

ANÁLISIS ESTRUCTURAL DEL CASCO DE UNA LANCHA PATRULLERA DE COSTA, ANTE EL EVENTO DE SLAMMING MEDIANTE EL USO DEL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

Structural analysis of the hull of a coastal patrol boat in front of the slamming event through the use of the finite element method

Johnnie Javier Sibrián Mendoza¹
Dawin Jimenez²

Recibido: 08/07/2018

Aceptado: 09/12/2019

Resumen

En la presente investigación se realiza un análisis estructural por medio del método de elementos finitos es realizado a una embarcación tipo CPV (Coastal Patrol Vessel) que es sometida a una carga de slamming. Además de esto, se aplicó el diseño estructural siguiendo el Reglamento High Speed Craft de Germanischer Lloyd (GL), así mismo las cargas de slamming fueron ejecutadas de acuerdo a lo que contempla este reglamento a lo largo de la longitud de la embarcación. El modelamiento de la geometría fue hecho utilizando un software CAD, posteriormente mediante el uso de un paquete de simulación comercial de elementos finitos (ANSYS) se realizó el análisis respectivo, para ello se define previamente una condición de frontera apropiada, se obtiene las distribuciones de esfuerzos y deformaciones en toda la estructura. Finalmente se comparó estos resultados con los criterios de aceptación de la Casa Clasificadora GL.

Palabras clave: Slamming, método de elementos finitos, esfuerzos, deformaciones,

criterio de aceptación, CPV, análisis estructural.

Abstract

A structural analysis is realized using the Finite Element Method on a Coastal Patrol Vessel (CPV) that is subjected to a slamming load. The structural design was carried out following the High Speed Craft Rules of Germanischer Lloyd (GL), likewise the loads of slamming were applied according to what this regulation contemplates along the ship. The modeling of the geometry was done using a CAD software, later by using a finite element commercial simulation package (ANSYS) the respective analysis was carried out, for which an appropriate boundary condition is previously defined, the structure stress and strain is obtained. Finally, the results are compared with the High Speed Craft Germanischer Lloyd Rules checking criteria.

Keywords: Slamming, Structural analysis, Finite element method, stress, deformations, CPV, checking criteria.

¹ Master en Ingeniería Naval. jonyisbrian@hotmail.com .Fuerza Naval de Honduras.

² Master en ciencias en ingeniería. dajivar@gmail.com . COTECMAR

Introducción

El slamming se presenta cuando la proa de un buque emerge del agua y posteriormente se sumerge a una altitud considerable produciendo grandes fuerzas de impacto en periodos cortos de tiempo. A lo largo de los años este fenómeno ha sido estudiado a través de estudios experimentales, métodos analíticos y numéricos con el objetivo de poder predecir su comportamiento y como afecta el desempeño de los buques cuando navegan en condiciones severas en el mar, obteniendo modelos que se aproximan a definir el fenómeno adecuadamente. Básicamente lo que se busca es obtener criterios para determinar las cargas que este fenómeno transmite al diseño estructural y la respuesta de la estructura ante este evento. Además de los métodos mencionados para modelar el slamming también se puede encontrar en los reglamentos de casas clasificadoras criterios que facilitan su cálculo para la realización del diseño estructural. Igualmente, es importante en el diseño en sus etapas preliminares obtener información acerca de la respuesta estructural ante una carga de slamming, encontrando en el método de elementos finitos una herramienta útil para este tipo de análisis. El propósito de este trabajo es realizar un análisis estructural a un casco de una embarcación tipo CPV, obteniendo previamente un diseño estructural siguiendo el reglamento “Rules for Classification of High Speed Craft” de la casa clasificadora Germanischer Lloyd, luego mediante un software CAD se realiza el modelamiento de una geometría válida, posteriormente se realiza el análisis estructural mediante el método de elementos finitos al casco de una embarcación tipo CPV sometida a una carga de slamming, con el fin de obtener las distribuciones de esfuerzos y deformaciones, las cuales son comparadas con los criterios de aceptación del reglamento seleccionado. Es importante resaltar que este estudio está orientado en la apropiación de conocimientos por parte de miembros de la Fuerza Naval de Honduras en el diseño y análisis estructural de embarcaciones en sus etapas básicas, mediante un reglamento de una casa clasificadora, validando el diseño propuesto con el método de elementos finitos.

