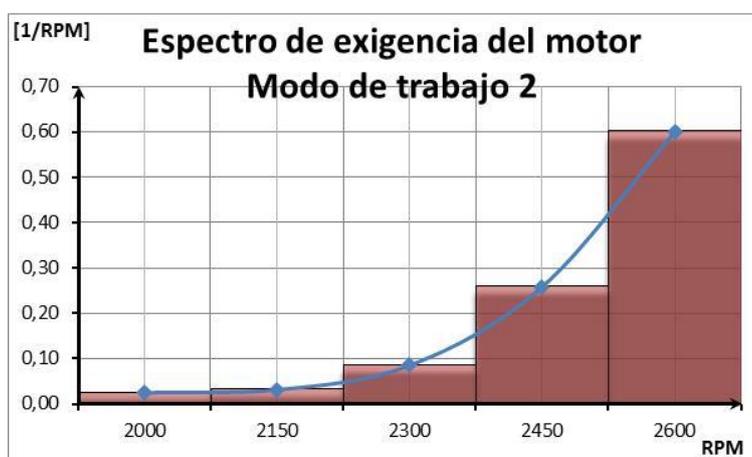


Figura No. 29 Porcentaje de uso del motor según RPM, para modo de trabajo 2, [Fuente: Elaboración Propia].

iii. Lancha con exigencia uniforme durante todo el recorrido

En este modo de trabajo se asume que la lancha se emplea en la misma cantidad de tiempo para cada velocidad, como se muestra en la siguiente gráfica:

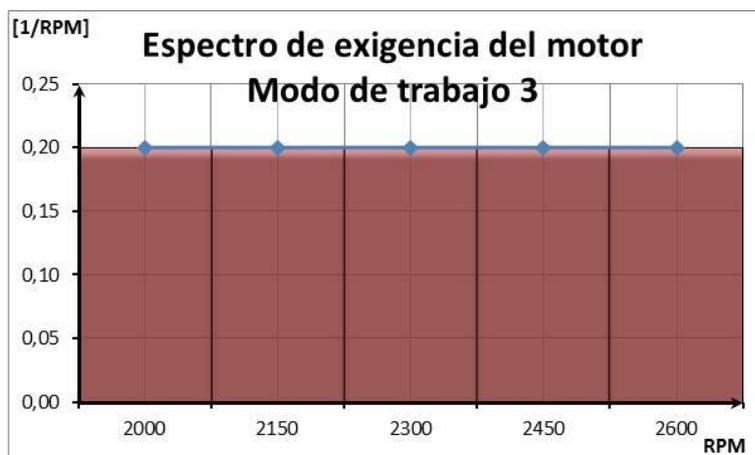


Figura No. 30 Porcentaje de uso del motor según RPM, para modo de trabajo 3, [Fuente: Elaboración Propia].

Una vez definidos los tres modos de trabajo de la lancha, se procede a calcular la vida útil de cada detalle referencial siguiendo el siguiente procedimiento:

1. Se determina, utilizando las curvas de Esfuerzo-vida, el número de ciclos que cada detalle referencial soporta según el rango de esfuerzos actuando en ellos. Para esto, se toman los valores encontrados en la Tabla No. XVI y se los ubica en la Figura No. 24 en las gráficas “a”, “b” y “c” según el tipo de detalle (Ver Tabla No. XII), y, en la curva correspondiente según el tipo de carga (Ver Tabla No. XIII), obteniendo las siguientes gráficas:

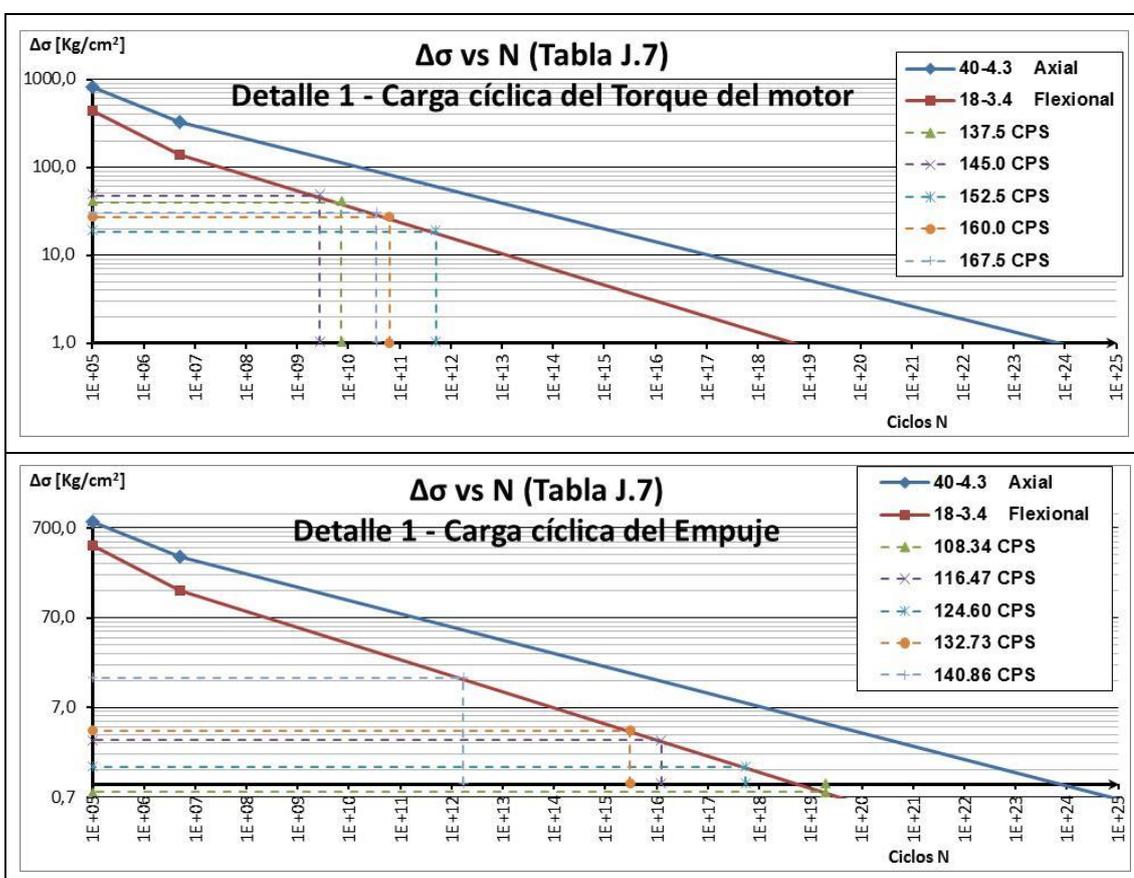


Figura No. 31 Ciclos N para cargas cíclicas, Detalle 1,

[Fuente: Elaboración Propia].

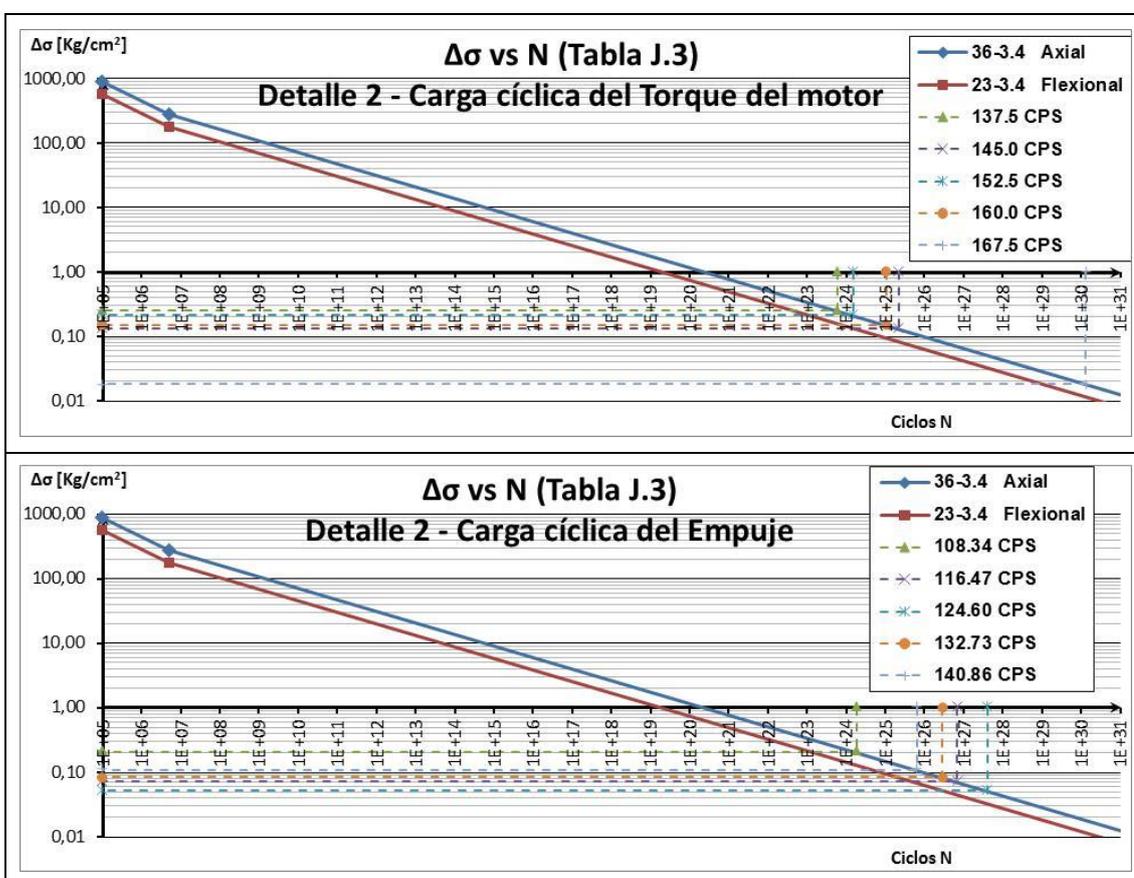


Figura No. 32 Ciclos N para cargas cíclicas, Detalle 2,

[Fuente: Elaboración Propia].

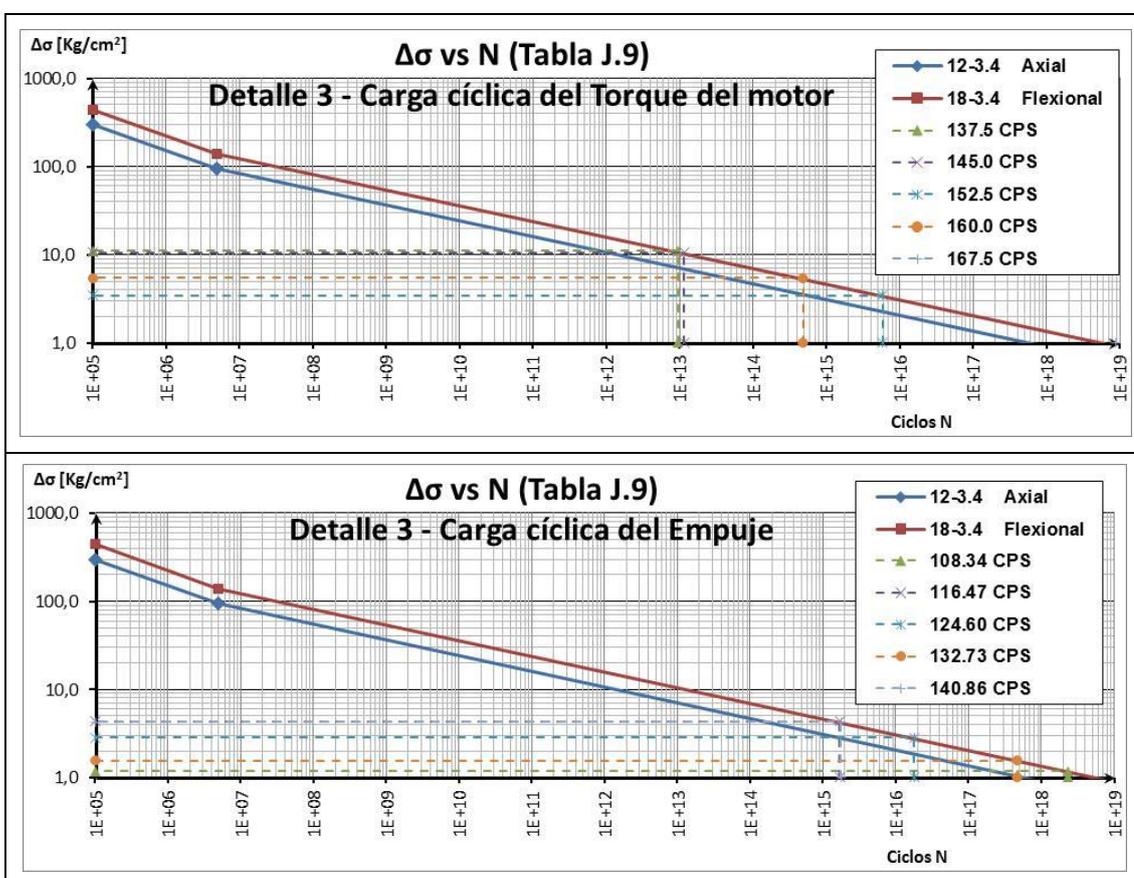


Figura No. 33 Ciclos N para cargas cíclicas, Detalle 3,

[Fuente: Elaboración Propia].

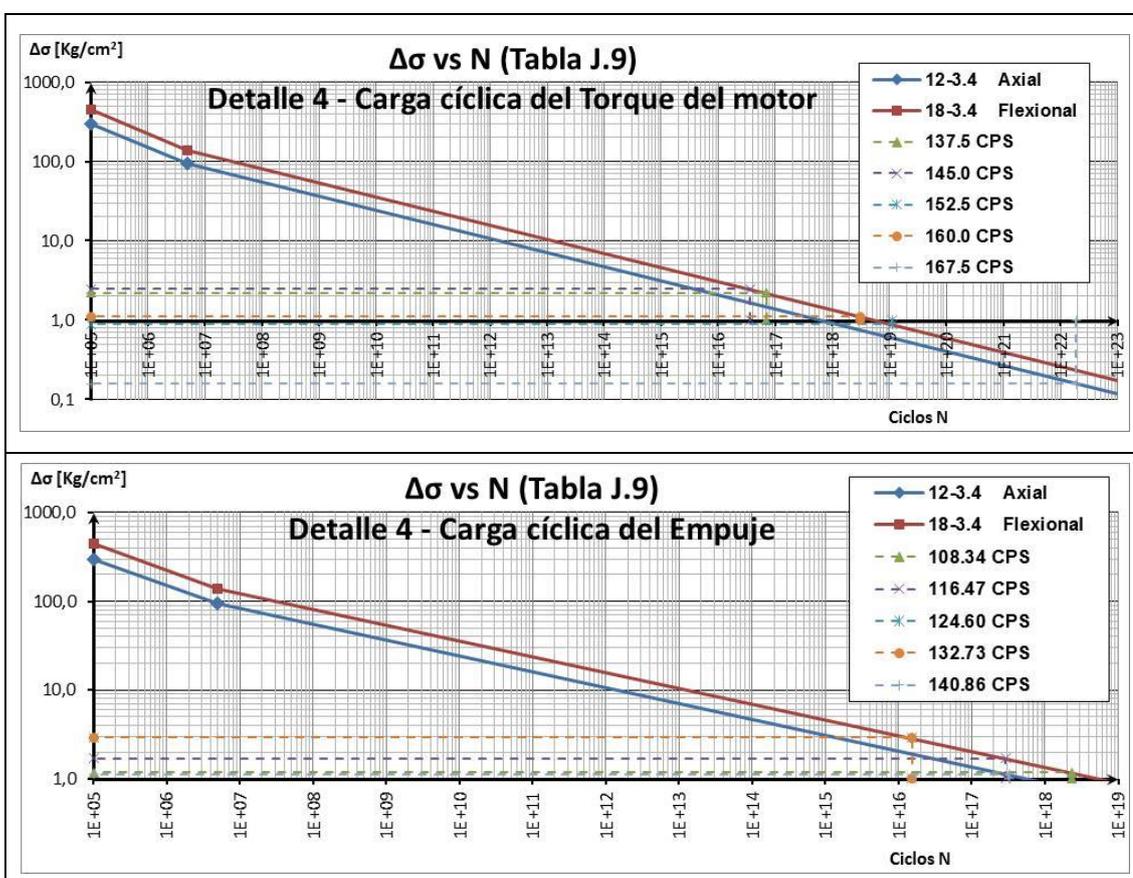


Figura No. 34 Ciclos N para cargas cíclicas, Detalle 4,

[Fuente: Elaboración Propia].

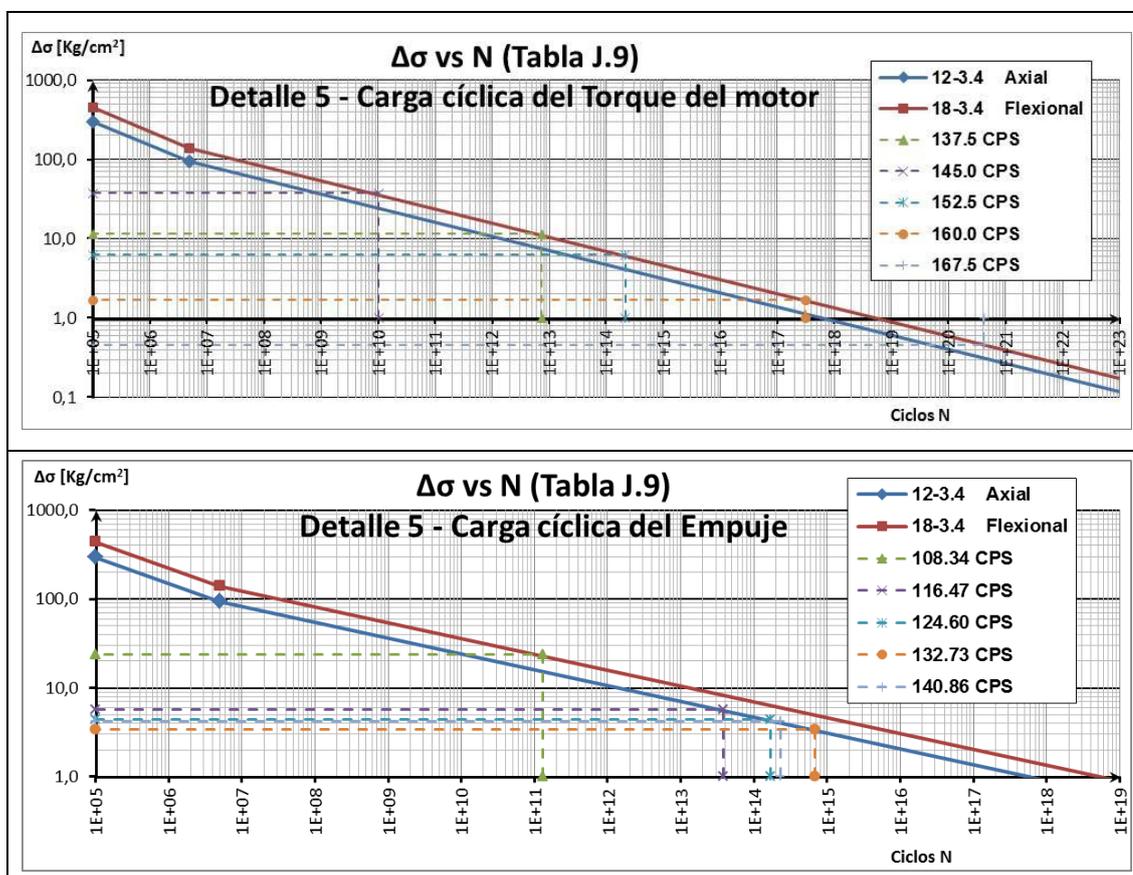


Figura No. 35 Ciclos N para cargas cíclicas, Detalle 5,

[Fuente: Elaboración Propia].

