ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

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

OPTIMIZACIÓN DE LOS ESCANTILLONES DE LA ESTRUCTURA DE UN BUQUE ATUNERO

TESIS DE GRADO

Previa la obtención del Título de

INGENIERO NAVAL

Presentado por:

Paul Arturo Escobar Ortiz

Guayaquil – Ecuador

2013

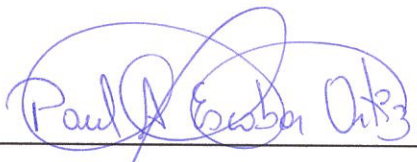
AGRADECIMIENTO

A Ti: por Tu amor infinito, a mi Madre: La Rosa Mística, al amor humilde que se tienen mis queridos padres, a mis amigos los ungidos: Tus hijos predilectos, a mis hermanos, amigos y profesores, al Dr. Caprace: Mi guía, al ser que aún está conmigo: María Guillermina – mi abuela, a mi futura familia: Desde antes pienso en Ustedes. A los que lo dan todo para que sea yo feliz, pues a todos les ofrezco la llama más humilde de mi gratitud.

DECLARACIÓN EXPRESA

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

(Reglamento de Exámenes y Títulos Profesionales de la ESPOL)



Paul Arturo Escobar Ortiz

TRIBUNAL DE GRADO

Ing. Marco Velarde Toscano
Presidente del Tribunal

Jean-David Caprace, Ph.D.
Director de Tesis

Ing. Cristóbal Mariscal Diaz
Miembro Principal

Ing. Jhonny Domínguez Ruíz
Miembro Suplente

RESUMEN

Como objetivo principal planteado para esta tesis, se demostrará el beneficio del resultado de la optimización de la estructura de buques atuneros en Ecuador. Para lograr este objetivo, la universidad de Lieja en su afán de compartir su tecnología con países en vías de desarrollo, permitió la utilización del software LBR-5.

En el primer capítulo de la investigación se describirá el modelo, características principales, lugar donde se construyó el buque y normas que se emplearon durante la construcción. Así como también se describe el problema y se justifica el porqué de la investigación y a donde se quiere llegar con este trabajo.

En el segundo capítulo se describe el software, para qué tipos de buques se utiliza el software, ejemplos de los trabajos que los científicos de la Universidad de Lieja han realizado hasta el momento y un poco del algoritmo que utiliza el LBR-5. En este mismo capítulo, se describirá la modelización del buque, el estudio de la sección media para dibujar el bloque del cuerpo medio paralelo. Antes de la asignación de las cargas, se presentarán las curvas de fuerza cortante y momento flector. Luego la asignación de los diferentes tipos de carga como son la presión hidrostática, la presión debido a la carga en las bodegas, presión sobre la cubierta principal y cubierta del parque de pesca, presión por los diferentes tipos de ola y presión en los tanques de combustible. Por último, antes de correr el software, se ingresarán las diferentes

restricciones para una optimización eficiente. Estas son de cinco tipos: Variables de diseño, Restricciones estructurales, Restricciones geométricas, Restricciones de igualdad y Restricciones Globales. Más adelante se explicarán cada uno de ellas.

En el tercer capítulo se presentarán los resultados. Al correr el programa, se tendrá que realizar dos alternativas diferentes, una para obtener la gráfica de la función objetivo de óptimo peso y la segunda, para obtener la gráfica de la función objetivo de óptimo costo. Finalmente en este capítulo realizaremos una validación en los resultados. Dentro de los resultados, se obtendrán los nuevos escantillonado. Sea esto en peso o en costo.

Por último, las conclusiones junto con la contribución principal de esta investigación. Los trabajos futuros que se pueden desarrollar a partir de esta tesis se los describirá en esta última parte de la tesis.

INDICE GENERAL

CAPITULO 1 ..... **1**

INTRODUCCIÓN **1**

1.1 ANTECEDENTES **1**

1.2 PROBLEMA, PARADIGMA E HIPÓTESIS **6**

1.2.1 PROBLEMA **7**

1.2.2 PARADIGMA **8**

1.2.3 HIPÓTESIS **9**

1.3 JUSTIFICACION DE LA INVESTIGACIÓN. **9**

CAPITULO 2 ..... **11**

METODOLOGÍA Y MODELACIÓN **11**

2.1 USO DEL SOFTWARE LBR-5 ..... **11**

2.2 ESTADO DEL ARTE – METODOS DE OPTIMIZACIÓN **13**

2.3 MODELACIÓN GEOMÉTRICA **16**

2.4 MODELACIÓN DE LAS CARGAS **41**

2.5 FUNCIÓN OBJETIVO **53**

2.6 MODELACIÓN DE LAS RESTRICCIONES DE OPTIMIZACIÓN **56**

2.6.1 VARIABLES DE DISEÑO **57**

2.6.2 RESTRICCIONES ESTRUCTURALES **60**

2.6.2.1 LISTA DE LOS PARAMETROS ESTRUCTURALES 65

2.6.2.1.1 La deflexión relativa W (n°7) 67
2.6.2.1.2 Mínimo espesor de placa (n°4) 68
2.6.2.1.3 Sigma von-Mises para esfuerzos primarios (n°11) 68
2.6.2.1.4 Sigma Von-Mises combinado con esfuerzo primario y flexión local longitudinal (n°12) 69
2.6.2.1.5 Pandeo de Planchas – Euler (n°14) 69
2.6.2.1.6 Sigma Von – Mises en el ala y alma de un refuerzo transversal (n°22) 70
2.6.2.1.7 Sigma Von-Mises para refuerzos transversal en la unión del alma con la plancha en la mitad del bloque (n°24) 70
2.6.2.1.8 Sigma Von-Mises para los refuerzos longitudinales en la unión del alma con la plancha en la mitad del bloque (n°35) 71
2.6.2.1.9 Sigma Von Mises para los refuerzos longitudinales en la unión del ala-alma a la mitad del bloque (n°36). 71
2.6.2.1.10 Pandeo en los refuerzos longitudinal-Johnson (n°37)..... 72

2.6.3 RESTRICCIONES GEOMÉTRICAS 73

2.6.4 RESTRICCIONES DE IGUALDAD 76

2.6.5 RESTRICCIONES GLOBALES 78

CAPITULO 3 82

RESULTADOS 82

3.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS 82

3.1.1 OPTIMO PESO 82

3.1.2 OPTIMO COSTO 96

3.2 VALIDACIÓN DE RESULTADOS 99

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 103

APÉNDICE A 109

APENDICE B 119

APENDICE C 124

APENDICE D 128

BIBLIOGRAFÍA 133

ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS

KW	Kilovatio
m	Metros
Ton	Toneladas
gal	Galones
dxf	formato de intercambio de dibujo
cm	Centímetro
cm^2	Centímetro cuadrado
cm^4	Centímetro a la cuarta
C	Cuaderna
MEF	Método de Elementos Finitos
m^2	Metros cuadrados
$\sigma_{máx,\ mín}$	Esfuerzos máxima
σ_1	Esfuerzo principal en dirección X
σ2	Esfuerzo principal en dirección Y
τ_{12}	Esfuerzo cortante
Esf. Pcpal.	Esfuerzo principal
Esf. 11	Esfuerzo en la cara 1 del elemento plano en la dirección del eje local 1
Esf. 22	Esfuerzo en la cara 2 del elemento plano en la dirección del eje local 2
Esf. 12	Esfuerzo cortante

Eb	Estribor
Bb	Babor
Pr	Proa
Pp	Popa
σ_y	Esfuerzo de fluencia del acero
Max	Máximo
Min	Mínimo
ABS	American Bureau of Shipping
BV	Bureau Veritas
mm	milímetros
CO_2	Anhídrido carbónico
ESPOL	Escuela Superior Politecnica del Litoral

INDICE DE TABLAS

Tabla I.- Características Principales del buque atunero..... 2
Tabla II.- Resumen de estructurales originales transversal. 20
Tabla III.- Dimensiones de los estructurales transversales que reemplazan al mamparo..... 22
Tabla IV.- Dimensiones principales de la varenga. 29
Tabla V.- Resumen de estructurales longitudinal..... 32
Tabla VI.- Resumen de las restricciones Estructurales..... 64
Tabla VII.- Comparación del escantillonado final del peso/costo. 98
Tabla VIII.- Tabla de Recapitulación de resultados..... 101

Tabla A1.- Presión sobre la cubierta..... 109
Tabla A2.- Presión por las ola tipo “A” 110
Tabla A3.- Presión por la ola tipo “B” 111
Tabla A4.- Presión hidrostática..... 112
Tabla A5.- Presión por la carga en las cubas 113
Tabla A6.- Presión por la carga de combustible 114
Tabla A7.- Presión total considerando la ola “A”..... 116
Tabla A8.- Presión total considerando la ola “B”..... 117
Tabla A9.- Presión total generado por el programa 118

Tabla B1.- Espesores iniciales de las planchas en cada panel. 120
Tabla B2.- Espesores iniciales de los elementos estructurales transversales en cada panel. 121
Tabla B3.- Espesores iniciales de los elementos estructurales longitudinales en cada panel. 122
Tabla B4 .- Tabla comparativa de los espesores iniciales y finales de la plancha en los paneles. ……123

Tabla C1.- Tabla comparativa del peso. 126
Tabla C2.- Tabla comparativa de costo. 127

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.- Plano de distribución general del buque atunero. [1]..... 3
Figura 2.- Plano de línea de formas del buque atunero [2]. 4
Figura 3.- Plano estructural transversal de la cuaderna maestra del buque [3]. 6
Figura 4.- Ejemplo de paneles formados por refuerzos transversales y/o longitudinales. [4] 12
Figura 5.- Vista de la sección transversal del modelo [24]. 17
Figura 6.- Espesor inicial de las planchas de los paneles [24]..... 19
Figura 7.- Longitud inicial del alma de los elementos estructurales transversales [24]..... 23
Figura 8.- Espesor inicial del alma de los elementos estructurales transversales [24]..... 24
Figura 9.- Ancho inicial del ala de los elementos estructurales transversales [24]..... 25
Figura 10.- Espesor inicial del ala de los elementos estructurales transversal [24]. 26
Figura 11.- Espaciamientos de los elementos transversales [24]. 27
Figura 12.- Ilustración de un tramo de la varenga..... 30
Figura 13.- Vista transversal de los estructurales, incluyendo los elementos no a optimizar [24]. 31
Figura 14.- Espaciamientos de las varengas [24]. 31
Figura 15.- Longitud inicial del alma de los elementos estructurales longitudinales [24]. 34

Figura 16.- Espesor inicial del alma de los elementos estructurales longitudinales [24]. 35
Figura 17.- Ancho inicial del ala de los elementos estructurales longitudinales [24]. 36
Figura 18.- Espesor inicial del ala de los elementos estructurales longitudinales [24]. 37
Figura 19.- Espaciamiento inicial de los elementos estructurales longitudinales [24]. 38
Figura 20.- Visualiza los tres diferentes espesores en una plancha o elemento estructural. 39
Figura 21.- Vista del modelo en tres dimensiones [24]. 40
Figura 22.- Curva de Fuerza Cortante y Momento Flexionante. 42
Figura 23.- Presión sobre la cubierta [24]. 44
Figura 24.- Presión de ola “Tipo A” [24]. 45
Figura 25.- Presión de ola “Tipo B” [24]. 46
Figura 26.- Presión hidrostática [24]. 47
Figura 27.- Presión de la carga en las bodegas [24]. 48
Figura 28.- Presión en el tanque de combustible [24]. 49
Figura 29.- Presión total considerando la ola “Tipo A” [24]. 50
Figura 30.- Presión total considerando la ola “Tipo B” [24]. 51
Figura 31.- Presión total máxima que genera el programa LBR-5 [24]. 52
Figura 32.- Cuadro de dialogo para la restricción “Variable de diseño” [24]. 58
Figura 33.- Ubicación del posicionamiento en el sentido de la x. 61
Figura 34.- Ubicación del posicionamiento en el panel. 61
Figura 35.- Ubicación del posicionamiento en los refuerzos. 62
Figura 36.- Cuadro de dialogo para el ingreso de los parámetros de optimización en la restricción de “Limitación Estructural” [24]. 63
Figura 37.- Desplazamientos relativos. 65
Figura 38.- Explicación de los esfuerzos primarios, esfuerzos secundarios y esfuerzos terciarios. 67

Figura 39.- Figura mostrada por el LBR-5 para guía del usuario [24]. 73
Figura 40.- Cuadro de dialogo para la restricción de igualdad [24]. 78
Figura 41.- Cuadro de dialogo para las restricciones globales [24]. 79
Figura 42.- Función objetivo del peso optimizado [24]. 83
Figura 43.- Variación del centro de gravedad una vez optimizado el peso [24]. 84
Figura 44.- Espesor final de las planchas de los paneles [24]. 85
Figura 45.- Longitud final del alma de los elementos estructurales transversales [24]. 86
Figura 46.- Espesor final del alma de los elementos estructurales transversales [24]. 87
Figura 47.- Ancho final del ala de los elementos estructurales transversales [24]. 88
Figura 48.- Espesor final del ala de los elementos estructurales transversales [24]. 89
Figura 49.- Longitud final del alma de los elementos estructurales longitudinales [24]. 91
Figura 50.- Espesor final del alma de los elementos estructurales longitudinales [24]. 92
Figura 51.- Ancho final del ala de los elementos estructurales longitudinales [24]. 93
Figura 52.- Espesor final del ala de los elementos estructurales longitudinales [24]. 94
Figura 53.- Espaciamiento final de los elementos estructurales longitudinales [24]. 95
Figura 54.- Función objetivo del costo optimizado [24]. 96
Figura 55.- Variación del centro de gravedad una vez optimizado el costo [24]. 97

CAPITULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES

En el presente trabajo, se dan a conocer los resultados de la optimización de los escantillones de la estructura de un buque atunero. Es importante mencionar que este buque se botó al agua en el astillero AXPE S.A. en Bilbao – España, a mediados de los años 70.

El barco se construyó bajo las normas de la sociedad clasificadora B.V. Existe un buque similar con el nombre de B/P “Elizabeth V”, este se encuentra operando con bandera ecuatoriana, haciendo base en el puerto de Manta.

La tecnología de construcción, ha evolucionado de una forma exponencial; desfasados quedaron los métodos de diseño y construcción de décadas pasadas. Por ser este un barco de casi 40 años de operación, se quiso estudiar para determinar si se pudo o no utilizar menos recursos como el acero.

Una herramienta numérica (LBR-5) ha sido desarrollada por la Universidad de Lieja para optimizar el escantillonado de las estructuras de buques de gran tamaño. Esta investigación utilizará este software para demostrar cuál sería el resultado del factor peso/costo que se podría esperar sobre el buque atunero.

Con el software, se llegará a la conclusión de cuanto se pudo haber optimizado en peso y en costo. Dentro de los costos, están los parámetros de material, mano de obra, etc.

Las características principales del buque atunero se los presenta en la Tabla I:

Eslora total	71.730 m
Eslora entre perpendiculares	63.600 m
Manga de trazado	13.000 m
Puntal a cubierta superior	8.450 m
Puntal a cubierta principal	6.000 m
Calado medio de trazado	6.54 m
Astilla muerta	0.450 m
Separación entre secciones	3.180 m
Separación entre líneas de agua	0.966 m
Separación entre longitudinales	1.300 m
Brusca (cubierta principal y superior)	0.260 m

Tabla I.- Características Principales del buque atunero.

Seguido de esta información, se presenta los planos de Distribución General y los Planos de Líneas de Formas del buque atunero tipo. Esto se encuentra en la Figura 1 y Figura 2 respectivamente.

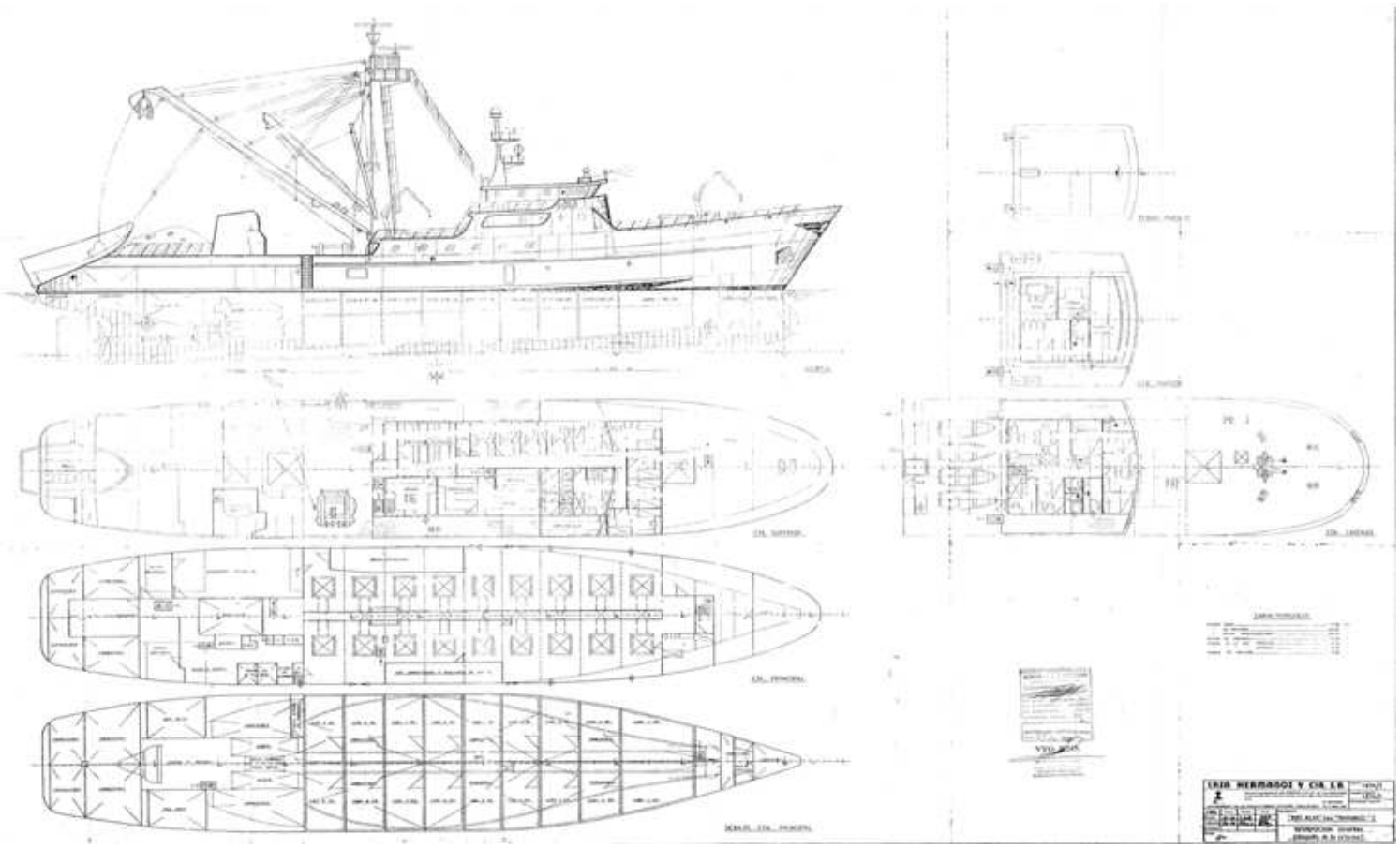


Figura 1.- Plano de distribución general del buque atunero. [1]

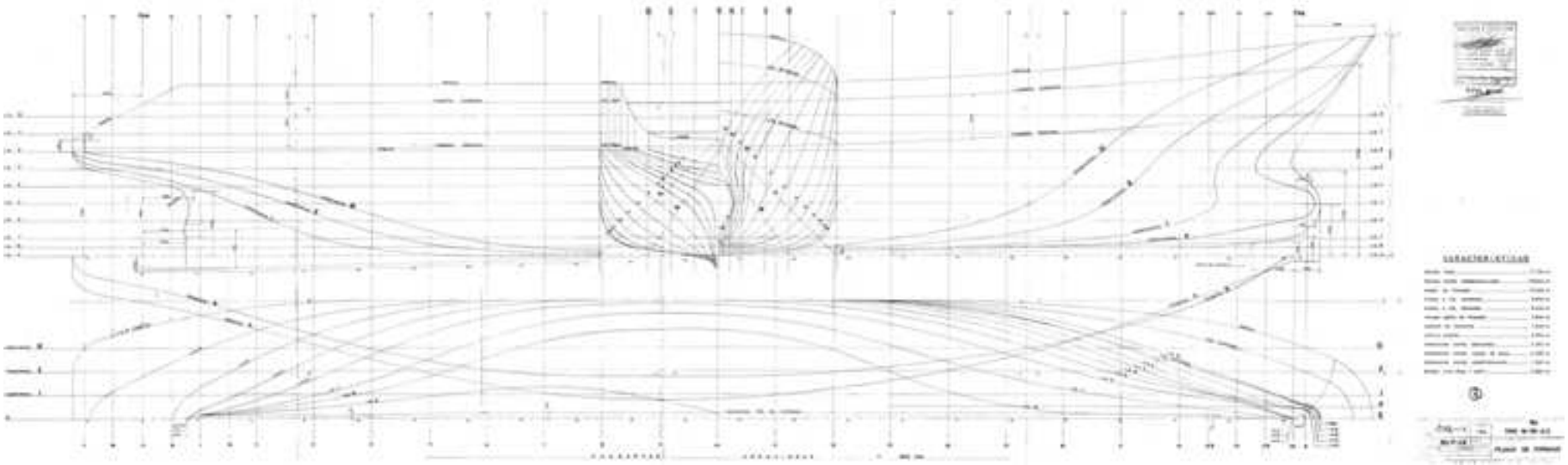


Figura 2.- Plano de línea de formas del buque atunero [2].

Por otra parte, los estructurales transversales son variados a lo largo de todo el buque. Como se recuerda, todo buque está dividido en estaciones, para el caso del buque atunero tipo, las estaciones van desde la “0” en popa hasta la “106” en la proa.

Los mamparos divisorios de las cubas, están separados cada 3,6 m. En el espacio entre dos mamparos, existe solamente varengas; dicho en otras palabras, no existen cuadernas ni baos entre dos mamparos. También, entre estos dos mamparos divisorios de las cubas encontraremos refuerzos longitudinales como: vagras, palmejares y esloras.

Las varengas varían su forma. A la altura de cada mamparo, las varengas son vigas de alma llena. Así forman un doble fondo, que servirán para tanques de combustible. Entre dos mamparos hay cinco varengas, la varenga central de la cuba es similar a la varenga ubicada a la altura de cada mamparo pero esta es con aligeramiento, mientras las otras dos son varengas reforzadas con planchas y ángulos.

En el parque de pesca, se tienen cuadernas que están ubicadas a la misma distancia de cada mamparo. De la misma forma un puntal a cada banda separado a una distancia de 1,8 m aproximadamente de la línea de crujía.

Las cuadernas por consiguiente, están separadas 3,6 m y como en el caso de los mamparos, no existen otros reforzamientos vertical transversal, entre estas cuadernas del parque de pesca.

Existe refuerzos longitudinales en el parque de pesca como son: palmejares y esloras.

En la Figura 3, se muestra los estructurales de la sección transversal, a la altura de la sección media del buque.

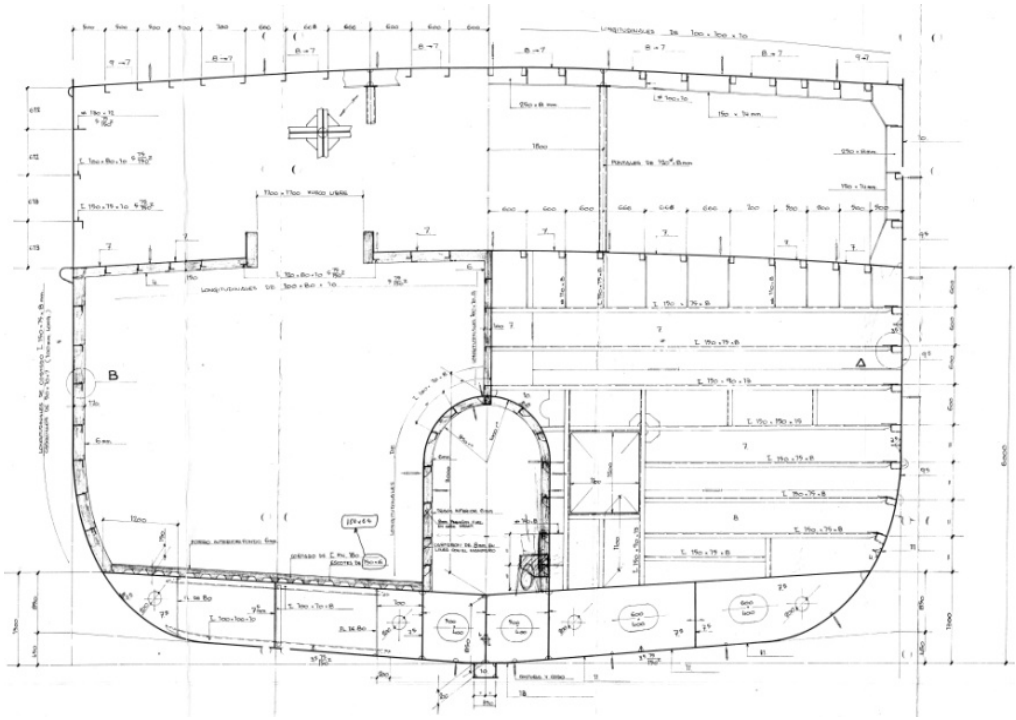


Figura 3.- Plano estructural transversal de la cuaderna maestra del buque [3].

1.2 PROBLEMA, PARADIGMA E HIPÓTESIS

En este ítem se describe: el problema, el modelo o buque tipo y la hipótesis. Al final de esta investigación se determinará si la hipótesis es verdadera o es falsa.

1.2.1 PROBLEMA

Existen muchos problemas al momento de construir un buque, así también en el cambio de estructurales y cambio de planchaje durante el mantenimiento.

En muchos varaderos o astilleros del mundo; nuestro país sin excepción, llevan un control de la relación peso producción vs horas-hombre, peso producción vs costos de construcción o mantenimiento, peso producción vs peso-electrodo de soldadura, etc.

Los armadores en cambio, tienen interés por algunos de los anteriores índices a más de otros como: desplazamiento del navío vs consumo de combustible, desplazamiento del navío vs Toneladas de carga movilizada (sea de servicio o de captura), tiempo-navegado vs número de veces que sube a carenar el navío, etc.

La optimización empieza antes de la construcción, empieza junto con el diseño. Entonces, ¿Por qué usar un barco ya construido para esta investigación? Justamente para demostrar que, la optimización es real hoy en día o simplemente es un objetivo a donde se quiere llegar en el futuro. Pero, ¿Por qué se quiere optimizar? Porque justamente el desperdicio de recursos como el acero, horas-hombres, etc. se puede evitar una vez cuantificado. El negocio de los astilleros es construir barcos con el menor número de horas-hombre, utilizar menos electrodos para unir los estructurales, los estructurales con las planchas, etc. El negocio de los armadores es que su navío navegue quemando el menor combustible, que desplace lo mínimo permisible con el

objetivo primordial de poder transportar más carga, etc. Por último, para que el medio ambiente se vea menos afectado, es menester que se use menos materia prima para construir y dar mantenimiento y menos combustible para operar la nave.

Es este el problema, el centro primordial es el medio ambiente, contaminar menos o utilizar menos recursos (materia prima y horas de trabajo). Hoy en día la comunidad internacional a través de United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC), y actores como la Unión Europea (UE), están presionando a todos los sectores, incluyendo la industria del transporte marítimo, para reducir las emisiones de CO_2. Menos consumo de acero, de combustible y de horas de trabajo es menos contaminación.

1.2.2 PARADIGMA

Se utilizará un buque atunero de las características que se mencionó en 1.1, se utilizará el cuerpo medio paralelo del buque, desde el mamparo 39 hasta el mamparo 57, esto involucra tres cubas a estribor y tres a babor de la embarcación, así también involucra 1 ½ tanque de combustible.

Se aplicarán las normas de la sociedad clasificadora Bureau Veritas (B.V.), esto para los cálculos iterativos que tiene que realizar el software LBR-5. Coincidentemente, las normas B.V. también fueron consideradas para la construcción, como se lo mencionamos en 1.1.

1.2.3 HIPÓTESIS

Es posible poder optimizar los escantillones de un buque atunero y es posible encontrar dos puntos; punto inicial y punto final, para la frontera de Pareto.
En el caso de ser verdadera la hipótesis, se lo cuantificará; el peso/costo, con ayuda del software LBR-5.

1.3 JUSTIFICACION DE LA INVESTIGACIÓN.

¿Vale la pena esta investigación? El Ecuador es un país pesquero; entre todas las especies del mar que extrae la flota pesquera la más predominante en cuanto a ingresos de capital es el atún. Al Ecuador se lo conoce mundialmente por ser uno de los países con mayor tonelada de captura de atún al año.
Hace poco tiempo fue botado al agua el primer atunero construido en el país; este navío fue bautizado con el nombre de B/P José Armando, su eslora sobrepasa los 60 m y su capacidad de bodega supera las 500 Ton. Seguro que este no será el último buque construido en el país, ni mucho menos, este no será el de mayor tamaño. Por todos estos antecedentes se piensa que el país tiene que estar preparado para la construcción de mas buques de este tipo, no solo pensar en construirlos para el Ecuador, se podría pensar construir para América Latina.
La ESPOL, a través de quien suscribe y bajo la dirección y supervisión del Ph.D. Jean-David Caprace, quiere presentar la investigación de la optimización de los escantillones de un buque atunero. Esta investigación,

servirá para que los futuros constructores en nuestro país, puedan considerar las sugerencias expuestas en esta tesis de grado.

Seguro esta investigación será de gran utilidad y avance para el país. Se Podría importar menos acero o se podría lograr que la flota ecuatoriana consuma menos combustible para movilizar los barcos, teniendo presente que el combustible que utiliza la flota es subsidiado por el gobierno. Con esto se concluye que no solo los armadores se verán beneficiados, también el Ecuador por el ahorro de combustible.

CAPITULO 2

METODOLOGÍA Y MODELACIÓN

2.1 USO DEL SOFTWARE LBR-5

Al usar el software y familiarizarse con este, a pesar de que no es un software de análisis estructural con elemento finito, pero tiene resolución analítica. Se puede mencionar que el software utiliza un esquema para la optimización parecido a otros software de diseño estructural. Los programas de análisis estructural tienen una secuencia para llegar al resultado. La primera etapa consiste en el dibujo del modelo. Seguido de esto, se define la geometría de las planchas y los elementos estructurales que forman los diversos paneles. Después, se le asigna las cargas al modelo, para en la parte final, bajo ciertas restricciones, se corre el modelo y se obtiene los resultados en base a unas condiciones iniciales.

En esencia, el LBR-5 es un software de optimización. Después de ingresar las cargas, se le asigna las restricciones de optimización para finalmente correr con las primeras pruebas. Es esta etapa, de asignación de restricciones de optimización, la que difiere con otros softwares de análisis estructural. En esta parte se desvía hacia su objetivo que es la optimización.

