

**ANÁLISIS COMPARATIVO POR ELEMENTOS FINITOS DE DOS  
TIPOS DE PÁNELES NAVALES SOMETIDOS A IGUALES  
CONDICIONES DE CARGA**

**JAVIER GUEVARA**

**MANUEL MARTINEZ**

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR**

**FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**CARTAGENA DE INDIAS DT. Y C**

**2003**

**ANÁLISIS COMPARATIVO POR ELEMENTOS FINITOS DE DOS  
TIPOS DE PÁNELES NAVALES SOMETIDOS A IGUALES  
CONDICIONES DE CARGA**

**JAVIER GUEVARA**

**MANUEL MARTINEZ**

**Monografía Para Optar Al Título De  
Ingeniero Mecánico**

**Director**

**ING. JAIRO USECHE**

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR**

**FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**CARTAGENA DE INDIAS DT. Y C**

**2003**

## Nota De Aceptación

---

---

---

Presidente del jurado

---

Jurado

---

Jurado

Cartagena DT y C. Noviembre de 2003

## **AGRADECIMIENTOS**

Los autores expresan su agradecimiento a:

Jairo Useche, Ingeniero Mecánico, por sus valiosas orientaciones y asesorías en la elaboración de este trabajo.

Carlos Cano, Ingeniero Naval. Jefe de la división de investigaciones de COTECMAR.

Orlando Castañeda, Ingeniero Naval, por su colaboración y orientación.

Benjamín Arango, Luis Majana y todos los profesores que nos ayudaron a realizar nuestra meta de ser profesionales.

A nuestros amigos por brindarnos todo su apoyo en los momentos más difíciles.

## CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	1
1. MARCO TEÓRICO	3
1.1 EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS	3
1.1.1 Ensamblaje De Elementos – Enmallado	3
1.1.2 Solución Del Problema De Elementos Finitos	4
1.1.3 Pasos De Un Análisis Con Elementos Finitos	5
1.1.4 Aplicación Del Método De Elementos Finitos	7
1.2 ANÁLISIS MODAL	7
1.2.1 Frecuencia Natural	8
1.2.2 Densidad Modal (DM) Y Efectividad De Modelos Por Elemento Finitos	9
1.2.3 Análisis Estadístico De Energía SEA	9
1.3 ANÁLISIS DE EMBARCACIONES	13
1.4 CARGAS EN LAS EMBARCACIONES	14
2. ANÁLISIS ESTRUCTURAL	16
2.1 VALIDACIÓN DEL MODELO	16
2.1.1 Solución Analítica	18
2.1.2 Solución Para El Caso 1 (Elementos Shell)	20
2.1.3 Solución Para El Caso 2 (Elementos Beam)	23
2.2 PRE-PROCESAMIENTO	26
2.2.1 Propiedades Del Material	28
2.2.2 Geometría De La Embarcación	29
2.2.3 Propiedades De Los Elementos	30
2.2.4 Condiciones De Apoyo	30
2.2.5 Condiciones De Carga	32

2.2.6	Análisis De Convergencia Y Enmallado	33
2.3	SOLUCIÓN DEL MODELO	36
2.4	POST-PROCESAMIENTO	37
2.4.1	Conexión Directa en Condición de Arrufo	38
2.4.2	Conexión Indirecta en Condición de Arrufo	41
2.4.3	Conexión Directa en Condición de Quebranto	45
2.4.4	Conexión Indirecta en Condición de Quebranto	48
2.5	RESULTADOS DEL ANÁLISIS ESTRUCTURAL	52
3.	ANALISIS MODAL	54
3.1	DESCRIPCIÓN DEL MODELO	54
3.2	SOLUCIÓN DEL MODELO	55
3.3	ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE ENERGÍA (SEA)	57
4.	CONCLUSIONES	63
5.	RECOMENDACIONES	65
6.	BIBLIOGRAFÍA	66

## LISTA DE TABLAS

		Pág.
<b>TABLA 1</b>	Resultados del Análisis de Convergencia	24
<b>TABLA 2</b>	Número de elementos	36
<b>TABLA 3</b>	Número de elementos	54
<b>TABLA 4</b>	Primeros 50 modos de la embarcación	55

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Ensamble de elementos con una malla	4
Figura 2. Grados de libertad de los nodos	4
Figura 3. Resultados de un análisis por el método de elementos finitos	6
Figura 4. Distribución de modos de pandeo en una lámina	11
Figura 5. Componentes principales de la embarcación	16
Figura 6. Conformación de la estructura	18
Figura 7. Representación grafica de la sección a analizar	19
Figura 8. Diagrama de Fuerza Cortante y Momento Flector	19
Figura 9. Comparación de modelos	20
Figura 10. Desplazamientos en la dirección z ( $U_z$ ) sobre toda la Estructura	21
Figura 11. Desplazamientos en la dirección z ( $U_z$ $m_x = 0.9810$ mm) sobre la viga	21
Figura 12. Esfuerzos normales en dirección X ( $S_x$ $m_x = 33.136$ Mpa)	22
Figura 13. Propiedades de la sección	23
Figura 14. Diferencia de modelos	23
Figura 15. Desplazamientos en Z, $U_Z$	24
Figura 16. Desplazamientos sobre viga ( $U_Z$ $m_x = 1.047$ mm)	24
Figura 17. Esfuerzos Sobre el eje X ( $S_X$ $m_x = 35.216$ MPa)	25
Figura 18. Panel con conexión Directa	26
Figura 19. Panel con conexión indirecta	27
Figura 20. Configuración de paneles (a) conexión directa, (b) indirecta	27
Figura 21. Modelo computacional de la embarcación	30
Figura 22. Condición de Arrufo	31
Figura 23. Condición de Quebranto	31

Figura 24. Condición de carga para arrufo	33
Figura 25. Condición de carga para arrufo	33
Figura 26. Sensibilidad del Esfuerzo SZ Vs Malla	35
Figura 27. Sensibilidad del Desplazamiento UY Vs Malla	35
Figura 28. Organigrama de exposición de resultados	37
Figura 29. Barcaza completa (USUM mx = 5.699 mm.)	38
Figura 30. Cubierta (USUM mx = 5.645 mm)	38
Figura 31. Cuaderna Maestra (USUM mx = 2.852 mm)	39
Figura 32. Barcaza completa (SEQV mx = 107.835 MPa)	39
Figura 33. Cubierta (SEQV mx = 60.618 Mpa)	40
Figura 34. Cuaderna maestra (SEQV mx = 47.03 MPa)	40
Figura 35. Cuaderna Maestra (SX min = -47.826 MPa, SX mx = 34.144 MPa)	41
Figura 36. Barcaza completa (USUM mx = 5.734 mm)	41
Figura 37. Cubierta (USUM mx= 5.736 mm)	42
Figura 38. Cuaderna maestra (USUM mx = 2.874 mm)	42
Figura 39. Barcaza completa (SEQV mx = 108.296 MPa)	43
Figura 40. Cubierta (SEQV mx = 75.425 MPa)	43
Figura 41. Cuaderna maestra (SEQV mx = 62.134 MPa)	44
Figura 42. Cuaderna maestra (SX min = -62.124 MPa, SX mx = 52.271 MPa)	44
Figura 43. Barcaza completa (USUM mx = 4.894 mm)	45
Figura 44. Cubierta (USUM mx = 4.894 mm)	45
Figura 45. Cuaderna maestra (USUM mx = 2.39 mm)	46
Figura 46. Barcaza completa (SEQV mx = 111.009 MPa)	46
Figura 47. Cubierta (SEQV mx = 61.171 MPa)	47
Figura 48. Cuaderna maestra (SEQV mx= 50.634 MPa)	47
Figura 49. Cuaderna maestra (SX min = -50.634 MPa, SX mx = 37.371 MPa)	48
Figura 50. Barcaza completa (USUM mx = 4.916 mm)	48
Figura 51. Cubierta (USUM mx =4.916 mm)	49
Figura 52. Cuaderna maestra (USUM mx = 2.466 mm)	49
Figura 53. Barcaza completa (SEQV mx = 110.667 MPa)	50
Figura 54. Cubierta (SEQV = 61.228 MPa)	50

Figura 55. Cuaderna maestra (SEQV = 65.208 MPa)	51
Figura 56. Cuaderna maestra (SX min = -62.124 MPa, SX mx = 52.271 MPa)	51
Figura 57. Diferencias de deformaciones entre el panel de conexión directa (a) e indirecta (b)	52
Figura 58. Frecuencia Vs Número de modos	56
Figura 59. Distribución de modos	58
Figura 60. Densidades modales conexión directa	59
Figura 61. Densidades modales conexión indirecta	59
Figura 62. Superposición de densidades modales	60
Figura 63. Diferencia entre densidades modales	61

## **LISTA DE ANEXOS**

<b>ANEXO A</b>	Propiedades del elemento SHELL63
<b>ANEXO B</b>	Propiedades del elemento BEAM188
<b>ANEXO C</b>	Propiedades sección compuesta
<b>ANEXO D</b>	Plano acero fondo
<b>ANEXO E</b>	Plano cuaderna maestra
<b>ANEXO F</b>	Tabla de resultado análisis estructural

## GLOSARIO

**ARRUFO:** Curvatura que se da habitualmente a un buque en el sentido longitudinal, elevando sus extremos.

**BAOS:** Vigas dispuestas transversalmente, que apoyan en las cabezas o unen las dos ramas de las cuadernas; sirven para sostener las cubiertas y aguantar los costados.

**CALADO:** Profundidad a que llega la parte inferior de la quilla de un buque, a contar de la línea de flotación.

**CASCO:** Es el armazón de un buque junto con su forro interior, cubiertas, etc., pero sin incluir los mástiles, aparejos y todos los demás elementos que forman la superestructura.

**CODASTE:** La pieza que se emperna con la quilla por la popa y forma la armazón principal de ésta.

**COSTADO:** Cada uno de los lados que forman el casco del buque, de proa a popa, y desde la línea de flotación hasta la borda.

