



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**  
**Facultad de Ingeniería Marítima, Ciencias Biológicas,**  
**Oceánicas y Recursos Naturales.**

SIMULACIÓN DEL IMPACTO DE UN CUERPO FLOTANTE  
SOBRE UN PANEL DEL FONDO DE UNA LANCHA  
PLANEADORA

**PROYECTO DE INVESTIGACIÓN**

Previo a la obtención del Título de:

**INGENIERO NAVAL**

Luis Eduardo Gonzaga Bermeo

GUAYAQUIL – ECUADOR

2017

## AGRADECIMIENTOS

Mis más sinceros agradecimientos a Dios quien me permite seguir con vida y en cada dificultad académica haberme permitido siempre llegar a buen puerto. A mis padres: Luis y Martina quienes siempre me han alentado a continuar estudiando pese a las dificultades económicas. A mi abuelita María por siempre velar que tenga un plato de sopa caliente pese a las horas tardías de llegada a casa. A mis hermanos: Marcelo y Martín quienes siempre ayudan a cuidar de los que viven en casa reduciendo mis preocupaciones para dedicarme a concluir mi carrera de ingeniería.

Por último agradezco a mis maestros Jorge Faytong, mi consejero académico; Alejandro Chanabá, Sub-decano de FIMCBOR; Ricardo Laica, encargado del laboratorio de computación de FIMCBOR; José R. Marín, mi tutor en el proyecto de investigación quien con sus aportes y correcciones me permiten presentar un trabajo del cual me siento orgulloso.

## DEDICATORIA

El presente proyecto realizado con empeño, se lo dedico a mis padres, a mis hermanos, a mi mami María, a mi enamorada Joselyn, quienes siempre estuvieron presentes en tenderme una mano en cuanto a recursos bibliográfico. A mis amigos Lasallistas que estuvieron pendiente del avance de mi titulación: Frank, Bryan, Johnny, Xavier, José Miguel, Manuel; y a mis amigos politécnicos: Lisbeth, Doménica, Carmen, Martha Gabriela, Miguel, Víctor Suárez.

## TRIBUNAL DE EVALUACIÓN

.....  
**José R. Marín López, PhD.**

PROFESOR TUTOR

.....  
**Nadia Muñoz, MSc.**

PROFESOR EVALUADOR

## **DECLARACIÓN EXPRESA**

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

---

Luis E. Gonzaga Bermeo

## RESUMEN

En este trabajo se simula numéricamente en el tiempo la respuesta de un panel del fondo de una lancha planeadora construida en aluminio A5086-H32, discretizada con el método de elementos finitos. Se pretende analizar la respuesta del fondo de una embarcación fluvial de 13 metros eslora al chocarse con un tronco.

Se consideran velocidades de avance de 15 nudos y 17 nudos, y el impacto se produce en tres zonas específicas: en el centro del panel, sobre un refuerzo longitudinal, y sobre un refuerzo transversal. El sólido escogido tiene una geometría compuesta por un cilindro y una semiesfera en el extremo y se lo define con las propiedades de madera. Con ello se pretende representar un tronco que flota.

La discretización de la sección estructural del fondo de la lancha a impactar sigue las recomendaciones hechas por la Clasificadora de buques Det Norske Veritas (DNV) en su sección de análisis de elementos finitos para impactos locales. El panel analizado tiene 750 mm de longitud y 450 mm de ancho, con un tamaño de malla en la zona de impacto de 5 mm y en el resto del modelo de 50 mm. La relación de aspecto de los elementos de la malla del modelo empleado para analizar el impacto en el centro del panel es 1.96; para las zonas de impacto sobre los refuerzos: 2.63, con 13979 y 10650 elementos cuadriláteros, respectivamente. En el caso del golpeador, el tamaño de malla fue de 30 mm e incluye alrededor de 12800 y 8750 elementos hexagonales correspondiente a las posiciones de impacto. El material del golpeador fue definido como elástico, y el del panel del fondo elástico-perfectamente plástico, es decir, la relación esfuerzo – deformación unitaria sigue una recta con pendiente igual al módulo de Young, hasta alcanzar el límite elástico; luego el esfuerzo se mantiene constante. El tiempo de simulación es de 0.02 segundos con un incremento en tiempo,  $\Delta t = 1.8E-07$  segundos.

Luego del análisis de impacto sobre el panel estructural original se propone una nueva geometría en la que se mantiene el número de varengas y se aumentan los refuerzos longitudinales. Se pretende evaluar la respuesta por impacto, manteniendo la rigidez flexural estática del conjunto, plancha más refuerzos. Los resultados por impacto sobre la geometría propuesta son comparados con el original.

## ÍNDICE GENERAL

|   |           |
|---|-----------|
| AGRADECIMIENTOS.....  | ii        |
| DEDICATORIA.....  | iii       |
| TRIBUNAL DE EVALUACIÓN.....   | iv        |
| DECLARACIÓN EXPRESA.....  | v         |
| RESUMEN.....  | vi        |
| ÍNDICE GENERAL.....   | vii       |
| INDICE DE TABLAS.....   | ix        |
| INDICE DE GRAFICOS.....   | x         |
| INDICE DE FIGURAS.....  | xi        |
| INTRODUCCIÓN.....   | 1         |
| CAPÍTULO 1.....   | 5         |
| 1. MODELIZACIÓN DE LA SECCIÓN DEL FONDO DE LA LANCHA PLANEADORA.....        | 5         |
| <b>1.1 Descripción de la lancha planeadora.....</b>                         | <b>5</b>  |
| <b>1.2 Descripción de la discretización del modelo.....</b>                 | <b>16</b> |
| <b>1.3 Descripción de las condiciones de frontera.....</b>                  | <b>20</b> |
| <b>1.4 Descripción del golpeador.....</b>                                   | <b>21</b> |
| CAPITULO 2.....   | 23        |
| 2. DESARROLLO DE LA SIMULACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS..                   | 23        |
| <b>2.1. Impacto en el centro de la plancha. ....</b>                        | <b>24</b> |
| <b>2.2. Impacto en un refuerzo longitudinal (Punto B). ....</b>             | <b>32</b> |
| <b>2.3. Impacto en el Refuerzo Transversal 2 (punto C).....</b>             | <b>33</b> |
| <b>2.4. Resumen de resultados .....</b>                                     | <b>35</b> |
| CAPITULO 3.....   | 37        |
| 3. ANALISIS DEL IMPACTO SOBRE UN DISEÑO ALTERNATIVO.....                    | 37        |
| 3.1. Rigidez equivalente y modelado del diseño alternativo .....            | 37        |
| 3.2. Resultados del impacto. ....   | 40        |
| 3.3. Resumen de resultados de las simulaciones del diseño alternativo. .... | 46        |
| CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....  | 48        |
| BIBLIOGRAFÍA.....   | 50        |

|  |    |
|--|----|
| ANEXOS .....   | 51 |
| A0. Análisis Estructural de un impacto.....  | 51 |
| A1. Deflexión Z en el punto A con velocidad de 15 y 17 nudos.....                              | 60 |
| A2. Deflexiones en el punto A con velocidad de 17 nudos.....                                   | 60 |
| A3. Esfuerzos Equivalentes en el punto A con velocidad de 15 y 17 nudos..                      | 61 |
| A4. Deflexión en las tres direcciones en el punto B con velocidad de 15 nudos.....             | 62 |
| A5. Deflexiones en el punto B con 15 nudos.....  | 62 |
| A6. Esfuerzos normales en el punto B con 15 nudos.....   | 63 |
| A7. Esfuerzos equivalentes en el punto B con 15 nudos .....                                    | 64 |
| A8. Deflexión en el punto B con 15 y 17 nudos.....   | 64 |
| A9. Esfuerzos Equivalentes en el punto B con 15 y 17 nudos .....                               | 65 |
| A10. Deflexión en el punto C con 15 nudos. ....  | 65 |
| A11. Esfuerzos normales en el punto C con 15 nudos.....  | 66 |
| A12. Esfuerzos normales en el punto C con 15 nudos.....  | 66 |
| A13. Deflexión en el punto C con 15 y 17 nudos. ....   | 67 |
| A14. Esfuerzos equivalentes en el punto C con 15 y 17 nudos.....                               | 68 |
| A15. Cálculo de inercia de los elementos estructurales a babor del fondo....                   | 68 |
| A16. Cálculo de inercia de la alternativa estructural a babor del fondo. ....                  | 70 |
| A17. Deflexiones del diseño alternativo en puntos A-B-C con velocidades de 15 y 17 nudos. .... | 72 |
| A18. Esfuerzos Equivalentes del diseño alternativo en puntos A-B-C con 15 y 17 nudos.....      | 72 |

## INDICE DE TABLAS

|   |    |
|---|----|
| Tabla 1: Dimensiones principales de lancha planeadora, [1].                       | 5  |
| Tabla 2: Escantillonado de lancha planeadora, [1].                                | 6  |
| Tabla 3: Propiedades Elásticas y mecánicas de aleación Aluminio 5086, [2]         | 15 |
| Tabla 4: Elementos estructurales en sección a estudiar, [1]                       | 17 |
| Tabla 5: Propiedades mecánicas del guayacán, [4].                                 | 21 |
| Tabla 6: Resumen de simulaciones a realizar.                                      | 23 |
| Tabla 7: Componentes de velocidades de pruebas                                    | 24 |
| Tabla 8: Representación con colores deflexión Z                                   | 27 |
| Tabla 9: Representación con colores de Esfuerzos normales X-Y                     | 29 |
| Tabla 10: Representación por colores de los esfuerzos equivalentes en el Punto A. | 31 |
| Tabla 11: Resumen de Resultados   | 36 |
| Tabla 12: Configuraciones estructurales probadas                                  | 38 |
| Tabla 13: Resumen de resultados con ambos modelos.                                | 46 |

## INDICE DE GRAFICOS

|  |    |
|--|----|
| Gráfico 2.1: Deflexión en punto A [superior] en dirección X-Y-Z .....                | 25 |
| Gráfico 2.2: Deflexión en PUNTO A [fondo] en dirección X-Y-Z.....                    | 26 |
| Gráfico 2.3: Esfuerzos Normales X-Y-Z [superior] .....                               | 28 |
| Gráfico 2.4: Esfuerzos Normales X-Y-Z [Inferior] .....                               | 28 |
| Gráfico 2.5: Esfuerzo equivalente en cara superior - fondo.....                      | 30 |
| Gráfico 3.1: Deflexión Z en punto A con 15 y 17 nudos .....                          | 40 |
| Gráfico 3.2: Esfuerzos equivalentes en punto A, con 15 y 17 nudos.....               | 41 |
| Gráfico 3.3: Deflexión Z en punto B con velocidades 15 y 17 nudos.....               | 42 |
| Gráfico 3.4: Esfuerzos Equivalentes en punto B con velocidades de 15 y 17 nudos..... | 43 |
| Gráfico 3.5: Deflexión Z en punto C con 15 y 17 nudos. ....                          | 44 |
| Gráfico 3.6: Esfuerzos equivalentes en el punto C con 15 y 17 nudos.....             | 45 |

## INDICE DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1.1: Plano de Líneas de Formas, [1].                             | 7  |
| Figura 1.2: Plano de Distribución, [1]                                  | 8  |
| Figura 1.3: Plano estructural de C3-C4-C5-C6, [1]                       | 9  |
| Figura 1.4: Plano estructural C4, [1]                                   | 10 |
| Figura 1.5: Plano estructural C5, [1]                                   | 11 |
| Figura 1.6: Plano estructural C6, [1]                                   | 12 |
| Figura 1.7: Plano estructural Mamparos 1, [1]                           | 13 |
| Figura 1.8: Plano estructural Mamparos 2, [1]                           | 14 |
| Figura 1.9: Modelado 3D de Sección a analizar.                          | 18 |
| Figura 1.10 Discretización de la sección                                | 19 |
| Figura 1.11: Condiciones de frontera de la sección                      | 20 |
| Figura 1.12: Modelado 3D del sólido a impactar el fondo de la lancha.   | 22 |
| Figura 1.13: Puntos de impacto en el modelo de la sección               | 22 |
| Figura 1.14: Discretización del sólido que va a impactar.               | 22 |
| Figura 2.1: Componentes de la velocidad del golpeador a 15 nudos        | 24 |
| Figura 3.1: Esquema simplificado estructural del fondo a babor          | 37 |
| Figura 3.2: Comparación entre diseño estructural original y alternativo | 39 |

## INTRODUCCIÓN

En las vías fluviales del Ecuador es común que el fondo de las embarcaciones se golpee con objetos sólidos flotantes tales como: boyas, restos de tanques, troncos de árboles, etc. Las lanchas rápidas a consecuencia de sus altas velocidades se vuelven complicadas para maniobrar, Peter Du Cane (1974), y así poder evitar dichos golpes. Estos impactos podrían generar vías de entrada de agua las cuales pongan en urgencia a los tripulantes, de manera que es importante analizar su efecto a nivel de diseño.

En lanchas de alta velocidad por efectos hidrodinámicos se producen cambios en su calado medio y asiento. De manera que al encontrarse con cuerpos flotantes, la región de choque en el fondo podría variar a lo largo de la eslora, Peter Du Cane (1974). Sin embargo es posible asumir de forma simple que la embarcación navegue con un porcentaje de la eslora sobre la superficie del agua, definiendo así a proa las secciones propensas a sufrir impactos.

Los objetos flotantes en los ríos suelen tener geometrías compuestas y variadas longitudes y formas. Además el impacto es un fenómeno de alta complejidad que se produce en tiempos muy cortos, la cual vuelve su análisis laborioso al emplear métodos analíticos tradicionales debido a la geometría del fondo de la nave y del cuerpo a impactar. Es por ello que en este proyecto se emplea el método de elementos finitos, para que a través de integración en tiempo poder calcular las deformaciones en la región impactada, además de observar el comportamiento en el tiempo de la zona seleccionada.

El fenómeno de impacto ha llevado a investigadores a tratar temas como el estudio experimental y numérico del impacto lateral de placas rectangulares de aluminio usando golpeadores de diferentes formas, véase Liu, Guedes Soares, Villavicencio, (2013). Otra investigación relacionada al impacto lateral es el criterio de falla en placas de aluminio y acero empleadas en la estructura de barcos con rigidez equivalente, golpeadas por una semiesfera a baja velocidad, Liu, Guedes Soares, Villavicencio, (2014). Un estudio experimental y numérico de impacto sobre

planchas de aluminio de diferentes espesores empleando golpeadores esféricos de diferentes diámetros y a velocidades superior a los 100 m/s fue desarrollado por Abdulhamid, Kolopp, Bouvet, y Rivallant, (2013). Además las Sociedades de Clasificación de buques han estudiado el efecto del impacto debido a presiones hidrodinámicas (slamming), como Lloyd Register Special Service Craft, (2013), así como la energía que debe absorber el costado debido a colisión entre dos embarcaciones, Germanischer Lloyd, (1997).

Las sociedades clasificadoras de buque no tratan el caso de impacto de embarcaciones planeadoras sino más bien se concentran en la resistencia a la colisión del doble casco de buques tanque o naves de logística, MSL Engineering, (2000). Por lo que en este trabajo se propone el estudio de la respuesta elástica estructural del fondo de una sección del casco, debido al impacto de un golpeador, simulando un tronco de árbol.

## **OBJETIVO GENERAL**

- Analizar el impacto de un cuerpo flotante sobre un panel del fondo de una lancha planeadora construida en aluminio.

## **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Modelar una sección de la lancha usando el método de elementos finitos para simular en tiempo el impacto elástico sobre el fondo de dicho tramo.
- Analizar la influencia del impacto de un cuerpo cilíndrico con punta semiesférica en diferentes lugares del fondo de la sección modelada.
- Comparar la influencia de la geometría y espaciamiento de los refuerzos longitudinales del fondo en la respuesta dinámica por impacto.

## **HIPOTESIS**

La influencia de la geometría y las dimensiones del objeto a impactar, así como la respuesta del análisis estructural de una nave planeadora se pueden analizar a través de simulación en tiempo con sistemas discretos de elementos finitos.

## **BENEFICIOS**

En el Ecuador se tiene poca experiencia en el estudio de impacto de un cuerpo de geometría compuesta sobre el fondo de una embarcación de planeo. Estas simulaciones y la posterior comparación de dos modelos estructurales nos permitirán entender la influencia de la geometría del fondo en la respuesta dinámica debida al impacto.

## CAPÍTULO 1

### 1. MODELIZACIÓN DE LA SECCIÓN DEL FONDO DE LA LANCHA PLANEADORA.

#### 1.1 Descripción de la lancha planeadora

La lancha planeadora 1304 de 13 metros de eslora fue construida por la empresa local ASTINAVE [1]. Tiene un desplazamiento de 23.91 toneladas y puede alcanzar una velocidad máxima de 25 nudos. El tipo de arreglo estructural es mixto, con espaciamiento entre cuadernas de 750 mm de la cuaderna 1 a la cuaderna 10, y 500 mm de separación desde la cuaderna 10 hasta el espejo. El espaciamiento entre refuerzos longitudinales es de 450 mm. Las dimensiones de la nave y su escantillonado de la embarcación se muestran en las Tablas No. 1 y 2, respectivamente.

| DIMENSIONES DE LANCHA ASTINAV 1304-1 |          |        |
|--------------------------------------|----------|--------|
| Descripción                          | Unidades |        |
| Eslora Total                         | 13.00    | m      |
| Eslora de Flotación                  | 12.62    | m      |
| Manga Moldeada                       | 3.80     | m      |
| Puntal Moldeado                      | 1.96     | m      |
| Calado de Diseño                     | 0.80     | m      |
| Desplazamiento al calado de diseño   | 23.91    | Ton    |
| Coefficiente Block, Cb               | 0.603    |        |
| Coefficiente Prismático, Cp          | 0.823    |        |
| Coefficiente Sección Media, Cms      | 0.732    |        |
| Ángulo de astilla muerta             | 12       | grados |

**Tabla 1: Dimensiones principales de lancha planeadora, [1].**

| ESCANTILLONADO LANCHA ASTINAV 1304-1 |          |      |                |    |
|--------------------------------------|----------|------|----------------|----|
| Descripción                          | Unidades |      | Unidades       |    |
| Espesor fondo                        | 1/4      | pulg | 6.35           | mm |
| Espesor costado                      | 3/16     | pulg | 4.76           | mm |
| Espesor varengas (C1-M3)             | 1/4      | pulg | 6.35           | mm |
| Espesor varengas (M3-Espejo)         | 1/2      | pulg | 12.70          | mm |
| Cuadernaje Transversal L             | 2x2x3/16 | pulg | 50.8x50.8x4.76 | mm |
| Longitudinal Fondo L (C1-M3)         | 2x2x1/4  | pulg | 50.8x50.8x6.35 | mm |
| Longitudinal Fondo L (M3-Espejo)     | 3x3x1/4  | pulg | 76.2x76.2x6.35 | mm |
| Longitudinal Costado FB (C1-M3)      | 2x1/4    | pulg | 50.8x6.35      | mm |
| Longitudinal Costado FB (M3-Espejo)  | 3x1/4    | pulg | 76.2x6.35      | mm |
| Puntales C11,C12,C14,C20 TUBO        | 3        | pulg | 76.2           | mm |
| Puntales C8,C9,C10 L                 | 3x3x1/4  | pulg | 76.2x76.2x6.35 | mm |
| Espesor Bases de Máquina             | 1/2      | pulg | 50.8           | mm |

**Tabla 2: Escantillonado de lancha planeadora, [1]**

En las figuras No. 1 y 2 se presentan las Líneas de formas y la distribución general de la embarcación. Se observa en el plano de formas que la embarcación tiene tres chinas. A partir de la cuaderna 9, la astilla muerta se mantiene constante con 12 grados.

La distribución de la nave muestra que tiene bajo cubierta principal cuatro zonas definidas por los mamparos: Peak de proa; habitabilidad para cuatro personas; sala de máquinas que consta de dos motores estacionarios; y el cuarto de tanques de combustible, agua dulce, aguas negras y bombas. En la superestructura se ubica el puente de mando, con disposición para cinco pasajeros.

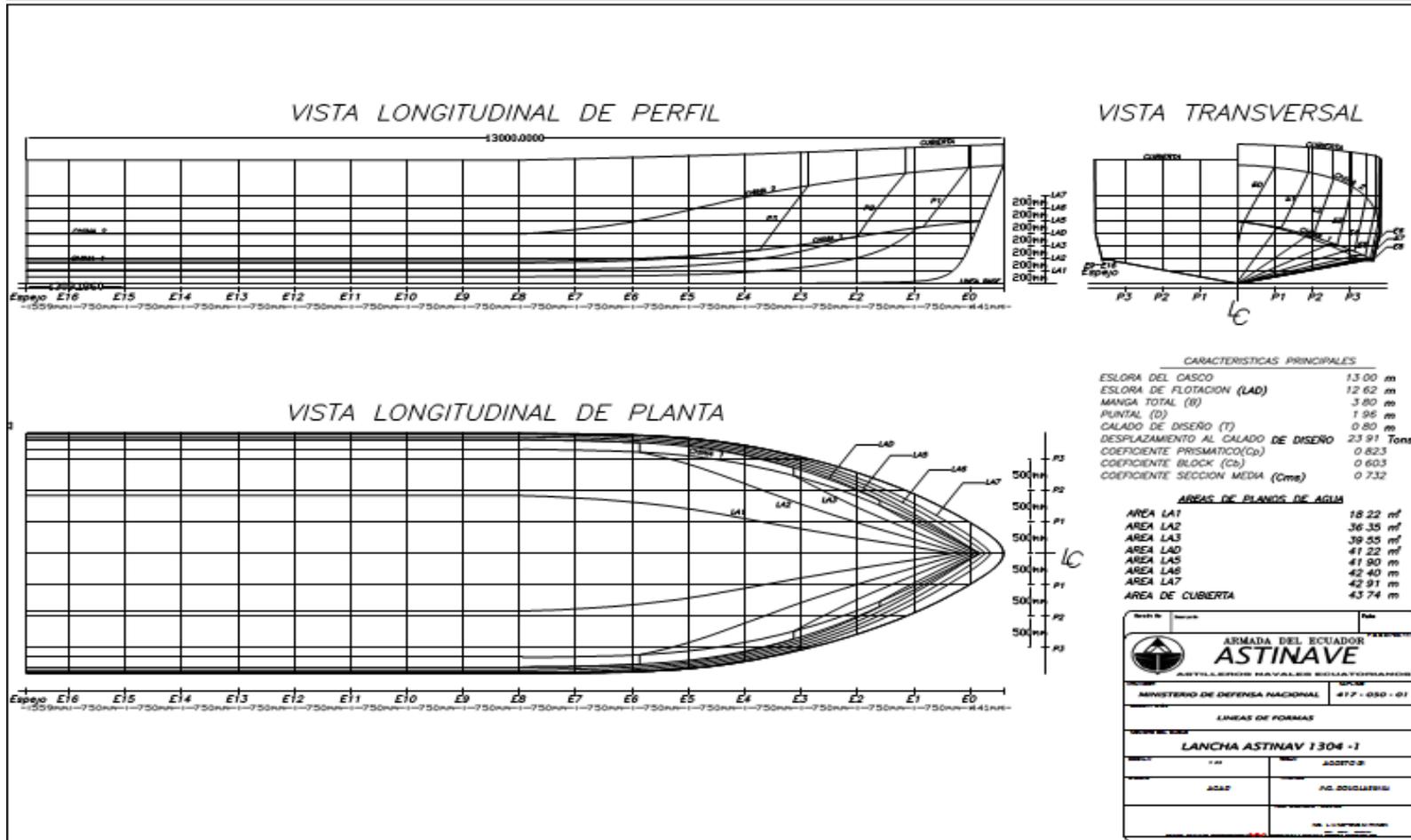


Figura 1.1: Plano de Líneas de Formas, [1].