Algunos profesionales describen al LBR-5, como un software que trabaja en 2 ½ D, esto es dos dimensiones y media. El programa no asume la longitud del bloque, por medio de una opción podemos ingresar la eslora. En el

software se dibuja la cuaderna de la sección media, luego con un comando de extrusión se verá el modelo como si fuera en 3D.

En el uso del programa LBR-5, los paneles, ver Figura 4, que están formados por planchas y refuerzos transversales y/o longitudinales, se incluyen en el desarrollo de una nueva metodología de diseño para facilitar y mejorar los estudios preliminares de las estructuras navales y estructuras flotantes hidráulicas. El objetivo final es vincular las herramientas estándares de diseño (CAD estructura de acero, la forma del casco, las curvas hidrostáticas, estabilidad flotante, estimación de peso, etc.) con un módulo de optimización de diseño racional y un coste de construcción mínimo (o peso mínimo) de la función objetivo. [4]

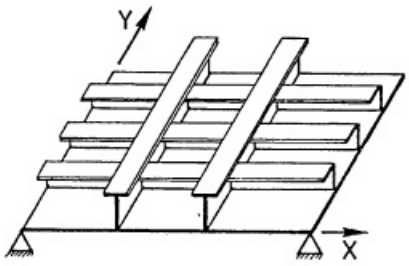


Figura 4.- Ejemplo de paneles formados por refuerzos transversales y/o longitudinales. [4]

LBR-5 permite, a partir del primer borrador del diseño en un proyecto a ejecutarse; sea la construcción de un buque o una compuerta hidráulica, una optimización de los escantillones de los elementos constitutivos de una estructura. Los estados límites pertinentes de la estructura se tienen en cuenta

gracias a un análisis racional de la estructura en 3D basada en las normas generales de la mecánica de sólidos y el comportamiento de la estructura [4].

2.2 ESTADO DEL ARTE – METODOS DE OPTIMIZACIÓN

Como es bien conocido ya en las primeras fases de un proyecto muchos aspectos de un buque dependen del diseño estructural que se ha definido únicamente en un nivel preliminar. Esta tendencia es similar para los buques mercantes, buques de pasajeros y yates a motor. Sólo en la parte final del proyecto algunos astilleros comienzan a aplicar los procesos de optimización más o menos sofisticados, con el fin de perfeccionar el diseño estructural en vista de la reducción del peso y/o el costo de la construcción. El peso, en particular, tiene un impacto muy importante en todo tipo de embarcaciones de gran tamaño. Las modificaciones estructurales propuestas por tales procedimientos de optimización implican una serie de cambios de segundo orden en artículos relacionados, tales como instalaciones, equipo y otros. Como consecuencia de la optimización estructural podría ser particularmente útil si se puede aplicar durante las primeras etapas del proyecto, de esta manera podemos evitar pérdidas de tiempo por causa de las modificaciones estructurales. [5]

Para la siguiente explicación de la optimización se ha tomado de la referencia [5] de la bibliografía, aquí se explica la optimización de un mega-yate.

El software LBR-5 ha sido utilizado con éxito para optimizar las estructuras del casco de un mega-yate de 60 metros. A diferencia de los grandes barcos, el mega-yate no tiene un "cuerpo cilíndrico" en la parte central del casco. Así, un nuevo módulo del software se ha utilizado para analizar varias secciones de la nave y para llevar a cabo una optimización global.

Para esta aplicación (mega-yate), el análisis de optimización se ha llevado a cabo por diferentes métodos: asumiendo el peso como la función objetivo, se ha logrado una ganancia de alrededor del 8%, mientras que una optimización de costo mínimo ha permitido una reducción de 15%.

En el siguiente ejemplo; de optimización, se ha utilizado la referencia [6] de la bibliografía. Esta, explica que se han realizado estudios de optimización en cruceros. Para un barco de pasajeros, una reducción significativa de la cantidad de acero o un aumento controlado del centro de gravedad, debería conducir o bien a una reducción del consumo de combustible o a obtener una cubierta adicional, que para un armador significa un retorno más rápido de la inversión.

Para el trabajo expuesto con respecto al crucero, se obtuvo un ahorro de peso en acero del 12,72% y en cuanto al costo se obtuvo el 5,1%.

Otro caso de investigación en la optimización que realizaron se trata de un tanquero de transporte de gas natural licuado.

En resumen, el uso de software se ha utilizado para embarcaciones de pasajero, tanqueros, etc. pero también se lo ha aplicado para la optimización

de compuertas hidráulicas tales como las nuevas compuertas de las esclusas de la ampliación del canal de Panamá.

En gran parte, la bibliografía menciona que los primeros estudios de optimización de la estructura del buque se realizaron esencialmente a mano. Seguido de esta etapa, con la aparición de los ordenadores modernos como instrumentos de ayuda a las diferentes actividades humanas ha cobrado tal importancia que los investigadores han desarrollado algoritmos de diseño y optimización.

Se utilizó la experiencia de trabajos anteriores, en cuanto a la optimización realizada por algunos investigadores, hoy se quiso investigar un buque atunero. ¿Qué pasaría con el resultado del nuevo escantillonado de peso y el nuevo escantillonado de costo? ¿Hubiera sido mejor el optimizar el peso u optimizar el costo? Muy pocas veces, esta decisión es indiferente.

Un aspecto importante es la forma de integrar el módulo LBR-5 con las herramientas existentes (CAD, etc.). Esta obra está bajo la terminación con la colaboración de socios industriales. El vínculo entre la LBR-5 (versión 5.3) y el modelo CAD, la forma del casco y otras herramientas preliminares realmente se hace a través de un procedimiento de intercambio de datos de forma manual. En un futuro próximo, una serie de "Interfaz de programas” se logrará de forma automática estas tareas. El uso de estas interfaces, el LBR-5 será capaz de recibir los datos geométricos (nodo de coordenadas, paneles, etc.) desde por ejemplo AutoCad, FastShip, Maxsurf o incluso por un simple archivo

de Excel o ASCII. Estas interfaces son desarrolladas de acuerdo a las especificaciones del usuario. Estas últimas explicaciones han se tomó de la referencia bibliografía [4].

2.3 MODELACIÓN GEOMÉTRICA

La modelación geométrica, consiste básicamente en dibujar el modelo del navío en una escala real 1:1. Las unidades de longitud utilizadas en el LBR-5 es el metro lineal y para las dimensiones de los estructurales se utiliza el mm. Algo indispensable que hay que mencionar, se trata justamente que el modelo es un bloque de la sección media, o lo que comúnmente se llama cuerpo medio paralelo. El software no necesita la modelación de todo el navío, sin embargo necesita de los valores calculados del navío completo; como la curva de pesos, fuerza cortante y momento de flexión.

Para el modelo es necesario que solamente se dibuje la semi-manga de la sección media. El software tomará internamente y hará los cálculos como si fuera la sección completa, esto por las condiciones de simetría.

En la Figura 5, se puede observar la sección media dibujado en el software. Los números en esta figura marcados en el casillero blanco corresponden a los paneles, mientras que los números marcados en el casillero verde corresponden a los nodos.

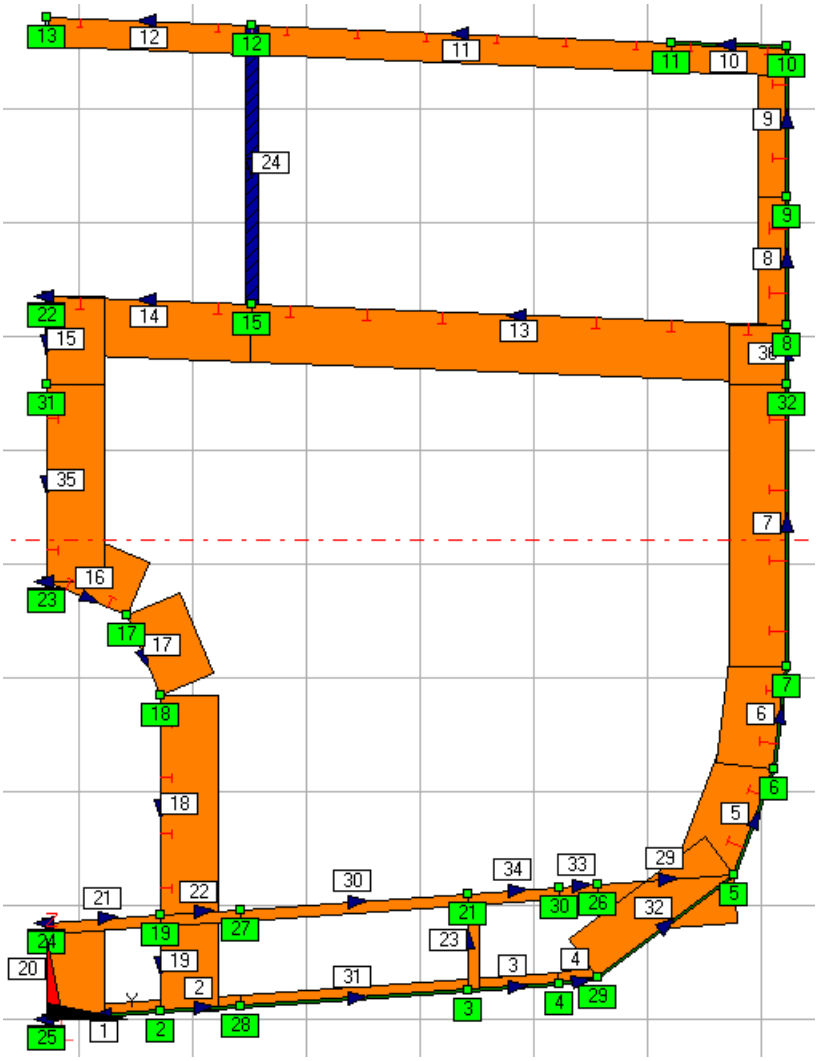


Figura 5.- Vista de la sección transversal del modelo [24].

El primer ajuste que se realizó, se debió al software. El software no dibuja perfiles diferentes a los perfiles T, esto ya sea refuerzos transversales al mismo tiempo que refuerzos longitudinales. Quiere decir que si el modelo o cualquier buque que se desea optimizar; utilizando el LBR-5, tiene en sus estructurales perfiles como: ángulos, platinas, etc. no se puede dibujar y si no se puede dibujar, mucho menos el software puede efectuar una modelización. Para

suplir esto, primero se tuvo que calcular la inercia del elemento (platina, ángulo, etc.) del diseño original. Una vez que se obtiene la inercia, se calcula las dimensiones del perfil T, que tenga una inercia aproximada al perfil original. A esto se le llama inercia equivalente entre dos perfiles de diferentes geometrías. Por último se reemplaza el perfil original con el nuevo perfil T.

El segundo ajuste está relacionado al mamparo, el software no efectúa modelización de planchas transversales como el mamparo transversal divisorio entre las cubas. A su vez para suplir esto, se debe remplazar el mamparo por un anillo estructural transversal sobredimensionado. Este anillo estructural transversal y a su vez sobredimensionado es nuevamente un perfil T.

El tercer ajuste encontrado en la Figura 5, se trata del panel 19. Se le agregó un perfil, esto es una modificación del plano estructural original porque de lo contrario no se cerraría el anillo estructural transversal. Un caso parecido ocurre con el panel 20.

En la modelación geométrica, se la divide en tres partes la explicación: modelación de planchas, modelación de estructurales transversales y modelación de estructurales longitudinales.

MODELACION GEOMETRICA DE PLANCHAS

En la Figura 6, se puede observar el espesor original de las planchas en los paneles como son las planchas del forro del casco, planchas de cubas y cubierta, etc.

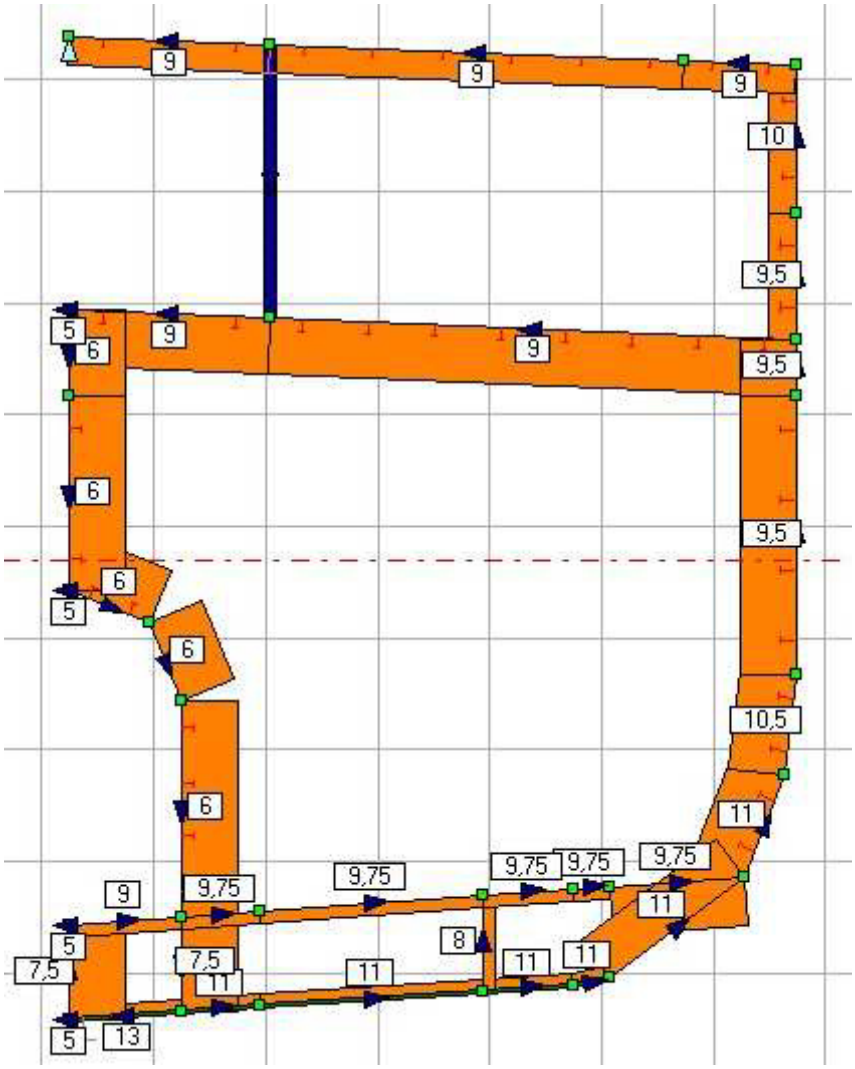


Figura 6.- Espesor inicial de las planchas de los paneles [24]

MODELACION GEOMETRICA DE REFUERZOS ESTRUCTURALES TRANSVERSALES

Los elementos transversales a considerar son: mamparos, varengas, cuadernas y baos.

Los paneles que pertenecen al mamparo son: 5, 6, 7, 36, 13, 14, 15, 35, 16, 17 y 18. Como se había mencionado anteriormente, estos son remplazados por un estructural T con medidas sobredimensionadas.

En la Tabla II, se observa las dimensiones de los elementos estructurales transversales que pertenecen al buque, en este caso las varengas, los baos de la cubierta principal y las cuadernas del parque de pesca.

VARENGA
• ∠ 100 x 100 x 10 mm I = 160,94 cm^4; A = 1900 mm²
• ∠ 100 x 70 x 8 mm I = 121,24 cm^4; A = 1296 mm²
BAO DE CUBIERTA PRINCIPAL
• T: alma = 250 mm; espesor alma = 8 mm; ala = 150 mm; espesor ala = 14 mm
CUADERNA DE PARQUE DE PESCA
• T: alma = 250 mm; espesor alma = 8 mm; ala = 150 mm; espesor ala = 14 mm

Tabla II.- Resumen de estructurales originales transversal.

En las Figura 7, Figura 8, Figura 9 y Figura 10, se expondrán las dimensiones del largo y espesor del alma, así como el ancho y espesor del ala de los elementos transversales y en la Figura 11 se expondrá el espaciamiento que

se encuentran los elementos estructurales transversales. Es importante mencionar que todas estas medidas corresponden a los perfiles T una vez encontrada las inercias equivalentes.

En la Figura 7, se observa la longitud inicial del alma de cada elemento estructural de la sección transversal. En el caso de cada panel que remplaza al mamparo la longitud del alma es de 500 mm y en el caso de la cuaderna y bao del parque de pesca, la longitud del alma es de 250 mm.

En la Figura 8, se observa el espesor inicial del alma de cada elemento estructural transversal. En este caso, el espesor del alma de la cuaderna que reemplaza al mamparo es de 16 mm y el espesor del alma de la cuaderna y el bao del parque de pesca, el espesor del alma es de 8 mm.

En la Figura 9, se puede observar el ancho del ala del anillo estructural transversal. Para el caso de la cuaderna y bao que reemplaza al mamparo, el ala es de 300 mm. Para los perfiles de los demás paneles, el valor es conforme a los planos.

En la Figura 10, se puede observar el espesor del ala de cada elemento estructural del anillo transversal. Para el caso de la cuaderna y bao que reemplaza al mamparo, se utiliza un espesor de 28 mm. Nuevamente, las demás medidas corresponden a los planos originales.

En la Figura 11; como se había mencionado, se muestra las medidas de los espaciamientos de los elementos transversales. Esto significa la distancia

existente en el plano original que están separadas cada cuaderna, cada bao y cada varenga.

A continuación en la Tabla III, se presentan las medidas de los elementos estructurales T, que reemplazarán al mamparo, esto como un resumen del mamparo.

LONGITUD DEL ALMA	500 mm
ESPESOR DEL ALMA	17 mm
ANCHO DEL ALA	300 mm
ESPESOR DEL ALA	28 mm

Tabla III.- Dimensiones de los estructurales transversales que reemplazan al mamparo.

Es importante que se recuerde que no se optimizará el mamparo.

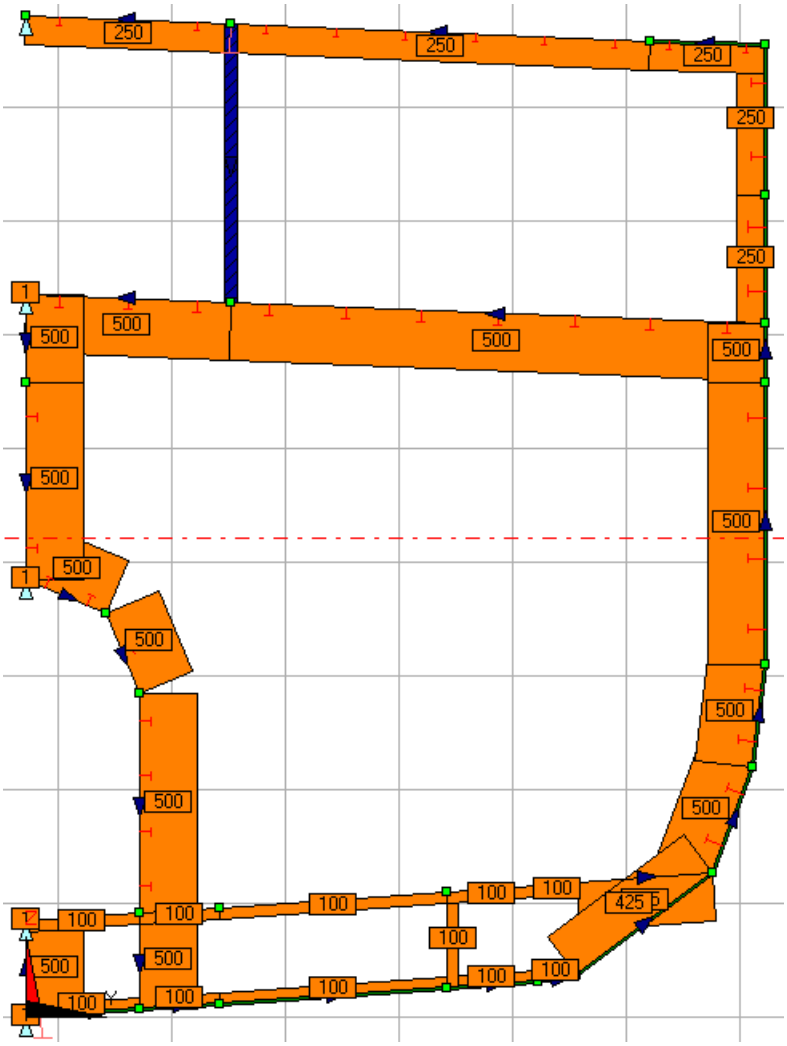


Figura 7.- Longitud inicial del alma de los elementos estructurales transversales [24].

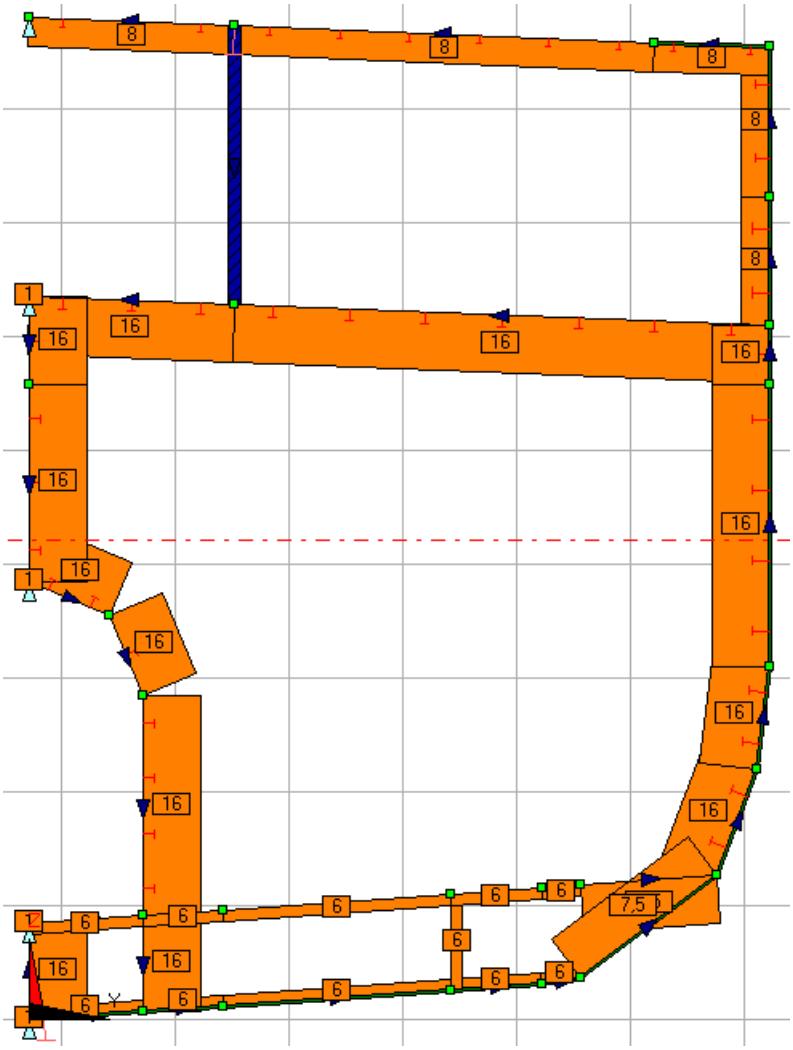


Figura 8.- Espesor inicial del alma de los elementos estructurales transversales [24].

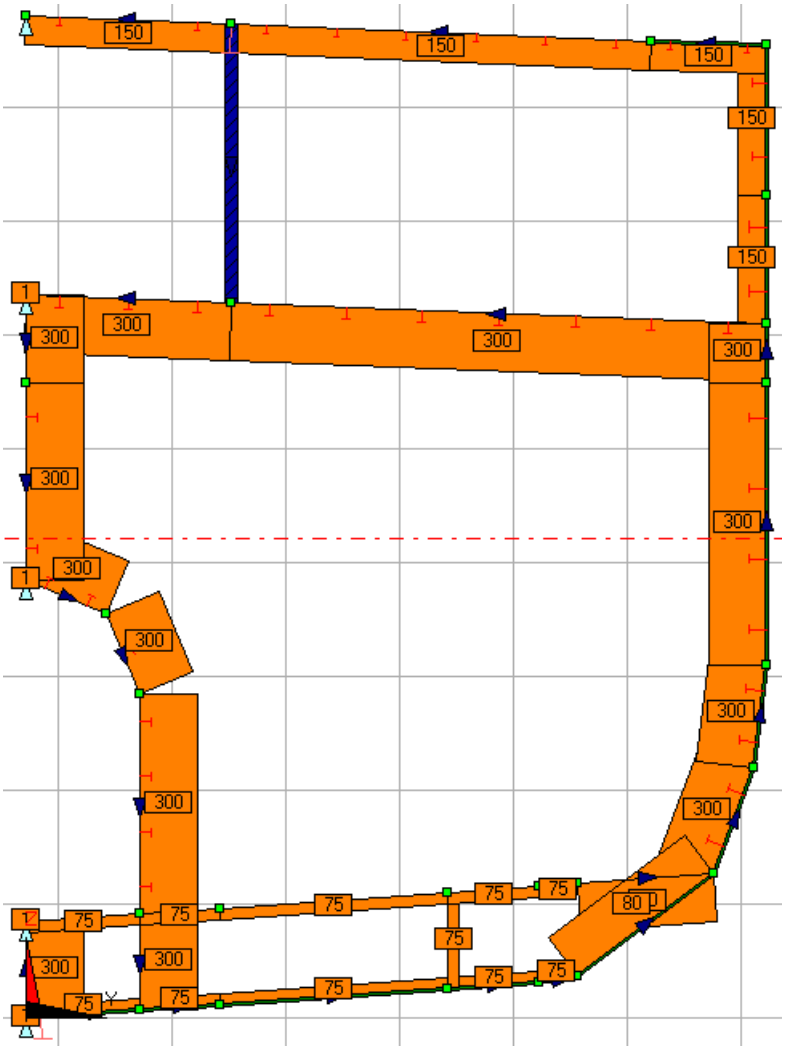


Figura 9.- Ancho inicial del ala de los elementos estructurales transversales [24].

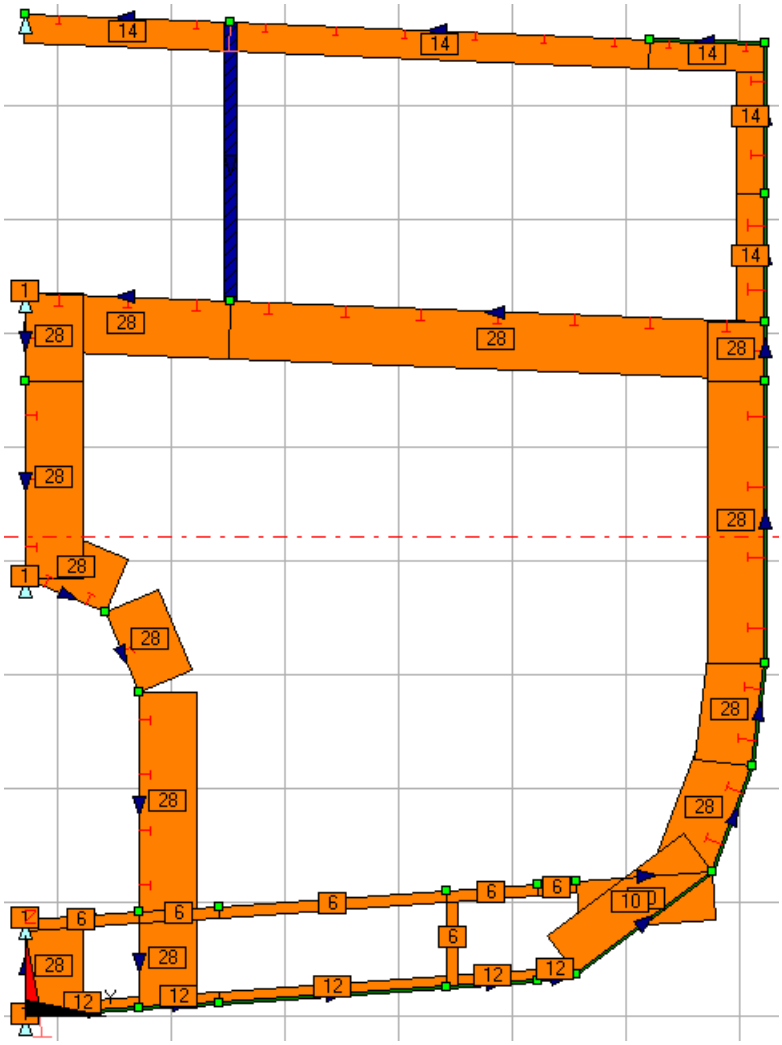


Figura 10.- Espesor inicial del ala de los elementos estructurales transversal [24].

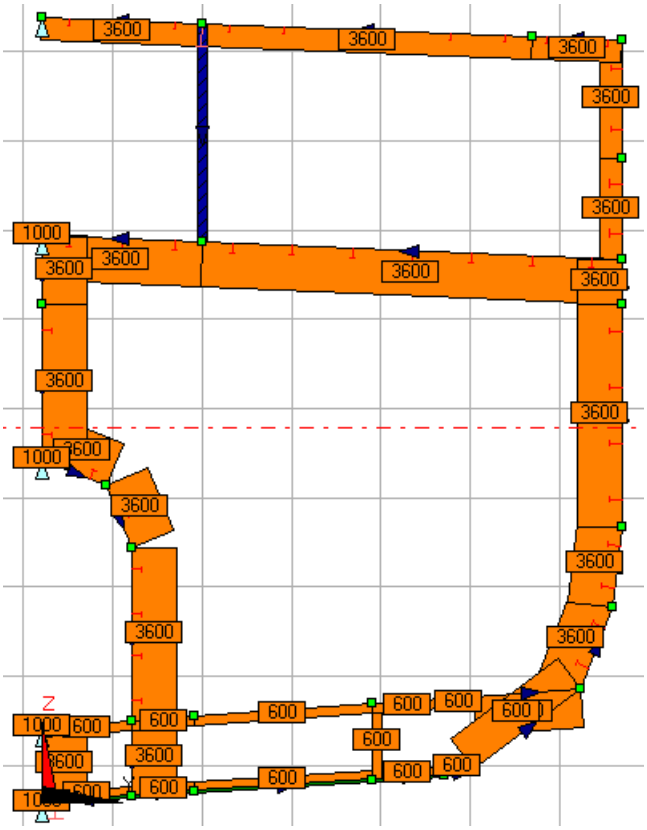


Figura 11.- Espaciamientos de los elementos transversales [24].

Un elemento adicional que no se optimizará es la varenga que está situada debajo de cada mamparo, esto está separado cada 3600 mm. Para este caso especial de varenga se describirá lo que se ha asumido para poder dibujarlo en el software.

La varenga se la dividirá horizontalmente en dos partes iguales. De esta manera cada tramo de varenga está compuesta por el panel superior junto con el panel inferior. Dicho de otra manera, el primer tramo está compuesta por el panel 1 y panel 21. El segundo tramo está compuesto por el panel 2 y panel 22. El tercer tramo de varenga está compuesto por el panel 30 y panel 31. El cuarto tramo de varenga está compuesto por el panel 3 y panel 34. El quinto tramo de varenga está compuesto por el panel 4 y panel 33 y por último, el tramo sexto está compuesto por el panel 29 y panel 32.

La varenga es una plancha aligerada en la mayoría de los casos y el buque tipo no es la excepción, pero esto no se considera puesto que en el software no se puede dibujar planchas con aligeramientos. Como se había mencionado, la modelación de planchas transversales está restringida para el software LBR-5.