**CUADERNA:** Miembro estructural transversal, que nace en la quilla y se extiende hacia los costados. Costilla del buque.

**CUBIERTA:** Cada uno de los suelos o pisos que se apoyan en los baos y esloras.

**ESLORA:** La longitud del buque. Eslora total es la comprendida entre el extremo más avanzado de la roda y el más saliente de popa. Eslora en flotación, la comprendida entre los extremos de la obra viva en la superficie. También se denomina así la pieza estructural llamada entremiche.

**MAMPARO:** Tabique divisorio en el interior del buque.

**MANGA:** La mayor anchura de un buque.

**PANTOQUE:** La parte curva del casco, que une el fondo con el costado.

**POPA:** La parte posterior de un buque.

**PROA:** La parte delantera del buque.

**PUNTAL:** Altura del buque, desde la parte superior de la quilla a la cubierta.

**QUILLA:** Es una viga de hierro que va de proa a popa y que forma la columna vertebral de un buque, en toda su extensión. De ella salen las cuadernas, la roda y el codaste.

**QUEBRANTO:** Movimiento en la trabazón de un casco, por el cual la quilla se arquea, elevándose en el medio y bajando en sus extremos, con pérdidas del arrufo.

**RODA:** Pieza, la más saliente de la proa del buque y que permite darle la forma apropiada en esta extremidad.

## RESÚMEN

Se presentan dos tipos de embarcaciones para transporte de personas, carga y combustible en embalses, diseñadas y construidas por la Corporación de ciencia y tecnología para el desarrollo de la industria marítima y fluvial COTECMAR las cuales presentan diferentes diseños estructurales, el primer tipo de embarcación contiene paneles con estructura primaria conectada directamente a las laminas exteriores y el segundo tipo presenta una estructura primaria con conexión indirecta.

El objetivo de este estudio es analizar y comparar el comportamiento mecánico de los dos tipos de paneles por lo que se determinaron los esfuerzos, los desplazamientos y las frecuencias naturales de oscilación mediante el método de elementos finitos, el software utilizado para este análisis fue ANSYS 5.5.

Los resultados arrojados por el programa indican que para el panel con conexión directa a las planchas de cubierta se presentan desplazamientos y esfuerzos menores que para el de conexión indirecta, mas sin embargo estas diferencias no son considerables.

En cuanto a la respuesta a las vibraciones se aprecia un comportamiento más crítico para la conexión indirecta a bajas frecuencias.

## INTRODUCCIÓN

El método de elementos finitos ha llegado a ser una herramienta poderosa en la solución numérica de un amplio rango de problemas de ingeniería, las aplicaciones van desde el análisis por deformación y esfuerzo de automóviles, aeronaves, barcos, edificios y estructuras de puentes hasta el análisis de los campos de flujo de calor, de fluidos magnéticos, filtraciones, análisis de vibración, etc. Con los avances de la tecnología de las computadoras y de los sistemas CAD, pueden modelarse problemas más complejos con relativa facilidad. En una computadora pueden probarse varias configuraciones alternas antes de construir el primer prototipo. En este método de análisis, una región compleja que define un sistema, se discretiza en formas geométricas simples llamadas elementos finitos. Las propiedades del material y las relaciones gobernantes, son consideradas sobre esos elementos y expresadas en términos de valores desconocidos en los bordes del elemento. Un proceso de ensamble, cuando se consideran debidamente las cargas y restricciones, da lugar a un conjunto de Ecuaciones. La solución de esas ecuaciones nos da el comportamiento apropiado del sistema.

Esta teoría de elementos finitos se empleará para analizar el comportamiento de una embarcación, para dos tipos conexiones de su estructura primaria a las

láminas de cubierta, en cuanto a sus deformaciones, esfuerzos y vibraciones (análisis modal).

Se analizará en este trabajo la forma como actúa una carga homogénea en una embarcación de tipo Bongo, utilizada para transporte de personas, carga y combustible en embalses. Esto se realizará por medio del método de elementos finitos, discretizando la geometría del modelo y aplicación de cargas.

El análisis estructural será validado por medio de un modelo más sencillo de comprobar matemáticamente, por teoría de vigas. Mientras que el estudio vibracional (análisis modal) no será validado ya que este requiere de un análisis experimental.

El alcance de este estudio solo se limita a expresar las diferencias mostradas en los dos tipos de paneles. Las conclusiones sólo se enfocan a los resultados obtenidos por el software, y servirán de base para un futuro estudio más detallado.

La decisión de elegir cuál de los dos tipos de conexión es más conveniente para este tipo de embarcación es responsabilidad de COTECMAR.

## **1. MARCO TEÓRICO**

### **1.1 EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS**

El método de elementos finitos es un método numérico para resolver en forma aproximada ciertos problemas en ciencia e ingeniería. De forma sencilla, consiste en definir un número finito de partes llamadas elementos cuyo comportamiento se especifica con un número finito de parámetros. Dichos elementos contienen una serie de puntos interconectados entre sí llamados nodos y a el conjunto de éstos se le conoce como malla.

Este método requiere de un gran trabajo computacional cuando se aplica a problemas reales, por lo que se hace casi imprescindible el uso de súper computadoras.

#### **1.1.1 Ensamblaje De Elementos – Enmallado.**

Los nodos están colocados en las esquinas de los elementos y a veces también en los puntos medios de estas caras o aristas y dentro de ellos. Los nodos son los puntos donde se conectan los elementos entre sí.

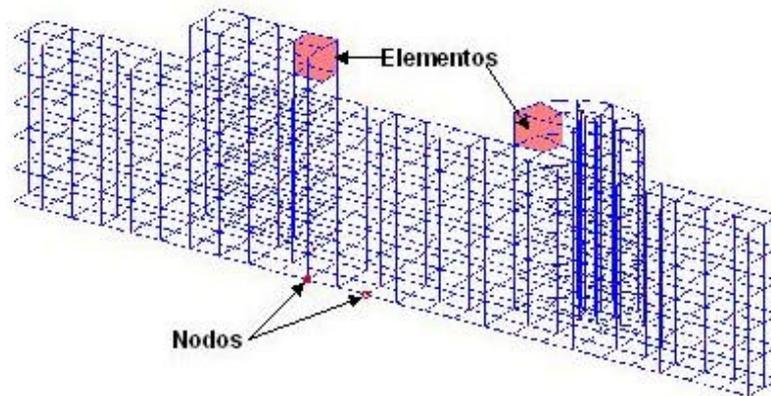


Figura 1. Ensamble de elementos con una malla

### 1.1.2 Solución Del Problema De Elementos Finitos.

El análisis de este ensamblaje nos provee de los desplazamientos de cada uno de los nodos para ciertas cargas aplicadas al modelo. Los desplazamientos de los otros puntos dentro del elemento se interpolan a partir de los valores de los desplazamientos en los nodos que correspondan al elemento. Cada nodo tiene un cierto número de posibles desplazamientos llamados grados de libertad.

En el espacio cada nodo posee 6 grados de libertad: 3 de desplazamientos trasnacionales y 3 rotacionales.

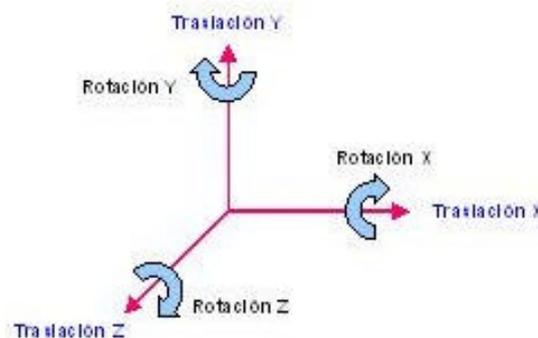


Figura 2. Grados de libertad de los nodos

A partir de los desplazamientos se calculan las reacciones, las deformaciones y los esfuerzos presentados en elemento analizado.

### **1.1.3 Pasos De Un Análisis Con Elementos Finitos.**

Un análisis usando elementos finitos requiere de la disponibilidad de un programa de computación especializado para trabajar en este campo. Existen numerosos programas de elementos finitos: PATRAN, NASTRAN, ABAQUS, ARIES, FEA, ADINA, ANSYS y muchos mas que pueden resolver un gran rango de problemas en ingeniería.

El uso de cualquiera de ellos para el análisis de un problema real sigue los siguientes pasos:

- **Pre-procesamiento**

El procesamiento consiste en la creación del modelo, y la definición de la manera como será cargado y apoyado. El modelo suele hacerse con un Pre-Procesador (Paquete gráfico que suele venir con el programa) o importado de un programa CAD. El éxito de un análisis depende en gran parte de:

- La destreza del usuario para determinar qué simplificaciones deben ser introducidas en el modelo para que represente el objeto real.
- La elección adecuada de elementos a ser usados y el diseño de la malla
- Imposición apropiada de restricciones y apoyos.

El resultado final de este paso es un archivo de datos en el que se le indica al programa qué hacer y con qué trabajar.

- **Análisis**

El programa de elementos finitos lee los datos del archivo de entrada, realiza ciertos chequeos de esa información a fin de encontrar errores, y si no los hay, se realiza el análisis y se produce un archivo de resultados.