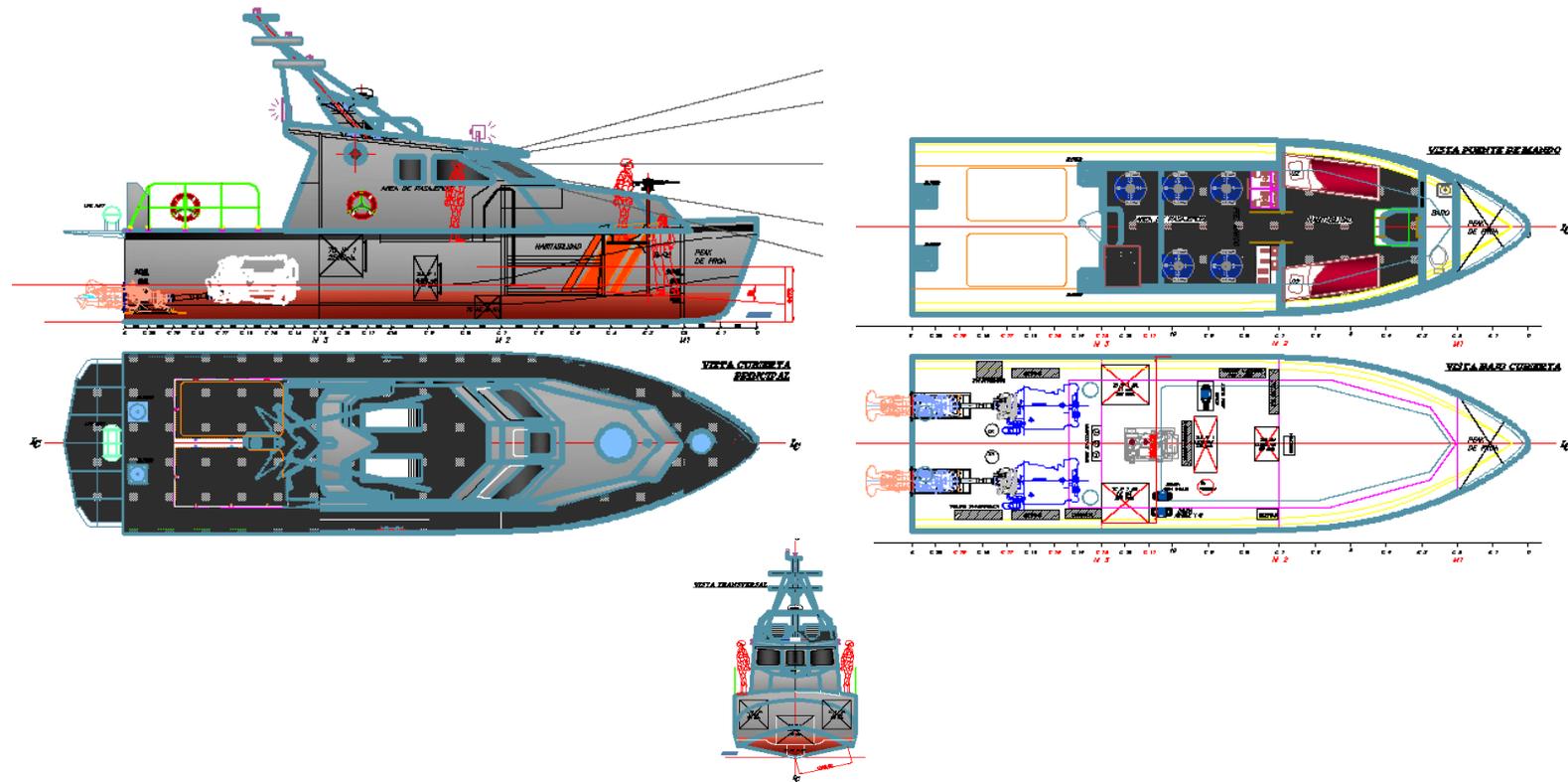


Figura 1.2: Plano de Distribución, [1]

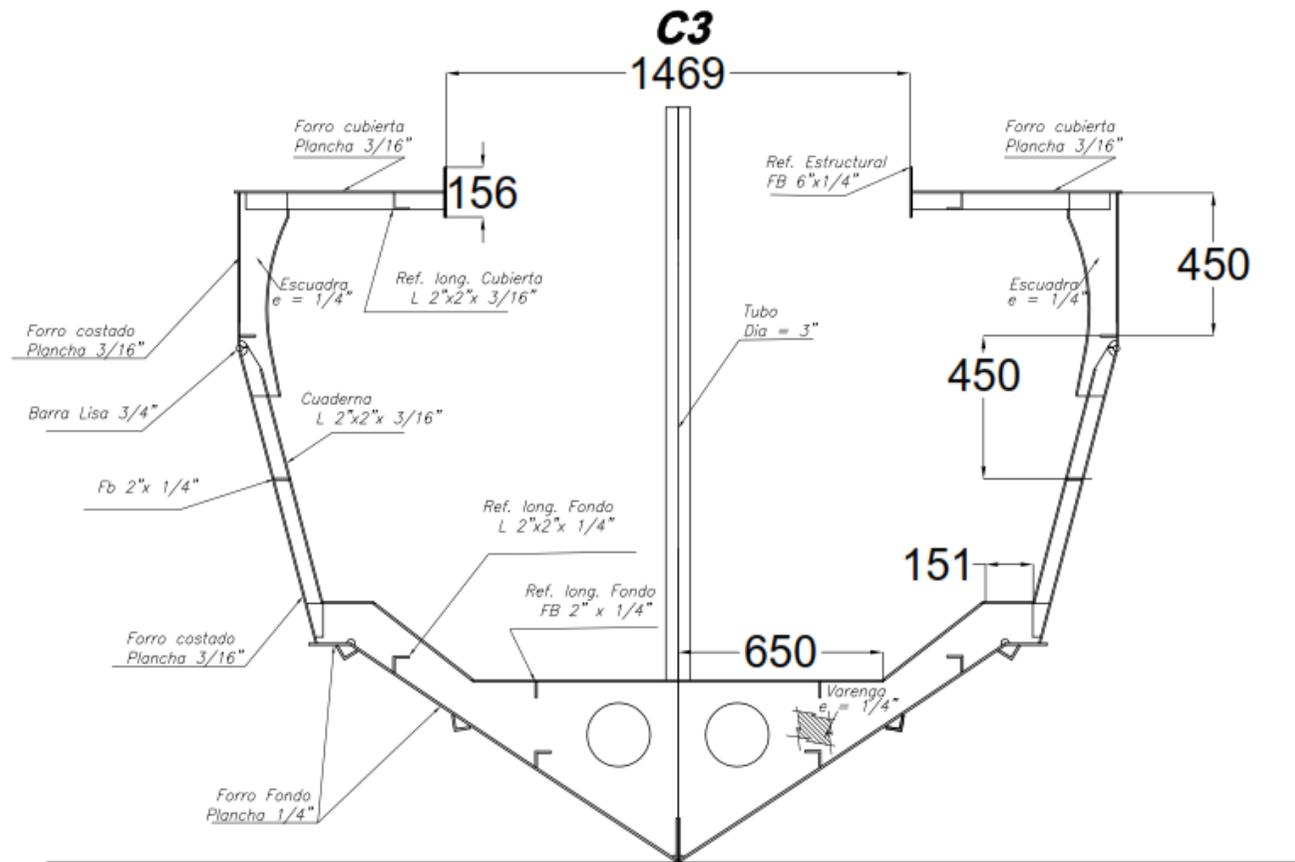


Figura 1.3: Plano estructural de C3, [1]

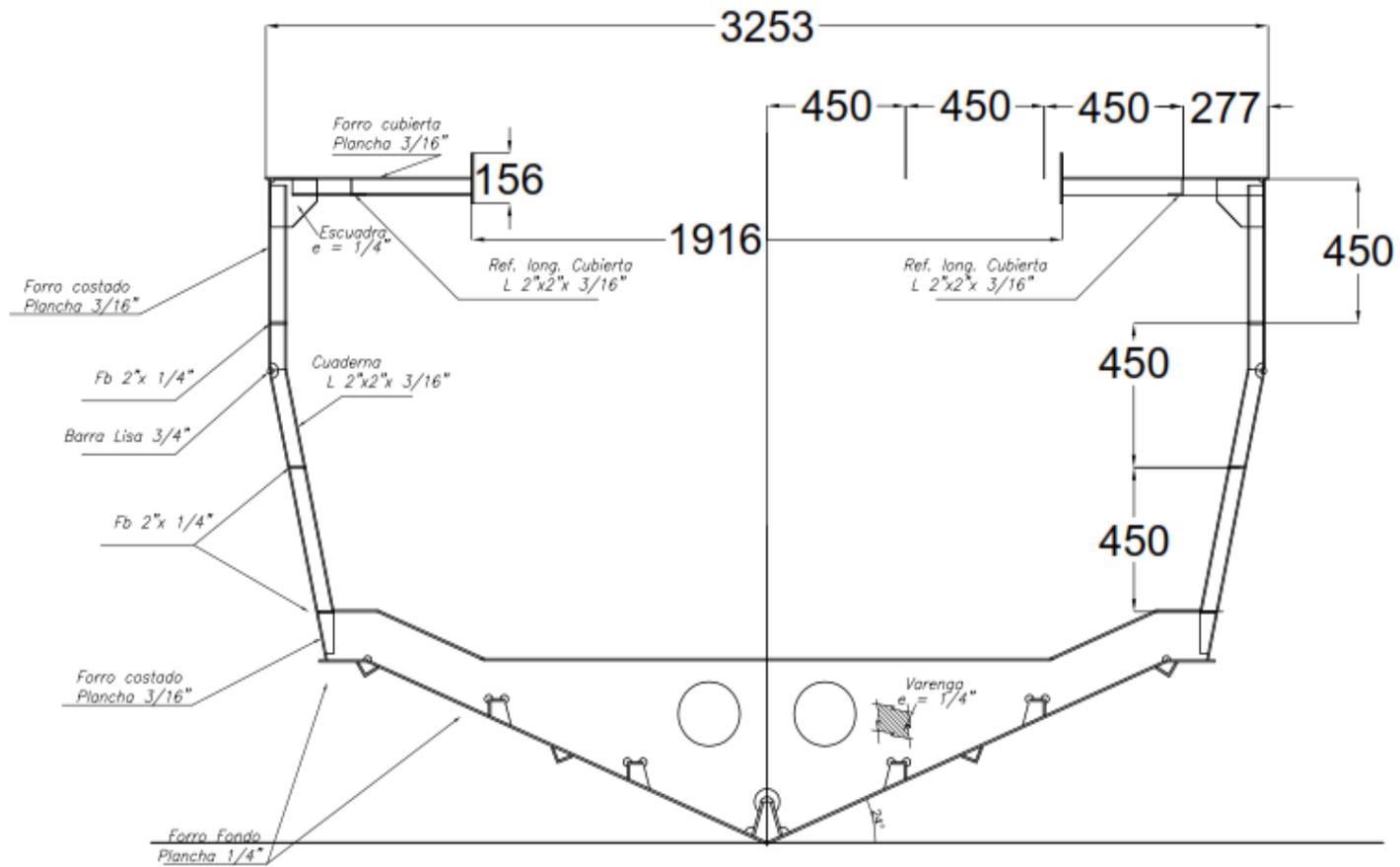


Figura 1.4: Plano estructural C4, [1]

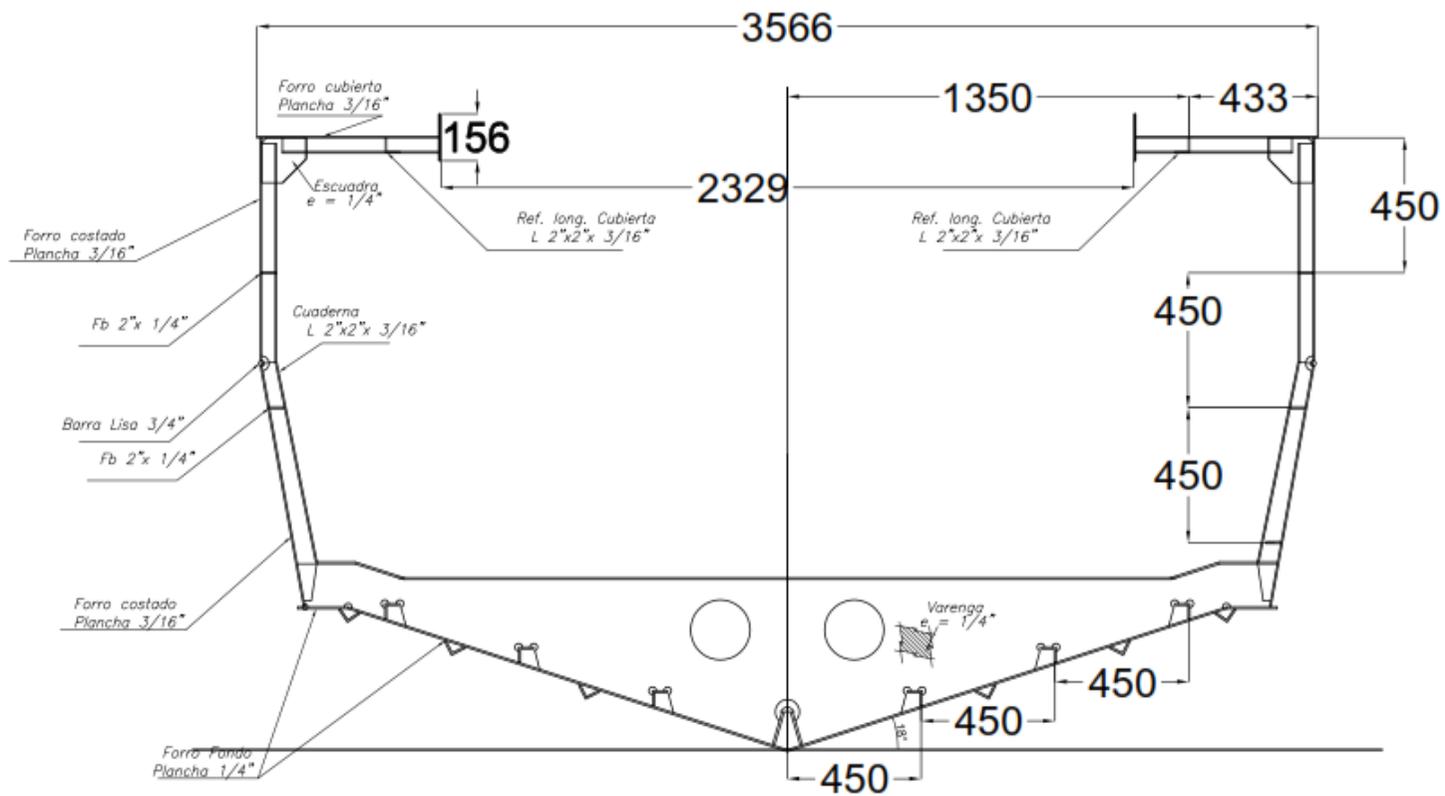


Figura 1.5: Plano estructural C5, [1]

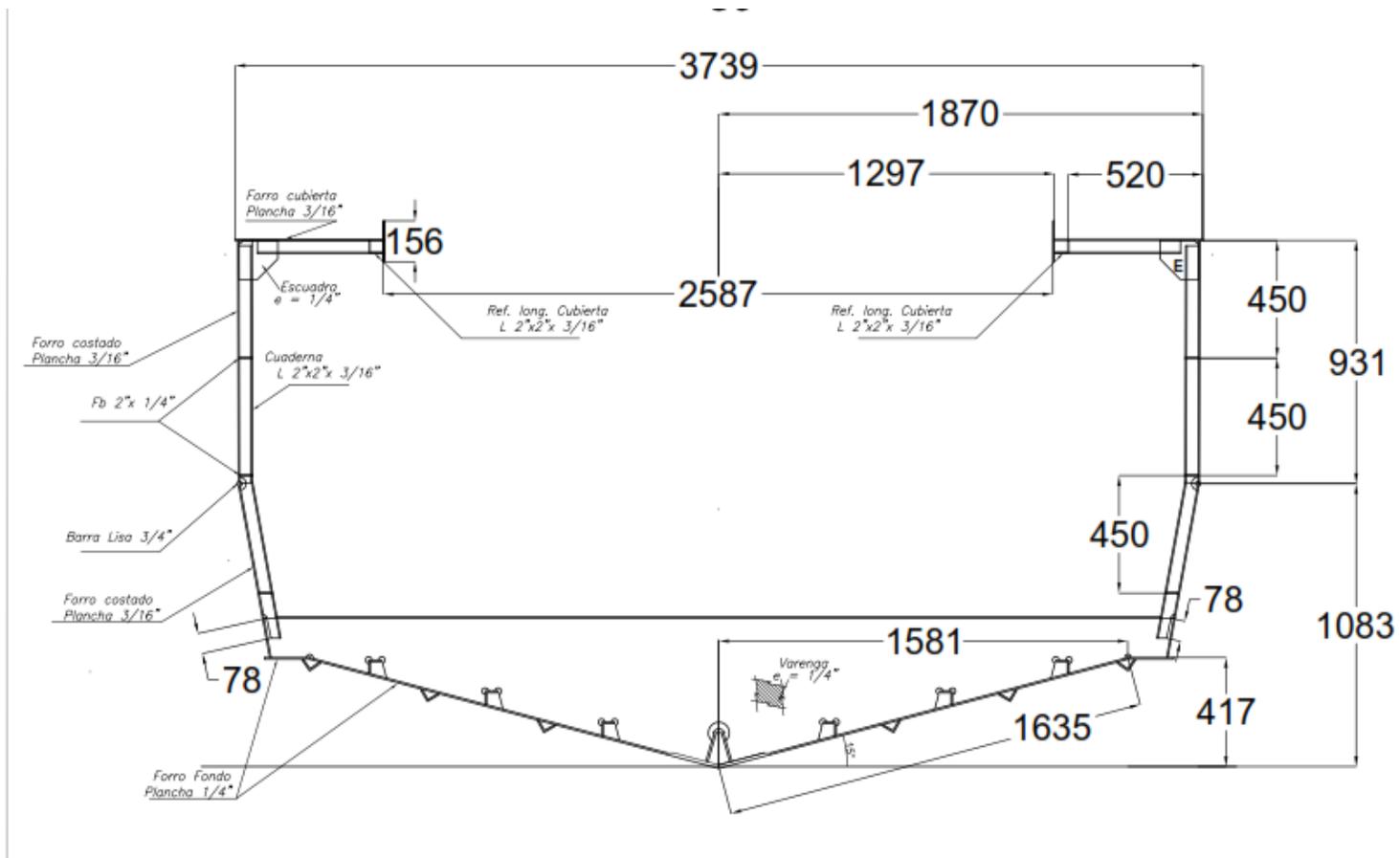
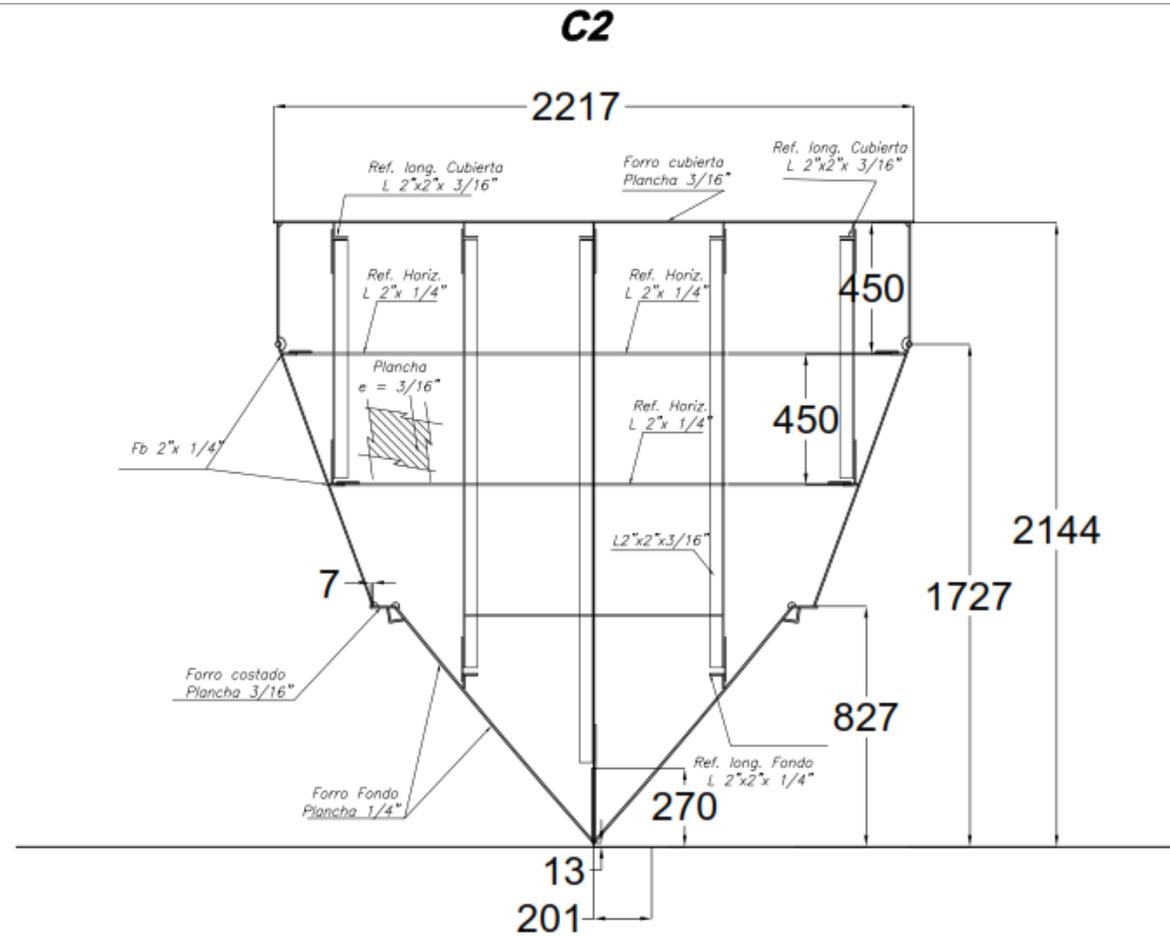


Figura 1.6: Plano estructural C6, [1]



**Figura 1.7: Plano estructural Mamparos 1, [1]**

M 2  
C7

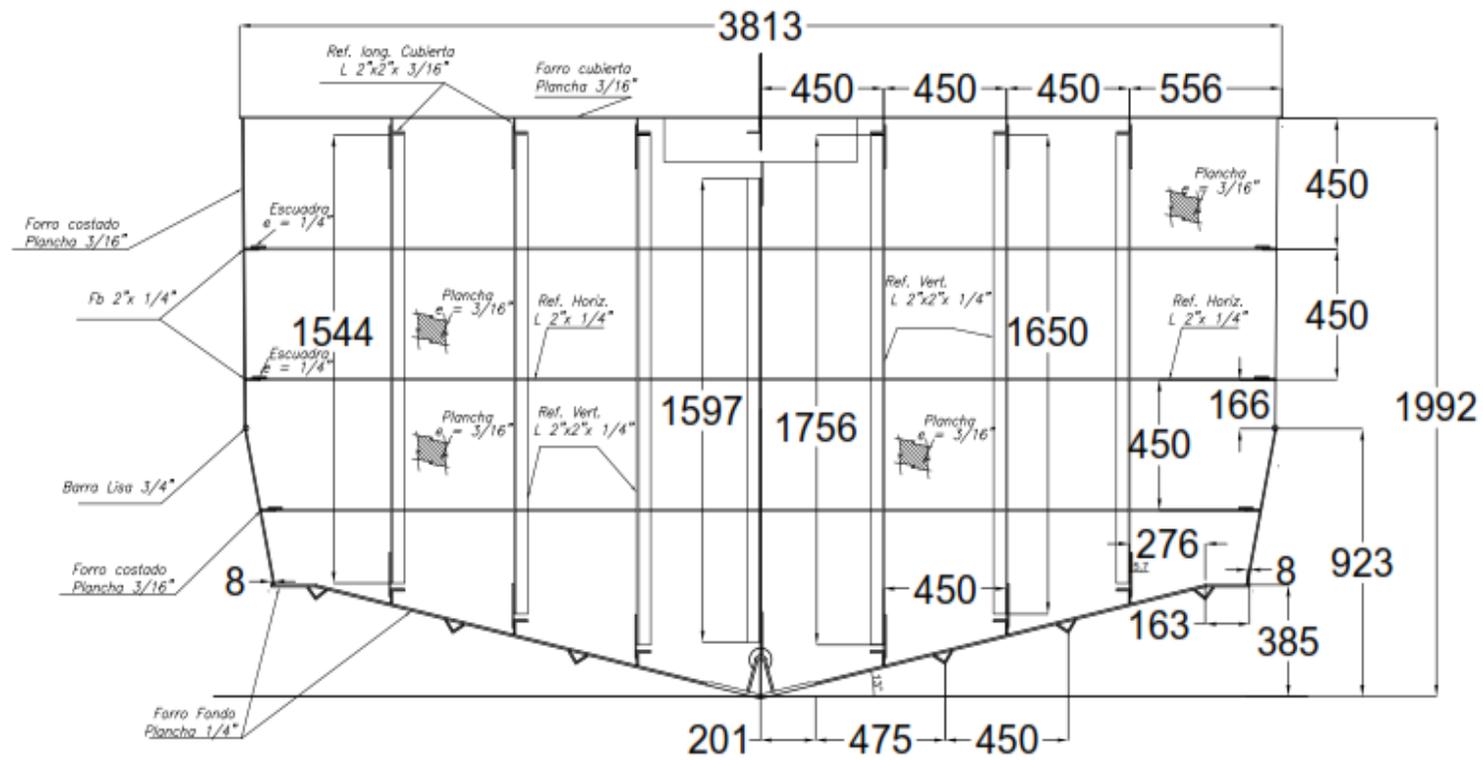


Figura 1.8: Plano estructural Mamparos 2, [1]

El material empleado para la construcción de la estructura de la embarcación es aleación de aluminio naval 5086, cuyas características principales se presentan en la Tabla 3.

| Material | Propiedad                          |          | Unidades    |
|----------|------------------------------------|----------|-------------|
| AL 5086  | Densidad, $\rho$                   | 2670     | $[kg/m^3]$  |
|          | Módulo Young, E                    | 7.1E+10  | $[N/m^2]$   |
|          | Módulo de Corte, G                 | 2.5E+10  | $[N/m^2]$   |
|          | Esfuerzo de Fluencia, $\sigma_y$   | 2.05E+08 | $[N/m^2]$   |
|          | Relación Poisson, $\nu$            | 0.33     | --          |
|          | Resistencia a la tracción/ soldada | 2460     | $[kg/cm^2]$ |

**Tabla 3: Propiedades mecánicas de aleación Aluminio 5086, [2]**

## 1.2 Descripción de la discretización del modelo

### Descripción de la sección de la lancha

El modelo estructural con elementos finitos de la sección está limitada longitudinalmente por: el Mamparo 1 hasta el Mamparo 2, ubicados a proa de la nave; transversalmente: del costado de babor hasta unos milímetros antes del primer refuerzo vertical del mamparo 1 - 2 a estribor; y, verticalmente: desde el fondo hasta el primer refuerzo longitudinal de costado en Babor. (Ver Figura 1.9). El sistema de ejes coordenados en el modelo se define: eje X (+) de popa a proa; eje Y (+) de estribor a babor; eje Z (+) del fondo hacia arriba. Los elementos estructurales que conforman este tramo se muestra en la Tabla 4.

La sección de la lancha planeadora a ser analizada se modela en Solidworks 2016 y luego se exporta a Ansys. Para su análisis en elementos finitos se emplea el módulo Explicit Dynamics, que permite simular impactos en tiempos muy cortos.

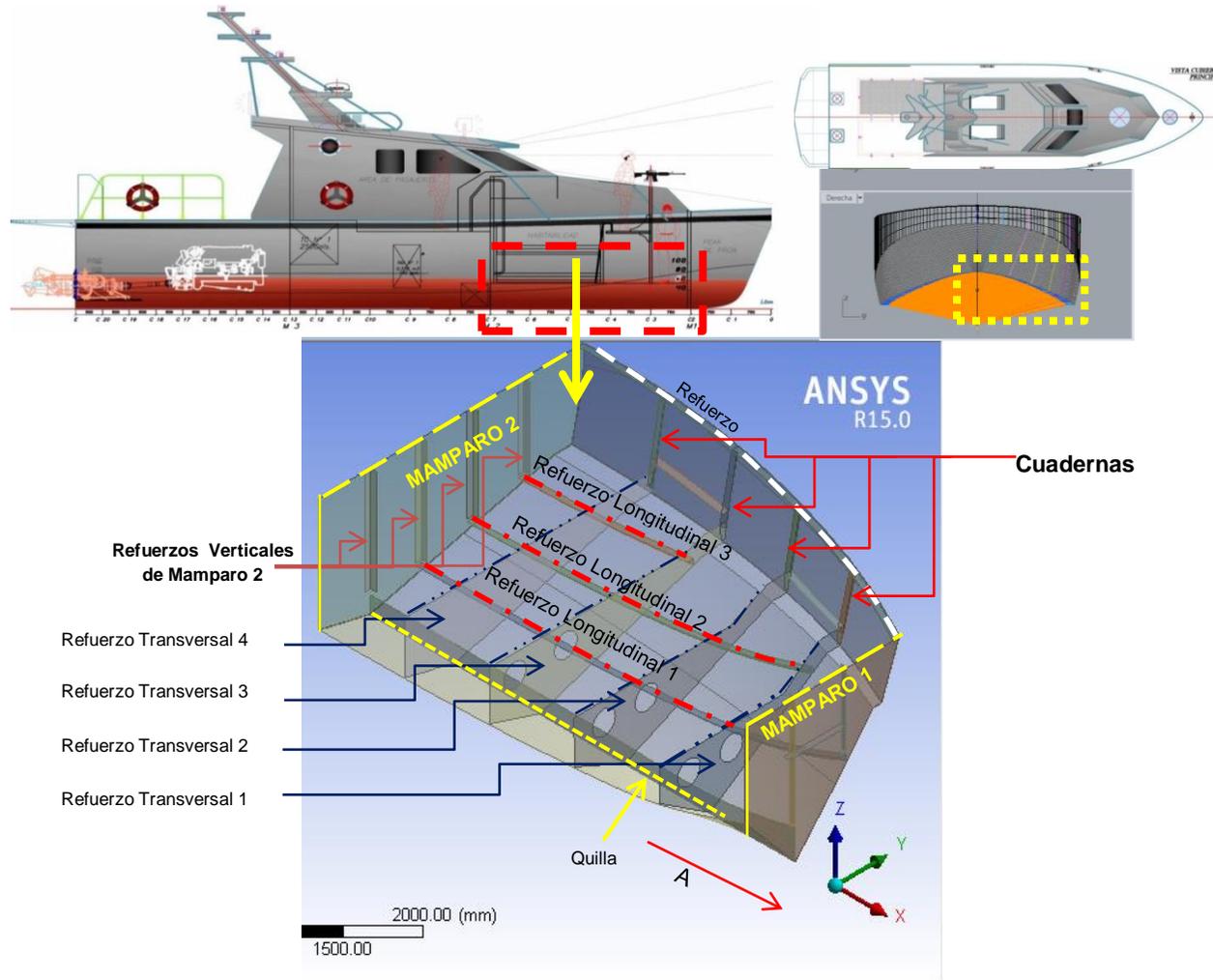
Para la discretización espacial con elementos finitos se considera lo que recomienda la Sociedad Clasificadora Det Norske Veritas – Germanischer Lloyds, 2015, referente a los métodos de cálculos, dentro de los cuales existen tres literales: a) Análisis Directo Global de esfuerzos; b) Análisis Estructural Parcial del Barco; c) Análisis Local de Estructuras. En el presente caso se siguen las recomendaciones dadas para la opción C.

| ELEMENTOS ESTRUCTURALES DE LA SECCION |               |          |
|---------------------------------------|---------------|----------|
| Descripción                           | Dimensiones   | cantidad |
| Refuerzo Longitudinal fondo           | L 2"x2"x1/4"  | 3        |
| Refuerzo Longitudinal costado         | FB 2"x1/4"    | 1        |
| Cuadernas                             | L 2"x2"x3/16" | 4        |
| Refuerzo Intercostal                  | FB            | 2        |
| Varenga (espesor)                     | 1/4"          | 4        |
| Refuerzo Vertical Mamparo 1           | L 2"x2"x3/16" | 2        |
| Refuerzo Horizontal Mamparo 1         | FB 2"x3/16"   | 1        |
| Refuerzo Vertical Mamparo 2           | L 2"x2"x1/4"  | 4        |
| Quilla                                | FB 7"x 1/2"   | 1        |
| Espesor plancha Mamparo 1             | 1/4"          |          |
| Espesor plancha Mamparo 2             | 3/16"         |          |
| Espesor plancha fondo                 | 1/4"          |          |
| Espesor plancha costado               | 3/16"         |          |

**Tabla 4: Elementos estructurales en sección a estudiar, [1]**

Se recomienda que los elementos del mallado estructural de un modelo con elementos finitos deben ser cuadriláteros y se debe evitar elementos triangulares, [3]. A su vez los elementos deben tener una relación de aspecto cercano a 1, pero no debe exceder de 3. Además si la zona a investigar es local, la malla debe ser fina, uniforme y tener un tamaño máximo de 50mm x 50mm, o, debe tener como mínimo 10 elementos en ambas direcciones.