Al dividir la varenga en dos partes iguales, se puede reemplazar con perfiles T. En el plano original, la esbeltez de la varenga es de 850 mm. Al dividir en dos partes, cada viga tendría una esbeltez de 425 mm. Este artificio, no es el único, al asumir una plancha de estas características, se tendría que agregar una ala. Para el panel inferior, el ala tendría que estar en la parte superior y

para el panel superior el ala estaría ubicada en la parte inferior. Se agrega el ala a cada fleje con el objetivo de atiesar la plancha. En la Figura 12, se muestra una ilustración de un tramo de la varenga.

El resumen de las medidas de la varenga quedaría como se muestra a continuación en la siguiente tabla:

LONGITUD DEL ALMA	425 mm
ESPESOR DEL ALMA	7,5 mm
ANCHO DEL ALA	100 mm
ESPESOR DEL ALA	15 mm

Tabla IV.- Dimensiones principales de la varenga.

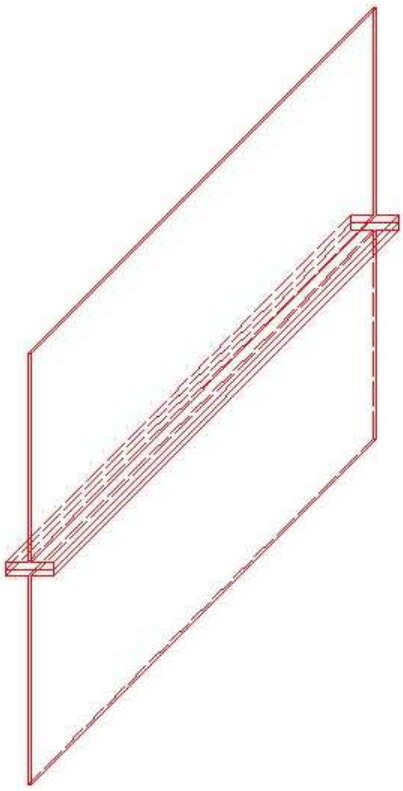


Figura 12.- Ilustración de un tramo de la varenga.

En la Figura 13, se observa que los paneles que conforman la varenga y que no se optimizará son de color verde. ¿Por qué para la varenga no se realizó el mismo artificio que el mamparo? Simplemente porque las dimensiones de la varenga son mucho menores que la de un mamparo.

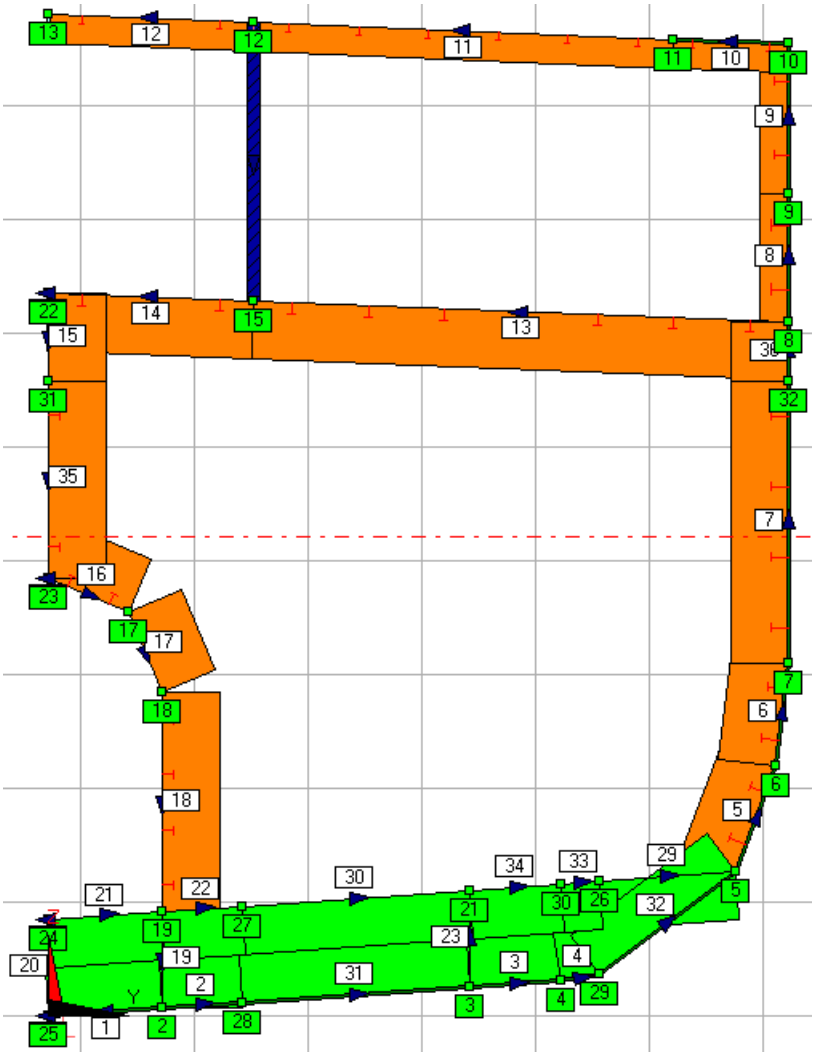


Figura 13.- Vista transversal de los estructurales, incluyendo los elementos no a optimizar [24].

En la Figura 14, se muestra el espaciamiento de la varenga. Como se había descrito anteriormente, la varenga no se optimizará.

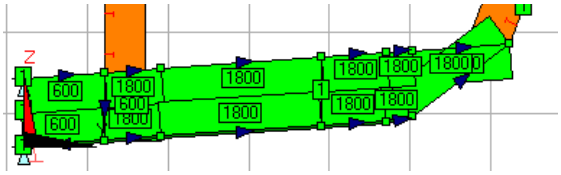


Figura 14.- Espaciamientos de las varengas [24].

MODELACION GEOMETRICA DE REFUERZOS ESTRUCTURALES LONGITUDINALES

En la Tabla V, se describen todos los elementos estructurales longitudinales que pertenecen originalmente al plano del buque. Las esloras, palmejares de las bodegas y palmejares del parque de pesca están descritas en esta tabla.

ESLORA DE LA CUBIERTA PRINCIPAL
• ∠ 100 x 100 x 10 mm I = 160,94 cm^4; A = 1900 mm^2
ESLORAS DE LA CUBIERTA DEL PARQUE DE PESCA
• ∠ 120 x 80 x 10 mm I = 255,75 cm^4; A = 1900 mm^2
• ∠ 100 x 80 x 10 mm I = 150,52 cm^4; A = 1700 mm^2
PALMEJARES DE LA CUBIERTA DEL PARQUE DE PESCA
• Pt 130 X 12 mm I = 219,70 cm^4; A = 1560 mm^2
• ∠ 100 x 80 x 10 mm I = 150,52 cm^4; A = 1700 mm^2
• ∠ 150 x 75 x 10 mm I = 473,88 cm^4; A = 2150 mm^2
PALMEJARES DE LA BODEGA
• ∠ 150 x 75 x 8 mm I = 391,87 cm^4; A = 1736 mm^2

Tabla V.- Resumen de estructurales longitudinal.

Así como en el caso de la modelación geométrica transversal, ocurre en la modelación geométrica longitudinal. En la Figura 15, Figura 16, Figura 17 y Figura 18, se expondrán las dimensiones de la longitud y espesor del alma, así como el ancho y espesor del ala de los elementos longitudinales. Es importante mencionar que todas estas medidas corresponden a los perfiles T una vez encontrada las inercias equivalentes.

En la Figura 15, el software presenta las medidas de la longitud inicial del alma de los estructurales longitudinales. Los elementos estructurales son: palmejares y las esloras de la cubierta principal y esloras de la cubierta del parque de pesca.

En la Figura 16, el software presenta las medidas del espesor inicial del alma de los estructurales longitudinales como los palmejares y las esloras.

En la Figura 17, el software presenta las medidas del ancho inicial del ala de los estructurales longitudinales como los palmejares y las esloras.

En la Figura 18, el software presenta las medidas del espesor inicial del ala de los estructurales longitudinales como los palmejares y las esloras.

En la Figura 19, el software presenta el espaciamiento inicial de los elementos estructurales longitudinales.

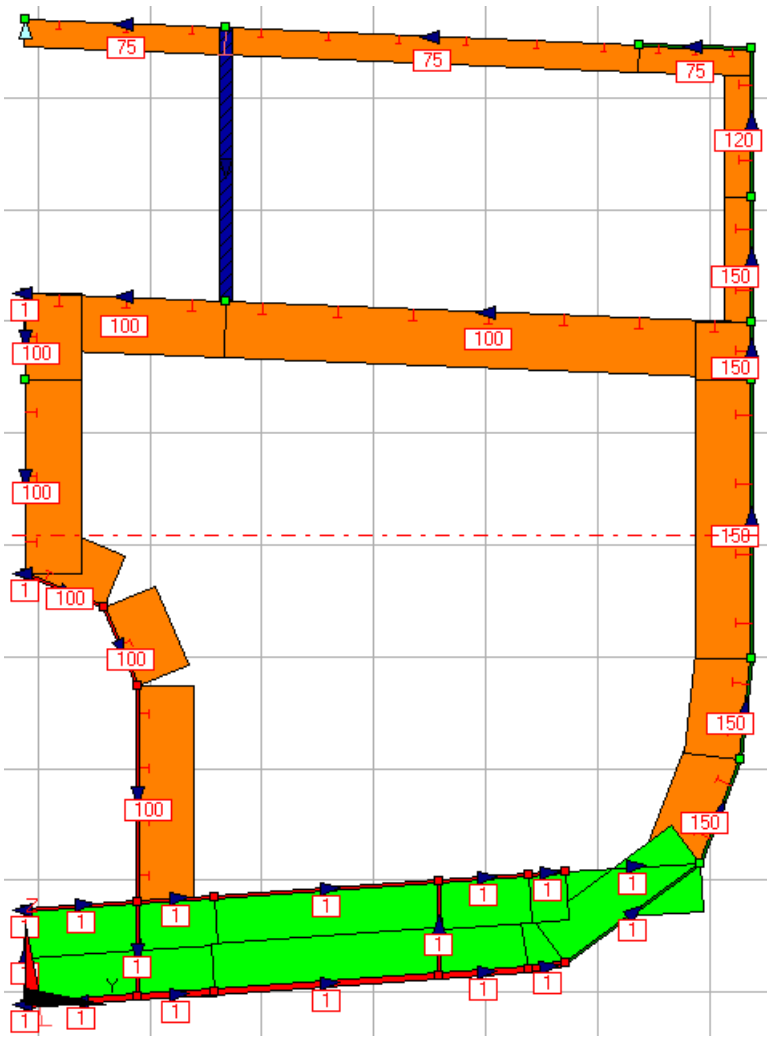


Figura 15.- Longitud inicial del alma de los elementos estructurales longitudinales [24].

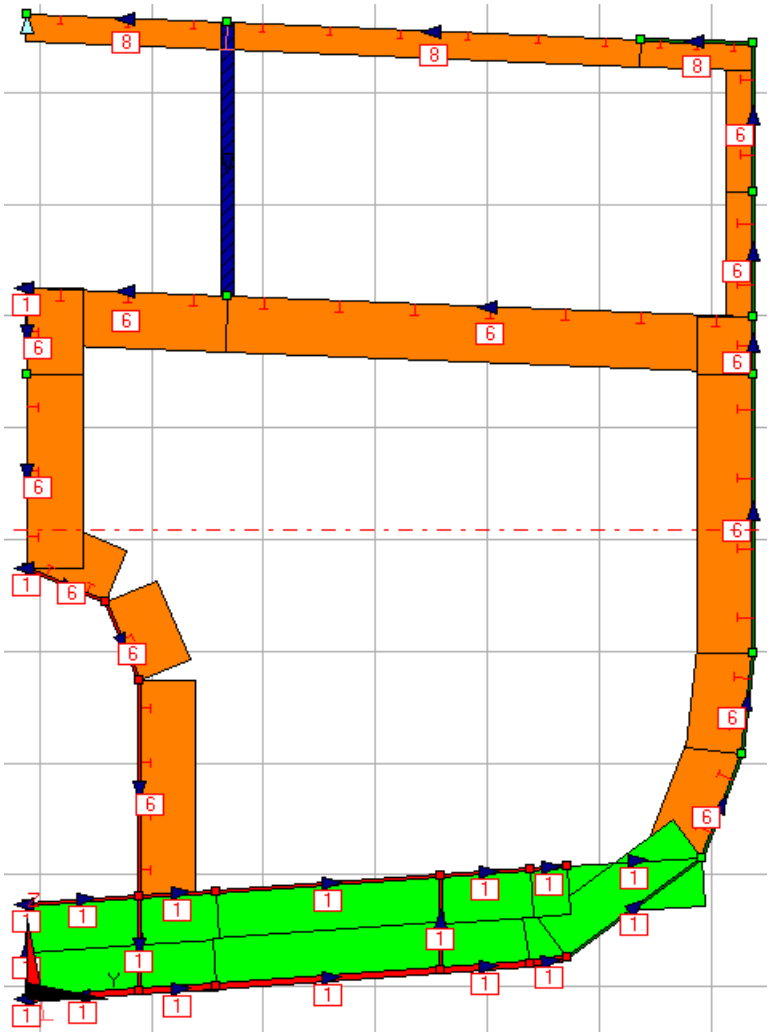


Figura 16.- Espesor inicial del alma de los elementos estructurales longitudinales [24].

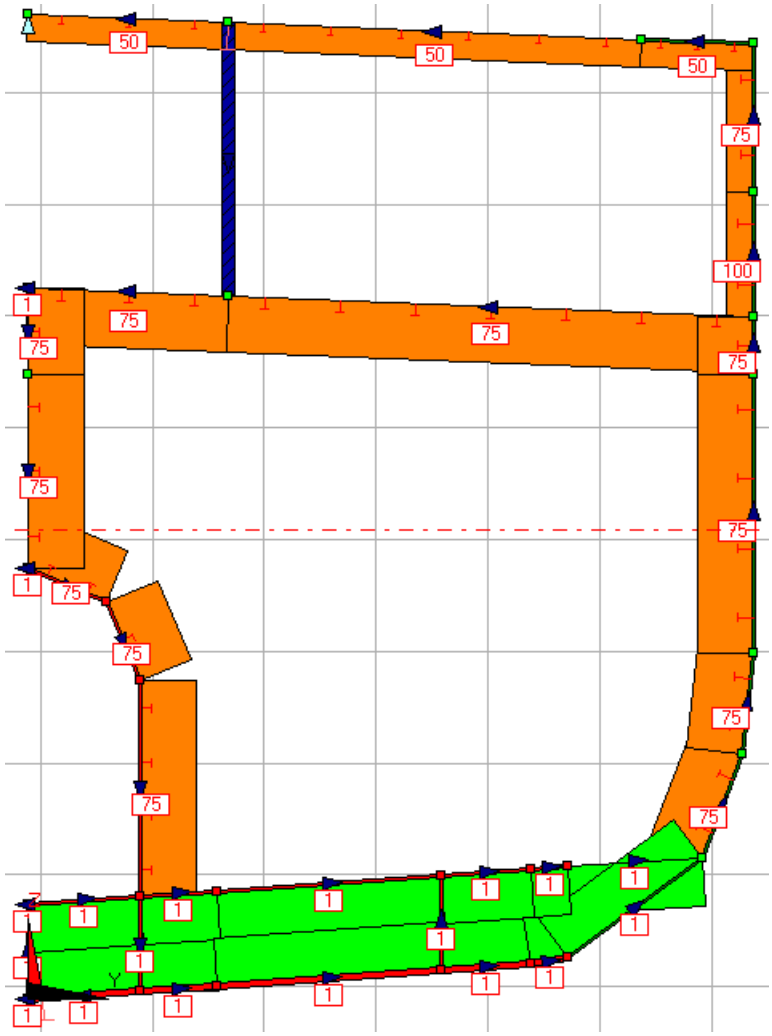


Figura 17.- Ancho inicial del ala de los elementos estructurales longitudinales [24].

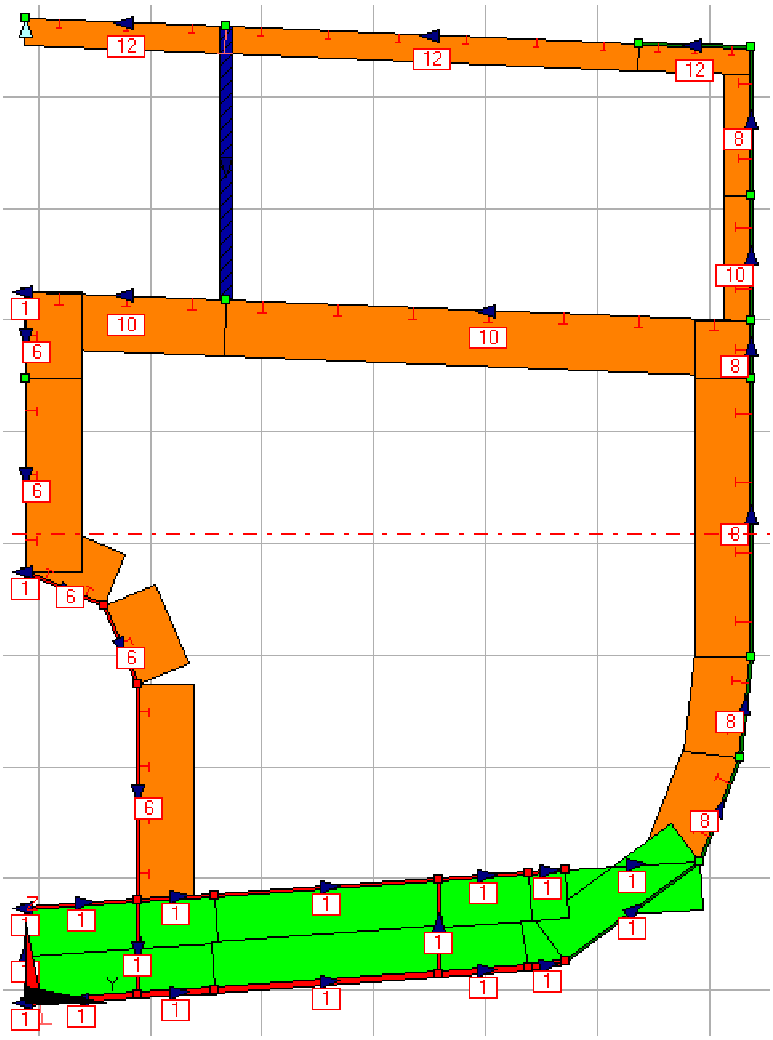


Figura 18.- Espesor inicial del ala de los elementos estructurales longitudinales [24].

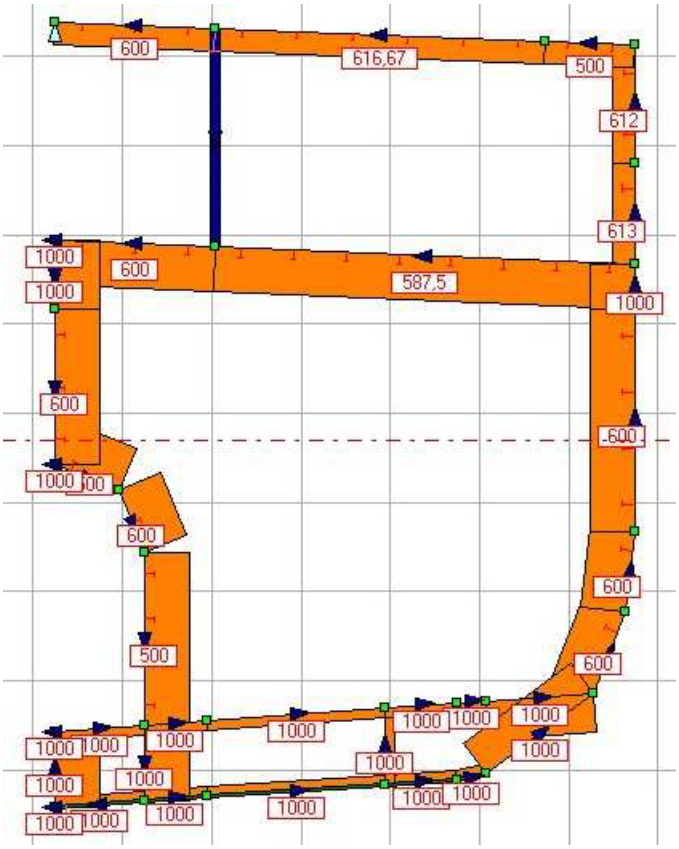


Figura 19.- Espaciamiento inicial de los elementos estructurales longitudinales [24].

Para los espesores de las planchas y los perfiles, aparecen tres conceptos diferentes de espesores. Los tres conceptos; Corrosion Thickness, Net Thickness y Gross Thickness, se lo explica en la Figura 20.

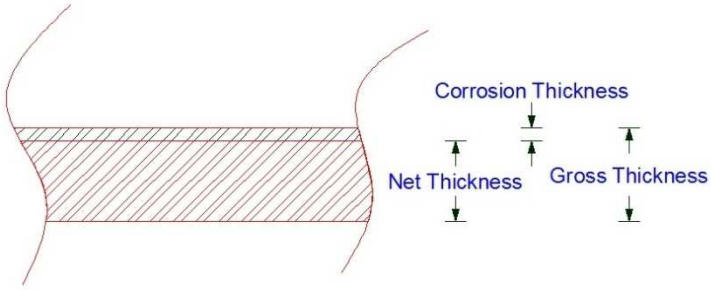


Figura 20.- Visualiza los tres diferentes espesores en una plancha o elemento estructural.

Net Thickness.- Es el espesor calculado en planchas y en perfiles. Este espesor es el adecuado para resistir los esfuerzos a los que va estar sometido un panel. Pero este espesor sufre desgaste a causa de la corrosion, es por esto que se tiene que agregar un espesor adicional, para que al actuar la corrosion disminuyendo el espesor; en la plancha o en el estructural, no se vea afectada la estructura a causa de las cargas.

Corrosion Thickness.- Este espesor significa, que es el espesor que se debe añadir a la plancha o refuerzo estructural; al espesor calculado por algún software de elemento finito, por causa de la corrosión. Este valor no es arbitrario, se toma de las normas de las sociedades clasificadoras, dependerá del espacio o la ubicación donde se encuentre la plancha o el refuerzo estructural; por ejemplo, si se encuentra en el doble fondo, cubierta, bodegas,

etc. En este caso, se ha utilizado las normas B.V., se puede encontrarlas en: Pt B, Ch 4, Sec 2, tabla 2.

Gross thickness.- Es la suma de los dos espesores; Net Thickness con Corrosion Thickness.

En las gráficas anteriores, se mostró los valores de los espesores de las planchas y de los refuerzos estructurales, esto es Gross Thickness.

Una vista del modelo en tres dimensiones “3D”, se lo puede observar en la Figura 21.

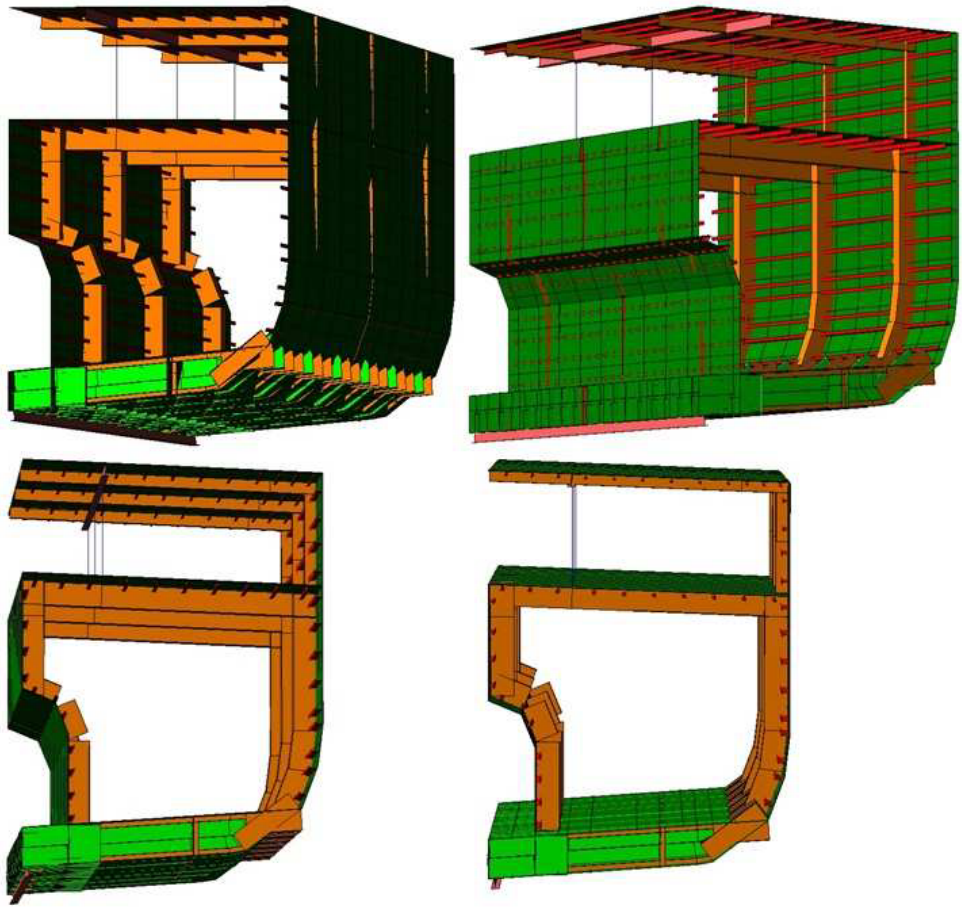


Figura 21.- Vista del modelo en tres dimensiones [24].

2.4 MODELACIÓN DE LAS CARGAS

Antes de que se inicie la modelación de las cargas; o más bien, al ingresar las cargas, es necesario que se realice unos cálculos preliminares al buque atunero tipo. Los cálculos principales son las curvas de fuerza cortante y momento flector.

Con los valores de la Tabla I y con los planos de líneas de formas, se inician los cálculos. Se Había escogido, por las restricciones del software, el cuerpo medio paralelo del buque atunero, este va desde la estación del mamparo 39 hasta la estación del mamparo 57. Esto involucra tres bodegas a estribor y tres bodegas a babor a más de una parte de los tanques de combustible en el doble fondo.

La curva de pesos y fuerza cortante se la encuentra en la Figura 22. El mamparo 39 está ubicado entre la estación 8 y 9 y el mamparo 57 está ubicado entre la estación 11 y 12.

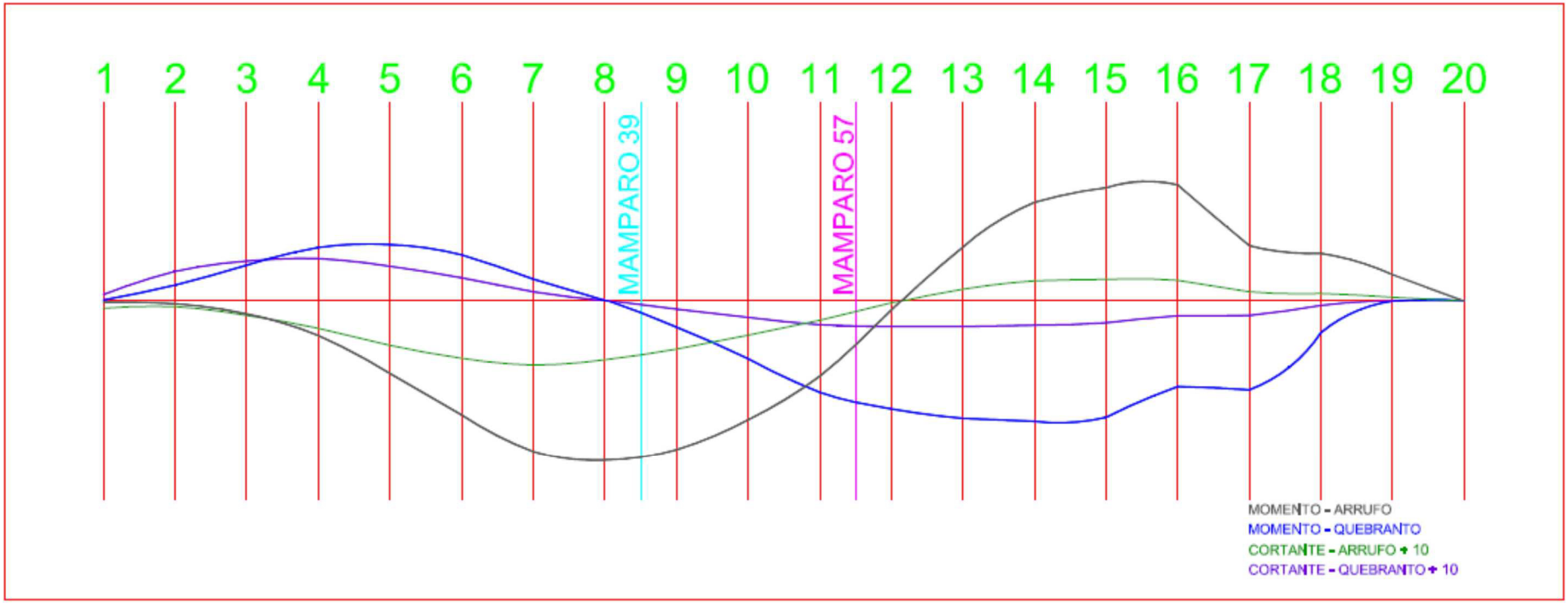


Figura 22.- Curva de Fuerza Cortante y Momento Flexionante.

En la Figura 22, el mayor momento, en valor absoluto, en arrufo se lo encuentra en el mamparo 39 y el mayor momento, en valor absoluto, en quebranto, se lo encuentra en el mamparo 57.

$$Momento\ en\ arrufo\ =\ 7888{,}5\ Ton*\ m = 77386{,}4\ kN\ *\ m$$
$$Momento\ en\ quebranto =\ 5110{,}7\ Ton\ *m =\ 50136{,}2kN\ *\ m$$

La unidad de medida para aplicar las cargas es el metro de agua. Esto quiere decir por ejemplo, una carga de 400 Kg/m² será igual a 0,4 m de H_2O por cada m².

Por otra parte, la presión total de las cargas viene dada por la siguiente fórmula:

$$\boldsymbol{PT} = (\boldsymbol{Pcu} + \boldsymbol{Pw} + \boldsymbol{Ph}) - (\boldsymbol{Pc} + \boldsymbol{Pd}) \qquad (1)$$

Donde:

P_T	Presión total en metros de agua.
P_{cu}	Presión sobre las cubiertas en metros de agua.
P_w	Presión por la ola en metros de agua.
P_h	Presión hidrostática en metros de agua.
P_c	Presión por la carga en metros de agua.
P_d	Presión por el combustible en metros de agua.

La presión sobre la cubierta P_{cu}: Se distinguen los dos tipos de cubiertas donde actúa la carga. La una es la cubierta principal y la otra es la cubierta del parque de pesca. En la cubierta principal actúa una presión de 500 kg/m² y en la cubierta del parque de pesca actúa una presión de 600 kg/m².