- **Post- Procesamiento**

El post-procesamiento recoge la información de los archivos de resultados y los presenta en forma gráfica o tabulada. Se usan colores para localizar sitios de valores de esfuerzo, temperatura, desplazamientos semejantes máximos, mínimos, etc. El modelo puede ser rotado o ampliado para ser examinado desde diferentes puntos de vista

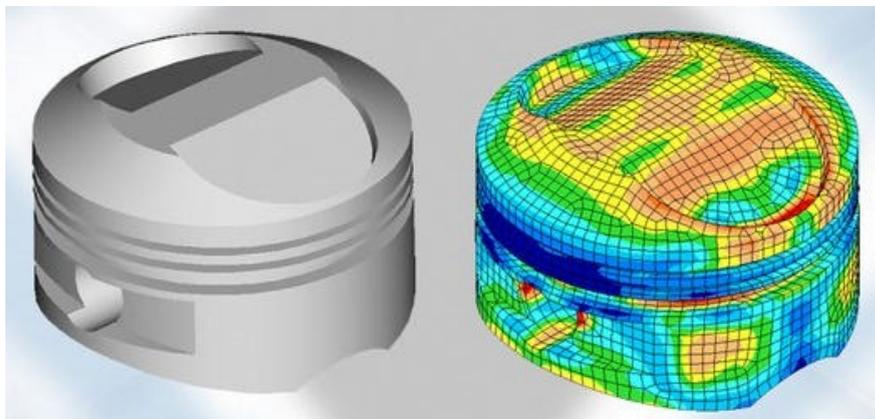


Figura 3. Resultados de un análisis por el método de elementos finitos

- **Interpretación De Resultados**

Es el paso final y a menudo el más menospreciado de un análisis mediante elementos finitos, aquí es donde entran en juego los conocimientos en ingeniería que se dispongan.

#### **1.1.4 Aplicación Del Método De Elementos Finitos**

Entre las diversas aplicaciones del MEF podemos citar:

- Estructuras de naves espaciales, automóviles y embarcaciones.
- Puentes de acero y concreto reforzado.
- Diseño de plásticos.
- Mecánica de fracturas, de suelos y fluidos viscosos.
- Campos electromagnéticos y acústicos.
- Flujos de plasma y en reactores nucleares.

## **1.2 ANÁLISIS MODAL**

El análisis modal es una técnica de diseño que se apoya en la determinación de las frecuencias y modos naturales de vibración del elemento en estudio. El modo vibratorio representa la escala por medio de la cual se distribuye la amplitud de la vibración a todo el sólido. En general es suficiente analizar los modos asociados con frecuencias comprendidas en un determinado rango; además las frecuencias y los modos naturales dependen de la inercia, rigidez y

amortiguamiento del componente. Los modos pueden ser *Reales*; si todos los puntos analizados vibran en fase es decir, que alcanzan su máximo desplazamiento al mismo tiempo y *Complejos*; si los puntos presentan un desfase entre ellos. Esto se debe al tipo de amortiguamiento que puede ser: nulo, viscoso proporcional, estructural y viscoso no proporcional. Entonces determinar las frecuencias naturales del conjunto estructural es fundamental para el diseño, porque así se logrará un buen comportamiento dinámico ya que las velocidades de servicio deberán estar alejadas de las frecuencias naturales.

### **1.2.1 Frecuencia Natural.**

Cualquier objeto oscilante tiene una 'frecuencia natural', que es la frecuencia con la que tiende a vibrar si no se le perturba. Por ejemplo, la frecuencia natural de un péndulo de 1 m de longitud es de 0,5 Hz, lo que significa que el péndulo va y vuelve una vez cada 2 segundos. Si se le da un ligero impulso al péndulo cada 2 segundos, la amplitud de la oscilación aumenta gradualmente hasta hacerse muy grande. El fenómeno por el que una fuerza relativamente pequeña aplicada de forma repetida hace que la amplitud de un sistema oscilante se haga muy grande se denomina resonancia. Muchos problemas graves de vibración en ingeniería son debidos a la resonancia. Por ejemplo, si la frecuencia natural de la carrocería de un automóvil es la misma que el ritmo del motor cuando gira a una velocidad determinada, la carrocería puede empezar a vibrar o a dar fuertes sacudidas. Esta vibración puede evitarse al montar el motor sobre un material amortiguador, por ejemplo hule o goma, para aislarlo de la carrocería.

### **1.2.2 Densidad Modal (DM) Y Efectividad De Modelos Por Elemento Finitos.**

El modelamiento por elementos finitos es un método eficaz para el estudio de la dinámica estructural y mecánica de un sistema siempre y cuando los modos de vibración tengan suficiente rango de frecuencias entre ellos o baja densidad modal (DM), la cual se describe típicamente como el número de modos dentro de 1/3 de la banda de frecuencias de una octava ( $f_0 < f < 1.33f_0$ ). Cuando la DM de un componente estructural o un conjunto estructural es mayor a 10 modos por 1/3 de banda de una octava, los detalles de los modos individuales de vibración no son significantes y las características estadísticas de respuesta a la vibración son las que toman principal importancia. En este tipo de situaciones, se aplica el método de análisis estadístico de energía SEA.

### **1.2.3 Análisis Estadístico De Energía SEA.**

El análisis estadístico de energía SEA (Statistical Energy Analysis) modela la respuesta de vibración de un sistema complejo como una interacción estadística entre los grupos de modos para cada sección del sistema.

Mientras el desarrollo teórico del SEA tiene sus raíces en el campo de vibraciones aleatorias, este no requiere una excitación aleatoria para el análisis estadístico. En cambio, el SEA usa la variación aleatoria de las respuestas modales en sistemas complejos para obtener las predicciones estadísticas de su respuesta en términos de la media y la varianza.

Teóricamente, el promedio estadístico se aplica para un conjunto de sistemas nominalmente idénticos. Sin embargo, en la práctica muchos sistemas tienen suficiente complejidad inherente de tal forma que la variación en su respuesta para la frecuencia o ubicación se representa adecuadamente por las estadísticas del conjunto.

Esto se ve incluso en casos relativamente simples como es la distribución de modos de pandeo en una lámina rectangular simplemente apoyada (Ver Figura 4a) Las frecuencias de resonancia de los modos están dadas por la siguiente ecuación.

$$f_{m,n} = \left( \frac{P}{4\sqrt{3}} \right) h C_L \left[ \left( \frac{m}{L_1} \right)^2 + \left( \frac{n}{L_2} \right)^2 \right]$$

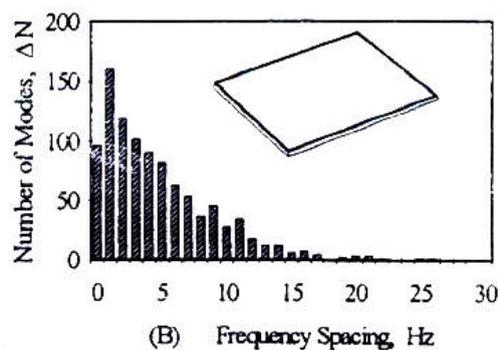
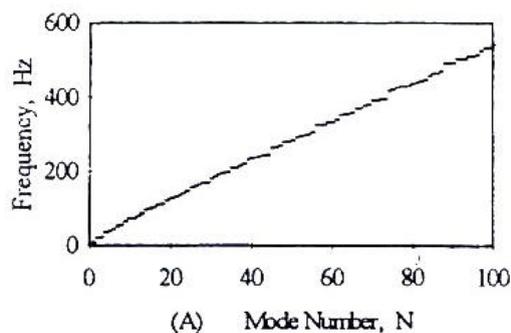


Figura 4. Distribución de modos de pandeo en una lámina

Donde,  $L_1$  y  $L_2$  son las dimensiones de longitud,  $h$  es el espesor,  $C_L$  es la velocidad de onda longitudinal para el material de la lámina, y  $m$  y  $n$  son enteros. Se aprecia que las frecuencias de resonancia tienden a ubicarse aproximadamente a lo largo de una línea recta. A la pendiente de esta recta se le denomina *espaciado promedio de frecuencias*  $\overline{\partial f}$  (inverso a la densidad modal por Hz) dado por,

$$\overline{\partial f} = \frac{hC_L}{\sqrt{3L_1L_2}}$$

Una manera de representar la variación en las frecuencias resonantes reales es trazar la distribución estadística de frecuencias entre dos resonancias sucesivas, lo que puede ser trazado como se muestra en la Figura 4b que se asemeja a una distribución de Poisson.

Repitiendo este análisis para otras láminas con el misma área superficial, espesor, y material (por lo tanto el mismo  $\overline{\partial f}$ ), pero con los valores diferentes de  $L_1$  y  $L_2$ , arroja esencialmente los mismos resultados. Esto indica que otra manera de considerar los modos de una lámina en particular es considerarlo como una realización de un conjunto de láminas que tienen la misma distribución estadística de resonancias.

El SEA usa a este modelo para desarrollar las estimaciones de la respuesta a la vibración de sistemas basado en los promedios para un conjunto de

sistemas similares. Sin embargo, ya que los modos usualmente son una función del parámetro  $(fL/c)$ , variaciones en la frecuencia  $f$  en un sistema complejo tienen a menudo el mismo comportamiento estadístico que las variaciones en  $L$  y  $c$  en un conjunto de sistemas similares.

El modelo estadístico de un sistema es útil en una variedad de aplicaciones. En la fase de diseño preliminar de un sistema, el SEA puede ser usado para obtener estimaciones cuantitativas de la respuesta a la vibración incluso cuando no se han especificado completamente todos los detalles del diseño.

Esto se debe a que pueden realizarse estimativos preliminares del SEA al usar las características generales de los componentes del sistema (el tamaño global, espesor, las propiedades del material, etc.) sin requerir detalles de la forma de los componentes y acoples.

El SEA también es útil diagnosticando problemas de vibración. El modelo SEA puede ser usado para identificar las fuentes y la forma de transferencia de la energía vibracional. Cuando se dispone de datos obtenidos mediante mediciones, SEA puede ayudar a interpretarlos, o estos datos pueden ser usados para mejorar la exactitud de un modelo SEA preliminar. Ya que el modelo SEA arroja predicciones cuantitativas basadas en las propiedades físicas de un sistema, puede ser usado para evaluar la efectividad de modificaciones en un diseño. También puede ser usado con una rutina de optimización para buscar mejores configuraciones de diseño.

### 1.3 ANÁLISIS DE EMBARCACIONES

El análisis de una embarcación se puede realizar a cuatro niveles diferentes, los cuales son:

- **Hull Girder**

Es el primer nivel de análisis que se realiza al diseñar una embarcación, consiste en analizar el casco de esta como una viga, partiendo de las cargas principales como son la distribución de pesos y la fuerza boyante. La resultante entre estas es la carga a la cual esta sometida la embarcación.