En el modelo numérico desarrollado cuando se impacta en el centro de la plancha tiene 13979 elementos cuadriláteros, con relación de aspecto 1.96. Por otro lado cuando se impacta los refuerzos se tiene 10650 Elementos cuadriláteros, con relación de aspecto 2.63. El porcentaje que no cumple lo recomendado por DNV es 4% y 8% respectivamente. Se ha tomado dos tamaños de mallado: el primero en la zona de impacto de 5 mm y en el resto del modelo un segundo tamaño de 50 mm. De esta forma se puede discretizar adecuadamente el área de contacto entre el fondo y el golpeador.



**Figura 1.9: Modelado 3D de Sección a analizar**

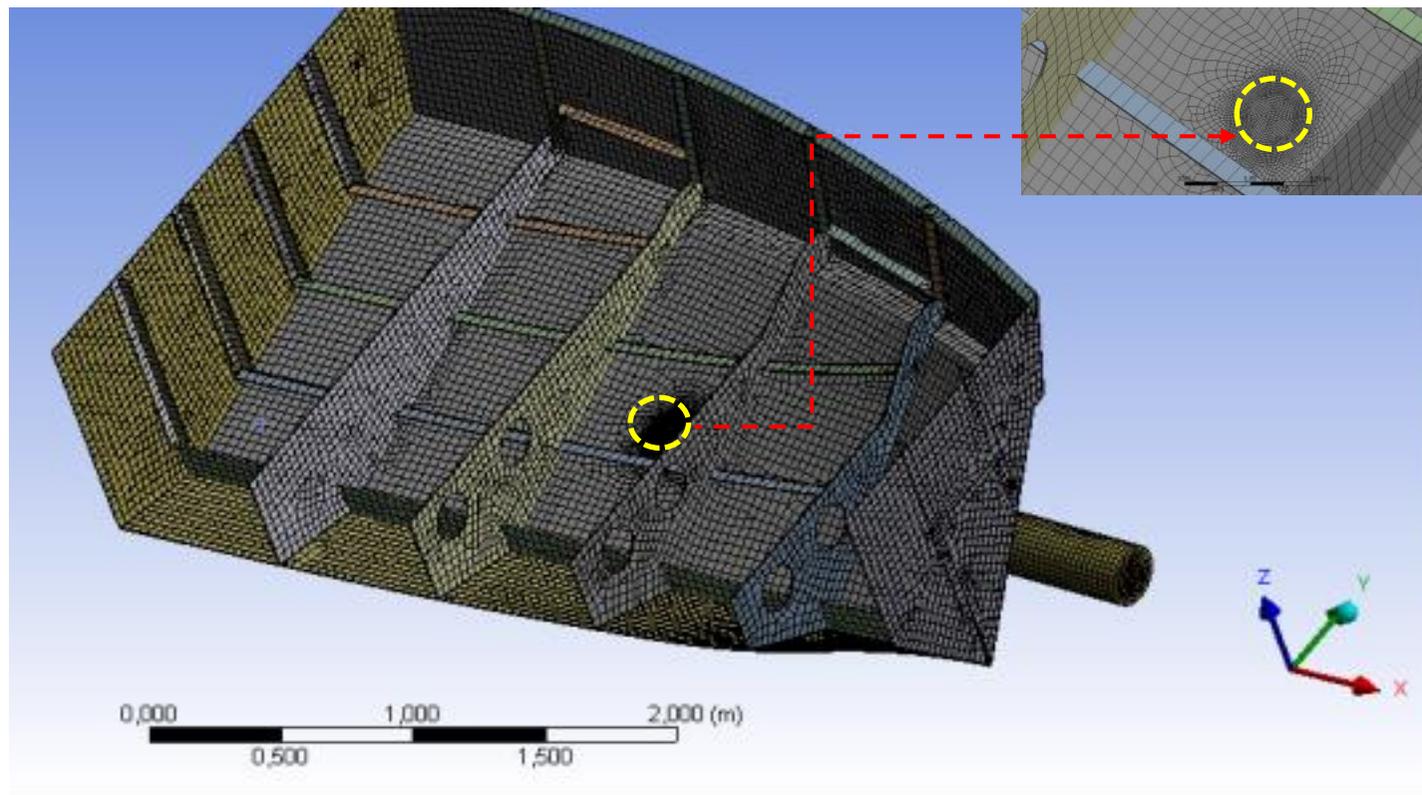


Figura 1.10 Discretización de la sección

### 1.3 Descripción de las condiciones de frontera

Para evitar introducir rigidizaciones artificiales se incluye en el modelo superficies aledañas a la sección del fondo que recibe el impacto. Los nodos ubicados en los bordes superiores de los mamparos 1 y 2 se toman como empotrados; los nodos localizados en el extremo superior del costado de babor son tomados como simplemente soportados, permitiendo la rotación. En la extensión estructural hacia el costado derecho de la quilla los nodos en los extremos de las varengas, los del planchaje de fondo y los del costado, se consideran simplemente soportados. Ver figura 1.11.

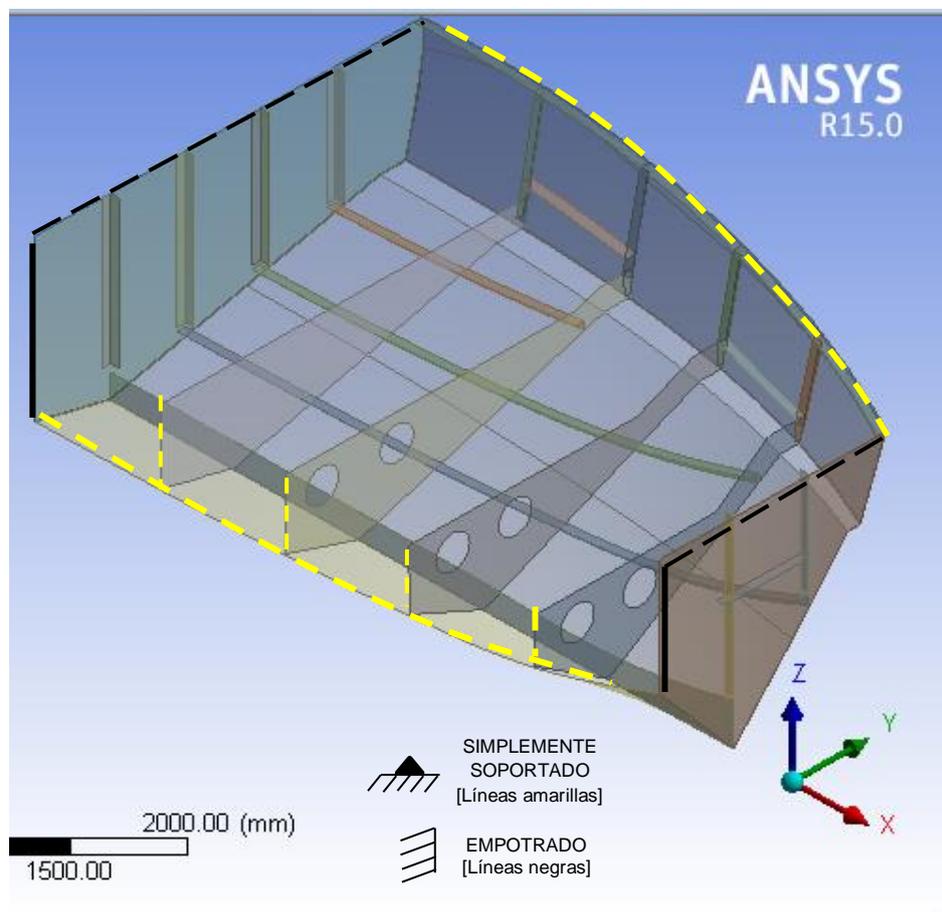


Figura 1.11: Condiciones de frontera de la sección

#### 1.4 Descripción del golpeador

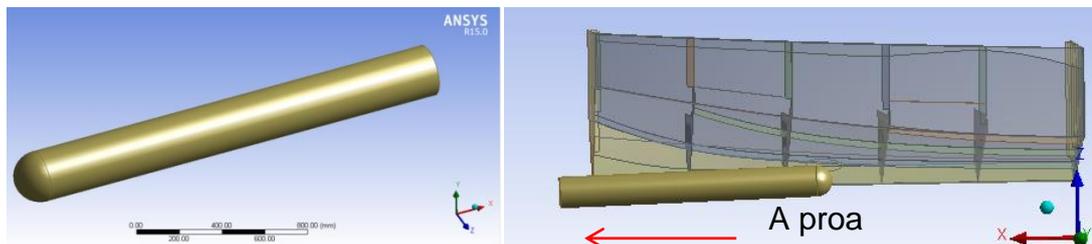
El objeto que va a impactar el fondo de la embarcación se considera como un tronco de árbol cuya forma simplificada se asume como un cilindro con una semiesfera en el extremo. Se va a considerar que el objeto sólido se mueve en relación al bote con velocidad igual a la embarcación, entre 15 nudos y 17 nudos. La geometría del cilindro es de 2000 mm de largo y 250 mm de diámetro; la semiesfera tiene un diámetro 250 mm, (ver figura 1.12). Las propiedades mecánicas del sólido corresponden a la madera guayacán y se muestran en la Tabla 5.

| Material                   | Propiedad               |          | Unidades |
|----------------------------|-------------------------|----------|----------|
| <b>MADERA<br/>GUAYACAN</b> | Densidad, $\rho_{ma}$   | 869      | $kg/m^3$ |
|                            | Módulo Young, $E_{ma}$  | 1.22E+10 | $N/m^2$  |
|                            | Relación Poisson, $\nu$ | 0.40     | --       |

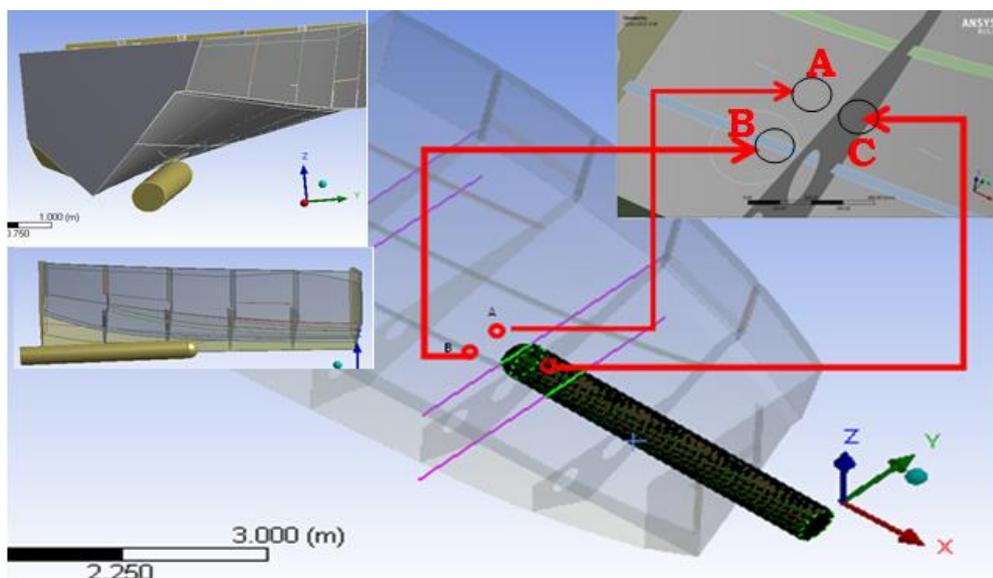
**Tabla 5: Propiedades mecánicas del guayacán, [4]**

La trayectoria del sólido con respecto a la embarcación es de proa a popa, con ángulo de inclinación respecto de la línea base de la lancha de 10 grados que corresponde al trimado que adopta. Se va a analizar el impacto del sólido que se produce en tres puntos:

- A) En el centro de la plancha ubicada entre los longitudinales 1 - 2 y entre los transversales (varengas) 2 - 3;
- B) En el refuerzo longitudinal 1, entre la varenga 2 – 3.
- C) En la varenga 2, (ver figura 1.13).

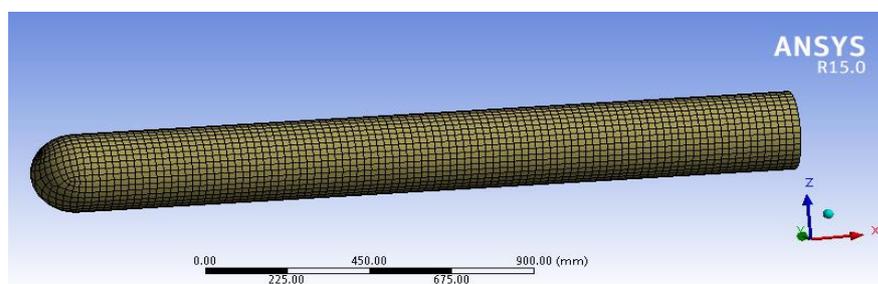


**Figura 1.12: Modelado 3D del sólido a impactar el fondo de la lancha.**



**Figura 1.13: Puntos de impacto en el modelo de la sección**

El modelado numérico del golpeador sólido se lo mejora en workbench y tiene un tamaño de mallado de 35 mm. Los elementos empleados para discretizar el sólido son hexaedros, ver figura 1.14.



**Figura 1.14: Discretización del sólido que va a impactar.**

## CAPITULO 2

### 2. DESARROLLO DE LA SIMULACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.

A continuación se presenta el proceso de simulación entre el fondo de la lancha planeadora y el tronco con dos velocidades en las tres zonas del impacto. Se ubica al objeto sólido a menos de 3 mm de la zona de contacto para que el tiempo hasta ponerse en contacto con el panel sea el menor posible. Se configuró al programa para que simule el fenómeno durante 0.020 segundos. Para analizar los diferentes resultados se van a resumir la deflexión y los esfuerzos normales y equivalente (Von Misses), y la fuerza de contacto.

| Lugar de impacto            | Centro (Punto A) |    |   | Refuerzo Longitudinal (Punto B) |    |   | Refuerzo Transversal (Punto C) |    |   |
|-----------------------------|------------------|----|---|---------------------------------|----|---|--------------------------------|----|---|
| <b>Velocidades</b>          | 15               | 17 |   | 15                              | 17 |   | 15                             | 17 |   |
| <b>Análisis a realizar</b>  | Dirección        |    |   | Dirección                       |    |   | Dirección                      |    |   |
|                             | X                | Y  | Z | X                               | Y  | Z | X                              | Y  | Z |
| <b>Deflexión</b>            | ✓                | ✓  | ✓ | ✓                               | ✓  | ✓ | ✓                              | ✓  | ✓ |
| <b>Esfuerzo Normal</b>      | ✓                | ✓  | ✓ | ✓                               | ✓  | ✓ | ✓                              | ✓  | ✓ |
| <b>Esfuerzo Equivalente</b> | ✓                |    |   | ✓                               |    |   | ✓                              |    |   |

**Tabla 6: Resumen de simulaciones a realizar y parámetros a reportar.**

### 2.1. Impacto en el centro de la plancha.

En este caso el golpeador choca contra el fondo de la lancha entre los refuerzos longitudinales 1 - 2, y los transversales 2 - 3, llamado punto A. (Ver figura 1.13). La velocidad neta del objeto sólido es de 15 nudos, ó, 7.716 m/s y su movimiento se expresa por dos componentes de velocidad: en X (-) y Z (+). La componente de la velocidad negativa en X se debe a que el sólido avanza de proa hacia popa. El vector resultante de velocidad tiene una dirección de 5° con respecto a la horizontal, ver figura 2.1.

Luego se efectúa una segunda simulación con 17 nudos (8.74 m/s), manteniendo la zona de impacto (Punto A), sus componentes se muestran en la tabla No. VI.

| Prueba 1  |        |        | Prueba 2  |        |        |
|-----------|--------|--------|-----------|--------|--------|
| Velocidad | nudos  | m/s    | Velocidad | nudos  | m/s    |
| Vx        | -14.94 | -7.686 | Vx        | -16.94 | -8.712 |
| Vz        | 1.31   | 0.672  | Vz        | 1.48   | 0.762  |
| Total     | -15    | -7.716 | Total     | -17    | -8.744 |

Tabla 7: Componentes de velocidades de pruebas

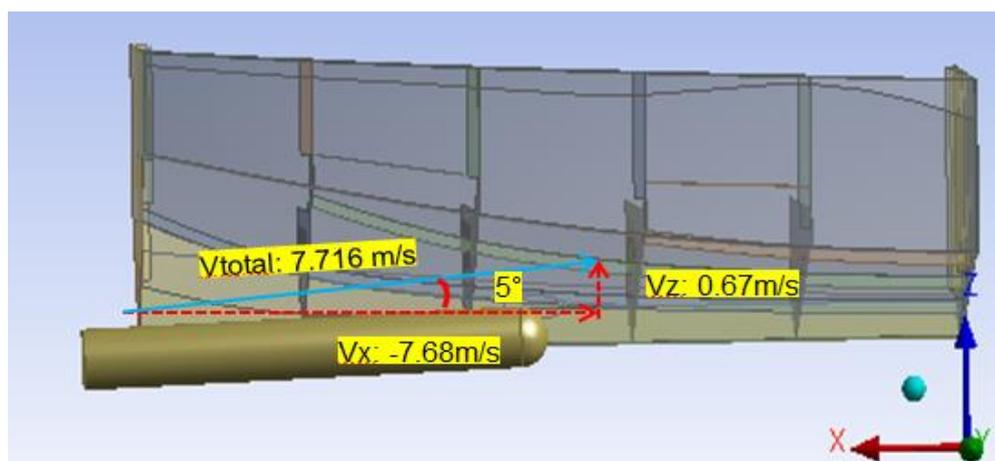


Figura 2.1: Componentes de la velocidad del golpeador a 15 nudos

### Deflexión con 15 nudos

Los resultados de la deflexión en la plancha del fondo fueron graficados para las tres direcciones, gráfica 2.1, en la zona de impacto. En la Gráfica 2.2 se aprecian las deflexiones en la cara inferior en la plancha del fondo, alrededor de la zona golpeada. La componente con mayor deflexión se da en la dirección Z (+), con 5.08 mm; las componentes en las otras direcciones (X e Y) no superan los 0.2 mm, por ello no se toman en cuenta en el análisis. Del lado posterior la componente que más influye se da en la dirección Y (-): 1.92 mm.

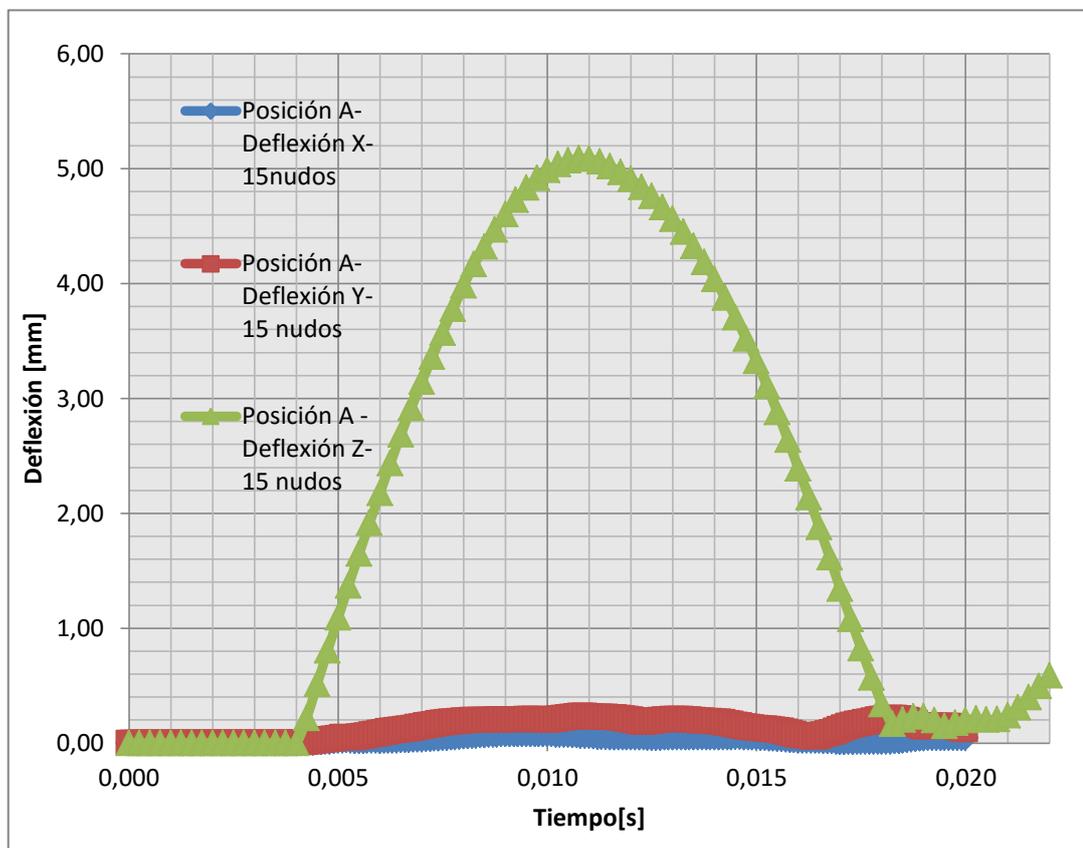
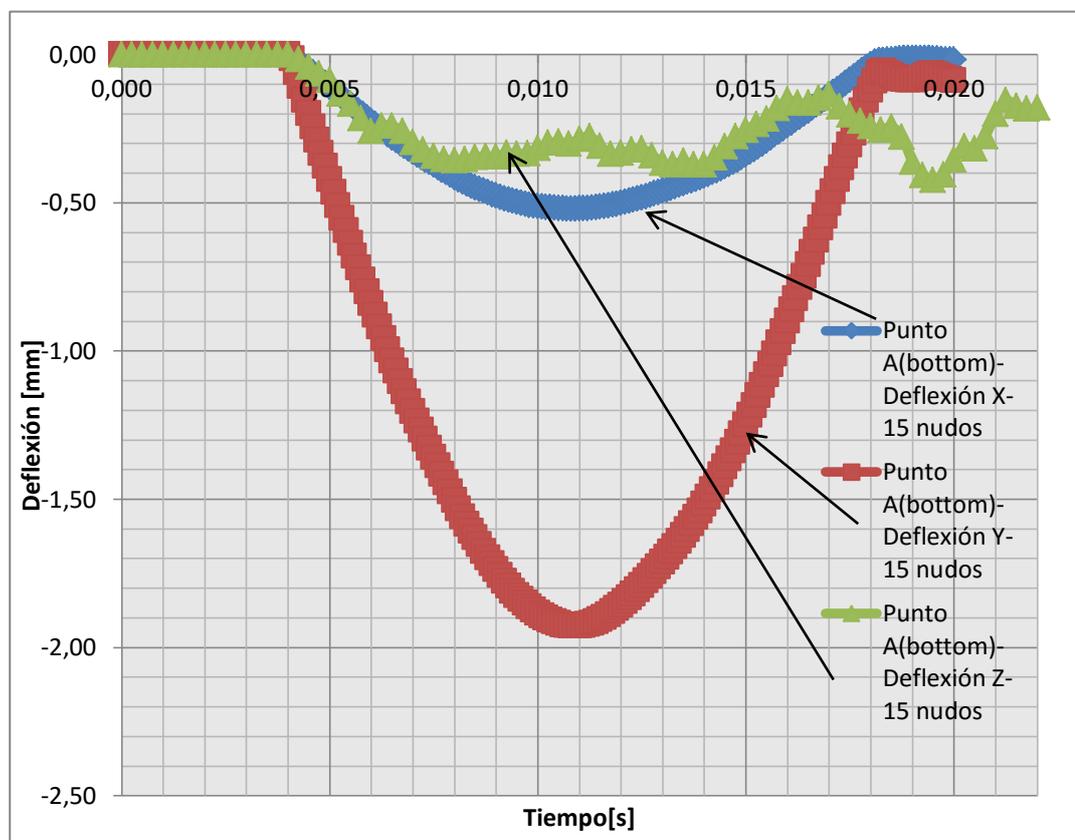
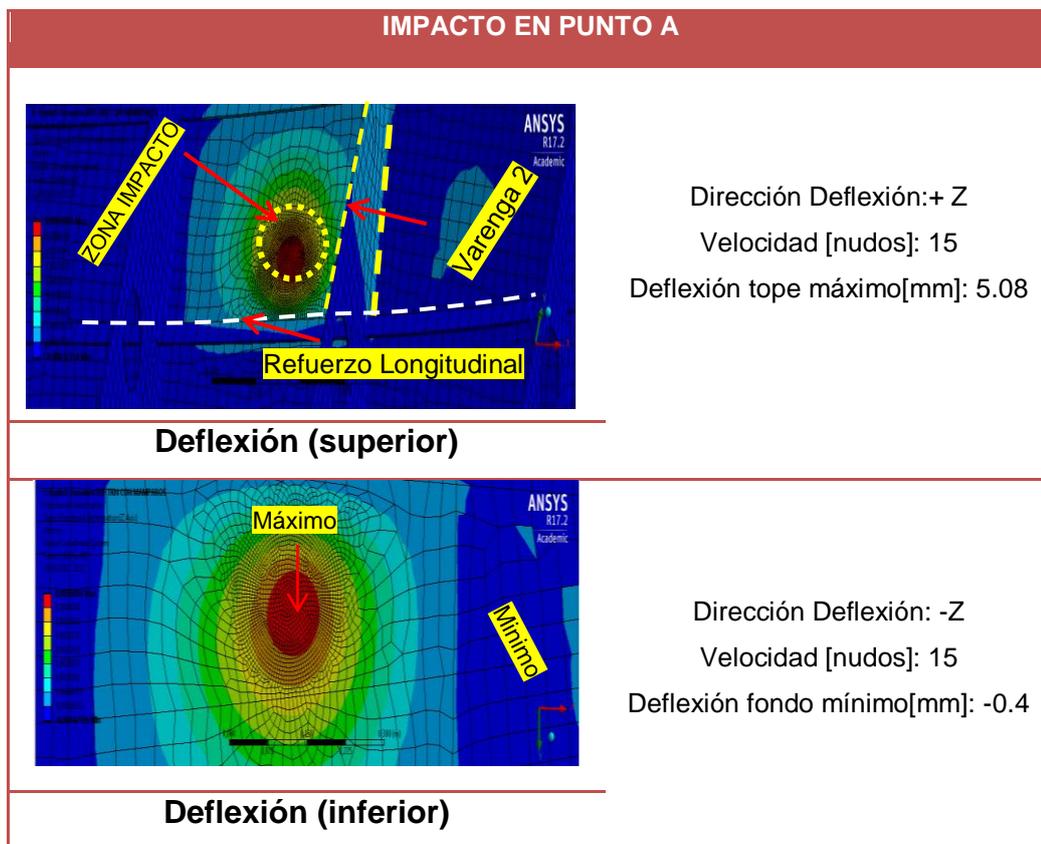


