

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA**

**FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA**



**SIMULACION NUMERICA A TRAVES DE  
ELEMENTOS FINITOS DE UNA  
EMBARCACION FLUVIAL**

**TESIS**

**PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE:  
INGENIERO NAVAL**

**ANTHONY BRITO TICLAVILCA TENORIO**

**PROMOCION 2014- II**

**LIMA-PERU**

**2015**

Dedico esta tesis a todos aquellos que no creyeron en mí, a aquellos que esperaban mi fracaso en cada paso que daba hacia la culminación de mis estudios, a aquellos que nunca esperaban que lograra terminar la carrera, a todos aquellos que apostaban a que me rendiría a medio camino, a todos los que supusieron que no lo lograría, a todos ellos les dedico esta tesis.

**INDICE GENERAL**

|   | <b>Pág.</b> |
|---|-------------|
| <b>PROLOGO</b>  | 01          |
| <br>  |             |
| <b>CAPITULO I: INTRODUCCIÓN</b>                         | 03          |
| <br>  |             |
| 1.1 DESCRIPCION DEL PROBLEMA                            | 03          |
| 1.2 OBJETIVOS   | 04          |
| 1.3 METODOLOGIA   | 04          |
| <br>  |             |
| <b>CAPITULO II: INTRODUCCION AL METODO DE ELEMENTOS</b> |             |
| <br>  |             |
| <b>FINITOS</b>  | 06          |
| <br>  |             |
| 2.1 PLANTEAMIENTO GENERAL DEL METODO                    | 06          |
| 2.2 FUNDAMENTO TEORICO DEL METODO DE ELEMENTOS          |             |
| FINITOS   | 09          |
| 2.2.1 TEORIA DE LA ELASTICIDAD                          | 10          |
| 2.2.2 TENSION   | 10          |
| 2.2.3 DEFORMACION                                       | 13          |
| 2.2.4 RELACION ENTRE TENSION Y DEFORMACION              | 14          |
| 2.3 DEFINICION DE ELEMENTOS                             | 17          |
| 2.3.1 ELEMENTO DE PLACA                                 | 18          |
| 2.3.1.1 TEORIA CLASICA DE FLEXION DE PLACAS             | 18          |
| 2.3.1.2 TENSION PLANA                                   | 20          |

|   |  |    |
|---|--|----|
| 2.4   | CRITERIO DE FALLAS DE LA MAXIMA ENERGIA DE<br>DISTORSION O DE VON MISSES | 22 |
| <b>CAPITULO III: FUNDAMENTO TEORICO</b>           |  | 24 |
| 3.1   | ANALISIS ESTRUCTURAL DEL BUQUE   | 24 |
| 3.1.1   | TENSION Y DEFLEXIONES PRIMARIA   | 24 |
| 3.1.2   | TENSIONES Y DEFLEXIONES SECUNDARIAS                                      | 25 |
| 3.1.3   | TENSIONES Y DEFLEXIONES TERCARIAS  | 25 |
| 3.2   | RESISTENCIA DE PLANCHAS  | 26 |
| 3.2.1   | RESISTENCIA TRANSVERSAL DE PLACAS  | 26 |
|   | 3.2.1.1 TEORIA CLASICA DE DESPLAZAMIENTOS<br>PEQUEÑOS                    | 26 |
|   | 3.2.1.2 TEORIA ESPECÍFICA DE PLACA                                       | 27 |
| 3.2.2   | PLACAS REFORZADAS-CONCEPTO PREVIO  | 28 |
|   | 3.2.2.1 PERFILES RIGIDIZADORES   | 31 |
|   | 3.2.2.2 ANCHO EFECTIVO DE PLACA  | 33 |
| 3.2.3   | PLACAS REFORZADAS-METODO DE ANALISIS                                     | 34 |
|   | 3.2.3.1 TEORIA DE PLACAS ORTOTROPICAS                                    | 34 |
| 3.3   | TEORIA DE VIGAS  | 39 |
| 3.4   | TEORIA VIGA-BUQUE  | 40 |
|   | 3.4.1 OBTENCION DE CARGAS  | 41 |
|   | 3.4.2 OBTENCION DE LOS ESFUERZOS PRIMARIOS                               | 43 |
| <b>CAPITULO IV: DESCRIPCION DE LA EMBARCACION</b> |  | 46 |

|   |  |           |
|---|--|-----------|
| 4.1                                       | CONCEPTOS PREVIOS                          | 46        |
| 4.1.1                                     | TRANSPORTE FLUVIAL                         | 46        |
| 4.1.2                                     | ACERO ESTRUCTURAL ASTM A36                 | 47        |
| 4.2                                       | CARACTERISTICAS DE LA EMBARCACION          | 47        |
| 4.3                                       | MODELO GEOMETRICO                          | 49        |
| 4.3.1                                     | MODELO DE LA VIGA                          | 49        |
| 4.3.2                                     | MODELO DE LA PLACA                         | 50        |
| 4.3.3                                     | MODELO ESTRUCTURAL DE LA EMBARCACION       | 51        |
| <b>CAPITULO V: MODELO NUMERICO</b>        |  | <b>54</b> |
| 5.1                                       | CONCEPTOS PREVIOS                          | 54        |
| 5.1.1                                     | GENERACION DE MALLA                        | 54        |
| 5.1.2                                     | TIPOS DE ELEMENTO DE MALLA                 | 56        |
| 5.1.2.1                                   | ELEMENTO BEAM3                             | 56        |
| 5.1.2.2                                   | ELEMENTO BEAM4                             | 57        |
| 5.1.2.3                                   | ELEMENTO SHELL181                          | 58        |
| 5.2                                       | GENERACION Y VALIDACION DEL SOFTWARE ANSYS | 58        |
| 5.3                                       | MODELO NUMERICO DE LA VIGA                 | 62        |
| 5.4                                       | MODELO NUMERICO DE LA PLACA                | 63        |
| 5.5                                       | MODELO NUMERICO DE LA EMBARCACION          | 63        |
| <b>CAPITULO VI: ANALISIS Y RESULTADOS</b> |  | <b>67</b> |
| 6.1                                       | CONCEPTOS PREVIOS                          | 67        |

|         |                                      |           |
|---------|--------------------------------------|-----------|
| 6.1.1   | CONDICIONES DE CONTORNO              | 67        |
| 6.1.1.1 | SOPORTE DE MOLAS                     | 67        |
| 6.1.1.2 | PRESION DEL RIO                      | 70        |
| 6.2     | SIMULACION ESTRUCTURAL DE LA VIGA    | 71        |
| 6.3     | SIMULACION ESTRUCTURAL DE LA PLACA   | 74        |
| 6.4     | SIMULACION ESTRUCTURAL DE LA BARCAZA | 76        |
| 6.4.1   | PRESION HIDROSTATICA                 | 76        |
| 6.4.2   | MOLAS O SPRING                       | 77        |
| 6.4.3   | CARGA RODANTE                        | 78        |
| 6.4.4   | RESULTADOS                           | 79        |
|         | <b>CONCLUSIONES</b>                  | <b>82</b> |
|         | <b>REFERENCIA BIBLIOGRAFICAS</b>     | <b>85</b> |
|         | <b>ANEXOS.</b>                       |           |
| A.      | PLANOS DE DISPOSICION GENERAL        |           |
| B.      | PLANO DE LINEA DE FORMA              |           |
| C.      | PLANO DE ESTRUCTURAS                 |           |
| D.      | CURVAS HIDROSTATICA                  |           |

## **PROLOGO**

La tesis que a continuación se muestra consiste en el estudio, mediante el método de elementos finitos, de la resistencia estructural y el comportamiento del casco de la barcaza fluvial, sin esta información técnica es probable que produzcan desperdicios económicos, tanto en la inversión inicial, al usar miembros estructurales sobredimensionados, debidos a que los costos de construcción se basan en el peso del acero, así también en los gastos de operación de la embarcación.

En el presente trabajo se realizara un análisis estática lineal de la estructura. Estructuras con comportamiento lineal son aquellas en que los efectos son proporcionales a las causas, es decir que los desplazamientos son proporcionales a las cargas. En general el comportamiento lineal está asociado a pequeñas rotaciones o desplazamientos y los materiales de comportamiento lineal (los que cumplen la ley de Hooke) o pequeñas esfuerzos sobre las cuales el material aún se comporta linealmente.

Calcular la estructura de un barco, presenta grandes dificultades, debido a la gran complejidad tanto de la estructura como del tipo de cargas que se presentan, es por esto que podemos aplicar criterios probabilísticos basados en experiencia, como lo son los métodos de las sociedades clasificadoras, permitiéndonos evaluar la integridad estructural de una embarcación con un alto margen de seguridad.

Para llevar a cabo el estudio se utilizará el software de elementos finitos ANSYS, haciendo previamente una revisión completa del método de elementos finitos y de las teorías pertinentes de resistencia de materiales, tanto para el caso de vigas, placas y cascos.

Finalmente con este trabajo se lograra un adecuado adiestramiento y una buena experiencia en el desarrollo de modelos estructurales de barcasas fluviales utilizando el método de elementos finitos y de esta manera, en un futuro se podrán modelar estructuras de embarcaciones más complejas.

# CAPITULO I

## INTRODUCCION

### **1.1 DESCRIPCION DEL PROBLEMA**

En la actualidad no se tiene conocimientos sobre los diferentes niveles de esfuerzos que se desarrollan en los cascos de las embarcaciones fluviales que prestan servicio de carga móvil. Se debe recordar que las condiciones de carga a las que están expuestas estas embarcaciones son muy diferentes a las que soportan las de tipo oceánico. Sin esta información técnica es probable que se produzcan desperdicios económicos, tanto en la inversión inicial, al usar miembros estructurales sobredimensionados, debido a que los costos de construcción se basan en el peso del acero, así también como en los gastos de operación de la embarcación.

Con este trabajo se lograra un adecuado adiestramiento y una buena experiencia en el desarrollo de modelos estructurales de embarcaciones fluviales utilizando el Método de Elementos Finitos, y de esta manera, en un futuro se podrán modelar estructuras de embarcaciones más complejas. Mediante los resultados obtenidos se determinaran también de manera apropiada las zonas estructurales que necesitaran ser reforzadas y las que están sobredimensionadas, lo que será muy útil para futuros nuevos diseños.

## **1.2 OBJETIVOS**

Los fines de este trabajo se muestran a continuación:

- Estudio numérico-analítico de viga y placa estructural, mediante el Método de Elementos Finitos (FEM).
- Analizar los niveles de esfuerzos y deformaciones producidos en una embarcación fluvial en condiciones característica de carga, mediante el programa ANSYS.
- Analizar el Factor de Seguridad con el cual trabaja la Norma ABS.
- Adquirir experiencia en simulaciones estructurales de embarcaciones, para poder realizar el estudio de estructuras más complejas.

## **1.3 METODOLOGIA**

La metodología que se usara en el desarrollo de esta Tesis será el Método Inductivo (es aquel método científico que obtiene conclusiones generales a partir de ideas específicas, mejor dicho que va de lo particular a lo general).

En esta tesis, empezaremos a desarrollar las simulaciones estructurales de paneles que viene hacer lo particular hasta llegar a la simulación de una embarcación fluvial que viene hacer lo general.

## CAPITULO II

### INTRODUCCION AL METODO DE ELEMENTOS FINITOS

El Método de Elementos Finitos (MEF o FEM por sus siglas en inglés Finite Element Method), se ha convertido en una de las herramientas más utilizadas al momento de obtener resultados rápidos y fiables para los diferentes problemas que se presentan en el área de ingeniería, especialmente en problemas en el cálculo de estructuras en donde es necesario obtener soluciones rápidas a problemas complejos de abordar mediante otras técnicas. Es un método numérico para la resolución de sistemas de ecuaciones en derivadas parciales.

#### **2.1 PLANTEAMIENTO GENERAL DEL METODO**

CARNICERO, A (2000). “Introducción al Método de los Elementos Finitos”, Universidad Politécnica de Cataluña [5]. El método consiste en discretizar un medio continuo mediante una cantidad finita de elementos llamados elementos finitos, los que están enlazados entre sí a través de nodos ubicados en los contornos de cada uno de estos elementos. En cada elemento

se asume una función de aproximación que definirá el comportamiento de la variable que se está estudiando, en el caso de las estructuras las variables definidas son los desplazamientos; en función de los valores que adquieran estas variables en los nodos, se obtendrán los desplazamientos nodales. Una vez obtenidas estas funciones, se plantean las ecuaciones de compatibilidad de todos los elementos, que relacionan los elementos unos con otros y que luego se resuelven utilizando métodos matriciales. Es por la dificultad de la resolución de estas matrices con métodos de cálculo manuales que el rol de los computadores y softwares se hacen más importantes.

ZIENKIWICKS, O.C. Y TAYLOR, R.L. (1994) “El Método de Elementos Finitos” [12]. El método de elementos finitos puede plantearse en una serie de etapas, las que en el caso específico del cálculo de esfuerzos y desplazamientos en una estructura son siete y están divididas en tres grupos: el preproceso o idealización de la realidad, el proceso o cálculo en sí, y el post proceso o visualización de los resultados. En estas etapas, el usuario sólo participa en las del preproceso y postproceso, puesto que el cálculo lo desarrolla el programa de elementos finitos, con la programación incluida dentro de éste, basándose en las propiedades ingresadas anteriormente en el preproceso. A su vez estas etapas están divididas en subprocesos, que son detallados a continuación:

### **Preproceso**

- i. **Discretización o modelación de la estructura:** La estructura es dividida en una cantidad finita de elementos unidos por nodos, los cuales se comportan de forma parecida a los elementos reales. Esta es una de las etapas más importantes, puesto que determina la precisión de los resultados obtenidos con el modelo.

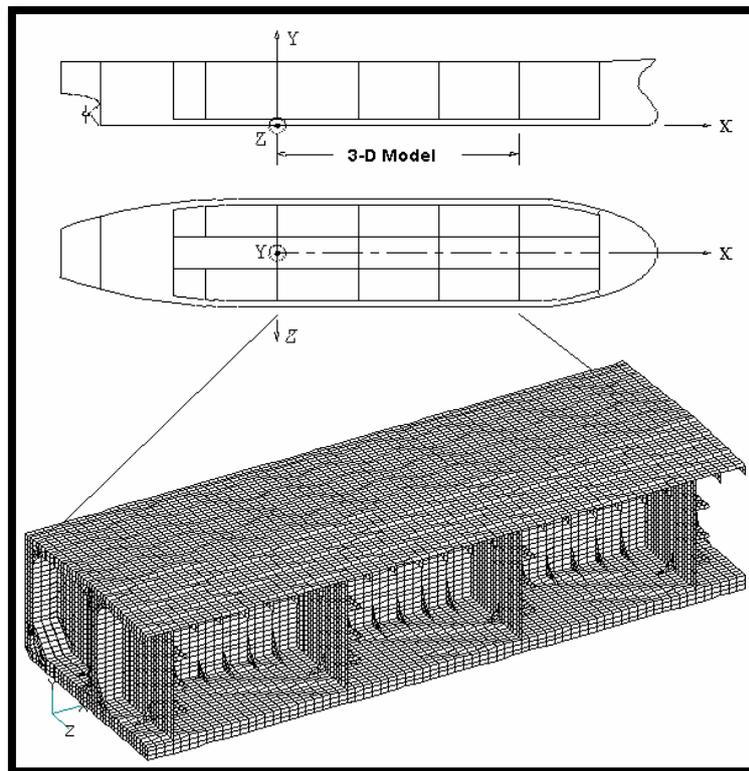


Fig. 2.1 Modelo Estructural de la Embarcación

- ii. **Definición del tipo de elemento y de sus parámetros:** En este paso se selecciona el tipo de elemento que es el más adecuado para modelar el sistema físico a estudiar y se definen las propiedades de los elementos elegidos, como por ejemplo, el espesor en los elementos de placa.
- iii. **Aplicación de las cargas y de las condiciones de contorno:** Las fuerzas externas, como cargas puntuales, presiones, momentos y la

gravidad son aplicados al modelo. Las condiciones de contorno son colocadas sobre los nodos o superficies, para evitar los desplazamientos y/o rotaciones de los nodos y del sólido-rígido y así obtener un modelo estáticamente determinado que pueda ser resuelto por el programa y que se asemeje bastante a la realidad.

- iv. Ensamble de las matrices de rigidez:** Para la obtención de las matrices de rigidez de cada elemento que relacionan a las cargas exteriores aplicadas sobre el elemento con los desplazamientos nodales, se utiliza el principio de energía potencial mínima.
- v. Solución del sistema de ecuaciones algebraico lineal:** Los pasos anteriores conducen a un sistema de ecuaciones simultáneas, donde las incógnitas son los desplazamientos nodales.
- vi. Cálculo de esfuerzo:** Una vez resueltas las ecuaciones lineales y determinados los desplazamientos, es posible obtener los esfuerzos y las reacciones.

### **Postproceso**

- i. Revisión de resultados:** Una vez calculados todos los parámetros necesarios, estos se pueden representar en forma gráfica mediante el uso de colores para mostrar los resultados.

## **2.2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS DEL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS**

Se debe seleccionar un modelo matemático que describa el comportamiento del fenómeno que se requiere estudiar, que para el caso de las estructuras sería la teoría de la elasticidad, y es sobre este modelo al que se le aplican las técnicas físico-matemáticas, con el fin de simular las propiedades de la estructura que se quiere calcular, y del que se pueden obtener resultados que pueden ser trasladados a la realidad.

### **2.2.1 TEORÍA DE LA ELASTICIDAD**

Se puede definir el ámbito de la teoría de la elasticidad como extendido al estudio de los sólidos deformables.

Se dice que un sólido es deformable cuando al momento de aplicar sobre él fuerzas externas las partículas que lo componen se desplazan hasta obtener un equilibrio entre las fuerzas externas e internas, producidas por las fuerzas de unión molecular. Para describir el comportamiento de los sólidos deformables se utilizan los conceptos de tensión y deformación, los cuales están relacionados entre sí mediante la Ley de Elasticidad de Hooke.

### **2.2.2 TENSIÓN**

La tensión o el esfuerzo se define como la medida de la cantidad promedio de fuerza ejercida por unidad de superficie. Si consideramos un

sólido como el de la figura, que está sometido a cargas externas, y que es atravesado, imaginariamente por un plano, que pasa a través del punto P, y que lo divide en dos partes, si suprimimos una de las partes, y hacemos un estudio del equilibrio de las fuerzas en la otra, vemos que el esfuerzo aparece al equilibrar las fuerzas externas.

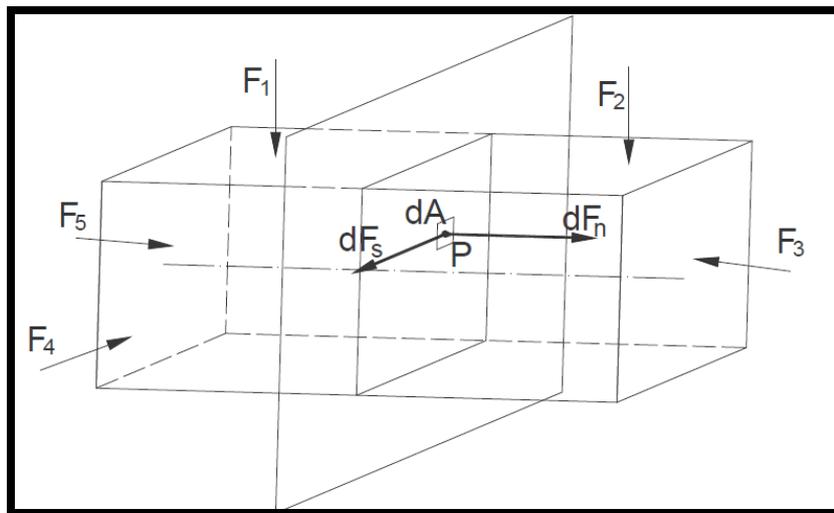


Fig. 2.2 Sólido sometido a fuerzas externas

Sea  $dA$ , un área infinitesimal que rodea al punto P, sobre la que actúan fuerzas internas. La resultante de estas fuerzas es  $dF$ , la que se puede dividir en dos componentes, una normal al plano,  $dF_n$ , y otra tangencial al plano,  $dF_s$ . La tensión, al igual que las fuerzas, se puede dividir en dos, la tensión normal,  $\sigma$  y la tensión tangencial,  $\tau$ , las que están definidas por:

$$\sigma = \left( \frac{dF_n}{dA} \right) \quad (2.1)$$

$$\tau = \left( \frac{dF_n}{dA} \right) \quad (2.2)$$

Si ahora consideramos un paralelepípedo infinitesimal, alrededor del punto P, cuyas aristas son paralelas a los ejes, X, Y y Z, del sistema de referencia cartesiano ortogonal, podemos ver que en cada cara del prisma se producen tensiones normales y tangenciales, lo que nos da un total de nueve tensiones, tres normales, indicadas como  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  y  $\sigma_z$ , y seis tensiones tangenciales o de corte, indicadas como  $\tau_{xy}$ ,  $\tau_{xz}$ ,  $\tau_{yx}$ ,  $\tau_{yz}$ ,  $\tau_{zx}$ ,  $\tau_{zy}$ . En el caso de las tensiones normales, el subíndice representa el eje al cual son paralelas y en el caso de las tensiones tangenciales el primer subíndice indica el eje al cual es normal y el segundo indica la dirección del eje al que es paralela.