- **Modulo del Casco**

Consiste en dividir la embarcación en varios módulos, por ejemplo cada zona de almacenamiento en un buque de carga, Tomando como condiciones de frontera las reacciones obtenidas para esta sección en el primer análisis.

- **Miembros Principales**

En esta sección se analizan los tipos de estructura para fabricar los paneles, doblefondo, cubiertas etc.

- **Miembros Locales**

Es un análisis donde se tienen en cuenta, miembros muy específicos de la embarcación como los tipos de juntas, acoples, perforaciones, agujeros de acceso etc.

#### **1.4 CARGAS EN LAS EMBARCACIONES**

Una forma de clasificar las cargas en las embarcaciones es de acuerdo al nivel estructural sobre el cual actúan, ya que algunas cargas solo afectan la estructura en uno de los cuatro niveles descritos anteriormente (Hull Girder, Módulos de Casco, Miembro principal y miembros locales) pero algunas cargas tienen influencia en más de uno de estos niveles, y la carga más fundamental (presión externa en el casco) tiene influencia en los cuatro niveles.

Otra forma de clasificar las cargas es de acuerdo a su variación con el tiempo: Estática, de variación lenta y variación rápida. Y para el cálculo de los efectos de las cargas, existen tres tipos de análisis estructurales: estático, dinámico y cuasiestático. En un análisis dinámico son tenidos en cuenta los efectos de la variación de la carga con respecto al tiempo.

Un análisis cuasiestático es simplemente un análisis estático en el que los movimientos son estimados y su efecto en la estructura se considera de manera aproximada al incluir algunas fuerzas de inercia.

Las cargas de variación lenta son aquellas para las cuales hasta su mayor frecuencia es apreciablemente menor que la frecuencia natural de vibración. En la mayoría de los casos, las cargas de variación lenta pueden ser tratadas por medio de análisis estáticos con pérdidas mínimas de precisión, así mismo, las cargas de variación rápida usualmente requieren un análisis dinámico para obtener respuestas confiables.

## 2. ANÁLISIS ESTRUCTURAL

### 2.1 VALIDACIÓN DEL MODELO

La geometría de la barcaza se puede dividir en dos partes principales, la primera de ellas consiste en las superficies exteriores ó las láminas que recubren la parte exterior y los mamparos, la otra consiste en la estructura interna.

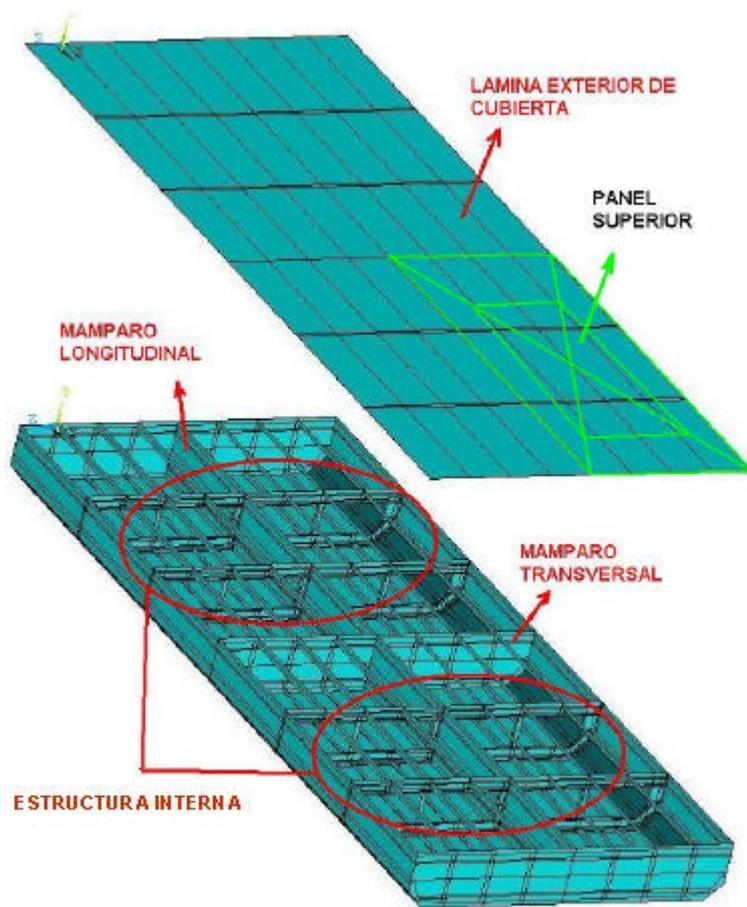


Figura 5. Componentes principales de la embarcación

Para el modelamiento de las superficies exteriores (cubierta, pantoques y fondo) y mamparos, se utiliza el elemento de lámina SHELL63 <sup>1</sup> de 4 nodos, y para el modelamiento de la estructura interna se presentan dos opciones como son:

- Elementos de lámina SHELL63
- Elementos de viga BEAM 188 <sup>2</sup> y SHELL63

La selección entre estos dos tipos de elementos para el modelamiento de la estructura interna se llevará a cabo al evaluar su interacción con una sección de plancha. Los valores obtenidos tanto de esfuerzos como de deformaciones para ambos casos se compararán con una respuesta analítica obtenida por un modelo matemático para conocer así sus porcentajes de error. Estos casos son

- Caso 1: Elementos de lamina (para toda la embarcación).
- Caso 2: Elementos de lamina (cubierta, fondo, pantoque y costados) y elementos de viga (Estructura interna).

Se presentara un problema típico de resistencia de materiales para comparar los dos tipos de elementos.

La sección estructural que se mostrará no forma parte de la estructura, solo se utiliza para validación del modelo

---

<sup>1</sup> Ver descripción en el anexo A

<sup>2</sup> Ver descripción en el anexo B

## PROBLEMA.

Una plancha de 2000 x 200 mm se encuentra simplemente apoyada mientras se somete a una presión de 0.02 MPa. La plancha ha sido reforzada con una viga de patín como se muestra.

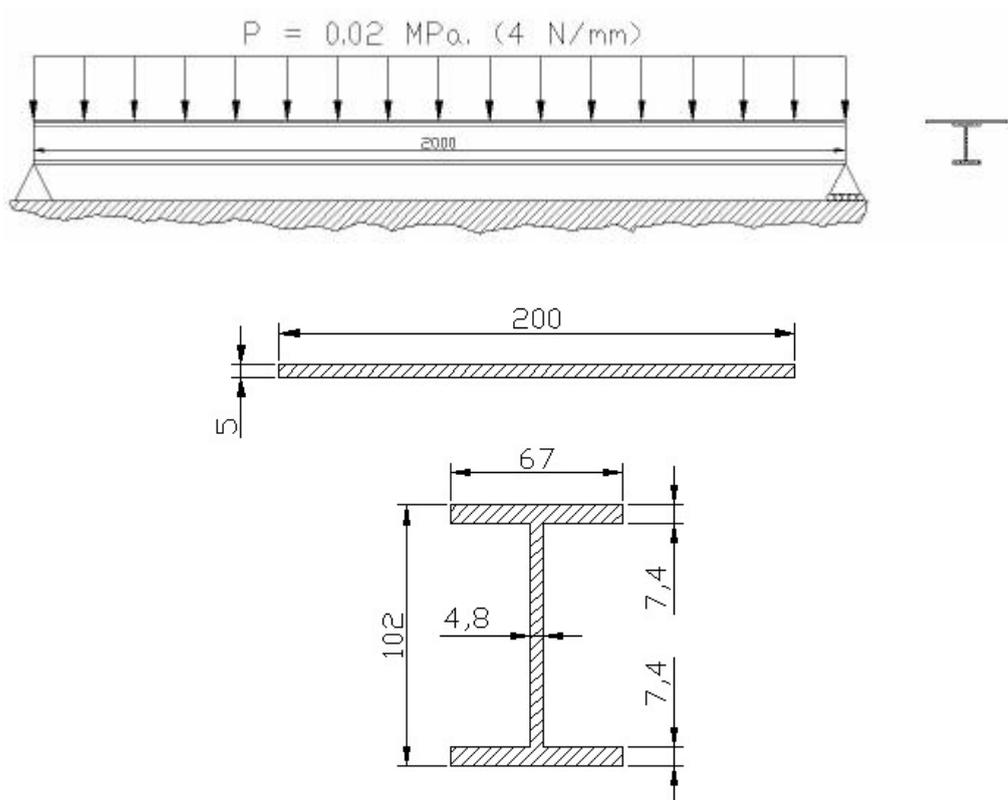


Figura 6. Conformación de la estructura

### 2.1.1 Solución Analítica

Para la solución del modelo suponemos que la plancha se comporta como una aleta más de la viga, y que ambas forman un conjunto al que se le trata como una viga nueva. (Ver figura 7)

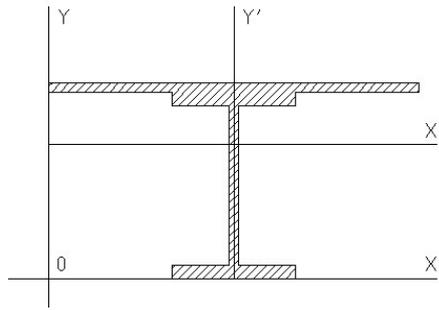


Figura 7. Representación gráfica de la sección a analizar

Las propiedades de la sección compuesta se presentan en el anexo C

A continuación se expresa la presión como una carga distribuida para realizar las curvas de fuerza cortante y momento flector (Ver figura 8).

$$W = P * A / L = 0.02\text{MPa} * \frac{(2000\text{mm})(200\text{mm})}{(2000\text{mm})} = 4 \frac{\text{N}}{\text{mm}}$$