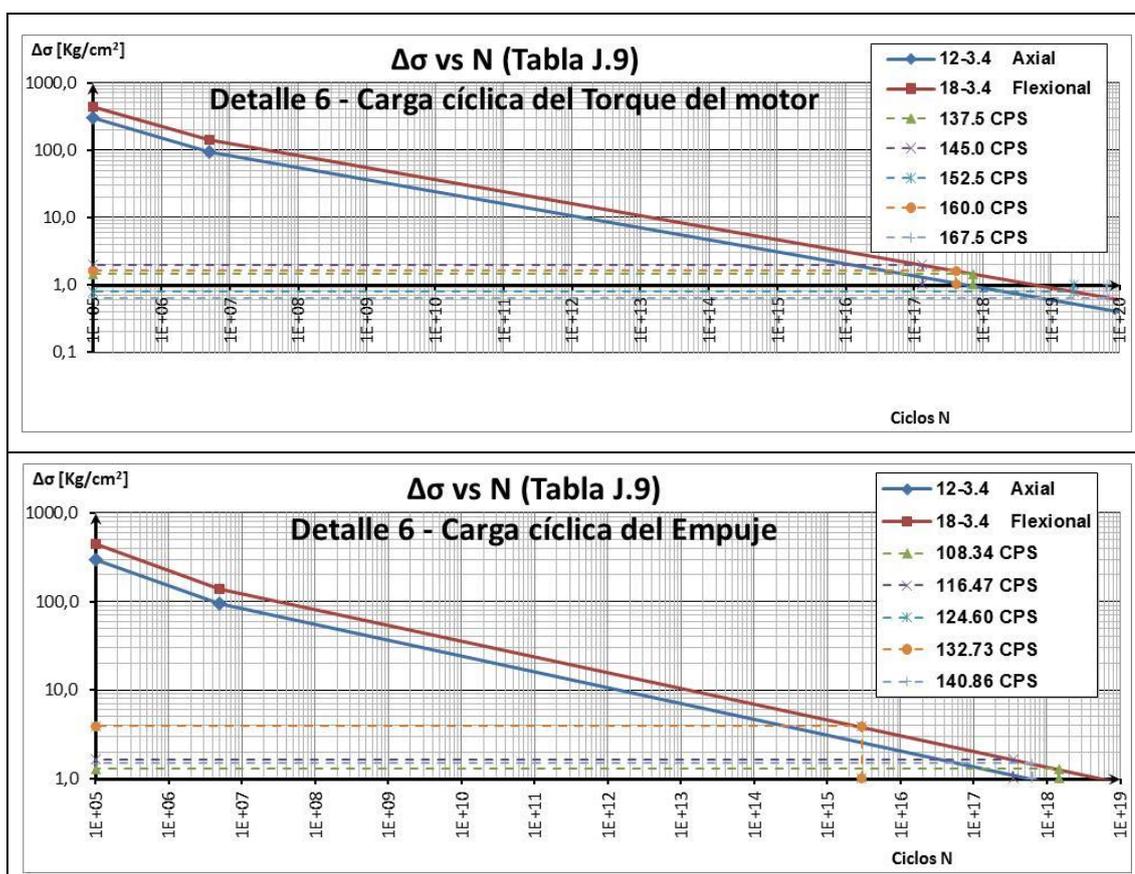


Figura No. 36 Ciclos N para cargas cíclicas, Detalle 6,

[Fuente: Elaboración Propia].

Los valores de ciclos “N” según el esfuerzo analizado correspondientes a las gráficas mostradas anteriormente son los que se muestran en la siguiente tabla de valores:

	N_motor [RPM]	Carga cíclica del Torque del motor		Carga cíclica del Empuje del propulsor	
		f_Excitación [CPS]	N ciclos	f_Excitación [CPS]	N ciclos
DETALLE 1	2000	137.5 CPS	7.30E+09	108.34 CPS	1.98E+19
	2150	145.0 CPS	2.79E+09	116.47 CPS	1.24E+16
	2300	152.5 CPS	5.10E+11	124.60 CPS	5.40E+17
	2450	160.0 CPS	6.42E+10	132.73 CPS	3.03E+15
	2600	167.5 CPS	3.57E+10	140.86 CPS	1.69E+12
DETALLE 2	2000	137.5 CPS	4.32E+22	108.34 CPS	1.44E+23
	2150	145.0 CPS	1.78E+24	116.47 CPS	3.99E+25
	2300	152.5 CPS	1.04E+23	124.60 CPS	3.79E+26
	2450	160.0 CPS	8.47E+23	132.73 CPS	2.55E+25
	2600	167.5 CPS	8.82E+28	140.86 CPS	4.19E+24
DETALLE 3	2000	137.5 CPS	3.61E+11	108.34 CPS	8.83E+16
	2150	145.0 CPS	4.40E+11	116.47 CPS	6.44E+13
	2300	152.5 CPS	2.23E+14	124.60 CPS	6.80E+14
	2450	160.0 CPS	1.83E+13	132.73 CPS	1.81E+16
	2600	167.5 CPS	3.44E+17	140.86 CPS	6.67E+13
DETALLE 4	2000	137.5 CPS	2.63E+15	108.34 CPS	9.30E+16
	2150	145.0 CPS	1.40E+15	116.47 CPS	1.09E+16
	2300	152.5 CPS	4.21E+17	124.60 CPS	5.79E+14
	2450	160.0 CPS	1.19E+17	132.73 CPS	5.79E+14
	2600	167.5 CPS	1.43E+21	140.86 CPS	2.39E+16
DETALLE 5	2000	137.5 CPS	2.84E+11	108.34 CPS	5.02E+09
	2150	145.0 CPS	3.94E+08	116.47 CPS	2.84E+12
	2300	152.5 CPS	8.26E+12	124.60 CPS	1.23E+13
	2450	160.0 CPS	1.19E+16	132.73 CPS	5.02E+13
	2600	167.5 CPS	1.62E+19	140.86 CPS	1.70E+13
DETALLE 6	2000	137.5 CPS	2.78E+16	108.34 CPS	5.48E+16
	2150	145.0 CPS	5.03E+15	116.47 CPS	1.31E+16
	2300	152.5 CPS	8.18E+17	124.60 CPS	1.13E+14
	2450	160.0 CPS	1.58E+16	132.73 CPS	1.13E+14
	2600	167.5 CPS	2.52E+18	140.86 CPS	2.35E+16

Tabla No. XVII Ciclos para la falla, [Fuente: Elaboración Propia].

2. Luego se calcula el número de ciclos para un determinado nivel de esfuerzo que el fondo de la lancha soporta en 1 hora. Para esto se utiliza la frecuencia de excitación según el tipo de carga aplicada, en Ciclos por Hora (CPH), y el factor de uso del motor para cada frecuencia, según el modo de trabajo de la lancha. Este valor se determina utilizando la siguiente ecuación:

$$n_i = n_i^* \times CPH \quad \text{Ec. 4}$$

donde:

n_i^* : Es el porcentaje de uso del motor durante una hora, según el modo de trabajo que se esté analizando, tomados de las Figuras No. 28, 29 y 30.

CPH : Son los ciclos por hora para cada frecuencia de excitación según el tipo de carga aplicada.

n_i : Es el número de ciclos para un determinado nivel de esfuerzo que el fondo de la lancha soporta en 1 hora.

Luego de realizar los cálculos utilizando la ecuación Ec. 4, se obtienen los siguientes valores:

	Modo de trabajo 1		Modo de trabajo 2		Modo de trabajo 3	
	f_motor	f_empuje	f_motor	f_empuje	f_motor	f_empuje
N_motor [RPM]	n	n	n	n	n	n
2000	247500	195012	12360	9738	99000	78005
2150	139200	111811	16292	13087	104400	83858
2300	73200	59808	46607	38080	109800	89712
2450	38400	31855	148854	123484	115200	95566
2600	20100	16903	362101	304511	120600	101419

Tabla No. XVIII Número de ciclos para un determinado nivel de esfuerzo que el fondo de la lancha soporta en 1 hora, [Fuente: Elaboración Propia].

3. Posteriormente, se determina la contribución de daño para cada detalle referencial analizado, según el tipo de carga y según el modo de trabajo analizados. Para esto se utiliza la siguiente ecuación, [17]:

$$D_i = \frac{n_i}{N_i} \quad \text{Ec. 5}$$

donde:

n_i : Es el número de ciclos para un determinado nivel de esfuerzo que el fondo de la lancha soporta en 1 hora, tomados de la Tabla No. XVIII.

N_i : Es el número de ciclos máximo que cada detalle referencial soporta, según el tipo de carga y la frecuencia de trabajo aplicadas, tomada de la Tabla No. XVII.

D_i : Contribución de daño para cada detalle referencial analizado, según el tipo de carga y según el modo de trabajo analizados.

Una vez utilizada la ecuación Ec. 9, se obtienen los resultados mostrados en la siguiente tabla:

		Modo de trabajo 1		Modo de trabajo 2		Modo de trabajo 3	
		f_motor	f_empuje	f_motor	f_empuje	f_motor	f_empuje
		N_motor [RPM]	n/N	n/N	n/N	n/N	n/N
DETALLE 1	2000	3.39E-05	9.84E-15	1.69E-06	4.91E-16	1.36E-05	3.94E-15
	2150	4.99E-05	9.05E-12	5.84E-06	1.06E-12	3.74E-05	6.78E-12
	2300	1.44E-07	1.11E-13	9.15E-08	7.05E-14	2.15E-07	1.66E-13
	2450	5.98E-07	1.05E-11	2.32E-06	4.08E-11	1.79E-06	3.16E-11
	2600	5.63E-07	1.00E-08	1.01E-05	1.80E-07	3.38E-06	6.00E-08
DETALLE 2	2000	4.24E-19	1.05E-19	2.12E-20	5.26E-21	1.70E-19	4.22E-20
	2150	6.46E-21	1.65E-22	7.56E-22	1.93E-23	4.84E-21	1.24E-22
	2300	4.79E-20	1.50E-23	3.05E-20	9.53E-24	7.18E-20	2.25E-23
	2450	3.70E-21	1.11E-22	1.43E-20	4.32E-22	1.11E-20	3.34E-22
	2600	1.53E-26	2.67E-22	2.75E-25	4.82E-21	9.16E-26	1.60E-21
DETALLE 3	2000	2.62E-08	8.35E-14	1.31E-09	4.17E-15	1.05E-08	3.34E-14
	2150	1.21E-08	6.64E-11	1.41E-09	7.77E-12	9.06E-09	4.98E-11
	2300	1.25E-11	3.36E-12	7.98E-12	2.14E-12	1.88E-11	5.05E-12
	2450	8.03E-11	6.76E-14	3.11E-10	2.62E-13	2.41E-10	2.03E-13
	2600	2.26E-15	9.64E-12	4.07E-14	1.74E-10	1.36E-14	5.78E-11
DETALLE 4	2000	3.59E-12	7.94E-14	1.79E-13	3.97E-15	1.44E-12	3.18E-14
	2150	3.81E-12	3.89E-13	4.46E-13	4.55E-14	2.86E-12	2.92E-13
	2300	6.62E-15	3.95E-12	4.21E-15	2.51E-12	9.92E-15	5.92E-12
	2450	1.22E-14	2.10E-12	4.74E-14	8.15E-12	3.67E-14	6.31E-12
	2600	1.07E-18	5.28E-14	1.92E-17	9.51E-13	6.39E-18	3.17E-13
DETALLE 5	2000	3.32E-08	1.48E-06	1.66E-09	7.40E-08	1.33E-08	5.93E-07
	2150	1.35E-05	2.90E-09	1.58E-06	3.40E-10	1.01E-05	2.18E-09
	2300	3.38E-10	3.58E-10	2.15E-10	2.28E-10	5.07E-10	5.37E-10
	2450	1.24E-13	4.64E-11	4.79E-13	1.80E-10	3.71E-13	1.39E-10
	2600	4.84E-17	7.27E-11	8.72E-16	1.31E-09	2.91E-16	4.36E-10
DETALLE 6	2000	3.40E-13	1.36E-13	1.70E-14	6.78E-15	1.36E-13	5.43E-14
	2150	1.06E-12	3.25E-13	1.24E-13	3.80E-14	7.95E-13	2.43E-13
	2300	3.43E-15	2.01E-11	2.18E-15	1.28E-11	5.14E-15	3.02E-11
	2450	9.28E-14	1.07E-11	3.60E-13	4.16E-11	2.78E-13	3.22E-11
	2600	3.07E-16	2.73E-14	5.53E-15	4.91E-13	1.84E-15	1.64E-13

Tabla No. XIX Contribución de daño por hora para cada detalle referencial,

según el tipo de carga y según el modo de trabajo analizados,

[Fuente: Elaboración Propia].

4. Luego, utilizando la regla de daño lineal acumulativo de Miner, se determina el daño total que tiene cada elemento estructural referencial seleccionado, [17]. Esta regla se expresa con la siguiente ecuación:

$$D_C = \sum_{i=1}^{j=k} \left(\frac{n_i}{N_i} \right) \quad \text{Ec. 6}$$

donde:

$\frac{n_i}{N_i} = D_i$: Es la contribución de daño para cada detalle referencial analizado, tomado de la Tabla No. XIX.

D_C : Es el daño total acumulado que tiene cada elemento estructural referencial seleccionado.

Reemplazando en la ecuación Ec. 5 con los valores parciales, se tiene la siguiente expresión, para cada detalle referencial combinando la influencia de las dos fuentes de vibración:

$$D_C = \left\{ \left(\frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \frac{n_3}{N_3} + \frac{n_4}{N_4} + \frac{n_5}{N_5} \right)_{\text{Torque cíclico del motor}} + \left(\frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \frac{n_3}{N_3} + \frac{n_4}{N_4} + \frac{n_5}{N_5} \right)_{\text{Empuje cíclico del propulsor}} \right\}_{\text{Modo de trabajo de la lancha}}$$

Calculando los valores de daño acumulativo para cada detalle estructural seleccionado, se obtiene la siguiente tabla de valores:

	Modo de trabajo 1	Modo de trabajo 2	Modo de trabajo 3
	D_c	D_c	D_c
Detalle 1	8.51E-05	2.03E-05	5.64E-05
Detalle 2	5.88E-19	7.73E-20	3.02E-19
Detalle 3	3.84E-08	3.22E-09	1.99E-08
Detalle 4	1.40E-11	1.23E-11	1.72E-11
Detalle 5	1.50E-05	1.66E-06	1.07E-05
Detalle 6	3.28E-11	5.54E-11	6.41E-11

Tabla No. XX Valores de daño acumulativo por hora,

[Fuente: Elaboración Propia].

Graficando los valores daño acumulativo de cada detalle seleccionado, según los modos de trabajo analizados, se obtiene lo siguiente:

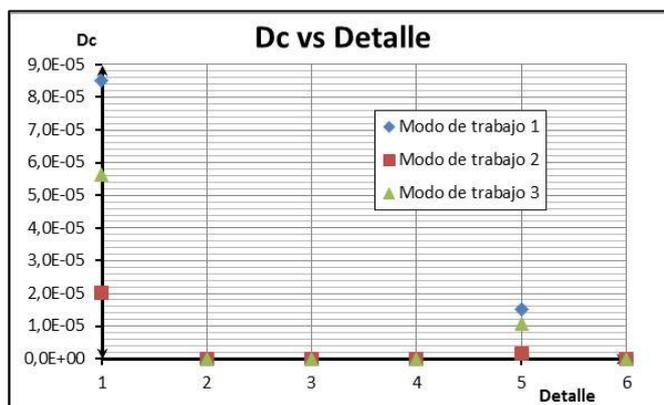


Figura No. 37 Valores de daño acumulativo según regla de Miner para cada detalle en 1 hora, para cada modo de operación asumido,

[Fuente: Elaboración Propia].

De la gráfica anterior se puede observar que el elemento estructural con mayor daño acumulado debido a carga cíclica es el “Detalle 1” siendo el caso crítico para el Modo de trabajo 1.

5. Finalmente, con los valores obtenidos de porcentaje de daño acumulativo por hora se determina el tiempo de vida útil, en horas, para cada detalle estructural, con la siguiente ecuación:

$$x [\text{hora}] = \frac{1}{D_c} [\text{Horas}] \quad \text{Ec. 7}$$

Reemplazando los valores en la ecuación Ec. 7, para cada detalle estructural, y cada modo de trabajo analizados, se obtienen los siguientes valores de horas totales de vida útil:

	Modo de trabajo 1 [Horas totales de vida útil]	Modo de trabajo 2 [Horas totales de vida útil]	Modo de trabajo 3 [Horas totales de vida útil]
Detalle 1	1.18E+04	4.93E+04	1.77E+04
Detalle 2	1.70E+18	1.29E+19	3.31E+18
Detalle 3	2.60E+07	3.10E+08	5.02E+07
Detalle 4	7.15E+10	8.11E+10	5.81E+10
Detalle 5	6.66E+04	6.03E+05	9.32E+04
Detalle 6	3.04E+10	1.80E+10	1.56E+10

Tabla No. XXI Valores de horas totales de vida útil, para cada detalle referencial analizado, según modo de trabajo asumido,

[Fuente: Elaboración Propia].

De la Tabla No. XXI se observa que el Detalle 1 tiene la menor cantidad de horas de vida útil totales, siendo el menor valor de estas para el Modo de trabajo 1, es decir, para cuando la lancha navega una mayor cantidad de tiempo a baja velocidad.

3.4. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y ESTIMACIÓN DEL TIEMPO DE VIDA ÚTIL DEL FONDO DE LA EMBARCACIÓN.

Se analiza la vida útil del fondo de la lancha, utilizando los valores de horas totales hasta la falla para cada detalle estructural calculados en el subcapítulo 3.3, y para ello se asume las horas de trabajo que tiene la lancha por año. Se toman para el presente análisis 3 casos: la lancha navegando un cuarto, medio, tres cuartas partes del día. Estos servirán para considerar los casos en que la lancha tiene un poco uso, hasta un uso moderado. Una vez realizado este análisis, se obtiene que el fondo de la lancha tiene una vida útil restringida por el Detalle 1, el cual tiene un tiempo de vida útil de 5.4 años, navegando una cuarta parte del día, en el Modo de trabajo 1.

Una vez que se han calculado las horas totales hasta la falla para cada detalle referencial seleccionado (véase Tabla No. XXI), se procede a determinar la vida útil del fondo de la lancha, conformado por la plancha del fondo y la plancha del espejo. Para esto se debe determinar el número de

horas que la lancha navega por día, por lo que se toma 3 casos: la lancha navegando una cuarta parte, medio y tres cuartas partes del día, todos los días del año. Tomando en consideración estos casos, se puede calcular el número de horas totales que la lancha navegara en un año, siendo estos valores mostrados en la siguiente tabla:

	[Horas/año]
[(1/4)*Día]/Año	2190
[(1/2)*Día]/Año	4380
[(3/4)*Día]/Año	6570

Tabla No. XXII Horas de trabajo por año según carga asumida de trabajo diario, [Fuente: Elaboración Propia].