Debido a la naturaleza complementaria de las tensiones podemos reducir las tensiones tangenciales a tres.

$$\begin{aligned} \tau_{xy} &= \tau_{yx} \\ \tau_{xz} &= \tau_{zx} \\ \tau_{yz} &= \tau_{zy} \end{aligned} \quad (2.3)$$

Es así como el estado tensional del punto P está definido por los nueve componentes antes mencionados.

$$\begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{xy} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma_z \end{bmatrix} (Tensor) \quad (2.4)$$

Del concepto de tensión podemos hacer las siguientes observaciones:

- a. Las dimensiones de la tensión son unidades de fuerza por unidad de superficie ( $F.L^2$ ), las que en unidades M.K.S. son  $N/m^2$  o pascales.
- b. La tensión depende del punto y la orientación de la sección elegida.
- c. En general, la tensión no es solo normal al plano de corte elegido, sino que se descompone en tensión normal ( $\sigma$ ) y tensión tangencial al plano de corte ( $\tau$ ), para un mejor estudio.

### 2.2.3 DEFORMACIÓN

Todo sólido elástico al aplicarle fuerzas externas se encuentra sometido a tensiones, las que producen deformaciones proporcionales al estado tensional. Debido a que el sólido es elástico cuando las fuerzas externas dejan de aplicarse este vuelve a su condición original.

Si consideramos el sólido de la Fig. 2.2, podemos descomponer las deformaciones, al igual que las tensiones, en deformaciones normales, indicadas como  $\varepsilon_x$ ,  $\varepsilon_y$  y  $\varepsilon_z$ , que son paralelas a los ejes coordenados X, Y y Z, en seis deformaciones cortantes, que son indicadas como  $\gamma_{xy}$ ,  $\gamma_{xz}$ ,  $\gamma_{yx}$ ,  $\gamma_{yz}$ ,  $\gamma_{zx}$  y  $\gamma_{zy}$ . Las deformaciones normales producen una variación del volumen

del sólido, en tanto que las deformaciones cortantes producen distorsiones en la forma del cuerpo, pero sin cambio en el volumen.

Los nueve componentes de la deformación son los siguientes:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x & \gamma_{xy} & \gamma_{xz} \\ \gamma_{yx} & \varepsilon_y & \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} & \gamma_{zy} & \varepsilon_z \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

Los desplazamientos componentes, para un punto dentro del sólido, a lo largo de los ejes X, Y, Z están dados por  $u(x, y, z)$ ,  $v(x, y, z)$  y  $w(x, y, z)$ , respectivamente. Si los desplazamientos son relativamente pequeños comparados con las dimensiones del sólido en estudio, pueden ser descritos por las siguientes ecuaciones lineales:

$$\begin{bmatrix} \left( \varepsilon_x = \frac{\delta u}{\delta x} \right) & \left( \gamma_{xy} = \frac{\delta u}{\delta y} + \frac{\delta v}{\delta x} \right) & \left( \gamma_{xz} = \frac{\delta u}{\delta z} + \frac{\delta w}{\delta x} \right) \\ \left( \gamma_{yx} = \frac{\delta v}{\delta x} + \frac{\delta u}{\delta y} \right) & \left( \varepsilon_y = \frac{\delta v}{\delta y} \right) & \left( \gamma_{yz} = \frac{\delta v}{\delta z} + \frac{\delta w}{\delta y} \right) \\ \left( \gamma_{zx} = \frac{\delta w}{\delta x} + \frac{\delta u}{\delta z} \right) & \left( \gamma_{zy} = \frac{\delta w}{\delta y} + \frac{\delta v}{\delta z} \right) & \left( \varepsilon_z = \frac{\delta w}{\delta z} \right) \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

Estas igualdades solo pueden aplicarse para el estudio de pequeñas deflexiones. En el caso de deformaciones demasiado grandes con respecto al tamaño del cuerpo un análisis no-lineal debe ser realizado, puesto que las deformaciones influyen en la forma en que son aplicadas las fuerzas externas.

#### 2.2.4 RELACIÓN ENTRE TENSIÓN Y DEFORMACIÓN

Según la teoría de la elasticidad, un cuerpo elástico al ser sometido a fuerzas externas, sufre deformaciones y al momento de quitar las fuerzas este cuerpo retorna a su estado original.

La Teoría de la elasticidad está definida por la ley de Hooke, que originalmente fue formulada para casos de estiramiento longitudinal y establece que la deformación unitaria,  $\varepsilon$ , de un material es directamente proporcional a la fuerza aplicada,  $F$ .

$$\varepsilon = \frac{\delta}{L} = \frac{F}{AE} \quad \text{ó} \quad \frac{F}{A} = E \cdot \varepsilon \quad (2.7)$$

Donde:

$\delta$  = Alargamiento total.

$L$  = Longitud inicial del cuerpo.

$E$  = Módulo de elasticidad de Young.

$A$  = Área de la sección transversal.

La fórmula (1.7) es solo para estiramiento longitudinal, pero la ley de Hooke se puede generalizar para todo tipo de deformaciones.

$$\{\sigma\} = [C]\{\varepsilon\} \quad (2.8)$$

Donde  $[C]$  corresponde a la matriz que contiene las constantes elásticas del material, la matriz  $\{\sigma\}$  contiene los seis componentes de la tensión y  $\{\varepsilon\}$  los seis componentes de la deformación.

Para los materiales isótopos la matriz de elasticidad es representada por las propiedades del material, el módulo de elasticidad o módulo de Young, (E) y el módulo de corte, (G), además del coeficiente de Poisson,  $\nu$ . Para pequeñas deflexiones, las siguientes relaciones son válidas para el esfuerzo y la deformación en materiales isótopos.

$$\begin{aligned}
 \varepsilon_x &= \frac{1}{E} [\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)]; & \gamma_{yz} &= \frac{\tau_{yz}}{G} \\
 \varepsilon_y &= \frac{1}{E} [\sigma_y - \nu(\sigma_x + \sigma_z)]; & \gamma_{zx} &= \frac{\tau_{zx}}{G} \\
 \varepsilon_z &= \frac{1}{E} [\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)]; & \gamma_{xy} &= \frac{\tau_{xy}}{G}
 \end{aligned} \tag{2.9}$$

Las ecuaciones de (1.9) se pueden escribir de forma matricial en términos del Módulo de Young y del coeficiente de Poisson.

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{yz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{E} & \frac{-\nu}{E} & \frac{-\nu}{E} & & & \\ \frac{-\nu}{E} & \frac{1}{E} & \frac{-\nu}{E} & & & \\ \frac{-\nu}{E} & \frac{-\nu}{E} & \frac{1}{E} & & & \\ \frac{1+\nu}{E} & & & & & \\ & & & \frac{1+\nu}{E} & & \\ & & & & \frac{1+\nu}{E} & \\ & & & & & \frac{1+\nu}{E} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{yz} \end{pmatrix} \tag{2.10}$$

Las relaciones inversas dados por:

$$\begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{xz} \\ \tau_{yz} \end{pmatrix} = \frac{E}{1+\nu} \begin{pmatrix} \frac{1-\nu}{1-2\nu} & \frac{\nu}{1-2\nu} & \frac{\nu}{1-2\nu} \\ \frac{\nu}{1-2\nu} & \frac{1-\nu}{1-2\nu} & \frac{\nu}{1-2\nu} \\ \frac{\nu}{1-2\nu} & \frac{\nu}{1-2\nu} & \frac{1-\nu}{1-2\nu} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{yz} \end{pmatrix} \quad (2.11)$$

### 2.3 DEFINICIÓN DE ELEMENTOS

Para diseñar un sólido continuo se puede utilizar varios tipos de elementos, dependiendo de la geometría y del estudio que se quiera realizar. Un elemento es la relación matemática que define como los grados de libertad de un nodo se relacionan con los grados del siguiente. Los elementos utilizados, en un análisis de tensiones estático, se pueden dividir, a grandes rasgos, en tres grupos:

- **Lineales:** Que se utilizan para el cálculo de puntales, vigas o sólidos en los cuales la dimensión principal es la longitud.
- **Superficies:** Ya sean en 2-D o 3-D, se utilizan para el cálculo de placas o membranas.
- **Poliedros:** Se utilizan para simular elementos de sólidos.

Para el caso de las estructuras navales, los tipos de elementos más utilizados son los de vigas y placas. La formulación de las placas será

descrita a continuación, la formulación de las vigas será descrita en el capítulo siguiente.

### **2.3.1 ELEMENTO DE PLACA**

Se utilizan para el cálculo de superficies estructurales en las cuales el espesor es mucho más pequeño comparados con las otras dimensiones. Son sólidos deformables en los que existe una superficie media, que se considera se aproxima a la placa y sobre la cual se añade un cierto espesor constante, por encima y por debajo de esta superficie.

Las placas soportan cargas axiales en el plano y cargas de flexión perpendiculares a esta. Si las deformaciones son pequeñas, las acciones axiales y de flexión son desacopladas, esto es, las formas de manifestarse de cada uno no tienen relación por lo que pueden ser estudiados de forma independiente. La acción axial o de membrana puede ser analizada como tensión plana y la acción de flexión de placas delgadas con la teoría clásica de Kirchhoff.

#### **2.3.1.1 TEORÍA CLÁSICA DE FLEXIÓN DE PLACAS**

La teoría se basa en las siguientes suposiciones:

- i. Las placas están hechas de material elástico, lineal, homogéneo e isótropo.

- ii. Las deflexiones son pequeñas comparadas con el espesor de la placa.
- iii. La pendiente de deflexión de la superficie media es pequeña.
- iv. Los puntos del plano medio solo se desplazan verticalmente.
- v. La sección plana normal a la superficie media permanece plana y normal a la superficie deformada.
- vi. La deformación de corte transversal es despreciada.
- vii. El esfuerzo normal a la superficie media es despreciada.

Para un elemento bajo carga planar y transversal, las tensiones y deformaciones presentes en el caso de cargas axiales, son  $\varepsilon_x$ ,  $\varepsilon_y$  y  $\gamma_{xy}$ , por lo tanto las relaciones de deformación-desplazamiento están dadas por:

$$\varepsilon_x = \frac{d\mu}{dx}$$

$$\varepsilon_y = \frac{dv}{dy} \quad (2.12)$$

$$\gamma_{xy} = \frac{du}{dy} + \frac{dv}{dx}$$

Donde  $u$ ,  $v$  y  $w$  son las coordenadas del desplazamiento de un punto cualquiera dentro del elemento, en los ejes  $X$ ,  $Y$  y  $Z$  respectivamente.

### 2.3.1.2 TENSIÓN PLANA

Los problemas tridimensionales pueden ser reducidos a dos dimensiones si satisfacen las condiciones del estado de tensión plana, deformación plana o axisimetría. Al hacer esta suposición la modelación de la estructura y el esfuerzo computacional se simplifica enormemente.

Se dice que una placa se comporta como tal si cumple la siguiente relación:

$$\frac{h}{L} \leq \frac{1}{10} \quad (2.13)$$

Donde:

$h$  = Espesor de la placa.

$L$  = La menor de las otras dos dimensiones.

Una plancha plana se encuentra sometida a tensión plana si sobre ella actúan cargas en cualquiera de sus bordes. Debido a que el espesor es pequeño no se generan esfuerzos en el eje  $X$ .

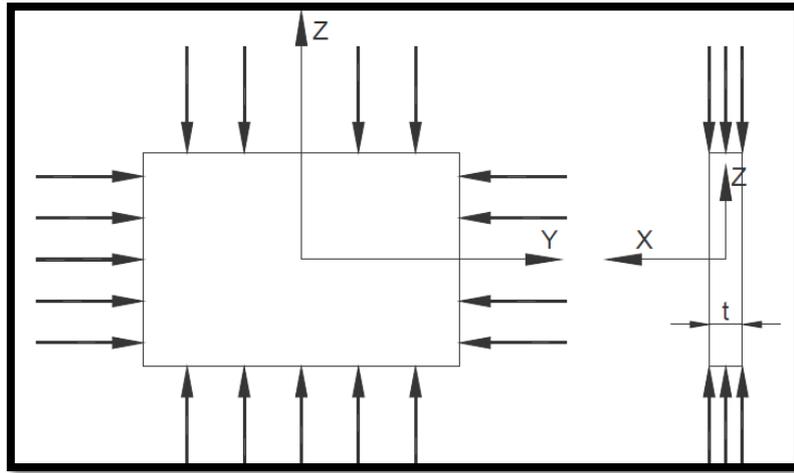


Fig. 2.3 Placa delgada sometida a Tensión Plana  
Fuente: [11]

Se puede decir que una estructura está sometida a tensión plana, cuando los esfuerzos en uno de los ejes ortogonales son pequeños comparados con los otros esfuerzos que se pueden aproximar a cero.

$$\sigma_{xx} = \tau_{yz} = \tau_{zx} = 0 \quad (2.14)$$

Los esfuerzos distintos de cero que se producen en un punto cualquiera son los expuestos en la figura 1.4.

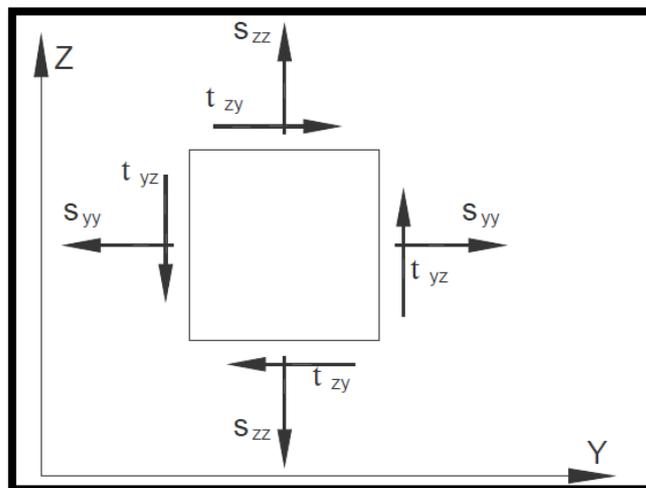


Fig. 2.4 Esfuerzos distintos de Cero  
Fuente: [11]

Aun cuando los esfuerzos en el eje X son cero, las deformaciones normales en torno al eje no son cero debido al efecto de Poisson.

$$\gamma_{yz} = \gamma_{zx} = 0 \tag{2.15}$$

$$\varepsilon_{xx} = -\frac{\nu}{E}(\sigma_{yy} + \sigma_{zz})$$

#### **2.4 CRITERIO DE FALLAS DE LA MÁXIMA ENERGÍA DE DISTORSION O DE VON MISSES**

Como se ha visto anteriormente un cuerpo sometido a fuerzas externas se encuentra en un estado tensional complejo, por otro lado, en un material la información de que generalmente se dispone es el límite elástico,  $\sigma_e$ , obtenido de un ensayo de tracción, es por esto que surge la necesidad de encontrar un estado monoaxial equivalente al estado triple que se considere y así hacer posible la comparación de esta tensión equivalente con el límite elástico del material.

Unos de los criterios más utilizados es el de la Teoría de la Máxima Distorsión, también conocida como el Criterio de Falla de Von Mises-Hencky, según el cual un elemento estructural falla cuando, en alguno de sus puntos, la energía de distorsión por unidad de volumen rebasa un cierto umbral. Esto en términos de tensiones puede escribirse según la llamada tensión de Von Mises.

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}} \geq \sigma_e \quad (2.16)$$

Donde  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  y  $\sigma_3$  son las tensiones principales.

Si escribimos la tensión de Von Mises en términos del tensor de tensiones, tenemos que:

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\frac{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2}{2} + 3(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)} \quad (2.17)$$

Con esta fórmula se puede obtener el valor del esfuerzo de Von Mises para un sólido en general.

## CAPITULO III

### FUNDAMENTO TEORICO

#### **3.1 ANÁLISIS ESTRUCTURAL DEL BUQUE**

##### **3.1.1 TENSIONES Y DEFLEXIONES PRIMARIAS**

ALAA MANSOUR & DON LIU. “Strength of Ships and Ocean Structures” [2]. La estructura global del buque es denominada Viga-Buque (Estructura Primaria).

Tensiones y deflexiones primarias son aquellas tensiones y deflexiones obtenidas por el momento resultante de la Viga-Buque.

La estructura del fondo es normalmente robusta, consiguiendo que el eje neutro se encuentre normalmente en la parte inferior de la sección

transversal. Por lo tanto la condición de máxima tensión de arrufo y quebranto es normalmente determinado en la cubierta principal.

Los miembros que determinan la resistencia estructural longitudinal o primaria son: Cubiertas, doble fondo, fondo, longitudinales de fondo, longitudinales de cubierta y quillas.

### **3.1.2 TENSIONES Y DEFLEXIONES SECUNDARIAS**

Ciertas partes del buque pueden ser consideradas apoyadas en la estructura restante, debido a que la parte adyacente presenta mayor rigidez que la parte considerada.

Un ejemplo será el hecho de que los mamparos y costados en la dirección longitudinal presenta una rigidez mucho mayor que la del panel reforzado, el cual está delimitado por el mamparo y el costado. A este panel reforzado se le llama Estructura Secundaria.

Las tensiones y deflexiones de este panel reforzado, se les llama tensiones y deflexiones secundarias.

### **3.1.3 TENSIONES Y DEFLEXIONES TERCIARIAS**

La tensión y deflexión en una unidad del enchapado es sometida a un cargamento lateral son denominados Tensiones y Deflexiones Terciarias.

Las cargas laterales son soportadas a través de una distribución lineal de tensiones de tracción y compresión en su espesor, pero esta se da para pequeñas deflexiones.

Para deflexiones mayores aparecen las llamadas Tensiones de Membrana.

- **Para la condición de empotrado;** Se considera deflexión pequeña cuando:

$$\frac{w}{t} \leq 0.5 \quad (3.1)$$

- **Para la condición de libre apoyo;** Se considera deflexión pequeña cuando:

$$\frac{w}{t} \leq 1 \quad (3.2)$$

Dónde:

W: Deflexión local.

t: Espesor.

## **3.2 RESISTENCIA DE PLANCHAS**

### **3.2.1 RESISTENCIA TRANSVERSAL DE PLACAS**

#### **3.2.1.1 TEORÍA CLÁSICA DE DESPLAZAMIENTOS PEQUEÑOS**

Placas delgadas no tienen rigidez de flexión en un análisis por la teoría de membranas, si se le da rigidez de flexión, la placa es el homólogo bidimensional de la viga: fuerzas transversales son recogidas por tensiones de flexión y de corte, y en el plano medio (el “eje neutral” de la viga), no hay tensiones directas. MARIN, J. (2003) “Notas de Clases de Estructuras Navales”. Guayaquil - Ecuador,

Desplazamientos en placas son del orden de 10% de su espesor, en la teoría de membranas del orden de 10 veces este espesor. Placas en estructuras de buques se comportan entre esos dos extremos. Pero, hay muchas aplicaciones que se calculan perfectamente con solo una de las dos hipótesis.