En la Figura 23, se puede observar la carga distribuida en los paneles que forman la cubierta principal y la cubierta del parque de pesca. Esta carga es con signo positivo porque está actuando de afuera hacia adentro de la embarcación.

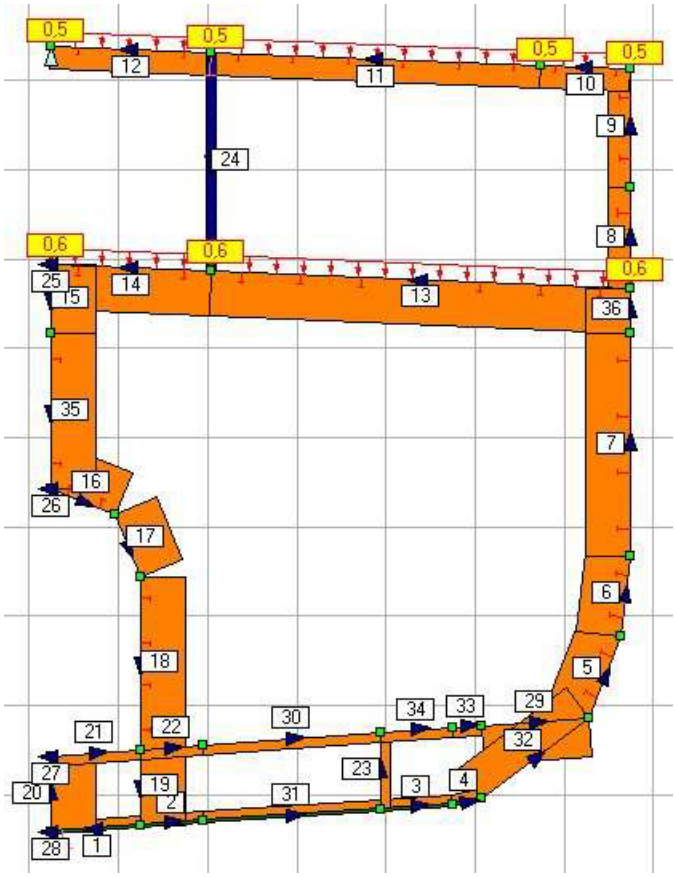


Figura 23.- Presión sobre la cubierta [24].

La presión de la ola P_w: Como se lo había mencionado, utilizando la norma B.V. en la sección 5 del capítulo 5, Parte B de la norma, se encuentra varios tipos de ola. Se utiliza la ola “tipo A” y la ola “tipo B”. Esta carga también tiene que ser convertida a metros de agua y es de signo positivo porque está actuando de afuera hacia adentro del casco. En la Figura 24 y Figura 25, se podrá observar una ilustración de la carga distribuida y perpendicular al casco causada por los dos tipos de ola.

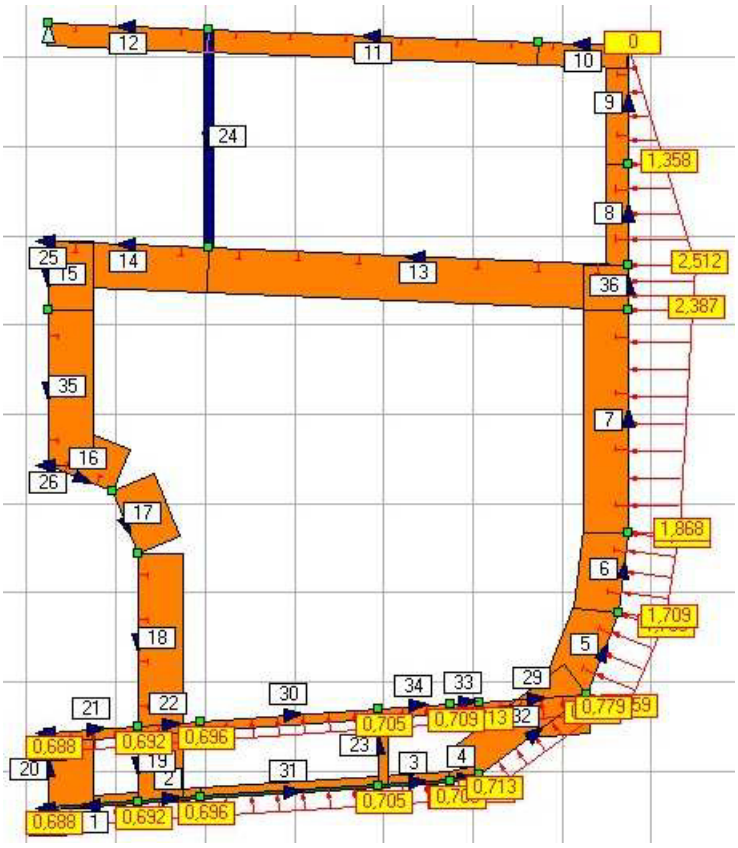


Figura 24.- Presión de ola “Tipo A” [24].

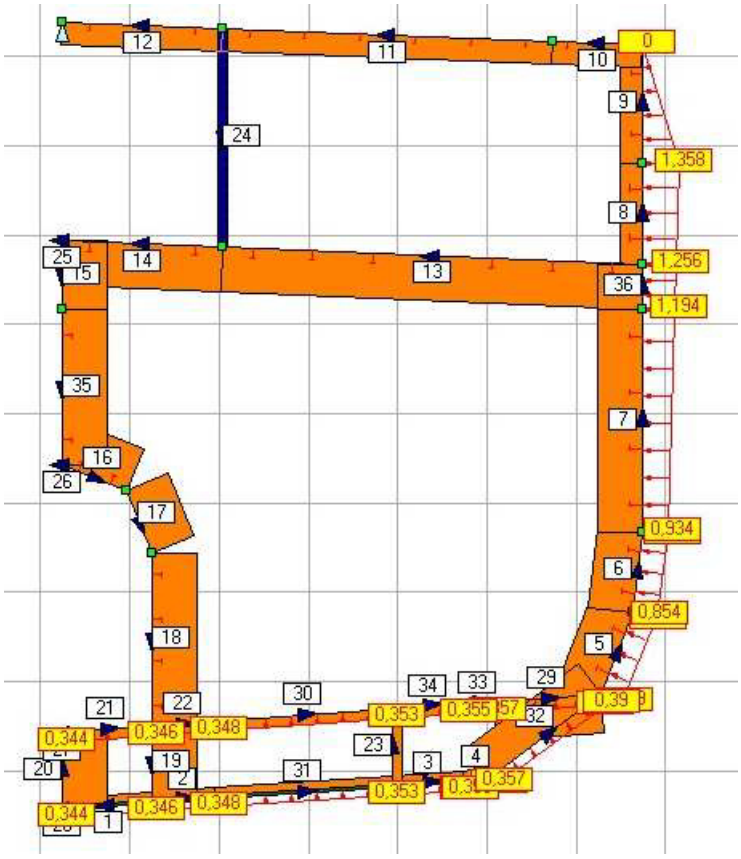


Figura 25.- Presión de ola “Tipo B” [24].

La presión hidrostática Ph: Es lo que se conoce como la presión de la bolsa que se forma alrededor del casco del navío. Esta presión es perpendicular a la superficie del casco y por actuar de afuera hacia adentro es de signo positivo. En la Figura 26 se observa la carga debido a la presión hidrostática.

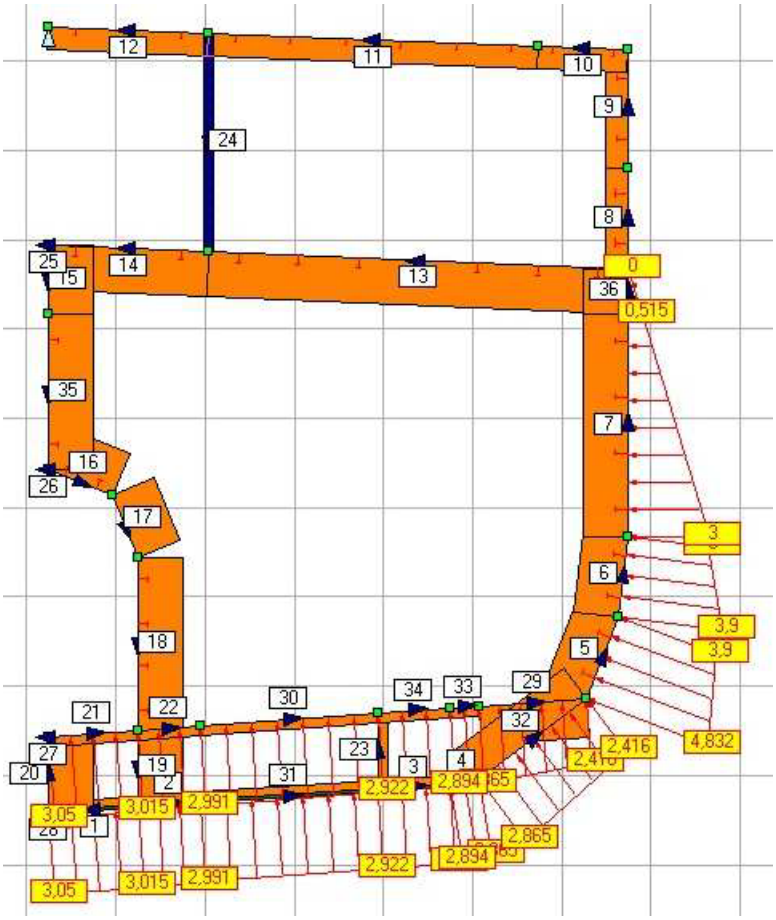


Figura 26.- Presión hidrostática [24].

La presión de la carga P_C: Se refiere a la presión que genera el peso de la carga en las bodegas, en nuestro caso es atún. La carga que viene dada en toneladas, se la tiene que convertir a metros de agua para trabajar con las mismas unidades. Por actuar de adentro hacia afuera esta carga es de signo negativo. La capacidad de las tres bodegas es de 199,1 Ton, para esta investigación se considera las cubas en su máxima capacidad permitida. En la Figura 27 se muestra la presión debido a la carga en las bodegas. Los paneles

que forman el doble fondo; como son el caso del panel 2 y panel 22, panel 31 y panel 30, panel 3 y panel 34, panel 4 y panel 33 y por ultimo panel 32 y panel 29, la carga se la divide para dos y se ingresa este valor tanto para el panel superior como para el panel inferior. Para los paneles del costado y del mamparo de crujía, no existe ninguna necesidad de dividir para dos, en este caso, se ingresa el valor de la carga correspondiente. Se divide para dos las cargas, porque en el doble fondo, estas cargas se distribuyen o se reparten.

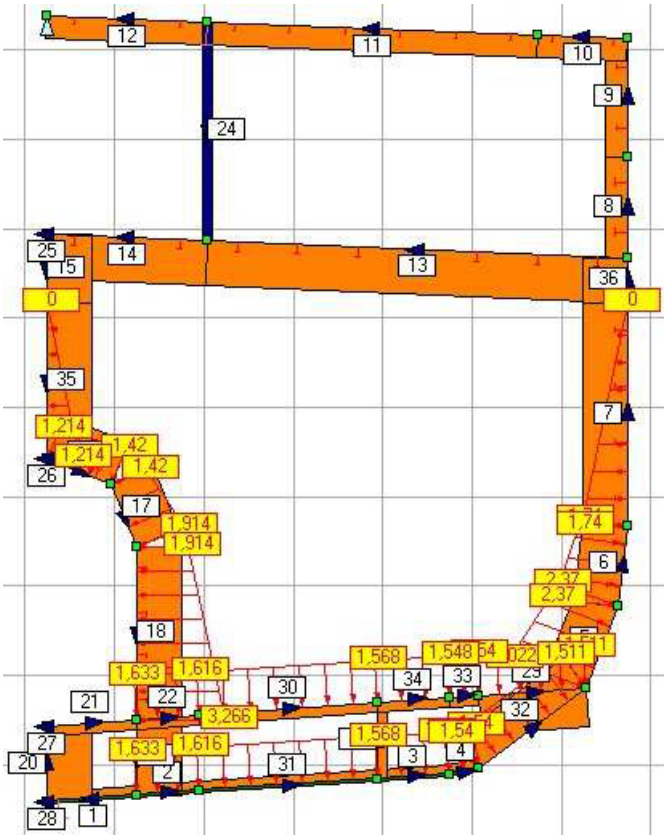


Figura 27.- Presión de la carga en las bodegas [24].

La presión de los tanques de combustible Pd: También se considera la presión por el peso del combustible, esta carga se la convierte en metros de agua para poder sumar algebraicamente todas las cargas. Esta carga es para el peor de los casos, esto es cuando los tanques del buque están en su máxima capacidad, considerando la superficie libre obviamente. Esta condición es cuando el buque sale de puerto hacia el caladero. Por actuar esta carga de adentro hacia afuera se resta en el momento de calcular el total de la carga. En la Figura 28 se muestra la presión debido a la carga de combustible.

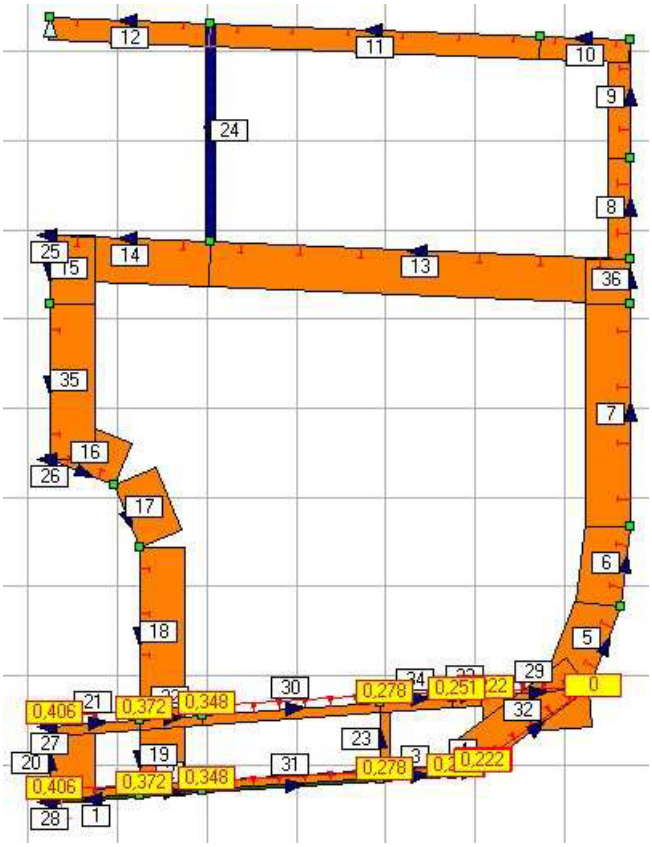


Figura 28.- Presión en el tanque de combustible [24].

La (1), se divide en dos presiones de cargas totales. Esto debido a los dos diferentes tipos de olas que se seleccionó de la norma.

$$\boldsymbol{PT} = (\boldsymbol{Pcu} + \boldsymbol{PwA} + \boldsymbol{Ph}) - (\boldsymbol{Pc} + \boldsymbol{Pd}) \qquad (2)$$

$$\boldsymbol{PT} = (\boldsymbol{Pcu} + \boldsymbol{PwB} + \boldsymbol{Ph}) - (\boldsymbol{Pc} + \boldsymbol{Pd}) \qquad (3)$$

La presión total considerando la ola tipo A; (2), se lo puede observar en la Figura 29 y la presión total considerando la ola tipo B; (3), se lo puede observar en la Figura 30.

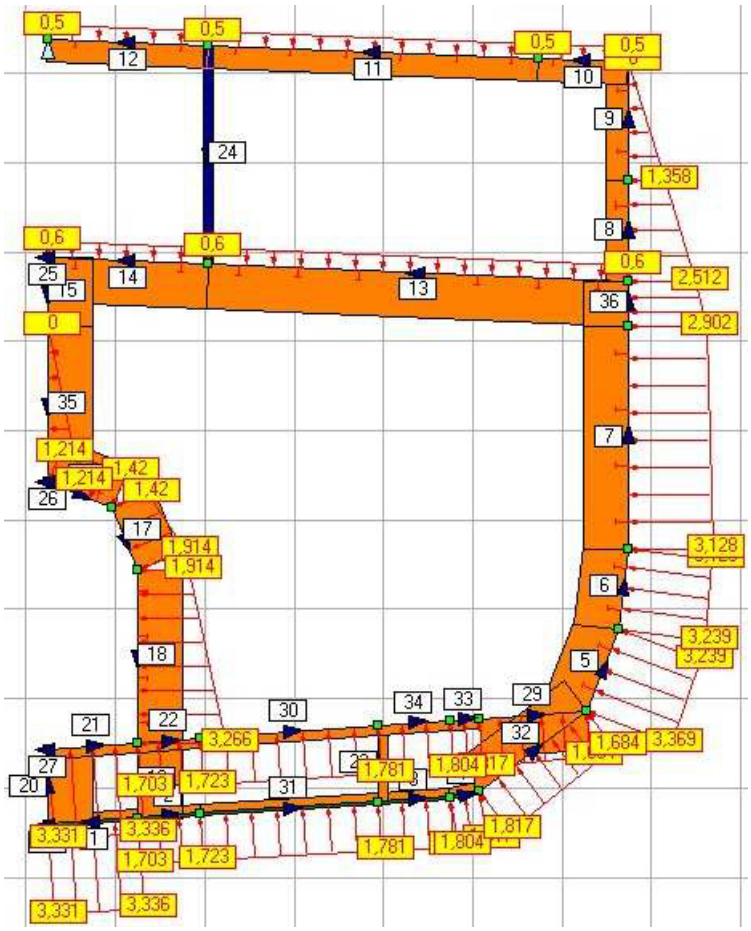


Figura 29.- Presión total considerando la ola “Tipo A” [24].

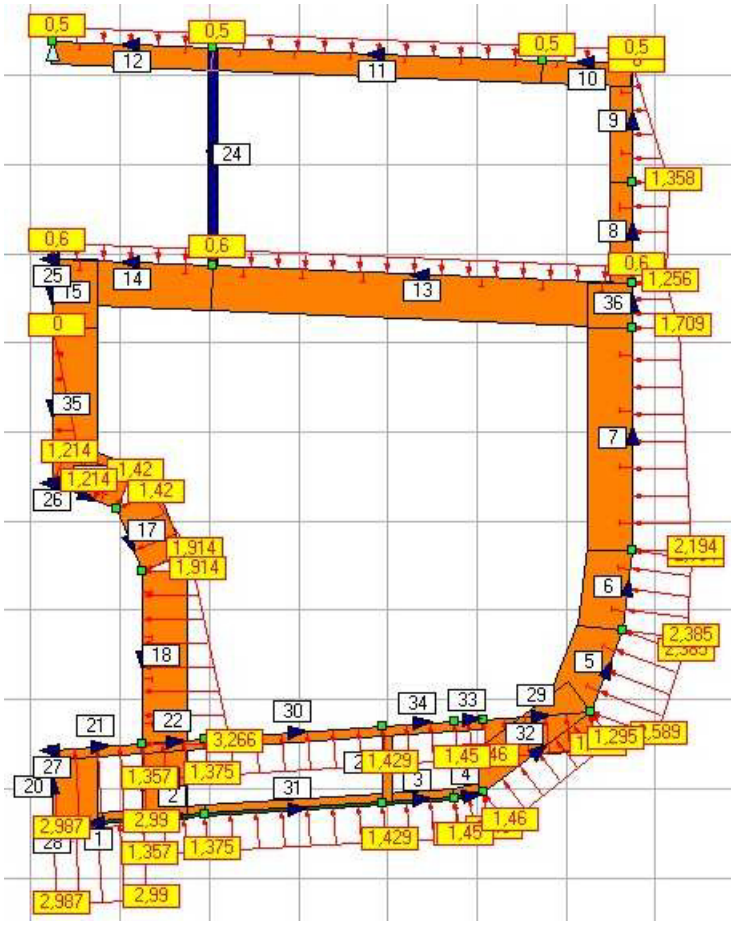


Figura 30.- Presión total considerando la ola “Tipo B” [24].

Estas presiones totales debido a las diferentes tipos de ola, se combinan para dos condiciones del buque tipo: arrufo y quebranto.

Existe una condición adicional de carga, esto lo genera el software y se refiere a una condición extrema que toma de las cuatro primeras condiciones. Para este caso, la Figura 31 presenta la carga total generada por el programa.

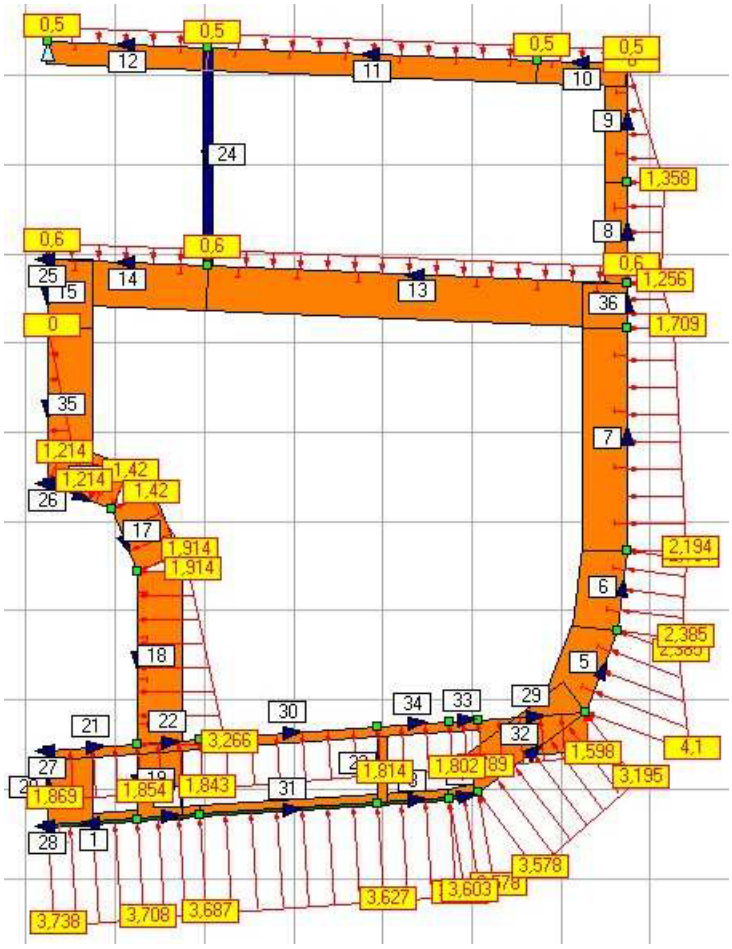


Figura 31.- Presión total máxima que genera el programa LBR-5 [24].

En resumen, se puede describir todas las combinaciones de los casos de cargas de la siguiente manera:

- Arrufo – Ola Tipo A.
- Arrufo – Ola Tipo B.
- Quebranto – Ola Tipo A.
- Quebranto – Ola Tipo B.
- Presiones locales máxima sin momento (Load Cases: 1, 2, 3, 4).

2.5 FUNCIÓN OBJETIVO

El coste de producción y el peso mínimo constituyen el doble objetivo considerado en esta aplicación.

Los costos de producción (PC) se han subdividido en tres categorías de acuerdo con la ecuación (4):

El costo de las materias primas (MC): la evaluación de los costos del material consiste en la cuantificación de las dimensiones requeridas para la construcción y la obtención de los precios de los proveedores y subcontratistas.

Los costos de mano de obra (LC): la mejor alternativa al uso de las formulaciones empíricas para evaluar los costos de mano de obra es una evaluación analítica. Este enfoque requiere un conocimiento del tiempo de trabajo requerido para cada tarea estándar de trabajo asociado con una estación de trabajo, así como la subdivisión por estaciones de todo el proceso de construcción. La ecuación (5), establece las relaciones de evaluación de costos, del costo laboral de un panel rígido por una simple actividad de fabricación, por ejemplo, la soldadura de dos conjuntos, la obtención de perfiles de acero, etc. El costo de producción se ha calculado con un módulo de coste avanzada teniendo en cuenta una base de datos detallada por varios astilleros. Alrededor de 60 operaciones de fabricación son consideradas, cubriendo las diferentes etapas de construcción, tales como vigas y

prefabricación de bulárcamas, ensamble de paneles, bloques de pre-montaje y montaje, así como 30 tipos de soldadura y sus costos unitarios [25].

Los gastos generales (OC): los gastos generales incluye cualquier gasto que no se puede atribuir a una estación de trabajo específica del proceso de construcción, pero que está, sin embargo, vinculados a la construcción.

$$\mathrm{PC} = \mathrm{MC} + \mathrm{LC} * \mathrm{HC} + \mathrm{OC} \quad (4)$$

Donde:

PC es el costo de producción (USD).

MC es el coste de material (USD).

LC son los costes laborales (horas-hombre).

HC coste por hora (USD/ hora).

OC los gastos generales (USD).

$$LC = QC * UC * KC * AC * WC \quad (5)$$

Donde:

LC es el coste laboral (horas-hombre).

QC es la cantidad (longitud de soldadura, el número de soportes, etc.).

UC son los costos unitarios (costo por unidad).

KC es el coeficiente corrector utilizado para ajustar los costos unitarios

AC es coeficiente de complejidad/accesibilidad.

WC es coeficiente de taller.

La ecuación (5) proporciona los medios básicos para evaluar el costo. Esta relación (QC X UC) es típicamente desarrollado directamente a partir de la medición de un único atributo físico tales como datos dimensionales (espesor de la placa, longitud del perfil, escantillonado del perfil, la longitud de soldadura, la garganta de soldadura, etc.) o datos cuantitativos (número de perfiles, número de soportes, número de recortes, número de agujeros, etc.) para una actividad dada la construcción naval (QC), y el costo unitario de llevar a cabo la actividad (UC), por ejemplo, la mano de obra para el montaje de bloques de acero en n horas – hombre/toneladas o la mano de obra para la soldadura en una posición vertical en n horas/metro.

Los costos unitarios (UC) varían según el tipo y el tamaño de la estructura, la tecnología de fabricación (soldadura manual, soldadura automática, etc.), la experiencia y las facilidades de las instalaciones del lugar de construcción, el país, etc. Por lo general, los costos unitarios están considerados como una función de una o más variables de diseño como espesor de la placa, la garganta de soldadura, el tipo de soldadura (a tope o filete), posición de soldadura, biseles, escantillonado perfil, etc.

Las escalas de costos catalogados (costo por unidad) disponible no siempre reflejan con precisión los costes previstos para la evaluación de costos. Por lo tanto, estas escalas de costes se pueden modificar gracias a un factor de ajuste correspondiente (KC). Este procedimiento tiene la doble ventaja de

preservar las escalas de costos para fines de control y que permite el impacto de simulación de una instalación o inversión en el costo de tecnología.

Un coeficiente adicional (AC) se introduce en la ecuación para ajustar las evaluaciones de los costos de fabricación en caso de aumento o una disminución de las relativas accesibilidades/complejidades de la nave o de sus subconjuntos (barco, bloques, paneles, etc.). Cuanto más difícil y compleja es el acceso a la estructura, mayor es el costo de fabricación.

Los cambios en la productividad de un taller a otro. Por lo general, los astilleros quieren considerar este tipo de cambio en sus evaluaciones de los costos. Para eso usamos otro coeficiente de ajuste (WC) que refleja ciertas ganancias o pérdidas en la productividad dentro de las actividades específicas de astilleros, tales como taller en el que el producto es ensamblado.

2.6 MODELACIÓN DE LAS RESTRICCIONES DE OPTIMIZACIÓN

Una vez terminado el modelo y de asignar las cargas al modelo, seguido de esto se ingresa las restricciones para la modelación. Las restricciones es para poner límites en los cálculos iterativos, de lo contrario, la optimización no sería eficiente, no sería una optimización ideal o no estaría cercana a la realidad.

Cada restricción está integrada por sus propios parámetros que se los utiliza para ingresar límites, condiciones, relaciones, proporciones, referencias, etc.

Las restricciones fundamentalmente son de cinco clases, ellos son:

a) Variables de diseño (Design Variables).
b) Restricciones estructurales (Structural Constraints).
c) Restricciones geométricas (Geometrical Constraints).
d) Restricciones de igualdad (Equality Restrictions).
e) Restricciones globales (Global Constraints).

2.6.1 VARIABLES DE DISEÑO

Como se sabe, los paneles están formados por planchas y refuerzos: longitudinales y/o transversales.

En esta restricción, encontramos algunos parámetros. Los parámetros a utilizar, son los siguientes:

1. Espesor de la plancha (Plate Thickness).
2. Longitud del alma del refuerzo transversal (Frames Web Height).
3. Espesor del alma del refuerzo transversal (Frames Web Thickness).
4. Ancho del ala del refuerzo transversal (Frames Flange Width).
5. Separación del refuerzo transversal (Frames Spacing).
6. Longitud del alma del refuerzo longitudinal (Stiffeners Web Height).
7. Espesor del alma del refuerzo longitudinal (Stiffeners Web Thickness).
8. Ancho del ala del refuerzo longitudinal (Stiffeners Flange Width).
9. Separación del refuerzo longitudinal (Stiffeners Spacing).

En la Figura 32 se muestra el cuadro de diálogo con los parámetros a ingresar para esta restricción. En la columna central de esta figura, se encuentra las dimensiones iniciales y originales de las planchas y refuerzos. En la columna de la izquierda se tiene el límite inferior y la columna de la derecha se tiene el límite superior. Estos dos límites se ingresa manualmente y se puede modificar una vez ingresado. Dentro de este rango, el software escogerá la dimensión más óptima para cada parámetro.

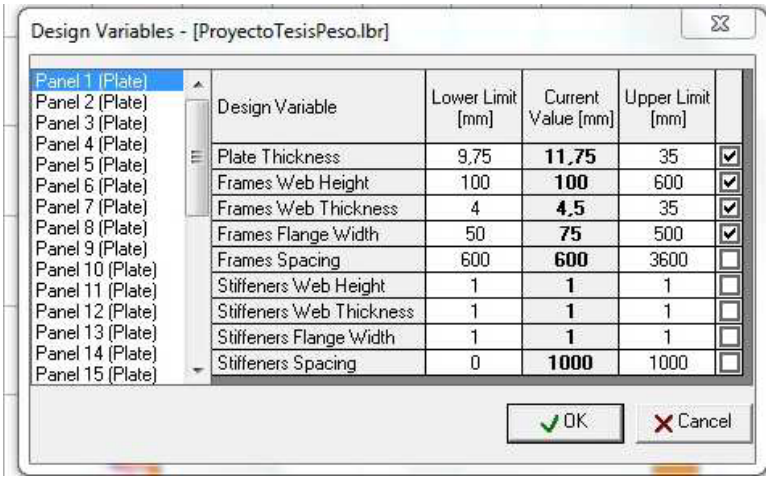


Figura 32.- Cuadro de dialogo para la restricción “Variable de diseño” [24].

No todos los parámetros se los utilizan en todos los paneles, la utilización de estos parámetros dependerá del diseño del panel.

Existen algunos paneles que están formados solo por planchas, estos carecen de refuerzos longitudinales y/o transversales.

Otros paneles, están formados por planchas y por refuerzos transversales. Un ejemplo en este modelo lo puede mostrar la Figura 5, esto son: el panel 1, panel 2, panel 3, panel 4, panel 21, panel 22, entre otros.