Con estos últimos valores, se procede a determinar los años de vida útil que tiene el fondo de la lancha, recordando que existen 3 modos de trabajo y 3 cargas de trabajo diarias:

$$Años\ de\ vida\ útil = \frac{Horas\ totales\ de\ vida\ útil}{(Horas/año)_{Tipo\ de\ carga\ diaria\ de\ navegación}} \quad Ec. 8$$

Una vez reemplazados los datos en la ecuación Ec. 8, se obtienen los siguientes valores:

		Detalle 1	Detalle 2	Detalle 3	Detalle 4	Detalle 5	Detalle 6
Modo de trabajo 1	[(1/4)*Día]/Año	5.4	7.8E+14	1.2E+04	3.3E+07	30.4	1.39E+07
	[(1/2)*Día]/Año	2.7	3.9E+14	5.9E+03	1.6E+07	15.2	6.95E+06
	[(3/4)*Día]/Año	1.8	2.6E+14	4.0E+03	1.1E+07	10.1	4.63E+06
Modo de trabajo 2	[(1/4)*Día]/Año	22.5	5.9E+15	1.4E+05	3.7E+07	275.4	8.24E+06
	[(1/2)*Día]/Año	11.3	3.0E+15	7.1E+04	1.9E+07	137.7	4.12E+06
	[(3/4)*Día]/Año	7.5	2.0E+15	4.7E+04	1.2E+07	91.8	2.75E+06
Modo de trabajo 3	[(1/4)*Día]/Año	8.1	1.5E+15	2.3E+04	2.7E+07	42.5	7.13E+06
	[(1/2)*Día]/Año	4.0	7.6E+14	1.1E+04	1.3E+07	21.3	3.56E+06
	[(3/4)*Día]/Año	2.7	5.0E+14	7.6E+03	8.8E+06	14.2	2.38E+06

Tabla No. XXIII Años de vida útil según modo de trabajo y horas diarias de navegación de la lancha, [Fuente: Elaboración Propia].

De la tabla anterior se puede determinar que el tiempo de vida útil del fondo de la lancha está restringido por el Detalle 1, puesto que es el que menor cantidad de años de vida útil tiene, siendo este valor crítico para el Modo de trabajo 1, con la lancha navegando tres cuartas partes del día. En resumen, el fondo de la lancha tendrá un tiempo de vida útil de 1.8 años navegando 18 horas diarias, 2.7 años navegando 12 horas diarias, y 5.4 años navegando 6 horas diarias, durante un año respectivamente.

CONCLUSIONES

En el presente documento se ha determinado el tiempo de vida útil del fondo de la lancha “Guayas”, utilizando el proceso descrito por la casa clasificadora DNV, el cual incluye realizar un análisis estructural utilizando elementos finitos. El modelo analizado incluyó los detalles estructurales encontrados en la zona seleccionada, y la carga cíclica debida al sistema propulsor (torque del motor y empuje), y según lo obtenido se concluye lo siguiente:

1. El modelo estructural desarrollado en este trabajo es adecuado para los objetivos planteados. Esto se afirma porque incluye todos los detalles con las características que se muestran en los planos estructurales provistos por el astillero constructor. La discretización empleada tiene elementos de mayor tamaño en zonas donde se presume los esfuerzos serán de baja amplitud, mientras que, tiene elementos de mucho menor tamaño en las zonas de intersección de detalles estructurales. Además, la razón de aspecto entre las dimensiones de los elementos utilizados en la discretización no sobrepasa el valor de 3.0, y el elemento de mayor dimensión utilizado en todo el modelo numérico es de 47 x 41 mm.
2. Las cargas actuantes se han estimado de forma metódica y se han aplicado de manera adecuada. Para el cálculo del Torque cíclico se utilizaron las características del motor que utiliza la lancha para su propulsión, además de tablas de esfuerzos tangenciales que genera debido a la rotación. Luego se los aplicó como una pareja de fuerzas desfasadas en las bases del motor. Para el Empuje cíclico se asumió que el fondo de la embarcación soporta un 10% del Empuje cíclico total generado por un propulsor de 3 palas. Este valor parece razonable comparado con las mediciones presentadas en la literatura.
3. Las distribuciones de esfuerzos obtenidas son aceptables, puesto que tienen un comportamiento normalmente continuo en los detalles

referenciales seleccionados, para los dos tipos de cargas analizadas en las diferentes frecuencias de excitación aplicadas. De manera que los valores de Esfuerzo máximo en los puntos de concentración permiten determinar de manera confiable los rangos de esfuerzos de los seis detalles referenciales seleccionados.

4. Luego de asumir tres tipos de modos de navegación y de asumir tres tipos de Carga de trabajo diario, se usó la regla de daño acumulativo lineal de Miner para determinar el número de horas que llevará a la falla a los detalles estructurales. Con esto se determina que la lancha tiene una menor vida útil para un Modo de trabajo en el que navega la mayoría del tiempo a velocidades bajas. Finalmente se determina que la embarcación analizada tendrá un tiempo de vida útil de 1.8, 2.7 o 5.4 años navegando 18, 12 o 6 horas diarias, durante un total de año respectivamente.

RECOMENDACIONES

1. Para desarrollar en forma eficiente el modelo estructural empleando el método de Elementos Finitos, se recomienda considerar la capacidad de procesamiento del computador utilizado. Se debe estimar el número final de grados de libertad que incluirá el modelo para que su manejo no se torne demasiado lento.
2. Se recomienda realizar trabajos de experimentación para obtener valores de masa añadida para planchas sumergidas en fluidos y sometidas a altas frecuencias. Los valores empleados en el presente trabajo, para esta variable, fueron tomados de resultados teóricos, en función de la geometría analizada, obteniendo en general, valores bastante altos.

3. Para confirmar los resultados teóricos, se deben realizar mediciones de la respuesta vibratoria de la estructura del fondo de la embarcación durante la navegación, haciendo uso de sensores ubicados en la zona de la sala de máquinas de la lancha. Estas mediciones pueden ser realizadas en las zonas críticas aquí seleccionadas, puesto que son en estas en las que se ha determinado que se desarrollarán esfuerzos de mayores magnitudes.
4. Se recomienda realizar experimentación de fatiga usando probetas con la geometría de detalles estructurales referenciales, como las aquí mostradas. Esto servirá para obtener las curvas de Esfuerzo-Vida de fatiga de éstos detalles típicos, con las características propias de nuestra producción nacional.
5. Para obtener resultados más precisos a futuro, se recomienda determinar espectros reales de Modos de trabajo para este tipo de embarcaciones, así como también los valores reales de las horas de navegación por año de las embarcaciones a analizar.

ANEXOS

ANEXO A

USO DE COMANDOS EDGESURF Y 3DFACE PARA DESARROLLO DE SUPERFICIES

Para graficar superficies usando el comando “Edgesurf” se debe tener 4 bordes como referencia y se generará una superficie con un número definido de elementos en filas y columnas, los cuales son especificados con los comandos “Surftab1” y “Surftab2”. Estos comandos indican cuántas particiones se van a tener en la dirección 1 y 2 respectivamente, siendo 2 el número mínimo de particiones para cada dirección, como se muestra en la Figura No. 38.

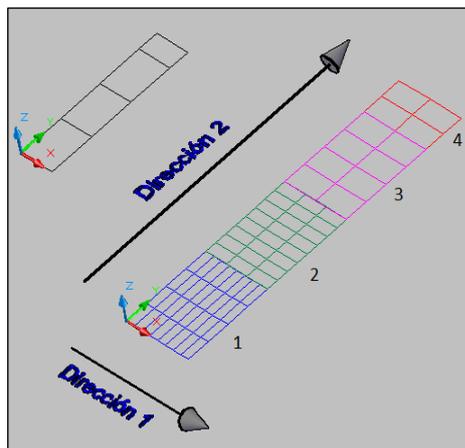


Figura No. 38 Superficies varias realizadas en Autocad usando el comando “Edgesurf”, [Fuente: Elaboración Propia].

En la figura anterior se puede observar los bordes originales (Esquina superior izquierda) y luego, las superficies generadas a partir de esos bordes, obteniendo como resultado 4 superficies con diferente número de elementos en cada dirección. Los valores asignados para los comandos “Surftab1” y “Surftab2”, se muestran en la Tabla No. XXIV:

Superficie	Surftab1	Surftab2	Color
1	4	8	Azul
2	8	3	Verde
3	4	2	Fucsia
4	2	2	Rojo

Tabla No. XXIV Detalle del número de elementos empleado en las superficies del ejemplo de la Figura No. 38, [Fuente: Elaboración Propia].

Para graficar superficies usando el comando “3DFace” se debe tener 3 o 4 puntos de referencia, y cabe mencionarse que este comando solo permite realizar una superficie de 1 elemento, ya sea de tipo triangular o cuadrilátero. Este comando servirá para realizar y completar superficies en algunas esquinas y en elementos que terminen en ángulos y que no puedan ser modelados usando el comando “Edgesurf”, como se puede observar en la Figura No. 39.

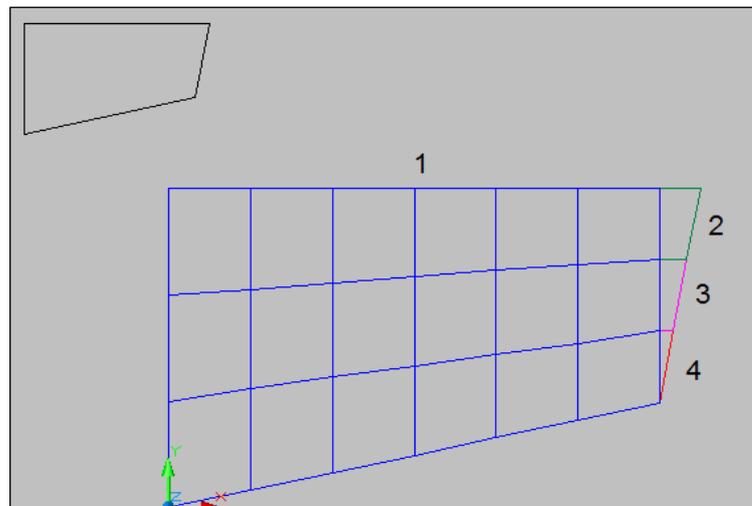


Figura No. 39 Superficies generadas usando el comando “Edgesurf” y “3dFace”, [Fuente: Elaboración Propia].

En la figura anterior se muestra originalmente un contorno cerrado de forma trapezoidal (Esquina superior izquierda) a la cual se le han generado superficies de manera combinada. Para la superficie 1 se ha usado Edgesurf de 3 x 6 elementos, mientras que los elementos restantes fueron generados usando el comando “3DFace”, siendo las superficies 2 y 3, paralelogramos, y, la superficie 4 de tipo triangular. De esta misma forma se deberá modelar ciertos detalles estructurales, donde para completar las superficies no se podrá usar el comando “Edgesurf”, debido a la restricción del número de bordes.

ANEXO B

DESARROLLO DEL MODELO GEOMÉTRICO EN AUTOCAD

El desarrollo de la estructura del fondo de la embarcación se realiza en 4 partes como se muestra a continuación:

1. Modelaje del Fondo de la lancha con sus detalles estructurales

Se empezó a desarrollar las superficies del fondo de la embarcación, como se puede apreciar en la Figura No. 40, en la cual se observa claramente el uso de los comandos `Edgesurf` y `3dFace`. También es notable mencionar que se dejó el agujero correspondiente a la entrada del chorro de agua del sistema de propulsión.

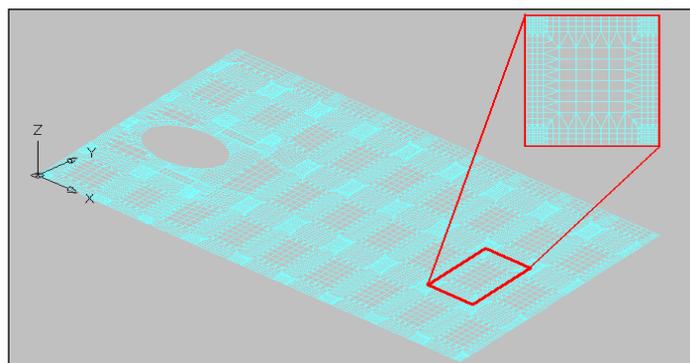


Figura No. 40 Superficie del Fondo de la Lancha “Guayas”,

[Fuente: Elaboración Propia].

Luego, se procedió a desarrollar las superficies correspondientes a los refuerzos donde irían asentados los motores como se muestra en la Figura No. 41. Para esto, se enfatiza que todas los nodos que forman las uniones entre elementos deben coincidir, es decir, los elementos deben estar enlazados entre sí.

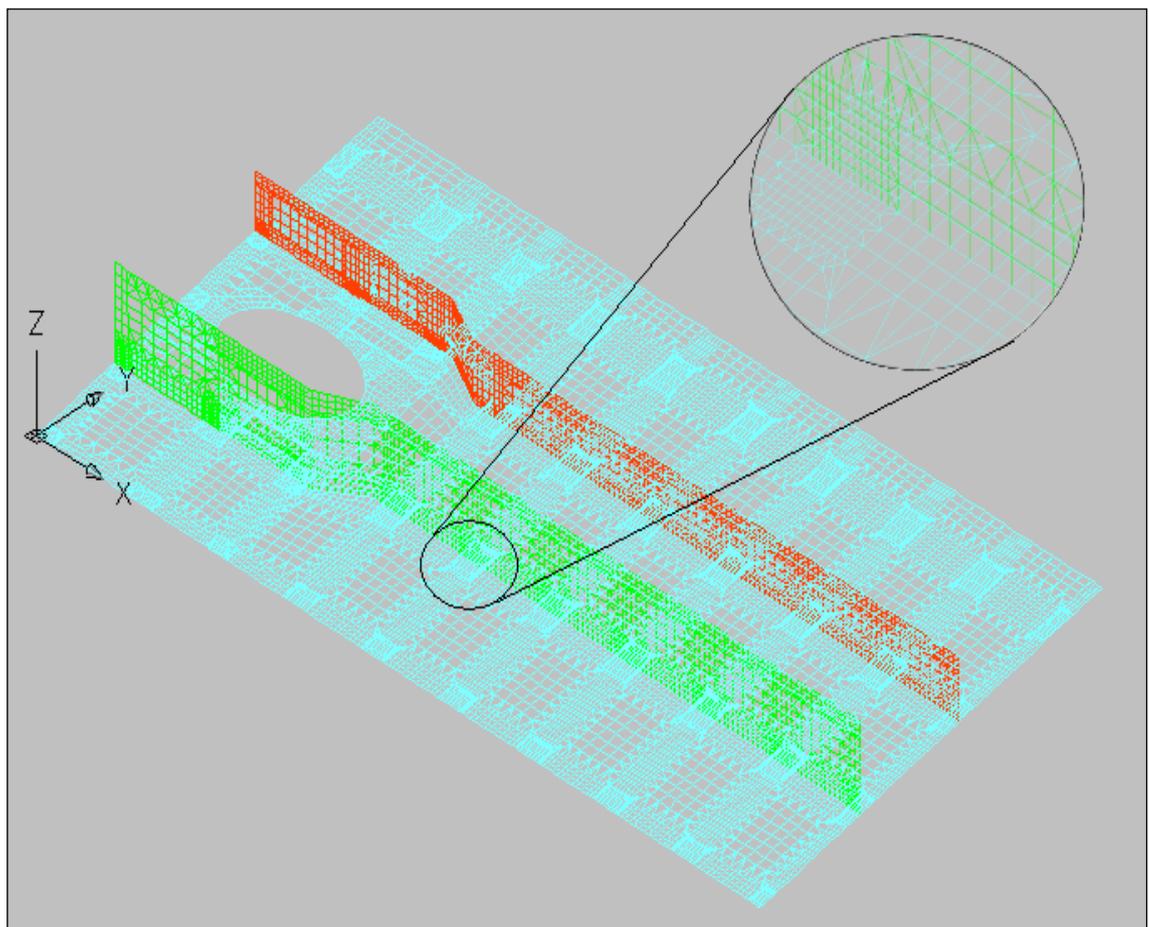


Figura No. 41 Modelo con superficies correspondientes al refuerzo de la Base de motores, [Fuente: Elaboración Propia].

Después, se realizaron las superficies correspondientes a las cuadernas, al refuerzo longitudinal y a las escuadras que se encontraban en la zona del fondo de la estructura, obteniendo el modelo que se presenta en la Figura No. 42.

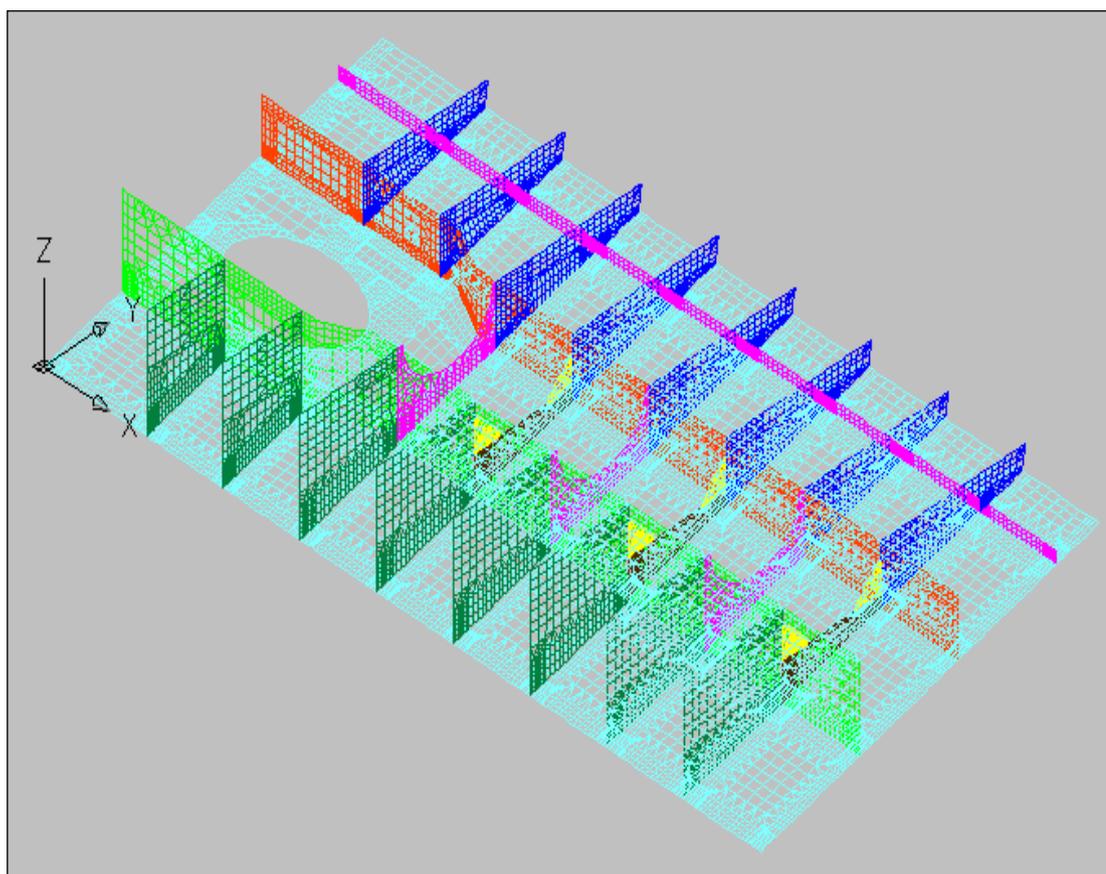


Figura No. 42 Modelo superficial correspondiente al fondo con sus respectivos detalles estructurales, [Fuente: Elaboración Propia].