#### ➤ **Planchas bajo Presión Hidrostática**

El caso de planchas sometidas a presión hidrostática tiene un significado importante en el cálculo de la resistencia transversal del buque.

### **3.2.1.2 TEORÍAS ESPECÍFICAS DE PLACAS**

En muchos casos la teoría clásica de desplazamientos pequeños para el diseño de placas cargadas transversalmente, lleva a espesores excesivos. La teoría no permite esfuerzos de membranas que existen cuando las deformaciones se hacen grandes o cuando los lados no pueden moverse hacia adentro.

La hipótesis apropiada para las tracas de un buque es que los lados si, pueden moverse hacia adentro.

### 3.2.2 PLACAS REFORZADAS – CONCEPTOS BÁSICOS

Son estructuras que están formadas por una placa y vigas que actúan como refuerzos, generalmente en direcciones ortogonales.

El objetivo de las vigas es soportar el cargamento transversal que actúa sobre el enchapado, manteniendo en su posición y geometría de forma que soporte las cargas existentes en el plano de estructura y transmitir estas cargas hacia la estructura del buque.

Los paneles reforzados, más allá de su estanqueidad, confiere alta rigidez en el sentido longitudinal y transversal de la Viga-Buque. Estos paneles deben de ser diseñados para soportar las tensiones primarias, secundarias y terciarias que son el producto de la flexión de la Viga-Buque, cargas locales y cargas laterales en la placa respectivamente.

- **Placa Colaborante:** Es el nombre que adopta la placa cuando esta trabaja como brida de los refuerzos longitudinales y transversales aumentando de esta manera la rigidez de módulo de sección. Entonces como consecuencia de la aplicación de esta placa.

Ancho Efectivo < Distancia entre refuerzos

En muchos modelos físicos la flexión no es causada por flexión pura y si por cargas transversales que son absorbidas por el alma de la viga. Bajo efecto de estas cargas el alma es curvada induciendo deformaciones máximas en las bridas. Además estas deformaciones se originan en el alma y solo llegan a la brida por causa del cizallamiento.

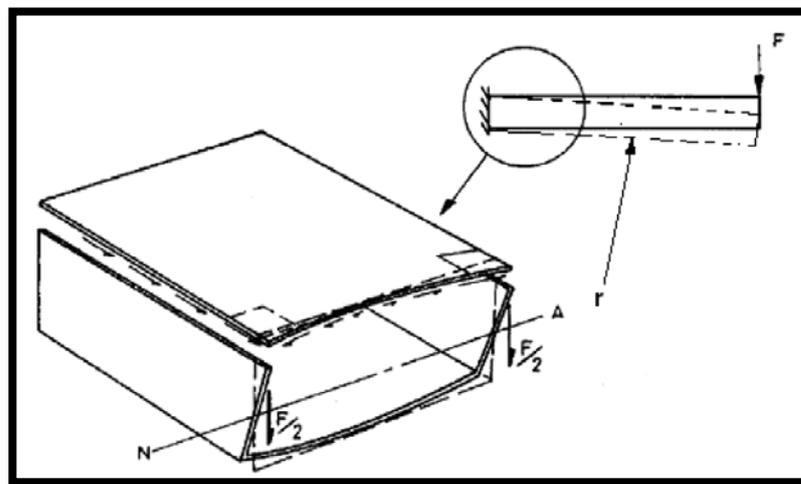


Fig. 3.1 Efecto "Shear Lag"  
Fuente: [11]

La flexión y el corte causan contracciones y distorsiones en el plano de la platabanda (brida), estas distorsiones del corte provoca que los extremos de la platabanda se deformen más que la parte central, debido a esto resulta que en la parte central hay menores tensiones a comparación a sus extremos, en consecuencia se hace menos efectiva.

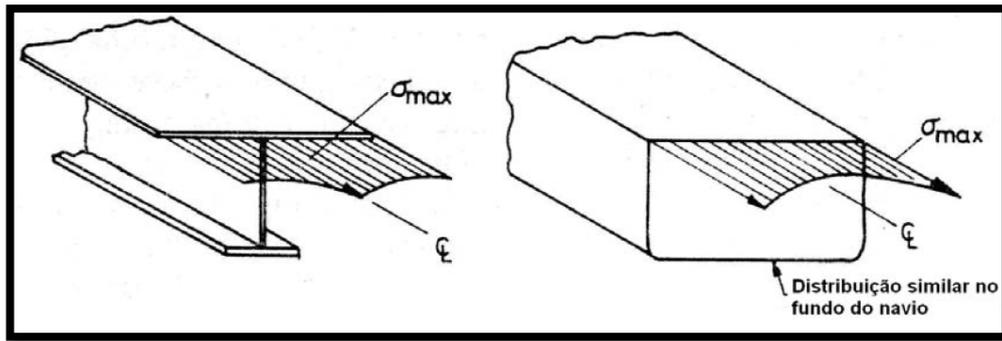


Fig. 3.2 Efecto “Shear Lag” en Vigas abiertas y Tipo Casco  
Fuente: [11]

Las platabandas al deformarse en su plano longitudinal, provocan la distorsión de la sección transversal (Alabeo), este efecto no es contemplado por la Teoría de Viga Simple.

Debido a la influencia del corte, las tensiones de flexión lejos del alma avanzan sobre esta última (Shear Lag).

Mientras que el ancho del enchapado, que cuando se calcula el momento de inercia de la sección, dará la tensión correcta en la intersección alma-platabanda, para la teoría, para la Teoría de la Viga Simple (Ancho Efectivo).

Llegamos a la conclusión de que la mejor manera de tener en cuenta el efecto de corte es a través del ancho efectivo.

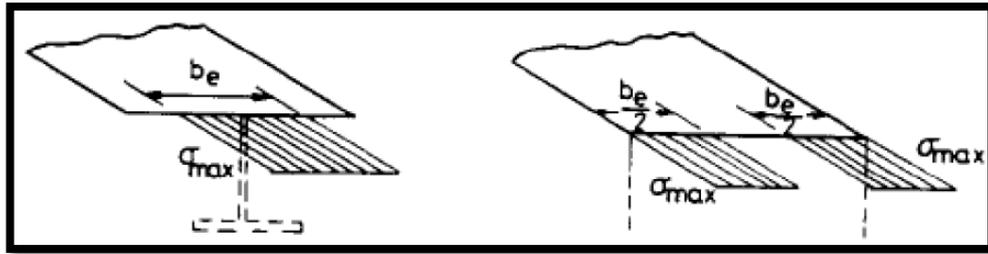


Fig. 3.3 Longitud Efectiva de perfiles en vigas abiertas y tipo casco Fuente:

[11]

### 3.2.2.1 PERFILES RIGIDIZADORES

#### ➤ Elección de la Clara de Cuadernas

Placas delgadas no son muy resistentes a cargas perpendiculares en su plano (presión hidrostática, peso de la carga útil). Por esa razón superficies grandes de placa se apoyan en el caso de construcciones marítimas en múltiples rigidizadores. La elección de la distancia entre estos rigidizadores se basa en un compromiso: una distancia pequeña da placas delgadas y rigidizadores ligeros (peso bajo) pero mucha obra de soldadura (costos altos de construcción).

La clara óptima de cuadernas puede determinarse por cálculos de “trial and error”. Pero a menudo se pierden de vista muchos factores que están contenidos en los datos de experiencia. Y los espesores de las tracas tienen que ser suficientes para aguantar un funcionamiento normal sin demasiados defectos y bultos.

#### ➤ Diseño de Perfiles

Los perfiles de refuerzo en la construcción marítima son del tipo largo y esbelto. Cuando se les carga principalmente en flexión, el diseño se basa en la teoría elemental de flexión. Por ejemplo: Las reglas de las Sociedades de Clasificación proveen en la mayoría de los casos fórmulas para un módulo resistente mínimo. Solo en casos excepcionados se formulan exigencias para sección y/o momento de inercia, e incluso entonces resulta el modulo resistente, normativo.

El modulo resistente requerido siempre incluye una tira de placa. Para refuerzos ligeros el ancho de esta tira mide 600 mm (2 pies). Para refuerzos primarios como palmejares y vigas longitudinales las sociedades de clasificación procuran formulas derivadas de la teoría.

Placas reforzadas tienen el comportamiento típico siguiente: la placa está obligada más o menos a seguir la deformación de los refuerzos y aporta en la resistencia de ellos. Si la distancia entre refuerzos es pequeña, la placa contribuirá totalmente y no hay problema. En el caso contrario la placa en distancia grande del refuerzo, no sentirá mucho la deformación del refuerzo, y entonces ya no es 100% efectiva.

#### ➤ **Secciones Adecuadas**

Para vigas que predominantemente son cargadas en flexión se utilizan de preferencia perfiles en I. Con mucho material lejos del eje

neutro dan un módulo resistente alto y un peso relativo pequeño. Además son doblemente simétricas. Cargas perpendiculares en las alas también tienen esta simetría así que nunca hay esfuerzos secundarios de flexión. Y como los esfuerzos en las alas tienen el mismo valor el material está utilizado de manera óptima: se obtiene la resistencia de fluencia en ambas alas en el mismo momento.

Reforzar placas hace que el módulo resistente del rigidizador implica una tira de ancho efectivo de placa. El ala del rigidizador no tendrá la misma sección de esta tira, así que el eje neutro está cerca de la placa y la distribución de los esfuerzos lejos de óptima. Los mejores perfiles para reforzar placas son perfiles en T con ala relativamente pesada o perfiles con nervio en ambos lados.

### 3.2.2.2 ANCHO EFECTIVO DE PLACA

Esto es un ancho imaginario por el cual los esfuerzos normales se toman igual en el borde de fijación con el refuerzo, y que tienen una resultante de esfuerzos constantes igual a la resultante de la distribución real por el ancho total de la placa.

$$w = \frac{1}{\sigma} \int \sigma_x(y) dy \quad (3.3)$$

Con:

$\sigma$ : Esfuerzo en alma

w: Ancho efectivo

El Ing. Schade elaboro una solución a la ecuación anterior, introduciendo una función de tensión de Air,  $\varphi_{(x,y)}$ . La solución de Schade cumple con las ecuaciones de equilibrio y las condiciones limites (aunque no totalmente en los extremos), y por eso representa una buena aproximación para paneles relativamente largos, como son los paneles en construcción naval.

### **3.2.3 PLACAS REFORZADAS – MÉTODOS DE ANÁLISIS**

#### **3.2.3.1 TEORÍA DE PLACAS ORTOTROPICAS**

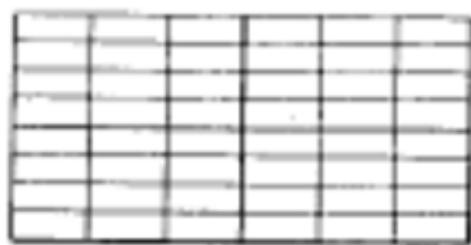
Es una placa con comportamiento elástico en diferentes direcciones es anisotrópica. Placas en estructuras navales, igual como en otras estructuras metálicas, tiene 3 planos de simetría con respecto a sus propiedades elásticas. Si son anisotrópicos, son ortotrópicos.

Una placa reforzada en dos direcciones con vigas puede ser analizada con un modelamiento de una malla para las vigas y elemento de placa. Si las vigas son uniforme y múltiples, tienen un alto grado de interacción, o si hay una pared doble, se puede utilizar el concepto de placa equivalente donde las vigas son repartida, por toda la superficie de la placa. Porque las vigas normalmente son diferentes en las dos direcciones, la rigidez efectiva en flexión también es diferente en las 2 direcciones. Nuestra placa equivalente es ortotropica.

Preferimos analizar estructuras con mallas de vigas y con placas, por el método de Elementos Finitos. Pero existen métodos de cálculo para placas simples reforzadas, métodos frecuentemente utilizados en construcción naval como el método de Schade. Para estructuras con paredes dobles, el análisis por placa equivalente ortotrópica, es más sencillo que el análisis por elementos finitos e igualmente preciso, lo que no se puede afirmar del método de Schade.

Teoría de placas ortotrópicas con refuerzo y sin refuerzo, empotrada o apoyada, de acuerdo a las curvas de Schade. Hay diferentes tipos de Teoría para hallar las deflexiones y los esfuerzos en la placa. La que trabajaremos serán con la curva de Schade se muestra los siguientes tipos:

- **Tipo A:** Para planchas con refuerzos cruzados todos los que se requieran.



Type A—Cross-stiffening

$$i_a = \frac{I_{na}}{S_a} + 2 \left( \frac{I_a - I_{na}}{b} \right)$$

$$i_b = \frac{I_{nb}}{S_b} + 2 \left( \frac{I_b - I_{nb}}{a} \right)$$

$$\rho = \frac{a}{b} \sqrt[4]{\frac{i_b}{i_a}} \quad (3.4)$$

$$n = \sqrt{\frac{I_{pa} I_{pb}}{I_{na} I_{nb}}}$$

- **Tipo B:** Para planchas con un refuerzo en una dirección central y varios refuerzos en la otra transversal a la del refuerzo único.



Type B—Modified cross-stiffening

$$i_a = 2 \frac{I_a}{b}$$

$$i_b = \frac{I_{nb}}{S_b} + 2 \left( \frac{I_b - I_{nb}}{a} \right)$$

$$\rho = \frac{a^4}{b} \sqrt{\frac{i_b}{i_a}} \quad (3.5)$$

$$n = 0.124 \sqrt{\frac{I_{pb}^2 b}{I_a I_{nb} S_b}}$$

➤ **Tipo C:** Para planchas con un refuerzo en una sola dirección.



Type C—Single stiffening

sin refuerzos.

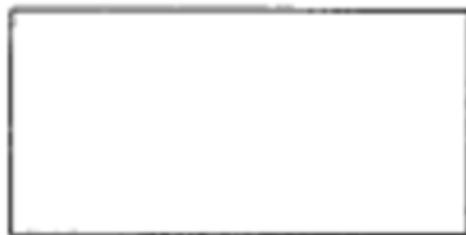
$$i_a = 0$$

$$i_b = \frac{I_{nb}}{S_b}$$

$$\rho = \infty \quad (3.6)$$

$$n = \text{indeterminado}$$

➤ **Tipo D:** Para planchas



Type D—Unstiffened plate

$$i_a = i_b = \frac{t^3}{12(1-\nu^2)}$$

$$\rho = \frac{a}{b} \quad (3.7)$$

$$n = 1$$

Una vez entendido esto pasare a identificar la simbología expuesta al costado de las gráficas:

**a, b:** Longitud y ancho del panel.

- S<sub>a</sub>, S<sub>b</sub>:** Separación de refuerzos longitudinales y refuerzos transversales.
- I<sub>na</sub>, I<sub>nb</sub>:** Momento de inercia de un refuerzo longitudinal y refuerzo transversal incluyendo el ancho efectivo de plancha.
- I<sub>a</sub>, I<sub>b</sub>:** Momento de inercia del refuerzo central longitudinal y refuerzo transversal, incluyendo el ancho efectivo de plancha.
- A<sub>a</sub>, A<sub>b</sub>:** Área de alma del refuerzo central longitudinal y refuerzo transversal.

Con todos estos parámetros correctamente definidos entendemos que para cada tipo de caso ya sea A, B, C o D, podemos calcular las propiedades que salen al lado derecho de cada uno, los importantes para poder acceder a la tabla para calcular K en el eje vertical de la derecha.

K se calcula accediendo a la tabla en el eje horizontal inferior con el valor calculado de  $\rho$  de acuerdo al tipo de caso, y viendo las condiciones de contorno de la plancha, una vez encontradas las curvas que coinciden con el tipo de contorno de nuestra plancha verificamos cuál de esas curvas corresponde al valor calculado de  $n$  y la intersectamos con una recta vertical trazada en el eje horizontal para nuestro respectivo  $\rho$ . A partir de este punto trazamos una horizontal hacia el eje vertical y calculamos el valor de K.

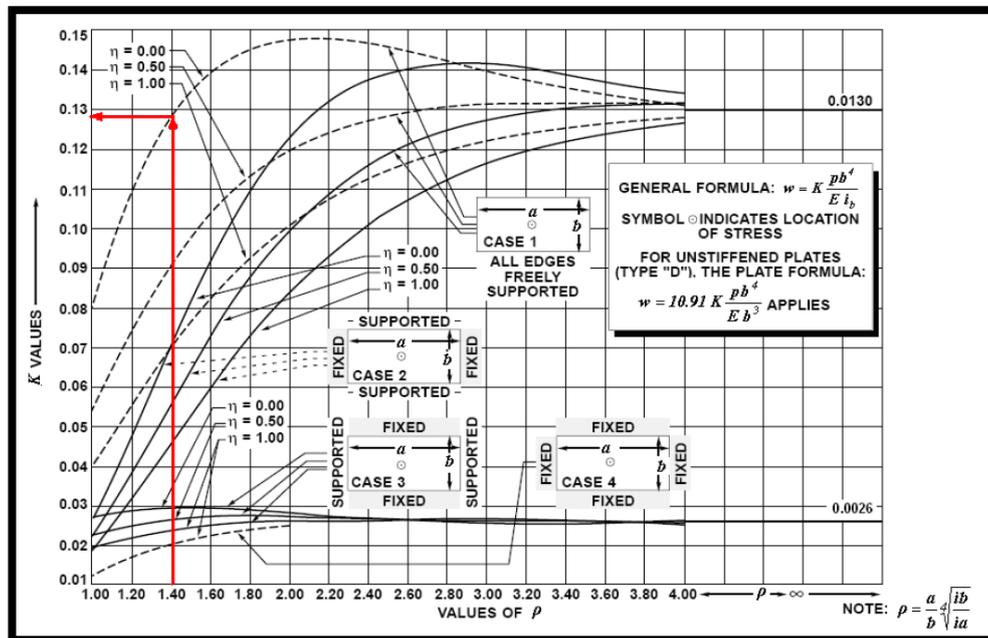


Fig. 3.4 Curvas de Schade en paneles reforzados  
Fuente: [11]

Vale la pena resaltar que esta tabla también nos brinda desplazamientos en el punto medio de las planchas con 4 tipos de condiciones de contornos:

- Todos los bordes libremente soportados.
- Los bordes largos apoyados, bordes cortos empotrados.
- Los bordes cortos apoyados, bordes largos empotrados.
- Todos los bordes empotrados.

Una vez calculado K para cualquiera de los casos que se presente, podremos obtener el desplazamiento utilizando la fórmula expuesta en la misma tabla, hay que notar que la tabla nos proporciona 2 tipos de fórmulas, la primera es una fórmula general y la otra es una fórmula que se aplica solo para planchas del tipo D.

### 3.3 TEORÍA DE VIGAS

Estimar los niveles de esfuerzos de un modo rápido y aceptable. Es necesario:

- Calcular el cargamento: Cargas concentradas y/o cargas distribuidas.
- Escoger condición de apoyo que mejor representa el comportamiento de la viga en función de las cargas aplicadas.
- Seleccionar escantillones.
- Seleccionar el punto de análisis.
- Calcular el momento flector máximo producido por la carga aplicada.

Estimación del esfuerzo producido por la flexión pura de la viga utilizando la conocida expresión:

$$\sigma_{Flexion} = \frac{MxY}{t} \quad (3.8)$$

Cuando es aplicada la teoría de vigas para estimar los esfuerzos en paneles reforzados los siguientes efectos son despreciados:

- Efectos cortantes.

- Rigidez torsional del panel.
- Efecto de Poisson.
- Unión con los otros elementos.

### **3.4 TEORÍA DE LA VIGA BUQUE**

LETCHER J. Geometry of Ships [7]. Como ya se explicó calcular la estructura de un barco, presenta grandes dificultades, debido a la gran complejidad de esta y de la obtención de las cargas, es por esto que se puede hacer estimaciones, basándose en estudios probabilísticos y en la experiencia, como lo hacen las casas clasificadoras, haciendo este método de cálculo unos de los más utilizados, por su sencillez y rapidez.

Recordemos que podemos dividir la estructura en primaria, secundaria y terciaria, siendo la primaria el buque como una sola gran pieza estructural, la secundaria se refiere al estudio de paneles, como un mamparo o el doble fondo, y en la terciaria se consideran los elementos componentes de los paneles, como un bao con su placa asociada.