Gráfico 2.1: Deflexión en punto A



**Gráfico 2.2: Deflexión en panel adyacente al impacto**

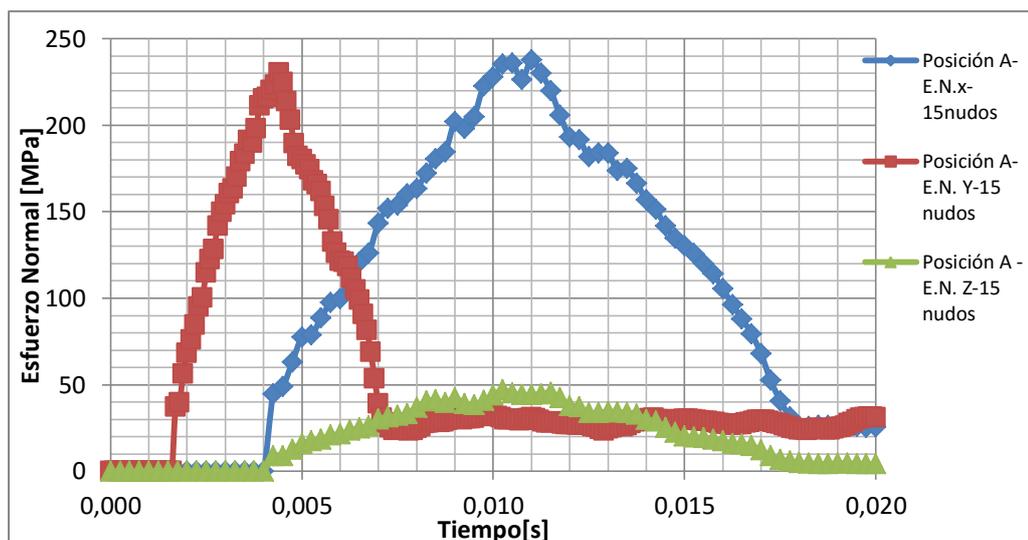
Es importante comentar que en el Gráfico 2.1 se muestran las deflexiones máximas de los nodos en la zona de impacto, mientras que en el Gráfico 2.2 se observa las deflexiones mínimas de la zona adyacente al impacto. A seguir se muestra con colores las deflexiones en las direcciones investigadas. La escala de colores van del azul, indicando las áreas con valores mínimos, 0.4mm, hasta el color rojo mostrado la máxima deflexión, 5.08 mm. Tras el impacto en el centro de la plancha se observa que la deflexión en el eje Z también afecta a otros miembros estructurales tales como los refuerzos transversales y longitudinales, ver Tabla 8.



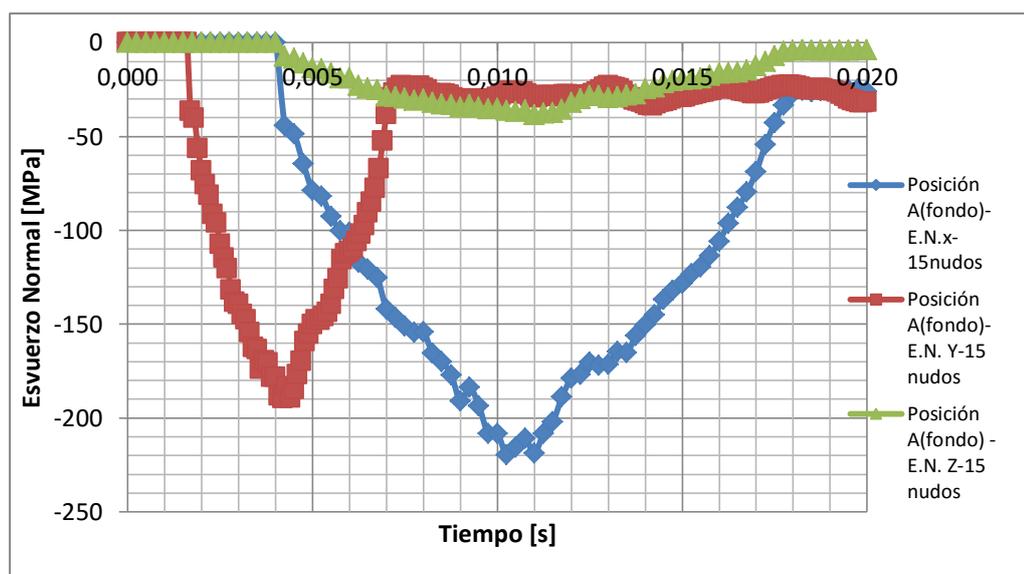
**Tabla 8: Representación con colores deflexión Z**

### **Esfuerzos Normales con 15 nudos**

Los esfuerzos normales que se producen en la plancha del fondo se presentan en las Gráficas 2.3 y 2.4, en las direcciones especificadas en la Tabla 6. Las componentes que alcanzan mayores valores se dan en dirección X- Y en ambos lados de la plancha, además es importante mencionar que las curvas presentan la misma tendencia y sus resultados son cercanos en la cara superior e inferior.



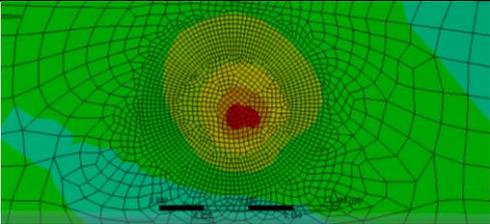
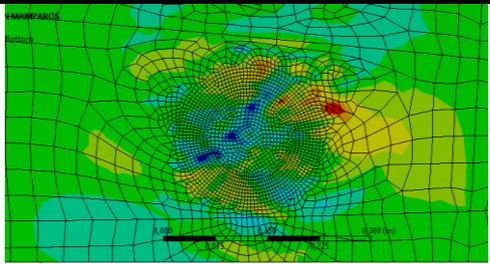
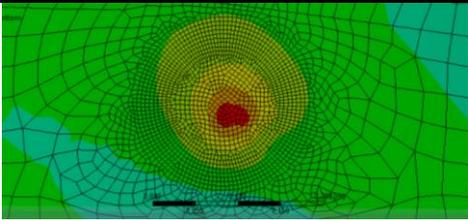
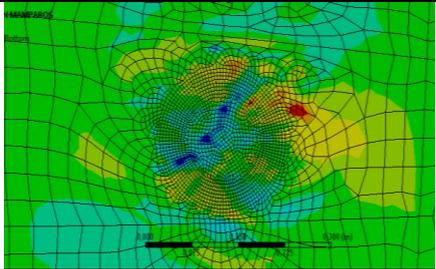
**Gráfico 2.3: Esfuerzos Normales en la cara superior.**



**Gráfico 2.4: Esfuerzos Normales en la cara inferior**

En la cara superior de la plancha del fondo se alcanza esfuerzos máximos en X de 237.8 MPa y en la cara inferior -219.6 MPa, es decir la flexión es preponderante. Por otro lado se logra superar valores superiores al esfuerzo de fluencia del aluminio: 205 MPa. Otra componente que aporta en la flexión de la plancha es la dirección Y, que alcanza un máximo en la cara superior de 230.5 MPa, mientras que en la cara

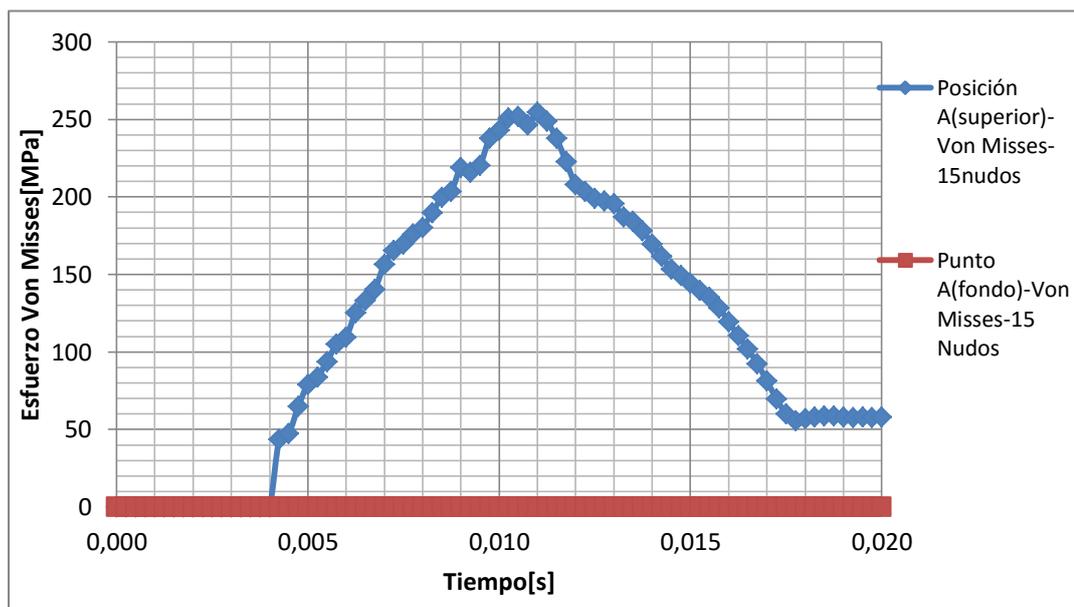
inferior es de -189.6 MPa. En la Tabla 9 se muestra las zonas donde se alcanzan los esfuerzos máximos identificados con rojo.

| ESFUERZOS NORMAL X- POSICIÓN IMPACTO: A   |  |
|---|--|
|    | Dirección: X<br>Velocidad [nudos]: 15<br>Esfuerzo Normal máximo [MPa]: +237.8  |
| <b>Esfuerzo Normal (superior)</b>   |  |
|   | Dirección: -X<br>Velocidad [nudos]: 15<br>Esfuerzo Normal máximo [MPa]: -219.6 |
| <b>Esfuerzo Normal (inferior)</b>   |  |
| ESFUERZOS NORMAL Y- POSICIÓN IMPACTO: A   |  |
|  | Dirección: Y<br>Velocidad [nudos]: 15<br>Esfuerzo Normal máximo [MPa]: +230.5  |
| <b>Esfuerzo Normal (superior)</b>   |  |
|  | Dirección: -Y<br>Velocidad [nudos]: 15<br>Esfuerzo Normal máximo [MPa]: -189.6 |
| <b>Esfuerzo Normal (inferior)</b>   |  |

**Tabla 9: Distribución de Esfuerzos normales por impacto en centro de la plancha**

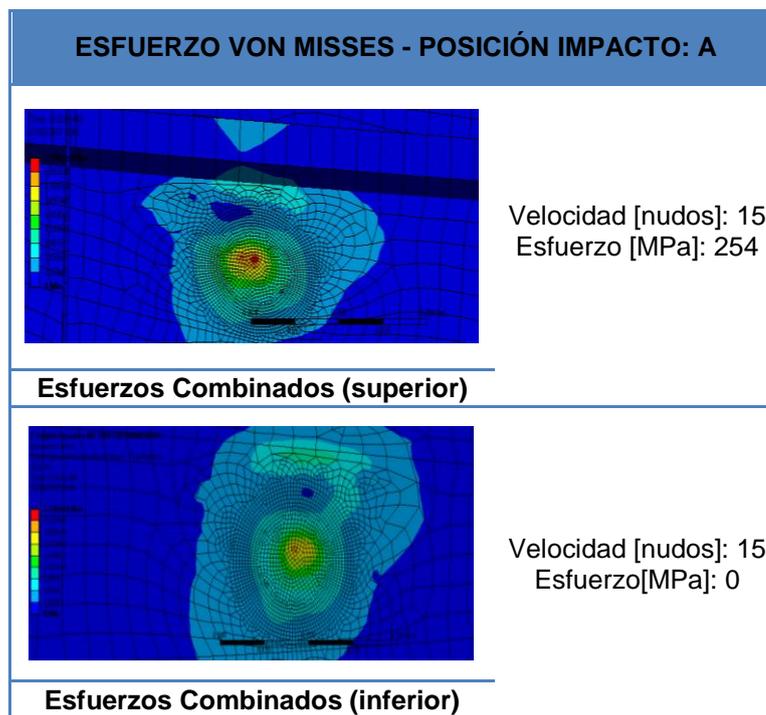
### Esfuerzos Equivalentes con velocidad de 15 nudos

El esfuerzo equivalente de Von Misses alcanza un valor máximo en la cara superior de 254.6 MPa, y en la cara inferior despreciable. Luego del máximo esfuerzo durante el impacto, los esfuerzos decrecen en el tiempo hasta establecerse en 57 MPa, indicando que existe una deformación permanente.



**Gráfico 2.5: Esfuerzo equivalente en cara superior - fondo**

En la Tabla 10 se muestra las distribuciones de los esfuerzos equivalentes desarrollados en la plancha. La zona de color rojo indica el máximo esfuerzo desarrollado en el fondo de la sección y el color azul indica mínimo esfuerzo.



**Tabla 10: Representación por colores de los esfuerzos equivalentes en el Punto A**

#### **Deflexión del fondo en punto A con velocidad de 17 nudos**

Una vez analizados los resultados en el centro de la plancha por los impactos con velocidad de 15 nudos se procede a investigar la respuesta del fondo con velocidad de 17 nudos. En Anexo A1, se muestran las curvas de deflexión con las dos velocidades analizadas. Con 17 nudos la cara superior del fondo alcanza un máximo de 5.76 mm mientras que en los alrededores de la zona impactada un mínimo de 0.55 mm.

En las gráficas del Anexo A1, muestra que luego de alcanzar la máxima deformación, la plancha del fondo no regresa a su posición inicial, es más, el fondo y sus miembros estructurales como refuerzos longitudinales 1-2 y la varenga 2 continúan vibrando por efecto del impacto. Esto se puede chequear en el Anexo A2, que a través de colores se identifica la zona de máxima deflexión por color rojo y por colores celeste las deflexiones menores a 1 mm.

### **Esfuerzos normales y equivalentes en punto A con 17 nudos**

Los esfuerzos más importantes se presentan en las direcciones X e Y. En la dirección Z los esfuerzos desarrollados son pequeños y por ello se los omitirá. Los esfuerzos equivalentes (Von Misses) para velocidades de 15 y 17 nudos se muestran en los Anexos A3 con la finalidad de poder compararlas. Se observa que el máximo se presenta con valores de 255 y 288 MPa respectivamente, superando ampliamente el esfuerzo de fluencia del aluminio. Cuando el impacto es 17 nudos el máximo esfuerzo es muy próximo al de fractura del aluminio 5086- H32; 290 MPa.

#### **2.2. Impacto en un refuerzo longitudinal (Punto B).**

Se investiga cuando el impacto se produce sobre el refuerzo longitudinal 1, denominado punto B, Figura 1.9. Se mantienen las componentes de la velocidad de la primera prueba.

#### **Deflexión en punto B con 15 nudos**

Los resultados obtenidos luego de la simulación de impacto en el punto B presentan deflexiones en la dirección Z: 3.65 mm, las otras componentes son menores a 1 mm de deflexión, ver Anexo A4. Se observa la representación por colores de la deflexión del fondo en Anexo A5. Note que el impacto no afecta únicamente el refuerzo longitudinal, sino que involucra a la plancha del fondo a estribor del refuerzo, esto parece que se debe a la forma del golpeador.

### **Esfuerzos normales y equivalentes en Punto B con 15 nudos**

Se observa que los esfuerzos en X e Y son los que alcanzan mayores valores: 292 MPa y 230.5 MPa respectivamente. Los esfuerzos en la dirección Z son menores a 50 MPa por lo que se desprecian. Ver Anexo A6. Calculando el esfuerzo equivalente se tiene que el máximo valor es: 281 MPa, ver Anexo A7. Luego de haber alcanzado el máximo se observa que decrece para establecerse en 55 MPa; esto indica que esta zona queda deformada luego del impacto.

### **Deflexión en punto B con velocidad de 17 nudos**

Luego de conocer las deformaciones direccionales se presenta en Anexo A8 los resultados en la dirección Z (+) de la plancha del fondo. El máximo valor alcanzado es 4.12 mm. Luego su deflexión decrece hasta 0.6 mm.

### **Esfuerzos equivalentes en el punto B con 17 nudos**

Como ya es conocido que los esfuerzos más representativos se dan en las direcciones X e Y, observados en los resultados de 15 nudos, se omite su presentación, y en su lugar se muestra directamente los esfuerzos equivalentes a 15 y 17 nudos. Ver Anexos A9. Los esfuerzos máximos para 15 y 17 nudos son: 280.7 MPa y 312.8 MPa respectivamente. Además se observa que comienzan a decrecer hasta establecerse en 55 MPa indicando que hay una deformación permanente.

## **2.3. Impacto en el Refuerzo Transversal 2 (punto C)**

Como últimas simulaciones se impactó en el refuerzo transversal 2, denominado punto C, con las velocidades mencionadas previamente.

### **Deflexión en el punto C con 15 nudos**

Las deflexiones en las direcciones principales se muestran en el Anexo A10. Se observa que la dirección con mayor componente es vertical con 1.30 mm mientras que en las otras direcciones la deflexión es menor a 0.5 mm. Luego de alcanzar la máxima deflexión se observa una vibración local de la estructura.

### **Esfuerzos Normales y Equivalentes en el punto C con 15 nudos**

Los esfuerzos normales máximos alcanzados en el fondo son en dirección X: 87.3 MPa; en Y: 48.2 MPa; y en Z: 18.8 MPa. (Ver Anexo A11). Luego de alcanzar el máximo se observa que los esfuerzos tienen tendencia decreciente, finalmente presenta esfuerzos normales menores a 20 MPa. En el Anexo A12 se muestra una representación por colores de las zonas donde existe concentración de esfuerzos en las direcciones investigadas. El color rojo representa las zonas de esfuerzos normales máximos, y el color azul indica la zona donde los esfuerzos son mínimos.

En cuanto al esfuerzo equivalente, (Von Misses) se llega a tener un máximo de 79.03 MPa, y finalmente se establecen en 15 MPa, ver Anexo A14. Es decir no se alcanza el límite de fluencia del aluminio cuando se impacta la zona C, a diferencia de lo que ocurre los puntos A, B.

### **Deflexión en Punto C con 17 nudos**

Se presentan los resultados de la deflexión en dirección vertical, componente con mayor desplazamiento: 1.46mm; en las otras direcciones X, Y sus valores son 0.27 y 0.54 mm respectivamente. Se observa además que las curvas de 15 y 17 nudos presentan tendencia similar, ver Anexo A13.

### **Esfuerzos equivalentes con 17 nudos**

Los esfuerzos de Von Misses se presentan en el anexo A14, donde sus valores máximos para 15 y 17 nudos son 79.03 MPa y 91.1 MPa, respectivamente. Es

importante mencionar que con 17 nudos los esfuerzos Von Misses no superan los 100 MPa. Por último se describe que la curva de esfuerzos se establece en 18 MPa indicando una deformación permanente.

## 2.4. Resumen de resultados

A continuación se presenta un resumen de resultados de Desplazamiento  $U_i$ ; la fuerza de contacto,  $F_c$ , entre el golpeador y la plancha en la dirección Z; el esfuerzo normal  $\sigma_i$ , en la dirección  $i$ .

| Lugar de impacto        | Parámetro           | Velocidad: 15 nudos |                        | Velocidad: 17 nudos |                        |
|-------------------------|---------------------|---------------------|------------------------|---------------------|------------------------|
|                         |                     | Fondo [Adyacente]   | Superior [En el punto] | Fondo [Adyacente]   | Superior [En el punto] |
| CENTRO                  | $U_x$ [mm]          | -0.5                | 0.1                    | -1.2                | 1.2                    |
|                         | $U_y$ [mm]          | -1.9                | 0.2                    | 0.4                 | -2.2                   |
|                         | $U_z$ [mm]          | -0.4                | 5.1                    | -0.6                | 5.8                    |
|                         | $\sigma_x$ [MPa]    | -220                | 238                    | -297                | 328                    |
|                         | $\sigma_y$ [MPa]    | -190                | 231                    | -245                | 292                    |
|                         | $\sigma_z$ [MPa]    | -38                 | 47                     | -53                 | 66                     |
|                         | $\sigma_{eq}$ [MPa] | 0                   | 255                    | 0                   | 288                    |
|                         | $F_c$ [KGF]         | 682                 |                        | 795                 |                        |
|                         |                     |                     |                        |                     |                        |
| REFUERZO LONGITUDINAL 1 | $U_x$ [mm]          | -0.6                | 0.8                    | -0.8                | 1.0                    |
|                         | $U_y$ [mm]          | -1.3                | 0.8                    | -1.5                | 1.0                    |
|                         | $U_z$ [mm]          | -0.6                | 3.6                    | -1.0                | 4.1                    |
|                         | $\sigma_x$ [MPa]    | -282                | 292                    | -312                | 325                    |
|                         | $\sigma_y$ [MPa]    | -217                | 230                    | -240                | 264                    |
|                         | $\sigma_z$ [MPa]    | -46                 | 45                     | -56                 | 51                     |
|                         | $\sigma_{eq}$ [MPa] | 0                   | 281                    | 0                   | 313                    |
|                         |                     |                     |                        |                     |                        |

|                               |                            |      |     |      |     |
|-------------------------------|----------------------------|------|-----|------|-----|
|                               | <b>F<sub>c</sub>[KGF]</b>  | 552  |     | 691  |     |
| <b>REFUERZO TRANSVERSAL 2</b> | <b>U<sub>x</sub> [mm]</b>  | -0.2 | 0.2 | -0.3 | 0.3 |
|                               | <b>U<sub>y</sub> [mm]</b>  | -0.4 | 0.5 | -0.5 | 0.5 |
|                               | <b>U<sub>z</sub> [mm]</b>  | -1.4 | 1.3 | -1.6 | 1.5 |
|                               | <b>σ<sub>x</sub> [MPa]</b> | -80  | 87  | -92  | 95  |
|                               | <b>σ<sub>y</sub> [MPa]</b> | -65  | 48  | -77  | 56  |
|                               | <b>σ<sub>z</sub> [MPa]</b> | -42  | 19  | -48  | 22  |
|                               | <b>σ<sub>eq</sub>[MPa]</b> | 0    | 79  | 0    | 91  |
|                               | <b>F<sub>c</sub>[KGF]</b>  | 1987 |     | 2636 |     |

**Tabla 11: Resumen de Resultados**

Los resultados de la Tabla 11 muestran que la mayor deflexión se da en el centro de la plancha, y el menor cuando se golpea en el refuerzo transversal, como era lo esperado considerando su elevada rigidez. Sin embargo el esfuerzo máximo se presenta cuando se impacta en el punto B, esto debido a que la zona de impacto no solo involucra al refuerzo longitudinal sino que parte de la plancha, y es en ella donde se desarrollan los mayores esfuerzos. Además se observa que la fluencia del aluminio se alcanza luego del impacto con ambas velocidades en A y B, es decir en los puntos menos rígidos.

La fuerza de contacto que se desarrolla entre el fondo y el golpeador es mayor cuando se impacta en el punto C, esto se debe a que el sólido tiene mayor componente vertical de movimiento por la geometría de la embarcación, no así en los casos de impacto en A y B.

## CAPITULO 3

### 3. ANALISIS DEL IMPACTO SOBRE UN DISEÑO ALTERNATIVO.

Luego de realizar las simulaciones por impacto en la estructura original del fondo de la embarcación y observar que los esfuerzos equivalentes superan los de fluencia cuando se golpea los puntos A y B, se va a analizar una alternativa en el diseño del fondo. Se va a mantener la rigidez flexural del panel reforzado calculado con la inercia combinada de plancha y refuerzos longitudinales. Luego se procede a simular la respuesta a impactos similares con velocidades de 15 y 17 nudos, y se compararán los resultados con ambos diseños.

#### 3.1. RIGIDEZ EQUIVALENTE Y MODELADO DEL DISEÑO ALTERNATIVO

Para desarrollar un diseño alternativo, se va a mantener la rigidez flexural de la combinación plancha más refuerzos longitudinales. Ver figura 3.1. Se inicia por calcular la inercia del fondo de la embarcación con los tres refuerzos longitudinales junto a la plancha del fondo, ver Anexos A15. Luego se prueban otras configuraciones de arreglo estructural cambiando las dimensiones de los refuerzos L, así como la separación entre ellos, manteniendo el espesor de los refuerzos longitudinales y plancha del fondo.