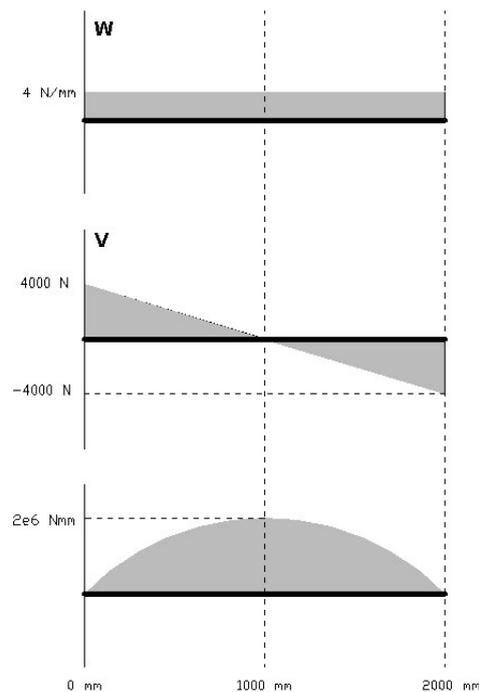


Figura 8. Diagrama de Fuerza Cortante y Momento Flector

El esfuerzo máximo de la estructura se presenta para las fibras más alejadas del eje neutro, por lo que

$$s = \frac{Mc}{I} = \frac{(2 \times 10^6 \text{ Nmm})(73.1977 \text{ mm})}{4165000.2795 \text{ mm}^4} = 35.149 \text{ MPa}$$

Se aplica la fórmula de deflexión máxima para vigas simplemente apoyadas con carga uniformemente distribuida.

$$y_{\text{MAX}} = -\frac{5WL^4}{384EI} = -\frac{5(4 \text{ N/mm})(2000)^4}{384(200 \times 10^{-3})(4165000.2795 \text{ mm}^4)} = -1.0004 \text{ mm}$$

### 2.1.2 Solución Para El Caso 1 (Elementos Shell)

A continuación se modela la totalidad de la estructura con el elemento SHELL63 de 4 nodos. Se divide la estructura en diversas áreas para enmallar por separado las correspondientes a cada espesor.

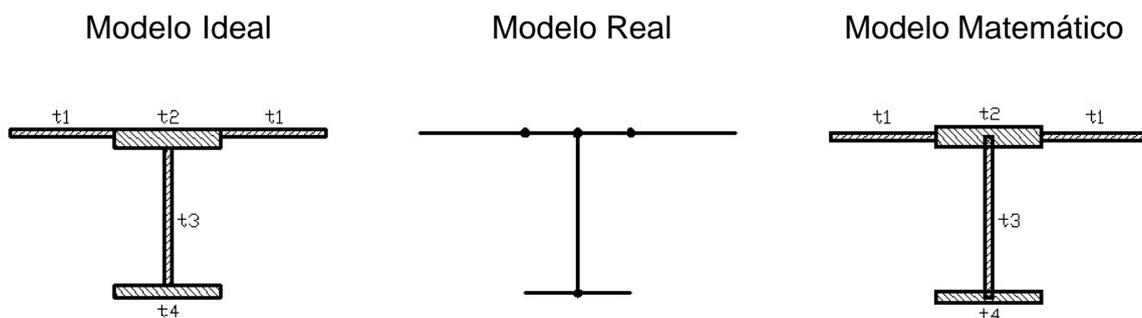


Figura 9. Comparación de modelos

Una vez obtenido el modelo con un total de 2100 elementos, se procede a solucionarlo de lo cual se obtienen los siguientes resultados:

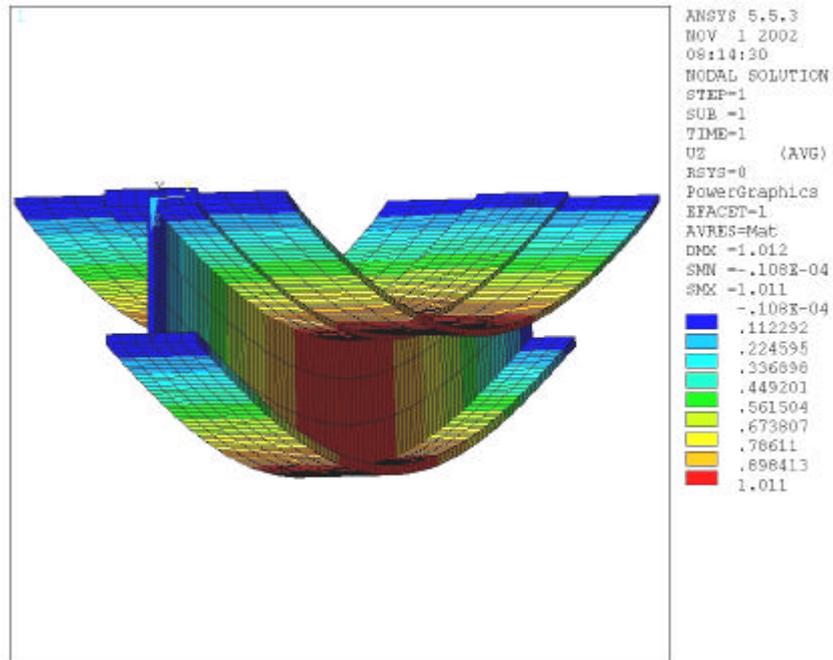


Figura 10. Desplazamientos en la dirección z ( $U_z$ ) sobre toda la estructura

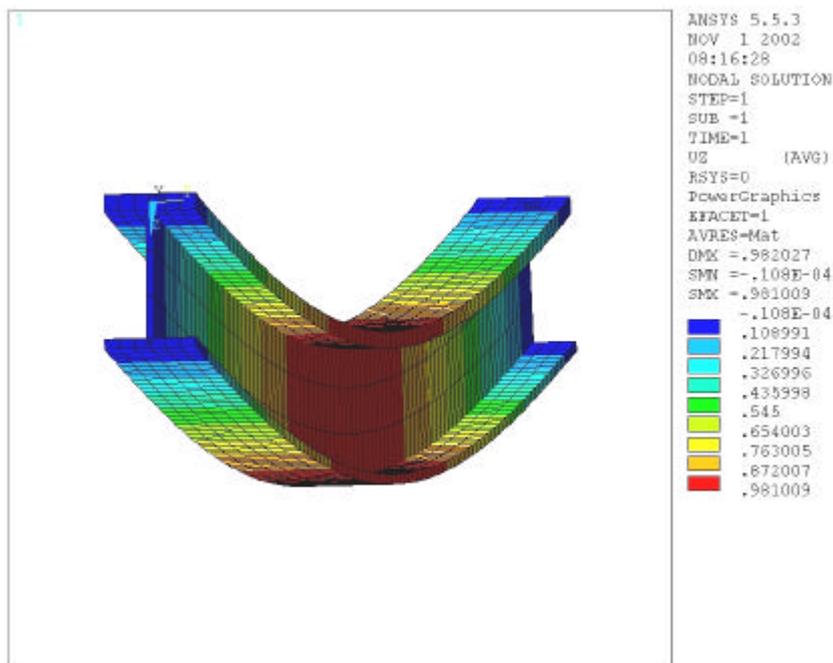


Figura 11. Desplazamientos en la dirección z ( $U_z$   $m_x = 0.9810$  mm) sobre la viga

Porcentaje de error en las deformaciones:

$$\frac{\partial_{\text{calculado}} - \partial_{\text{real}}}{\partial_{\text{real}}} = \frac{0.9810\text{mm} - 1.0004\text{mm}}{1.0004\text{mm}} * 100\% = 1.94\%$$

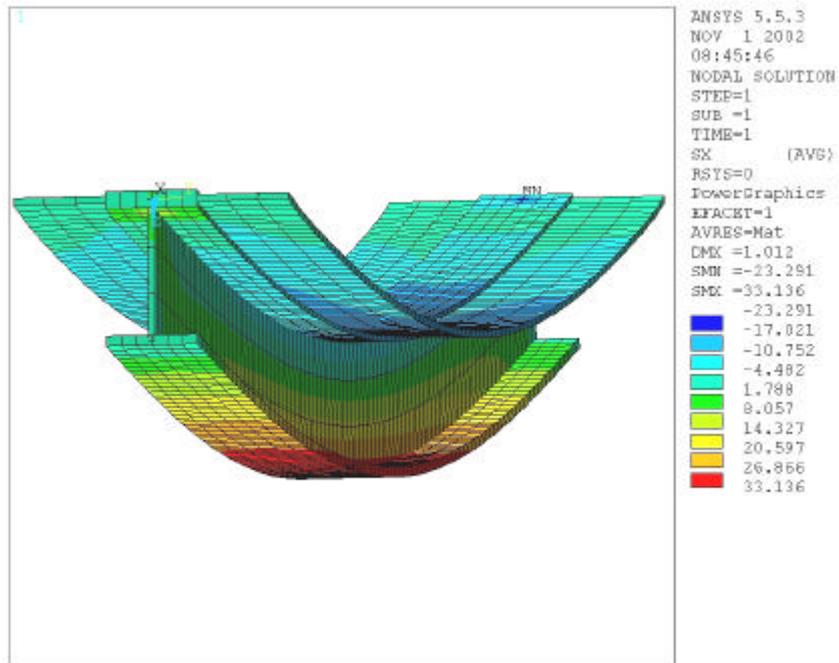


Figura 12. Esfuerzos normales en dirección X (Sx mx = 33.136 Mpa).

Porcentaje de error en los esfuerzos:

$$\frac{\mathbf{s}_{\text{Real}} - \mathbf{s}_{\text{Calculado}}}{\mathbf{s}_{\text{real}}} = \frac{35.149\text{MPa} - 33.136\text{MPa}}{35.149\text{MPa}} * 100\% = 5.73\%$$

### 2.1.3 Solución Para El Caso 2 (Elementos Beam)

Para este caso la plancha se modela con el elemento SHELL63 de 4 nodos mientras que la viga de refuerzo se modela con elementos de viga BEAM188 de 2 nodos.

Para el elemento de viga BEAM188 definimos la sección transversal tal como se muestra. (Ver figura 13).