ALAA MANSOUR & DON LIU. Strength of Ships and Ocean Structures [2]. En la teoría de la Viga-Buque, se asume el barco, en su totalidad como una viga simplemente apoyada, con cargas distribuidas aplicadas a lo largo de esta, las que son producidas por las fuerzas de

empuje, generadas por el volumen desplazado, y que actúan hacia arriba y las fuerzas de los pesos, producidas por la estructura y la carga transportada, que actúan hacia abajo en el sentido vertical, como se puede apreciar en la siguiente figura.

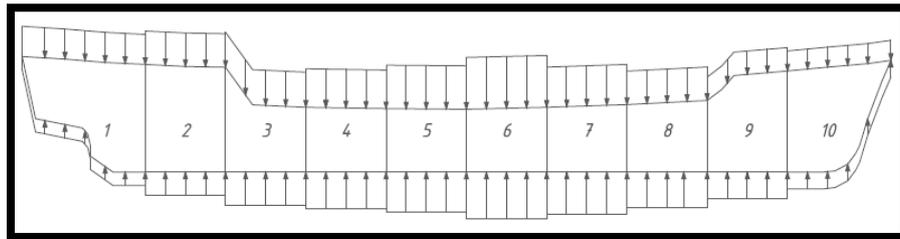


Fig. 3.5 Distribución de Fuerzas como Viga-Buque  
Fuente [10]

Por lo tanto, para calcular los esfuerzos y deflexiones a las que estará sometido un buque, este se calculara como una viga, es decir se seguirán los tres pasos, explicados anteriormente, para calcular una viga normal, que son el cálculo de las cargas, de los esfuerzos y de las deflexiones. Estos pasos se explicaran a continuación.

### 3.4.1 OBTENCIÓN DE LAS CARGAS

En la figura 3.5 se muestra un buque dividido en diez secciones que están sometidas a cargas de empuje, representadas por flechas en el fondo del barco y apuntando hacia arriba y cargas de peso representadas por flechas en la cubierta apuntando hacia abajo. Las diferencias entre las magnitudes de las cargas en cada sección se debe, en el caso del empuje, a que las formas del fondo del casco no son constantes a lo largo de este, y en el caso de las cargas de peso, se debe a la distribución de los pesos en el

buque, ya sea por el arreglo de la estructura, que es reforzada en los extremos del buque debido a que zonas están más expuestas a cargas externas, y debido a la ubicación de la carga transportada.

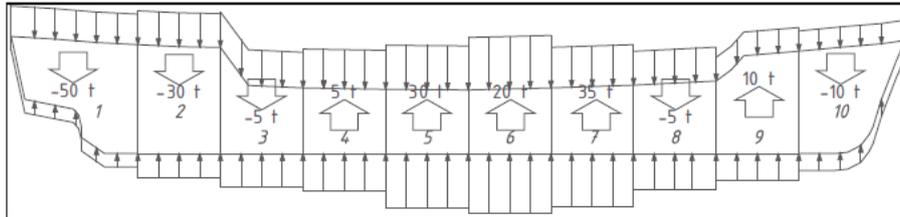


Fig. 3.6 Resultante de Cargas por Módulos  
Fuente [10]

Las flechas “grandes” representan las diferencias entre las fuerzas de empuje y los pesos de cada sección. Como se puede ver las cargas que apuntan hacia abajo representan un exceso de peso y las flechas o cargas que apuntan hacia arriba representan un exceso de empuje en cada zona. En el ejemplo presentado debido a las formas y ubicación de las cargas la viga se flexionara hacia abajo en los extremos.

Si dividimos el casco en infinitas secciones que están sometidas a cargas de empuje y de peso, y las dibujamos en un gráfico obtenemos la curva de carga,  $W(x)$  y la curva de empuje,  $b(x)$ . Si obtenemos el área debajo de cada una de estas dos curvas obtenemos el peso total del buque y el empuje total generado por el volumen sumergido, esos dos valores son iguales pero con direcciones opuestas, lo que hace que nuestra embarcación se encuentre flotando y en equilibrio. Si sumamos estas dos curvas obtenemos la Curva de Cargas,  $q(x)$ , la cual representa la distribución de los pesos y los empujes a lo largo de la embarcación.

Como en cualquier cálculo de vigas, si integramos la curva de cargas, con respecto a la eslora, obtenemos la curva de esfuerzos cortantes.

$$V_{(x)} = \int_0^{x_1} [b(x) - w(x)] dx \quad (3.9)$$

En donde:

$b(x)$  = Es el empuje por unidad de longitud.

$W(x)$  = Es el peso por unidad de longitud.

Ahora si integramos esta curva, desde 0 a un punto  $x$  en la viga, obtenemos la curva de momentos flectores.

$$M_{(x)} = \int_0^{x_1} V(x) dx \quad (3.10)$$

Luego de obtenidas las curvas de carga, esfuerzos cortantes y de momentos, podemos obtener los esfuerzos a los que estará sometida la estructura primaria.

### **3.4.2 OBTENCIÓN DE LOS ESFUERZOS PRIMARIOS**

Para obtener los esfuerzos primarios, es posible utilizar la Ley de Navier, puesto que el barco, se comporta en su totalidad como una viga sometida a flexión simple. Para esto, como se vio en el punto anterior, es

necesario tener las propiedades geométricas de la sección en la cual se quieren obtener los esfuerzos.

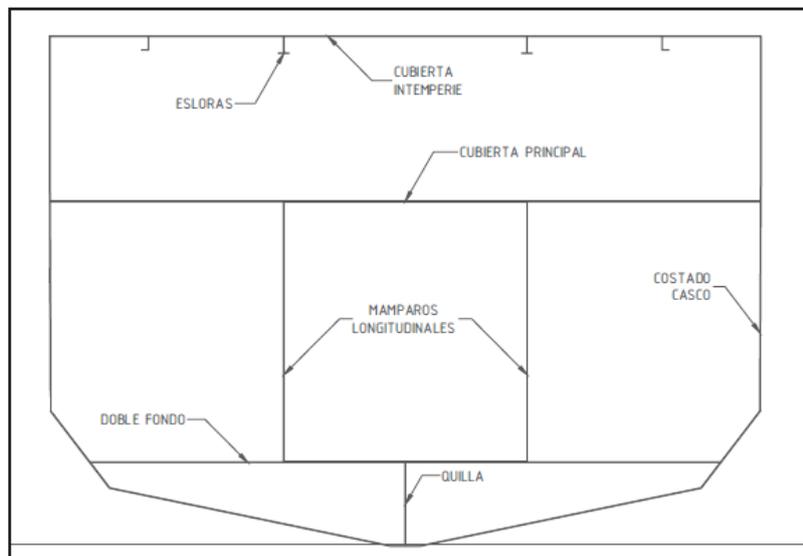


Fig. 3.7 Sección Media  
Fuente [10]

MARTINEZ, S (2011). “Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño de Ingeniería. ELSEVIER DOYVA, [7]. Para el cálculo de inercia, y por ende del módulo de sección,  $SM$ , y de la ubicación del eje neutro, según los reglamentos, como el Bureau Veritas, definen que deben considerarse los elementos que tengan continuidad longitudinal y que se encuentren debajo de la cubierta de fuerza, que es definida en el reglamento como la cubierta continua más alta. Entre estos, el principal elemento a considerar es el casco, puesto que el costado de este es el que contribuye mayormente a la inercia. Además se consideran elementos longitudinales, como la quilla, las cubiertas y esloras, siempre y cuando estos tengan una extensión tal que sean capaces de absorber los momentos de la viga en total.

Recordando la Ley de Navier, el esfuerzo en la sección media es:

$$\sigma_x = \frac{M(x)}{SM} \quad (3.11)$$

Dónde:

$M(x)$  = Es el momento Flector.

$SM$  = Es el módulo de la sección.

## CAPITULO IV

### DESCRIPCION DE LA EMBARCACION

#### **4.1 CONCEPTOS PREVIOS**

##### **4.1.1 TRANSPORTE FLUVIAL**

El transporte fluvial es apto para trasladar mercaderías pesadas de bajo precio, en especial gráneles, sólidos y líquidos; en general, es recomendable para productos de gran volumen con relación a su valor y que no exigen, por su naturaleza, un transporte a corto plazo, ya que el ritmo del transporte fluvial es lento. Podría afirmarse que, con una adecuada infraestructura y vehículos fluviales, el modo fluvial es el más económico de los modos interiores de transporte de mercaderías (comparativamente con el ferroviario y con el carretero).

Otras ventajas que tiene el modo fluvial son sus bajos niveles de accidentología y de impacto ambiental por emisión de gases o ruidos, especialmente con relación al transporte carretero. Una barcaza fluvial de

mil quinientos toneladas equivale a treinta vagones de ferrocarril de cincuenta toneladas cada uno o a cincuenta y cuatro camiones de veintiocho toneladas cada uno.

#### **4.1.2 ACERO ESTRUCTURAL ASTM A-36**

Es un acero estructural al carbono, utilizando en construcción de estructuras metálicas. Tiene una densidad de  $7850 \text{ kg/m}^3$ .

Sus propiedades, como la mayoría de los aceros, el A36 en barras, planchas y perfiles estructurales con espesores menores de 8pulg. tiene un límite de fluencia de  $250 \text{ MPa}$  ( $36 \text{ Ksi}$ ), y un límite de rotura mínimo de  $410 \text{ MPa}$  ( $58 \text{ Ksi}$ ). Tiene un módulo de elasticidad ( $E=200 \text{ GPa}$ ) y un módulo de poisson de 0.3.

#### **4.2 CARACTERÍSTICAS DE LA EMBARCACIÓN**

- Esta embarcación fluvial, se diseñó mediante las normas ABS, para navegar en el Rio Apurímac, con el objetivo de poder transportar 04 camionetas con carga a granel. Esta barcaza tiene las siguientes características principales:

L (Eslora) = 15.8 m

B (Manga) = 4 m

D (Puntal) = 1 m

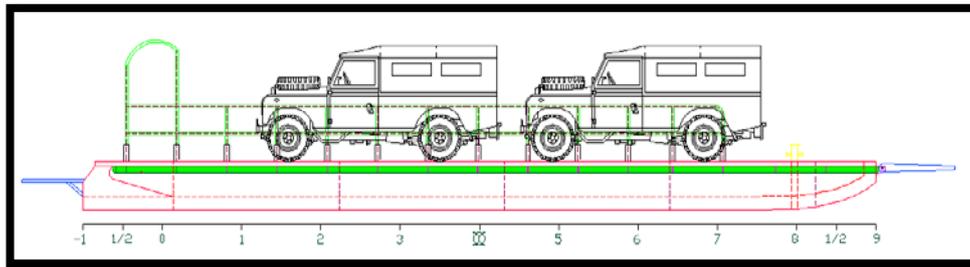


Fig. 4.1 Vista Longitudinal  
Fuente: Propia

- En épocas de sequias el calado mínimo del rio es 1.5 m. y en épocas de lluvia tiene un calado máximo de 3.5 m.
- El material de la embarcación es de Acero estructural ASTM A36.
- El ancho estándar de cada camioneta es de 1.7 m.

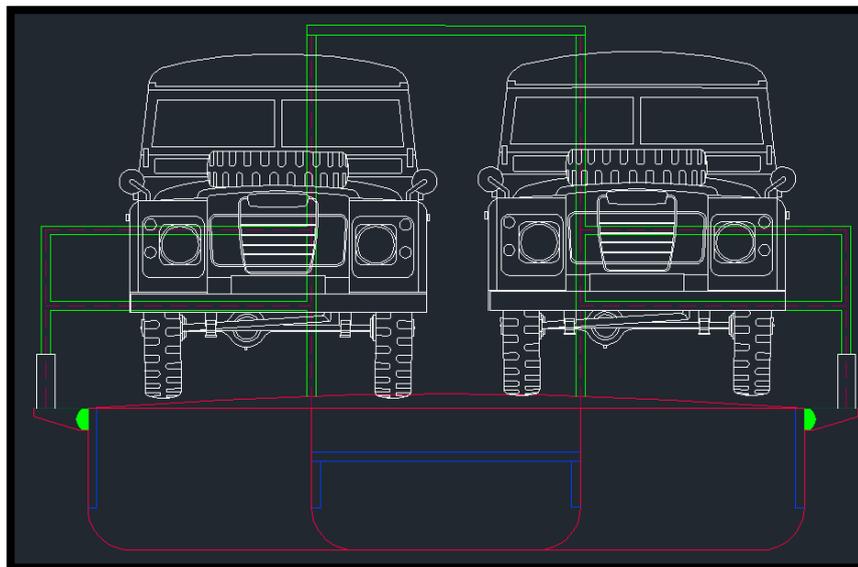


Fig. 4.2 Vista Transversal  
Fuente: Propia

## 4.3 MODELO GEOMÉTRICO

### 4.3.1 MODELO DE LA VIGA

Se modelara una viga bi-apoyada de longitud 5600 mm, sujeta a una carga distribuida de 180 KN/m, utilizando 20 elementos en la viga. A sección recta de la viga en formato I con alas iguales de espesor de 2 cm y ancho de 180 cm, con un alma de espesor de 2 cm y una altura de 900 mm. El material es acero común.

Se definirá la sección de la viga según los datos indicados:

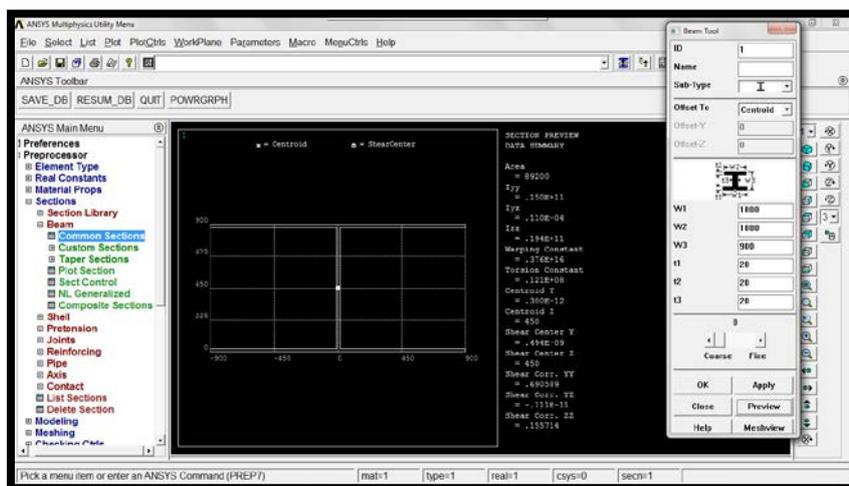


Fig. 4.3 Sección de la Viga  
Fuente: Propia

Se obtiene el área, momento de inercia con respecto al eje “y” y centro de área en el eje Z, que son:

$$A = 89200 \text{ mm}^2$$

$$I_{yy} = 0.15 \cdot 10^{11} \text{ mm}^4$$

$$X_z = 450 \text{ mm}$$

Ahora dimensionamos la viga

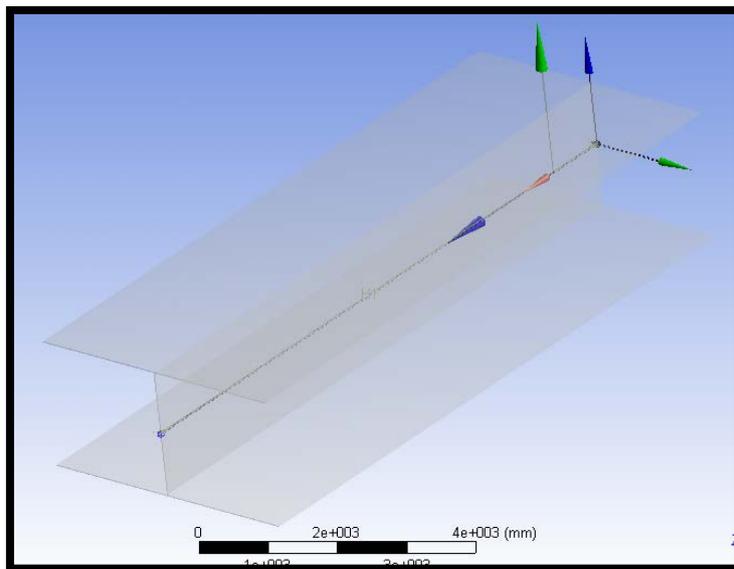


Fig. 4.4 Modelo Geométrico de la Viga  
Fuente: Propia

### 4.3.2 MODELO DE LA PLACA

LARA, (2000) “Calculo de Estructuras mediante el Empleo de Modelos de Elementos Finitos”, Madrid [8]. Una placa reforzada en dos direcciones con vigas puede ser analizada con un modelamiento de una malla para las vigas y elemento de placa. Si las vigas son uniforme y múltiples, tienen un alto grado de interacción, o si hay una pared doble, se puede utilizar el concepto de placa equivalente donde las vigas son

repartida, por toda la superficie de la placa. Porque las vigas normalmente son diferentes en las dos direcciones.

$$D_x \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2H \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + D_y \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = p(x, y) \quad (4.1)$$

Esta ecuación es la que describe el comportamiento elástico de los paneles estructurales.

Modelaremos una placa de longitud de 3000 mm y un ancho de 4500 mm con un espesor de 10 mm. Se distribuye en toda la placa una presión de 15000 KPa y se utilizara 3 refuerzos de 150 mm de alma. La distancia entre refuerzos es de 750 mm. Esta placa será empotrada en sus 4 lados.

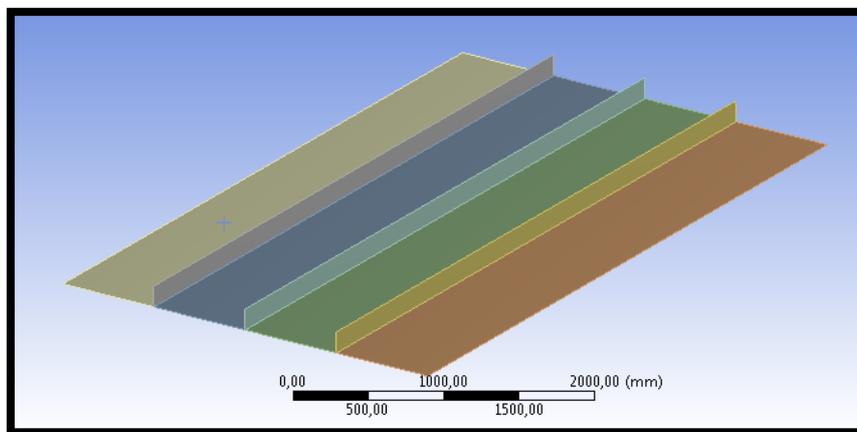


Fig. 4.5 Modelo Geométrico de Placa Reforzada  
Fuente; Propia

### 4.3.3 MODELO ESTRUCTURAL DE LA EMBARCACIÓN

Se modelo la embarcación como superficie en el programa Solidwork, luego se exporto como formato IGES al programa ANSYS. Los elementos que se usaron en la presente Tesis y disponibles en la librería del

software ANSYS, serán: elementos “Shell 181” y el elemento “Beam 3”.