Método

Presentación de la embarcación

Para el diseño de la embarcación y estructura se tomó como referencia la configuración típica de una CPV que posee la Fuerza Naval de Honduras de la clase STAND PATROL4207 construida en el astillero holandés DAMEN que fue adquirida en años recientes. Se seleccionó ese tipo de embarcación por su funcionalidad para armadas de mediano tamaño.

Tabla 1.
Principales Características de la CPV

Características	Dimensión	Unidad
Elora total (L)	42,60	Metros
Elora Línea de agua (Lwl)	40,47	Metros
Manga máxima (B)	7,50	Metros
Manga Línea de agua (Bwl)	7,28	Metros
Puntal (H)	4,40	Metros
Calado de diseño (D)	2,20	Metros
Cb	0,46	0,46
Desplazamiento	293	Ton
Velocidad de diseño	24	Knt
Restricciones de servicio	Mar abierto	
Tipo de bote	CPV	

A. Evento Slamming

De acuerdo (Bertram, 2000), utilizar un método racional y práctico de estimación del impacto de las olas es uno de los más importantes requerimientos en la seguridad del diseño de estructuras marinas. En ese sentido se selecciona el criterio establecido por el Reglamento "Rules for the Classification of High Speed Craft" de la Casa Clasificadora Germanischer Lloyd, se calcula utilizando las formulas plasmadas en el reglamento, el cual permite realizar el dimensionamiento estructural de diferentes tipos de embarcaciones. Este reglamento establece las cargas a considerar en el dimensionamiento estructural las cuales son: presión de slamming en el fondo, presión hidrostática y cargas internas.

De acuerdo a GL la presión máxima de slamming en el fondo ocurre entre 0,5 y 0,8 de la eslora aproximadamente, como se muestra en la figura 1.

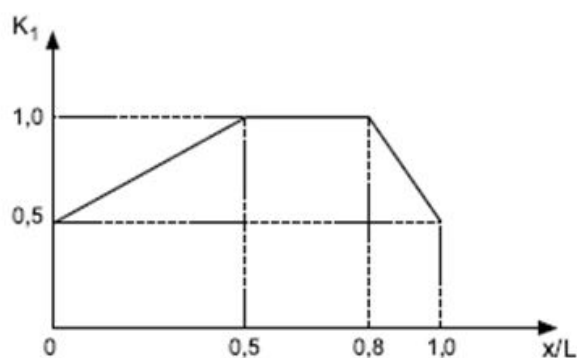


Figura 1. Distribución de impacto Slamming.
Fuente : GL.

El mismo reglamento establece que la presión máxima de slamming se calcula con la siguiente ecuación:

$$P_{SL} = 70 \cdot \frac{\Delta}{S_r} \cdot k_1 \cdot k_2 k_3 \cdot a_{cg} \quad (kN/m^2) \quad (1)$$

Donde,

Δ : desplazamiento, en toneladas.

S_r : área de referencia, en m^2 y es igual a:

$S_r = 0,7 \cdot \Delta \cdot T$ donde Δ es el desplazamiento y T el calado.

k_1 : Factor de impacto longitudinal en casco;

1 para $0,5 < x/L < 0,8$

k_2 : Factor de área de impacto; que se calcula con.

$$k_2 = 0,455 - 0,35 \frac{u^{0,75} + 1,7}{u^{0,75} + 1,7} = 0,64, \text{ siendo } u = \frac{s}{s_r}$$

k_3 : Factor de ángulo de astilla muerta; es igual a :

$k_3 = (70 - ad) / (70 \cdot ad \text{ CG})$; donde ad , es el ángulo de astilla muerta en el área de cálculo y $adCG$, es el ángulo de astilla muerta en el LCG (Centro de Gravedad Longitudinal).