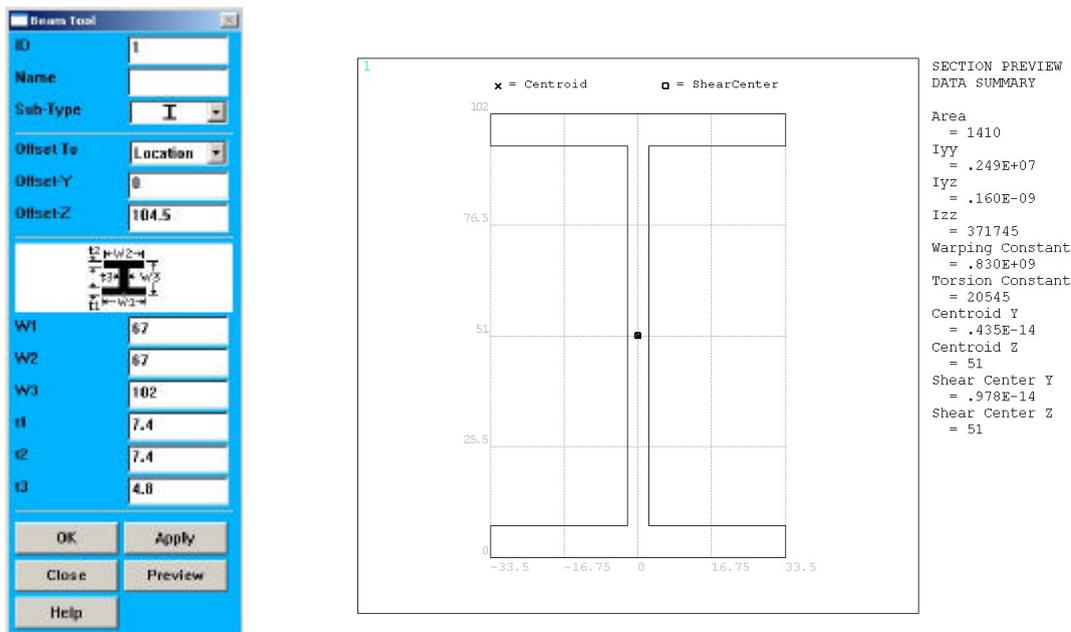


Figura 13. Propiedades de la sección

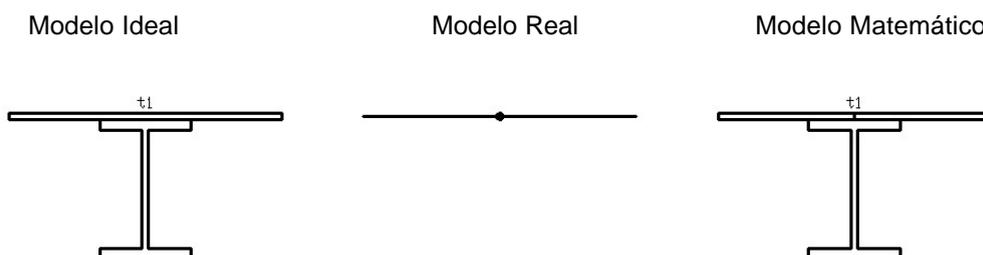


Figura 14. Diferencia de modelos

Una vez obtenido el modelo con un total de 700 elementos, se procede a solucionarlo

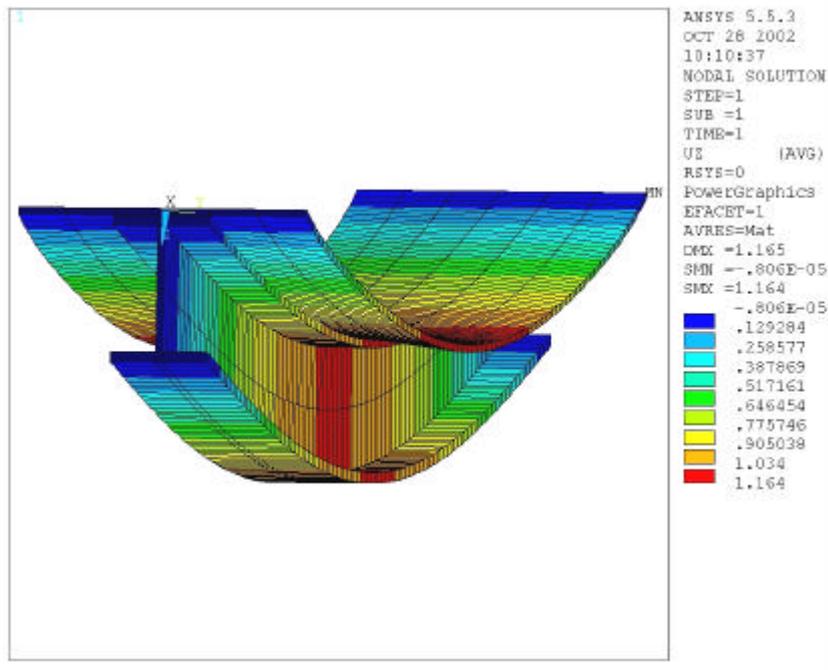


Figura 15. Desplazamientos en Z, UZ

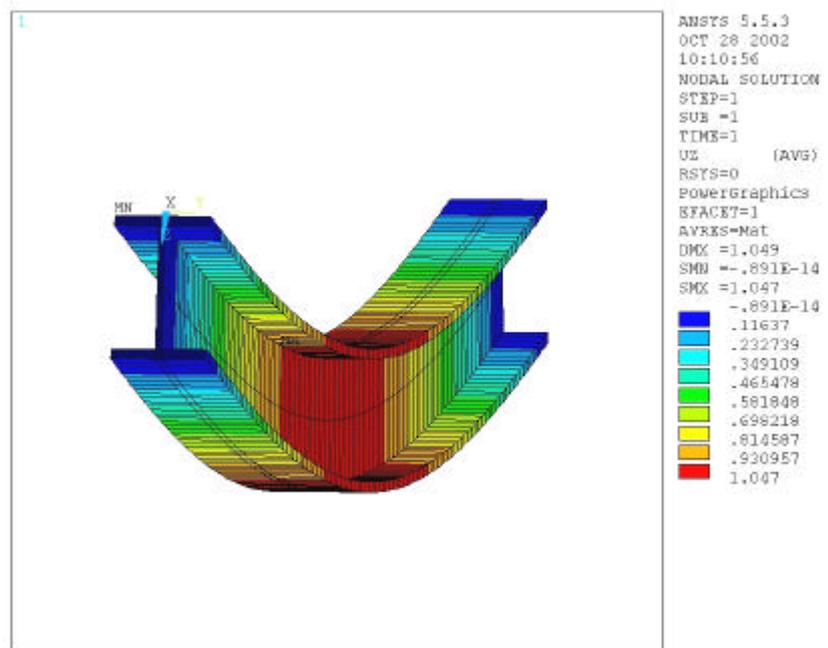


Figura 16. Desplazamientos sobre viga (UZ mx = 1.047 mm)

Porcentaje de error en las deformaciones:

$$\frac{\partial_{\text{calculado}} - \partial_{\text{real}}}{\partial_{\text{real}}} = \frac{1.047\text{mm} - 1.0004\text{mm}}{1.0004\text{mm}} * 100\% = 4.66\%$$

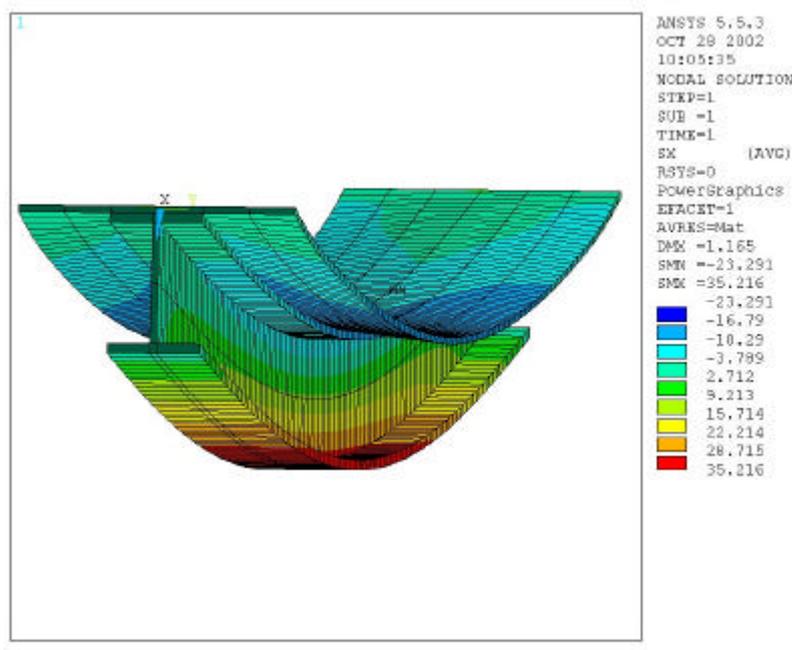


Figura 17. Esfuerzos Sobre el eje X (SX mx = 35.216 MPa)

Porcentaje de error en los esfuerzos:

$$\frac{s_{\text{Calculado}} - s_{\text{real}}}{s_{\text{real}}} = \frac{35.216\text{MPa} - 35.149\text{MPa}}{35.149\text{MPa}} * 100\% = 0.19\%$$

El porcentaje de error en los desplazamientos es 2.72 puntos porcentuales mayor para BEAM 188 que para SHELL 63, mientras que el porcentaje de error en los esfuerzos es 5.54 puntos porcentuales menor, debido a esto se elegirá el elemento de viga BEAM 188 de 2 nodos para modelar la estructura interna de la barcaza.

Vale resaltar que al trabajar con elementos de viga se reduce el número de elementos totales, en esta validación se redujo de 2100 a 700 con el mismo tamaño de elemento, haciendo el modelo menos pesado computacionalmente.

## 2.2 PRE-PROCESAMIENTO

En este paso se construyen los modelos de la embarcación correspondientes a los dos tipos de conexiones, los cuales se muestran en las figuras 18 y 19.