Este sería el modelo preliminar final para la zona del fondo de la estructura a analizar, quedando aun por realizar la estructura del espejo y los elementos

correspondientes a las alas de los refuerzos, para posteriormente concatenarlos y obtener el modelo final.

2. Modelaje del Espejo con sus detalles Estructurales

Siguiendo un proceso similar al del modelaje de las superficies del fondo, se realiza el modelo correspondiente a la estructura del espejo de la lancha, obteniendo como resultado la Figura No. 43 que se muestra a continuación.

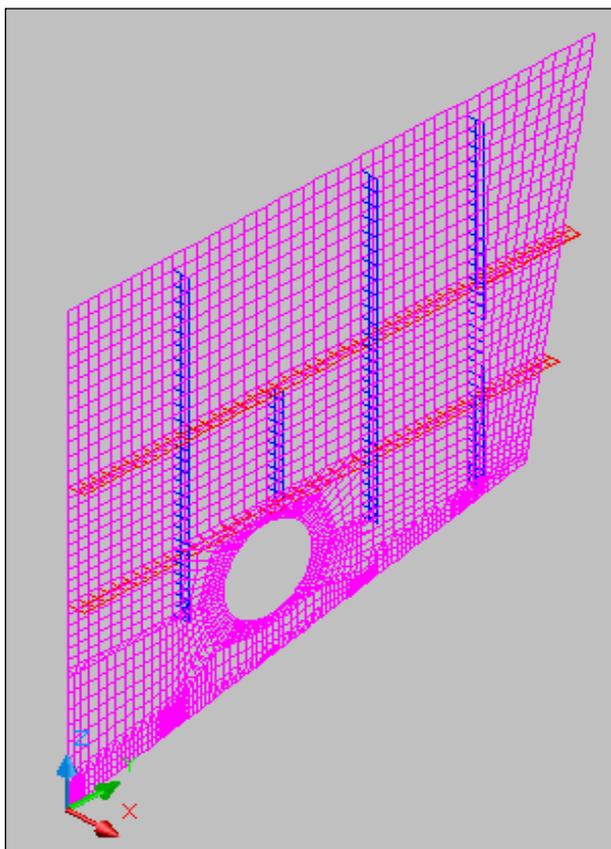


Figura No. 43 Modelo superficial preliminar correspondiente al espejo con sus detalles estructurales, [Fuente: Elaboración Propia].

3. Acople de la parte del fondo y del espejo

Una vez modeladas las dos zonas principales, fondo y espejo, se deben unir incluyendo las escuadras, tal como muestra el plano estructural de la lancha analizada, [9]. De esta forma se obtiene finalmente el modelo completo de las superficies a utilizar en el análisis a realizar en el presente proyecto. En la Figura No. 44 se puede observar el resultado del procedimiento mencionado.

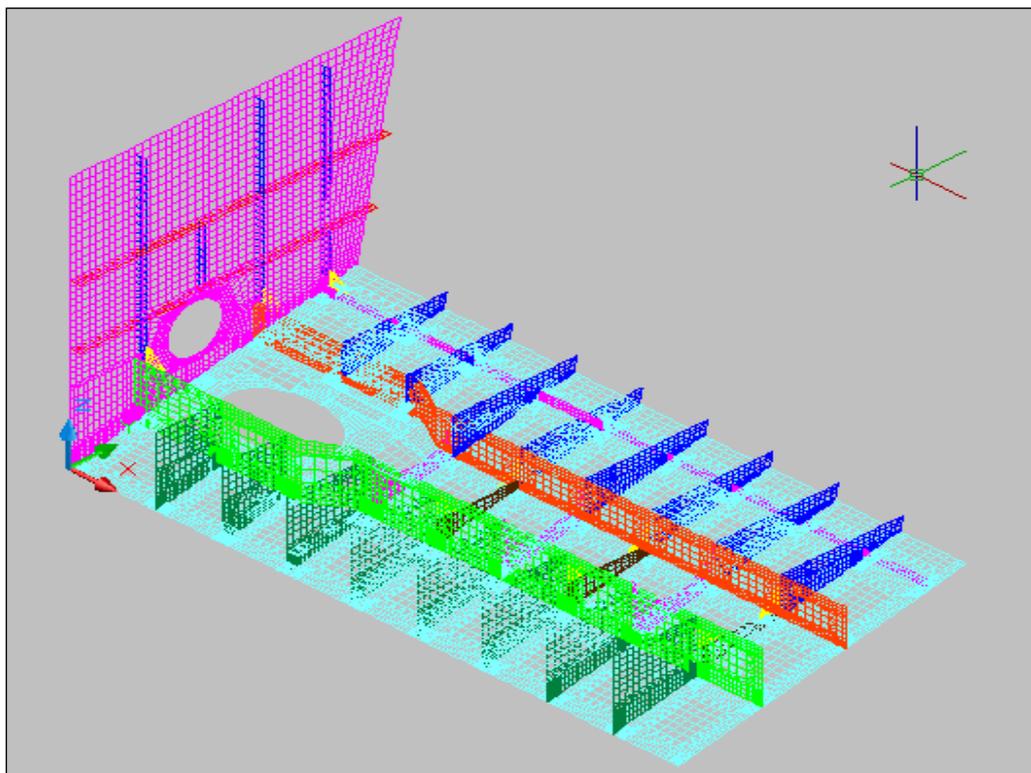


Figura No. 44 Modelo con superficies completas realizado en Autocad,

[Fuente: Elaboración Propia].

4. Modelaje de los “Frames” en los refuerzos del fondo y del espejo

Finalmente, se deben modelar los elementos que sirven para simular las alas de los refuerzos, para esto se usa el comando “Polilínea” y se grafican líneas en donde están ubicadas las alas de los refuerzos. En este caso se tiene elementos “Frames” tanto en los detalles estructurales del fondo como del espejo, y una vez ubicados, se obtiene un modelo completo como se muestra en la Figura No. 45.

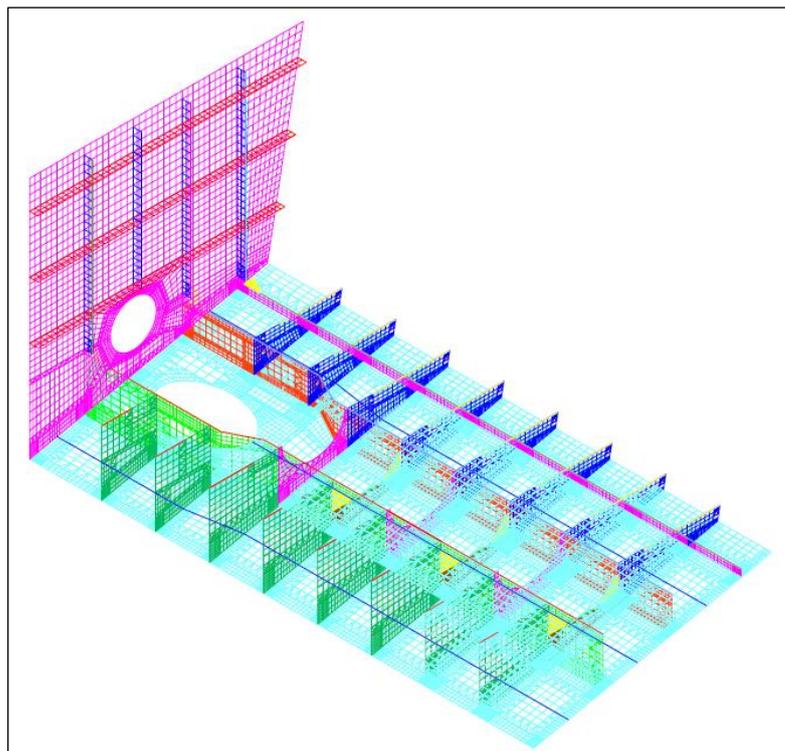


Figura No. 45 Modelo geométrico final con Superficies y elementos polilínea,

[Fuente: Elaboración Propia].

ANEXO C

IMPORTACIÓN DEL MODELO ESTRUCTURAL DESDE SAP2000

Inicialmente se debe tener el modelo ya desarrollado en un archivo con formato “.dxf”, con todas las superficies y polilíneas requeridas para representar los detalles estructurales a importar. Luego, se abre el programa en donde se realizará el análisis estructural, que en este caso es SAP2000, y se crea un nuevo documento en blanco, cuidando de que las unidades en las que este se encuentre sean equivalentes a las que se trabajó en Autocad. Finalmente se importa el modelo geométrico previamente desarrollado.

El proceso de importación se realiza en varios pasos, esto es debido al número de capas que se tiene en el archivo de Autocad y de que los elementos que se encuentran ingresados dentro de cada una de ellas tienen características diferentes entre sí. Entonces para hacer esto de manera ordenada se procede de la siguiente forma:

- i. Una vez creado el nuevo documento de SAP2000 se va a la pestaña `File ==> Import ==> Autocad .dxf file`, luego se busca la carpeta y el archivo que se desea Importar y clic en abrir. Una vez realizado

esto, se seleccionan las unidades en las que se desea importar el modelo, recordando que deben ser equivalentes a las del sistema usado en Autocad. Además se debe seleccionar la dirección global del eje “z” que se desea utilizar, y dar clic en aceptar. Luego se selecciona el tipo de elemento a importar, en este caso puede ser de tipo *Shells* o de tipo *Frames*, como se muestra en la Figura No. 46.

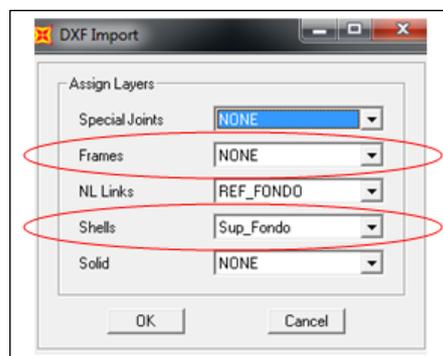


Figura No. 46 Opciones de tipos de elementos a importar desde SAP2000, [Fuente: Elaboración Propia].

En el presente caso se empezó importando las capas de tipo *Shell*, siendo la primera seleccionada, la capa perteneciente al planchaje de la lancha. Se siguen los pasos mencionados y se obtiene el modelo del fondo en la ventana de SAP2000, como se muestra en la Figura No. 47, en donde solo se observa las superficies realizadas, aun sin ninguna característica de material ni de sección.

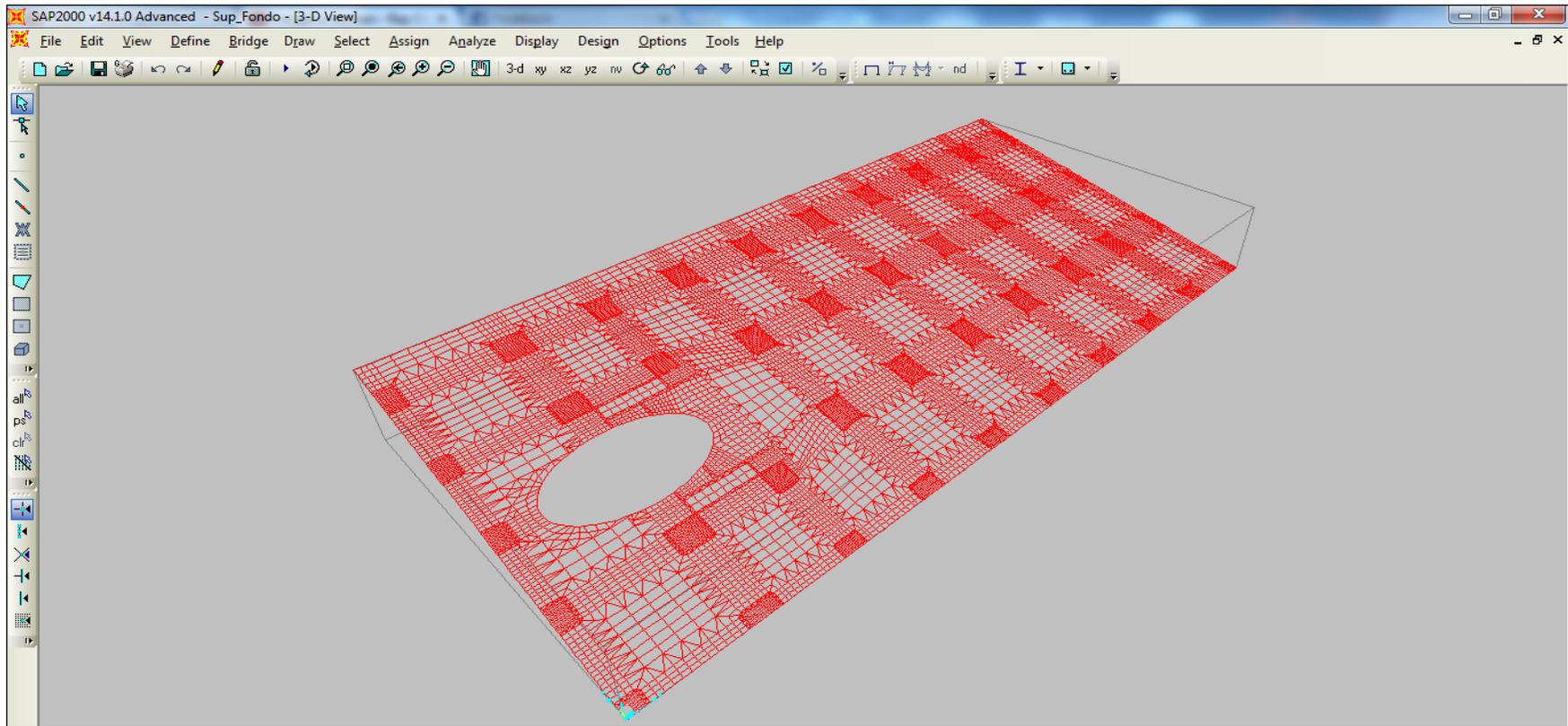


Figura No. 47 Capa perteneciente al fondo, importada desde Autocad al programa SAP2000, [Fuente: Elaboración Propia].

- ii. Luego se procede a agregar las características estructurales al modelo, esto quiere decir las propiedades mecánicas del material y características de la sección. Para realizar esto debemos ir a la pestaña `Define ==> Materials`, una vez ahí, dar clic en `Add New Material` y agregar las características que se deseen para el nuevo material. En la ventana que aparece (ver Figura No. 48), se debe cambiar el Nombre del material. Si se desea se puede elegir el color con el que se muestre, el Tipo de material, y las características mecánicas que lo conforman, tales como Masa por unidad de Volumen, Módulo de Young, etc.

Material Property Data	
General Data	
Material Name and Display Color	Aluminio [Color Swatch]
Material Type	Aluminum
Material Notes	Modify/Show Notes...
Weight and Mass	
Weight per Unit Volume	7849.0476
Mass per Unit Volume	800.3801
Units	Kgf. m. C
Isotropic Property Data	
Modulus of Elasticity, E	2.039E+10
Poisson's Ratio, U	0.3
Coefficient of Thermal Expansion, A	1.170E-05
Shear Modulus, G	7.842E+09
Other Properties for Aluminum Materials	
Aluminum Type	Wrought
Aluminum Alloy Designation	6061-T6
Compressive Yield Strength, Fcy	24607437
Tensile Yield Strength, Fty	24607437
Tensile Ultimate Strength, Ftu	26716646
Shear Ultimate Strength, Fsu	16873671
<input type="checkbox"/> Switch To Advanced Property Display	
OK Cancel	

Figura No. 48 Opciones de Propiedades del Material,

[Fuente: Elaboración Propia].

- iii. Luego para agregar las propiedades de la sección de la estructura superficial a usar se debe ir a la pestaña Define ==> Section Properties ==> Area Sections, y en la ventana que aparece seleccionar la opción Add New Section. Una vez en la ventana de propiedades de elementos “Shell” (ver Figura No. 49), se debe seleccionar el Nombre con el que se quiere que aparezca la Sección a utilizar. Además se puede modificar el color con el que se desea que se muestre y las características del tipo de elemento a utilizar y el espesor del material empleado, tomando en cuenta las unidades con las que se está trabajando.

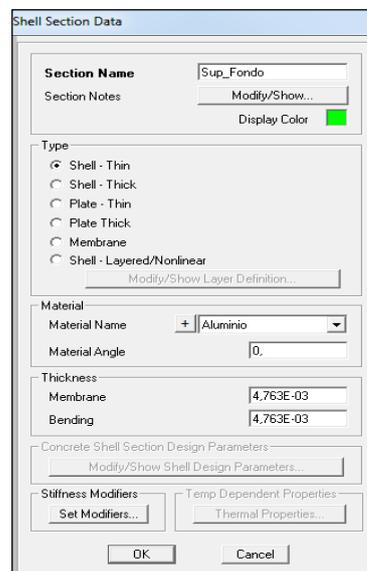


Figura No. 49 Opciones de propiedades de Sección superficial a utilizar,

[Fuente: Elaboración Propia].

Estos procesos hay que realizarlos para cada tipo de material que se tenga presente, y para cada tipo de sección con el que estemos trabajando en el modelo, recordando que además de secciones de tipo superficial, también tenemos secciones de tipo `Frame`.

- iv. Para agregar las características a los elementos de tipo `Frame`, se debe ir a la pestaña `Define ==> Section Properties ==> Frame Sections`, y dar clic en `Add New Property`, luego de lo cual nos aparecerá otra ventana en la que tenemos algunos tipos de secciones disponibles en la librería. Si no se encuentra la sección que se desea, establece desde cero nuestra sección, se usa la pestaña desplegable y se da clic en `Other`, y luego de esto se tendrá que dar clic en la opción `Section Designer`.

Aquí nos aparece una ventana como se muestra en la Figura No. 50, en donde se pide el Nombre de la sección a crear, además de que debemos ingresar el nombre del Material del que se quiere que este conformado este tipo de Sección. En la misma ventana se debe dar clic en el botón `Section Designer`, y aparece otra ventana cuadriculada como la de la Figura No. 51. En este caso solo se usan secciones de elementos `Frame` de tipo rectangular, por lo tanto solo se grafican secciones de este tipo.

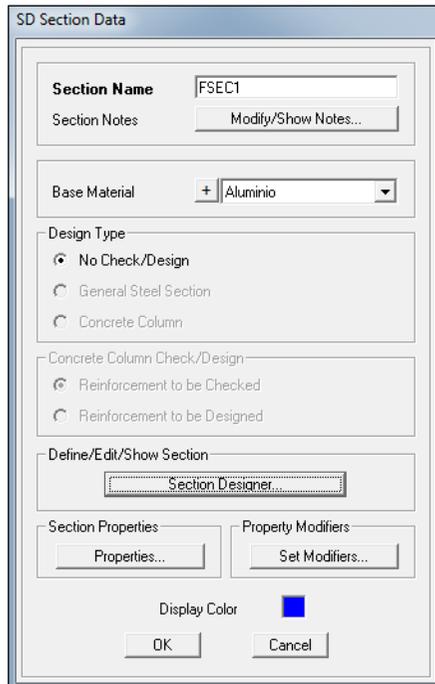


Figura No. 50 Ventana de Opciones de Elementos Frame,
[Fuente: Elaboración Propia].