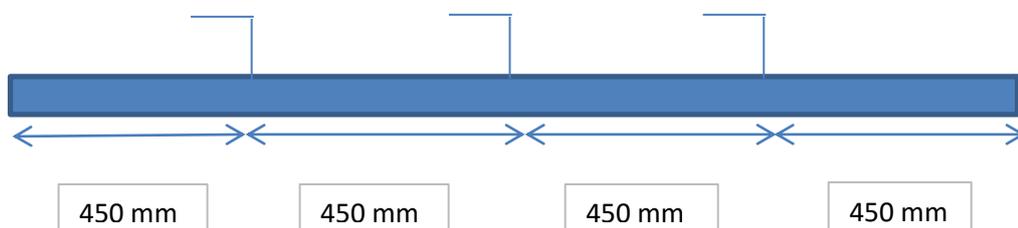


Figura 3.1: Esquema simplificado estructural del fondo a babor

Luego de calcular la inercia de la sección del fondo por milímetro de separación de refuerzos, se procede a probar con otras dimensiones de refuerzos y separación entre ellos. El valor de inercia por mm de separación del sistema original es  $8.19E+03 \text{ mm}^3$ . Ver tabla 12.

| Descripción del Refuerzo                   | Diseño alternativo |          |          | Diseño original |
|--|--------------------|----------|----------|-----------------|
|  | L 1 ½"             | L 1 ¾"   | L 1 ¾"   | L 2"            |
| Ancho plancha fondo [mm]                   | 1800               | 1800     | 1800     | 1800            |
| Número de refuerzos                        | 5                  | 5        | 4        | 3               |
| espaciamiento refuerzos [mm]               | 300                | 300      | 360      | 450             |
| Inercia respecto al E.N.[mm <sup>4</sup> ] | 2.71E+06           | 4.02E+06 | 3.33E+06 | 3.69E+06        |
| Inercia/ separación [mm <sup>3</sup> ]     | 9.02E+03           | 1.34E+04 | 9.25E+03 | 8.19E+03        |

**Tabla 12: Configuraciones estructurales probadas**

El arreglo alternativo que más se acerca al original usando elementos estructurales disponibles en el mercado son los refuerzos en L de 1 ½" separados 300 mm. De acuerdo a la Sociedad de Clasificación DNV, [7], es el mínimo espaciamiento permitido para que pase el cordón de soldadura. En el Anexo A16 se muestra en detalle del cálculo de inercia del fondo para esta alternativa estructural.

Posteriormente se modela con elementos finitos la sección del fondo con el arreglo estructural seleccionado y se procede a analizar el impacto en forma similar al capítulo anterior.

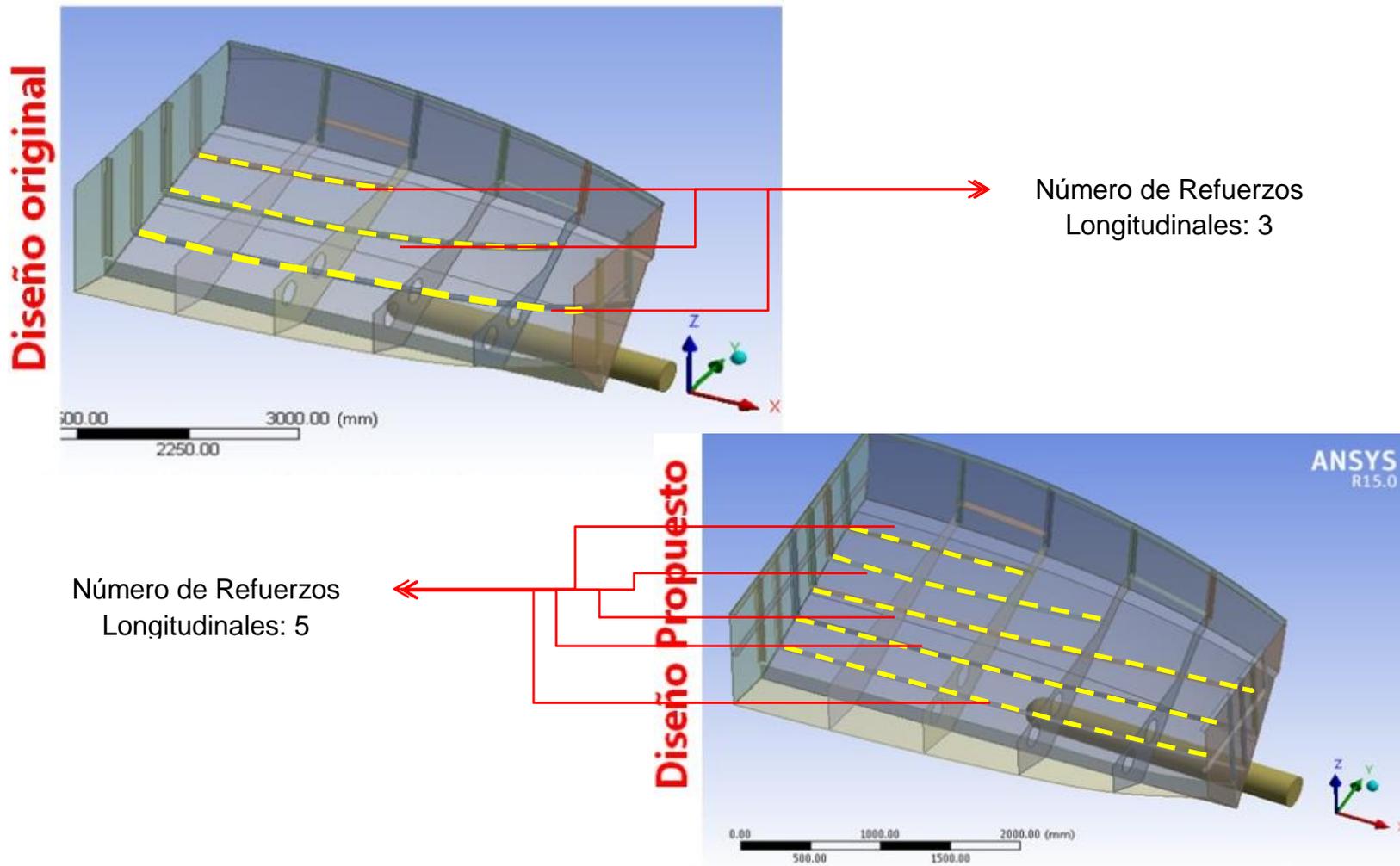


Figura 3.2: Comparación entre diseño estructural original y alternativo

### 3.2. Resultados del impacto.

A continuación se presentan los resultados de deflexión y esfuerzos. En el capítulo 2 se pudo identificar las componentes de mayor importancia. Se impacta las mismas zonas A, B y C, con las mismas velocidades, 15 y 17 nudos.

#### Deflexiones en el punto A con 15 y 17 nudos.

Los resultados de deflexión se presentan en la dirección Z en donde se puede observar que los máximos valores alcanzados con 15 nudos son 3.30 mm y con 17 nudos: 3.74 mm. Posteriormente la deflexión decrece hasta 0.1 mm Ver Gráfico 3.1.

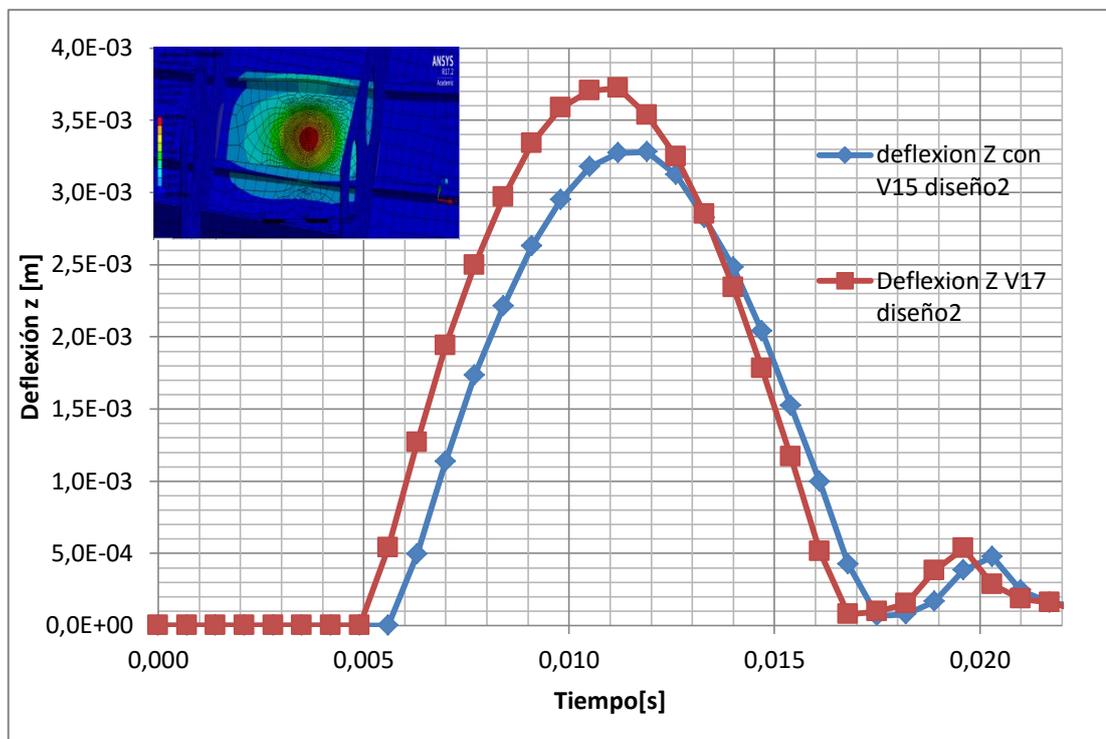


Gráfico 3.1: Deflexión Z en punto A con 15 y 17 nudos

### Esfuerzos Equivalentes en el punto A con 15 y 17 nudos

Los esfuerzos equivalentes resultantes de la simulación alcanzan valores máximos de 283 MPa y 322 MPa con velocidades de 15 y 17 nudos respectivamente, que superan la fluencia del aluminio. Luego comienzan a decrecer los esfuerzos hasta finalmente mantenerse en 57 MPa, indicando que hay deformación permanente. Ver Gráfico 3.2.

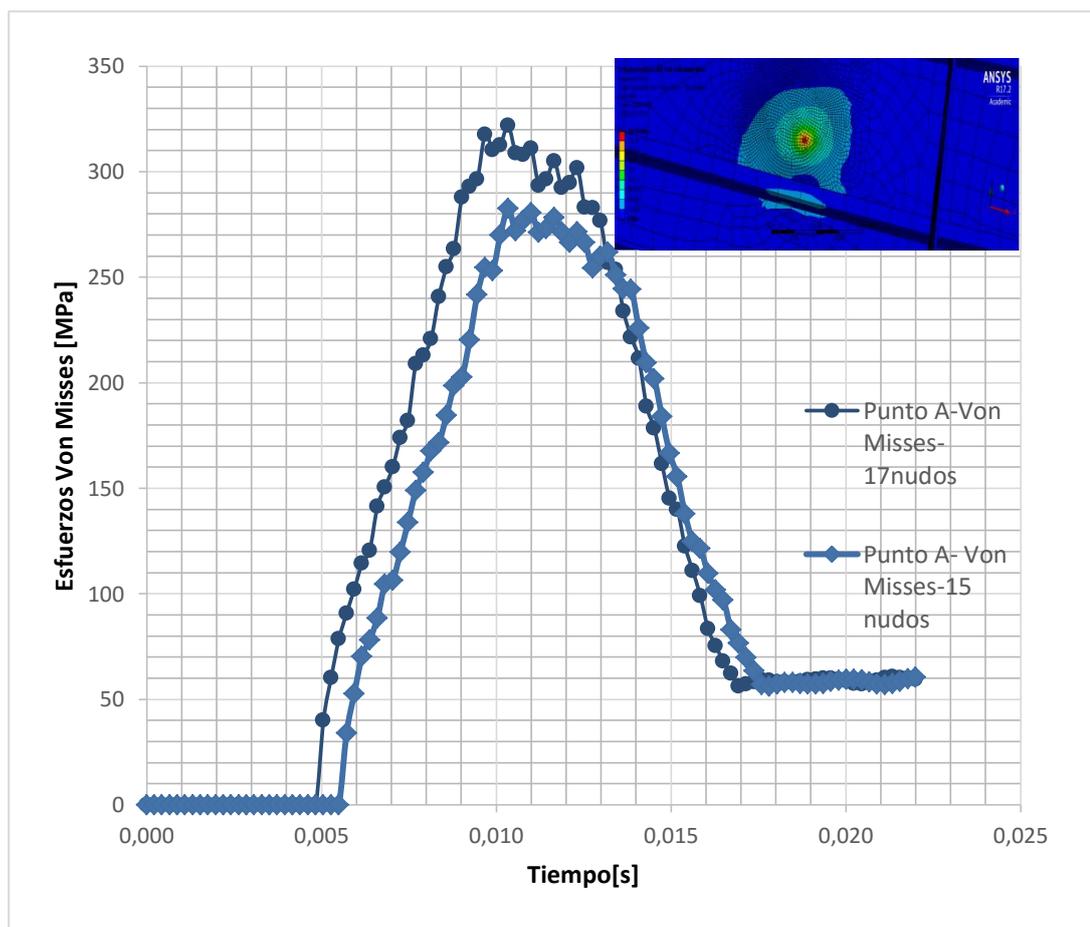


Gráfico 3.2: Esfuerzos equivalentes en punto A, con 15 y 17 nudos.

### Deflexiones en el punto B con 15 y 17 nudos

La deflexión máxima en dirección vertical con velocidades de 15 y 17 nudos fueron: 1.57 mm y 1.80 mm. Finalmente la zona impactada tiene deflexión permanente de para 15 y 17 nudos de 0.2 mm y 0.4 mm respectivamente. Ver Gráfico 3.3.

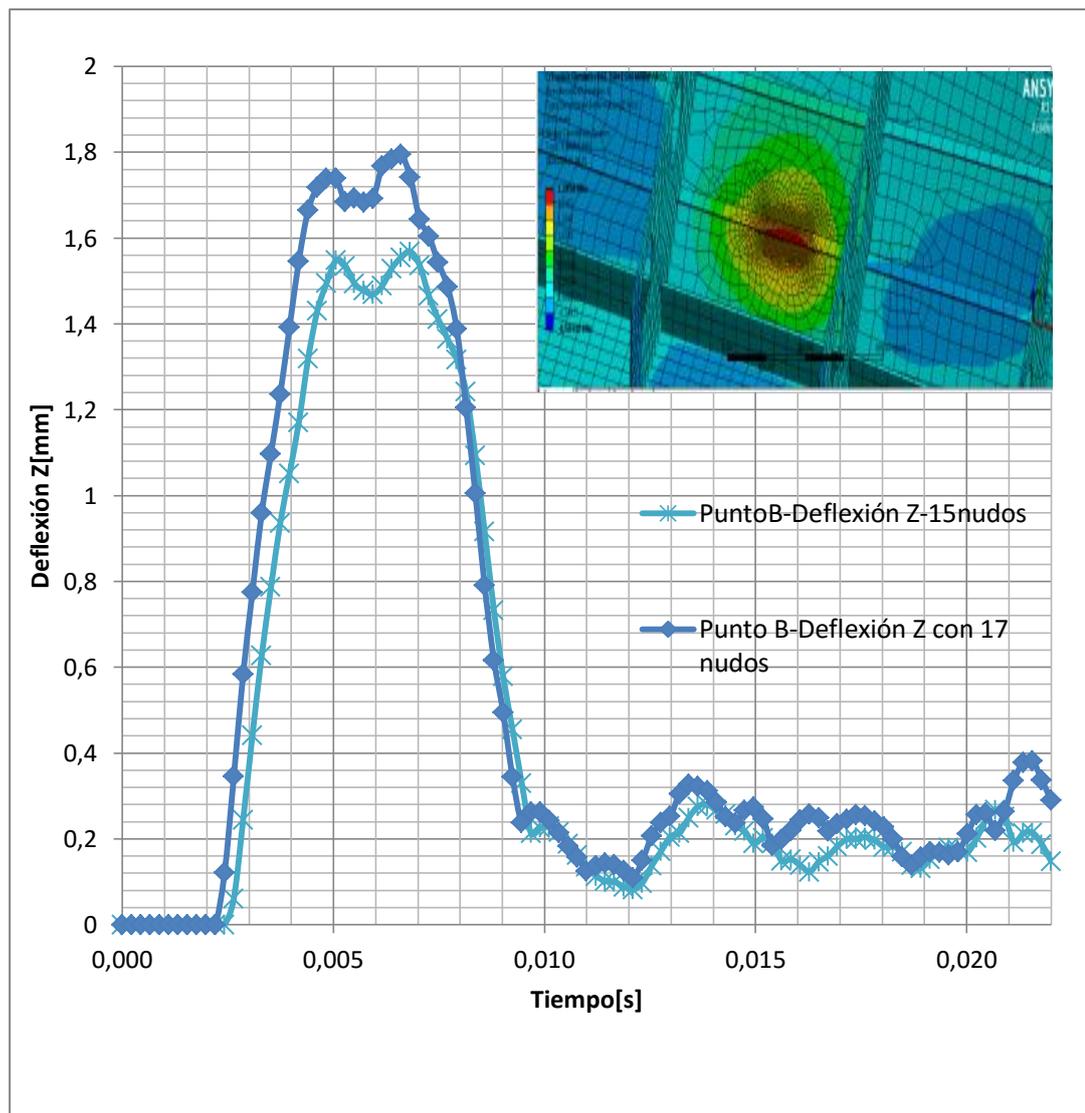


Gráfico 3.3: Deflexión Z en punto B con velocidades 15 y 17 nudos

### Esfuerzos equivalentes en punto B con 15 y 17 nudos

En el Gráfico 3.4 se observan los esfuerzos equivalentes. Con 15 nudos el esfuerzo máximo es 121 MPa, y 138 MPa con 17 nudos. Luego de alcanzar los máximos, los esfuerzos decrecen hasta establecerse en alrededor de 21 MPa.

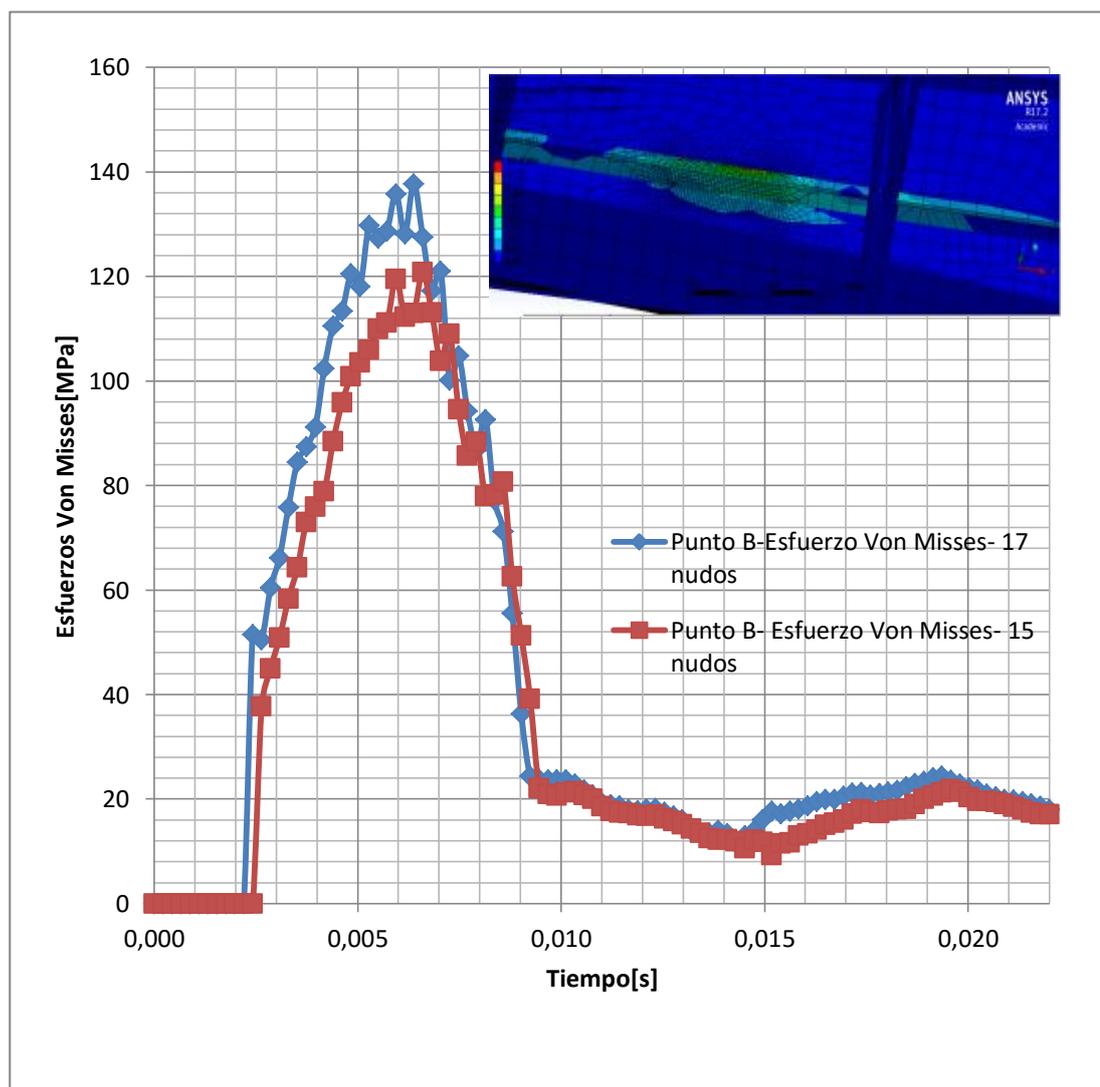


Gráfico 3.4: Esfuerzos Equivalentes en punto B con velocidades de 15 y 17 nudos.

### Deflexión en el punto C con 15 y 17 nudos

El impacto sobre el refuerzo transversal 2 (punto C) presenta como máxima deflexión: 0.65 mm y 0.74 mm para las velocidades de 15 y 17 nudos. Ver Gráfico 3.5. Luego se observa que hay oscilación resultante, con oscilación  $\tau_r$ , 6.7 E-03 segundos en promedio.

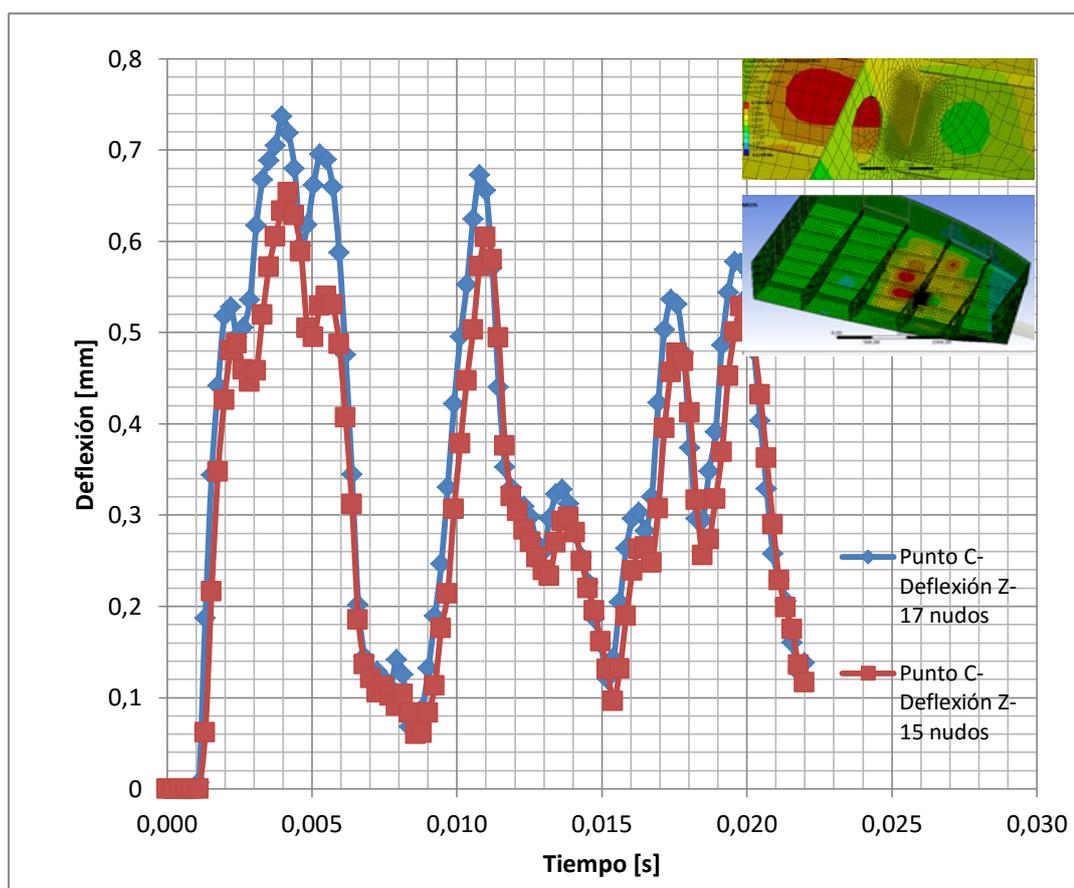


Gráfico 3.5: Deflexión Z en punto C con 15 y 17 nudos.

### Esfuerzos equivalentes en el punto C con 15 y 17 nudos

En el Gráfico 3.6 se observan los esfuerzos equivalentes. Los valores máximos son 164 MPa, y 189 MPa para 15 y 17 nudos respectivamente. Luego de alcanzar los respectivos máximos, los esfuerzos decrecen hasta establecerse en alrededor de 27 MPa y 32 MPa para 15 y 17 nudos.