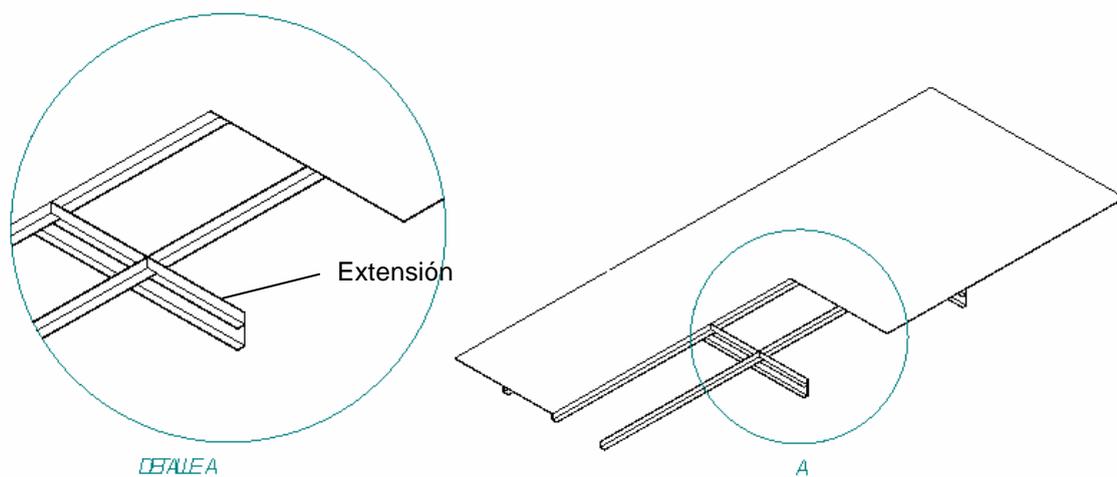


Figura 18. Panel con conexión Directa

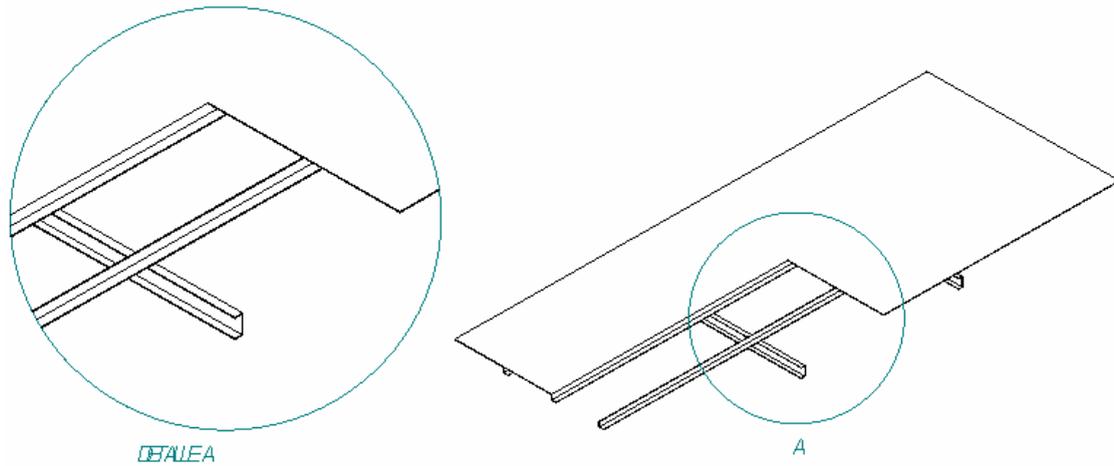


Figura 19. Panel con conexión indirecta

La conexión directa presenta una extensión a partir del perfil en C hasta las láminas exteriores, y en la conexión indirecta dicha extensión no existe por lo que las cargas aplicadas sobre estas láminas se transmiten al perfil en C solo a través de los perfiles en L. (Ver figura 20).

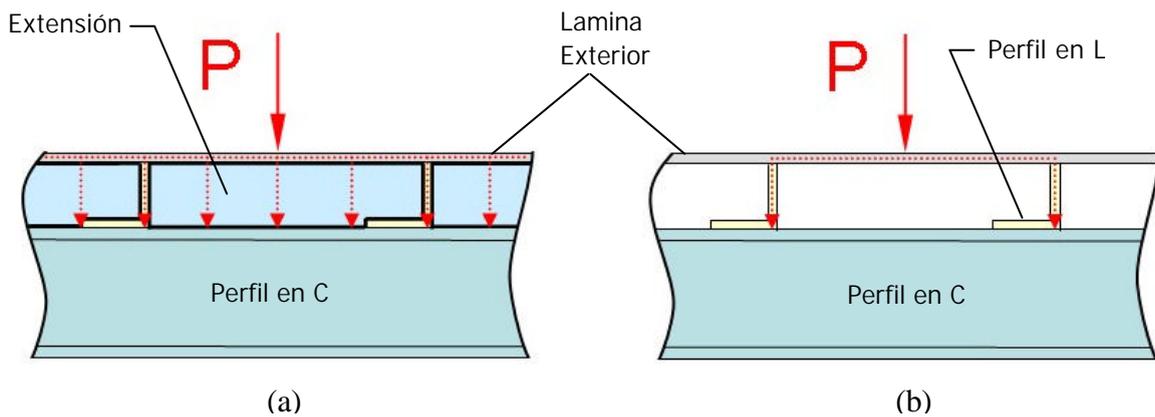


Figura 20. Configuración de paneles (a) conexión directa, (b) indirecta

En el modelamiento de los paneles se deberán tener en cuenta los siguientes aspectos:

- Tipo de análisis a realizar
- Propiedades del material
- Geometría de la embarcación
- Condiciones de carga
- Condiciones de apoyo
- Enmallado

El modelo fue realizado completamente en el programa ANSYS 5.5 para evitar errores en la importación desde cualquier otro software de CAD.

### **2.2.1 Propiedades Del Material**

El material mas usado en la construcción de embarcaciones según las normas internacionales, es el acero ASTM A 131 ó acero naval como se le conoce más comúnmente. Para este caso en particular, el acero utilizado es ASTM A 131 grado A, el cual presenta las siguientes propiedades:

$$s_{ut} = 400 - 490 \text{ MPa (58 - 71 Ksi)}$$

$$s_y = 200 \text{ MPa (32 Ksi)}$$

$$\text{Elongación Mínima en 200 mm} = 21\%$$

$$\text{Densidad: } 7860 \text{ kg / m}^3 \text{ (490 Lb/ft}^3\text{)}$$

$$\text{Modulo de elasticidad} = 200 \text{ GPa (30 x10}^6 \text{ Psi)}$$

$$\text{Relación de Poisson : 0.3}$$

### 2.2.2 Geometría De La Embarcación

Las dimensiones con las cuales será construido el modelo general de la embarcación se muestran en los anexos D y E.

Se evaluaron cuatro opciones para el modelamiento de la embarcación

- Toda la embarcación.
- Media embarcación (simetría longitudinal)
- Media embarcación (simetría Transversal)
- Un cuarto de embarcación (Simetría longitudinal y transversal)

La embarcación no posee simetría transversal ya que la orientación de los perfiles en C se mantiene constante a lo largo de la misma (Ver anexos D), tampoco posee simetría longitudinal debido a que los perfiles en L, encargados de hacer más rígido el mamparo longitudinal, se ubican solo a un lado de este (Ver anexo E) , por lo cual se decide modelar la totalidad de la embarcación.

Se emplea un nivel de detalle, que incluye la geometría general de la embarcación, y las secciones transversales de las vigas que componen la estructura interna junto con sus propiedades. El detalle de las uniones y las juntas no se tiene en cuenta ya que estas dependen de los métodos de construcción empleados.

El modelo de la embarcación, incluyendo la totalidad de su geometría se ilustra en la figura 21, este modelo corresponde a la conexión indirecta. Para la construcción del modelo de conexión directa se agregan elementos de lámina para conectar su estructura primaria a las láminas exteriores.

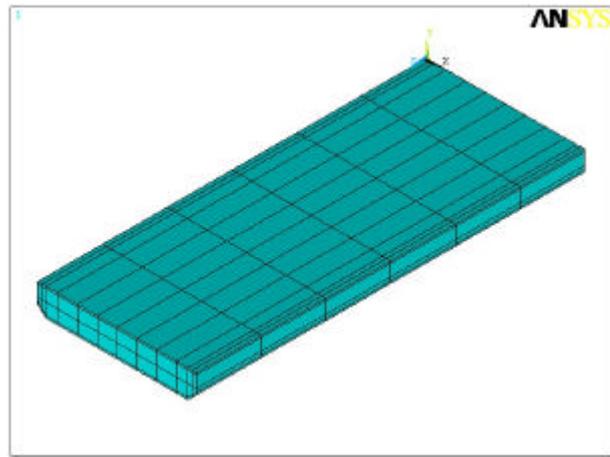


Figura 21. Modelo computacional de la embarcación

### 2.2.3 Propiedades De Los Elementos

Las propiedades de los elementos SHELL63 y BEAM 188 son descritas en los anexos B y C respectivamente.

### 2.2.4 Condiciones De Apoyo

Las condiciones de apoyo ó restricciones deberán ser aplicadas de acuerdo a dos condiciones críticas presentadas al trabajar la embarcación, estas condiciones son las de arrufo y quebranto. Las cuales se describen a continuación.

- **Arrufo**

Esta condición se da en el momento en que la embarcación se apoya entre dos olas, una en cada extremo de esta. Para este caso se considera la embarcación como una viga simplemente apoyada. (Ver figura 22).