Siendo $ad = 30$ y $adCG = 20$, se obtuvo un valor de 0,8

a_{cg} : Aceleración vertical de diseño en el LCG. (m/s^2)

Otras cargas tomadas en cuenta en el dimensionamiento estructural de los elementos fueron la presión hidrostática y la presión en cubierta.

Tabla 2.
Presiones para el Escantillado

Presión Diseño	GL Rules (KN/m ²)
Slamming	132,13
Hidrostática	52,00
Presión en cubierta	7,96

Una vez obtenidas las presiones de diseño se realizó el escantillado tomando como distancia entre refuerzos de 500 mm y una longitud no apoyada de 1000 mm, obteniendo los elementos estructurales que se especifica en la Tabla 3.

Tabla 3.
Resumen de elementos obtenidos en el escantillonado

Elemento estructural	Tipo y/o espesor
Quilla	T300*12/100*12
Longitudinales de fondo y pantoque	L 150*12/50*12
Longitudinales de costado	FB 80*10
Longitudinales de doble fondo	FB 80*10
Refuerzo de espejo y mamparos	FB 80*10
Longitudinales de cubierta	FB 80*10
Longitudinales de mamparos	FB 80*10
Palmejares	T300*10/100*10
Fondo	12mm
Cubiertas de tanques (Doble fondo)	12mm
Pantoque	12mm
Costado	8mm
Cubierta Principal	8mm
Espejo	8mm
Mamparo de colisión y After peak	8mm
Mamparos de Subdivisión	6mm

B. Análisis mediante el Método de Elementos Finitos.

Luego de calcular los valores de las dimensiones de los elementos estructurales de acuerdo a la norma GL, se realizó el modelamiento de la geometría de la embarcación objeto de estudio, usando el software CAD Rhinoceros, manteniendo los parámetros del escantillonado como ser: distancia entre refuerzos, longitud apoyada. Así mismo se tuvieron en cuenta los espacios para cuarto de máquinas, habitabilidad y distribución de tanques tomando como referencia la configuración típica de la embarcación descrita.

Posteriormente, un modelo geométrico se procedió a realizar el análisis por elementos finitos de la estructura comenzando con la exportación del modelo al software seleccionado para el caso de estudio, generándose 454 superficies para ser analizadas mediante FEM.

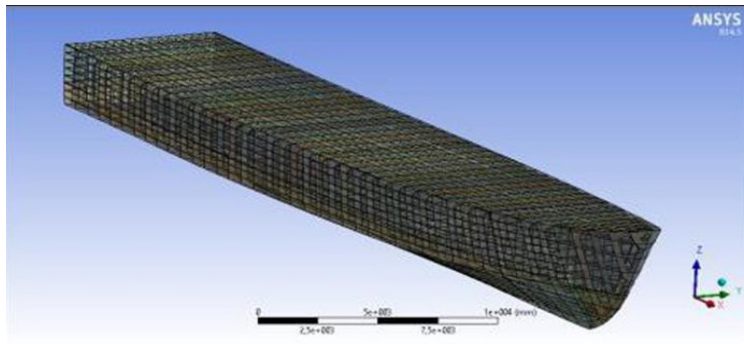


Figura 2. Modelo importado en Ansys Se ingresaron las propiedades mecánicas del material de diseño seleccionado.

Tabla 4
Propiedades mecánicas del material de diseño

Propiedades del Aluminio	
Densidad	2770 Kg/m ³
Módulo de Elasticidad	7,1x10 ¹⁰
Coefficiente de Posson	0,33

En orden de verificar la integridad estructural del modelo y que todos los elementos aporten la rigidez debida, se realizó un análisis modal a la geometría, observando que todos los elementos están unidos adecuadamente, obteniendo una geometría apropiada para continuar con el análisis FEM, ya que si existen espacios entre las regiones de contacto se generarían errores en la solución del problema y el análisis no puede llevarse a cabo hasta corregir dichos errores.