Por último, existen paneles que están formados por planchas y refuerzos; transversales y longitudinales. Un ejemplo en el modelo se lo observa en la Figura 5, esto son: el panel 5, panel 6, panel 7, panel 8, panel 9, panel 10, panel 11, panel 12, entre otros.

En las planchas, el parámetro de optimización es el espesor. Se ingresa el límite inferior y el límite superior del espesor de la plancha para que dentro de este rango el software escoja el óptimo.

En refuerzos transversales, los parámetros de optimización son: la longitud y espesor del alma, el ancho del ala y la separación entre los refuerzos transversales. Nuevamente, el software escogerá el valor óptimo dentro de un rango.

En refuerzos longitudinales, los parámetros de optimización son: la longitud y espesor del alma, ancho del ala y la separación entre los refuerzos longitudinales. Lo mismo que en los párrafos anteriores, el software escogerá el valor optimo dentro de un límite inferior y límite superior.

En los refuerzos transversales y los refuerzos longitudinales, no se puede ingresar como parámetros de optimización el espesor del ala. Este parámetro para optimizar, se lo describe más adelante en las restricciones geométricas.

2.6.2 RESTRICCIONES ESTRUCTURALES

Esta restricción tiene relación con los esfuerzos a los que está sometido un buque. Existen algunas referencias que se tendría que ingresar en esta restricción. Esta referencia dependerá del tipo de panel, por decir: si el panel está compuesto por refuerzos longitudinales, transversales o mixtos (transversales y longitudinales). También dependerá del esfuerzo en la plancha o los estructurales.

Las restricciones representan estados límite tales como el pandeo, la fluencia y grandes deflexiones. Estas restricciones se basan en análisis directos y se modela con ecuaciones.

La figura 33, figura 34 y figura 35, son de gran importancia para la explicación de los parámetros de esta restricción.

La figura 33, el área sombreada representa el bloque modelado. Dentro del bloque, existen tres puntos para un sistema de referencia. Cuando x = 0 significa que el punto está ubicado al principio del bloque visto de popa a proa, cuando x = L/2 significa que el punto está ubicado al centro del bloque y cuando x = L significa que el punto está ubicado al final del bloque.

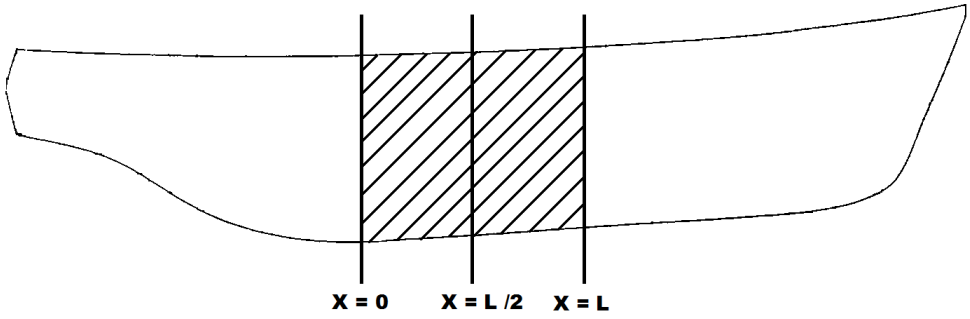


Figura 33.- Ubicación del posicionamiento en el sentido de la x.

En la figura 34; se recuerda, que el modelo está compuesto por paneles y los paneles por planchas y/o refuerzos longitudinales y/o transversales. Entonces, se orienta cada panel por tres puntos que se utilizará como referencia en posicionamiento. El punto 1 que es el punto inicial del panel, el punto 2 que está en el centro del panel y el punto 3 que esta al final de cada panel. En la gráfica, los puntos están marcados dentro de una circunferencia.

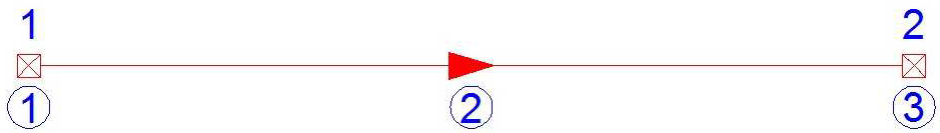


Figura 34.- Ubicación del posicionamiento en el panel.

En la figura 35, se presenta un refuerzo longitudinal o transversal, de un panel cualquiera. Este refuerzo se lo identifica con tres puntos para tener nuestro sistema de referencia. El punto A, el punto B y el punto C.

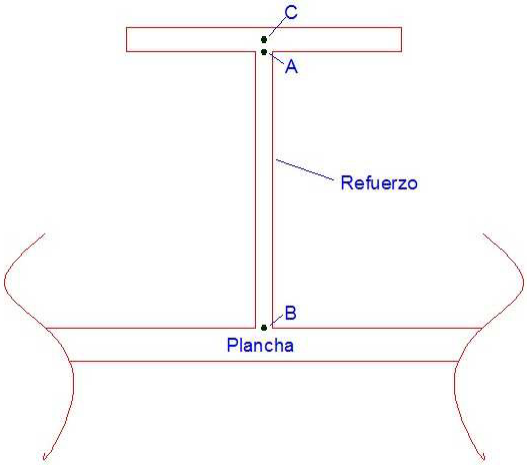


Figura 35.- Ubicación del posicionamiento en los refuerzos.

En la Figura 33, se ilustra el cuadro de diálogo, allí se observa que una de las columnas pertenece a la referencia. La referencia se refiere a las condiciones o parámetros que se habían explicado anteriormente.

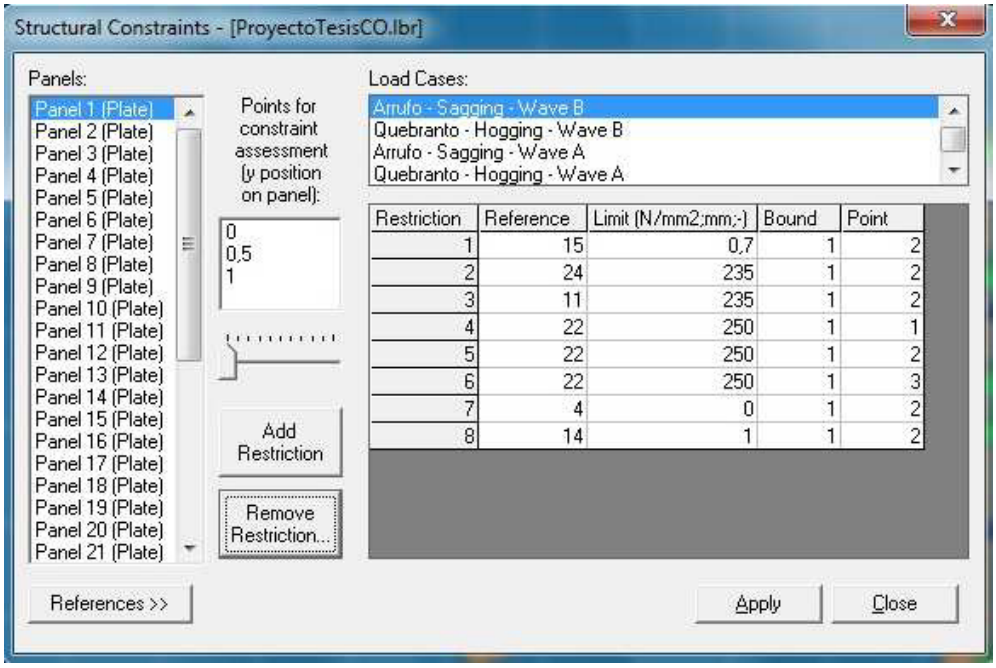


Figura 33.- Cuadro de dialogo para el ingreso de los parámetros de optimización en la restricción de “Limitación Estructural” [24].

En la misma Figura 33, se observa que en cada parámetro o referencia utilizamos un límite, un intervalo y un punto. El punto se describió en la figura 35, el limite son valores límite del acero, estos valores se escoge de las normas de las sociedades clasificadoras y en cuanto a la referencia, la tabla VI resume todos los parámetros utilizados en esta restricción.

RESTRICCIÓN	LIMITE (N/mm²; mm; -)	INTERVALO	PUNTO
4	0	1	2
7	0,012	1	2
11	235	1	2
12	235	1	2
14	1	1	2
15	0,7	1	2
22	250	1	1
			2
			3
24	235	1	2
	250	1	1
			2
			3
35	235	1	2
36	235	1	2
37	1	1	2

Tabla VI.- Resumen de las restricciones Estructurales.

En resumen:

- La restricción n°4, n°7, n°11 y n°14 las utilizam os para plancha.
- La restricción n°22 y n°24 las utilizamos para ref uerzos estructurales transversales.
- La restricción n°12, n°35, n°36 y n°37 las utiliza mos para refuerzos estructurales longitudinales.
- La restricción n°15 lo utilizamos para plancha y r efuerzo longitudinal.

2.6.2.1 LISTA DE LOS PARAMETROS ESTRUCTURALES

DESPLAZAMIENTO RELATIVO DE LA ESTRUCTURA GLOBAL

$$\boldsymbol{C(XI) \leq CJMAX} \qquad (6)$$

C(XI) es la deflexión y CJMAX el desplazamiento admisible en (m),

CJMAX puede ser positive o negativo.

En la figura 37, se muestra el desplazamiento relativo.

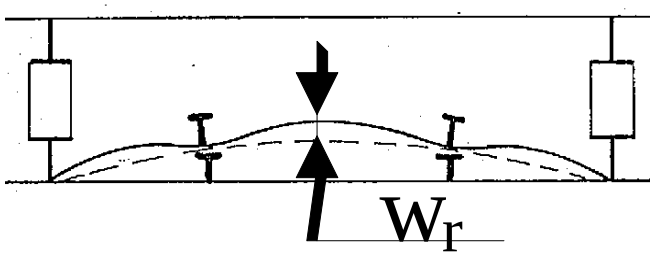


Figura 34.- Desplazamientos relativos.

PLACA FLEXIBLE (VON-MISES)

$$\boldsymbol{C(XI) \leq CJMAX} \qquad (6)$$

C(XI) es el esfuerzo von-Mises y CJMAX la tensión admisible en (N/m^2)
CJMAX siempre debe ser positivo (como C(XI) es un esfuerzo von-Mises)

Estas limitaciones se refieren a los esfuerzos Von-Mises que actúan en la placa e inducida por el momento de flexión global de la viga buque (esfuerzo primario) y la flexión de las cuadernas sometidas a la presión lateral (esfuerzo secundario). Los esfuerzos secundarios inducidos por la flexión local de los longitudinales entre las cuadernas y terciarios no están incluidos en este nivel. Éstos se pueden considerar usando el parámetro n° 4 para las tensiones terciarias y n° 54 y 56 para los esfuerzos secundarios adicionales. Los esfuerzos Von Mises se explicarán en el Apéndice D. En la figura 38, se encuentra una gráfica explicativa de los esfuerzos primarios, secundarios y terciarios.

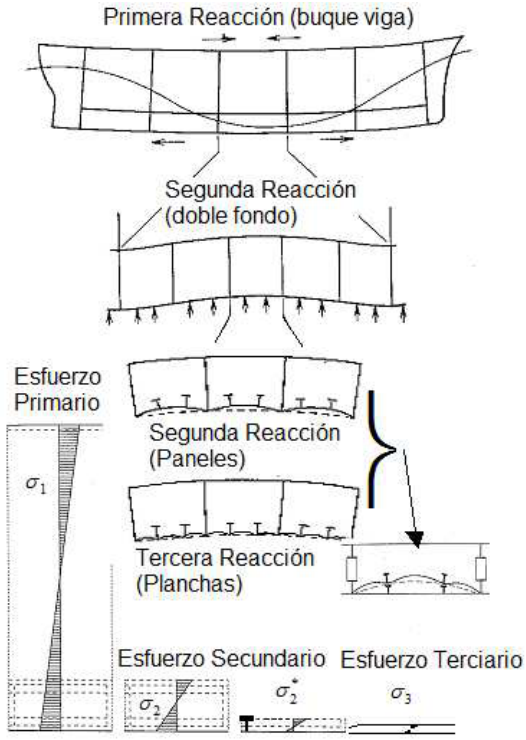


Figura 38.- Explicación de los esfuerzos primarios, esfuerzos secundarios y esfuerzos terciarios.

2.6.2.1.1 La deflexión relativa W (nº7)

Con respecto al promedio de los desplazamientos W de los dos extremos (nodos) de los paneles, es decir, el “nodo de salida” (Y=0) y el “nodo final” (Y=Yo).

$$W_{\text{relativa (Y)}} = W_{\text{absoluta (Y)}} - \frac{[W_{\text{absoluta}}(Y=0) + W_{\text{absoluta}}(Y=Y_0)]}{2} \qquad (7)$$

Debemos de tener en cuenta que la desviación local de los refuerzos y de la placa no rigidizadas son controladas utilizando respectivamente los parámetros 51-52 y 57-58, pero esto no es para el presente caso.

2.6.2.1.2 Mínimo espesor de placa (nº4)

$$\delta \min - \delta < 0 \qquad (8)$$

El mínimo espesor de placa "δ min - δ <0" (cambio flexible de la plancha y pandeo de plancha) incluye el esfuerzo de flexión en el refuerzo local.

Anteriormente sólo los esfuerzos globales (esfuerzo primario (Sx), esfuerzos secundarios (Sy eran inducidas por la flexión transversal) y el esfuerzo cortante asociado) fueron considerados para evaluar el mínimo espesor de la chapa para evitar la obtención de una placa flexionada y una placa pandeada.

En la nueva versión, es añadido el esfuerzo en el plano inducido por la flexión local de los refuerzos. Como los refuerzos son generalmente continuo (no simplemente soportado) un esfuerzo local que corresponde a un momento de flexión de $PL^2/10$ es considerado (en sus bordes y en el centro del espacio). Esta es una aproximación que ha sido validada.

2.6.2.1.3 Sigma von-Mises para esfuerzos primarios (nº11)

El sigma von-Mises (Sx, Sy) plancha (Z=0, espesor promedio de la plancha) en x = L/2 (Solo esfuerzo primarios).

Como se lo había mencionado, esta referencia se la utilizará para planchas. Corresponde a los esfuerzos primarios en el área de la sección media del bloque modelado.

2.6.2.1.4 Sigma Von-Mises combinado con esfuerzo primario y flexión local longitudinal (n°12)

Sigma Von – Mises (Sx + Sx_ rigido, Sy) placa (Z = 0, espesor promedio de placa) en x = L/2 (Esfuerzo Primario + flexión local longitudinal).

Esta referencia corresponde a los esfuerzos primarios en la sección media del bloque modelado, incluido un esfuerzo adicional en los refuerzos longitudinales.

2.6.2.1.5 Pandeo de Planchas – Euler (n°14)

Euler:

$$\sigma_{cr} = \sigma_E = k \frac{\pi^2 E}{12(1-\upsilon^2)} \left(\frac{t}{s}\right)^2 \quad (9)$$

υ = Coeficiente de Poisson

t = Espesor de la plancha del panel

s = Separación más corta del panel

$k = \frac{8,4}{\Psi+1,1}$ (10) Si la plancha esta reforzada longitudinalmente (malla grande)

$= \left[1 + \left(\frac{s}{l}\right)^2\right]^2 \frac{2,1}{\Psi+1,1}$ (11) si la plancha esta reforzada transversalmente (malla grande)

l = mayor lado de la plancha entre los refuerzos longitudinales

Ψ = relación entre los mayores esfuerzos de compresión $\sigma_a$cuando este varia linealmente

Restricción Estructural:

$$\sigma_a \leq SF\ \sigma_{cr} \quad (12)$$

σ_a = Tensión aplicada, calculada por LBR-5

SF = Coeficiente de seguridad (= 0,5)

2.6.2.1.6 Sigma Von – Mises en el ala y alma de un refuerzo transversal (n°22)

Sigma Von-Mises (S_y , τ_{xy}) refuerzo transversal, en la unión alma-ala en x = L/2

Este parámetro guarda relación con los esfuerzos primarios y el esfuerzo al corte en un elemento estructural transversal en el punto A de la figura 35, en la sección media del bloque modelado.

2.6.2.1.7 Sigma Von-Mises para refuerzos transversal en la unión del alma con la plancha en la mitad del bloque (n°24)

Sigma Von-Mises (S_y , τ_{xy})

Este parámetro guarda relación con los esfuerzos primarios y el esfuerzo al corte en un elemento estructural transversal en el punto B de la figura 35, en la sección media del bloque modelado.

2.6.2.1.8 Sigma Von-Mises para los refuerzos longitudinales en la unión del alma con la plancha en la mitad del bloque (n°3 5)

Sigma Von Mises ($S_x + S_x\_stiff\left(\frac{PL^2}{12}\right)$, $\tau_{xy}\_web\_global + \tau_{xy}\_web\_local$)

Este parámetro guarda relación con los esfuerzos primarios más un esfuerzo primario de los refuerzos longitudinales junto con el esfuerzo cortante global en el alma más el esfuerzo cortante local en el alma de los refuerzos longitudinales en el punto B de la figura 35, en la sección media del bloque modelado.

2.6.2.1.9 Sigma Von Mises para los refuerzos longitudinales en la unión del ala-alma a la mitad del bloque (n°36).

Sigma Von Mises($S_x + S_x\_stiff$, $\tau_{xy}\_web\_global$)

Este parámetro guarda relación con los esfuerzos primarios más un esfuerzo primario en los refuerzos longitudinales junto con el esfuerzo cortante global en el alma de los refuerzos longitudinales en el punto A de la figura 35, en la sección media del bloque modelado.

2.6.2.1.10 Pandeo en los refuerzos longitudinal-Johnson (nº37)

Este parámetro se utiliza para los refuerzos longitudinales.

Euler:

$$\sigma_E = \pi^2 * E \left(\frac{i}{L_{fl}}\right)^2 \quad (13)$$

E = Modulo de Young

i = Radio de giro

$$i = \sqrt{\frac{I}{A}} \quad (14)$$

I = Momento de inercia del perfil correspondiente al plano de pandeo.

A = Área del perfil.

L_{fl} = Longitud del pandeo del rigidizado.

Johnson:

$\sigma_{cr} = \sigma_E$ si $\sigma_E \leq 0{,}5\sigma_y$ (15)

$\sigma_{cr} = \sigma_y \left(1 - \frac{\sigma_y}{4\sigma_E}\right)$ si $\sigma_E > 0{,}5\ \sigma_y$

σ_y = Limite elástico

Restricción Estructural:

$\sigma_a \leq SF\ \sigma_{cr}$ (16)

σ_a = Tensión aplicada, calculada por LBR-5

SF = Coeficiente de seguridad (= 0,33)

2.6.3 RESTRICCIONES GEOMÉTRICAS

En la Figura 35, se muestra un panel reforzado con perfiles T, esta gráfica lo muestra el mismo software para que se tenga la referencia clara del significado de cada variable, para los parámetros de proporcionalidad.

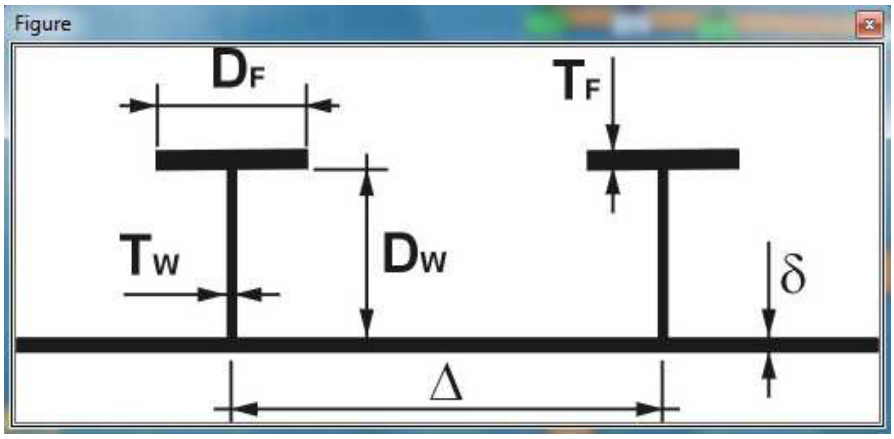


Figura 35.- Figura mostrada por el LBR-5 para guía del usuario [24].

Esta restricción, sirve estrictamente para determinar las propiedades geométricas de los refuerzos longitudinales como transversales, y la forma como se puede combinar estas propiedades geométricas, entre los estructurales transversales con los longitudinales.

Esta restricción evita que en el momento de la optimización ocurra una desproporcionalidad entre:

- La esbeltez del alma con el ancho del ala.
- El espesor del alma con la esbeltez del alma.
- El espesor de la plancha del panel con el espesor del alma.

- El espesor de la plancha del panel con la esbeltez del alma.
- La esbeltez del alma del refuerzo longitudinal con la esbeltez del alma del refuerzo transversal.
- El espesor del alma del refuerzo longitudinal con el espesor del alma del refuerzo transversal.

Se menciona desproporcionalidad porque de no darse esta restricción; el software, al momento de la optimización podría arrojar valores incoherentes. Como por ejemplo: el ancho del ala mayor a la longitud del alma.

Los parámetros básicamente están divididos en tres grupos:

a) Parámetros para refuerzos longitudinales.
b) Parámetros para refuerzos transversales.
c) Parámetros de interacción entre los refuerzos longitudinales y transversales.

Parámetros para refuerzos longitudinales

Los parámetros que se utilizará para los refuerzos longitudinales son cinco básicamente y estos son:

1. Relación entre: espesor de la plancha [d]/espesor del alma [Tw].

$$d - 2 * Tw \leq 0 \qquad (17)$$

2. Relación entre: ancho del ala [Df]/alto del alma [Dw].

$$0{,}625 * Df - Dw \leq 0 \qquad (18)$$

3. Relación entre: alto del alma [Dw]/ancho del ala [Df].

$$Dw - 2{,}5 * Df \leq 0 \qquad (19)$$

4. Relación entre: esbeltez del alma [Dw]/espesor del alma [Tw].

$$Dw - 36 * Tw \leq 0 \qquad (20)$$

5. Relación entre: espesor del alma [Tw]/espesor de la plancha [d].

$$Tw - 2 * d \leq 0 \qquad (21)$$

Parámetros para refuerzos transversales

En los parámetros para los refuerzos transversales se utilizará las formulas: (17), (18), (19), (20) y (21). Estas fórmulas fueron presentadas en los parámetros para refuerzos longitudinales.

A más de estas fórmulas anteriores, también se usará un parámetro adicional.

Relación entre: esbeltez del alma [Dw] / espesor del alma [Tw].

$$Dw - 120 * \mathrm{Tw} \leq 0 \qquad (22)$$

Parámetros de interacción entre los refuerzos longitudinales y transversales

Cuando es el caso de interactuar refuerzos longitudinales con transversales; como en el caso de un bao con una eslora o una cuaderna con un palmejar, etc. se Utilizará el siguiente parámetro:

1. Relación entre: esbeltez del alma del refuerzo transversal [Dw(fr)]/ esbeltez del alma del refuerzo longitudinal [Dw(st)].

$$2 \leq (Dw(fr))/(Dw(st)) \qquad (23)$$

2.6.4 RESTRICCIONES DE IGUALDAD

Las restricciones de igualdad sirven para darle una proporción a un panel con respecto a un segundo panel. La proporción de igualdad, lo que el software lo llama ratio, es una constante que va de (0; 1). Lo que quiere decir es que de cualquier elemento de un panel sea plancha, refuerzo longitudinal o refuerzo transversal, el ratio es la proporción que existe entre dos paneles, dicho en otras palabras, el ratio es cuantas veces menor; en espaciamiento y geometría, cualquiera de los elementos de un panel con respecto a un segundo panel.

Dentro de esta restricción existe variable dependiente y variable independiente. Dentro de la variable independiente se escoge un panel, luego se escoge otro panel dentro de la variable dependiente para que sea proporcional al panel escogido en la variable independiente; el ratio define cuanto proporcional debe ser la variable dependiente con respecto a la variable independiente.

Los parámetros son los mismos parámetros del ítem 0 Variables de diseño.

Ejemplos:

1. El espesor de la plancha en el panel 4 = 1 * El espesor de la plancha en el panel 2.

En este ejemplo, la restricción nos dice que el espesor de la plancha del panel 4 es igual al espesor de la plancha del panel 2. El 1 es el ratio, que es la relación de proporcionalidad. La variable independiente es el panel 2 y la variable dependiente el panel 4.

2. El ancho del ala del refuerzo transversal en el panel 4 = 1 * El ancho del ala del refuerzo transversal en el panel 31.

En este ejemplo, la restricción nos dice que el ancho del ala del refuerzo transversal del panel 4 es igual al ancho del ala del refuerzo transversal del panel 31. El 1 es el ratio, que es la relación de proporcionalidad. La variable independiente es el panel 31 y la variable dependiente es el panel 4.

3. El espaciamiento de los refuerzos transversales en el panel 23 = 0,16 * el espaciamiento de los refuerzos transversales en el panel 13.

En este ejemplo, la restricción explica que el espaciamiento del refuerzo transversal del panel 23 es 0,16 veces el espaciamiento del refuerzo transversal del panel 13. El ratio es 0,16 y es la relación de proporcionalidad, lo que quiere decir que por un espacio que se repite el panel 13 se repetirá seis veces el panel 23.

En la Figura 3640, se muestra el cuadro de dialogo donde se ingresa los parámetros para la optimización.

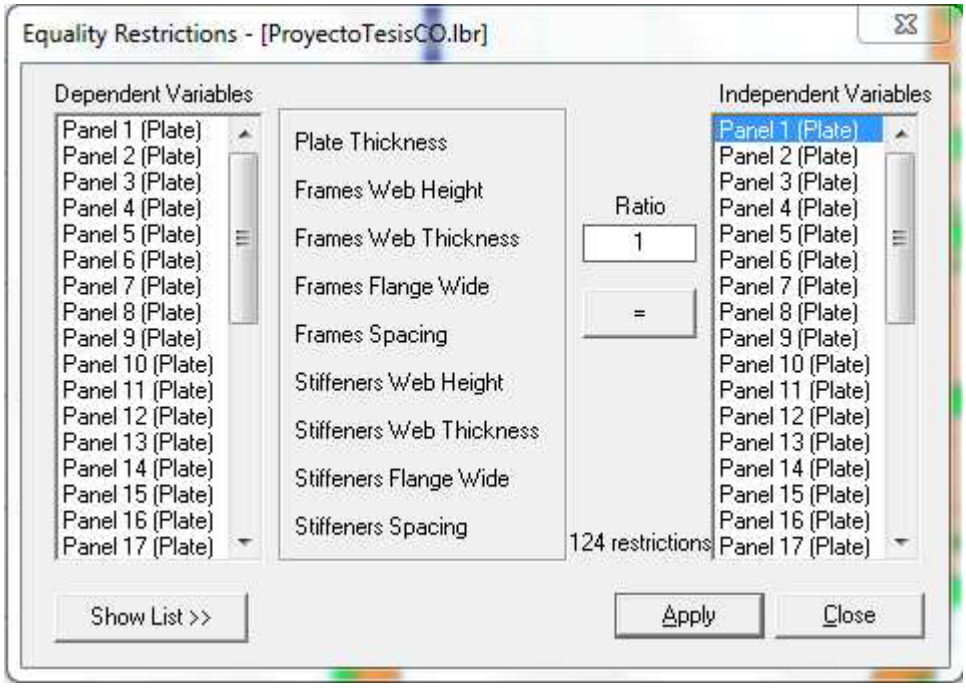


Figura 36.- Cuadro de dialogo para la restricción de igualdad [24].

2.6.5 RESTRICCIONES GLOBALES

Una última restricción, son justamente las restricciones globales. Se Puede observar; en la Figura 37, el cuadro de dialogo que el software presenta al momento de ingresar los datos.

El cuadro de dialogo para esta restricción está dividida en cuatro partes:

- Límites del centro de gravedad.
- Restricciones del módulo de la sección.
- Restricciones de la inercia.
- Restricciones de peso.
- Restricciones de costo.

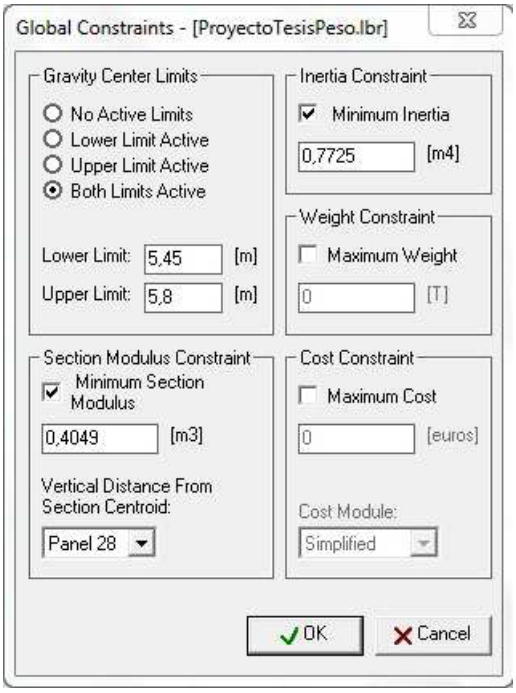


Figura 37.- Cuadro de dialogo para las restricciones globales [24].

LIMITES DEL CENTRO DE GRAVEDAD

El centro de gravedad inicial del buque atunero está a 5,583 m. Para este parámetro, dentro de las restricciones globales, se ingresa un límite superior y un límite inferior, el cual pretende que el centro de gravedad trate de mantenerse igual al original. Una variación excesiva del centro de gravedad, sea que este disminuya o se incremente, provocaría una inestabilidad de la embarcación.

En este caso, el límite inferior hemos considerado 5,45 m. Y el límite superior, consideramos 5,8 m.

En el capítulo próximo; donde se mostrará los resultados, se dará a conocer en cantidad y en porcentaje, cuanto ha variado el centro de gravedad del buque atunero tipo.

RESTRICCIONES DEL MODULO DE LA SECCION

En este parámetro que se encuentra dentro de las restricciones globales, se utiliza la fórmula para calcular el módulo de la sección media. Esta fórmula se la adquiere de la referencia [7].

$$Z_{R,MIN} = n_1 * C * L^2 * B * (C_B + 0{,}7) * K * 10^{-6} \quad (24)$$

Donde:

n_1 = 1

K = 1

C = viene dado por la formula

$$C = (118 - 0{,}36 * L) * \frac{L}{1000} \quad (25)$$

Como resultado por las formulas anteriores, Z = 0,4049 m³. Este valor se lo ingresa en el cuadro de dialogo de las restricciones globales.

RESTRICCIONES DE LA INERCIA

Otros de los parámetros que se encuentra en el cuadro de dialogo de la restricciones globales es con respecto a la inercia. Antes de ingresar el valor,

primeramente se tiene que calcular. La fórmula esta dada por la norma B.V. descrita en la referencia [7].

$$I_{YR} = 3 * Z'_{R,MIN} * L * 10^{-2} \qquad (4)$$

Utilizando el valor del módulo de la sección calculado de la formula (24), se remplaza en la formula (4), obteniendose como resultado $I_{YR} = 0{,}7725$. Este valor se lo ingresa en el cuadro de dialogo del software como se lo mostró en la Figura 37.

RESTRICCIONES DE PESO

En este parámetro no se ingresa ningún valor.