Los elementos estructurales son los siguientes:

| ITEM | ELEMENTO | DIMENSIONES          |
|------|----------|----------------------|
| 1    | Casco    | PL. 6mm              |
| 2    | Vagra    | PL. 4mm x 110mm      |
| 3    | Eslora   | PL. 4mm x 100mm      |
| 4    | Mamparos | PL. 4mm              |
| 5    | Cuaderna | L 50mm x 50mm x 6 mm |
| 6    | Varengas | L 50mm x 50mm x 6 mm |
| 7    | Bao      | L 50mm x 50mm x 6mm  |
| 8    | Puntal   | Ø3”                  |

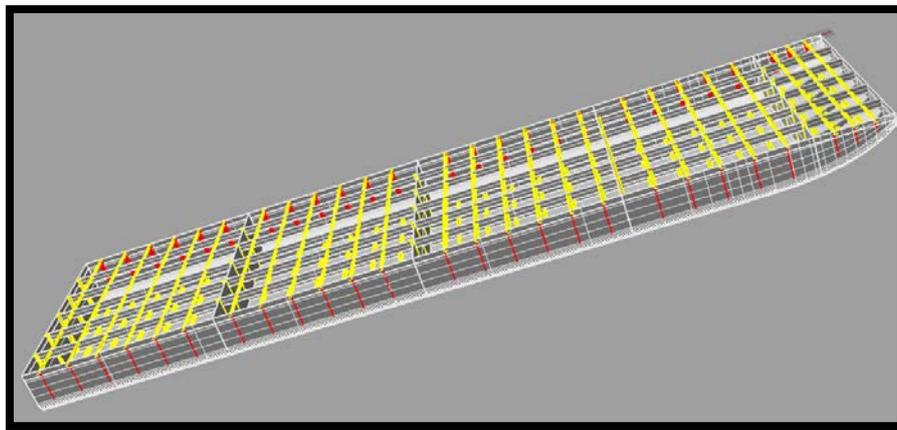


Fig. 4.6 Modelo Isométrico de la Barcaza  
Fuente: Propia

El elemento “Shell 181” será considerado en las siguientes partes estructurales:

- Casco
- Vagra
- Eslora

- Mamparos
- Varenga
- Cuadernas
- Baos
- Cubierta Principal

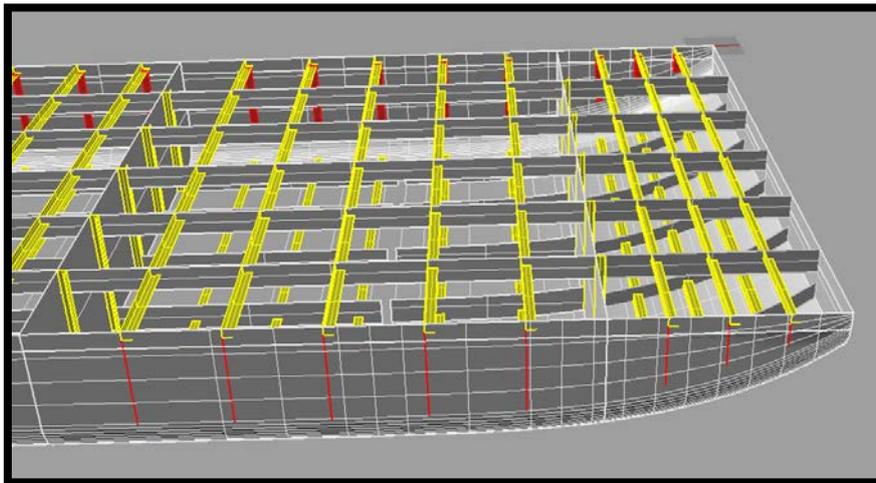


Fig. 4.7 Modelo Tipo “Shell 181”  
Fuente: Propia

Así también se ha modelado como elemento “Beam3” el siguiente miembro estructural:

- ✓ Puntales

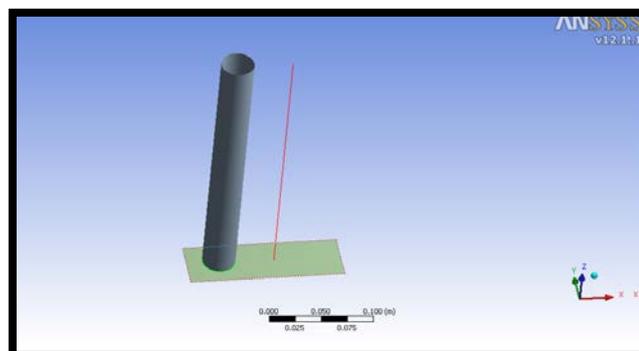


Fig. 4.8 Puntal  
Fuente: Propia

## **CAPITULO V**

### **MODELO NUMERICO**

#### **5.1 CONCEPTOS PREVIOS**

##### **5.1.1 GENERACIÓN DE MALLA**

ERDOGAN MADENCI GUVEN (2006). “The Finite Element Method and Applications in Engineering Using ANSYS” [6]. Una malla es un conjunto de celdas contiguas que permite representar en forma discreta el dominio de un problema a resolver numéricamente. La confiabilidad de la solución numérica obtenida depende de la calidad de la malla generada. Los criterios de calidad a usar dependen del método numérico escogido y del tipo de problema a resolver.

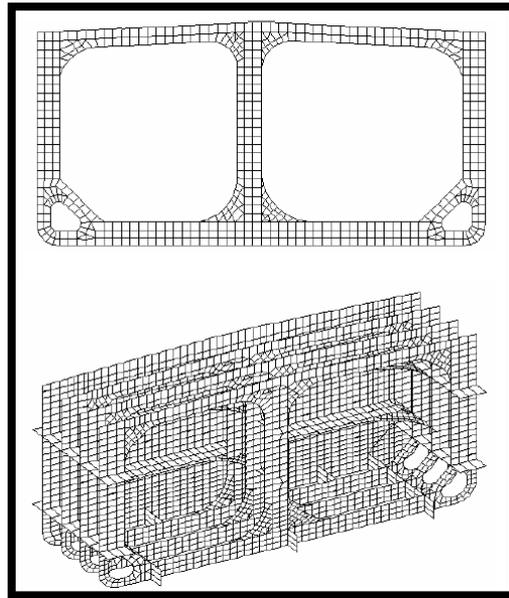


Fig. 5.1 Enmallado de Cuadernas  
Fuente: [1]

En esta presentación se discutirá sobre los métodos para modelar y describir la geometría del dominio, los tipos de mallas más usados, algoritmos para generar mallas, mostrando con más detalle uno para generar mallas mixtas, criterios de refinamiento y de calidad usados, el estado de la investigación actual en el área.

Las mallas geométricas se pueden clasificar en estructuradas y no estructuradas. Las mallas estructuradas se caracterizan estar compuestas de celdas de un tamaño similar y del mismo tipo, por ejemplo, triángulos o rectángulos, en dos dimensiones, tetraedros o hexaedros en tres dimensiones. Estas mallas son fáciles de generar pero no permiten modelar eficientemente problemas geoméricamente complejos. Por otro lado, las mallas no estructuradas permiten el uso de celdas de distinto tipo y/o de diferente tamaño. Estas mallas requieren de algoritmos y estructuras de datos más complejos que las anteriores, pero permiten modelar geometrías complejas y

optimizar el número de celdas usadas de acuerdo a la necesidad de la aplicación.

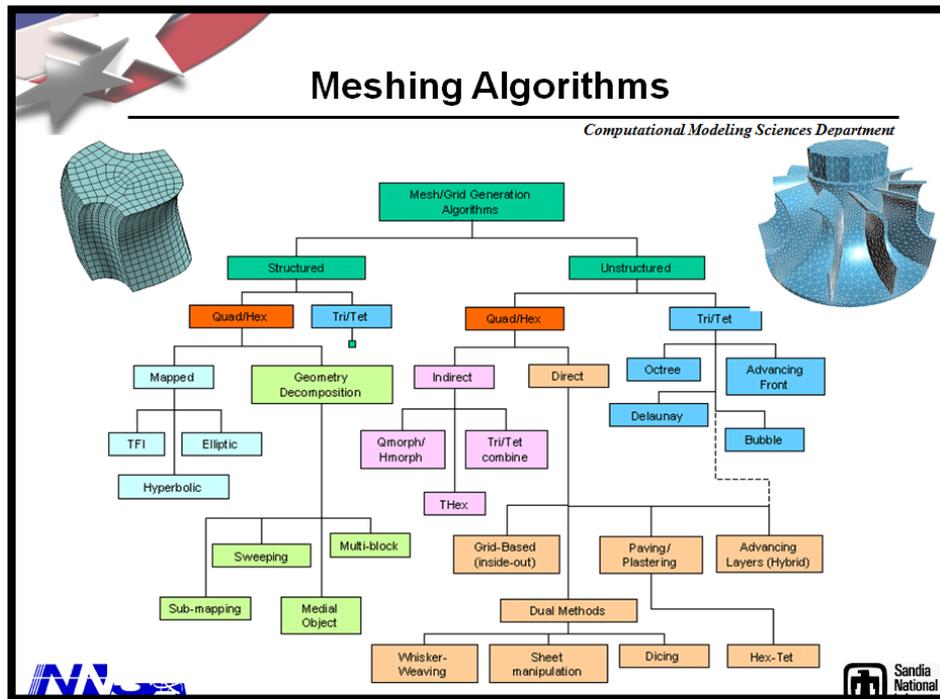


Fig.5.2 Algoritmos de Malla  
Fuente: [6]

Actualmente, la generación de una malla adecuada en dos dimensiones se considera un problema resuelto, pero no así en tres dimensiones. En tres dimensiones se trabaja en el diseño algoritmos eficientes, tanto secuenciales como paralelos, en todas las etapas del proceso de generación de una malla de calidad, para poder resolver cada vez problemas más complejos.

## 5.1.2 TIPOS DE ELEMENTO DE MALLA

### 5.1.2.1 ELEMENTO BEAM-3

Los elementos Beam son elementos uniaxiales que pueden estar sometidos a tensión, compresión y flexión.

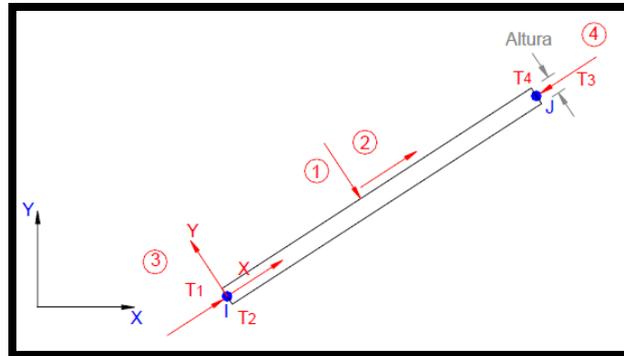


Fig. 5.3 Elemento Beam-3  
Fuente: [4]

El elementos Beam-3 tiene tres grados de libertad en cada nodo: traslaciones en las direcciones “X” y “Y” y rotación alrededor del eje “Z”. La figura 12 muestra la geometría y sistema coordenado del elemento. La comprensión del sistema coordenado resulta fundamental a la hora de aplicar cargas distribuidas (presiones) sobre los elementos; las presiones normales positivas actúan hacia el elemento, de la forma indicada por los números encerrados en círculo en la misma figura. El elemento requiere de la definición del área transversal, el momento de inercia del área, la altura de la sección transversal y una deformación inicial (si existe).

#### 5.1.2.2. ELEMENTO BEAM-4

Este elemento es similar al Beam-3, pero se utiliza en análisis tridimensionales. Tiene seis grados de libertad en cada nodo: tres traslaciones y tres rotaciones. El elemento puede definirse con dos nodos (al igual que el

elemento Beam-3) o con tres nodos; en este caso el tercer nodo se usa para orientar la sección transversal del elemento en el espacio, aunque esta misma tarea puede llevarse a cabo indicando un ángulo de orientación (Theta) en sus constantes reales. Las cargas del elemento se definen según las direcciones indicadas en la figura 13. Para usar el elemento se deben definir su área transversal, los momentos de inercia alrededor de los tres ejes, el espesor de la sección en las direcciones Y y Z (en coordenadas del elemento), la deformación inicial (si existe) y las constantes de deflexión por cortante (ShearY y ShearZ) si se desea tener en cuenta este efecto.

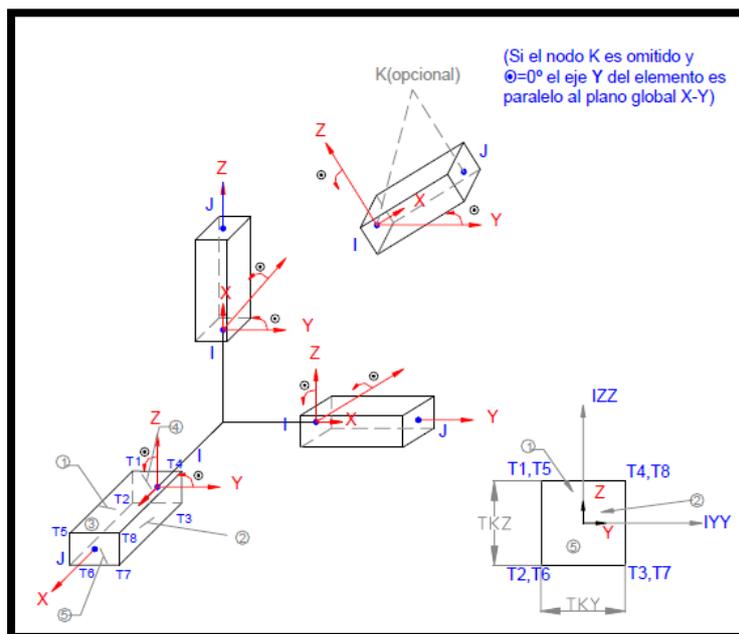


Fig.5.4 Elemento Beam-4  
Fuente: [4]

### 5.1.2.3 ELEMENTO SHELL181

Es adecuado para el análisis de estructuras de cascara delgada a moderadamente gruesas. Usado en refuerzos longitudinales, vagras y en el casco.

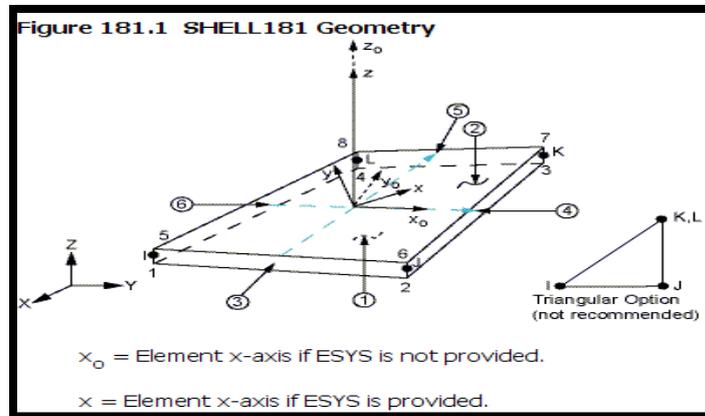


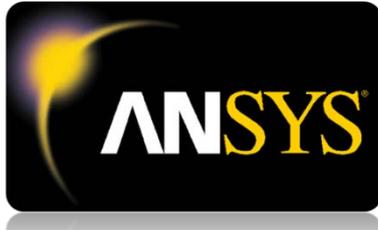
Fig. 5.5 Elemento SHELL181  
Fuente: [4]

Este elemento cuenta con 6 grados de libertad: 3 de rotación y 3 de traslación. Su malla es de 4 nodos.

## 5.2. Generación y Validación del Software ANSYS

Existen 3 grandes teorías para el análisis estructural, que son las siguientes:

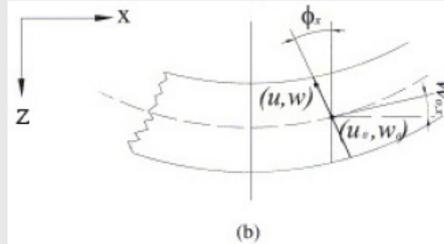
- CPT (Classical Plate Theory): Teoría clásica de placas.
- FSDT (First order Shear Deformation Theory): Teoría de primer orden.
- HSDT (Higher order Shear Deformation Theory): Teoría de orden superior.



Este Software está programado bajo la Teoría de Primer Orden (FSDT).

- **FSDT (First order shear deformation theory)**, assumes constant transverse shear deformation and violates free surface boundary conditions.

$$\bar{u}(x, y, z) = u(x, y) - z\phi_x,$$
$$\bar{v}(x, y, z) = v(x, y) - z\phi_y,$$
$$\bar{w}(x, y, z) = w(x, y).$$



Aquí se muestra los siguientes pasos para validar la teoría:

- **Displacement field** (Campo de Desplazamientos).
- **Elasticity theory** to get strains (Teoría de elasticidad para obtener deformaciones unitarias)
- **Law of Hook** to get stresses (Ley de Hooke para obtener esfuerzos).
- **The principle of virtual work**, then use the discretization (Trabajo y Energia)
- **Apply boundary conditions** (Condiciones de Contorno).
- **Solve it!** (Solucion)

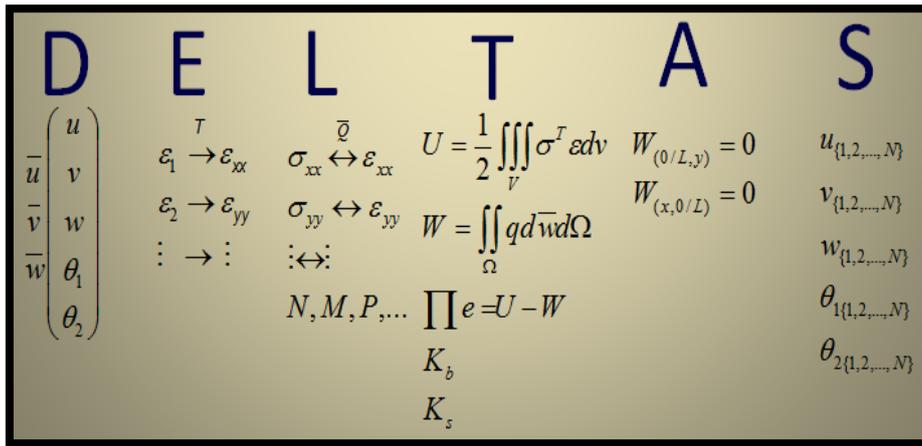


Fig. 5.6 Teoría de Primer Orden  
Fuente: [10]

Comparando resultados FSDT vs HSDT.

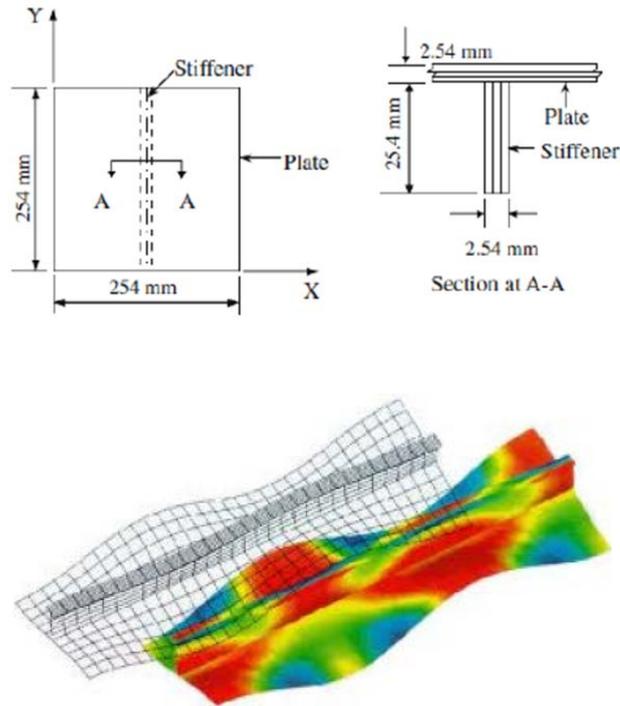


Fig. 5.7 Modelo Numérico de Placa con Refuerzo  
Fuente: [10]

Se obtuvo los siguientes resultados:

| Espesores de Placa (mm) | Refuerzo (mm x mm) | FSDT    | HSDT    |
|-------------------------|--------------------|---------|---------|
| 2.794                   | 0 x 0              | 295.730 | 295.825 |
| 2.778                   | 6.35 x 0.635       | 263.489 | 291.362 |
| 2.730                   | 12.7 x 1.27        | 118.603 | 246.062 |

|       |               |        |         |
|-------|---------------|--------|---------|
| 2.651 | 19.05 x 1.905 | 41.063 | 146.171 |
| 2.54  | 25.4 x 2.54   | 17.088 | 72.937  |
| 2.397 | 31.75 x 3.175 | 8.620  | 37.386  |
| 2.222 | 38.1 x 3.810  | 5.001  | 20.894  |
| 2.016 | 44.45 x 4.445 | 3.204  | 12.720  |

### 5.3 MODELO NUMÉRICO DE LA VIGA

Una vez definido la geometría de la viga, el tipo de elemento (que define la malla), el tipo de sección y sus constantes reales, y por ultimo las propiedades del material procedemos al mallado.