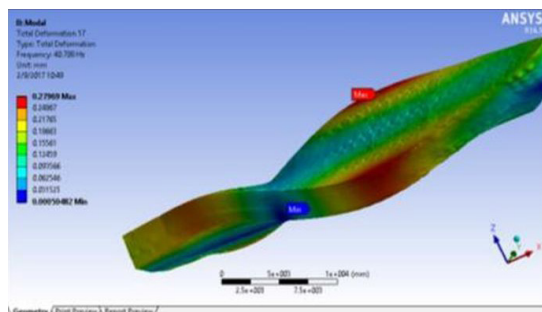


Figura 3. Analisis modal.

Después de verificar que el modelo realizado observa una adecuada integridad estructural se realizó la discretización (mallado) del dominio en un número finito de elementos.

Un aspecto a tener en cuenta en la búsqueda de resultados aceptables, es la cantidad de elementos de la malla, en relación a eso es lógico que una malla más fina produce mejores resultados pero también incrementa el tiempo de computador y requerimientos de memoria del sistema, en ese sentido se busca obtener una malla adecuada en relación a su cantidad de elementos y consumo de recursos computacionales. Considerando lo anterior se realizó el análisis del modelo con diferentes mallas, las cuales fueron generadas utilizando la opción de relevancia que facilita el programa en su módulo de mallado, esta opción controla la fineza de la malla en el modelo completo. El objetivo de generar diferentes mallas consiste en poder realizar, partir de ellas, un análisis de convergencia de resultados en la fase de solución.

Tabla 5

Mallas generadas en el modelo en Ansys

ID Malla	Elementos	Nodos	ID Malla	Elementos	Nodos
1	94677	132041	4	155246	204394
2	105668	145634	5	190830	246472
3	135646	181157	6	193244	249275

El tipo de elemento seleccionado en el estudio es elemento tipo Shell 181 el cual es un elemento de cuatro nodos con seis grados de libertad en cada nodo, tiene traslación en los tres ejes de dirección y rotación alrededor de los ejes x, y, z.

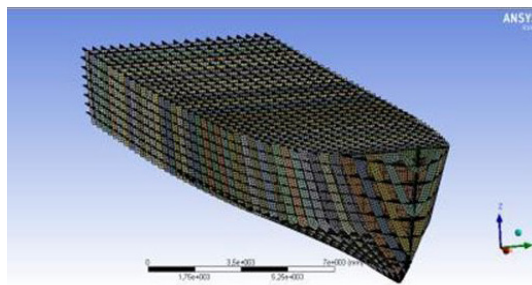


Figura 4. Malla 6 generada en Ansys.

Otro aspecto importante en el análisis es la calidad de la malla de la cual depende la transferencia de la información entre los nodos y de esto la precisión de los resultados. Este aspecto fue verificado obteniendo una malla aceptable en calidad, también se buscó que los elementos que predominen en el mallado sean elementos tipo QUAD, recomendado por el módulo de ayuda de Ansys.

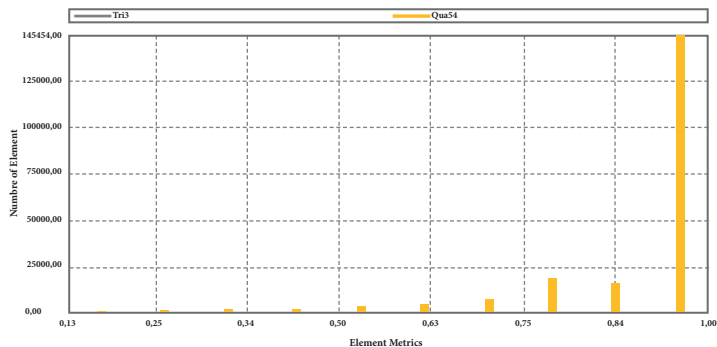


Figura 5. Parámetro de calidad del elemento de malla generada en Ansys.

Después del proceso de mallado se aplicaron las cargas al modelo que son presión de slamming, hidrostática y las aceleraciones de gravedad y vertical en el centro de gravedad. La presión de slamming máxima de acuerdo este reglamento se observa entre 0.5 y 0.8 L, sin embargo a lo largo de todo el fondo del casco la distribución de impacto se da de acuerdo a lo que muestra la figura 1 “Distribución de impacto de slamming en el fondo”.