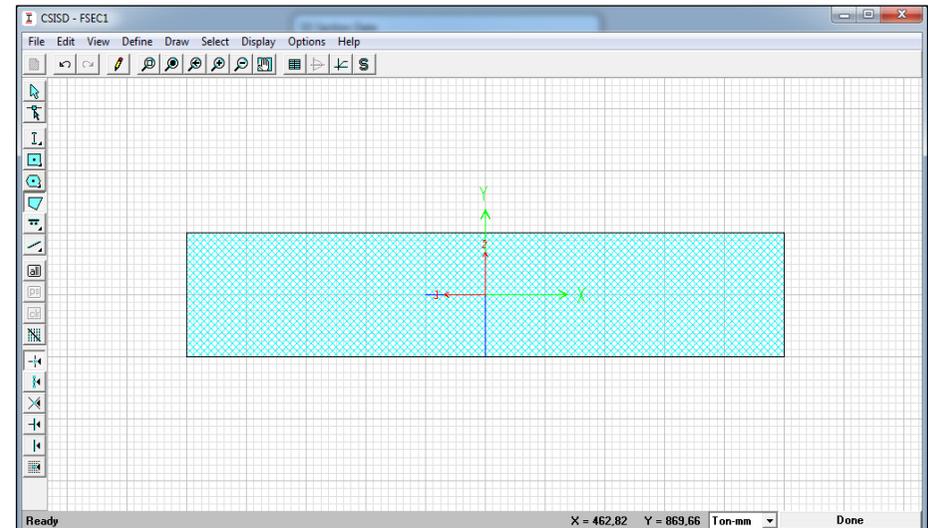


Figura No. 51 Ventana para agregar propiedades de
Secciones tipo Frame, [Fuente: Elaboración Propia].

- v. Luego se procede a agregar las características a las capas que se estén trabajando; como se había mencionado, se importó únicamente el planchaje del fondo, por lo tanto ahora se procede a agregarle las características del material y de la sección a esta capa. Para esto se selecciona todo el modelo al que le añadiremos las propiedades, vamos a la pestaña *Assign* ==> *Area/Frame* ==> *Sections*, y una vez en la ventana que aparece se selecciona el tipo de característica previamente cargada y clic en *OK*, obteniendo lo que se muestra en la Figura No. 52. Finalmente se guarda y se cierra el programa.

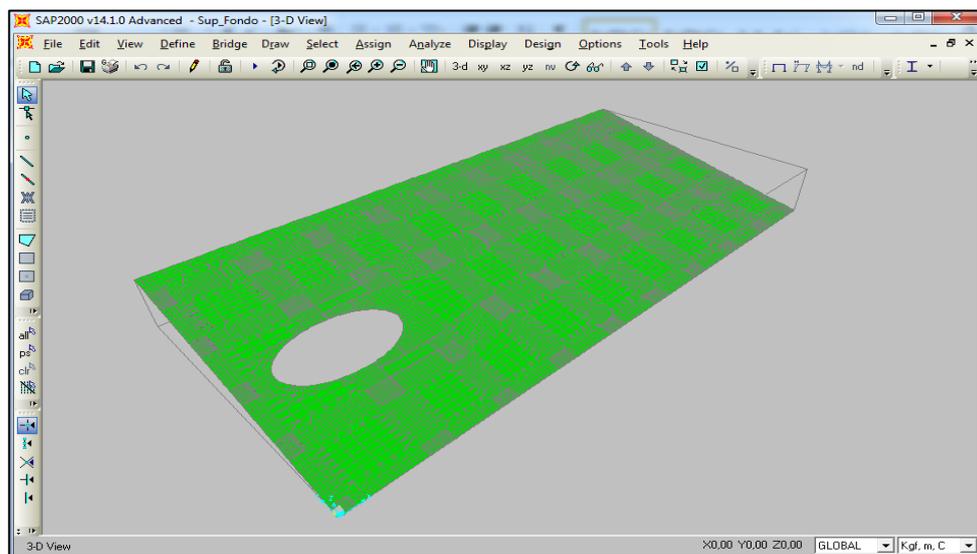


Figura No. 52 Fondo de la Lancha en SAP2000 con las propiedades de sección y material asignadas, [Fuente: Elaboración Propia].

Ahora, se procede a hacer lo mismo con cada superficie que se haya realizado en el archivo de Autocad, esto es debido a que, al final, se unirán todas las capas desarrolladas en SAP2000 para formar un solo modelo completo de la estructura. Para lograr esto, con las capas restantes se procede de la siguiente manera:

- i. Cada nueva capa deberá desarrollarse de la misma manera que el Fondo de la lancha, es decir, se crea un nuevo archivo de SAP2000, y se procede a importar la capa desde el archivo con extensión “.dxf”. Luego se cargan a la librería las respectivas características del material y de la sección, luego se selecciona el modelo que se está trabajando y se le adicionan las características previamente cargadas, ya sean de tipo Shell o Frame.

La diferencia está en que ahora, se guarda el archivo, pero, no se lo cierra, sino que se lo exporta a un archivo de intercambio propio de SAP2000. Para esto, vamos a la pestaña `File ==> Export ==> SAP2000 .s2k Text File` y aparecerá una nueva ventana, en la cual deberemos marcar todas las opciones, se da clic en `OK`, se guarda con un nombre y ahora si se puede cerrar. Este proceso se deberá realizar con todas las capas restantes que se tenga, tanto de tipo Shell como las de tipo `Frame`.

- ii. Para adjuntar el modelo completo, se debe abrir el archivo que se tenía inicialmente, el correspondiente al Fondo de la lancha, el cual se usará como base, es decir, que en este se sobrescribirá la información realizada para las otras capas con el proceso especial mencionado en el párrafo anterior. Entonces para importar las capas sobre ésta, se debe dirigir a la pestaña `File ==> Import ==> SAP2000 .s2k Text File ==> Add to existing model`, y clic en `Advanced options`.

Una vez que aparezca la ventana de opciones, se va a la pestaña `ITEMS WITH SAME NAME` y ahí se selecciona las opciones `Overwrite Previous ítem` y `Add DB ítem to model with new name`, esto último tanto para el bloque de `Joint, Frame, Area, Solid and Links Elements` como para `Other elements`. Luego, en la misma ventana se va a la pestaña `Items in same Location` y ahí se marca en todos los bloques la opción `Replace old one`, luego clic en el botón `OK`. Finalmente se selecciona el archivo a importar y clic en `abrir`. De esta forma se repite hasta tener el modelo completo con todas las capas agregadas.

Se sugiere que se vaya comprobando, a medida que se están importando las capas, la dirección en las que se está trabajando, y que todas las características y propiedades de materiales y secciones estén

correctamente agregadas. En caso de que algo esté errado, lo más fácil y recomendable es que se elimine lo último que se ha realizado, ir a la capa correspondiente y modificar solo las características de la capa en cuestión, volverla a exportar y finalmente importarla en la capa base.

- iii. Una vez que ya se tiene todas las capas se procede a agregar las condiciones de frontera, las cuales en este caso serán Simplemente soportadas en todos los nodos de los bordes, obteniendo el modelo final como se muestra en la Figura No. 53.

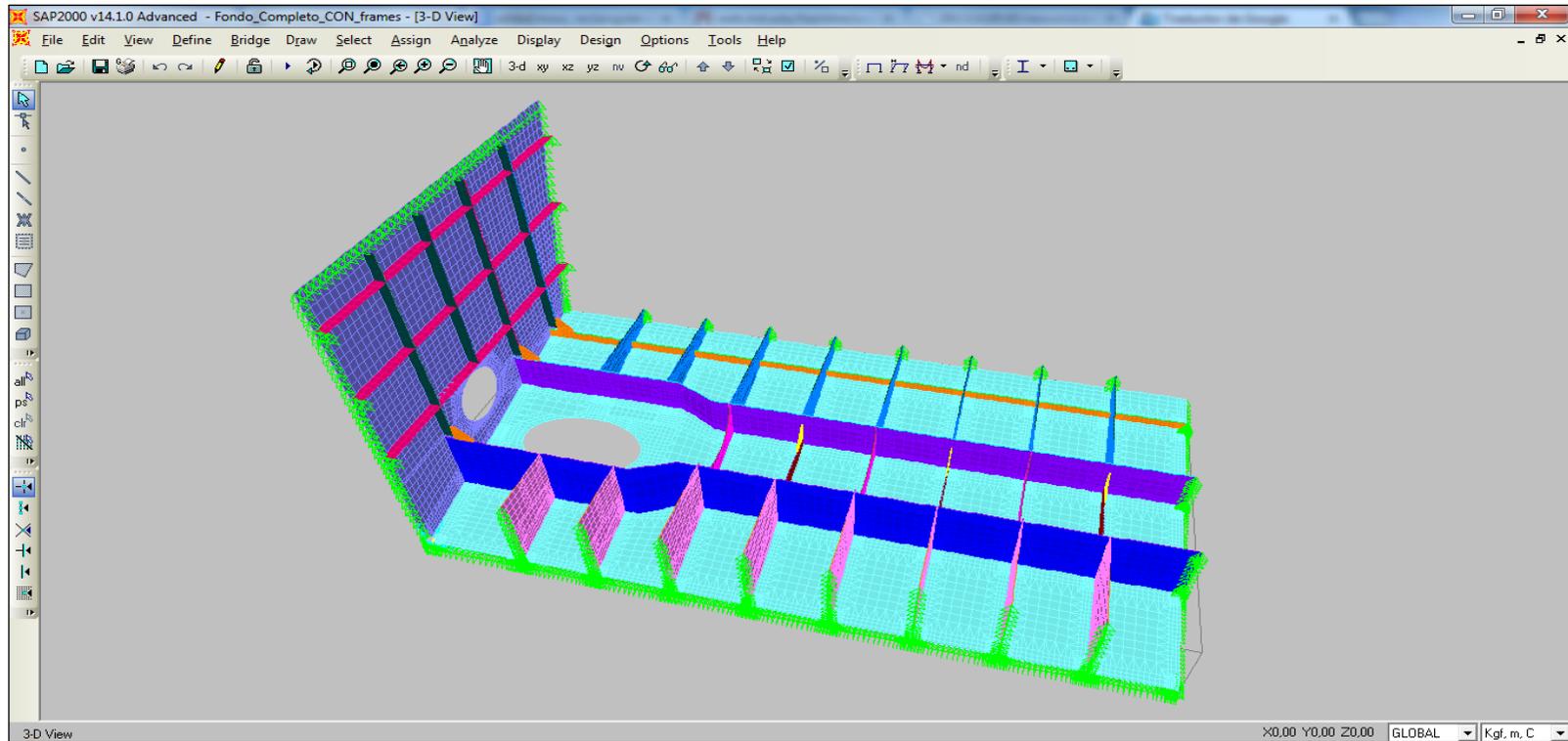


Figura No. 53 Modelo completo con características y condiciones de frontera realizadas en SAP2000,

[Fuente: Elaboración Propia].

iv. Al modelo final mostrado en la Figura No. 53, se le agrega la masa equivalente al motor y al ducto, los cuales son añadidos como elementos sólidos prismáticos para la masa equivalente del motor y como Frames de sección circular para el ducto de sujeción del Chorro de agua entre el fondo y el espejo. Estos dos elementos fueron agregados con material Acero, variándoseles la densidad, la cual fue obtenida de dividir la masa de cada elemento analizado para el volumen total que ocupaban. Estos valores se determinaron como se detalla a continuación:

- Para el motor se definió un prisma sólido de dimensiones 0.75 x 0.48 x 1 [m], y teniendo del manual que la masa es de 0.896 [Ton], obteniendo como densidad equivalente para este elemento el valor que se detalla en la tabla mostrada a continuación:

Motor	
Masa motor [Kg]	896
L [m]	0.75
B [m]	0.88
H [m]	1
Volumen [m³]	0.66
Densidad_eq [Kg/m³]	1357.58

Tabla No. XXV Tabla de dimensiones de solido de modelo para el motor con densidad equivalente, [Fuente: Elaboración Propia].

- Para el ducto del chorro de agua se definió 8 elementos Frames de sección circular de diámetro 0.1 [m], y, teniendo un total de 4.65 [m] en longitud, se encuentra el volumen, para determinar la densidad equivalente al dividir el valor del peso de cada ducto ($m_{Ducto} = 187 [kg]$) para el volumen total. Los valores encontrados son los que se muestran en la siguiente tabla de resumen:

	Diámetro [m]	0.1	
Frame	Longitud [m]	Area [m ²]	Volumen [m ³]
1	0.95	0.00785	0.00743
2	0.79	0.00785	0.00619
3	0.56	0.00785	0.00441
4	0.32	0.00785	0.00252
5	0.23	0.00785	0.00177
6	0.38	0.00785	0.00299
7	0.60	0.00785	0.00472
8	0.82	0.00785	0.00645
		V_Total	0.03648
Masa [Kg]	187		
Densidad [Kg/m³]	5125.41		

Tabla No. XXVI Tabla de resumen para masa, volumen y densidad equivalente de ducto de chorro de agua, [Fuente: Elaboración Propia].

Además de los 8 elementos Frames mencionados en el párrafo anterior, también se agregó Frames en los bordes de los agujeros, para asegurar que todo el sistema de agujeros que sujetan el ducto se excita de manera conjunta.

El modelo con la masa de motor y ducto añadidos es como se muestra a continuación:

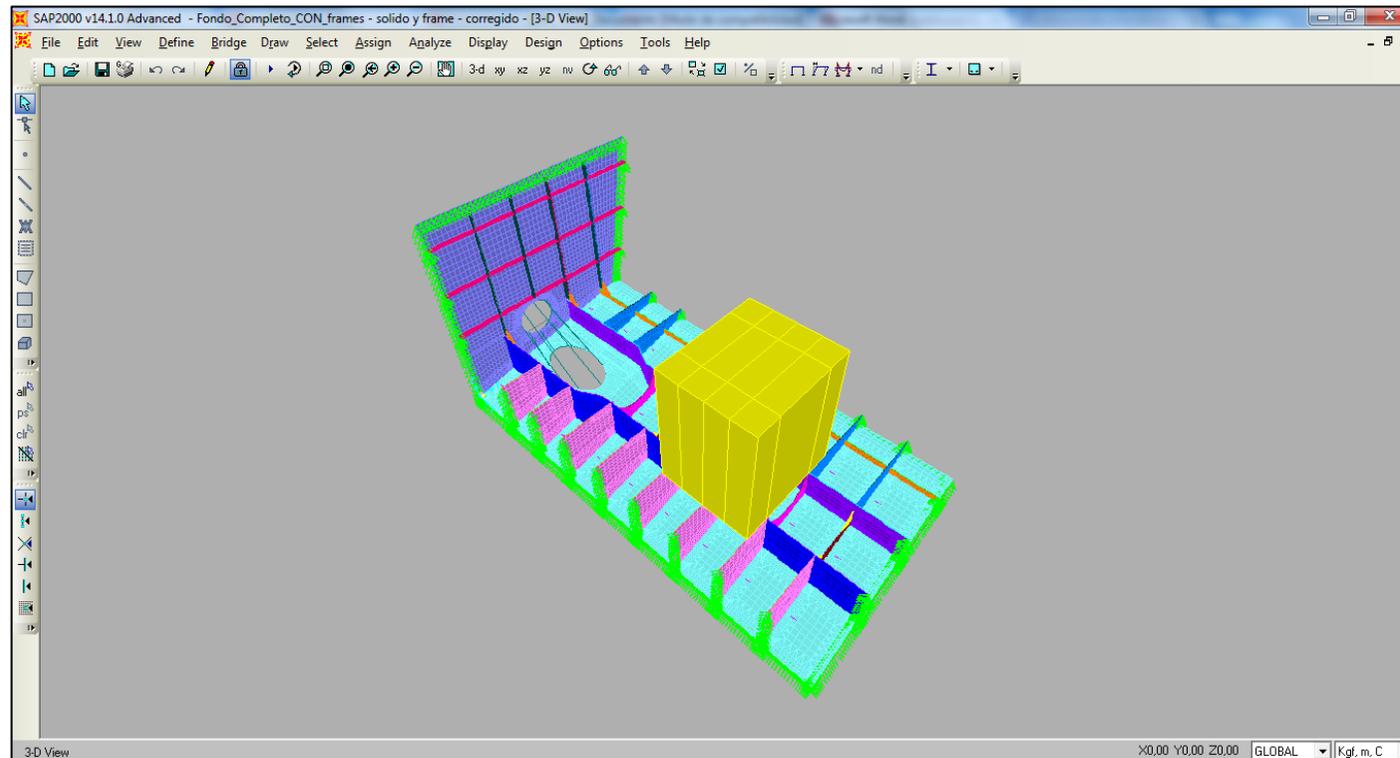


Figura No. 54 Gráfico final de modelo con masa de motor y ducto, [Fuente: Elaboración Propia].

ANEXO D

SELECCIÓN DE TAMAÑO DE ELEMENTOS EN LA DISCRETIZACIÓN DEL MODELO

Para discretizar las superficies entre los bordes se debe decidir el tamaño de los elementos. Mientras más pequeños sean los elementos más precisos serán los resultados obtenidos, pero, se necesitará una computadora con mayor recurso de procesamiento. Inicialmente se empezó a discretizar de manera uniforme todas las superficies, como se muestra en la Figura No. 55, pero, este modelo, una vez finalizado, tuvo problemas al exportarlo al programa de análisis estructural, debido a la limitada capacidad del computador empleado.

En el modelo inicialmente generado se tenía elementos con dimensiones medias de 1.5 x 1.5 [cm], obteniendo un total de 105639 nodos y 105081 elementos. Recordando que se está trabajando espacialmente, por cada nodo habría 6 grados de libertad (GDL) encontrando que, se deberían resolver 633834 ecuaciones. Por la extrema lentitud del proceso de solución se decidió cambiar la manera de discretización de la estructura.