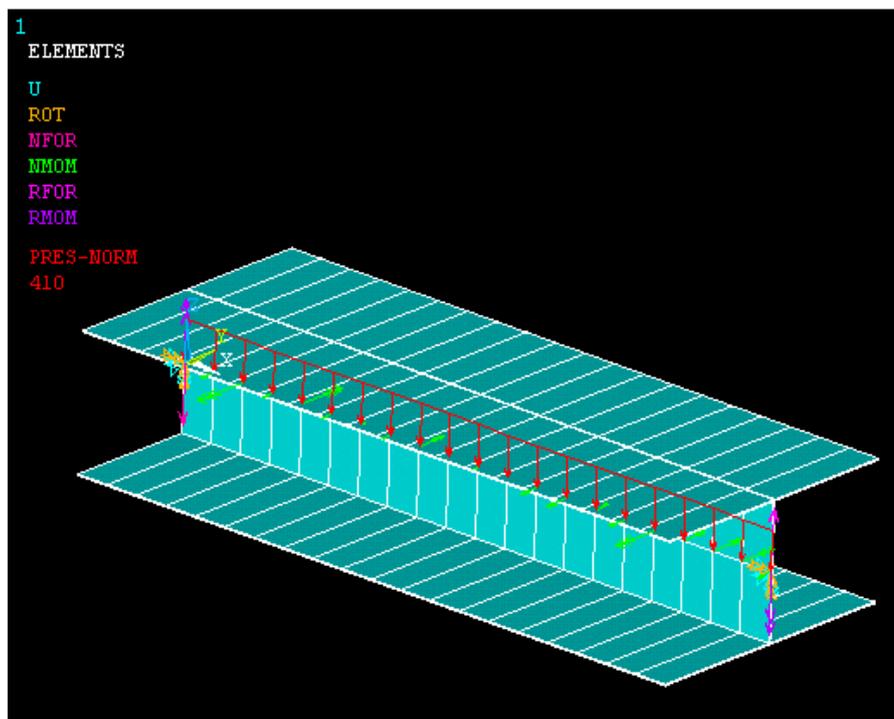


Fig. 5.8 Discretización de la Viga  
Fuente: Propia

Donde se puede ver que el tipo de material es el “Beam 3”. El enmallado de la Viga tiene un total de 20 elementos.

Se distribuye una carga lineal de 180 KN/m en la viga bi-apoyada.

## 5.4 MODELO NUMÉRICO DE LA PLACA

Una vez modelado geoméricamente la placa con sus respectivas dimensiones y cantidad de refuerzos. Sabiendo que el tipo de elemento es del tipo “Casca” (Shell 181). Se procede con el enmallado.

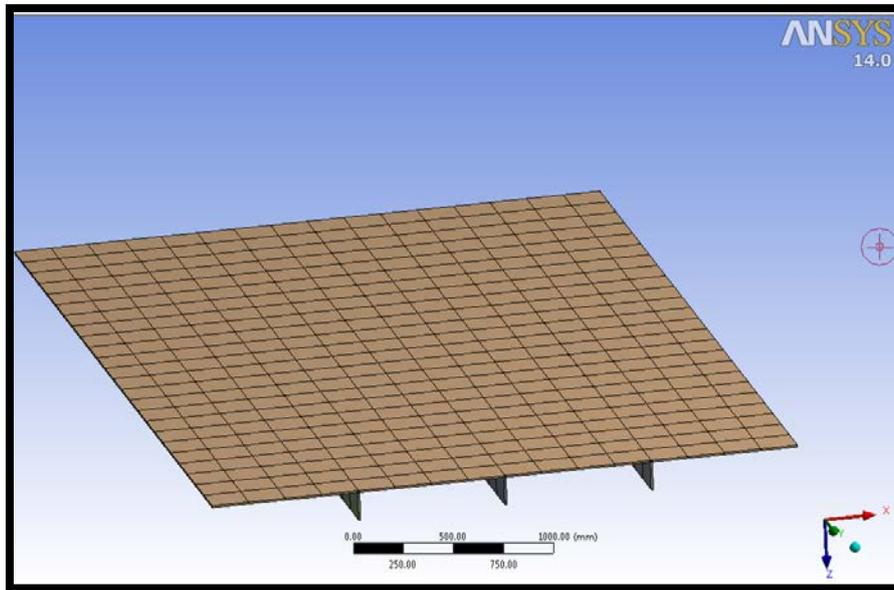


Fig. 5.9 Discretización de la Placa Reforzada  
Fuente: Propia

Según la figura tenemos una malla densa de 24x24, con un total de 500 nodos y 456 elementos.

## 5.5 MODELO NUMÉRICO DE LA EMBARCACIÓN

El modelo estructural final es exportado al software ANSYS con formato IGES, para poder comenzar con el enmallado de la barcaza. Para saber ubicar en que zona se da los errores de mallado, primero se enmalla por defecto solo el casco luego se hace un refinamiento de malla (Refinement), como se muestra en la siguiente figura:

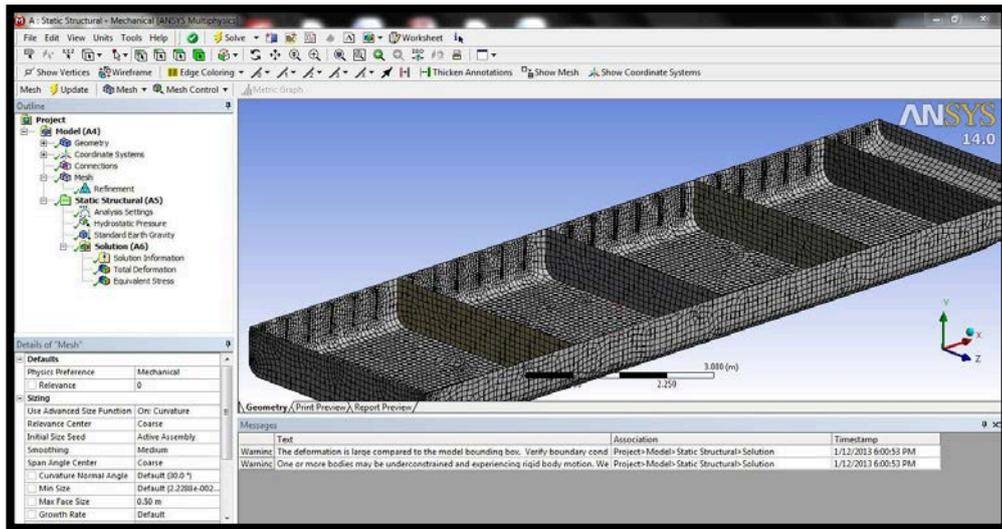


Fig. 5.10 Enmallado del Casco  
Fuente: Propia

Luego el segundo paso sería enmallar por defecto todo el casco más su estructura interna, como se muestra en la siguiente figura:

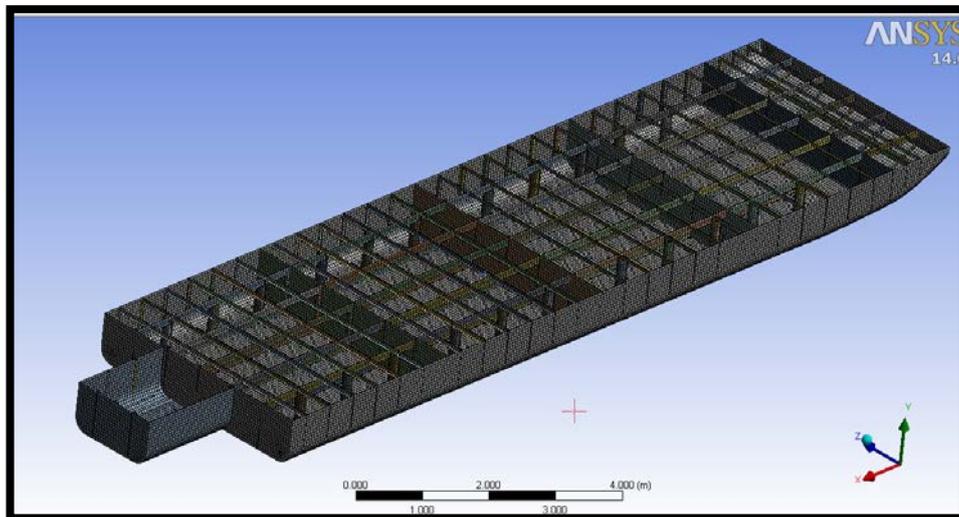


Fig. 5.11 Enmallado del casco con estructura interna  
Fuente: Propia

Vemos que enmalla toda la embarcación pero en forma desordenada, por ello tenemos que hacer un refinamiento de malla para obtener lo siguiente:

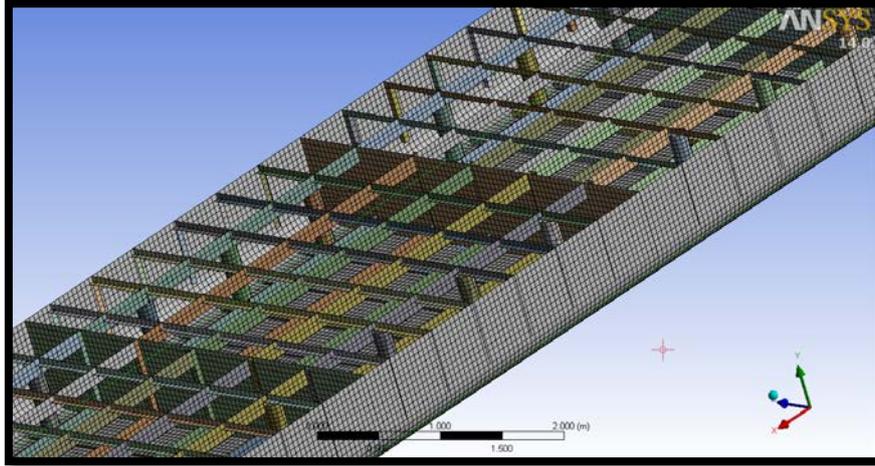


Fig. 5.12 Refinamiento de malla  
Fuente: Propia

Luego de refinar la malla en toda la barcaza, notamos que en las alas de los ángulos solo tenemos 2 nodos, como se ve en la siguiente figura:

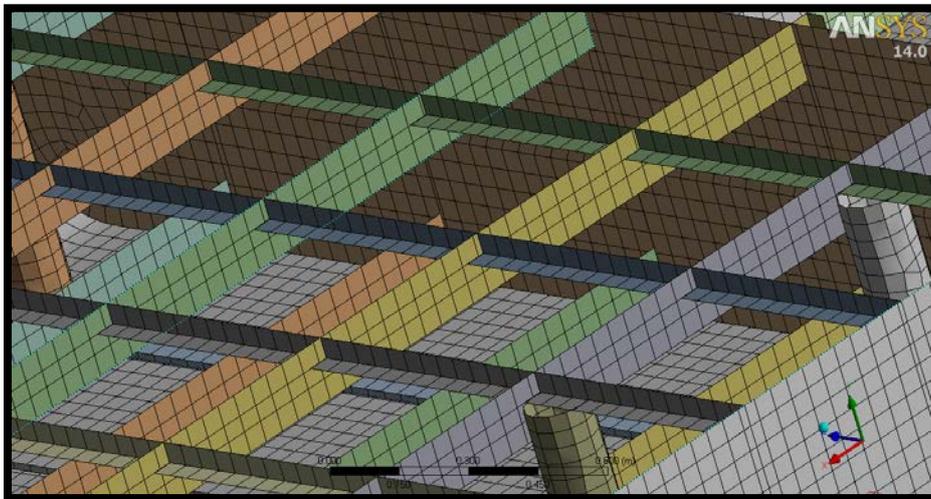


Fig. 5.13 Ángulos con 2 nodos en cada ala  
Fuente: Propia

Para poder tener resultados más confiables, el ángulo debe tener como mínimo 03 nodos en cada ala, como se muestra en la siguiente imagen:

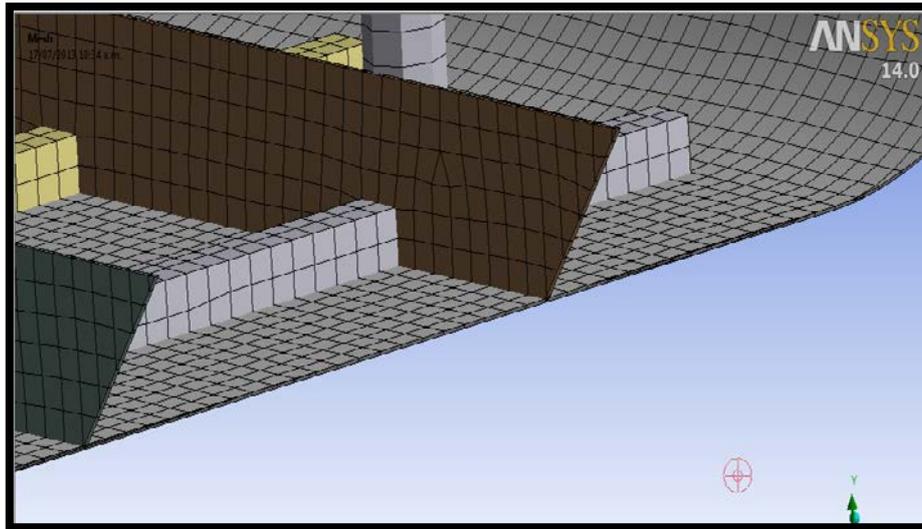


Fig. 5.14 Angulo con 3 nodos en cada ala  
Fuente: Propia

También tenemos que tener cuenta que cada nodo en cada elemento deben coincidir, no pueden haber nodos desfasados porque eso es la consecuencia de una simulación estructural errónea.

Finalmente, se muestra un corte en la barcaza del enmallado final con un total de 228429 nodos.

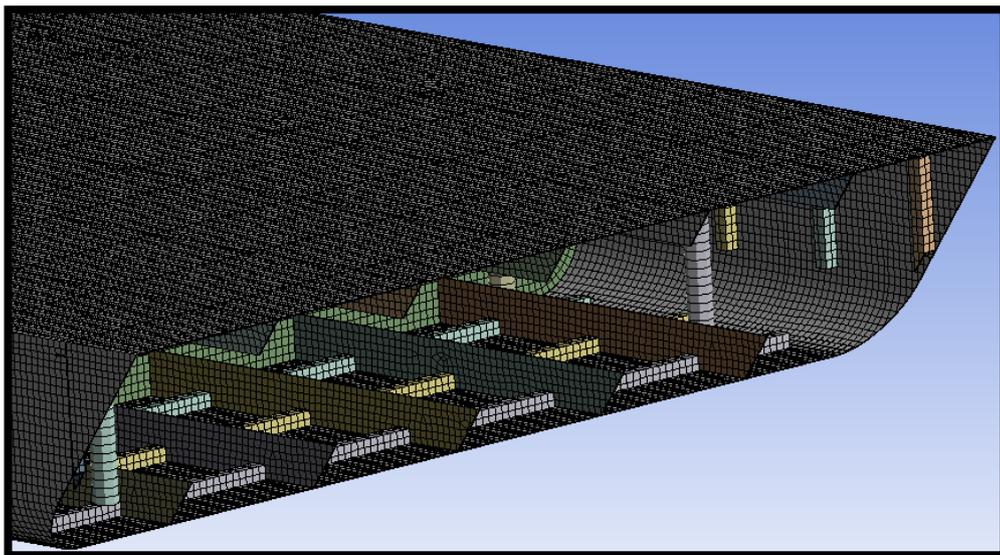


Fig. 5.15 Sección de enmallado  
Fuente: Propia

## CAPITULO VI

### ANALISIS Y RESULTADOS

#### **6.1 CONCEPTOS PREVIOS**

##### **6.1.1 CONDICIONES DE CONTORNO**

Para hacer un análisis por el método de elementos finitos, las condiciones de contorno de la embarcación son las siguientes según Ítem 15 de la Sección 3 de la norma **ABS FEA**.

##### **6.1.1.1 SOPORTE DE MOLAS**

Las fuerzas y momentos de la estructura viga – buque no siempre están en equilibrio, para esto se recomienda condiciones de contorno especiales usando elementos “Rod” (Tipo de elemento Combin 14) en las direcciones horizontales y verticales. Estos soportes deberán estar conectados al modelo y sus extremos finales de forma fija.

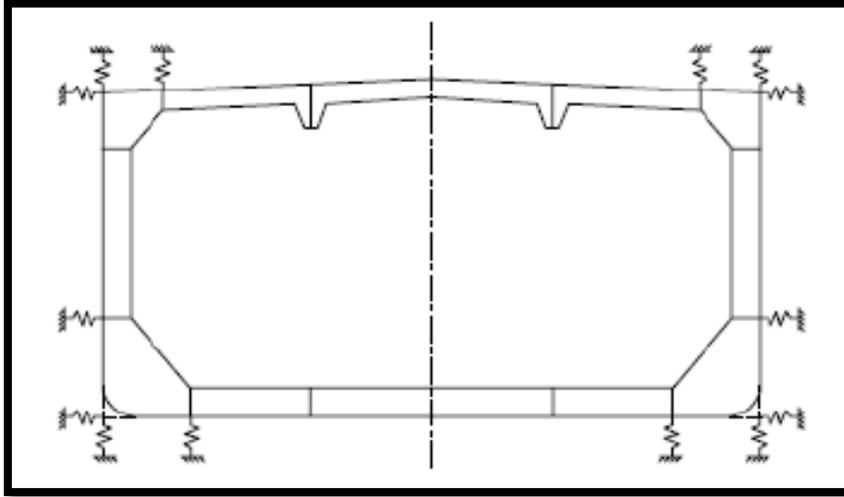


Fig. 6.1 Soporte de molas  
Fuente: [1]

El área de la sección de los soportes de elementos “Rod” para tanques se calcula de la siguiente manera, según AMERICAN BUREAU OF SHIPPING (2008). Rules for Building and Classing, Steel Vessels, Part 3, Hull Construction and Equipment [1]:

$$A = \left( \frac{1}{1+\nu} \right) \frac{A_s l}{L} - 0.77 \frac{A_s l}{L} \quad (6.1)$$

Dónde:

$A$  = Área de la sección para soportar el elemento Rod.

$\nu$  = Coeficiente de Poisson

$A_s$  = Área de la sección del miembro estructural.

$L$  = Longitud total del tanque.

$l$  = Longitud de los soportes.

La resultante de áreas  $A$ , es el total de áreas equivalentes para los soportes de elementos rod conectados en un mismo miembro estructural. El área para el soporte rod es igual a  $A$  dividido por los números de rods.

En una embarcación fluvial las molas se colocan solo en las esquinas de los mamparos en forma vertical y horizontal, su constante de rigidez se calcula de la siguiente manera:

$$K = A_S \cdot \frac{E}{[(1+\nu)L]} \quad (6.2)$$

Dónde:

$E$  = Modulo de elasticidad del material.

$\nu$  = Coeficiente de Poisson.

$L$  = Longitud entre mamparos.

$A_S$  = Área del refuerzo según dirección tomada.

$$A_{S1} = a_1 \times t_1 \quad A_{S2} = a_2 \times t_2$$

$a_1; a_2$  = Calado y Manga respectivamente

$t_1; t_2$  = espesores

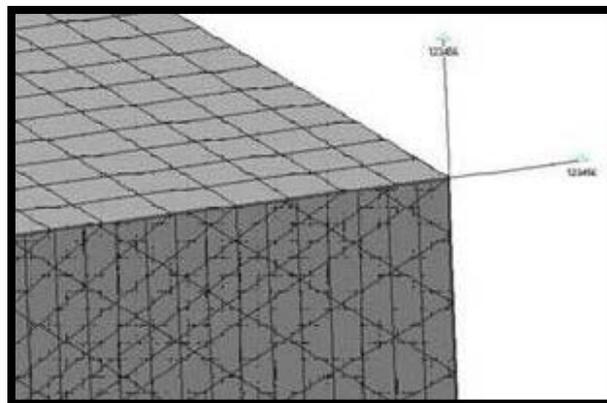


Fig. 6.2 Elementos rod horizontal y vertical  
Fuente: [8]

Nuestro modelo está en mm, por lo tanto la unidades de “K” es N/mm.

### 6.1.1.2 PRESIÓN DEL RIO

Las presiones hidrodinámicas inducidas por olas actuando en el casco externo, en río se consideran despreciables. Porque en el río las aguas son tranquilas y solo se considera las presiones hidrostáticas del agua actuando en el casco externo.