Tabla 6. Presiones de slamming aplicadas al modelo en Ansys

x/L	K1	Psl (KPa)
0	0.5	66.06
0.1	0.6	79.28
0.2	0.7	92.49
0.3	0.8	105.70
0.4	0.9	118.91
0.5	1	132.13
0.6	1	132.13
0.7	1	132.13
0.8	1	132.13
0.9	0.9	118.91
1	0	0

Basándose en este criterio se obtuvo la distribución de presiones que fueron aplicadas al modelo FEM como se muestra en la figura.

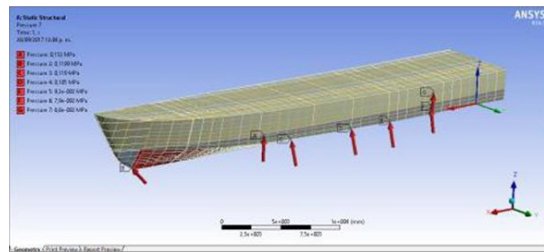


Figura 5. Presiones de slamming aplicadas al modelo

En relación a la presión hidrostática, ANSYS permite simular esta carga estableciendo la línea de flotación en el modelo y configurando los parámetros de la columna de agua que está actuando en el casco así como la aceleración de gravedad, de esta manera se obtiene la presión hidrostática más apropiada.

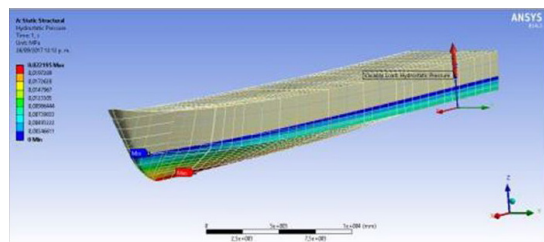


Figura 1. Presión hidrostática aplicada al modelo en Ansys.

La condición de contorno aplicada al modelo es “Inertial Relief” la cual da al modelo un balance de diferencia de fuerzas (fuerza aplicada menos peso). Es útil para análisis estáticos con aceleraciones del cuerpo sobre toda la estructura, de tal manera que la reacción en la frontera vertical es cero. Esta condición es requerida durante un análisis para restringir el modelo lo suficiente para prevenir traslación y rotación del cuerpo libre.

Esta condición ha sido utilizada en algunos análisis de elementos finitos similares, dando excelentes resultados para restringir apropiadamente el modelo. (Solano, 2015a.); de igual manera en el análisis estructural por elementos finitos de un buque tipo OPV utiliza esta condición para su estudio. Asimismo (Fuentes, 2014a.) hace uso de esta condición definiéndola como una herramienta en la que las fuerzas pares de torsión son equilibradas o contrarrestadas por las fuerzas de inercia inducidas por un campo de aceleración, en esencia calcula el desbalance de cargas y aplica un conjunto de fuerzas inerciales a lo largo del modelo con el fin de obtener su equilibrio, en igual sentido el software resuelve las ecuaciones en los nodos determinando el desplazamiento de los mismos, calculando el esfuerzo y hallando la deformación del elemento.

C. Resultados obtenidos

En orden de obtener mejores resultados y que estos sean consecuentes con el aprovechamiento eficiente del recurso computacional, un análisis de convergencia fue realizado con el objetivo de alcanzar una malla adecuada en cantidad de elementos y calidad, analizándose seis diferentes mallas, los resultados se muestran en la tabla 6.

Tabla 7.
Análisis de convergencia de malla

Malla	Elementos	Nodos	Esfuerzo (Mpa)	Variación %	Deformación (mm)	Variación %
1	94677	132041	100.26		8.46	
2	105668	145634	117.75	14.85	9.34	9.42
3	135646	181157	108.26	8.76	9.96	6.22
4	155246	204394	106.84	1.32	10.86	8.29
5	190830	246472	101.79	4.96	10.955	0.90
6	193244	249275	101.89	0.09	11.056	0.09

A partir del análisis realizado se obtienen los esfuerzos equivalentes de Von-Misses de toda la estructura después de haber aplicado las cargas de slamming a lo largo de la eslora.