RESTRICCIONES DE COSTO

Para este parámetro; al igual que la restricción de peso, no se ingresa ningún valor.

CAPITULO 3

RESULTADOS

3.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Es importante recordar que existen dos óptimos, debido a las dos variables que se optimizan: peso y costo. Generalmente, el escantillonado de óptimo peso no es igual al escantillonado de óptimo costo.

3.1.1 OPTIMO PESO

Para el óptimo peso se muestra los resultados en la siguiente secuencia: gráfica de la función objetivo, grafica de la variación del centro de gravedad, dimensiones finales de las planchas, dimensiones finales de los estructurales transversales y dimensiones finales de los estructurales longitudinales.

GRÁFICA DE LA FUNCION OBJETIVO

En la Figura 38, se muestra la gráfica de la función objetivo. Aquí se podrá observar que dentro de las iteraciones, comienza con 48,3 Ton y termina con 43,9 Ton. El resultado de esta optimización; en porcentaje, es de 9,0% en peso.

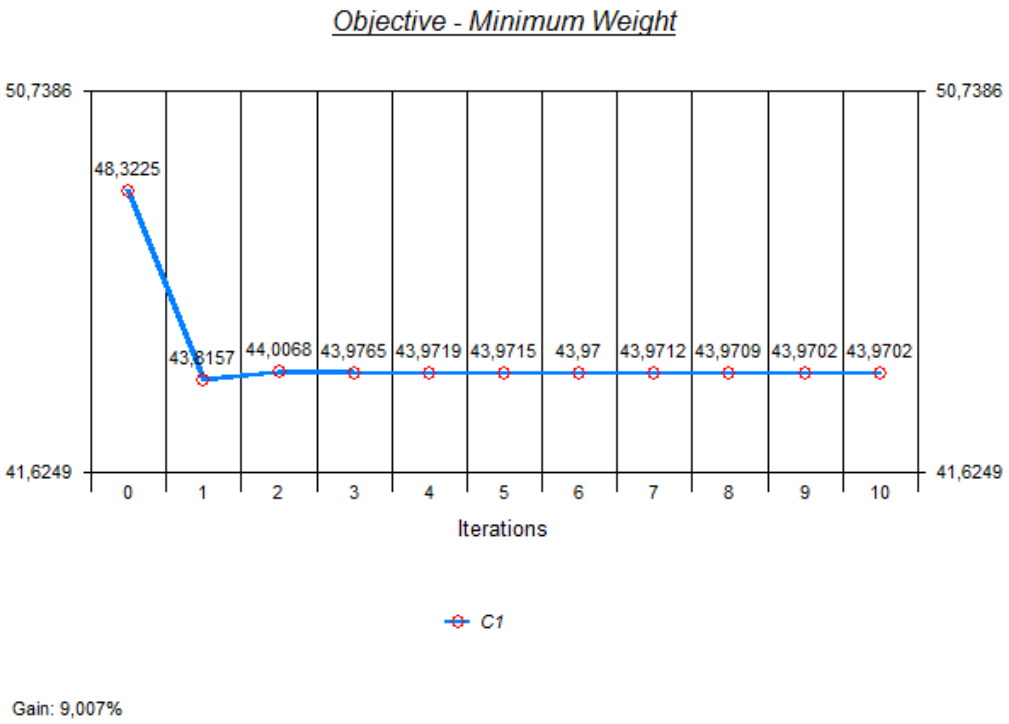


Figura 38.- Función objetivo del peso optimizado [24].

GRÁFICA DE LA VARIACIÓN DEL CENTRO DE GRAVEDAD

En la Figura 39 se muestra la variación del centro de gravedad. Se puede notar que empieza con la primera iteración en 5,583 m. Y la última iteración es de 5,58 m.

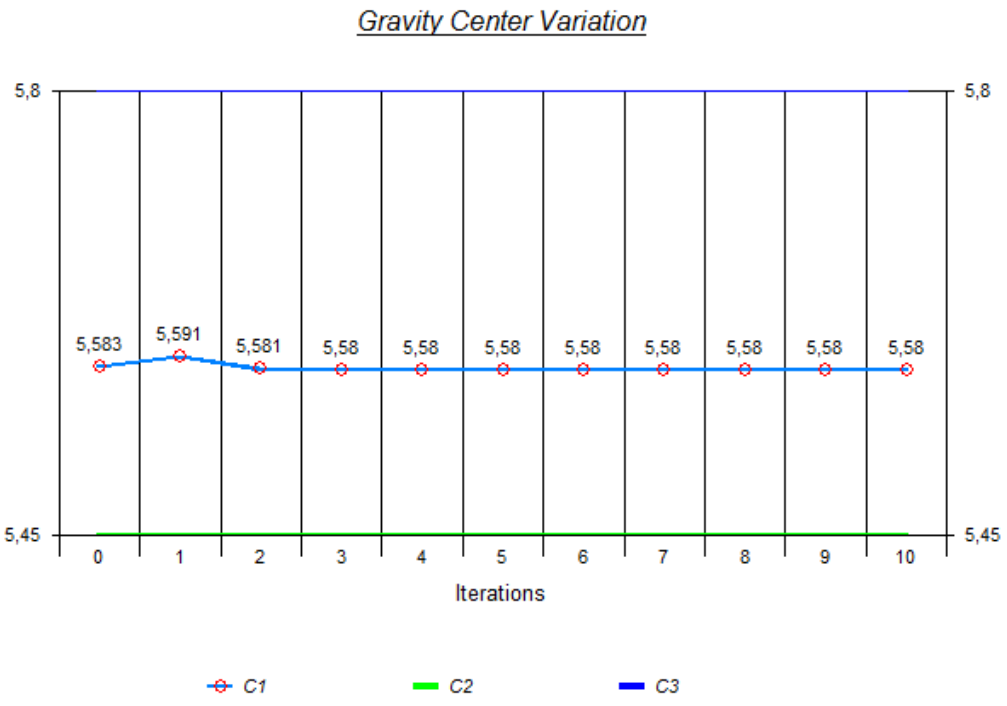


Figura 39.- Variación del centro de gravedad una vez optimizado el peso [24].

DIMENSIONES FINALES DE PLANCHAS

Estas nuevas dimensiones se las muestra en la Figura 40, aquí se observan los nuevos espesores de las planchas en cada panel.

Es importante mencionar que el espesor mostrado en esta figura corresponde al espesor Gross Thickness.

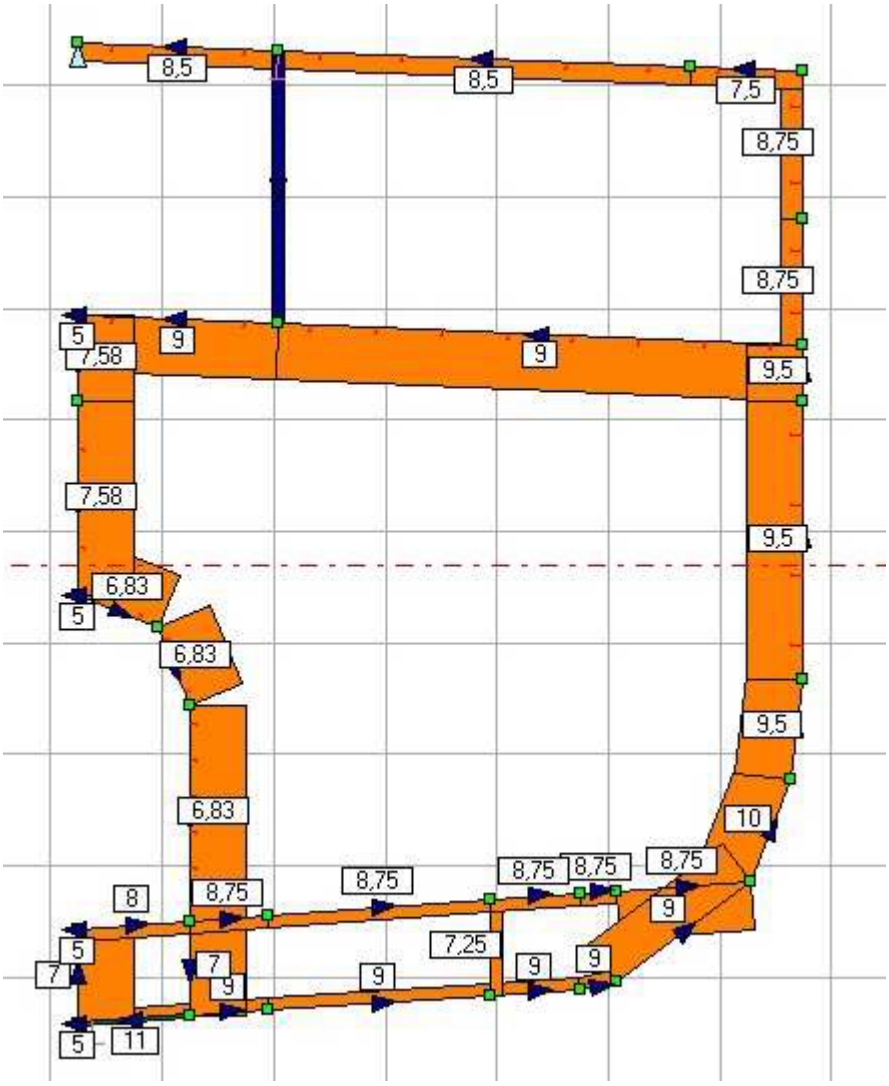


Figura 40.- Espesor final de las planchas de los paneles [24].

DIMENSIONES FINALES DE LOS ESTRUCTURALES TRANSVERSALES

En la Figura 41, Figura 42, Figura 43 y Figura 44 se muestran las dimensiones de la longitud y el espesor del alma, y las dimensiones del ancho y el espesor

del ala de la cuaderna y los baos del parque de pesca. Así también las varengas en el doble fondo.

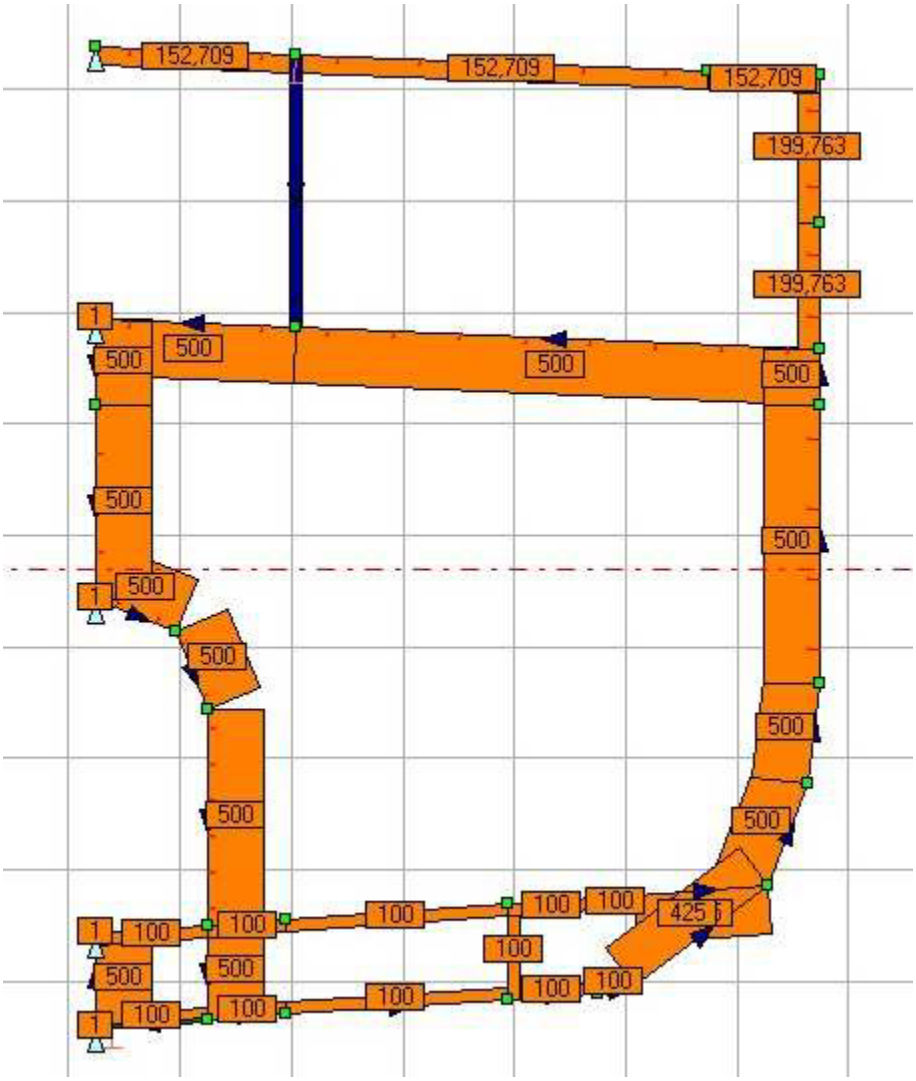


Figura 41.- Longitud final del alma de los elementos estructurales transversales [24].

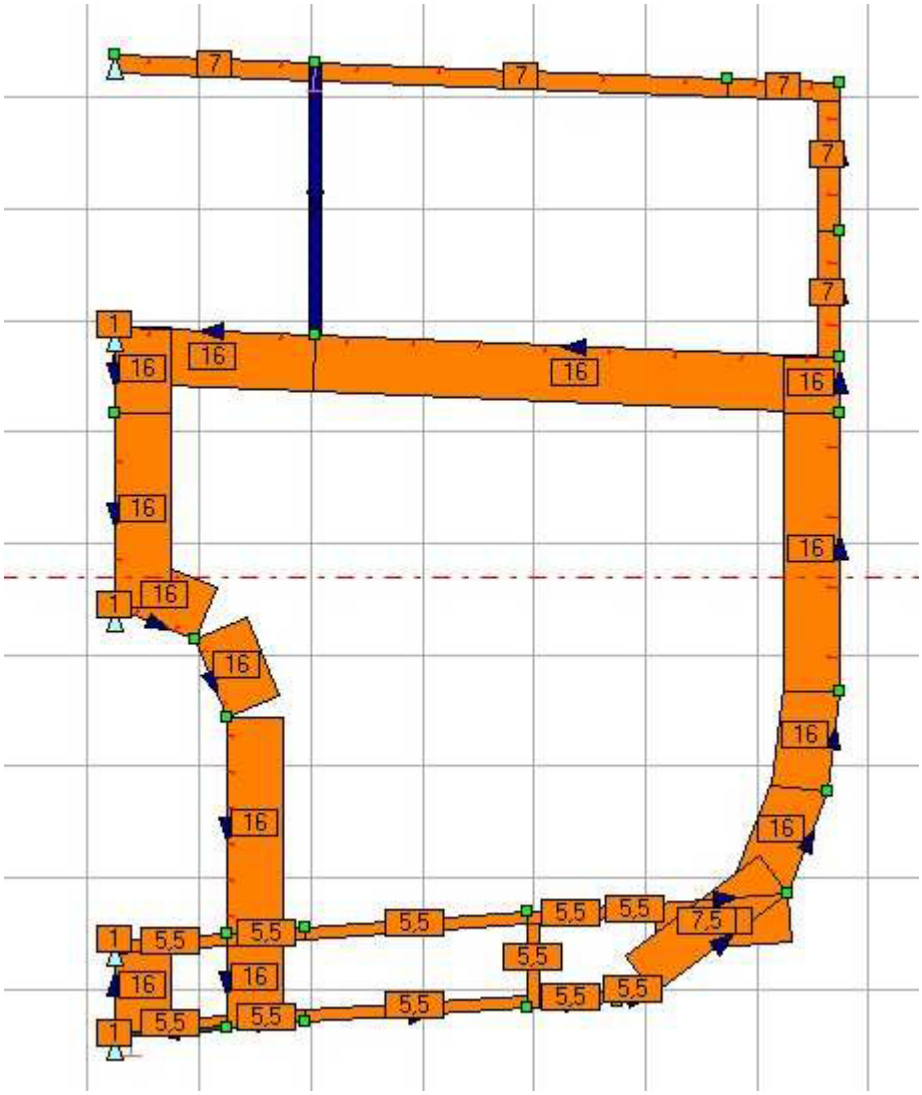


Figura 42.- Espesor final del alma de los elementos estructurales transversales [24].

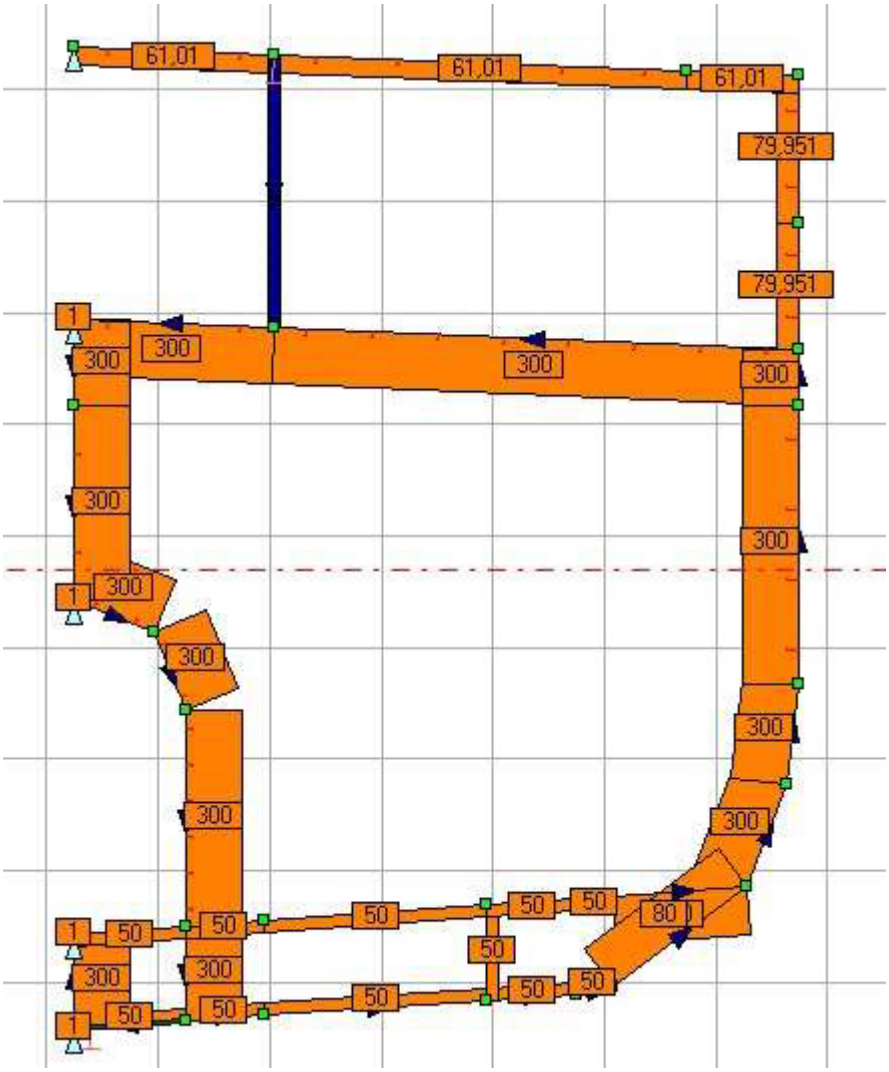


Figura 43.- Ancho final del ala de los elementos estructurales transversales [24].

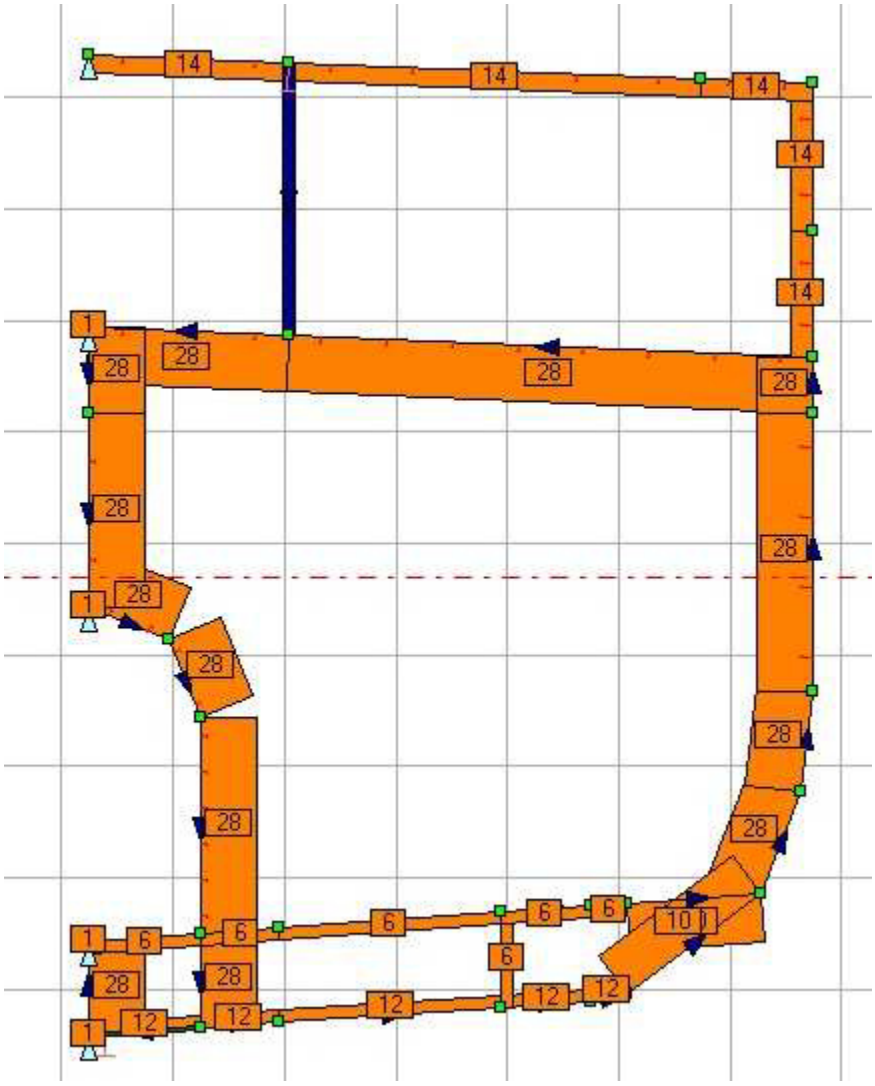


Figura 44.- Espesor final del ala de los elementos estructurales transversales [24].

Los estructurales transversales que forman el mamparo no presentan ningún cambio; se había mencionado que el mamparo no se optimizaría.

Por la forma del buque tipo que se estudió, se decidió no optimizar el espaciamiento entre los refuerzos transversales, lo que quiere decir que los mamparos, las varengas, las cuadernas junto con los baos del parque de pesca, quedan ubicados en la misma posición original.

DIMENSIONES FINALES DE LOS ESTRUCTURALES LONGITUDINALES

Las Figura 45, Figura 46, Figura 47 y Figura 48 muestran las dimensiones de la longitud y el espesor del alma, y las dimensiones del ancho y el espesor del ala de los palmejares y esloras de las bodegas, palmejares y esloras del parque de pesca.

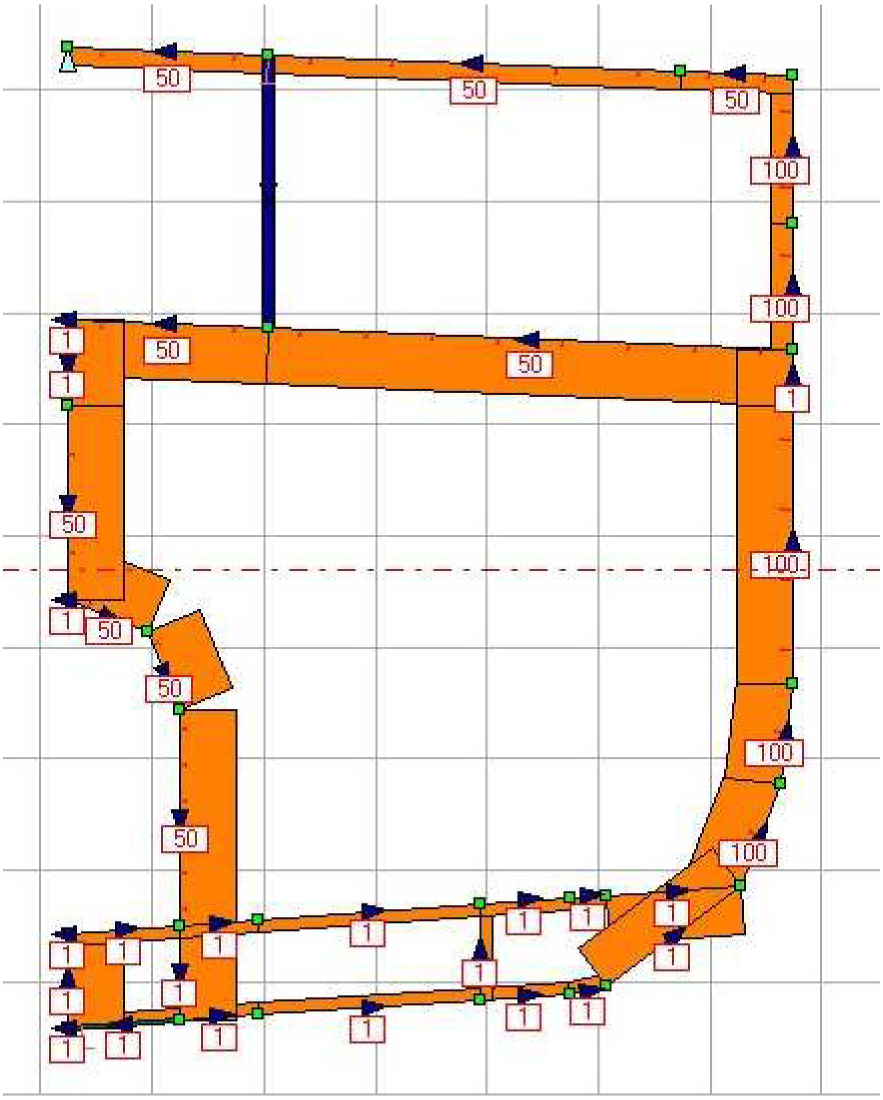


Figura 45.- Longitud final del alma de los elementos estructurales longitudinales [24].

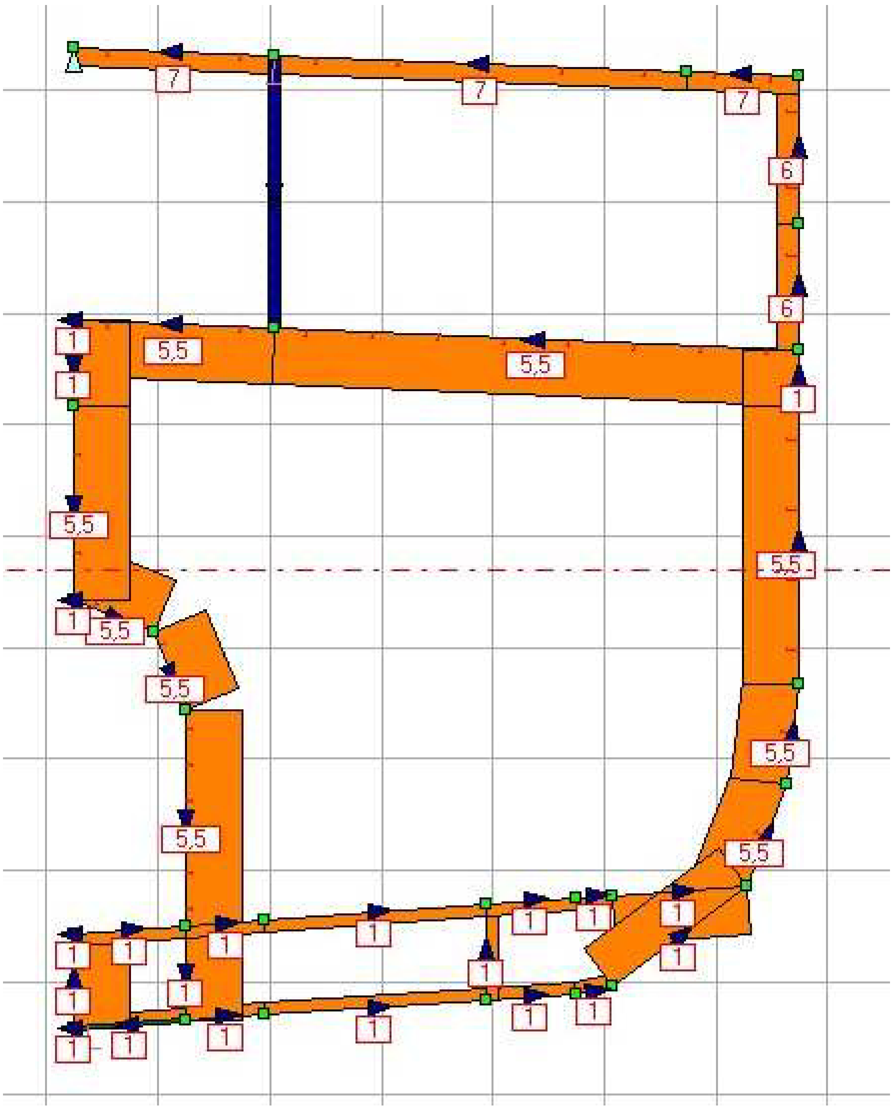


Figura 46.- Espesor final del alma de los elementos estructurales longitudinales [24].

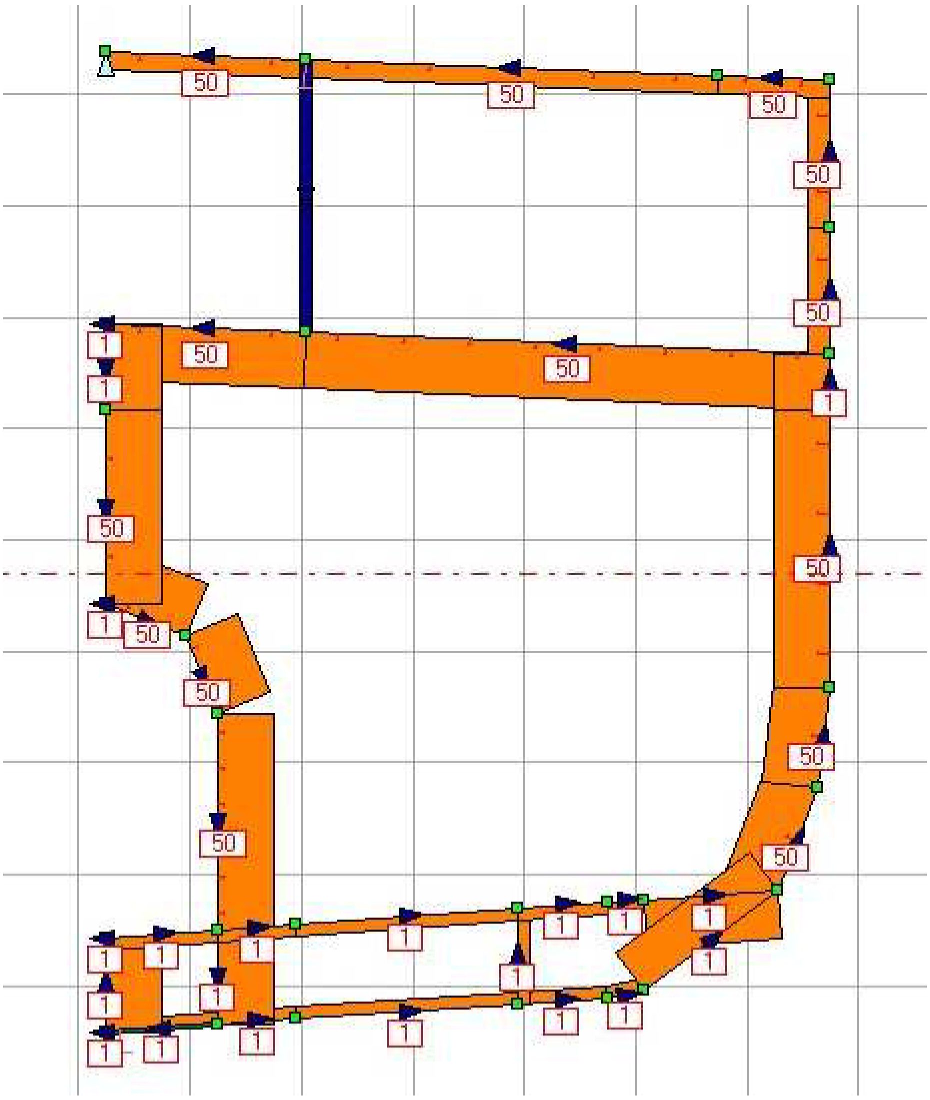


Figura 47.- Ancho final del ala de los elementos estructurales longitudinales [24].