El cálculo de las presiones de río dado por la regla de la IACS es la siguiente formula (IACS Sección 7/2.2.2):

$$P = \rho_{sw}g(T_{LC} - Z) \quad (6.3)$$

Dónde:

$\rho_{sw}$  = Densidad del agua

$g$  = Aceleración de la gravedad

$T_{LC}$  = Calado de la condición de carga

$Z$  = Coordenada en la cual se desea obtener la presión.

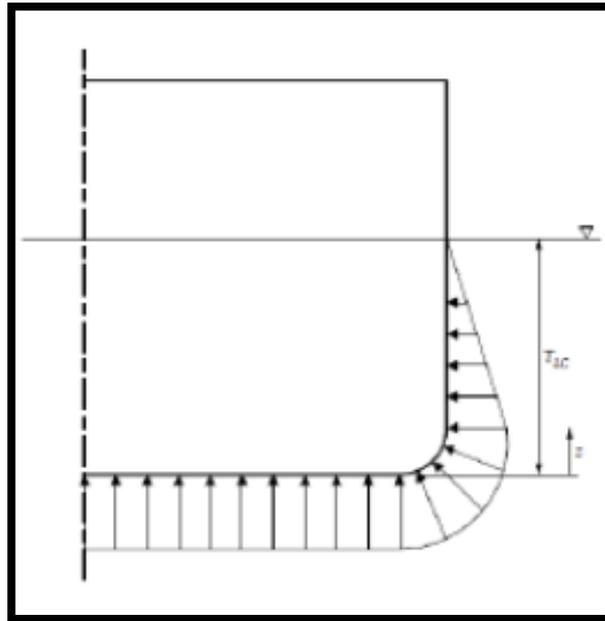


Fig.6.3 Distribución de Presiones  
Fuente: [1]

## 6.2 SIMULACIÓN ESTRUCTURAL DE LA VIGA

Aquí definimos las condiciones de contorno de la viga, la dirección de la gravedad y finalmente obtenemos la siguiente simulación.

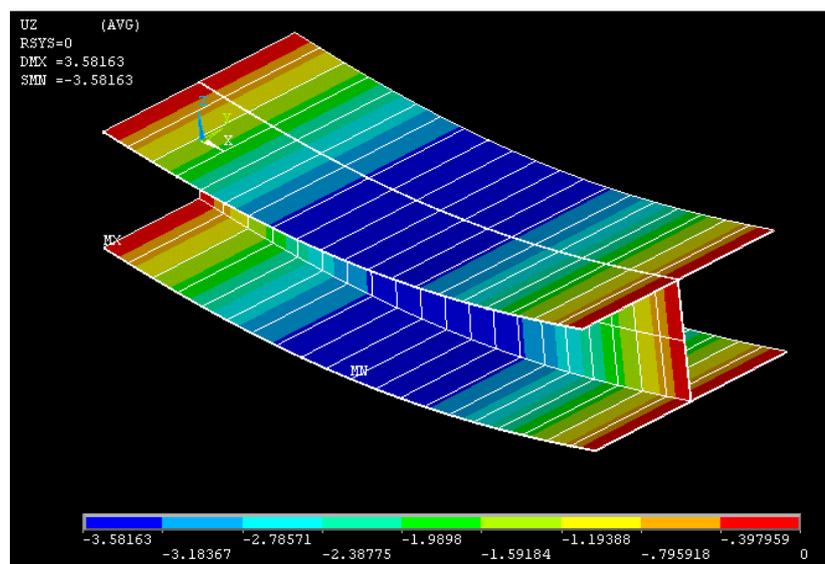


Fig. 6.4 Simulación Estructural de la Viga  
Fuente: Propia

El programa nos da la siguiente tabla de resultados de esfuerzos, fuerzas cortantes y momento flector en cada elemento.

```

PRINT ELEMENT TABLE ITEMS PER ELEMENT
***** POST1 ELEMENT TABLE LISTING *****
STAT   CURRENT   CURRENT   CURRENT   CURRENT   CURRENT   CURRENT
ELEM   SMAXI    SMAXJ     FYI       FYJ       MZI       MJJ
1      21.976    16.702    -0.65404E+06 -0.60172E+06 -0.73253E+09 -0.55672E+09
2      16.702    11.867    -0.60172E+06 -0.54940E+06 -0.55672E+09 -0.39556E+09
3      11.867    7.4718    -0.54940E+06 -0.49707E+06 -0.39556E+09 -0.24906E+09
4      7.4718    3.5161    -0.49707E+06 -0.44475E+06 -0.24906E+09 -0.11720E+09
5      3.5161    0.12491E-11 -0.44475E+06 -0.39243E+06 -0.11720E+09 -0.41636E-04
6      0.11060E-11 3.0766    -0.39243E+06 -0.34010E+06 -0.36867E-04 0.10255E+09
7      3.0766    5.7137    -0.34010E+06 -0.28778E+06 0.10255E+09 0.19046E+09
8      5.7137    7.9113    -0.28778E+06 -0.23546E+06 0.19046E+09 0.26371E+09
9      7.9113    9.6694    -0.23546E+06 -0.18313E+06 0.26371E+09 0.32231E+09
10     9.6694    10.988    -0.18313E+06 -0.13081E+06 0.32231E+09 0.36626E+09
11     10.988    11.867    -0.13081E+06 -78485.    0.36626E+09 0.39556E+09
12     11.867    12.306    -78485.    -26162.    0.39556E+09 0.41022E+09
13     12.306    12.306    -26162.    26162.    0.41022E+09 0.41022E+09
14     12.306    11.867    26162.    78485.    0.41022E+09 0.39556E+09
15     11.867    10.988    78485.    0.13081E+06 0.39556E+09 0.36626E+09
16     10.988    9.6694    0.13081E+06 0.18313E+06 0.36626E+09 0.32231E+09
17     9.6694    7.9113    0.18313E+06 0.23546E+06 0.32231E+09 0.26371E+09
18     7.9113    5.7137    0.23546E+06 0.28778E+06 0.26371E+09 0.19046E+09
19     5.7137    3.0766    0.28778E+06 0.34010E+06 0.19046E+09 0.10255E+09
20     3.0766    0.10254E-13 0.34010E+06 0.39243E+06 0.10255E+09 0.34180E-06

MINIMUM VALUES
ELEM   6          20          1          1          1          1
VALUE 0.11060E-11 0.10254E-13 -0.65404E+06 -0.60172E+06 -0.73253E+09 -0.55672E+09

MAXIMUM VALUES
ELEM   1          1          20          20          14          12
VALUE 21.976    16.702    0.34010E+06 0.39243E+06 0.41022E+09 0.41022E+09
    
```

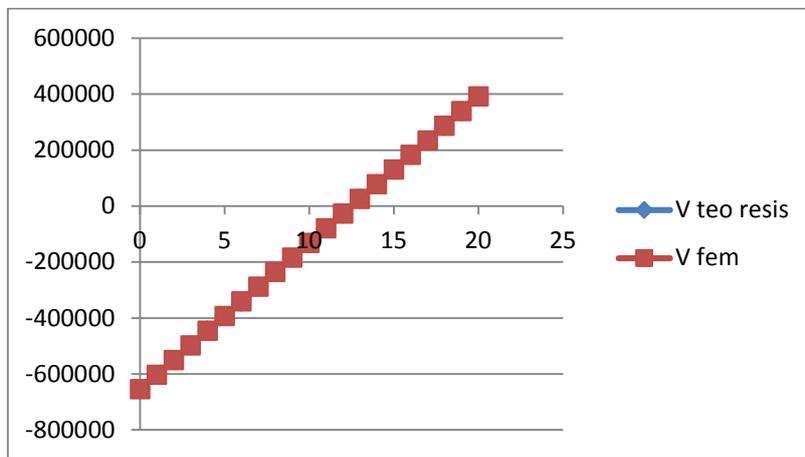
Fig. 6.5 Resultados en cada elemento  
Fuente: Propia

Estos resultados obtenidos lo comparamos en una tabla y una gráfica Excel con los resultados obtenidos por la Teoría Clásica de Resistencia de Materiales. Se obtienen los siguientes resultados, para las fuerzas cortantes de la viga.

| NODO | V (N) TEO RESIS | V (N) FEM | ERROR % |
|------|-----------------|-----------|---------|
| 0    | -654049.2       | -654040   | 0.00    |
| 1    | -601725.88      | -601720   | 0.00    |
| 2    | -549402.56      | -549400   | 0.00    |
| 3    | -497079.24      | -497070   | 0.00    |
| 4    | -444755.92      | -444750   | 0.00    |
| 5    | -392432.6       | -392430   | 0.00    |
| 6    | -340109.28      | -340100   | 0.00    |
| 7    | -287785.96      | -287780   | 0.00    |
| 8    | -235462.64      | -235460   | 0.00    |
| 9    | -183139.32      | -183130   | 0.01    |
| 10   | -130816         | -130810   | 0.00    |
| 11   | -78492.68       | -78485.   | 0.01    |
| 12   | -26169.36       | -26162.   | 0.03    |

|    |           |        |       |
|----|-----------|--------|-------|
| 13 | 26153.96  | 26162. | -0.03 |
| 14 | 78477.28  | 78485. | -0.01 |
| 15 | 130800.6  | 130810 | -0.01 |
| 16 | 183123.92 | 183130 | 0.00  |
| 17 | 235447.24 | 235460 | -0.01 |
| 18 | 287770.56 | 287780 | 0.00  |
| 19 | 340093.88 | 340100 | 0.00  |
| 20 | 392417.2  | 392430 | 0.00  |

Se puede observar en la siguiente grafica ambos resultados planteados  
V(N) vs Nodos.



Ahora viendo la gráfica directa del programa ANSYS, obtenemos lo siguiente:

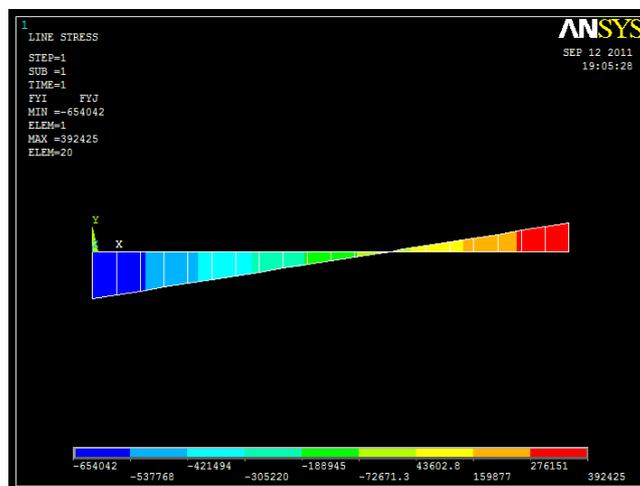


Fig. 6.6 Diagrama de Fuerzas Cortantes  
Fuente: Propia

Por lo tanto, se logró validar el análisis numérico y teórico para una viga mediante el programa ANSYS.

### 6.3 SIMULACIÓN ESTRUCTURAL DE LA PLACA

Una vez enmallado la placa y puesto como condición de contorno lados empotrados, se obtuvo la siguiente distribución de esfuerzos.

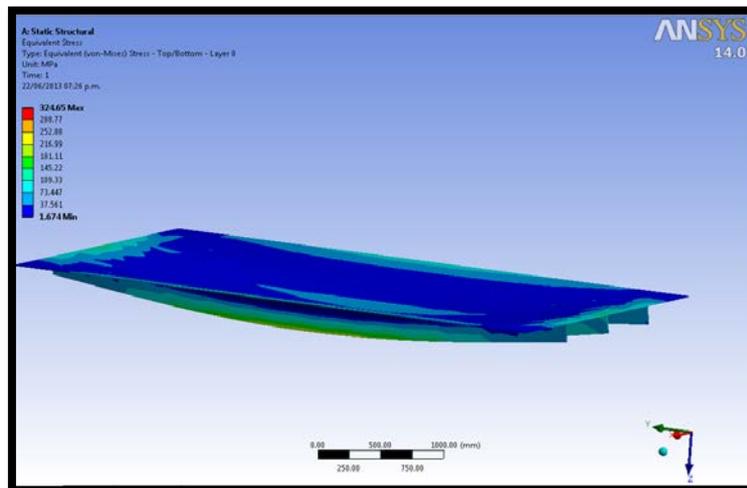


Fig. 6.7 Diagrama de Esfuerzos  
Fuente: Propia

Según la figura anterior tenemos un esfuerzo máximo en la placa de 32.4 MPa. En la siguiente imagen se muestra el diagrama de deformaciones en la placa.

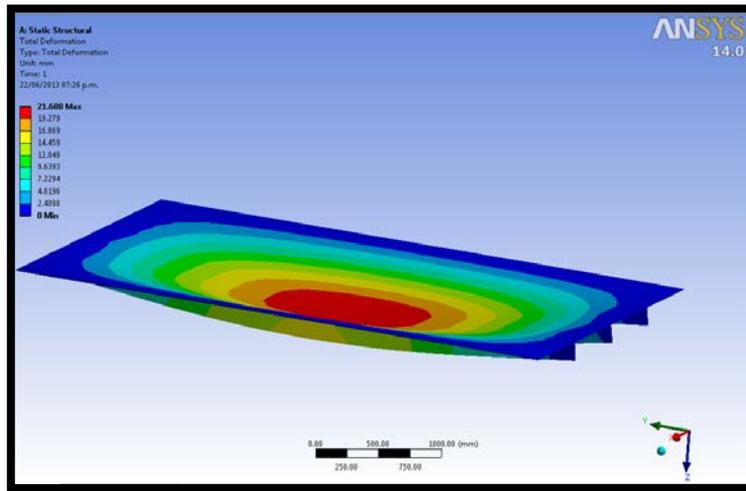


Fig. 6.8 Diagrama de Deformaciones  
Fuente: Propia

Se tiene como una deformación máxima de 21.6 mm en el centro de la placa.

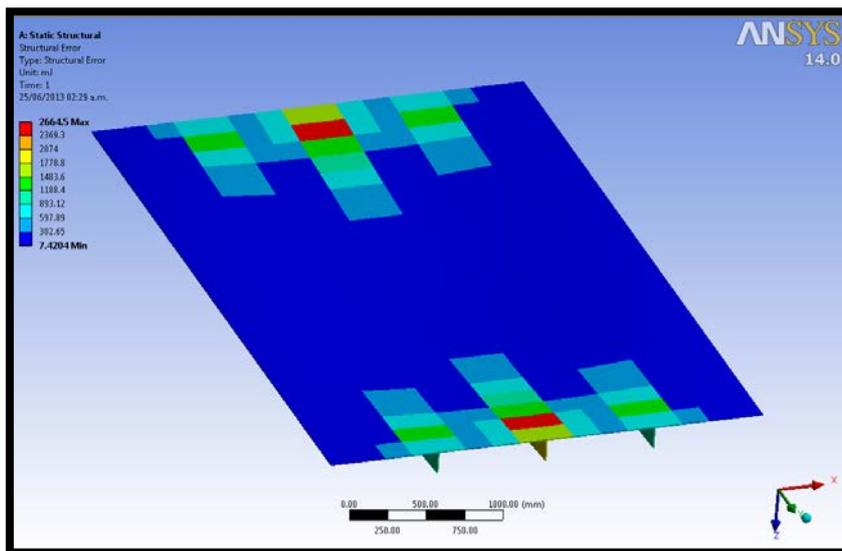
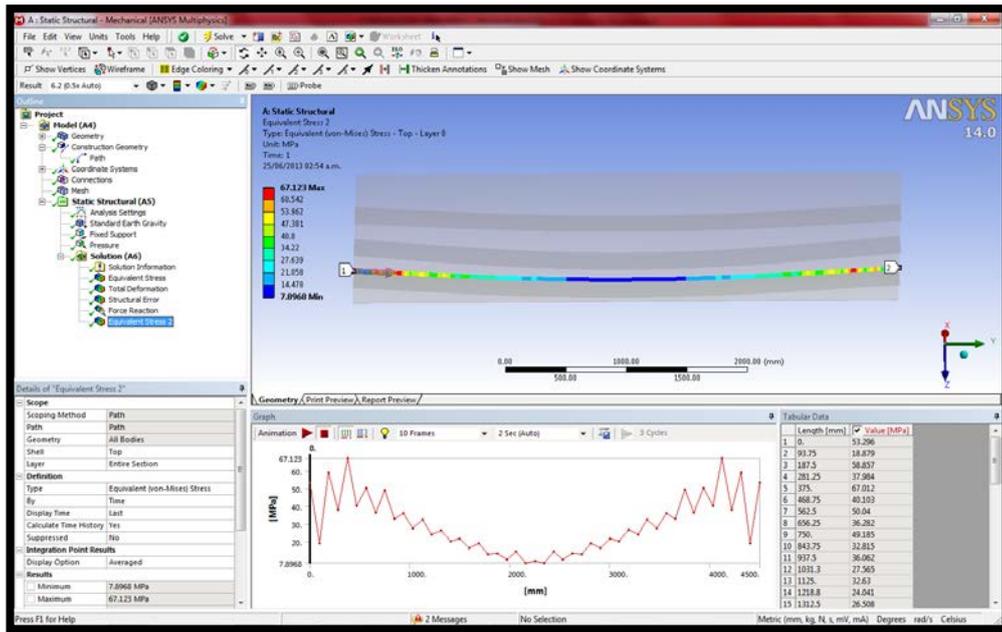


Fig. 6.9 Structural Error  
Fuente: Propia

Este diagrama Nos permite detectar donde podemos afinar la malla, si en caso vemos que la zona roja no es nuestra zona de interés, nos es necesario afinarlo.



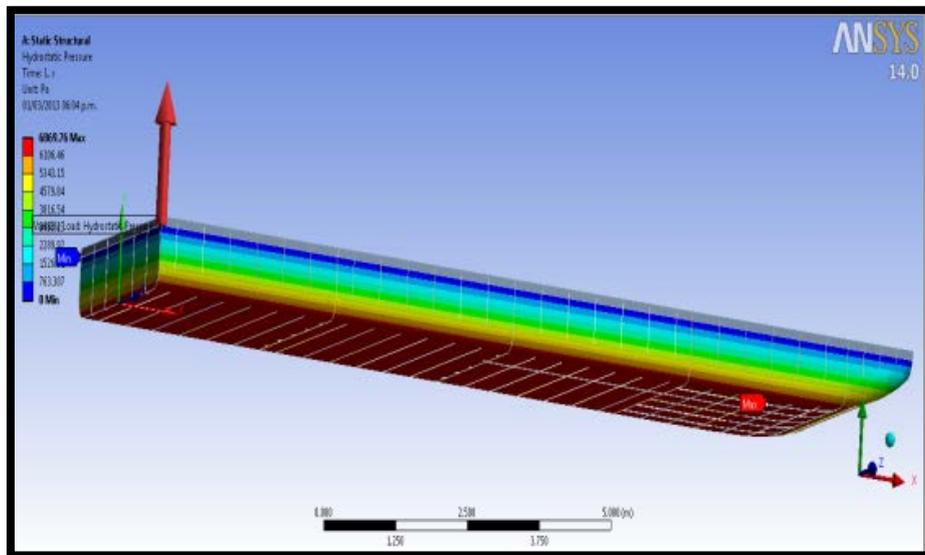


Fig. 6.11 Modelo Numérico – Distribución de Presiones  
Fuente: Propia

## 6.4.2 MOLAS O SPRING

Se modelo las Molas en los nodos donde se intersectan los refuerzos con los mamparos. Estos Spring nos permiten restringir el movimiento en el eje vertical y también rigidiza la embarcación para pueda rodar. En el programa ANSYS, se le conoce como el tipo de elemento “Combin 14”.