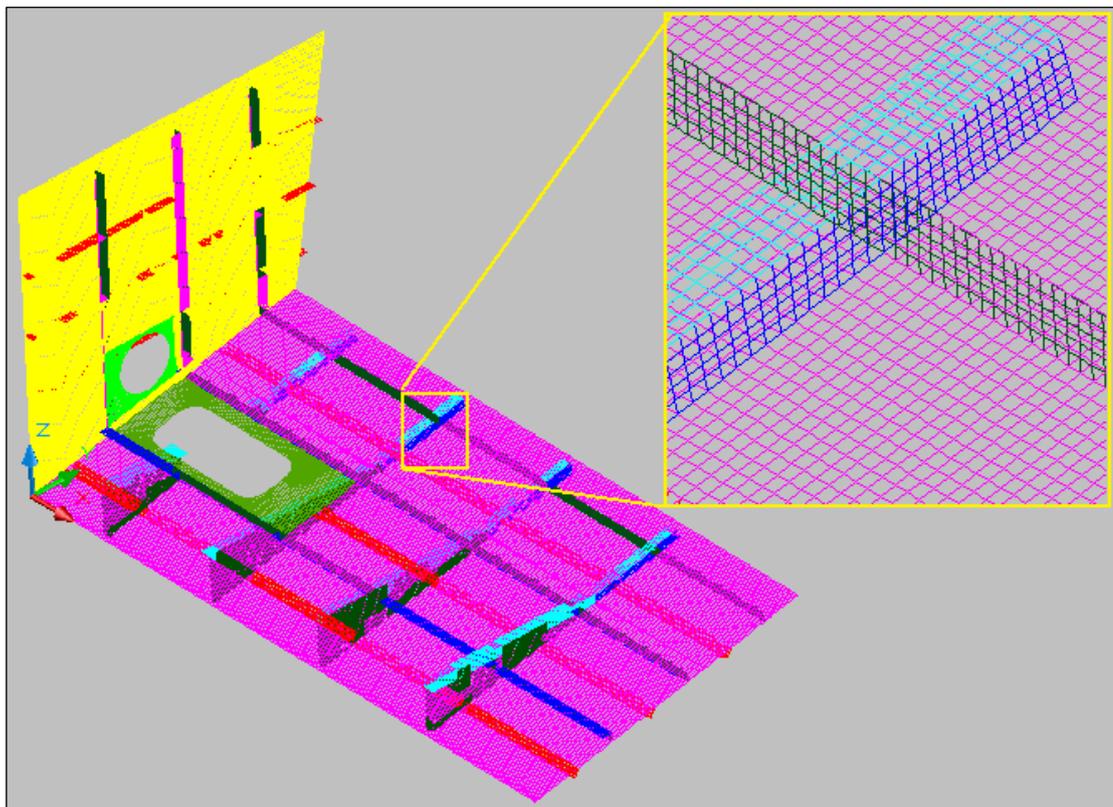


Figura No. 55 Modelo inicial, discretización uniforme,
[Fuente: Elaboración Propia].

En la Figura No. 55 se pueden observar las superficies originalmente generadas.

ANEXO E

DETERMINACION DE LA CARGA DEBIDA AL TORQUE VIBRATORIO DEL MOTOR

Para la determinación de la carga debida al torque del motor se sigue el procedimiento descrito en la sección 2.1, “Fuerzas vibratorias generadas por el motor principal”. Primero se debe conocer las características del motor utilizado en la lancha a analizar, el cual en este caso es de marca Cummins, modelo QS8.3-500:

Engine Specifications		Power Ratings	
Configuration	In-line 6-cylinder, 4-stroke diesel	Rating	HO/ID
Bore & Stroke	114 mm x 135 mm (4.49 in x 5.31 in)	Metric hp	500
Displacement	8.3 L (505 in ³)	bhp	493
Aspiration	Turbocharged / Aftercooled	KW	368
Rotation	Counterclockwise facing flywheel	Rated rpm	2600
		Max Torque ft-lbs	1327
		Max Torque N-m	1799
		rpm @ max torque	1800

Tabla No. XXVII Características generales del Motor Cummins QS8.3-500,

[18].

Además también se dispone de información de la potencia (BHP) entregada por el motor según las RPM a las que está trabajando, información obtenida del mismo manual, como se muestra a continuación en la Tabla No. XXVIII:

Rating	QSC8.3-500 ID/HO				QS8.3-550 HO			
rpm	2600	2400	2200	2000	3000	2800	2600	2400
KW	368	367	366	353	405	404	399	221
l/hr	96.1	76.1	59.4	46.2	112.8	87.7	73.1	56.8
bhp	493	493	490	474	543	541	535	530
gal/hr	25.4	20.1	15.7	12.2	29.8	23.2	19.3	15.0

Tabla No. XXVIII Consumo de combustible y BHP según RPM del motor,

[18].

Según lo mostrado en las dos tablas anteriores, se puede realizar una tabla de resúmenes, con las características principales del motor Cummins, tal y como se muestra en la siguiente tabla:

Motor Cummins de 4 tiempos	
k	0.5
Carrera [m]	0.135
Diámetro del cilindro [m]	0.114
Z [# cilindros]	6
N [RPM]	2600
Torque [Nm]	1799
Potencia _{Efectiva} [BHP]	493
RPM	BHP
2000	474
2200	490
2400	493
2600	493

Tabla No. XXIX Características generales del Motor Cummins

de la lancha "Guayas", [Fuente: Elaboración Propia].

De la tabla anterior se procede a obtener una gráfica para observar la variación de la potencia del motor según las RPM a las que se encuentra trabajando, obteniendo la Figura No. 56:

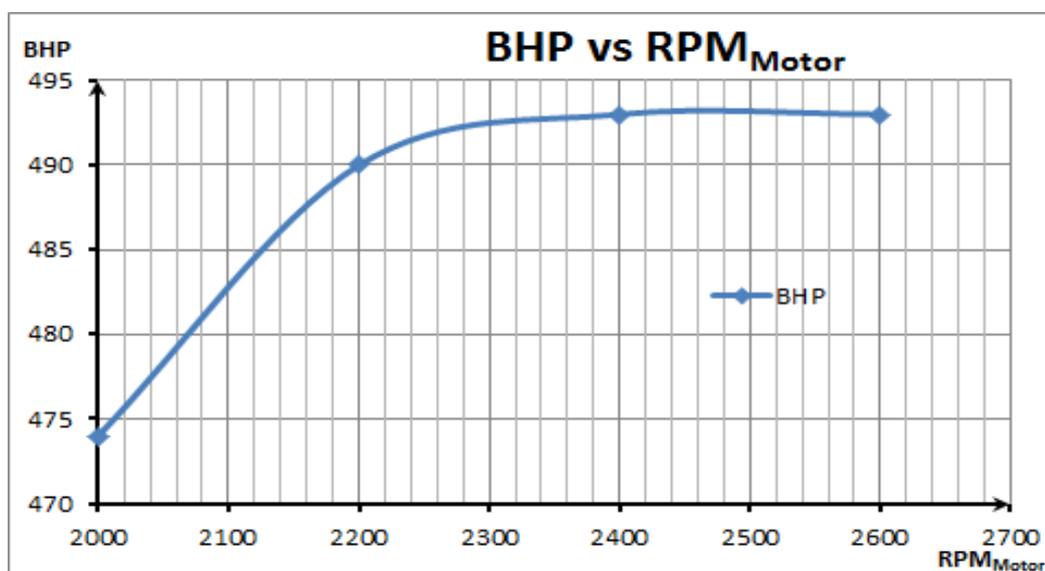


Figura No. 56 Curva de BHP según RPM de trabajo del motor Cummins,
[Fuente: Elaboración Propia].

Con los valores mostrados en la Tabla No. XXIX, se procede de la siguiente forma a calcular las fuerzas equivalentes:

- a) Determinar la Presión efectiva, teniendo en cuenta los valores referenciales para ésta, que se muestran en la siguiente tabla:

Presión efectiva [Kg/cm ²]			Tipo de motor
6	a	8.5	Motor 4T diésel aspiración natural
10	a	25	Motor 4T diésel sobrealimentados
4	a	10	Motor 2T diésel

Tabla No. XXX Rangos comunes de referencia para la presión efectiva en motores diésel, **[19]**.

Para determinar el valor de la Presión efectiva se aplica la siguiente fórmula:

$$Potencia_E = p_E ASZNK \text{ [Watts]} \quad \text{Ec. 9}$$

donde:

p_E : Presión media efectiva del motor, está en [N/m²].

A : Área de la sección del cilindro, en [m²].

S : Carrera del émbolo, en [m].

Z : Es el número de cilindros que tiene el motor.

N : Es el valor de RPM del motor al máximo torque, en [Rev./min].

K : Es el factor que relaciona ciclos y una revolución, siendo el valor para motores de 4 tiempos $K=0.5$.

De donde, despejando la Presión efectiva, se tiene:

$$p_E = \frac{Potencia_E \left[\frac{N}{m^2} \right]}{ASZNK} p_E = 2.05 \times 10^6 \left[\frac{N}{m^2} \right] = 20.53 \left[\frac{Kg}{cm^2} \right] \quad \text{Ec. 10}$$

El valor obtenido si se encuentra dentro del rango que está estipulado para el tipo de motor que se está analizando (Motor de 4 tiempos y sobrealimentado), por lo tanto se puede avanzar con los cálculos.

- b) Se debe calcular la Potencia media indicada del motor, para lo cual se debe tener el valor de la eficiencia mecánica, que según la referencia “Motores de combustión interna”, se estima con el valor de $\eta_M = 0.85$, [19]. Luego, se usa la siguiente ecuación:

$$\eta_M = \frac{P_E}{P_I} \implies P_I = \frac{P_E}{\eta_M} \quad \text{Ec. 11}$$

donde:

P_I : Potencia indicada del motor.

P_E : Potencia efectiva del motor.

η_M : Eficiencia mecánica del motor.

Una vez reemplazados los valores, se encuentra que la Potencia indicada del motor es de:

$$P_I = 432680 \text{ [Watts]}$$

- c) Luego, se debe determinar la presión media indicada del motor, para lo cual se usa la siguiente formulación:

$$Potencia_I = p_i ASZNK \text{ [Watts]} \quad \text{Ec. 12}$$

donde:

p_i : Es la presión media indicada a la que trabaja el motor, está en $[N/m^2]$.

Despejando el valor de la presión media indicada de la ecuación de Potencia indicada, se obtiene el siguiente valor:

$$p_i = \frac{Potencia_I \left[\frac{N}{m^2} \right]}{ASZNK}$$

Reemplazando los valores respectivos se tiene que:

$$p_i = 2415406 \left[\frac{N}{m^2} \right] = 24.15 \left[\frac{Kg}{cm^2} \right]$$

- d) Se debe determinar la presión media indicada para cada velocidad de rotación de motor, lo cual se logra usando la siguiente relación, [19]:

$$p_{i_Nueva} = p_i \left(\frac{N_{Nuevo}}{N_{Total}} \right)^2, \left[\frac{Kg}{cm^2} \right] \quad \text{Ec. 13}$$

Reemplazando los valores se obtiene una tabla de datos, en donde se puede observar la distribución de la Presión indicada del motor para cada RPM de trabajo, como se muestra a continuación:

N [RPM]	Presión media indicada [Kg/cm²]
0	0.0000
100	0.0357
200	0.1429
300	0.3216
400	0.5717
....
....
1700	10.3262
1800	11.5768
1900	12.8988
2000	14.2923
2100	15.7573
2200	17.2937
2300	18.9016
2400	20.5810
2500	22.3318
2600	24.1541

Tabla No. XXXI Presión media indicada según RPM del motor, [Fuente:

Elaboración Propia].

- e) Luego se determina el esfuerzo tangencial equivalente para un motor según la presión indicada que se está analizando. Para esto, se usa la gráfica del libro “Motores de combustión interna”, [19], en donde se presentan valores de esfuerzos según la presión media indicada:

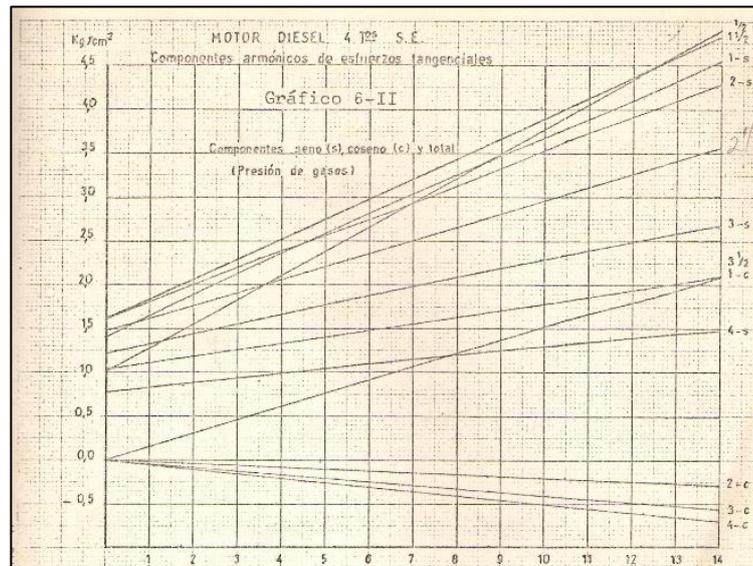


Figura No. 57 Gráfica de Esfuerzos tangenciales según la Presión indicada, [19].

De la Figura No. 57 usa la curva que presenta los esfuerzos tangenciales para el armónico de interés, el cual, en este caso analizado, es el del 3er. armónico debido a que se tienen 6 cilindros en el motor que es de 4 tiempos.

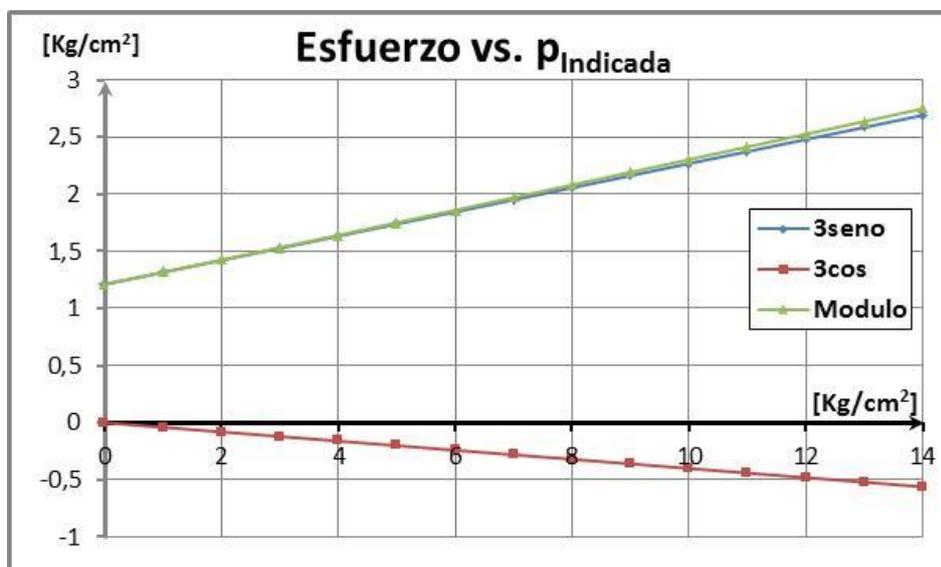


Figura No. 58 Esfuerzos tangenciales vs Presión indicada, para motores diésel de 4T, [Fuente: Elaboración Propia].

- f) Con estos valores se calcula el componente armónico del Torque que produce el motor:

$$Torque = Esfuerzo * area * z * brazo$$

Ec. 14

donde:

Torque: Amplitud del armónico, en [Kg*m].

Esfuerzo: Es el esfuerzo tangencial para cada presión indicada del motor, en [Kg/cm²].

Área: Área del cilindro del motor, en [m²]

Z: Es el número de cilindros que tiene el motor.

Brazo: Distancia máxima a la cual va a ser aplicada de manera teórica el grupo de fuerzas, [m], dado por el valor de la carrera del cilindro.

Al reemplazar estos valores que se tienen en la Ec. 14 se obtienen los valores que se muestran en la Tabla No. XXXII:

N RPM	Esfuerzo tangencial [Kg/cm ²]	Torque [Kg*cm]
104.03	1.21	50.02
320.71	1.26	52.21
497.91	1.32	54.41
642.97	1.37	56.63
762.25	1.42	58.85
861.20	1.48	61.08
944.40	1.53	63.32
1015.71	1.59	65.57
....
....
1804.70	2.47	102.06
1846.75	2.52	104.36
1886.86	2.58	106.67
1924.95	2.64	108.97
1960.98	2.69	111.28
1995.03	2.75	113.58

Tabla No. XXXII Valores obtenidos de Torque

según Esfuerzo tangencial y según RPM, [Fuente: Elaboración Propia].

Realizando una gráfica de los valores de los valores de Torque encontrados según las RPM del motor analizado, se obtiene lo siguiente incluyendo una ecuación de la curva de tendencia:

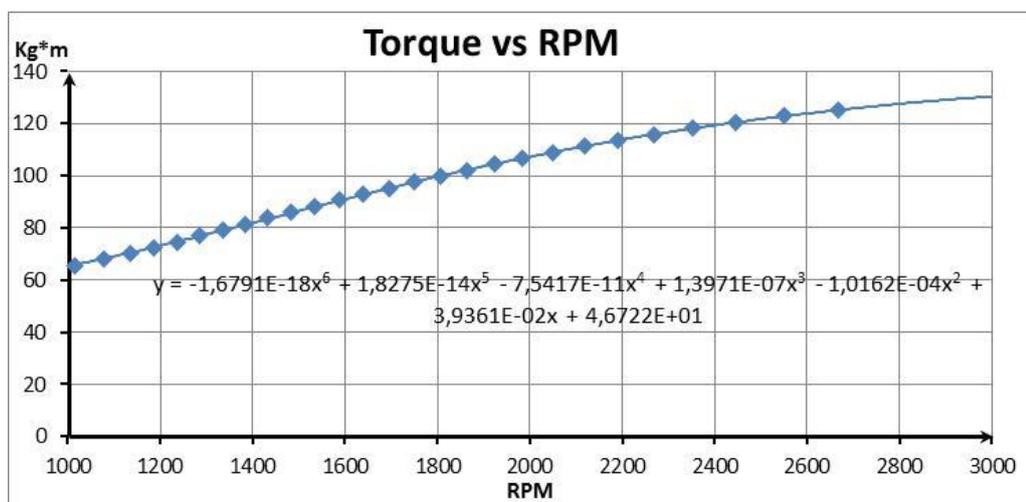


Figura No. 59 Gráfica de Torque del motor Vs. RPM de trabajo,
[Fuente: Elaboración Propia].

De los valores anteriormente mostrados, tomamos 5 velocidades de rotación referenciales para el análisis. Estos valores de RPM's comprenden desde la velocidad de vacío hasta la máxima velocidad de trabajo, es decir que los análisis para la estimación de la carga del motor será para RPM's desde 2000 hasta 2600 [RPM].

- g) Luego, se procede al cálculo de carga equivalente al torque, la cual se genera debido a la separación que existe entre los refuerzos que

soportan al motor. El cálculo de esta carga equivalente se realiza usando la definición de Torque que menciona que al aplicar un par de fuerzas en un eje de acción se produce un momento de fuerzas o torque, y se muestra en la:

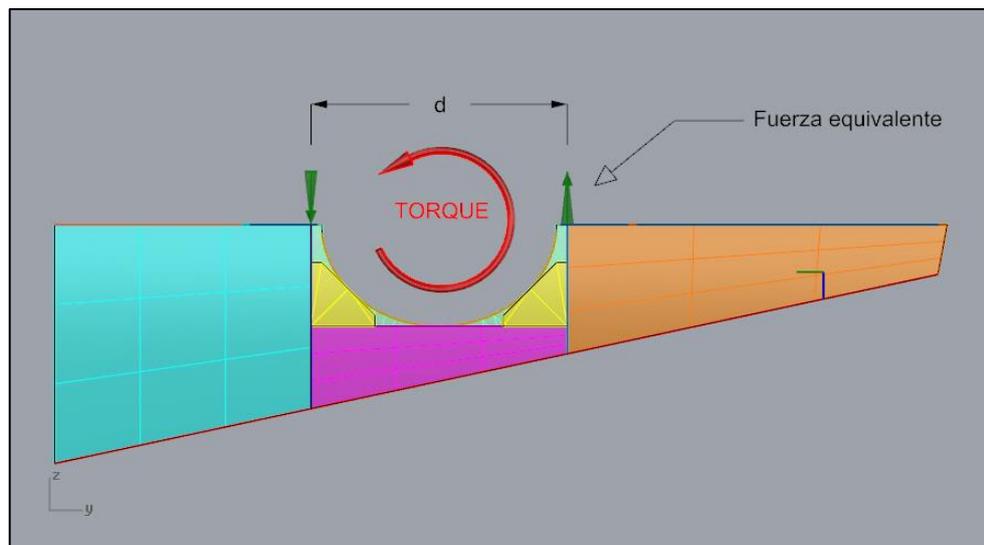


Figura No. 60 Fuerza equivalente aplicada en los refuerzos de la base del motor, [Fuente: Elaboración Propia].