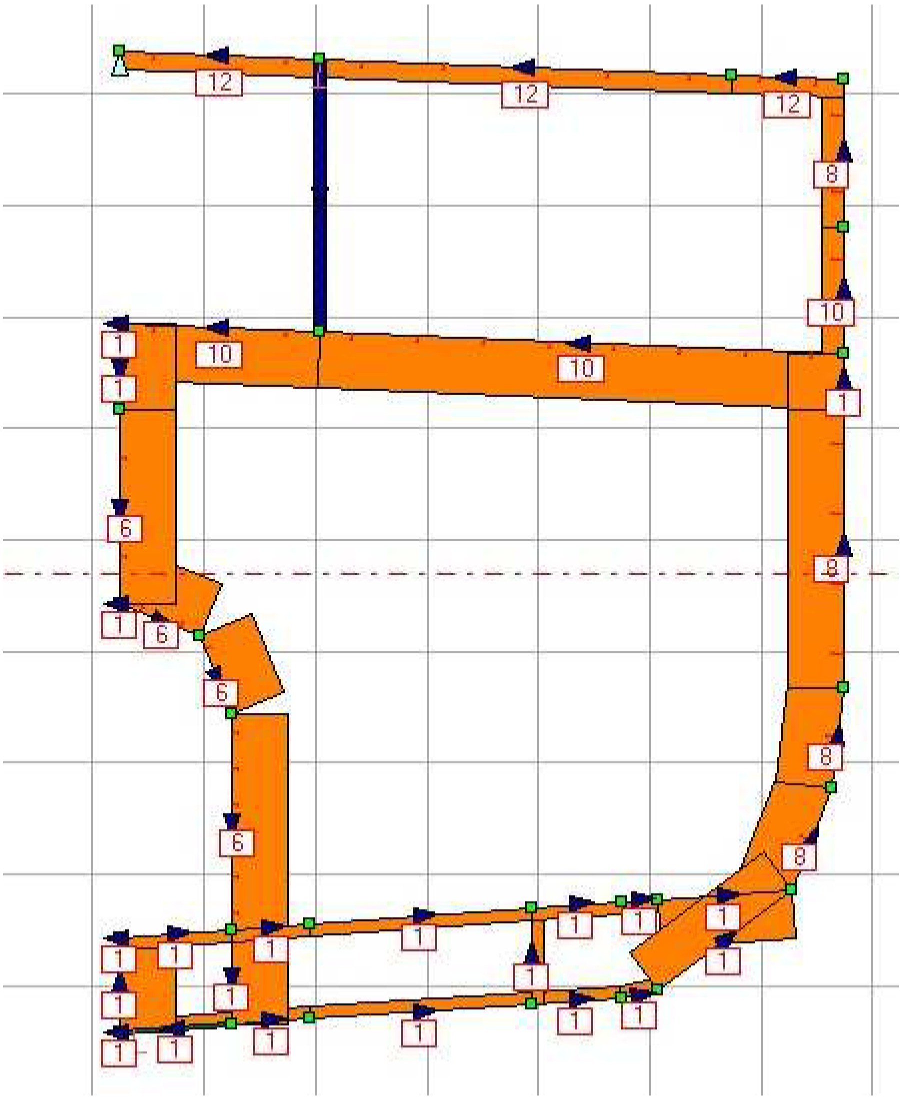


Figura 48.- Espesor final del ala de los elementos estructurales longitudinales [24].

El buque no tiene estructurales para optimizar en las vagras. Las vagras para el buque analizado son planchas que por ser el caso solo se optimizará el espesor y esto se lo presentó en la Figura 40.

La Figura 4953 muestra el espaciamiento óptimo entre los estructurales longitudinales.

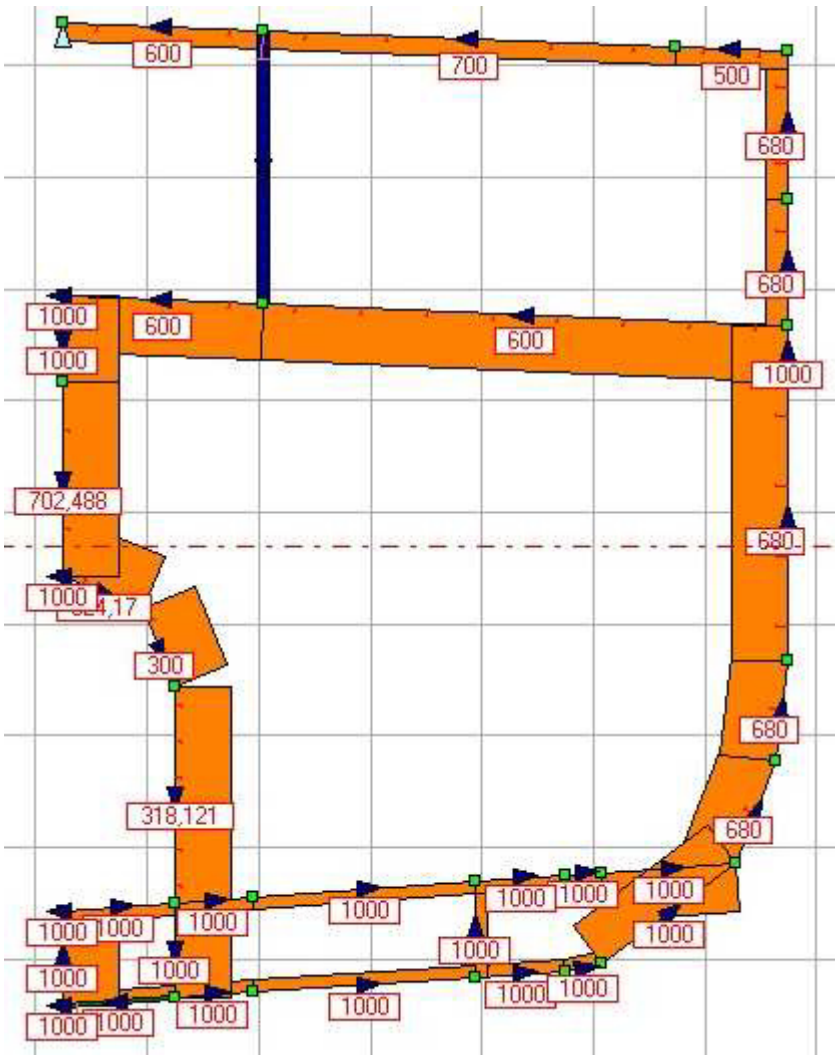


Figura 49.- Espaciamiento final de los elementos estructurales longitudinales [24].

3.1.2 OPTIMO COSTO

Para el óptimo costo se muestran los resultados en la siguiente secuencia: gráfica de la función objetivo, gráfica de la variación del centro de gravedad y el escantillonado final para óptimo costo.

GRÁFICA DE LA FUNCION OBJETIVO

En la Figura 50, se muestra la gráfica de la función objetivo. Aquí se podrá observar que dentro de las iteraciones, comienza con 99615 USD y termina con 92948 USD. El resultado de esta optimización; en porcentaje, es de 6,69% en costos.

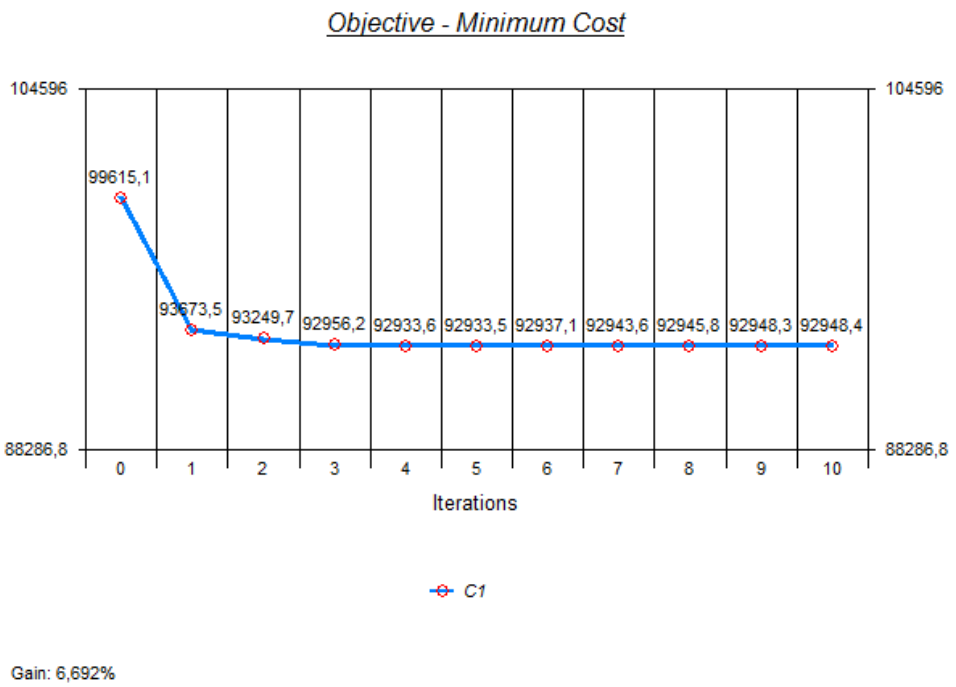


Figura 50.- Función objetivo del costo optimizado [24].

GRÁFICA DE LA VARIACION DEL CENTRO DE GRAVEDAD

En la Figura 51 se muestra la variación del centro de gravedad. Se puede notar que empieza con la primera iteración en 5,583 m. Y la última iteración es de 5,584 m.

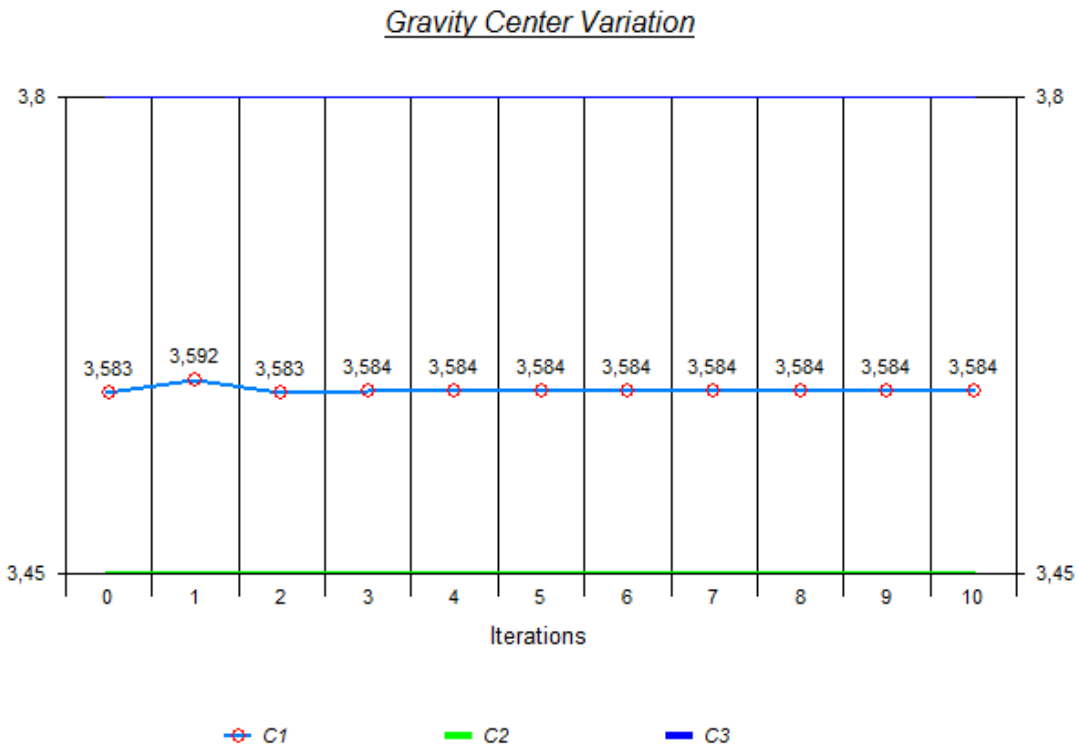


Figura 51.- Variación del centro de gravedad una vez optimizado el costo [24].

ESCANTILLONADO FINAL

No necesariamente el escantillonado final para la optimización de peso resultará igual para la optimización de costo. Esto puede variar, esto no es una

restricción necesaria. De hecho, en nuestro buque tipo, el escantillonado varía en muy pocos paneles.

Después de que se obtuvo los resultados de la optimización de costo se puede observar un ligero cambio entre el escantillonado de peso respecto al escantillonado de costo. En la Tabla VII se presenta este cambio en el escantillonado final.

	PESO	COSTO	PESO	COSTO
PANEL	ESPESOR FINAL DE PLANCHA **LBR-5** (mm)	ESPESOR FINAL DE PLANCHA **LBR-5** (mm)	ESPACIAMIENTO FINAL DEL REFUERZO LONGITUDINAL **LBR-5** (mm)	ESPACIAMIENTO FINAL DEL REFUERZO LONGITUDINAL **LBR-5** (mm)
15	7,58	9,87	323,404	600
16	6,83	9,12	300	557,909
17	6,83	9,12	318,074	587,419
35	7,58	9,87	701,734	900

Tabla VII.- Comparación del escantillonado final del peso/costo.

Para los demás paneles; esto es: plancha y refuerzos longitudinales y/o transversales, resultará el mismo escantillonado en peso y en costo.

3.2 VALIDACIÓN DE RESULTADOS

En esta validación de los resultados se utiliza las normas B.V. para determinar; si el escantillonado final tanto para óptimo peso como para óptimo costo, cumple con esta norma.

Los valores de estos espesores se muestra en la tabla C1 y tabla C2 del apéndice C.

A continuación se presenta las formulas empleadas para los paneles.

- Para el sector de la quilla:

$$e = 3{,}8 + 0{,}04\ L\sqrt{K} + 4{,}5\ S \quad (5)$$

Panel: 1

- Para el sector del fondo:

$$e = 2{,}8 + 0{,}032\ L\sqrt{K} + 4{,}5\ S \quad (6)$$

Panel: 2 – 3 – 4 – 31 – 32

- Para el sector del costado pero debajo de la línea de flotación:

$$e = 2{,}1 + 0{,}031\ L\sqrt{K} + 4{,}5\ S \quad (7)$$

Panel: 5 – 6 – 7 – 36

- Para el sector del costado pero arriba de la línea de flotación:

$$e = 2{,}1 + 0{,}013\ L\sqrt{K} + 4{,}5\ S \quad (8)$$

Panel: 8 – 9

- Para el sector de la cubierta principal y la cubierta del parque de pesca:

$$e = 1{,}6 + 0{,}032\ L\sqrt{K} + 4{,}5\ S \quad (9)$$

Panel: 10 – 11 – 12 – 13 – 14

- Para mamparos longitudinales:

$$e = 1{,}7 + 0{,}013\ L\sqrt{K} + 4{,}5\ S \quad (10)$$

Panel: 15 – 16 – 17 – 18 – 35

- Para el sector del doble fondo:

$$e = 1{,}9 + 0{,}024\ L\sqrt{K} + 4{,}5\ S \quad (11)$$

Panel: 19 – 20 – 21 – 22 – 23 – 29 – 30 – 33 – 34

Donde:

L = es la eslora entre perpendiculares.

K = es una constante de proporcionalidad.

S = es la separación final entre los refuerzos (nos muestra el software).

Estas fórmulas corresponden a los espesores mínimos dictados por la norma. En el apéndice C, se encontrará los valores de los espesores finales de las planchas de los paneles calculada por el software LBR-5 y los valores de los espesores mínimos de la norma B.V.

La Tabla VIII, es una tabla de recapitulación de los resultados. En esta tabla se resume los valores en porcentaje de las pérdidas o ganancias; en porcentaje, en cuanto a peso, costo y KG (centro de gravedad).

	% PESO	% COSTO	% KG (Centro de Gravedad)
ÓPTIMO PESO	9,007	6,34	-0,054
ÓPTIMO COSTO	10,29	6,692	0,028

Tabla VIII.- Tabla de Recapitulación de resultados.

Algo más de la Tabla VIII, se presenta valores con signos positivos y valores con signos negativos en esta tabla.

Los signos tienen su significado. En óptimo costo; tiene el porcentaje de peso, el porcentaje de costo y la variación del centro de gravedad, con signo positivo. Lo que quiere decir que si se optimiza costo; se ahorra peso, se disminuye costos y el centro de gravedad sube. En óptimo peso; se tiene el porcentaje de peso y el porcentaje costo, con signo positivo, mientras que la variación del centro de gravedad es de signo negativo. Lo que quiere decir que si se optimiza peso; se disminuye peso y ahorra costos, pero el centro de gravedad baja, con la ventaja de que no es considerablemente.

Por otra parte, en base a las investigaciones de optimización realizada; por algunos científicos utilizando el software LBR-5, a estos valores mostrados en la Tabla VIII, se tendría que hacer unos ajustes.

Primero se trata del escantillonado final, los estructurales finales T se tiene que encontrar la inercia. Luego, encontrar un nuevo perfil ángulo o platina con una inercia equivalente.

Por último, el espesor de la plancha. Este espesor muchas veces no existe en el mercado y se tiene que redondear al espesor superior próximo.

Con estos dos ajustes, en base a la experiencia de algunos científicos; como lo mencionamos en el párrafo anterior, se pierde alrededor de 3%. De todas formas siguen siendo interesante los valores de optimización.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONTRIBUCION PRINCIPAL

En esta investigación; dentro de las conclusiones a la contribución principal, puedo resumir que el desarrollo del mismo ha tenido varios éxitos.

1. Comenzando por el aprendizaje del software; software que fue utilizado con la autorización de la universidad de Lieja. Muchos investigadores utilizaron el software para la optimización de yates, cruceros, tanqueros, compuertas para esclusas, etc. Comencé aprendiendo como se dibuja los nodos y paneles dentro del software. Asigné las cargas que fueron de varios tipos: debido a la presión hidrostática, por la presión que existe sobre la cubierta principal y cubierta del parque de pesca, por el tipo de ola (tipo A y tipo B), por la carga en las cuba y debido a la presión en el tanque de combustible. Después de un estudio y asignación detallada de las cargas, se procedió a la asignación de las restricciones. Esto es fundamental a la hora de optimizar. Una omisión o una incorrecta asignación de las restricciones, llevaría a que los resultados no sean los reales.
2. Se desconoce si se utilizó el software para la optimización de un buque atunero, en todo caso queda demostrado; por esta investigación, que el software es también de mucha utilidad para este tipo de buques.

3. Se trabajó con inercias equivalentes de los perfiles, tenía que llegar a que todos los perfiles; por su inercia equivalente, se conviertan en perfiles T.
4. Se Calculó y graficó las curvas de fuerza cortante y momento flexionante para toda la embarcación.
5. Se adquirió más experiencia en la utilización de normas de sociedades clasificadoras, específicamente en la norma B.V. Esta norma; como se lo mencionó anteriormente, se utilizó para la construcción del navío, y se lo utilizó en varias etapas de la investigación. Primero para determinar el mínimo espesor de corrosión en planchas y perfiles, según donde estén ubicados cada elemento del panel. Después se utilizó para calcular la presión de la ola y según el tipo de ola. Seguido de esto, se utilizó para determinar si los espesores finales del escantillonado optimizado cumplen con esta norma.
6. Después de correr el software; tanto para óptimo peso como para óptimo costo, se concluye principalmente dos aspectos:

a) En el momento de la construcción se podría utilizar menos peso de acero y se podría reducir los costos de construcción utilizando menos horas-hombre, menos energía, etc.
b) El nuevo escantillonado cumple con las normas B. V.

7. En cuanto a la decisión, de que se optimizaría, peso o costo. En base a la Tabla VIII, concluyo que la mejor decisión es el escantillonado de

costo porque la variación del porcentaje de peso (Δ% peso) en optimo peso con optimo costo es 1,28% (a favor de optimo costo), la variación del % costo (Δ% costo) en optimo peso con optimo costo es 0,35% (a favor de optimo costo) y por ultimo, con respecto a la variación del centro de gravedad (Δ% KG), en ambos casos lo podemos llamar despreciables. Entonces, resumiendo esta conclusión, con el optimo costo estamos optimizando un 10,29% de peso, un 6,69% de costo y el centro de gravedad sube en un 0,028% que se puede decir que es despreciable.

8. Nos familiarizamos con algunos conceptos como óptimo de Pareto. La referencia [8] nos da a entender mejor los conceptos aplicados a la optimización.

TRABAJO FUTURO

Son varios los trabajos futuros que se pueden desarrollar a continuación de esta investigación. Toda investigación en general, no se desarrolla en un solo trabajo, pues se trata de trasmitir el conocimiento, facilitar los resultados a los que deseen seguir ampliando y afinando una determinada investigación.

En la optimización multi-objetivo, en un problema de optimización se tratará de encontrar una solución que represente el valor óptimo para una función objetivo.

En el caso más sencillo se tendrá un único objetivo, que estará representado por una función del tipo f: M $\rightarrow$ N, donde M $\subset$ R y N $\subset$ R. Tanto el dominio como la imagen de la función serán números reales (escalares), y el valor óptimo corresponderá a un mínimo o a un máximo.

1. El diagrama de Pareto, desarrollarlo y mostrarlo es una gran oportunidad para que se amplíe las recomendaciones de esta investigación para las grandes construcciones futuras en nuestro país. En esta investigación; como se había mencionado anteriormente, se tomó el 100% del peso con 0% del costo y 100% del costo con 0% del peso. Con esto se obtuvo dos de los puntos para el diagrama de Pareto. El diagrama de Pareto consiste en la obtención de varios puntos para formar la gráfica. Se puede tomar en una futura investigación el 90% del peso con 10% costo, después el 80% del peso con 20% costo, etc. de esta manera ir combinando las posibilidades con el objetivo de ir obteniendo los puntos para la gráfica del diagrama de Pareto y con esto encontrar el óptimo apropiado.
2. Se optimizó el costo en esta investigación, esto hace que nuestro buque tenga más capacidad de carga o simplemente cale menos con el ahorro del peso del casco y superestructura. Al reducir el calado se tiene menos área de superficie mojada. Por lo tanto, se requiere menos potencia y a menor potencia menor consumo de combustible. La interrogante es: ¿Se puede cuantificar la cantidad de combustible

ahorrado sea en Galones/año o USD/año? ¿Cuánto gana el medio ambiente? Aquí otro trabajo para el futuro, para ampliar esta investigación.

3. En cuanto al mantenimiento, ¿Se puede cuantificar? ¿Se puede determinar la relación ahorro en USD/año? Aquí se encuentra otro tema que se puede afinar la investigación utilizando este mismo modelo, este es un tema específico o puntual en la que se puede ampliar el estudio.
4. Por otra parte, el LBR-5 solo modela con perfiles T. Si se tiene un perfil T y se lo compara con cualquier perfil platina o ángulo con una inercia equivalente, seguro que el área de la sección transversal del perfil T es menor que el área de la sección transversal de un perfil platina o ángulo. Lo que quiere decir que tan solo la utilización de perfiles T, produce un ahorro de peso. Pero, si se utiliza los perfiles T ¿Qué sucede con los costos? Los perfiles T básicamente se fabrican en nuestro país, el fabricarlo tiene un costo. Entonces, nace una interrogante ¿El ahorro del peso de acero, compensa con el costo de fabricación de este perfil? ¿Cuánto se ahorra o cuánto se pierde? Si a esto se le agrega que en esta investigación, se transforma los perfiles, platinas y ángulos a perfiles T para poder modelar en el software y luego de correr el programa lo que dio como resultado una optimización con nuevas dimensiones de perfiles T, pero no se realizó el proceso inverso en llevar estas nuevas dimensiones a un perfil ángulo o platina con una

inercia equivalente. Sería un buen trabajo futuro seguir con la investigación para analizar cuanto se pierde en peso si se lleva nuevamente a perfiles ángulos o platinas y además de responder las interrogantes anteriores.

5. ¿Qué tan confiable es el LBR-5? Es tan confiable que en Europa se utilizó para optimizar grandes barcos importantes como un buque de pasajero, un mega-yate, un tanquero de LNG, entre otros. Otro trabajo para ampliar esta investigación, consiste en verificar la autenticidad de los resultados en esta investigación del buque atunero utilizando otras herramientas de cálculo de optimización, o en cuanto varía.
6. Se demostró que los nuevos espesores de las planchas, cumplen con los espesores mínimos de la norma de la sociedad clasificadora Bureau Veritas. ¿Qué sucede con los estructurales que forman los diferentes paneles? ¿Cumplen también esta norma? Si a esto se le añade la interrogante de ¿Qué sucede si el nuevo escantillonado, junto con todo el barco se lo analizacon un software de elementos finitos? ¿La estructura del buque soportarían los esfuerzos a que va a estar sometido durante la navegación y la faena de pesca? Aquí se tiene entonces otro proyecto investigativo.

APÉNDICE A

En este anexo se presenta una serie de tablas, en estas tablas se encuentra el valor de las diferentes cargas en metros de H2O, para cada panel.

Panel	In node Pressure [mts H2O]	Out node Pressure [mts H2O]
10	0,5	0,5
11	0,5	0,5
12	0,5	0,5
13	0,6	0,6
14	0,6	0,6

Tabla A1.- Presión sobre la cubierta

En la Figura 23 se presentó la gráfica de las cargas en los paneles de la cubierta. En la Tabla A1, se presenta los valores de las cargas en cada uno de estos paneles.

En la Figura 24, se presenta la gráfica de la presión de ola tipo A. En la Tabla A2, se presentan los valores de la presión de la carga debido a este tipo de ola.

Panel	In node Pressure [mts H_2O]	Out node Pressure [mts H_2O]
1	0,692239	0,687523
2	0,692239	0,695559
3	0,70522	0,709014
4	0,709014	0,713088
5	1,558534	1,708871
6	1,708871	1,867773
7	1,867773	2,387492
8	2,512112	1,357569
9	1,357569	0
21	0,687523	0,692239
22	0,692239	0,695559
29	0,713088	0,779267
30	0,695559	0,70522
31	0,695559	0,70522
32	0,713088	0,779267
33	0,709014	0,713088
34	0,70522	0,709014
36	2,387492	2,512112

Tabla A2.- Presión por las ola tipo “A”

En la Figura 25, se observa la gráfica de las cargas debido a la presión generada por la ola tipo B. En la Tabla A3, se presenta los valores de estas cargas.

Panel	In node Pressure [mts H_2O]	Out node Pressure [mts H_2O]
1	0,346122	0,343762
2	0,346122	0,347779
3	0,352608	0,354504
4	0,354504	0,356544
5	0,779267	0,85443
6	0,85443	0,933887
7	0,933887	1,193751
8	1,256056	1,357569
9	1,357569	0
21	0,343762	0,346122
22	0,346122	0,347779
29	0,356544	0,389634
30	0,347779	0,352608
31	0,347779	0,352608
32	0,356544	0,389634
33	0,354504	0,356544
34	0,352608	0,354504
36	1,193751	1,256056

Tabla A3.- Presión por la ola tipo “B”

En la Tabla A4, se presenta los valores de las cargas, en metros de agua, de cada panel donde actúa la presión hidrostática. En la Figura 26, se muestra la gráfica de las cargas de la presión hidrostática.

Panel	In node Pressure [mts H2O]	Out node Pressure [mts H2O]
1	3,0154	3,05
2	3,0154	2,9912
3	2,9219	2,89425
4	2,89425	2,86525
5	4,8321	3,9
6	3,9	3
7	3	0,515
21	3,05	3,0154
22	3,0154	2,9912
29	2,86525	2,41605
30	2,9912	2,9219
31	2,9912	2,9219
32	2,86525	2,41605
33	2,89425	2,86525
34	2,9219	2,89425
36	0,515	0

Tabla A4.- Presión hidrostática

En la Tabla A5, se muestran los valores de las cargas que se generan en los paneles de las cubas. Estas presiones son debido a la captura y se asumió con las cubas llenas a su máxima capacidad permisible. En la Figura 27, se muestran la gráfica generada por el software.

Panel	In node Pressure [mts H_2O]	Out node Pressure [mts H_2O]
2	1,63303	1,61609
3	1,56758	1,548225
4	1,548225	1,54
5	3,02197	2,3695
6	2,3695	1,7395
7	1,7395	0
16	1,2145	1,41953
17	1,41953	1,9145
18	1,9145	3,26606
22	1,63303	1,61609
29	1,54	1,510985
30	1,61609	1,56758
31	1,61609	1,56758
32	1,54	1,510985
33	1,548225	1,54
34	1,56758	1,548225
35	0	1,2145

Tabla A5.- Presión por la carga en las cubas

Para los tanques de combustible se considera el efecto de superficie libre, por esta razón se asumió los tanques llenos en un 90% de su capacidad. En la Tabla A6, presentamos los valores de las cargas en los paneles que forman los tanques de combustible. En la Figura 28, se muestra la gráfica desarrollado por el software debido a estas cargas.

Panel	In node Pressure [mts H2O]	Out node Pressure [mts H2O]
1	0,37175	0,40635
2	0,37175	0,34755
3	0,27825	0,2506
4	0,2506	0,2216
21	0,40635	0,37175
22	0,37175	0,34755
29	0,2216	0
30	0,34755	0,27825
31	0,34755	0,27825
32	0,2216	0
33	0,2506	0,2216
34	0,27825	0,2506

Tabla A6.- Presión por la carga de combustible

En la Tabla A7, se muestran los valores de las cargas en cada panel del modelo, considerando la carga total, pero con la ola tipo A. En la Figura 29, se mostró la gráfica de las cargas totales.

En la Tabla A8, se muestran los valores de la carga total debido al tipo de ola B. En la Figura 30, se mostró las cargas totales debido a este tipo de ola.