El esfuerzo máximo observado se da entre 0,3 y 0,5 L obteniendo un valor de **101,89 Mpa**.

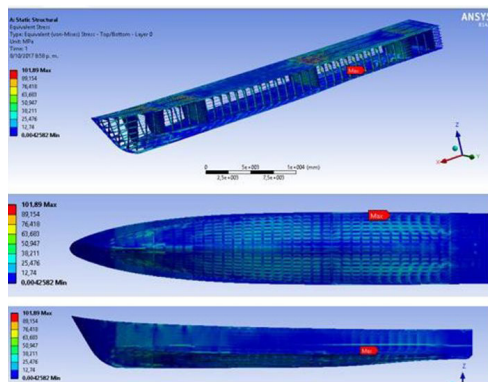


Figura 6. Esfuerzos equivalente de Von Misses máximos obtenidos en Ansys.

Las cargas aplicadas en esta sección van desde 105,70 a 118,91 KPa de acuerdo a lo mostrado en la tabla No. 6 “Presiones de slamming aplicadas al modelo en Ansys” Se puede observar que estas cargas a pesar de no ser las máximas presiones de slamming aplicadas, son presiones bastantes altas.

Se observó un comportamiento estructural consecuente ya que esta sección no tiene algunos elementos estructurales que si tiene la sección de 0,5 a 0,8 L. De este modo, se pueden ver los esfuerzos máximos en toda la estructura se da en la cuaderna 10, además se observan esfuerzos considerables altos desde la cuaderna 5 hasta la cuaderna 15, también en los longitudinales de cubierta existen esfuerzos considerables observando valores hasta de 97,82 Mpa.

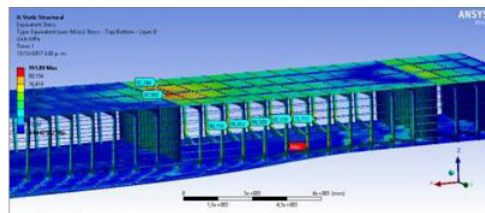


Figura 7. Esfuerzos equivalentes de Von Mises máximos obtenidos en Ansys

La deformación máxima observada se dio entre 0,5 y 0,8 L sometida a la mayor carga de slamming obteniendo un valor máximo de 11,052 mm.

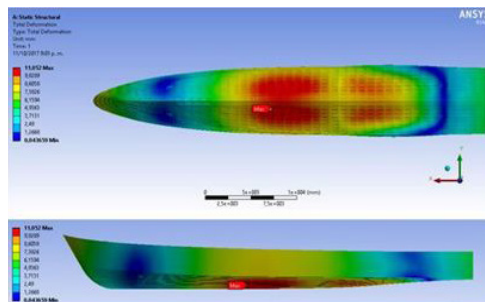


Figura 8 Deformaciones máximas obtenidas en Ansys.

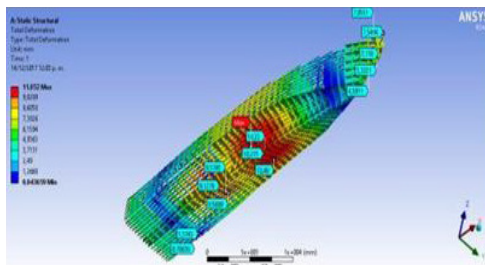


Figura 9 Deformaciones observadas en el modelo en Ansys.

D. Criterio de aceptación

El criterio utilizado para nuestro análisis es el Reglamento GL para embarcaciones de aluminio, en el cual el esfuerzo máximo equivalente no debe ser mayor que el que se describe a continuación.

$$\sigma = \frac{190}{K \cdot f_m \cdot f_s} \text{ (Mpa)} \quad (2)$$

Donde k,

Factor de material a partir de $k = \frac{100}{R_{lim}}$

Fm: Coeficiente de material

R_{lim} (Aluminio): 125 Mpa

K: Factor del material del aluminio =0,8. Fm:

Coeficiente de material $f_m = 2,15$.