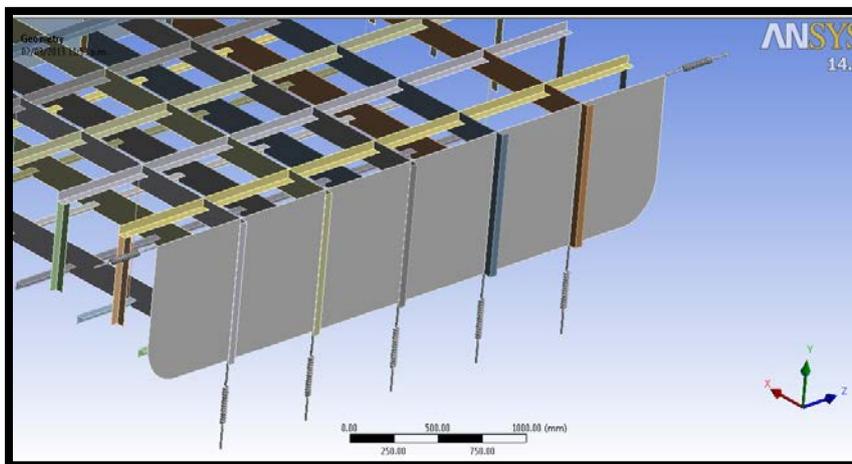


Fig. 6.12 Modelamiento de Molas o Spring  
Fuente: Propia

Los valores de las constantes de los resortes son calculados según como indica la norma ABS para elementos FEM.

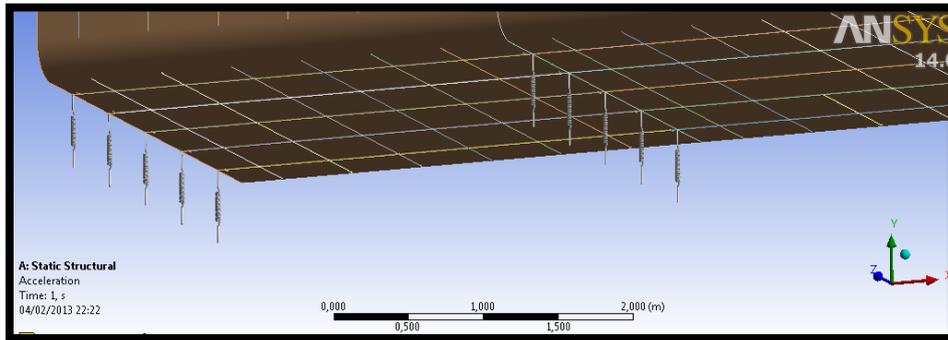


Fig. 6.13 Molas en los Mamparos  
Fuente: Propia

### 6.4.3 CARGA RODANTE

Esta barcaza va a transportar 4 camionetas con carga máxima. El peso bruto de cada camioneta es de 4 toneladas, de las cuales será distribuida en sus 4 llantas, cada llanta soportara 1 tonelada el cual será transmitido a la cubierta de la embarcación.

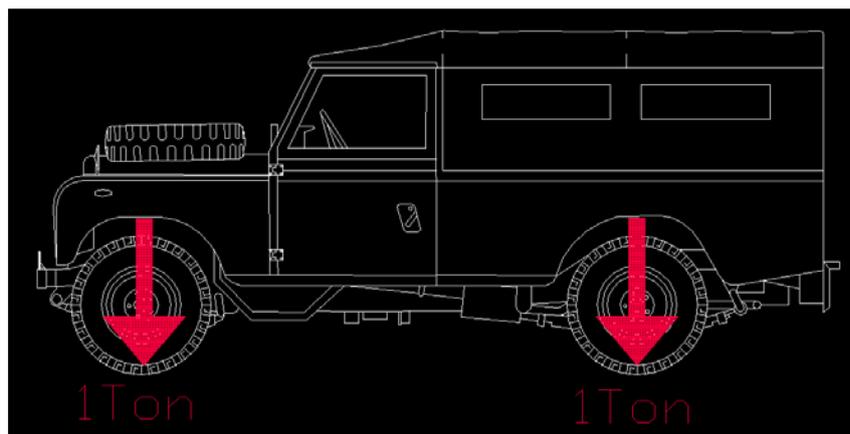


Fig. 6.14 Carga Rodante  
Fuente: Propia

El área proyectada de cada llanta a la cubierta en la condición de carga máxima, es un rectángulo de 350mm x 250mm aproximadamente, en esta

área será distribuida la carga de cada llanta. En cada camioneta hay 04 apoyos, en total hay 16 apoyos, cada uno soportara aproximadamente 10 KN.

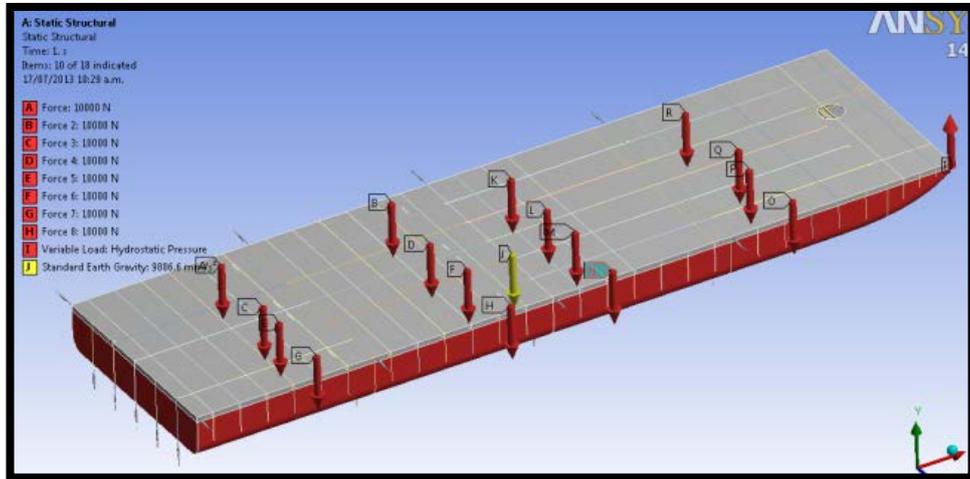


Fig. 6.15 Distribución de Cargas  
Fuente: Propia

#### 6.4.4 RESULTADOS

Se muestra los siguientes diagramas de esfuerzos y deformaciones en toda la embarcación (comportamiento estructural de la barcaza).

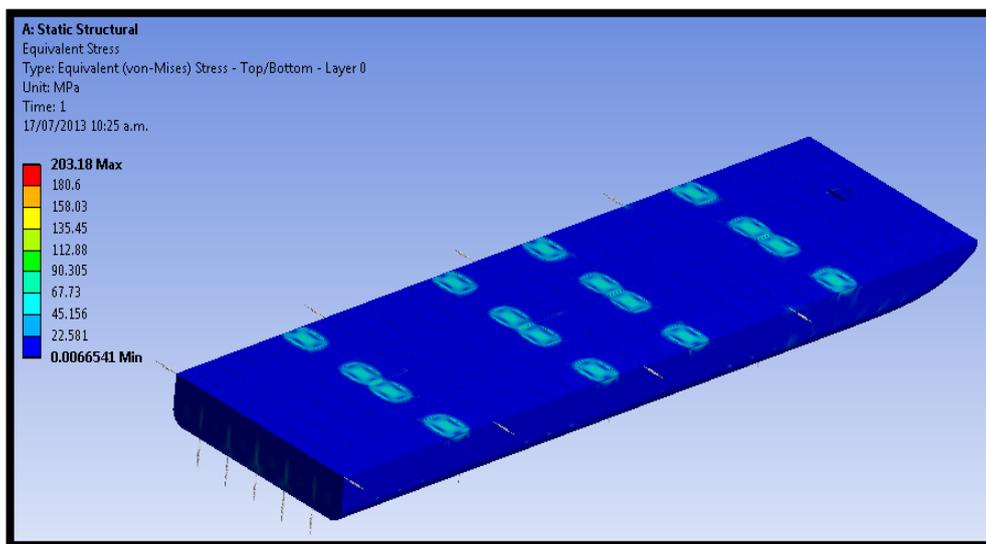


Fig. 6.16 Diagrama de Esfuerzos – Exterior  
Fuente: Propia

Haciendo un corte en la parte de la sección media, vemos como se distribuye en la plancha del fondo por medio de los puntales.

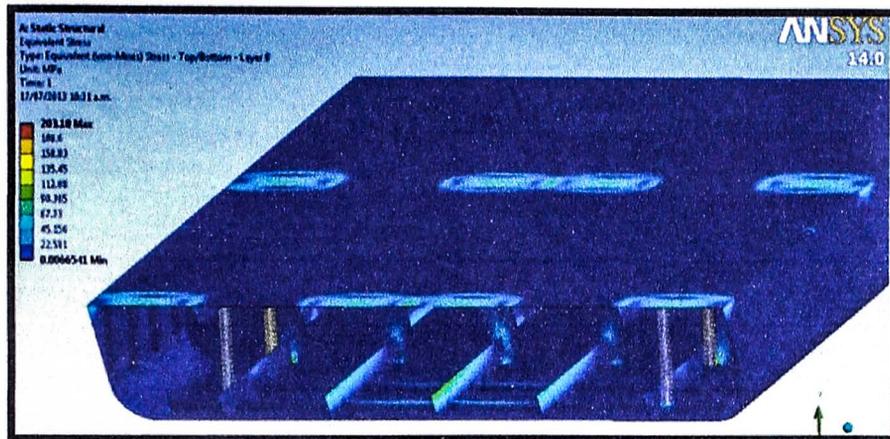


Fig. 6.17 Distribución de Esfuerzos – Interna  
 Fuente: Propia

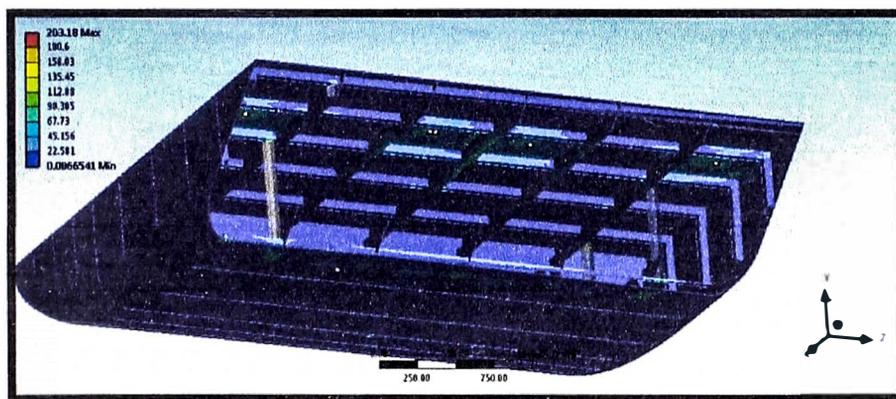


Fig. 6.18 Distribución de Esfuerzos – Interna  
 Fuente: Propia

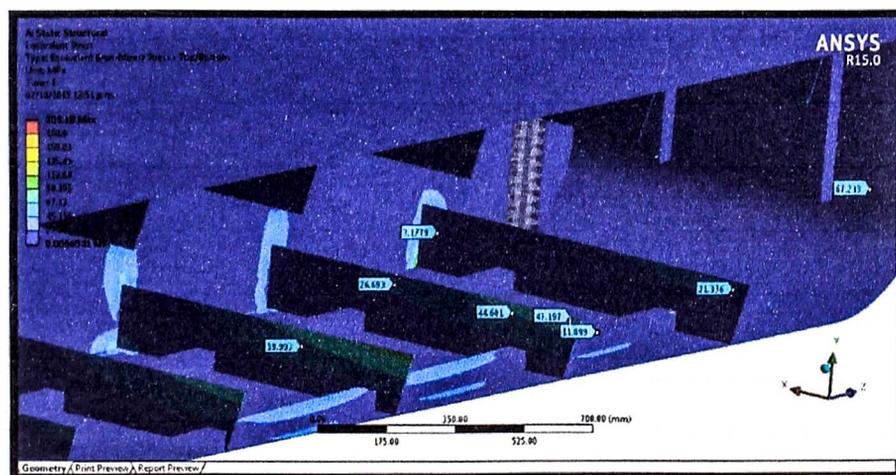


Fig. 6.19 Distribución de Esfuerzos en el fondo  
 Fuente: Propia

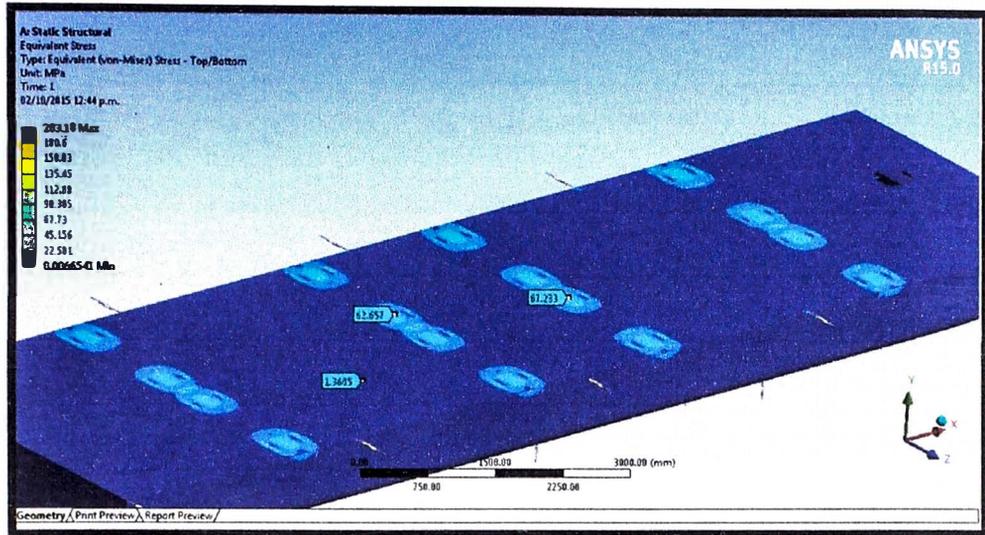


Fig. 6.20 Distribución de Esfuerzos en cubierta  
Fuente: Propia

En esta Fig. 6.20, el rango de colores nos muestra en forma interactiva cuánto vale el esfuerzo en determinada posición del modelo estructural, según su color dado. Notamos que en este estudio del comportamiento estructural global de la embarcación fluvial se obtuvo como esfuerzo máximo de Von Mises de 70 MPa. aproximadamente.

Por lo tanto, nuestros resultados están por debajo del esfuerzo de fluencia del material (Acero estructural A36). Si el esfuerzo de fluencia del acero estructural es de 250 MPa, entonces nuestro FS (Factor de Seguridad) es:

$$FS = \frac{250}{70} = 3.57$$

## CONCLUSIONES

- ✓ Con el presente trabajo que utiliza el método de elementos finitos se facilita la labor que se realizaría para obtener los cálculos de diseño de forma manual, disminuyendo considerablemente el tiempo empleado para el análisis de estructuras de uso naval, además de alcanzar un mayor nivel de confiabilidad a la hora de obtener los resultados del diseño.
- ✓ Se hizo el estudio Numérico - Analítico del modelo de una viga bi-apoyada de longitud 5600 m, sujeta a una carga distribuida de 180 KN/m, utilizando 20 elementos en la viga que tiene una sección recta en formato I con alas iguales de espesor 20 mm y ancho de 1800 mm, con un alma de espesor de 20 mm y una altura de 900 mm, el material de la viga es acero ASTM-A36. Los resultados se muestra en la siguiente tabla:

| NODO | V(N) TEO RESIS | V(N) FEM | ERROR. % |
|------|----------------|----------|----------|
| 0    | -654049.2      | -654040  | 0.00     |
| 1    | -601725.88     | -601720  | 0.00     |
| 2    | -549402.56     | -549400  | 0.00     |
| 3    | -497079.24     | -497070  | 0.00     |
| 4    | -444755.92     | -444750  | 0.00     |
| 5    | -392432.6      | -392430  | 0.00     |
| 6    | -340109.28     | -340100  | 0.00     |
| 7    | -287785.96     | -287780  | 0.00     |
| 8    | -235462.64     | -235460  | 0.00     |
| 9    | -183139.32     | -183130  | 0.01     |
| 10   | -130816        | -130810  | 0.00     |
| 11   | -78492.68      | -78485.  | 0.01     |
| 12   | -26169.36      | -26162.  | 0.03     |
| 13   | 26153.96       | 26162.   | -0.03    |
| 14   | 78477.28       | 78485.   | -0.01    |
| 15   | 130800.6       | 130810   | -0.01    |

|    |           |        |       |
|----|-----------|--------|-------|
| 16 | 183123.92 | 183130 | 0.00  |
| 17 | 235447.24 | 235460 | -0.01 |
| 18 | 287770.56 | 287780 | 0.00  |
| 19 | 340093.88 | 340100 | 0.00  |
| 20 | 392417.2  | 392430 | 0.00  |

- ✓ Se hizo el estudio Numérico - Analítico del modelo de una placa de longitud de 3000 mm y un ancho de 4500 mm con espesor de 10 mm, en toda la placa se distribuye una presión de 15000KPa y se utilizó 3 refuerzos de 150 mm de alma con una distancia entre refuerzos de 750 mm, el material de la placa es acero ASTM-A36. Los resultados se muestra en la siguiente tabla:

| PLACA                             |              |               |         |
|-----------------------------------|--------------|---------------|---------|
| ITEM                              | MET. ANALITO | MET. NUMERICO | ERROR % |
| Deformación en el centro de Placa | 21.2 mm      | 21.6 mm       | 1.00    |
| Esfuerzo Máximo                   | 32.1 MPa.    | 32.4 MPa.     | 0.90    |

- ✓ Se logró modelar completamente de una manera adecuada la estructura de una embarcación fluvial, aplicando un proceso combinado modelando una parte en SOLIDWORK y exportándolo al software ANSYS. Los elementos del modelo es tipo cascara o superficie se usó SHELL181 para el casco y refuerzos, y el BEAM3 para los puntales. Todo esto lleva a la conclusión que la discretizacion que se realizó en el modelo fue adecuada.
- ✓ Para juzgar una posible falla por combinación de esfuerzos, el programa usado calcula la intensidad de esfuerzos para una

determinada condición de trabajo de carga en la barcaza y lo muestra de una forma muy esquemática. La máxima intensidad de esfuerzos se desarrolla en la cubierta con un valor de 70 MPa, por lo tanto, obtenemos un Factor de Seguridad adecuado ( $FS = 3.57$ ).

- ✓ Se adquirió experiencia en simulación estructural de una embarcación fluvial, para así poder realizar estudios de estructuras más complejas, ya que el diseño por elementos finitos provee un alto grado de verificación, con adecuada retroalimentación, una posible extensión del presente trabajo puede reducir o eliminar la necesidad de pruebas de estructuras a escala completa.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] AMERICAN BUREAU OF SHIPPING (2008) “Rules for Building and Classing, Steel Vessels, Part. 3, Hull Construction and equipment”.
- [2] ALAA MANSOUR & DON LIU. “Strength of Ships and Ocean Structures”
- [3] ABS, “Safe Hull Finite Element Analysis of Hulls Structures”.
- [4] ANSYS. Capítulo 5. “Introducción al Modelamiento por Elementos Finitos”.
- [5] CARNICERO, A. (2000). “Introducción al Método de los Elementos Finitos”, Universidad Politécnica de Cataluña.
- [6] ERDOGAN MADENCI GUVEN (2006). “The Finite Element Method and Applications in Engineering Using ANSYS”
- [7] LETCHER JOHN. “Geometry of Ships”.
- [8] LARA, (2000)”Calculo de Estructuras Mediante el Empleo de Modelos de Elementos Finitos”, Madrid.

- [9] MARTINEZ, S. (2011). “Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería. ELSEVIER DOYMA, 1, 15.
- [10] MARIN, JOSE (2003) “Notas de Clases de Estructuras Navales”. Guayaquil-Ecuador.
- [11] WILLIAMS. Apuntes de Clases de Estructura. (Ex catedrático de la UNI).
- [12] ZIENKIWICKS, O.C. Y TAYLOR, R.L. (1994) “El Método de los Elementos Finitos”.
- [13] (<http://www.kxcad.net/ansys/>).
- [14] <https://sites.google.com/site/danieljimenez94/mywork/tutorialanalisisestaticodedeformacionesolidworks>.
- [15] <http://www.padtnic.com/blog/the-focus/ansys-mesh-connections>.
- [16] <http://www.simutechgroup.com/FEA/fea-tips-tricks-macros-buoyancefloating.html>.