Luego relacionando se obtiene la fuerza relacionada al torque con la siguiente ecuación:

$$F_{Equivalente} = \frac{Torque}{d} \quad \text{Ec. 15}$$

Del plano la distancia de separación entre los refuerzos de la base del motor es $d= 0.48$ [m], por lo que este será el valor del brazo requerido para obtener la carga equivalente total debido a torque según RPM de trabajo del motor. Empleando la ecuación mencionada, y reemplazando en los valores correspondientes, obtenemos la siguiente tabla de resultados:

Velocidad Motor [RPM]	Amplitud del armónico del Torque [Kg*m]	Fuerza equivalente total [Kg]
2000	107.31	223.56
2150	112.34	234.03
2300	116.73	243.19
2450	120.56	251.16
2600	123.89	258.12

Tabla No. XXXIII Tabla de Fuerzas equivalentes calculadas según RPM del motor, [Fuente: Elaboración Propia].

En la Tabla No. XXXIII, se observa en la 3ra. columna el valor total de la fuerza equivalente al torque según las RPM del motor. La carga será aplicada en un total de 10 nodos, por lo que se tendrán 5 parejas de nodos con un momento aplicado a cada par. Es decir que el valor de Carga equivalente total se debe dividir para 5, y aplicarla en cada par de nodos en direcciones contrarias, como se observa en la Figura No. 61:

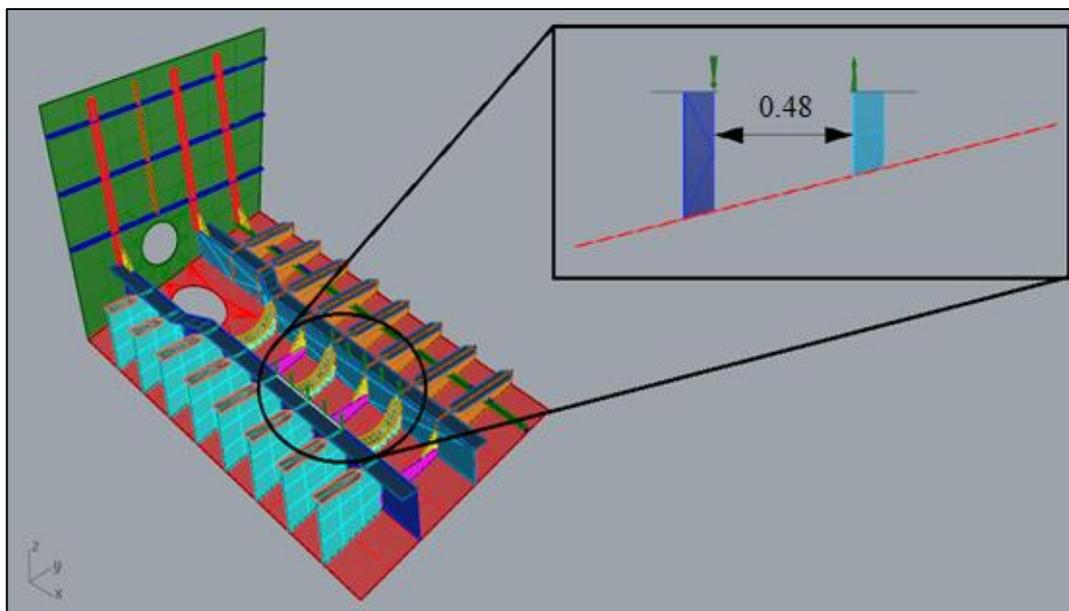


Figura No. 61 Carga debida al Torque del motor, aplicada en la estructura del fondo de la lancha, [Fuente: Elaboración Propia].

Los valores calculados de carga equivalente para cada RPM analizada se muestran en la siguiente tabla:

Velocidad Motor RPM	Fuerza equivalente total [Kg]	# Momentos: 5
		F_Apoyos [Kg]
2000	223.56	44.71
2150	234.03	46.81
2300	243.19	48.64
2450	251.16	50.23
2600	258.12	51.62

Tabla No. XXXIV Tabla de resultados para velocidades del motor con las respectivas cargas en los apoyos, [Fuente: Elaboración Propia].

h) Finalmente, se debe calcular la frecuencia de excitación a la cual se va a aplicar cada carga modelada. Las frecuencias deben ser equivalentes a las RPM's de trabajo del motor que ya se han analizado y serán las del 6to.armónico debido a que el motor cuenta con 6 cilindros. Estas frecuencias de excitación serán mostradas en Ciclos por segundo (CPS) siendo la formulación para obtener la frecuencia de excitación la siguiente:

$$f_{Excitacion} = \frac{6 \times RPM}{2} \times \frac{1}{60} [CPS] \quad \text{Ec. 16}$$

Reemplazando los valores de RPM del motor analizados, se obtiene la siguiente tabla de resultados, en donde se muestra el valor de la frecuencia del motor, la carga que se debe aplicar y la frecuencia de excitación equivalente para cada torque que provoca el motor según las RPM's de trabajo:

RPM Motor	Torque [Kg*m]	No. Apoyos		f _{Excitacion} CPS
		Fuerza Total [Kg]	F _{Apoyos} [Kg]	
2000	107.31	223.56	44.71	100.0
2150	112.34	234.03	46.81	107.5
2300	116.73	243.19	48.64	115.0
2450	120.56	251.17	50.23	122.5
2600	123.90	258.12	51.62	130.0

Tabla No. XXXV Módulo de carga modelada a aplicar y frecuencia de excitación del motor, [Fuente: Elaboración Propia].

Se debe mencionar que cuando cada carga modelada se aplica en el modelo numérico realizado en SAP2000, ésta se ingresará con un módulo asumido de 1 [kg] trabajando a la respectiva frecuencia de excitación equivalente a la velocidad del motor. Luego, los resultados que se generen de realizar este cálculo (Esfuerzos) deberán ser corregidos, con un factor de corrección equivalente a la carga modelo, lo que se puede hacer debido a que se está trabajando dentro del campo lineal.

El factor de corrección (F.C.) mencionado, debe ser calculado de la siguiente manera:

$$F.C. = \frac{F_{Real} / \# \text{ Nodos}}{F_{Asumida} / \# \text{ Nodos}} \quad \text{Ec. 17}$$

donde:

$F_{Real} / \# \text{ Nodos}$: Es la fuerza total dividida para el número de nodos donde se va aplicar la carga, dado en [Kg]. Este valor es el mismo que se menciona como F_{Apoyos} en la Tabla No. XXXV.

$F_{Asumida}/\# \text{Nodos}$: Es la fuerza estimada en cada nodo de aplicación, y está dada en [Kg].

Reemplazando en la ecuación anterior, se observa que los factores de corrección a utilizar en cada análisis son los siguientes:

$F_{Real}/\# \text{Nodos}$	$F_{Asumida}/\# \text{Nodos}$	Factor de corrección
44.71	1	44.71
46.81	1	46.81
48.64	1	48.64
50.23	1	50.23
51.62	1	51.62

Tabla No. XXXVI Tabla de factores de corrección para carga debido al torque del motor, [Fuente: Elaboración Propia].

ANEXO F

DETERMINACION DE CARGA DEBIDA AL EMPUJE

La fuerza de empuje es la que vence la resistencia al avance que ejerce el medio sobre la embarcación, la que depende en gran parte de la velocidad de navegación. Para modelar la carga vibratoria equivalente del empuje que actúa sobre los agujeros que se encuentran en el fondo y en el espejo de la lancha se sigue el procedimiento descrito en el subcapítulo 2.1, el cual se detalla a continuación. Primero, se determina la resistencia que tiene la embarcación en función de la velocidad de avance. En el caso la lancha “Guayas”, en [20] se reporta dicho valor estimado con el método de Savitsky:

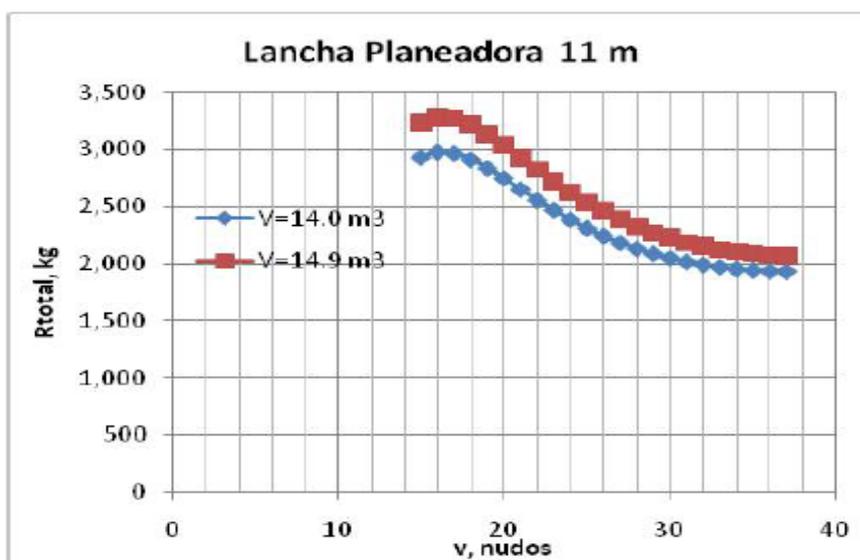


Figura No. 62 Resistencia al avance con método de Savitsky, [20].

Con estas gráficas, se puede obtener la ecuación de la curva que denota la relación entre la Resistencia promedio en función de la velocidad de avance, obteniendo los valores como se muestra a continuación:

v [Nudos]	Resistencia [Kg]
14	3086
16	3208
18	3090
20	2876
22	2653
24	2455
26	2293
28	2168
30	2073
32	2005
34	1960
36	1934

Tabla No. XXXVII Valores de resistencia en función de la velocidad para la lancha "Guayas", [Fuente: Elaboración Propia].

Para el tramo de bajas velocidades, entre 0 y 14 nudos, se ha estimado un comportamiento cuadrático de la resistencia según la velocidad de análisis, obteniendo finalmente 2 ecuaciones de Resistencia dependiendo del rango de velocidad, como se muestra posteriormente:

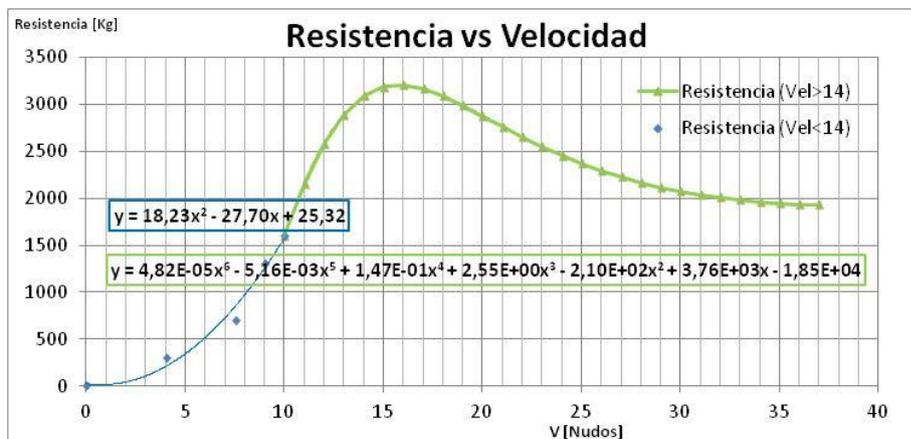


Figura No. 63 Resistencia vs velocidad, con ecuaciones que las describen,
[Fuente: Elaboración Propia].

En la misma referencia, [20], se muestran resultados de pruebas que se ha realizado a las lanchas, para determinar la velocidad a la que se desplazan según la velocidad de rotación del motor, de las cuales se han obtenido las siguientes tablas de resultados:

RPM	A favor, nudos		En contra, nudos		Promedio	
	Vel	GPH	Vel	GPH	Vel	GPH
2000	12.8	23.2	8.9	23.2	10.85	23.16
2200	17.4	32.2	10.8	31.6	14.1	31.86
2400	31.4	40.8	15.2	40.6	23.3	40.66
2500	36	45.6	27.2	44.2	31.6	44.86
2600	37.3	52	32.2	52	34.75	51.96
2500	34	44	28.8	45.6	31.4	44.76
2400	26.4	38.6	24	40.6	25.2	39.56
2300	18.7	35.8	14.5	36.6	16.6	36.16

RPM	A favor, nudos		En contra, nudos		Promedio	
	Vel	GPH	Vel	GPH	Vel	GPH
2000	13	23.2	8.7	23.2	10.85	23.16
2200	15.2	32.2	12.8	31.6	14	31.86
2400	21.3	40.8	24.7	40.6	23	40.66
2500	33.8	45.6	30	44.2	31.9	44.86
2600	36.6	52	32.1	52	34.35	51.96
2500	33.8	44	28.5	45.6	31.15	44.76
2400	27.5	38.6	24.4	40.6	25.95	39.56
2300	19.7	35.8	13	36.6	16.35	36.16

Figura No. 64 Tablas de resultados de las pruebas realizadas a las lanchas 1 y 2, [20].

Los valores mostrados en la Figura No. 63 servirán para luego obtener una relación directa entre la velocidad de rotación del motor y el empuje que estas tienen.

De los valores observados en las tablas de la Figura No. 64, se puede obtener valores de velocidades promedios en función de las RPM del motor a las que se encuentra trabajando la lancha, de donde se puede tener la siguiente tabla de resumen, una vez que se realizan las operaciones respectivas:

RPM	Promedios		
	Vel. Lancha 1	Vel. Lancha 2	V
2000	10.85	10.85	10.85
2200	14.10	14.00	14.05
2400	23.30	23.00	23.15
2500	31.60	31.90	31.75
2600	34.75	34.45	34.60
2500	31.40	31.15	31.28
2400	25.20	25.95	25.58
2300	16.60	16.35	16.48

Tabla No. XXXVIII Velocidad promedio final de la lancha prototipo analizada, [Fuente: Elaboración Propia].

En donde los valores de las columnas “Vel. Lancha 1” y “Vel. Lancha 2” y “RPM” son obtenidos de las tablas de la Figura No. 64 y corresponden al promedio de velocidad de cada lancha sometida a la prueba de mar y a las velocidades a las que

trabajó el motor en el momento de la prueba. El valor correspondiente a la columna “V” es el promedio de las velocidades de las pruebas realizadas a las 2 lanchas, y será el que se toma como velocidad final para las embarcaciones.

De la tabla anterior, se puede realizar una gráfica de V vs. RPM, para a continuación encontrar la ecuación que describa la velocidad de la lancha en función de las RPM de trabajo del motor, encontrado lo siguiente:

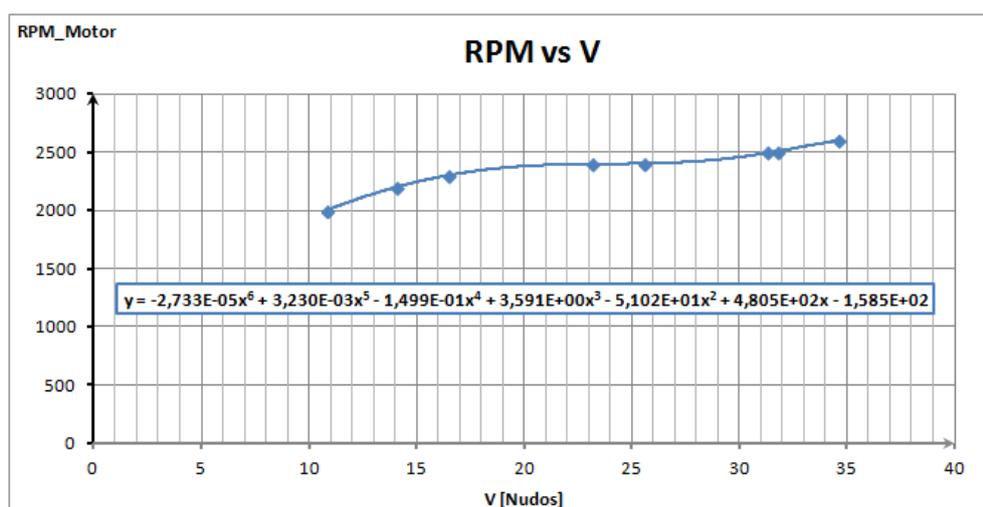


Figura No. 65 Relación de las RPM del motor en función de la velocidad de la lancha, [Fuente: Elaboración Propia].

En la Figura No. 65 se obtiene la ecuación que relaciona las variables RPM y Velocidad de la lancha, y debido a que ya se obtuvo la ecuación que relaciona la Resistencia con la Velocidad de la lancha (observar Figura No. 63), por dependencia matemática, podemos obtener una gráfica que relacione la resistencia con las velocidades de trabajo de la lancha según las RPM's del motor.

Para tener una continuidad con el proceso realizado, tomaremos las velocidades de la lancha equivalentes a las RPM's del motor que se tomaron en el cálculo para obtener la carga debido al Torque del motor, las cuales se muestran en la siguiente tabla de valores:

RPM	2000	2150	2300	2450	2600
------------	------	------	------	------	------

Tabla No. XXXIX Valores de RPM's de referencia para análisis de cargas,

[Fuente: Elaboración Propia].

Con los valores de RPM's mostrados en la Tabla No. XXXIX y haciendo uso de las ecuaciones encontradas en la Figura No. 63 y en la Figura No. 65, se obtienen los siguientes valores:

V [nudos]	RPM	R [Kg]
10.86	2000	270.90
13.15	2150	686.72
16.51	2300	1720.74
30.34	2450	3194.88
36.00	2600	1920.20

Tabla No. XL Valores de Velocidad y resistencia según RPM del motor,

[Fuente: Elaboración Propia].

Con los valores de la columna R, que son valores de resistencia según la velocidad de la lancha en función de la velocidad de rotación del motor, se calcula el empuje que soporta la embarcación, esto se logra usando la siguiente ecuación:

$$T = \frac{R}{1 - t} \quad \text{Ec. 18}$$

donde:

T: Es el empuje que desarrolla el propulsor, en [Kg]

R: Es la resistencia que genera la embarcación al desplazarse a una velocidad respectiva, en [Kg].

t: Es el coeficiente de deducción de empuje, valor tomado de la referencia [20].

Reemplazando en la ecuación mostrada, se obtiene que el Empuje de la lancha Guayas tiene los siguientes valores:

	t	-0,02
RPM	R [Kg]	T [Kg]
1300	2096	2055
1626	2925	2868
1950	3185	3123
2276	2066	2025
2600	1920	1883

Tabla No. XLI Valores de Empuje según RPM de motor,

[Fuente: Elaboración Propia].