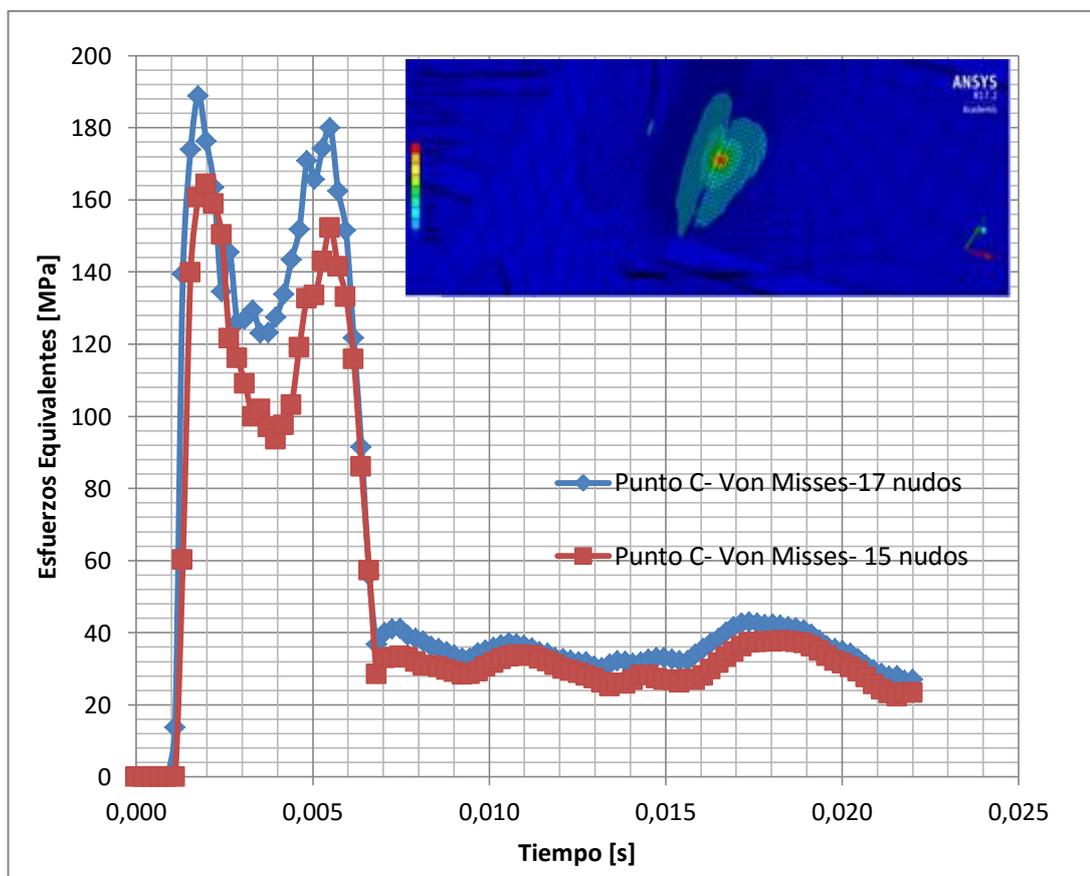


Gráfico 3.6: Esfuerzos equivalentes en el punto C con 15 y 17 nudos

### 3.3. Resumen de resultados de las simulaciones del diseño alternativo.

A continuación se muestra un resumen de los resultados del impacto sobre la estructura original y la alternativa. Se han calculado también los cambios porcentuales de las deflexiones y los esfuerzos equivalentes, y en los anexos A17 y A18 se muestran gráficamente las deflexiones y esfuerzos con las velocidades de prueba.

| DEFLEXION Z [mm]             |                 |     |                    |     |                      |      |
|------------------------------|-----------------|-----|--------------------|-----|----------------------|------|
|                              | Diseño original |     | Diseño Alternativo |     | Reducción porcentual |      |
| Velocidad [nudos]            | 15              | 17  | 15                 | 17  | 15                   | 17   |
| Punto A                      | 5.1             | 5.8 | 3.3                | 3.7 | -35%                 | -36% |
| Punto B                      | 3.7             | 4.1 | 1.6                | 1.8 | -58%                 | -56% |
| Punto C                      | 1.4             | 1.5 | 0.7                | 0.7 | -54%                 | -51% |
| ESFUERZOS EQUIVALENTES [MPa] |                 |     |                    |     |                      |      |
| Punto A                      | 255             | 288 | 283                | 322 | 11%                  | 12%  |
| Punto B                      | 281             | 313 | 121                | 138 | -57%                 | -56% |
| Punto C                      | 79              | 91  | 164                | 189 | 108%                 | 108% |

**Tabla 13: Resumen de resultados con ambos modelos**

Para el punto A: La deflexión máxima se reduce en 35% y 36% para velocidades de 15 y 17 nudos entre el modelo original y el diseño estructural alternativo. En cambio los esfuerzos equivalentes desarrollados en la alternativa estructural son mayores, esto es 283 MPa y 322 MPa, los cuales representan un incremento en 11% y 12% para las velocidades probadas. Para esta última velocidad, el esfuerzo equivalente supera el de ruptura del Aluminio (290 MPa).

Para el punto B: La deflexión máxima se reduce en 58% y 56% con respecto al diseño original para las velocidades probadas. Los esfuerzos equivalentes son 121 MPa y 138 MPa, lo que representa un porcentaje de reducción de esfuerzos del

57% y 56% para 15 y 17 nudos. Cabe mencionar que los esfuerzos no superan la fluencia del aluminio, 205 MPa,

Para el punto C: Las deflexiones máximas para 15 y 17 nudos son 0.65 y 0.74 mm, respectivamente con el nuevo diseño. Estos valores representan una reducción porcentual del 54% y 51% con respecto al diseño original. Sin embargo los esfuerzos equivalentes aumentaron a 164 MPa y 189 MPa con 15 nudos y 17 nudos que corresponde a un incremento del 108%. El cambio radical en los esfuerzos del diseño original con respecto del propuesto es debido a que se registraron los nodos ligeramente a proa del refuerzo transversal, mostrando que los esfuerzos son mayores en la plancha próxima al refuerzo. En este punto de impacto con la configuración original causa menor exigencia estructural.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se han desarrollado simulaciones del impacto sobre el fondo de la embarcación fluvial planeadora y de un golpeador, empleando discretización espacial mediante elementos finitos. El modelo estructural sigue las recomendaciones de la Sociedad de Clasificación DNV sobre la discretización del dominio, de manera que se considera que es adecuado para las simulaciones numéricas propuestas. También se comparan resultados considerando una distribución estructural alternativa con mayor cantidad de refuerzos longitudinales, pero manteniendo la rigidez flexural.

### Conclusiones

1. La discretización del modelo estructural es una parte importante para una simulación numérica de impacto y por ello se empleó elementos planos tetraedros, evitando elementos triangulares, y; además los elementos deben tener relación de aspecto menor a tres. Las anteriores y lo referente al tamaño de la malla, corresponden a las recomendaciones de la sociedad clasificadora de buques DNV para la preparación de modelos con elementos finitos, de manera que el modelo empleado en este trabajo es adecuado para el objetivo buscado.
2. El impacto analizado sobre el diseño del panel original de la embarcación fluvial con velocidades de 15 y 17 nudos se analiza en tres zonas del panel del fondo: en el centro de la plancha entre refuerzos, sobre un refuerzo longitudinal y sobre otro transversal. De ellos el que produce mayor deflexión y esfuerzos que exceden el límite elástico se da en la zona central (punto A), provocando deformaciones permanentes. Esto era de esperarse debido a la menor rigidez del panel de este sector. Las deflexiones máximas registradas fueron de 5.8mm, 4.1mm, y 1.5 mm, en los tres puntos de impacto mencionados previamente, para una velocidad de 17 nudos.
3. Cuando el impacto se produce alrededor de los nodos de los refuerzos transversales, sea a proa o popa; y longitudinales, sea a babor o estribor, el nivel de esfuerzos crece aproximadamente al doble, que cuando se impacta en los

nodos de estos refuerzos. Es decir hay alta sensibilidad del punto de impacto, produciéndose mayor daño que cuando el fenómeno ocurre sobre la plancha.

4. El impacto analizado en la configuración del fondo estructural alternativa en la que la rigidez flexural del conjunto se mantiene constante, pero se aumenta el número de refuerzos longitudinales de menores dimensiones produce menor afectación en la estructura. Las deflexiones en las zonas de impacto se reducen debido a que el panel de la plancha tiene menores dimensiones, y en los bordes sin embargo los esfuerzos equivalentes se incrementan a consecuencia de que la plancha no tiene oportunidad de flexionarse como antes y por tanto disipar mayor energía. En definitiva, lo recomendable es entonces diseñar la estructura con la mínima separación entre refuerzos permitida por la sociedad que clasifica la embarcación.

### **Recomendaciones**

1. El material empleado en el modelo estructural del fondo de la embarcación se ha considerado como elástico – perfectamente plástico, y según los resultados se ha excedido el límite elástico. Entonces sería recomendable analizar los impactos pero considerando la relación esfuerzo – deformación propia del material, es decir, una variación continua y no lineal entre esfuerzo y deformación unitaria.
2. Sería conveniente también investigar el impacto sobre el fondo del bote considerando tanto su dinámica de cuerpo rígido, así como la del tronco. Es posible que esto lleve a menores efectos sobre el panel investigado, dependiendo de la relación entre cantidades de movimiento de los cuerpos.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] ASTINAVE, Memoria Técnica Lancha ASTINAV 1304-1, 2011.
- [2] ASM International, 2th, "Atlas of stress – strain curves", ASM International print, United States of America, 2002.
- [3] DNV- GL, "Finite Element Analysis", DNVGL-CG-0127, DNV-GL-AS, Oct 2015
- [4] V. Armijos, J. Medina, "Propiedades físico – mecánico de las maderas tipo A: Guayacán Pechiche, Colorado, Sande y Mascarey; y aplicación al diseño del paradero en el IIASA II", ESPE, Ecuador, 2010.
- [5] J.R. Marín, "Notas de Clase Estructuras Navales 2", ESPOL, Ecuador, 2013.
- [6] Explicit Dynamics User Guide, Explicit Dynamics Step Controls, 2014.
- [7] DNV-GL, "Rules for Classification", DNVGL-RU-SHIP-Pt3Ch13, Oct 2015.
- [8] Liu; Guedes Soares; Villavicencio, "Estudio experimental y numérico del impacto lateral de placas rectangulares de aluminio usando golpeadores de diferentes formas", International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, (2013).
- [9] Liu; Guedes Soares; Villavicencio, "Criterio de falla en placas de aluminio y acero empleadas en la estructura de barcos con rigidez equivalente, golpeadas por una semiesfera a baja velocidad", International Journal of Mechanical Sciences, 2014.
- [10] Abdulhamid, Kolopp, Bouvet, y Rivallant, "Estudio experimental y numérico de impacto sobre planchas de aluminio de diferentes espesores empleando golpeadores esféricos de diferentes diámetros y a velocidades superior a los 100 m/s", International Journal of Impact Engineering, 2013.

## ANEXOS

### A0. ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE UN IMPACTO

La simulación de impacto del golpeador contra el fondo de una sección de la lancha se desarrolla empleando el módulo de ANSYS: EXPLICIT DYNAMICS. En el presente subcapítulo se empieza por describir el procedimiento de preparación de dos cuerpos sólidos independientes: el golpeador y la sección a impactar. Posteriormente en Explicit Dynamics se describen los pasos a seguir para desarrollar la conexión de mallas de varios elementos, así como asignar el incremento en tiempo para la posterior integración, incluir las condiciones de frontera y finalmente definir los resultados que se deseen que el programa muestre al final de la simulación.

#### Importación de objetos independientes

La sección de la embarcación generada con el paquete SOLIDWORKS se guardó como superficies con formato IGS, luego se la importa como ARCHIVO DE GEOMETRÍA EXTERNA desde el Design Modeler de Ansys. Ver figura A0.1.

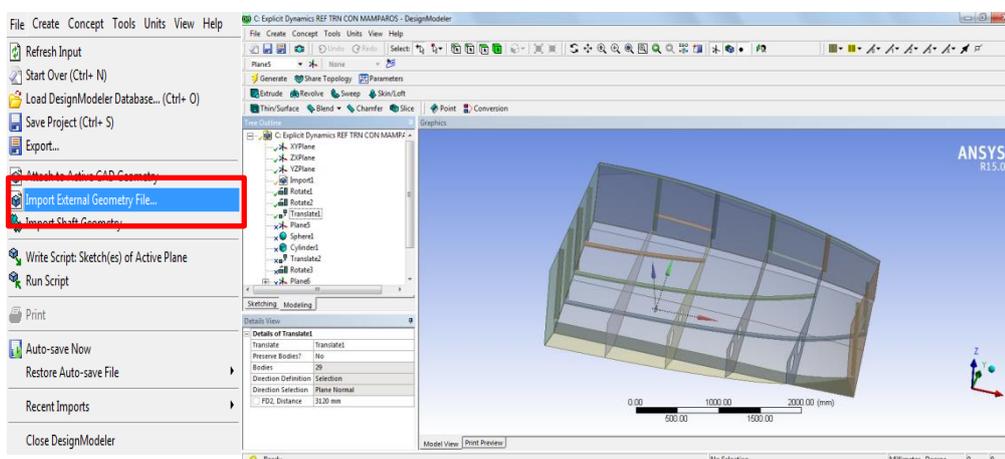


Figura A0. 1: Importación de Geometría externa en Design Modeler

A continuación el objeto sólido puede ser modelado en la misma herramienta de Ansys o por una externa y luego importarla como se mencionó en el párrafo anterior. La única recomendación es declarar a los cuerpos como “ADD FROZEN”, en “Detalle de Vista” en la opción “Operación”; ver figura A0.2. De esta forma será independiente de los otros objetos importados o creados. Caso contrario por omisión aparece activada la opción “ADD MATERIAL”, el cual los asume a todos los objetos como uno solo.

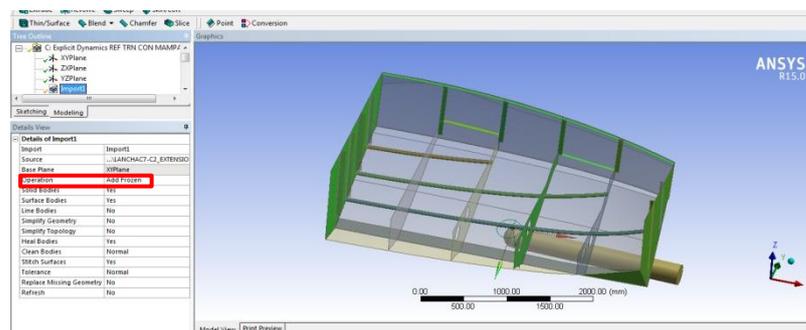


Figura A0. 2: Declaración de sección como “ADD FROZEN”

### Discretización de las zonas de impacto

Para lograr la discretización de las zonas de impacto es necesario definir las regiones que tendrán malla de diferente tamaño en comparación al resto del cuerpo. Para el presente caso en el Design Modeler se define la región a partir de un nuevo plano con base en la cara superior del fondo, ver figura A0.3. A seguir se desarrolla la división de la región del modelo empleando la herramienta FaceSplit que se encuentra en la barra de herramientas, en la opción Tools, ver figura A0.4.

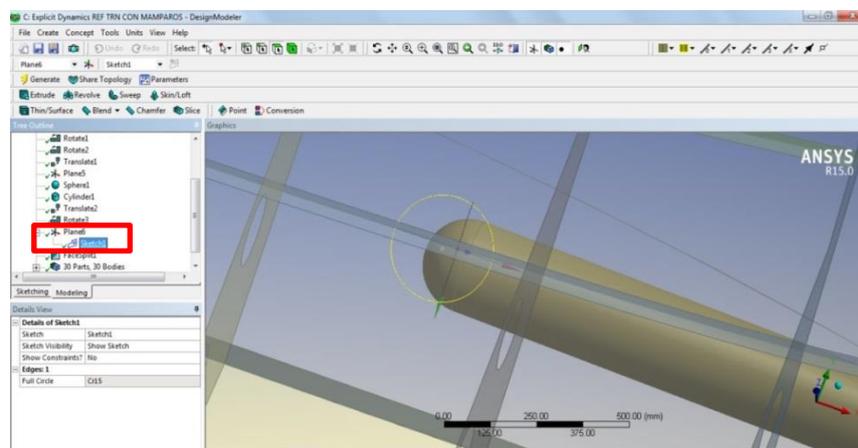


Figura A0. 3: Creación de la región de impacto para su posterior mallado

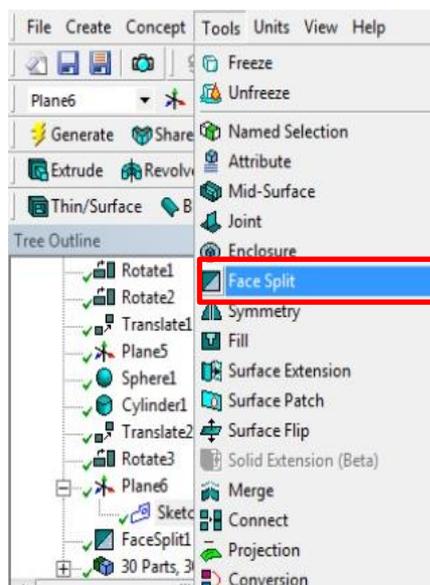


Figura A0. 4: Herramienta FaceSplit

Una vez definidas las divisiones en la superficie se procede al mallado de los objetos. Esto es posible si insertamos un nuevo tamaño de malla “sizing” en la opción MESH, ver figura A0.5. Allí se requiere ingresar el sector, así como el tamaño de malla, y el tipo de mallado que se desea, ver figura A0.6.

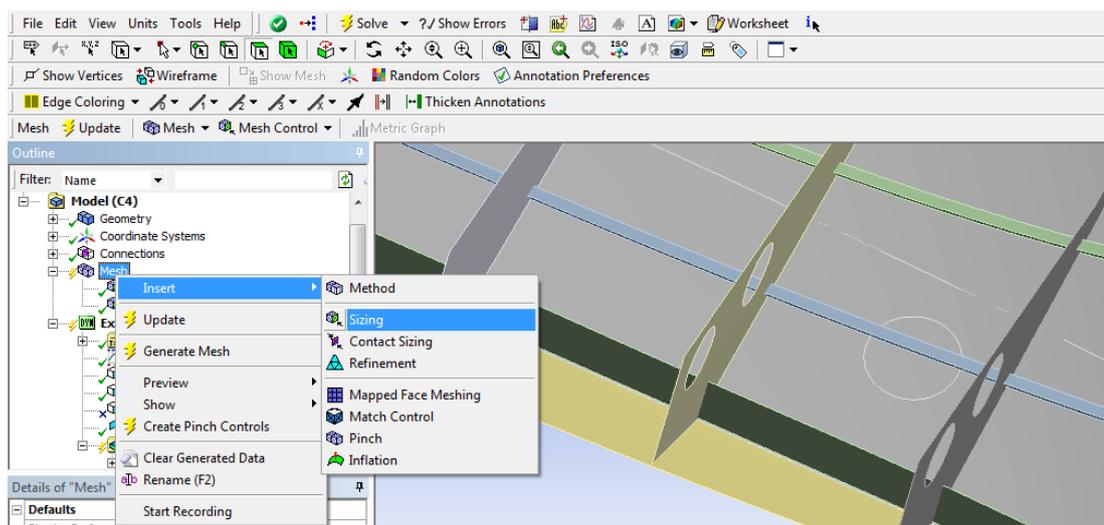


Figura A0. 5: Creación de un nuevo tamaño de malla

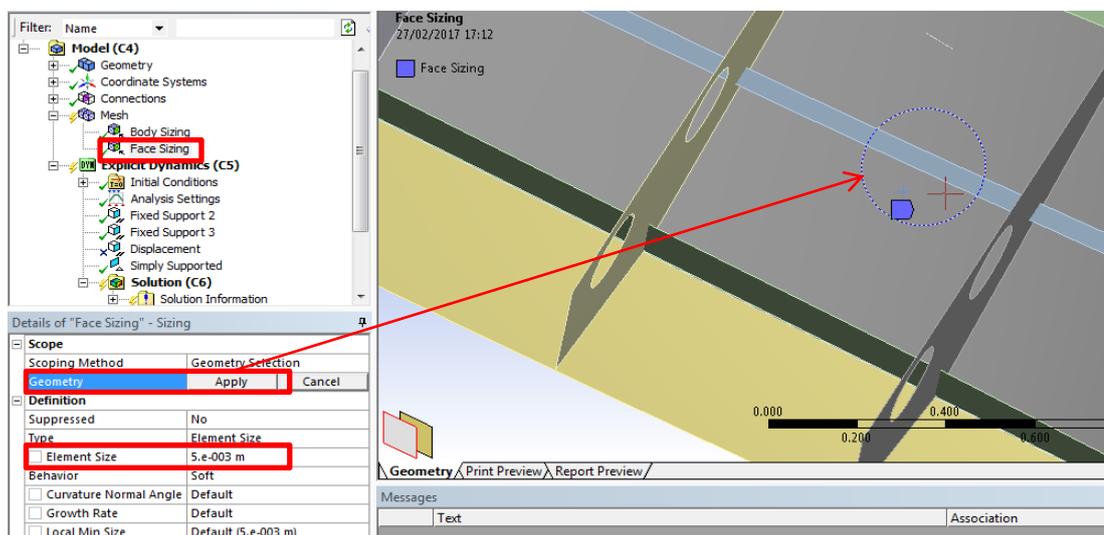


Figura A0. 6: Definición del tamaño de malla y el lugar a aplicar esta propiedad

### Conexión entre mallas en elementos estructurales

La malla de los cuerpos es generada al seleccionar la opción malla, sin embargo no se asegura la unión entre los elementos discretizados, ver figura A0.7. Es por ello que se debe ejecutar la opción MESH CONNECTION, que se encuentra en la opción CONNECTION – INSERT – MANUAL MESH CONNECTION, ver figura A0.8. Esto último permite que los elementos estructurales discretizados se conecten para desarrollar el análisis estructural.

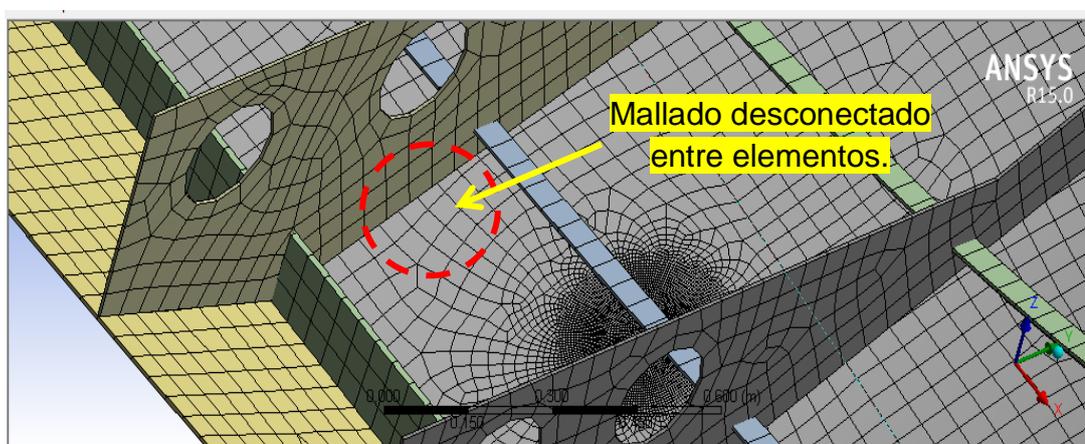


Figura A0. 7: Elementos de la malla sin unir

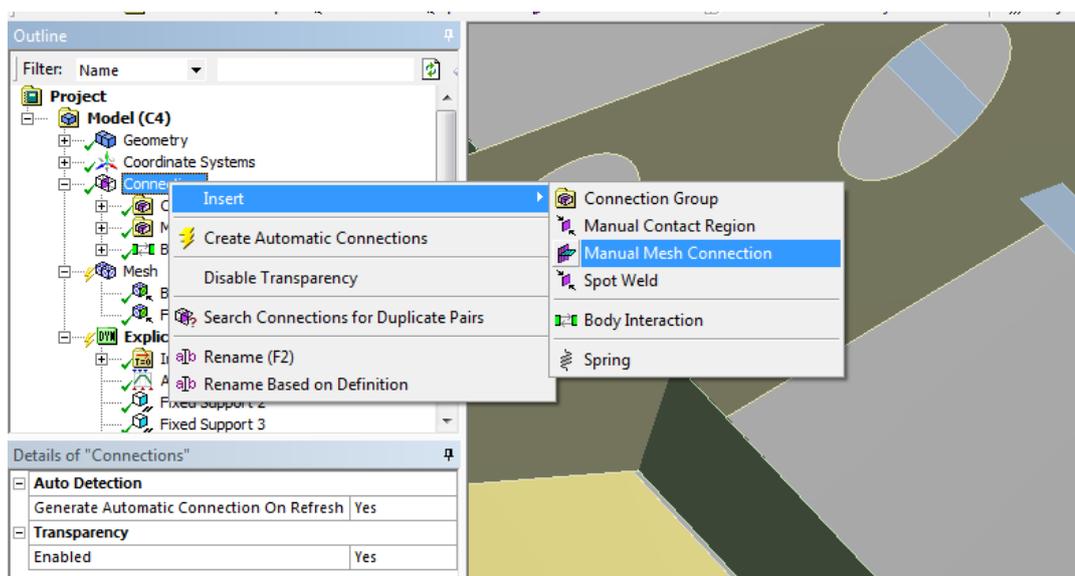


Figura A0. 8: Creación de conexión de malla manual

Una vez insertada la conexión aparece un recuadro del detalle de la conexión, en donde se debe especificar la geometría “Master” y la geometría “Slave”. La primera es la que da el patrón del mallado y la siguiente indica los elementos que se van a conectar a esa malla. Figura A0.9.

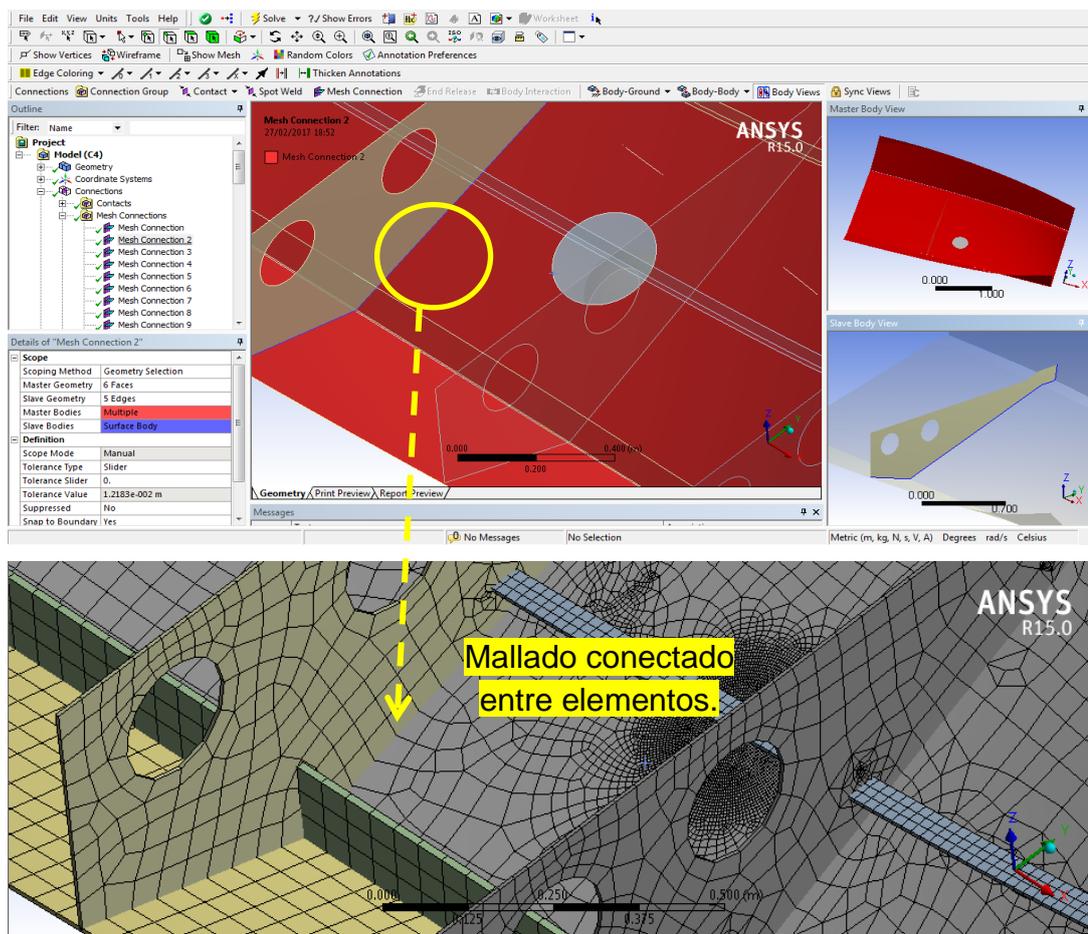


Figura A0. 9: Mallado de elementos unidos

## CONFIGURACION DEL INCREMENTO EN TIEMPO

El incremento en tiempo de la solución se puede modificar al encontrarnos en Analysis Settings, en el menú “Details of Analysis Settings” en la pestaña “Step Controls” en las opciones: “Initial Time Step, Minimum Time Step, Maximum Time Step”. Ver figura A0.10. En estas opciones se ingresa el tiempo inicial de integración, luego el mínimo incremento en tiempo permitido, el cual si llega a caer debajo de dicho valor el análisis automáticamente se detiene; por omisión este valor es 1/10 del incremento del tiempo inicial. Por último el incremento máximo del tiempo permitido, el cual el solucionario usa el mínimo entre este valor o el incremento calculado de estabilidad. Se recomienda que los tres campos estén en la opción “Program Controlled” [6].