Fs: Coeficiente de seguridad $f_s = 1$.

A partir de la ecuación (2) se obtiene que el esfuerzo permisible debe ser menor que 110,47 Mpa, comparando el resultado calculado en el análisis FEM de 101,89 Mpa se concluye que el modelo cumple satisfactoriamente con el criterio establecido por el reglamento seleccionado, para la carga de slamming prescrita.

Con respecto a las deformaciones obtenidas se observan que están en el régimen elástico ya que los esfuerzos observados en la estructura no superan el límite de fluencia del Aluminio.

Conclusiones

Se determinó las distribuciones de esfuerzos y deformaciones máximas en el modelo realizado obteniendo valores aceptables que cumplen el criterio de aceptación seleccionado para la carga de slamming prescrita.

La concentración de esfuerzos máxima observada fue de 101,89 Mpa que representa un 92% del esfuerzo permisible que establece el reglamento (110,47 Mpa), cumpliendo satisfactoriamente con el criterio.

La deformación máxima observada fue de 11,052 mm entre 0,5 y 0,8 L donde la carga aplicada fue la máxima, partiendo del hecho que la mayor concentración de esfuerzos obtenida cumple con el criterio de aceptación del reglamento y también es menor que el límite de fluencia del Aluminio se concluye que las deformaciones están dentro del régimen elástico por lo que son aceptables.

Se pudo notar que las cargas de slamming son transmitidas a lo largo de todo el modelo de acuerdo a las cargas aplicadas mostrando un comportamiento coherente, por lo que se concluye que el modelo representa una aproximación confiable.

Se validó mediante el método de elementos finitos el cálculo que recomienda el reglamento seleccionado para la distribución de presiones del slamming a lo largo de la eslora, determinando que el modelo estructural propuesto cumple con los criterios de aceptación para las concentraciones de esfuerzos y deformaciones, los cuales además están dentro de los límites de resistencia del material.

Se apropió de la metodología para obtener un modelo en una etapa de diseño básico que responde adecuadamente a una condición extrema de operación.

Referencias

ANSYS, Teoría de Referencia, *Ansys, Version 14.5, Canonsburg: Ansys, Inc., 2011.*

Bertram, V. (2000). *Practical Ship Hydrodynamics*. Oxford: Butterworth Heinemann. Planta Tree. ISBN 0 7506 4851 1. pp. 139.

Fuentes, David (2014) “*Análisis y optimización estructural de un multicasco diseñado en aluminio*” Tesis de Magister, Facultad de Ingeniería Naval, Universidad Austral de Chile.

Fuerza Naval de Honduras, *El Guayabal, Francisco Morazán, Honduras*. Página oficial <http://fnh.mil.hn>.

Murcia, Hugo (2017), “*Aplicación del método de elementos finitos en el análisis estructural de una patrullera tipo SWATH*”. Tesis de Magister, Escuela Naval de Cadetes Almirante Padilla, Cartagena de Indias, Colombia

Rules for the Classification of High Speed Craft, Germanischer Lloyd

Seak, Sopheak, (2012), “*Slamming and Whipping Analysis of Ships*”, PhD Thesis, Technical University of Denmark, Department of Mechanical Engineering, December 2012.

Solano, Carlos (2015), “*Análisis Estructural de un buque tipo OPV (Offshore Patrol Vessel) utilizando el método de Elementos Finitos para la evaluación de la carga Slamming*”, Tesis de Magister, Escuela Naval de Cadetes Almirante Padilla, Cartagena de Indias, Colombia.

Stavovy, A. & Chuang, S. (1976). *Analytical determination of slamming pressures for high- speed vehicles in waves. Journal of Ship Research, 20(4), pp 190-198.*

Tuitman, Johannes Tewes (2010), “*Hydro-Elastic Response of Ship Structures to Slamming induced whipping*”, tesis de Doctorado, Universidad Técnica de Delft, Rotterdam, Holanda



Izada de bandera