Por último, en el ítem 2.4 Figura 31; al describir cada una de las cargas, se explicó que el software genera una condición adicional (Presiones locales máxima sin momento). Entonces, en la Tabla A9 se muestra estas cargas totales generada por el software.

Panel	In node Pressure [mts H_2O]	Out node Pressure [mts H_2O]
1	3,3359	3,3312
2	1,7029	1,7231
3	1,7813	1,8044
4	1,8044	1,8167
5	3,3687	3,2394
6	3,2394	3,1283
7	3,1283	2,9025
8	2,5121	1,3576
9	1,3576	0
10	0,5	0,5
11	0,5	0,5
12	0,5	0,5
13	0,6	0,6
14	0,6	0,6
16	1,2145	1,4195
17	1,4195	1,9145
18	1,9145	3,2661
21	3,3312	3,3359
22	1,7029	1,7231
29	1,8167	1,6843
30	1,7231	1,7813
31	1,7231	1,7813
32	1,8167	1,6843
33	1,8044	1,8167
34	1,7813	1,8044
35	0	1,2145
36	2,9025	2,5121

Tabla A7.- Presión total considerando la ola “A”

Panel	In node Pressure [mts H2O]	Out node Pressure [mts H2O]
1	2,9898	2,9874
2	1,3567	1,3753
3	1,4287	1,4499
4	1,4499	1,4602
5	2,5894	2,3849
6	2,3849	2,1944
7	2,1944	1,7088
8	1,2561	1,3576
9	1,3576	0
10	0,5	0,5
11	0,5	0,5
12	0,5	0,5
13	0,6	0,6
14	0,6	0,6
16	1,2145	1,4195
17	1,4195	1,9145
18	1,9145	3,2661
21	2,9874	2,9898
22	1,3567	1,3753
29	1,4602	1,2947
30	1,3753	1,4287
31	1,3753	1,4287
32	1,4602	1,2947
33	1,4499	1,4602
34	1,4287	1,4499
35	0	1,2145
36	1,7088	1,2561

Tabla A8.- Presión total considerando la ola “B”

Panel	In node Pressure [mts H2O]	Out node Pressure [mts H2O]
1	3,7076	3,7375
2	3,7076	3,6868
3	3,6271	3,6033
4	3,6033	3,5783
5	4,1004	2,3849
6	2,3849	2,1944
7	2,1944	1,7088
8	1,2561	1,3576
9	1,3576	0
10	0,5	0,5
11	0,5	0,5
12	0,5	0,5
13	0,6	0,6
14	0,6	0,6
16	1,2145	1,4195
17	1,4195	1,9145
18	1,9145	3,2661
21	1,8688	1,8538
22	1,8538	1,8434
29	1,7892	1,5977
30	1,8434	1,8136
31	3,6868	3,6271
32	3,5783	3,1953
33	1,8016	1,7892
34	1,8136	1,8016
35	0	1,2145
36	1,7088	1,2561

Tabla A9.- Presión total generado por el programa

APENDICE B

En las siguientes tablas de este apéndice, se presentan los tres diferentes espesores iniciales (Net thickness, Corrosion thickness y Gross thickness) de las planchas y de los elementos estructurales transversales y longitudinales. En este apéndice existen tres tablas y cuando se mencionan los espesores iniciales, se refiere a los espesores especificados en los planos.

La Tabla B1 muestra los espesores iniciales de las planchas en cada panel, la Tabla B2 muestra los espesores iniciales de los elementos estructurales transversales y por último la Tabla B3 muestra los espesores iniciales de los elementos estructurales longitudinales.

En la Tabla B4 se presenta los espesores iniciales y finales de las planchas en cada panel, seguido de esto se presenta los espaciamientos iniciales y finales de los refuerzos longitudinales en cada panel, luego de manera general se calcula el peso inicial y final aproximado de la plancha en cada panel utilizando: longitud del bloque, ancho del panel, espesor (inicial y final) de la plancha en cada panel, multiplicado por el peso especifico del acero.

Luego, se sumó el peso inicial aproximado de plancha en todos los paneles y el peso final aproximado de plancha en todos los paneles.

El peso total inicial de las planchas de los paneles es 31835 Kg y el peso total final de las planchas de los paneles es 29964 Kg. Esta diferencia es de 1871 Kg.

PANEL	NET THICKNESS (mm)	CORROSION THICKNESS (mm)	GROSS THICKNESS (mm)
1	11,75	1,25	13,00
2	9,75	1,25	11,00
3	9,75	1,25	11,00
4	9,75	1,25	11,00
5	8,75	2,25	11,00
6	8,25	2,25	10,50
7	7,25	2,25	9,50
8	8,00	1,50	9,50
9	8,50	1,50	10,00
10	7,50	1,50	9,00
11	7,50	1,50	9,00
12	7,50	1,50	9,00
13	6,25	2,75	9,00
14	6,25	2,75	9,00
15	2,50	3,50	6,00
16	3,25	2,75	6,00
17	3,25	2,75	6,00
18	3,25	2,75	6,00
19	6,50	1,00	7,50
20	6,50	1,00	7,50
21	7,25	1,75	9,00
22	7,25	2,50	9,75
23	7,00	1,00	8,00
24	7,00	0,00	7,00
29	7,25	2,50	9,75
30	7,25	2,50	9,75
31	9,75	1,25	11,00
32	9,75	1,25	11,00
33	7,25	2,50	9,75
34	7,25	2,50	9,75
35	2,50	3,50	6,00
36	7,25	2,25	9,50

Tabla B1.- Espesores iniciales de las planchas en cada panel.

	ELEMENTO TRANSVERSAL - ALMA			ELEMENTO TRANSVERSAL - ALA		
PANEL	NET THICKNESS (mm)	CORROSION THICKNESS (mm)	GROSS THICKNESS (mm)	NET THICKNESS (mm)	CORROSION THICKNESS (mm)	GROSS THICKNESS (mm)
1	4,50	1,50	6,00	10,50	1,50	12,00
2	4,50	1,50	6,00	10,50	1,50	12,00
3	4,50	1,50	6,00	10,50	1,50	12,00
4	4,50	1,50	6,00	10,50	1,50	12,00
5	12,50	3,50	16,00	24,50	3,50	28,00
6	12,50	3,50	16,00	24,50	3,50	28,00
7	12,50	3,50	16,00	24,50	3,50	28,00
8	6,00	2,00	8,00	12,00	2,00	14,00
9	6,00	2,00	8,00	12,00	2,00	14,00
10	6,00	2,00	8,00	12,00	2,00	14,00
11	6,00	2,00	8,00	12,00	2,00	14,00
12	6,00	2,00	8,00	12,00	2,00	14,00
13	12,50	3,50	16,00	24,50	3,50	28,00
14	12,50	3,50	16,00	24,50	3,50	28,00
15	12,50	3,50	16,00	24,50	3,50	28,00
16	12,50	3,50	16,00	24,50	3,50	28,00
17	12,50	3,50	16,00	24,50	3,50	28,00
18	12,50	3,50	16,00	24,50	3,50	28,00
19	12,50	3,50	16,00	24,50	3,50	28,00
20	12,50	3,50	16,00	24,50	3,50	28,00
21	4,50	1,50	6,00	4,50	1,50	6,00
22	4,50	1,50	6,00	4,50	1,50	6,00
23	4,50	1,50	6,00	4,50	1,50	6,00
29	6,50	1,00	7,50	9,00	1,00	10,00
30	4,50	1,50	6,00	4,50	1,50	6,00
31	4,50	1,50	6,00	10,50	1,50	12,00
32	6,50	1,00	7,50	9,00	1,00	10,00
33	4,50	1,50	6,00	4,50	1,50	6,00
34	4,50	1,50	6,00	4,50	1,50	6,00
35	12,50	3,50	16,00	24,50	3,50	28,00
36	12,50	3,50	16,00	24,50	3,50	28,00

Tabla B2.- Espesores iniciales de los elementos estructurales transversales en cada panel.

	ELEMENTO LONGITUDINAL - ALMA			ELEMENTO LONGITUDINAL - ALA		
PANEL	NET THICKNESS (mm)	CORROSION THICKNESS (mm)	GROSS THICKNESS (mm)	NET THICKNESS (mm)	CORROSION THICKNESS (mm)	GROSS THICKNESS (mm)
5	2,50	3,50	6,00	4,50	3,50	8,00
6	2,50	3,50	6,00	4,50	3,50	8,00
7	2,50	3,50	6,00	4,50	3,50	8,00
8	4,00	2,00	6,00	8,00	2,00	10,00
9	4,00	2,00	6,00	6,00	2,00	8,00
10	6,00	2,00	8,00	10,00	2,00	12,00
11	6,00	2,00	8,00	10,00	2,00	12,00
12	6,00	2,00	8,00	10,00	2,00	12,00
13	2,50	3,50	6,00	6,50	3,50	10,00
14	2,50	3,50	6,00	6,50	3,50	10,00
15	2,50	3,50	6,00	2,50	3,50	6,00
16	2,50	3,50	6,00	2,50	3,50	6,00
17	2,50	3,50	6,00	2,50	3,50	6,00
18	2,50	3,50	6,00	2,50	3,50	6,00
35	2,50	3,50	6,00	2,50	3,50	6,00
36	2,50	3,50	6,00	4,50	3,50	8,00

Tabla B3.- Espesores iniciales de los elementos estructurales longitudinales en cada panel.

PANEL	ESPESOR INICIAL DE LA PLANCHA (mm)	ESPESOR FINAL DE LA PLANCHA (mm)	ESPACIAMIENTO INICIAL ENTRE REFUERZOS LONGITUDINALES (mm)	ESPACIAMIENTO FINAL ENTRE REFUERZOS LONGITUDINALES (mm)	LONGITUD DEL BLOQUE (mm)	10800,00	
					LONGITUD DEL PANEL (mm)	PESO INICIAL DE LA PLANCHA (Kg)	PESO FINAL DE LA PLANCHA (Kg)
1	13,00	11,00	0,00	0,00	1002,40	1104,79	934,82
2	11,00	9,00	0,00	0,00	700,00	652,81	534,11
3	11,00	9,00	0,00	0,00	801,90	747,84	611,87
4	11,00	9,00	0,00	0,00	343,80	320,62	262,33
5	11,00	10,00	600,00	680,00	996,50	929,32	844,83
6	10,50	9,50	600,00	680,00	906,90	807,31	730,43
7	9,50	9,50	600,00	680,00	2485,00	2001,44	2001,44
8	9,50	8,75	613,00	680,00	1126,00	906,89	835,29
9	10,00	8,75	612,00	680,00	1324,00	1122,49	982,18
10	9,00	7,50	500,00	500,00	1010,20	770,80	642,34
11	9,00	8,50	616,67	700,00	3698,60	2822,11	2665,32
12	9,00	8,50	600,00	600,00	1796,40	1370,69	1294,54
13	9,00	9,00	587,50	600,00	4708,80	3592,91	3592,91
14	9,00	9,00	600,00	600,00	1796,40	1370,69	1370,69
15	6,00	7,58	0,00	0,00	774,70	394,07	497,85
16	6,00	6,83	600,00	324,17	765,40	389,34	443,20
17	6,00	6,83	600,00	300,00	765,40	389,34	443,20
18	6,00	6,83	500,00	318,12	1930,80	982,16	1118,02
19	7,50	7,00	0,00	0,00	850,00	540,47	504,44
20	7,50	7,00	0,00	0,00	850,00	540,47	504,44
21	9,00	8,00	0,00	0,00	1002,40	764,85	679,87
22	9,75	8,75	0,00	0,00	700,00	578,62	519,28
23	8,00	7,25	0,00	0,00	850,00	576,50	522,46
29	9,75	8,75	0,00	0,00	1200,00	991,93	890,19
30	9,75	8,75	0,00	0,00	2006,50	1658,58	1488,47
31	11,00	9,00	0,00	0,00	2006,50	1871,22	1531,00
32	11,00	9,00	0,00	0,00	1496,80	1395,89	1142,09
33	9,75	8,75	0,00	0,00	339,70	280,80	252,00
34	9,75	8,75	0,00	0,00	801,90	662,85	594,87
35	6,00	7,58	600,00	702,49	1735,00	882,56	1114,97
36	9,50	9,50	0,00	0,00	515,00	414,79	414,79
						PESO TOTAL (Kg) 31835,15	PESO TOTAL (Kg) 29964,23

Tabla B4.- Tabla comparativa de los espesores iniciales y finales de la plancha en los paneles

APENDICE C

En este apéndice C, se muestran dos tablas explicativas. La Tabla C1, es una tabla comparativa entre los espesores que el software LBR-5 genera y los espesores que dictan las normas. Estas comparaciones en esta tabla son en cuanto al nuevo escantillonado del optimo peso. La Tabla C2, es una tabla comparativa entre los espesores que el software LBR-5 genera y los espesores que dictan las normas. Esta tabla comparativa es en cuanto a los costos.

En estas dos tablas comparativas se utiliza unas constantes $c_1, c_2\ y\ c_3$. Estas constantes es para que se simplifiquen las formulas que se describió en el ítem 3.2.

La constante c_1 toma algunos valores dependiendo del panel donde nos encontremos.

c_1 = 3,8 para el panel: 1.

c_1 = 2,8 para los paneles: 2, 3, 4, 31 y 32.

c_1 = 2,1 para los paneles: 5, 6, 7, 8, 9 y 36.

c_1 = 1,6 para los paneles: 10, 11, 12, 13 y 14.

c_1 = 1,7 para los paneles: 15, 16, 17, 18 y 35.

c_1 = 1,9 para los paneles: 19, 20, 21, 22, 23, 29, 30, 33 y 34.

La constante c_2 toma algunos valores dependiendo del panel donde nos encontramos.

c_2 = 0,04 para el panel: 1.

c_2 = 0,032 para los paneles: 2, 3, 4, 10, 11, 12, 13, 14, 31 y 32.

c_2 = 0,031 para los paneles: 5, 6, 7 y 36.

c_2 = 0,013 para los paneles: 8, 9, 15, 16, 17, 18 y 35.

c_2 = 0,024 para los paneles: 19, 20, 21, 22, 23, 29, 30 y 34.

La constante c_3 toma el valor de 4,5 para todos los paneles.

Por último, S (espaciamiento final), es el espaciamiento final que genera el software.

PANEL	C_1	C_2	C_3	S FINAL (mm)	ESPESOR FINAL DE PLANCHA - NORMA (mm)	ESPESOR FINAL **LBR5** DE PLANCHA (mm)
1	3,8	0,04	4,5	600	9,04	9,25
2	2,8	0,032	4,5	600	7,54	7,75
3	2,8	0,032	4,5	600	7,54	7,75
4	2,8	0,032	4,5	600	7,54	7,75
5	2,1	0,031	4,5	680	7,13	7,5
6	2,1	0,031	4,5	680	7,13	7,25
7	2,1	0,031	4,5	680	7,13	7,25
8	2,1	0,013	4,5	680	5,99	7
9	2,1	0,013	4,5	680	5,99	7
10	1,6	0,032	4,5	500	5,89	6,5
11	1,6	0,032	4,5	700	6,79	7
12	1,6	0,032	4,5	600	6,34	6,5
13	1,6	0,032	4,5	344,06	5,18	5,5
14	1,6	0,032	4,5	342,39	5,18	5,5
15	1,7	0,013	4,5	-	2,53	4,08
16	1,7	0,013	4,5	322,96	3,98	4,08
17	1,7	0,013	4,5	300	3,88	4,08
18	1,7	0,013	4,5	319	3,96	4,08
19	1,9	0,024	4,5	-	3,43	6
20	1,9	0,024	4,5	-	3,43	6
21	1,9	0,024	4,5	600	6,13	6,25
22	1,9	0,024	4,5	600	6,13	6,25
23	1,9	0,024	4,5	600	6,13	6,25
29	1,9	0,024	4,5	600	6,13	6,25
30	1,9	0,024	4,5	600	6,13	6,25
31	2,8	0,032	4,5	600	7,54	7,75
32	2,8	0,032	4,5	600	7,54	7,75
33	1,9	0,024	4,5	600	6,13	6,25
34	1,9	0,024	4,5	600	6,13	6,25
35	1,7	0,013	4,5	699,75	2,84	6
36	2,1	0,031	4,5	-	4,08	7

Tabla C1.- Tabla comparativa del peso.

PANEL	C_1	C_2	C_3	S FINAL (mm)	ESPESOR FINAL DE PLANCHA - NORMA (mm)	ESPESOR FINAL **LBR5** DE PLANCHA (mm)
1	3,8	0,04	4,5	600	9,04	9,25
2	2,8	0,032	4,5	600	7,54	7,75
3	2,8	0,032	4,5	600	7,54	7,75
4	2,8	0,032	4,5	600	7,54	7,75
5	2,1	0,031	4,5	680	7,13	7,5
6	2,1	0,031	4,5	680	7,13	7,25
7	2,1	0,031	4,5	680	7,13	7,25
8	2,1	0,013	4,5	680	5,99	7
9	2,1	0,013	4,5	680	5,99	7
10	1,6	0,032	4,5	500	5,89	6,5
11	1,6	0,032	4,5	700	6,79	7
12	1,6	0,032	4,5	600	6,34	6,5
13	1,6	0,032	4,5	680	6,7	6,75
14	1,6	0,032	4,5	677,54	6,68	6,75
15	1,7	0,013	4,5	-	2,53	6,37
16	1,7	0,013	4,5	600	5,23	6,37
17	1,7	0,013	4,5	557,27	5,03	6,37
18	1,7	0,013	4,5	585,48	5,16	6,37
19	1,9	0,024	4,5	-	3,43	6
20	1,9	0,024	4,5	-	3,43	6
21	1,9	0,024	4,5	600	6,13	6,25
22	1,9	0,024	4,5	600	6,13	6,25
23	1,9	0,024	4,5	600	6,13	6,25
29	1,9	0,024	4,5	600	6,13	6,25
30	1,9	0,024	4,5	600	6,13	6,25
31	2,8	0,032	4,5	600	7,54	7,75
32	2,8	0,032	4,5	600	7,54	7,75
33	1,9	0,024	4,5	600	6,13	6,25
34	1,9	0,024	4,5	600	6,13	6,25
35	1,7	0,013	4,5	900	6,58	6,75
36	2,1	0,031	4,5	-	4,08	7

Tabla C2.- Tabla comparativa de costo.

APENDICE D

Este apéndice se lo toma de la referencia [25], y este explica sobre las tensiones o esfuerzos Von Mises.

La tensión de Von Mises es una magnitud física proporcional a la energía de distorsión. En ingeniería estructural se usa en el contexto de las teorías de fallo como indicador de un buen diseño para materiales dúctiles.

La tensión de Von Mises puede calcularse fácilmente a partir de las tensiones principales del tensor tensión en un punto de un sólido deformable, mediante la expresión:

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\frac{(\sigma_1-\sigma_2)^2+(\sigma_2-\sigma_3)^2+(\sigma_3-\sigma_1)^2}{2}} \qquad (34)$$

Siendo σ_1, σ_2, σ_3, las tensiones principales, y habiéndose obtenido la expresión a partir de la energía de distorsión en función de las tensiones principales:

$$E_{de\ f,dist} = \frac{1}{6G}\left[\frac{(\sigma_1-\sigma_2)^2+(\sigma_2-\sigma_3)^2+(\sigma_3+\sigma_1)^2}{2}\right] \qquad (35)$$

La tensión de Von Mises y el criterio de fallo elástico asociado debe su nombre a Richard Edler von Mises (1913) propuso que un material dúctil sufría fallo elástico cuando la energía de distorsión elástica rebasaba cierto valor. Sin embargo, el criterio fue claramente formulado con anterioridad por Maxwell en 1865[1] más tarde también Huber (1904), en un artículo en polaco anticipó hasta cierto punto la teoría de fallo de Von Mises.[2] Por todo esto a veces se llama a

la teoría de fallo elástico basada en la tensión de Von Mises como teoría de Maxwell-Huber-Hencky-von Mises y también teoría de fallo J_2.

Formulación matemática

La tensión de Von Mises es un escalar proporcional a la energía de deformación elástica de distorsión que puede expresarse en función de las componentes del tensor tensión, en particular admite una expresión particularmente simple en función de las tensiones principales, por lo que la tensión de Von Mises puede calcularse a partir de la expresión de la energía de deformación distorsiva.

Igualmente la superficie de fluencia de un material que falla de acuerdo con la teoría de fallo elástico de Von Mises puede escribirse como el lugar geométrico de los puntos donde la tensión de Von Mises, como función de las tensiones principales, supera cierto valor. Matemáticamente esta ecuación puede expresarse aún como el conjunto de puntos donde el invariante cuadrático de la parte desviadora del tensor tensión supera cierto valor.

Energía de deformación

La energía de deformación de un sólido deformable iguala al trabajo exterior de las fuerzas que provocan dicha deformación. Dicho trabajo puede descomponerse entre el trabajo invertido en cambiar la forma del cuerpo o energía de distorsión y el trabajo invertido en comprimir o dilatar el cuerpo manteniendo constantes las relaciones geométricas o energía elástica volumétrica:

$$E_{def} = E_{def,V} + E_{def,dist} \qquad (36)$$

Los dos términos vienen dados por:

$$E_{def,V} = \int_V \frac{3}{2}\left(\sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz}\right)^2 \frac{1-2\upsilon}{E} dV = + \int_V \frac{\left(\sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz}\right)^2}{2K} dV \qquad (37)$$

$$E_{def,dist} = E_{def} - E_{def,V} = \int_V \frac{1}{6G}\left[\sigma_{xx}{}^2 + \sigma_{yy}{}^2 + \sigma_{zz}{}^2 - \left(\sigma_{xx}\sigma_{yy} + \sigma_{yy}\sigma_{zz} + \sigma_{zz}\right)\right](+ + \sigma_{zz})^2 \frac{1-2\upsilon}{E} dV = + \int_V \frac{\left(\sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz}\right)^2}{2K} dV \qquad (38)$$

Frecuentemente, la energía de distorsión dada por la última expresión, se expresa en términos de una combinación especial de las otras componentes de tensión llamada tensión de Von Mises:

$$E_{def,dist} = \int_V \frac{\sigma_{VM}{}^2}{6G} dV \qquad (39)$$

Igualando los integrandos de (31) y (32) se obtiene que la tensión de Von Mises viene dada precisamente por:

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\sigma_{xx}{}^2 + \sigma_{yy}{}^2 + \sigma_{zz}{}^2 - \left(\sigma_{xx}\sigma_{yy} + \sigma_{yy}\sigma_{zz} + \sigma_{zz}\sigma_{xx}\right) + 3(\tau_{xy}{}^2 + \tau_{yz}{}^2 + \tau_{zx}{}^2)} \qquad (40)$$

Invariante cuadrático J_2

La energía de distorsión considera en la sección anterior puede ser calculada a partir de la parte desviadora del tensor tensión:

$$[S_{ij}] = [\sigma_{ij}] - \sigma_V[I] = \begin{bmatrix} \sigma_x - \sigma_V & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y - \sigma_V & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z - \sigma_V \end{bmatrix}$$

Con $\sigma_V = \frac{\sigma_x+\sigma_y+\sigma_z}{3}$ (41)

El segundo invariante cuadrático de este tensor denominado J_2, es proporcional a la tensión de Von Mises y resulta ser:

$$J_2 = \frac{1}{6}\left[\left(\sigma_x - \sigma_y\right)^2 + \left(\sigma_y - \sigma_z\right)^2 + (\sigma_x - \sigma_z)^2 + 6\left({\tau_{yz}}^2 + {\tau_{zx}}^2 + {\tau_{xy}}^2\right)\right] = \frac{{\sigma_M}^2}{3}$$

(42)

Por esta razón a veces la teoría de fallo de Von Mises se llama teoría de fallo $\boldsymbol{J_2}$.

Tensión de Von Mises y tensiones principales

Aunque la expresión (37) ofrece una fórmula práctica para calcular la tensión de Von Mises o equivalentemente la energía de deformación distorsiva. La expresión se simplifica mucho si usamos en cada punto las tres tensiones principales para el cálculo de la tensión de von Mises:

$$\sigma_{VM} = \sqrt{{\sigma_1}^2 + {\sigma_2}^2 + {\sigma_3}^2 - (\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1)} \quad (43)$$

Esta expresión se puede simplificar aún más:

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\frac{(\sigma_1-\sigma_2)^2 + (\sigma_2-\sigma_3)^2 + (\sigma_3-\sigma_1)^2}{2}} \quad (44)$$

Tensión de Von Mises en una viga

Usualmente en una viga sólo 3 de las 6 componentes del tensor tensión son diferentes de cero: la tensión normal a la sección transversal y dos componentes independientes asociadas a la tensión tangencial, en ese caso las tensiones principales resultan ser:

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_x + \sqrt{\sigma_x{}^2 + 4\left(\tau_{xy}{}^2 + \tau_{xz}{}^2\right)}}{2} \quad (45)$$

$$\sigma_2 = 0 \quad (44)$$

$$\sigma_3 = \frac{\sigma_x - \sqrt{\sigma_x{}^2 + 4\left(\tau_{xy}{}^2 + \tau_{xz}{}^2\right)}}{2} \quad (46)$$

De donde se sigue que:

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\sigma_x{}^2 + 3\left(\tau_{xy}{}^2 + \tau_{xz}{}^2\right)} = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} \quad (47)$$

Tensión de Von Mises en una placa

Usualmente en una viga sólo 3 de las 6 componentes del tensor tensión son diferentes de cero $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$, a partir de las cuales se pueden calcular las tensiones principales $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$:

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_x + \sigma_y + \sqrt{\left(\sigma_x - \sigma_y\right)^2 + 4\tau_{xy}{}^2}}{2} \quad (48)$$

$$\sigma_2 = 0 \quad (49)$$

$$\sigma_3 = \frac{\sigma_x + \sigma_y - \sqrt{\left(\sigma_x - \sigma_y\right)^2 + 4\tau_{xy}{}^2}}{2} \quad (50)$$

De donde se sigue que la tensión de Von Mises es:

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\sigma_x{}^2 - \sigma_x\sigma_y + \sigma_y{}^2 + 3\tau_{xy}{}^2} \quad (51)$$

Bibliografía

[1] D. N. d. l. E. Acuaticos, *Plano de Distribucion General,* DIRNEA (Anteriormente DIGMER), 1998.

[2] D. N. d. l. E. Acuaticos, *Plano de Lineas de Formas,* DIRNEA (Anteriormente DIGMER), 1998.

[3] M. d. A. S.A., *Cuaderna Maestra y Secciones Tipo. Aprobado por el Bureau Veritas.,* Madrid, 1973.

[4] P. Rigo, A module-oriented tool for optimum design of stiffened structures – Part 1 / University of Liege, Department of Naval Architecture (ANAST), Chemin des Chevreuils No. 1, B52/3 B-4000, Liege, Belgium, 2001.

[5] D. Motta y D. Boote, Dept. of Naval Architecture and Electrical Engineering, University of Genoa, Genoa, Italy; Caprace, Jean-David and Rigo, Philippe / ANAST, Department of Naval Architecture, University of Liege, Liege, Belgium / Optimization of Hull Structures for a 60 met, Honolulu, Huwaii, Septiembre 2011.

[6] D. Peri y E. F. Campana, Istituto Nazionale per Studi ed Esperienze di Architettura Navale (INSEAN, Italian Ship Model Basin), Rome, Italy / High-Fidelity Models and Multi-objective Global Optimization Algorithms in Simulation-Based Design / Journal of Ship Research, vol. 49, Septiembre 2005, pp. 159-175.

[7] B. Veritas, «Rules for the Classification of Steel Ships, parte B,» vol. 2.

[8] P. Rigo, An Integrated Software for Scantling Optimization and Least Production Cost / University of Liege.

[9] P. Rigo y E. Rizzuto, *Analysis and Design of Ship Structure / Chapter 18.*

[10] Y. Ha y S. Cho, *Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Seoul National University, Seoul, Korea; Kim, Woojong / MIDAS Information Technology Company LTD., Kyunggi-Do, Korea*

/ Design Sensitivity Analysis and Topology Optimization Method Applied to Stiffene, vol. 50, 2006, pp. 222-230.

[11] P. RIGO (M), Least Cost Structural Optimization Oriented Preliminary Design / THE SOCIETY OF NAVAL ARCHITECTS AND MARINE ENGINEERS / Paper presented at the 2001 Ship Production Symposium, Michigan, 2001, pp. 13-15.

[12] J.-D. Caprace, F. Bair y P. Rigo, ANAST – University of Liege, Chemin des chevreuils, 1, 4000 Liege, Belgium / Scantling multi-objective optimization of a LNG carrier / Marine Structures 23, 2010, pp. 288-302.

[13] D. Peri y E. F. Campana, Istituto Nazionale per Studi ed Esperienze di Architettura Navale (INSEAN) – The Italian Ship Model Basin, Rome, Italy / Multidisciplinary Design Optimization of a Naval Surface Combatant / Journal of Ship Research, vol. 47, Marzo 2003, pp. 1-12.

[14] P. Rigo, OPTIMIZATION OF STIFFENED STRUCTURES - LBR5 – / PART V: OPTIMIZATION OF A LOCK GATE / A Civil Engineering Application to Hydraulic Structure / Reference: Rigo Ph. (1999), Least Cost Optimum Design of Stiffened Hydraulic and Floating Structures P.I.A.N.C., 1999, pp. 33-45.

[15] H. Kyung Kim y H. Cheol Song, Optimum Structural Design of High-Speed Surface Effect Ships Built of Composite Materials / Marine Technology, vol. 40, Enero 2003, pp. 42-48.

[16] S. I. Seo, K. Son Ho y M. K. Park, Optimum Structural Design of Naval Vessels / Marine Technology, vol. 40, Julio 2003, pp. 149-157.

[17] S.-S. Na, *Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Mokpo National University, Korea; Karr, Dale G. / Department of Naval Architecture and Marine Engineering, University of Michigan / Product-Oriented Optimum Structural Design of Double-Hull Oil Tanke,* vol. 18, 2002, pp. 237-248.

[18] J.-D. Caprace, F. Bair y P. Rigo, *ANAST – University of Liege, Belgium / EARLY STRUCTURAL ASSESSMENT AND OPTIMISATION OF PASSENGER SHIPS..*

[19] P. Rigo, *Department of Naval Architecture (ANAST), University ok Liege, Chemin des Chevreuils No 1, B52/3, B-4000 Liege, Belgium / Fleury, Claude / Department of Aerospace (LTAS), University of Liege, Chemin des Chevreuils No 1, B52/3, B-4000 Liege, Belgium / Scan,* 2001, pp. 631-649.

[20] B. Veritas, «Rules for the Classification of Steel Ships,» de *tabla 2 de la Parte B*.

[21] «Wikipedia,» 08 Marzo 2013. [En línea]. Available: http://es.wikipedia.org/wiki/Eficiencia_de_Pareto#cite_note-Barr-1.

[22] «Wikipedia,» 08 Marzo 2013. [En línea]. Available: http://es.wikipedia.org/wiki/Optimizaci%C3%B3n_multiobjetivo.

[23] B. Veritas, «Rules for the Classification of Steel Ships,» de *tabla 2 de la Parte B*, vol. Volumen 2.

[24] LBR-5

[25] Toderan C, Pircalabu E, Caprace J, Rigo P. Integration of a bottom-up production cost model in LBR-5 optimization tool. COMPIT'07; 2007. p. 225– 33.