Luego, dado que la lancha posee dos propulsores, se divide el empuje para 2, y será esta la fuerza equivalente que se va a aplicar al modelo numérico. Del empuje que proporciona cada propulsor solo se asume que el 10% corresponde a la amplitud de la parte vibratoria y será el que se aplique en los nodos correspondientes a los agujeros en donde va sujeto el ducto del chorro de agua. Dado que son dos agujeros, la carga equivalente se va a ubicar dividida, la mitad aplicada en el agujero del fondo y la otra mitad en el agujero del espejo. Los resultados se muestran en la siguiente tabla de valores, para cada RPM de trabajo:

RPM	T [Kg]	T/2 [Kg]	10% (T/2) [Kg]	Espejo	Fondo
				[10% (T/2)]/2 [Kg]	[10% (T/2)]/2 [Kg]
2000	2055	1027.45	102.74	51.37	51.37
2150	2868	1433.81	143.38	71.69	71.69
2300	3123	1561.35	156.13	78.07	78.07
2450	2025	1012.58	101.26	50.63	50.63
2600	1883	941.27	94.13	47.06	47.06

Tabla No. XLII Tabla de valores con cargas equivalentes según RPM del motor, [Fuente: Elaboración Propia].

Graficando los valores obtenidos en la Tabla No. XLII se observa lo mostrado en la Figura No. 66:

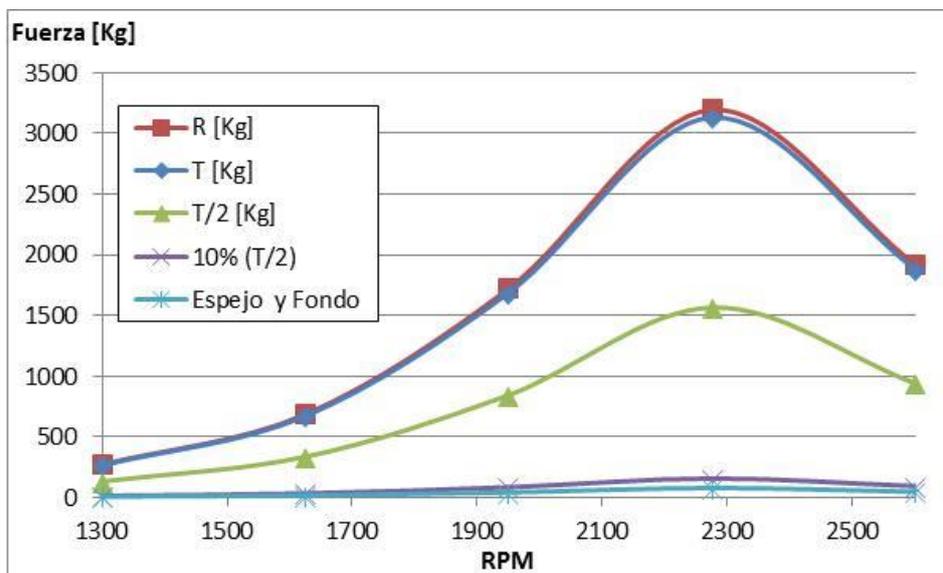


Figura No. 66 Gráfica de valores de fuerzas calculadas según RPM del motor, [Fuente: Elaboración Propia].

Finalmente se debe recordar que la carga obtenida para cada agujero debe ser agregada a los nodos, por lo que se debe dividir este valor para el número de nodos que hay en cada agujero y así obtener la carga equivalente del Empuje que debe ser ubicada en cada nodo de cada agujero. Del modelo numérico se obtiene que en el agujero del fondo y en el del espejo hay 86 y 112 nodos respectivamente, luego dividiendo la carga encontrada para el número de nodos se encuentran los valores que se muestran en la siguiente tabla:

	Nodos_Espejo	Nodos_Fondo
	112	86
RPM	Fuerza_E/No.Nodos [Kg]	Fuerza_F/No.Nodos [Kg]
2000	0.46	0.60
2150	0.64	0.83
2300	0.70	0.91
2450	0.45	0.59
2600	0.42	0.55

Tabla No. XLIII Tabla de carga equivalente de Empuje a agregar en los nodos de los agujeros del modelo numérico, [Fuente: Elaboración Propia].

Además hay que estimar la frecuencia de excitación a la que va a ser agregada la carga equivalente del empuje, para lo cual se usa la siguiente ecuación:

$$f_{Excitacion} = \frac{3 \times RPM_{Motor}}{R} \times \frac{1}{60} [CPS] \quad \text{Ec. 19}$$

donde:

$f_{Excitacion}$: Frecuencia de excitación a la que debe ser agregada la carga equivalente del empuje, en [CPS].

RPM_{Motor} : Velocidad de rotación del motor, en [RPM].

R: Factor de reducción del motor, para este caso con un valor de $R=0.893$

Luego de reemplazar los valores respectivos se obtienen los valores mostrados en la siguiente tabla de valores donde se han adjuntado de manera resumida los demás valores de carga de empuje modelados:

				Nodos_Espejo	Nodos_Fondo	
	Fuerza Total	Carga total Espejo	Carga Total Fondo	112	86	
RPM Motor	10% (T/2) [Kg]	10% (T/2)/2 [Kg]	10% (T/2)/2 [Kg]	Fuerza_E/No.Nodos [Kg]	Fuerza_F/No.Nodos [Kg]	$f_{excitacion}$
2000	102.74	51.37	51.37	0.459	0.597	108.3
2150	143.38	71.69	71.69	0.640	0.834	116.5
2300	156.13	78.07	78.07	0.697	0.908	124.6
2450	101.26	50.63	50.63	0.452	0.589	132.7
2600	94.13	47.06	47.06	0.420	0.547	140.8

Tabla No. XLIV Tabla de resumen de carga de empuje modelada y de frecuencia de excitación calculada, [Fuente: Elaboración Propia].

De la misma manera que en el cálculo de la carga equivalente debida al Torque del motor, la carga equivalente debida al Empuje se aplica en el modelo numérico realizado en SAP2000, será ingresada con un módulo asumido de 1 [kg] trabajando a la respectiva frecuencia de excitación equivalente a la velocidad del motor. Luego, los resultados de esfuerzos que se generen de realizar este cálculo deben ser corregidos, usando un factor de corrección equivalente a la carga modelo. El factor de corrección (F.C.) mencionado, debe ser calculado de la siguiente manera:

$$F.C. = \frac{F_{Total}/\# Nodos}{F_{Asumida}/\# Nodos} \quad \text{Ec. 20}$$

donde:

$F_{Total}/\# Nodos$: Fuerza total dividida para el número total de nodos donde se va aplicar la carga (Nodos de Fondo + Nodos de espejo), dado en [Kg].

$F_{Asumida}/\# Nodos$: Es la fuerza asumida en cada nodo de aplicación, y está dada en [Kg].

Recordando que hay 112 nodos en el agujeros el Espejo y 86 en el agujero del fondo, podemos notar que en total el Empuje total equivalente será distribuida entre $(112+86) = 198$ agujeros.

Y será este valor el que usaremos para reemplazar en la variable de $F_{Total}/\# Nodos$, obteniendo los resultados que se muestran en la siguiente tabla en donde se puede observar el factor de corrección que se utilizara en cada análisis:

Fuerza total [Kg]	Nodos totales		Factor de corrección
	198		
10% ($T/2$)	$F_{Total}/\# Nodos$	$F_{Asumida}/\# Nodos$	
102.74	0.52	1	0.52
143.38	0.72	1	0.72
156.13	0.79	1	0.79
101.26	0.51	1	0.51
94.13	0.48	1	0.48

Tabla No. XLV Factores de corrección para las cargas de empuje aplicadas,

[Fuente: Elaboración Propia].

ANEXO G

MODOS DE VIBRACION DEL FONDO DE LA LANCHA

Se determinaron los 70 primeros modos de vibración del modelo de la estructura del fondo, utilizando el programa de análisis estructural SAP 2000.

Los valores obtenidos se muestran en Tabla No. **XLVI**:

No.	Periodo	Frecuencia	No.	Periodo	Frecuencia
	[Segundo]	[CPS]		[Segundo]	[CPS]
1	0.028526	35.056	36	0.00794	125.94
2	0.022134	45.179	37	0.007939	125.97
3	0.016764	59.652	38	0.007916	126.32
4	0.012264	81.537	39	0.007813	127.99
5	0.011222	89.107	40	0.007708	129.74
6	0.010048	99.525	41	0.007685	130.12
7	0.009647	103.66	42	0.007634	130.99
8	0.009625	103.89	43	0.007571	132.08
9	0.009525	104.99	44	0.007562	132.25
10	0.009357	106.87	45	0.00754	132.63
11	0.009186	108.86	46	0.007486	133.59
12	0.009067	110.29	47	0.007475	133.77
13	0.00906	110.37	48	0.007419	134.78
14	0.009052	110.48	49	0.007411	134.94
15	0.008667	115.38	50	0.007388	135.35
16	0.008659	115.48	51	0.007371	135.67
17	0.008584	116.50	52	0.007312	136.76
18	0.008522	117.35	53	0.007292	137.13
19	0.008515	117.43	54	0.00726	137.73
20	0.008505	117.58	55	0.007248	137.97
21	0.008472	118.03	56	0.007225	138.42
22	0.00846	118.21	57	0.007185	139.18
23	0.008423	118.72	58	0.007153	139.79
24	0.008389	119.20	59	0.007112	140.61
25	0.008373	119.43	60	0.007045	141.95
26	0.00831	120.33	61	0.007012	142.61
27	0.008297	120.53	62	0.006899	144.94
28	0.008292	120.6	63	0.006852	145.95
29	0.008186	122.16	64	0.00677	147.71
30	0.008134	122.93	65	0.006632	150.79
31	0.008079	123.78	66	0.006618	151.09
32	0.008072	123.89	67	0.006584	151.87
33	0.008019	124.70	68	0.006472	154.50
34	0.007996	125.07	69	0.006422	155.72
35	0.007981	125.29	70	0.006413	155.94

Tabla No. XLVI Modos de vibración del modelo estructural del fondo de la lancha, [Fuente: Elaboración Propia].

Revisando las gráficas correspondientes a la tabla de valores anterior, se observa que existen algunos valores de modos de vibración en los que los detalles del fondo de la embarcación tienen un gran desplazamiento, lo que generaría un alto esfuerzo localizado, siendo la mayoría de estos en la zona del planchaje donde se asienta el motor. Se tomó de estos casos, el crítico, mostrando la zona altamente deformada a la respectiva frecuencia, siendo esta la gráfica mostrada a continuación:

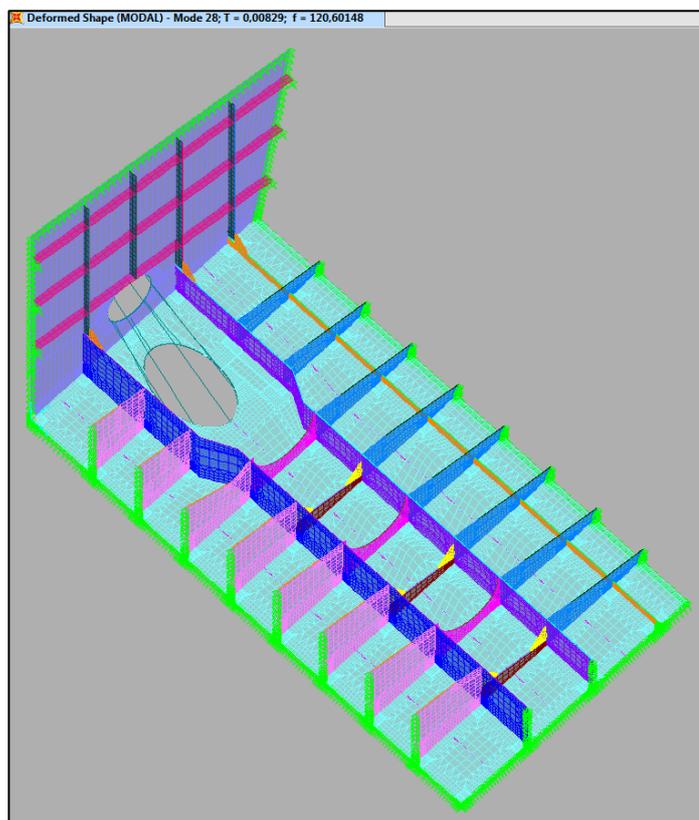


Figura No. 67 Modo de vibración 28 para el modelo estructural del fondo de la lancha, [Fuente: Elaboración propia].

En la Figura No. 67 se puede observar que existe una gran deformación en el planchaje del fondo que se encuentra entre los refuerzos principales, bajo el motor principal. Realizando un corte de esta zona se observa lo siguiente:

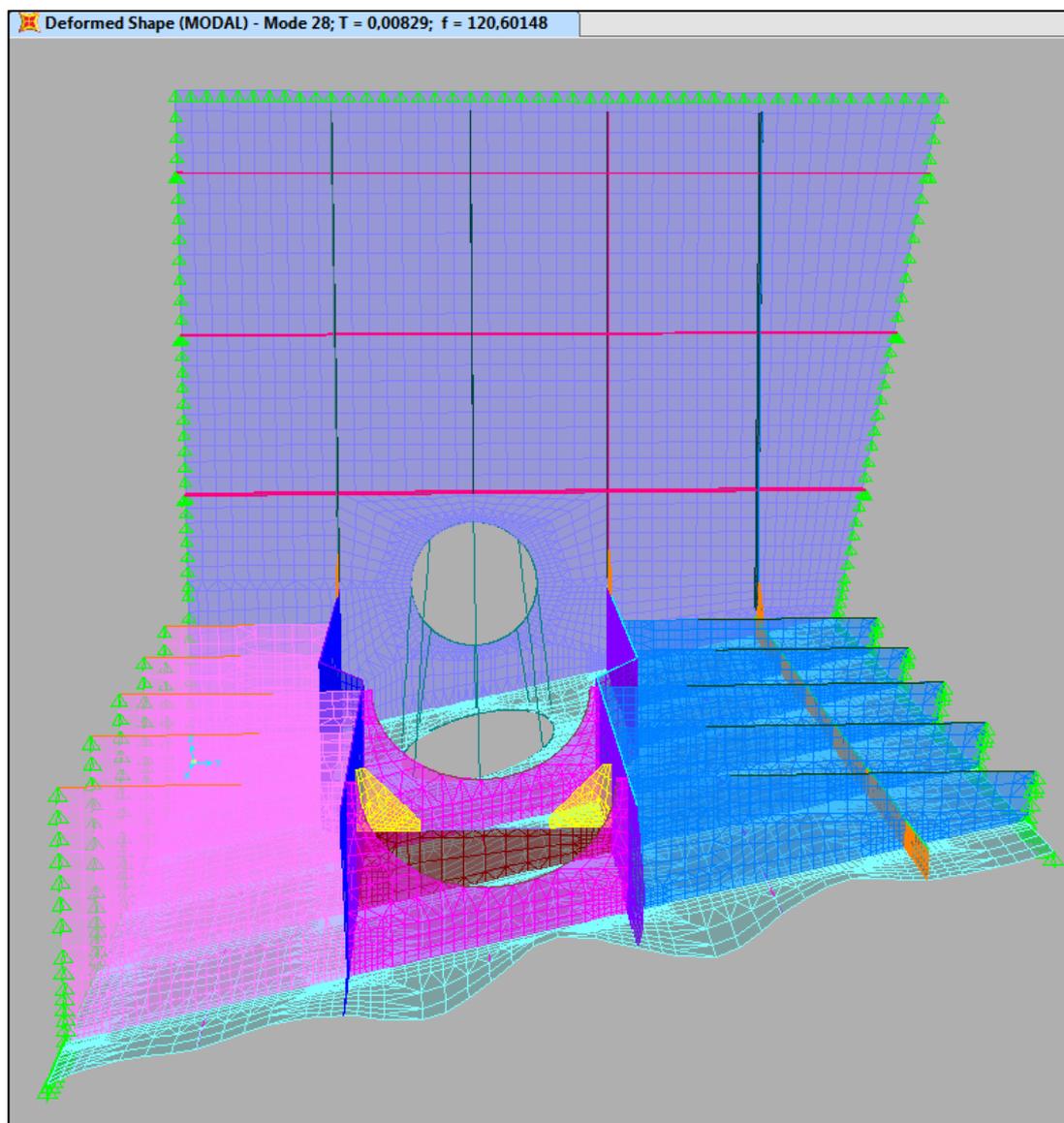


Figura No. 68 Modo de vibración 28, para el modelo estructural del fondo de la lancha, [Fuente: Elaboración propia].

BIBLIOGRAFÍA

- [1] BMT Fleet Technology, *"Course of Fatigue and fracture analysis of ship structures"*. Texas, 2011.
- [2] Det Norske Veritas, *"Rules for classification of Speed, Light Craft and Naval Surface Craft"*. Oslo: DNV, 2011.
- [3] Popov E., Toader , and Balan, *"Mecánica de sólidos"*. Pearson Educations, 1999.
- [4] F. Singer and F. Pytel, *"Introducción a la mecánica de sólidos"*. New York University, 1994.
- [5] Bannantine, Comer, and Handrock, *"Fundamentals of Metal Fatigue Analysis" Pearson Edition*. University of illinois, 1990.
- [6] American Bureau of Shipping, *"Structural direct analysis for High Speed Craft"*. Texas, 2011.

- [7] Autodesk Inc., "*Manual de usuario AutoCad*"., 2000.
- [8] Computers and Structures Inc., "*SAP2000*". California, 2005.
- [9] Astinave S. A., "*Memoria técnica de la embarcación Lancha Guayas*", Astinave, Guayaquil, 2011.
- [10] D. Benitez, "*Pruebas experimentales para determinar la influencia de flaps en la resistencia al avance de una lancha planeadora de 11 metros*". Guayaquil, 2012.
- [11] American Bureau of Shipping, "*GUIDE FOR BUILDING AND CLASSING HIGH-SPEED CRAFT*". Houston, 2012.
- [12] L. Chester, "*Marine Engineering*". The Society of Naval Architects and Marine Engineers, 1992.
- [13] Hamilton Jet, "*Manual de diseño de la serie HJ de Hidrojets*"., 2007.
- [14] A. Korotkin, "*Added masses of ship structures*". St. Petersburg, 2007.
- [15] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, "*Eurocode 9: Design of aluminium structures*". Bruselas, 2011.
- [16] Aerospace Specification Metals Inc. MatWeb. [Online]. <http://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=MA5086H116>
- [17] R. Mott, "*Diseño de elementos de máquinas*". Pearson Educación, 2006.

- [18] Cummins Inc. Marine Cummins. [Online].
https://marine.cummins.com/MarineECM/MarineContent/SiteContent/en/Binary_Asset/attachments/Products/Commercial_Propulsion/QSC8_3/QSC8_3_SS.pdf
- [19] V. Moreno, "*Motores de combustión interna*". ESCUELA TECNICA SUPERIOR DE INGENIEROS NAVALES, 1980.
- [20] J. Marin, L. Miranda, and F. Macas, "Análisis de resultados propulsivos en una lancha planeadora de 11 [m]", in *Jornadas Técnicas sobre Propulsión de Buques*, Guayaquil, 2011.