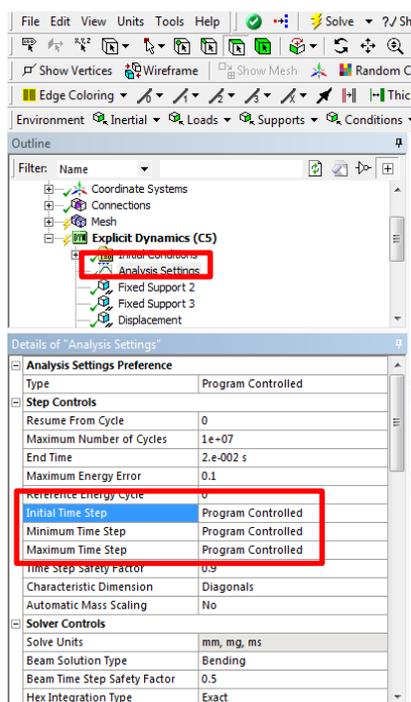


Figura A0. 10: Opciones de incremento en tiempo

## CONDICIONES DE FRONTERA

Para agregar las condiciones de frontera debemos ir al menú “Explicit Dynamics (C5)” –”Insert” –”Fixed Support” si se requiere definir soportes empotrados o “Displacement” en el caso de simplemente soportados. Es necesario que se señalen los nodos o los bordes de la geometría a la cual se van aplicar las condiciones de frontera, esto se encuentra en el menú ”Detail of fixed support” o”Detail of displacement”, en la opción “Geometry”. Note que en la figura A0.11, que se debe indicar para el caso simplemente soportado las componentes X-Y-Z como “Constant”.

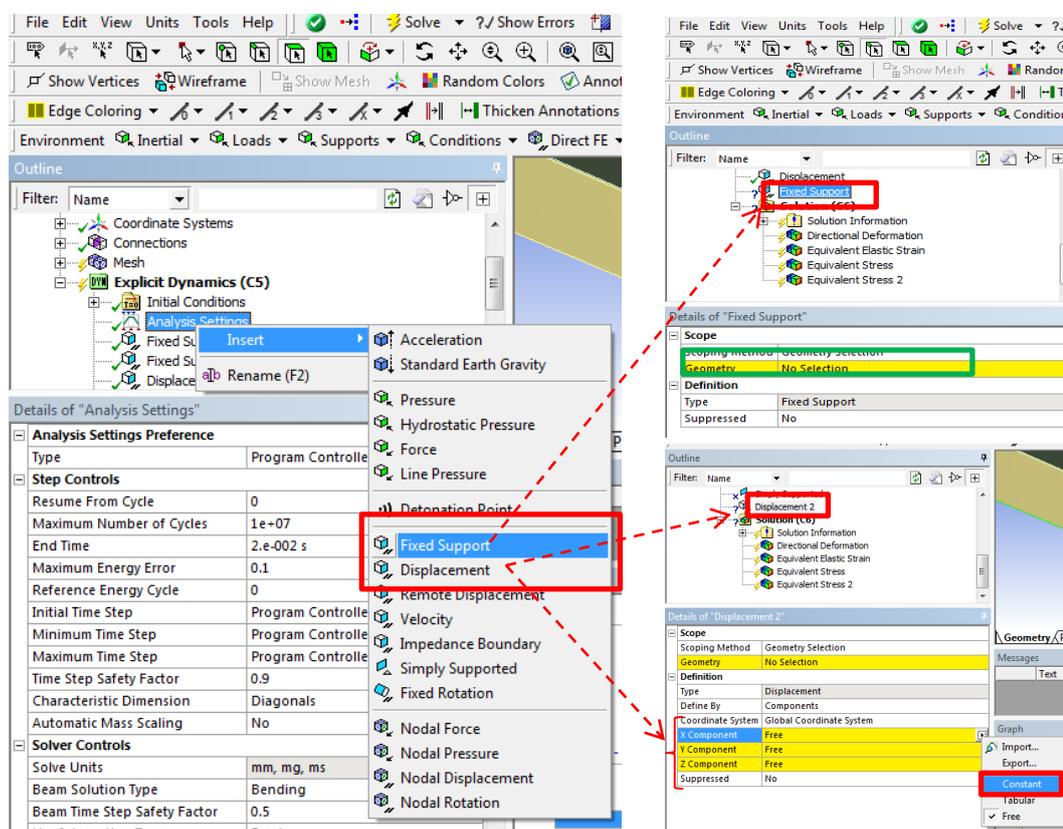


Figura A0. 11: Inserción de Condiciones de Frontera

## PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

Como último ítem dentro de Explicit Dynamics se encuentra *Solution*, el cual añade las soluciones que el usuario requiere al final de la simulación: por ejemplo *Deformation*, que muestra los resultados de deformación en la dirección que se le especifique, y *Stress* que presenta los esfuerzos, ver figura A0.12. Las fuerzas de contacto, fuerza de reacción, energía también se las puede calcular al insertar en la opción *Solution Information* lo requerido, ver figura A0.13.

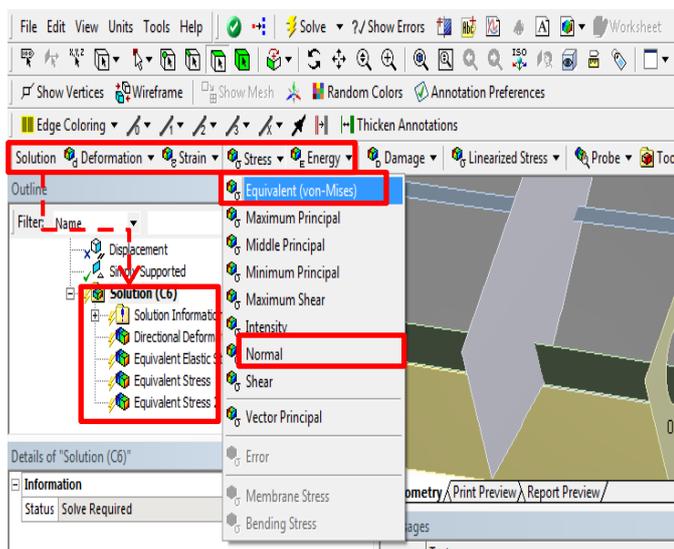


Figura A0. 12: Selección de Resultados a mostrar

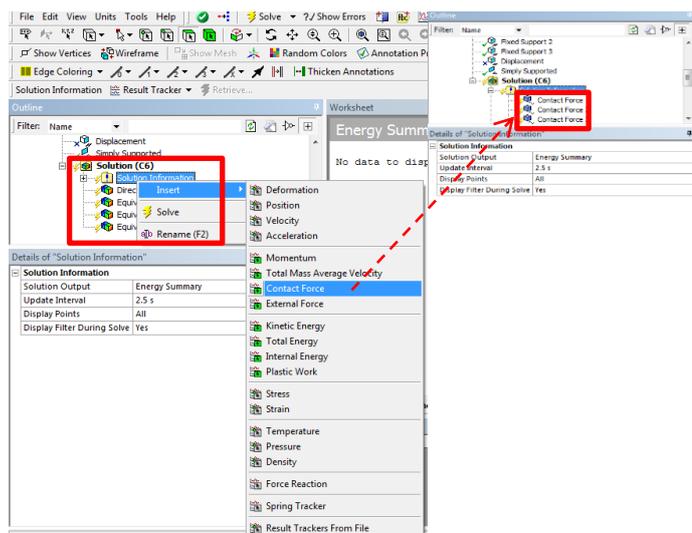
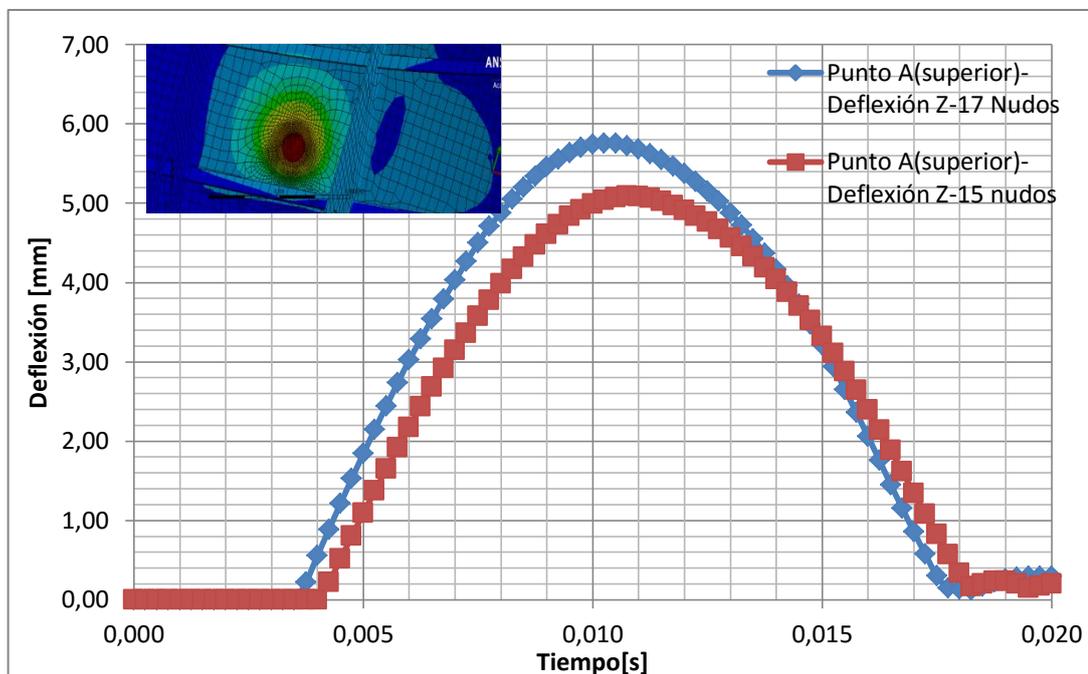


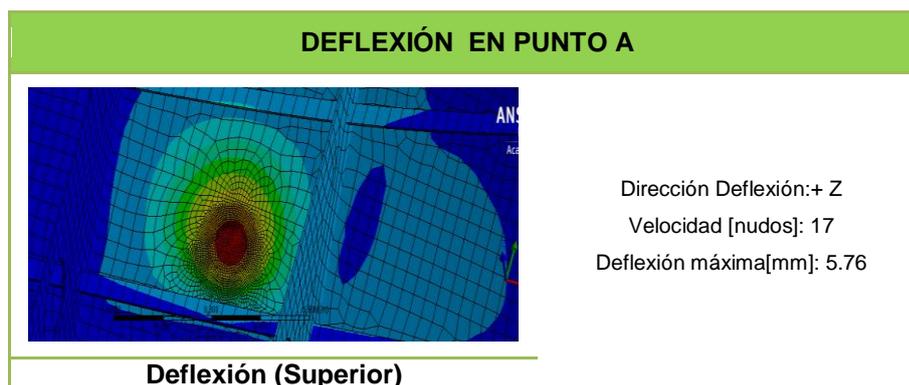
Figura A0. 13: Inserción de Fuerza de contacto

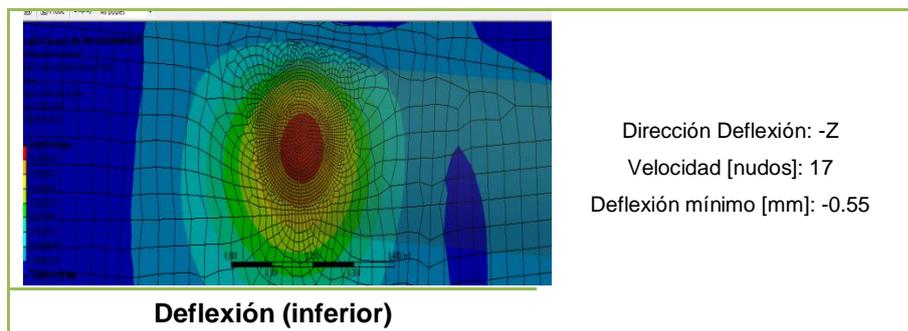
### A1. Deflexión Z en el punto A con velocidad de 15 y 17 nudos



**Gráfico Anexo 1: Deflexión Z en punto A con 15 y 17 nudos**

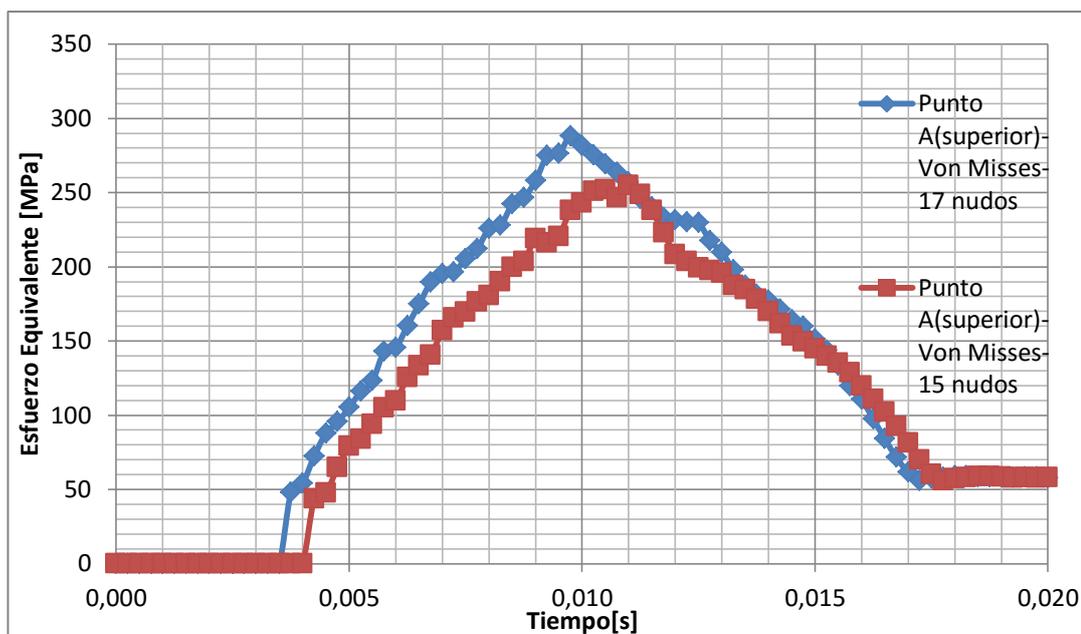
### A2. Deflexiones en el punto A con velocidad de 17 nudos.





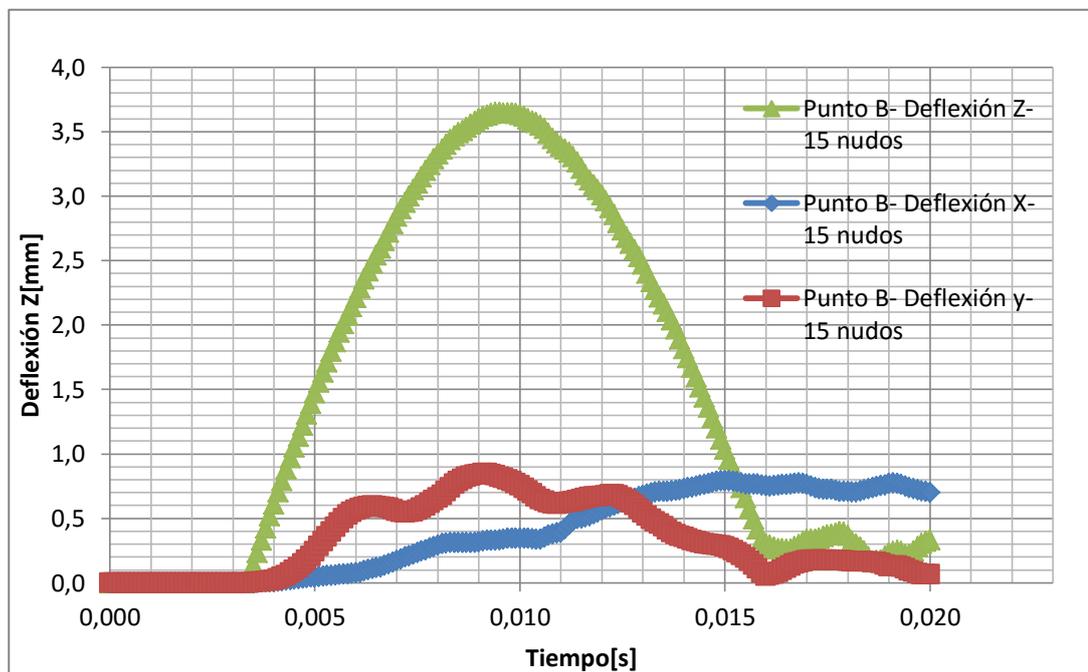
**Tabla Anexo 1: Deflexión con 17 nudos**

**A3. Esfuerzos Equivalentes en el punto A con velocidad de 15 y 17 nudos.**



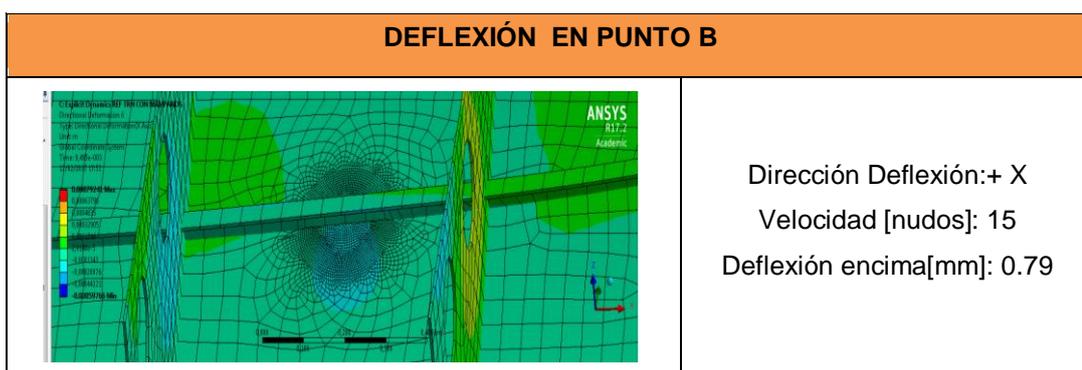
**Gráfico Anexo 2: Esfuerzos Von Mises en punto A con 15 y 17 nudos**

**A4. Deflexión en las tres direcciones en el punto B con velocidad de 15 nudos.**



**Gráfico Anexo 3: Deflexión en X-Y-Z con velocidad de 15 nudos**

**A5. Deflexiones en el punto B con 15 nudos.**



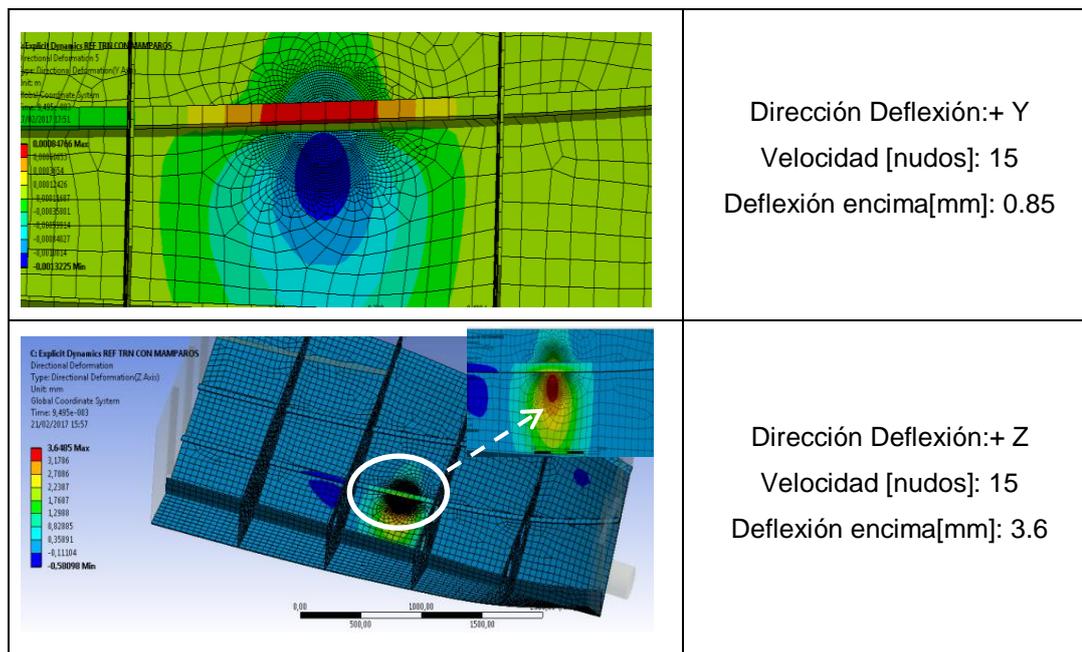


Tabla anexo 2: Deflexión del fondo a 15 nudos

#### A6. Esfuerzos normales en el punto B con 15 nudos

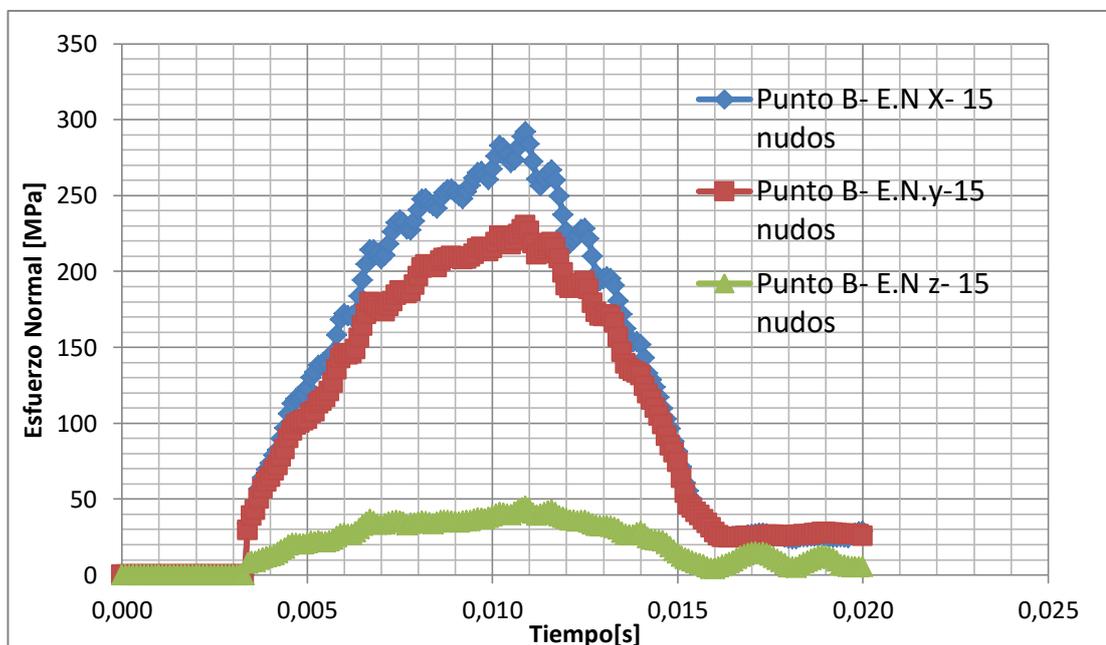


Gráfico anexo 4: Esfuerzos normales a 15 nudos

### A7. Esfuerzos equivalentes en el punto B con 15 nudos

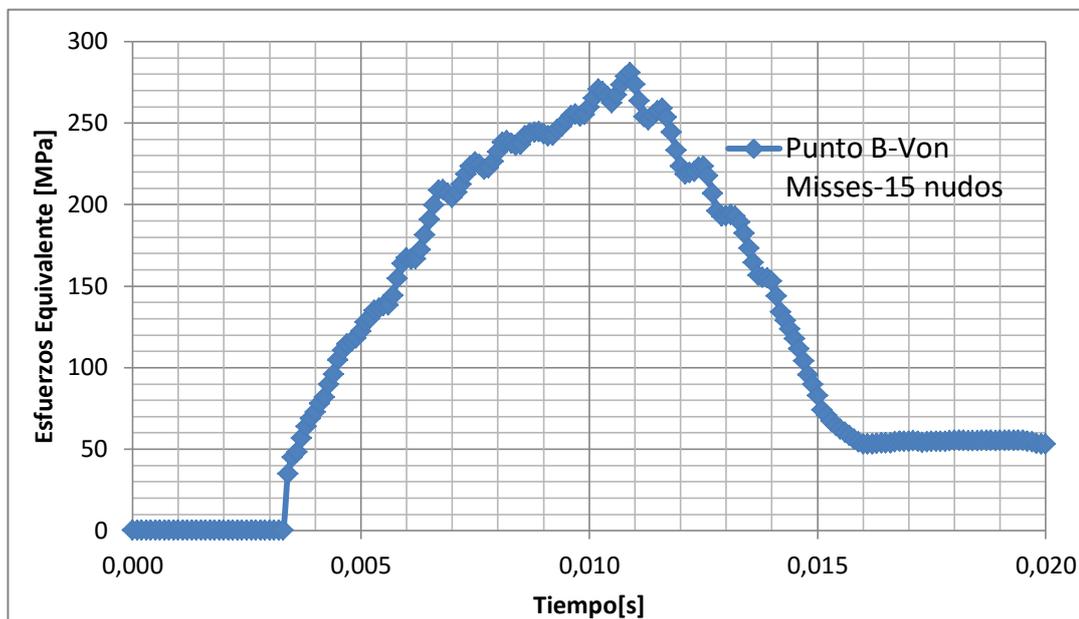


Gráfico anexo 5: Esfuerzo equivalente (Von Misses) con 15 nudos

### A8. Deflexión en el punto B con 15 y 17 nudos

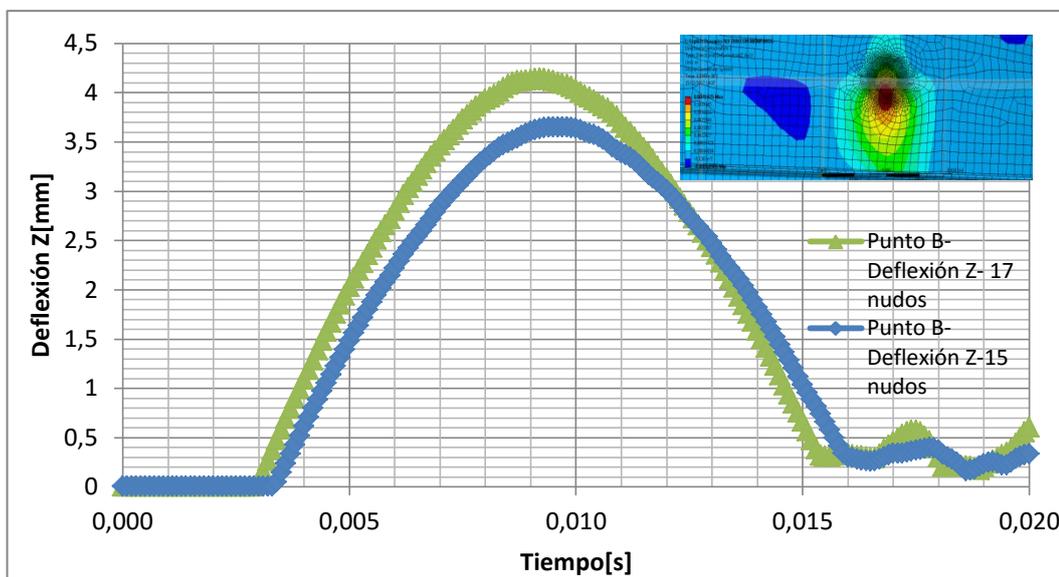


Gráfico anexo 6: Deflexión en Punto B con 15 y 17 nudos

### A9. Esfuerzos Equivalentes en el punto B con 15 y 17 nudos

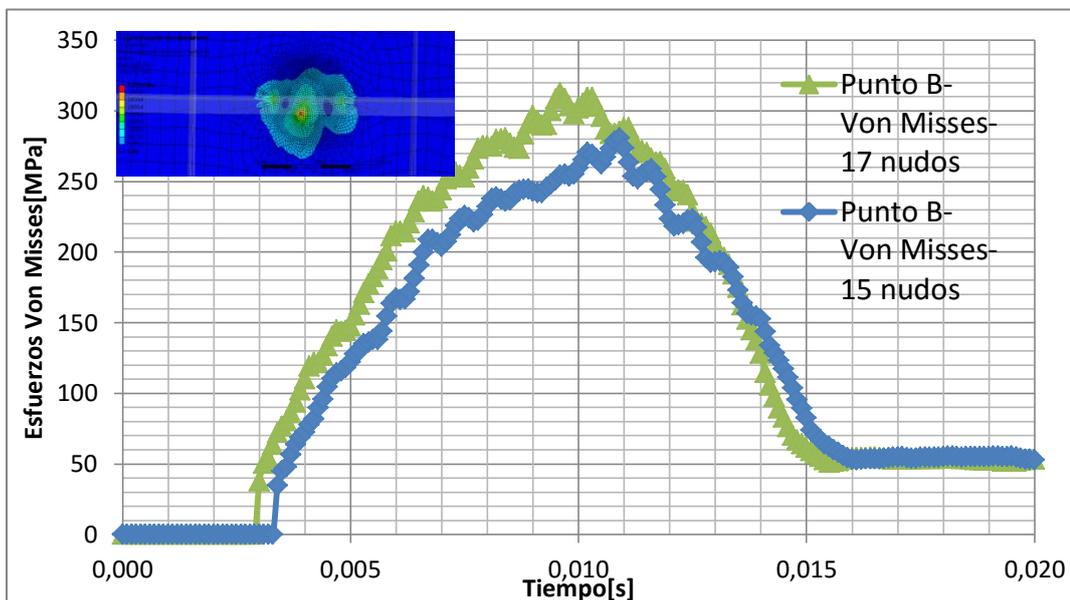


Gráfico anexo 7: Esfuerzos equivalentes en el punto B con 15 y 17 nudos

### A10. Deflexión en el punto C con 15 nudos.

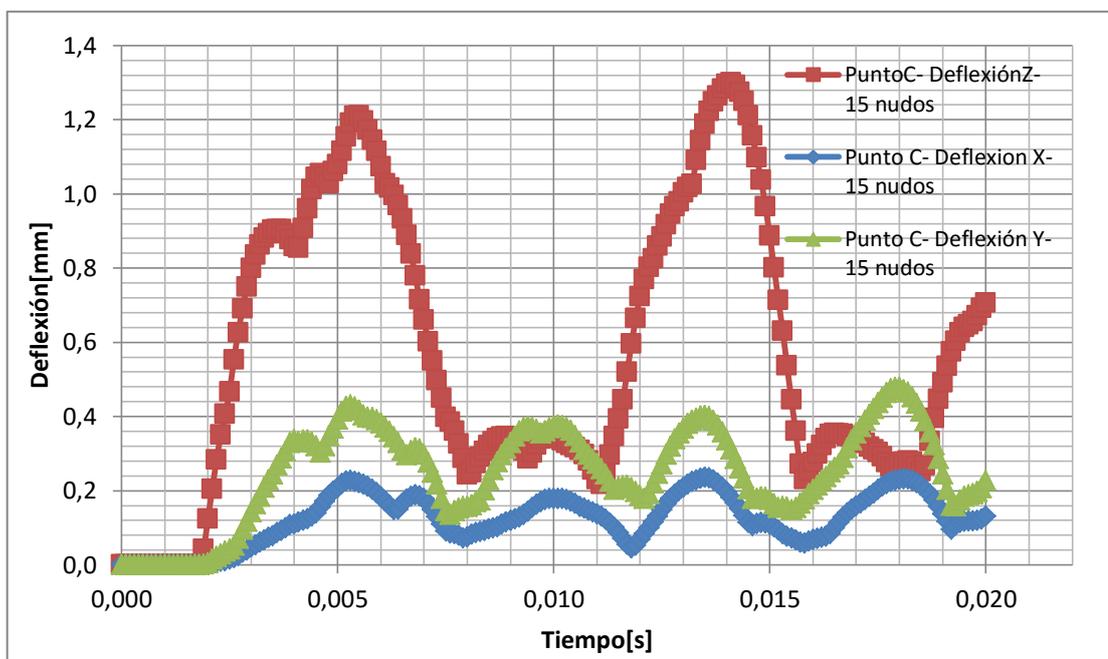


Gráfico anexo 8: Deflexiones en el punto C con 15 nudos

### A11. Esfuerzos normales en el punto C con 15 nudos.

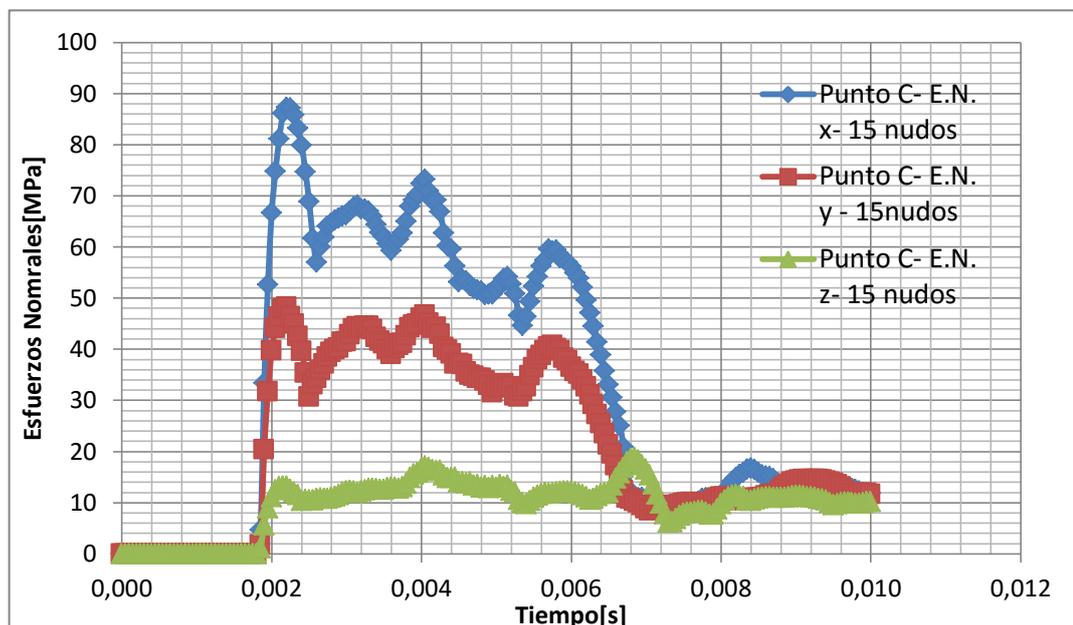
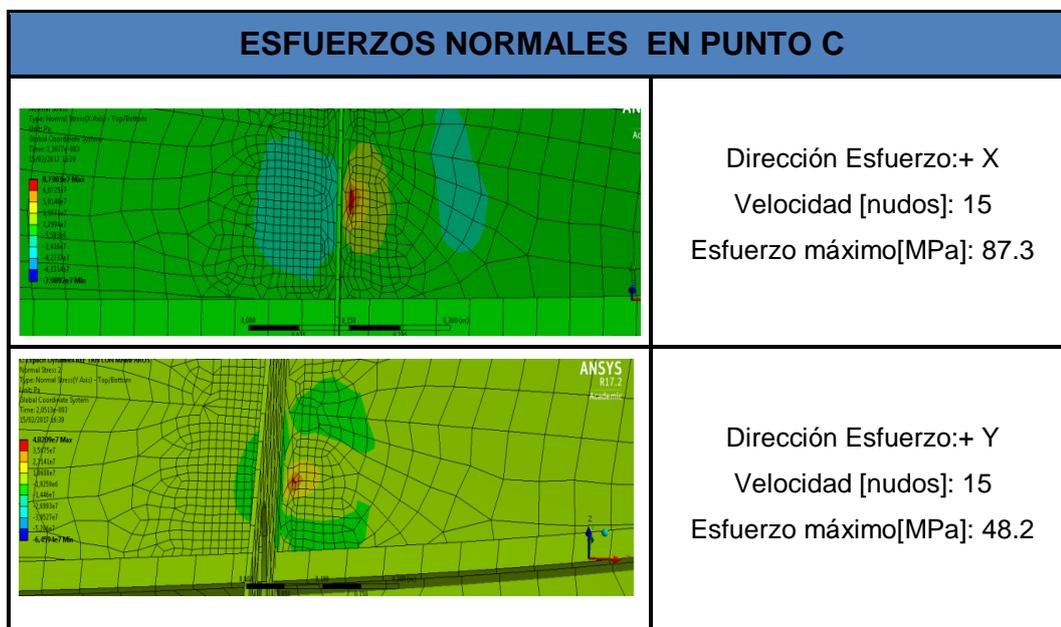
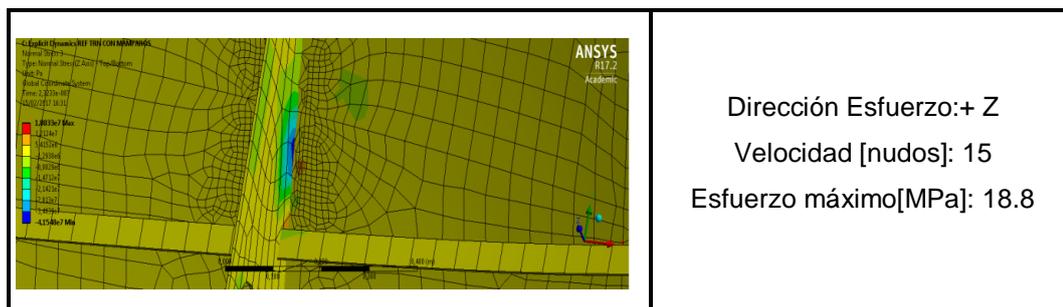


Gráfico anexo 9: Esfuerzos normales en el punto C con 15 nudos.

### A12. Esfuerzos normales en el punto C con 15 nudos.





### A13. Deflexión en el punto C con 15 y 17 nudos.

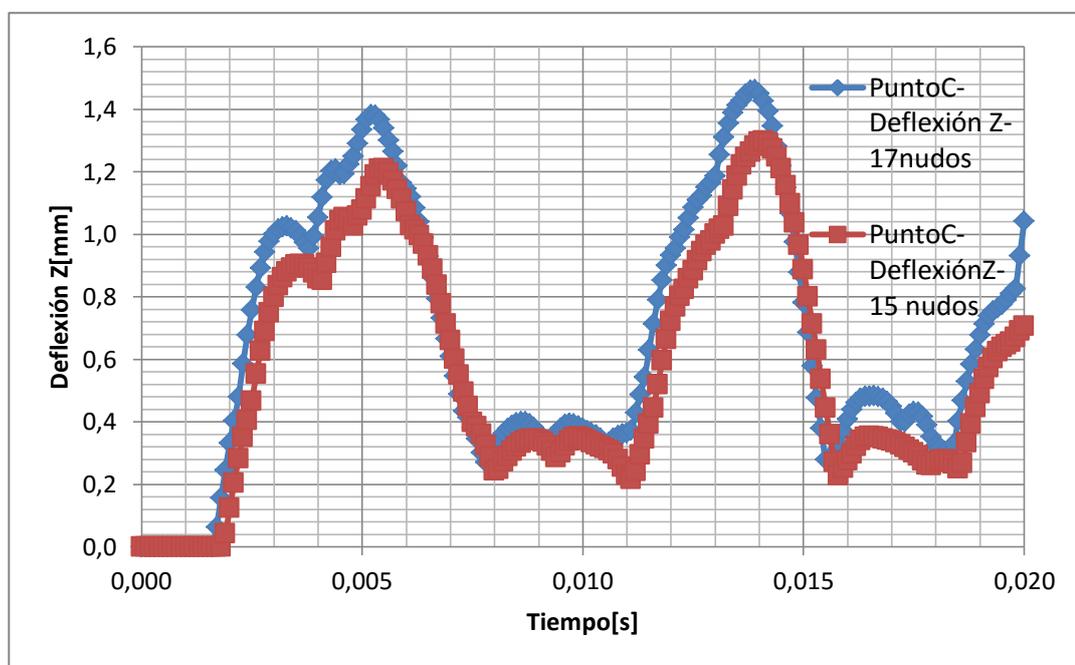


Gráfico anexo 10: Deflexión en el punto C con velocidades 15 y 17 nudos

#### A14. Esfuerzos equivalentes en el punto C con 15 y 17 nudos.

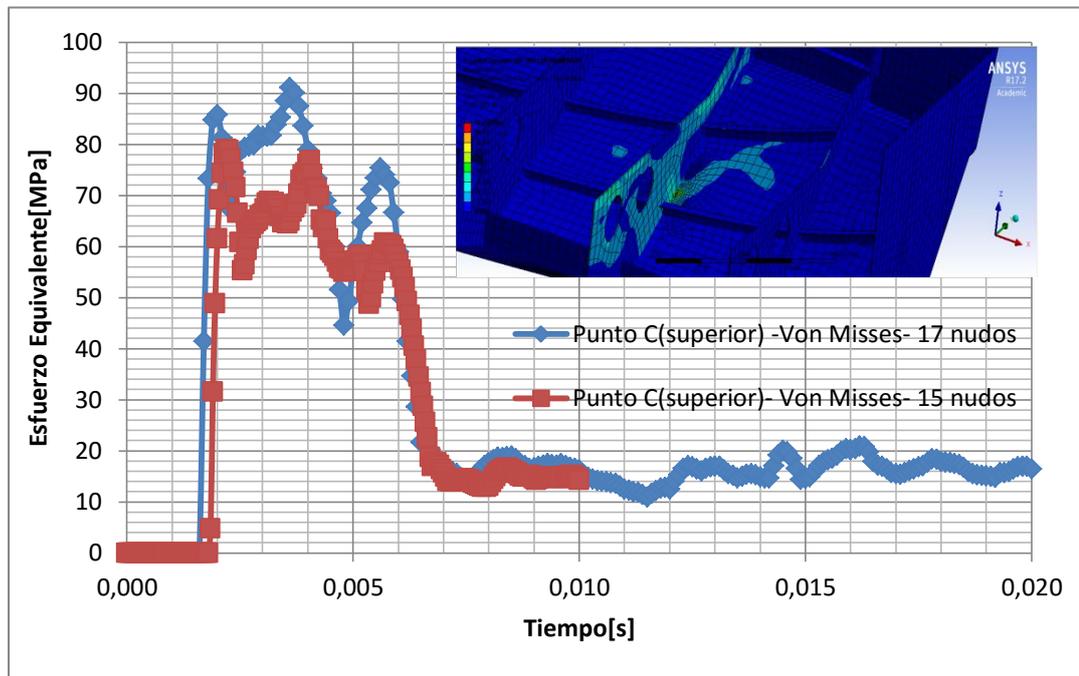


Gráfico anexo 11: Esfuerzos Von Mises en Punto C con 15 y 17 nudos.

#### A15. Cálculo de inercia de los elementos estructurales a babor del fondo

| Detalle       | Alto, H [mm] | Ancho, B [mm] | AREA[mm <sup>2</sup> ] | Distanci a L.B. al C.G. del elemento | (Distanci a L.B.) <sup>2</sup> | Area x (Distanci a L.B) [mm <sup>3</sup> ] | Area x (Distanci a L.B) <sup>2</sup> [mm <sup>4</sup> ] | Inercia elemento [mm <sup>4</sup> ] |
|---------------|--------------|---------------|------------------------|--------------------------------------|--------------------------------|--|---|-------------------------------------|
| Plancha       | 6.35         | 1800          | 11430                  | 3.175                                | 10.08                          | 3.6E+04                                    | 1.15E+05  | 3.8E+04                             |
| refuerzo1 - L | 50.8         | 6.35          | 322.58                 | 31.75                                | 1008.06                        | 1.0E+04                                    | 3.25E+05  | 6.9E+04                             |
| refuerzo2 - L | 6.35         | 50.8          | 322.58                 | 60.325                               | 3639.11                        | 1.9E+04                                    | 1.17E+06  | 1.1E+03                             |
| refuerzo2 - L | 50.8         | 6.35          | 322.58                 | 31.75                                | 1008.06                        | 1.0E+04                                    | 3.25E+05  | 6.9E+04                             |

|                  |      |      |                |        |         |                |                |                |
|------------------|------|------|----------------|--------|---------|----------------|----------------|----------------|
|                  | 6.35 | 50.8 | 322.58         | 60.325 | 3639.11 | 1.9E+04        | 1.17E+06       | 1.1E+03        |
| refuerzo3 -<br>L | 50.8 | 6.35 | 322.58         | 31.75  | 1008.06 | 1.0E+04        | 3.25E+05       | 6.9E+04        |
|                  | 6.35 | 50.8 | 322.58         | 60.325 | 3639.11 | 1.9E+04        | 1.17E+06       | 1.1E+03        |
| <b>Total</b>     |      |      | <b>1.3E+04</b> |        |         | <b>1.3E+05</b> | <b>4.6E+06</b> | <b>2.5E+05</b> |

**Tabla anexo 3: Cálculo de inercia de elementos estructurales a babor del fondo**

| EJE NEUTRO DEL CONJUNTO    |      |    |
|----------------------------|------|----|
| Ycg= Mto Area / Area Total |      |    |
| Ycg                        | 9.38 | mm |

**Tabla anexo 4: Ubicación del Eje neutro del modelo original**

| Inercia respecto al eje neutro [mm <sup>4</sup> ] | Inercia respecto al eje neutro [in <sup>4</sup> ] | Separación Refuerzos, S1 [mm] | $\frac{I_1}{s_1}$ [mm <sup>3</sup> ] |
|---|---|-------------------------------|--------------------------------------|
| 3.69E+06  | 8.86  | 450                           | 8.19E+03                             |

**Tabla anexo 5: Inercia del fondo por milímetro**

### A16. Cálculo de inercia de la alternativa estructural a babor del fondo.

| Detalle          | Alto, H [mm] | Ancho, B [mm] | AREA[mm <sup>2</sup> ] | Distan-<br>cia<br>L.B. al<br>C.G.<br>del<br>elemen-<br>to | (Distan-<br>cia<br>L.B.) <sup>2</sup> | Area x<br>(Distan-<br>cia L.B)<br>[mm <sup>3</sup> ] | Area x<br>(Distan-<br>cia<br>L.B) <sup>2</sup><br>[mm <sup>4</sup> ] | Inercia<br>elemen-<br>to<br>[mm <sup>4</sup> ] |
|------------------|--------------|---------------|------------------------|---|---------------------------------------|--|--|--|
| Plancha          | 6.35         | 1800          | 11430                  | 3.175   | 10.08                                 | 3.6E+04  | 1.2E+05  | 3.8E+04  |
| refuerzo 1/2" -L | 38.1         | 6.35          | 241.935                | 25.4  | 645.16                                | 6.1E+03  | 1.6E+05  | 2.9E+04  |
|                  | 6.35         | 38.1          | 241.935                | 47.625  | 2268.14                               | 1.2E+04  | 5.5E+05  | 8.1E+02  |
| refuerzo 1/2" -L | 38.1         | 6.35          | 241.935                | 25.4  | 645.16                                | 6.1E+03  | 1.6E+05  | 2.9E+04  |
|                  | 6.35         | 38.1          | 241.935                | 47.625  | 2268.14                               | 1.2E+04  | 5.5E+05  | 8.1E+02  |
| refuerzo 1/2" -L | 38.1         | 6.35          | 241.935                | 25.4  | 645.16                                | 6.1E+03  | 1.6E+05  | 2.9E+04  |
|                  | 6.35         | 38.1          | 241.935                | 47.625  | 2268.14                               | 1.2E+04  | 5.5E+05  | 8.1E+02  |
| refuerzo 1/2" -L | 38.1         | 6.35          | 241.935                | 25.4  | 645.16                                | 6.1E+03  | 1.6E+05  | 2.9E+04  |
|                  | 6.35         | 38.1          | 241.935                | 47.625  | 2268.14                               | 1.2E+04  | 5.5E+05  | 8.1E+02  |
| refuerzo 1/2" -L | 38.1         | 6.35          | 241.935                | 25.4  | 645.16                                | 6.1E+03  | 1.6E+05  | 2.9E+04  |
|                  | 6.35         | 38.1          | 241.935                | 47.625  | 2268.14                               | 1.2E+04  | 5.5E+05  | 8.1E+02  |
|                  |              |               | 1.38E+04               |   |                                       | 1.2E+05  | 3.6E+06  | 1.9E+05  |

**Tabla anexo 6: Cálculo de inercia de elementos de alternativa estructural a babor del fondo**

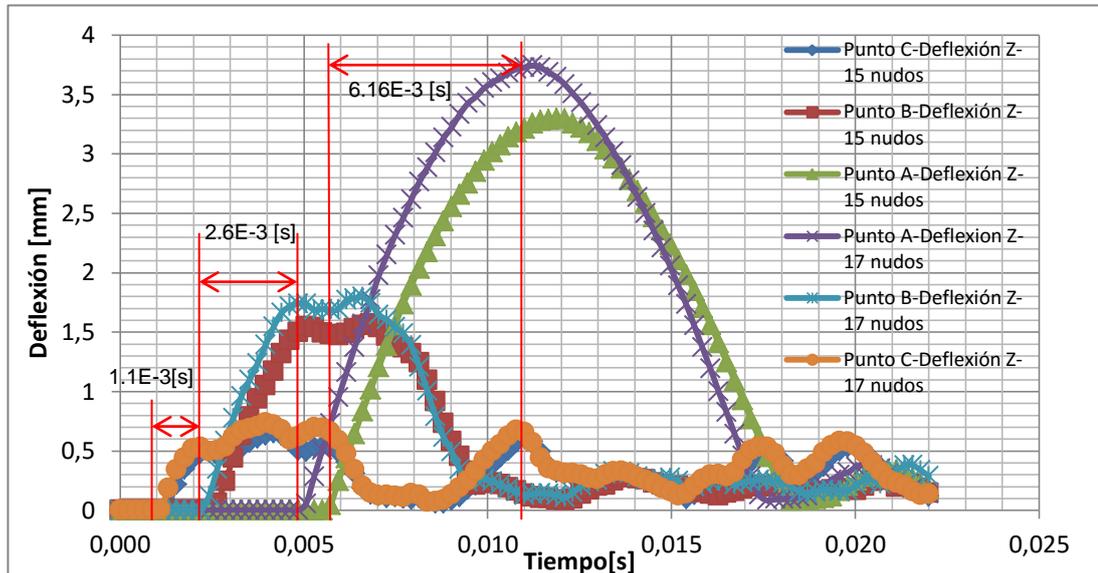
| EJE NEUTRO DEL CONJUNTO    |      |    |
|----------------------------|------|----|
| Ycg= Mto Area / Area Total |      |    |
| Ycg                        | 9.00 | mm |

**Tabla anexo 7: Ubicación eje neutro en alternativa estructural**

| Inercia<br>respecto al<br>eje neutro<br>[mm <sup>4</sup> ] | Inercia<br>respecto al<br>eje neutro<br>[in <sup>4</sup> ] | Separación<br>Refuerzos,<br>S2[mm] | $\frac{I_2}{S_2}$ [mm <sup>3</sup> ] |
|--|--|------------------------------------|--------------------------------------|
| 2.71E+06   | 6.50   | 300                                | 9.02E+03                             |

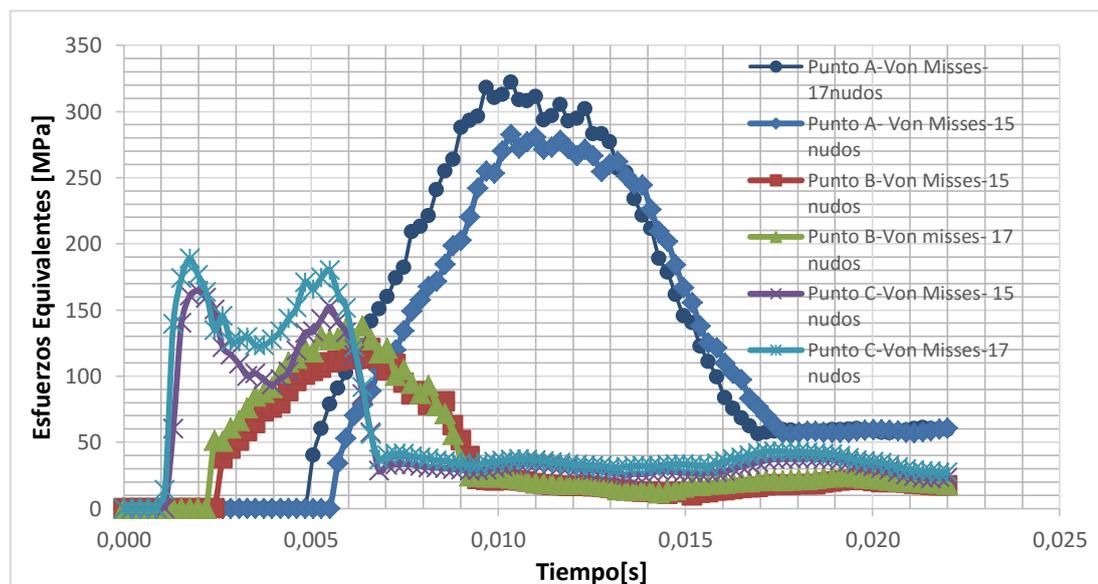
**Tabla anexo 8: Inercia del diseño alternativo del fondo por milímetro.**

**A17. Deflexiones del diseño alternativo en puntos A-B-C con velocidades de 15 y 17 nudos.**



**Gráfico anexo 12: Deflexión en A-B-C con velocidades de 15 y 17 nudos.**

**A18. Esfuerzos Equivalentes del diseño alternativo en puntos A-B-C con 15 y 17 nudos**



**Gráfico anexo 13: Esfuerzos Equivalentes en A-B-C con 15 y 17 nudos**