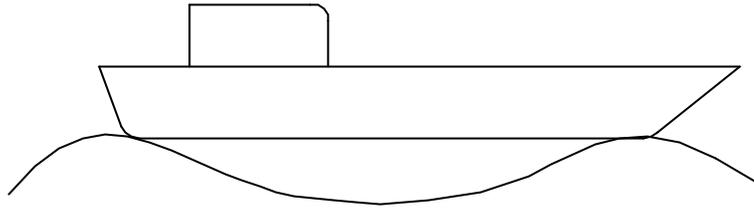


Figura 22. Condición de Arrufo

- **Quebranto**

Esta condición se da en el momento en que la embarcación se apoya sobre una sola ola ubicada a la mitad de su longitud. Para este caso se considera que la embarcación se encuentra apoyada en el extremo inferior del mamparo transversal. (Ver figura 23).

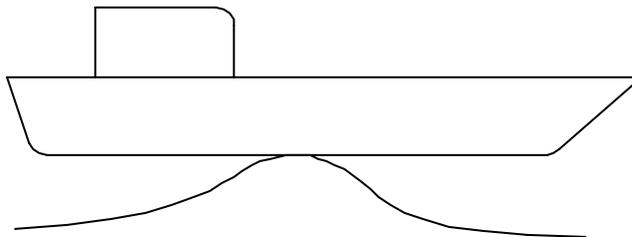


Figura 23. Condición de Quebranto

Estas dos situaciones de apoyo se aplican a los dos tipos de conexión por lo que en total se construyen cuatro modelos

1. Arrufo con conexión indirecta.
2. Arrufo con conexión directa.
3. Quebranto con conexión indirecta.
4. Quebranto con conexión directa

### 2.2.5 Condiciones De Carga

La embarcación se somete a una carga homogénea de 0.7 m de columna de agua (c.d.a), la cual nunca existirá durante su funcionamiento ya que ésta no flotaría, debido ser un volumen de agua superior al que podría desplazar toda la embarcación

La carga de 0.7 m de c.d.a se modela como una presión uniformemente aplicada a todas las áreas que conforman la cubierta. Este valor se calcula a continuación:

$$P = g h$$
$$g = 9.806 \frac{KN}{m^3}$$
$$P = 9.806 \frac{KN}{m^3} * 0.7m = 6.8642 \frac{KN}{m^2} = 6.8642 \times 10^{-3} \frac{N}{mm^2}$$

La presión ejercida sobre la cubierta es de  $6.8642 \times 10^{-3} \text{ N/mm}^2$  (MPa).

Las figuras 24 y 25 muestran las condiciones de carga para los dos tipos de apoyos descritos en el inciso 2.2.4.



Figura 24. Condición de carga para arrufo

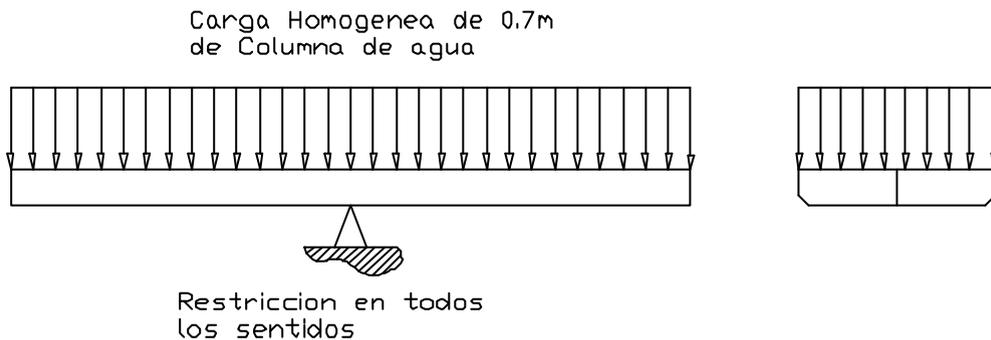


Figura 25. Condición de carga para arrufo

## 2.2.6 Análisis De Convergencia Y Enmallado

Debido a que el modelo general se descompuso en formas geométricas sencillas (cuadriláteros), se utiliza un enmallado mapeado<sup>3</sup>, el cual permite obtener respuestas más confiables al no distorsionar la forma de los elementos.

<sup>3</sup> Enmallado compuesto únicamente de elementos cuadriláteros o triangulares distribuidos en un patrón regular. "Meshing Your Solid Model" Analysis Guides, ANSYS 5.5.

Esta situación no se presenta para las láminas que unen la estructura primaria con las planchas en la conexión directa, por lo que se utiliza enmallado libre.

Se realizó un análisis de convergencia para determinar el número adecuado de elementos para realizar el enmallado del modelo de conexión indirecta en condición de arrufo. Los datos obtenidos durante este análisis se presentan en la tabla 1.

Tabla 1. Resultados del Análisis de Convergencia

Tamaño Global de Elementos	Número de Elementos	Uy (mm.)	Sz (Mpa.)
150	7388	-4,0595	-23,605
137,5	9656	-4,065	-23,24
125	11072	-4,0689	-22,65
112,5	13048	-4,0734	-22,812
100	14600	-4,0742	-22,409
87,5	19244	-4,0807	-22,369
75	23756	-4,0839	-22,211
68	32040	-4,0873	-22,131
62,5	34392	-4,0886	-22,021
58	40580	-4,0902	-22,071
54	46476	-4,0927	-22,136
50	50904	-4,0928	-22,107
46	62808	-4,0946	-22,206

Al graficar estos datos se obtienen las curvas de convergencia de esfuerzo y de desplazamientos. (Ver figuras 26 y 27).

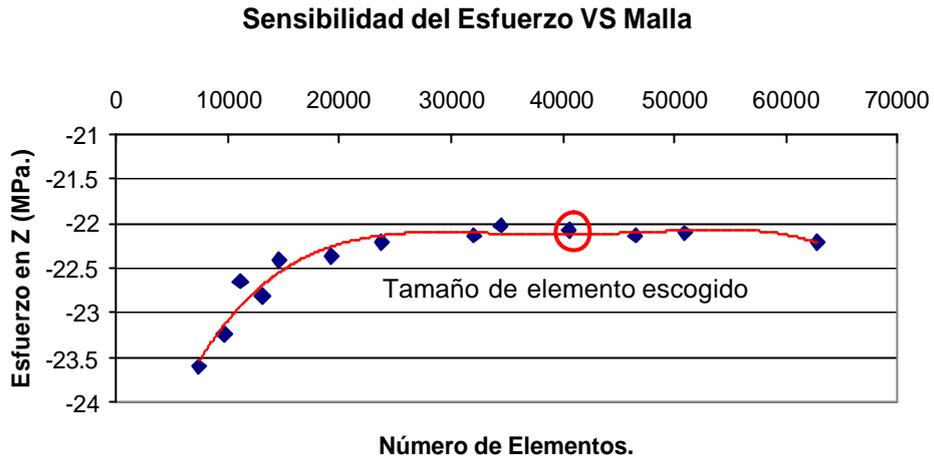


Figura 26. Sensibilidad del Esfuerzo SZ Vs Malla

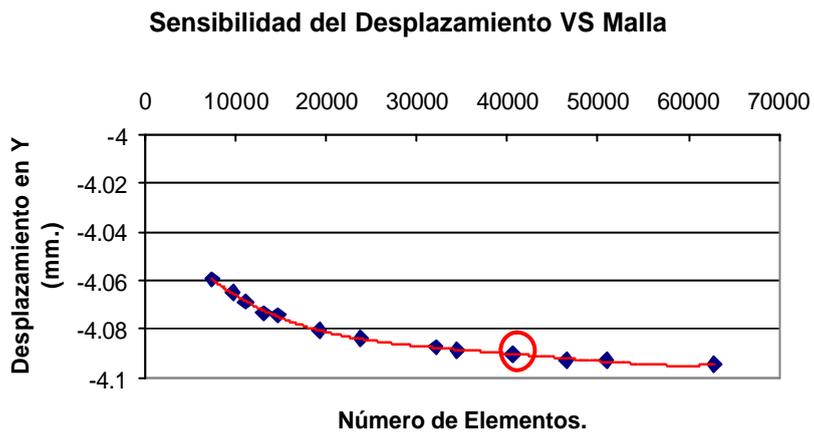


Figura 27. Sensibilidad del Desplazamiento UY Vs Malla

La sensibilidad de esfuerzos contra número de elementos, converge a partir de aproximadamente 20000 elementos según muestra la figura 26, en cambio la sensibilidad de desplazamientos contra número de elementos muestra una convergencia muy lenta a un número elevado de elementos, lo que implica un alto costo computacional. A partir de esto se decidió trabajar con el modelo compuesto de elementos con un tamaño global de 58, ya que representa un buen equilibrio entre tamaño del modelo y precisión del resultado.

Este tamaño global de elementos es utilizado para enmallar los modelos restantes, debido a la similitud en su geometría y condiciones de carga.

Para cada modelo existen dos tipos de elementos, los cuales son las líneas que representan las vigas de la estructura interna y las áreas que representan la cubierta, costados, pantoques, fondo y refuerzos (encargados de unir las vigas con las láminas para la conexión directa).

La distribución de los elementos se muestra a continuación en la tabla 2

Tabla 2. Número de elementos

Modelo	Elementos SHELL63		Elementos BEAM188	Total elementos
Directo (Arrufo y Quebranto)	Malla Mapeada	36948	3806	41560
	Malla Libre	806		
Indirecto (Arrufo y Quebranto)	Malla Mapeada	36948	3806	40754

## 2.3 SOLUCIÓN DEL MODELO

En este paso se obtienen los archivos de solución para la conexión directa en condición de arrufo y la conexión directa e indirecta en condición de quebranto.

Para la conexión indirecta en condición de arrufo se utiliza el archivo de solución del modelo seleccionado en el análisis de convergencia.

## 2.4 POST-PROCESAMIENTO

Se tendrán en cuenta los resultados sobre la totalidad de la embarcación y para componentes específicos como la cubierta y una de las cuadernas maestras.

Para la totalidad de la embarcación y la cubierta se analizarán los desplazamientos totales (USUM) y los esfuerzos equivalentes de Von Misses (SEQV), para la cuaderna maestra se analizará además los esfuerzos axiales en las vigas que la componen (SX).

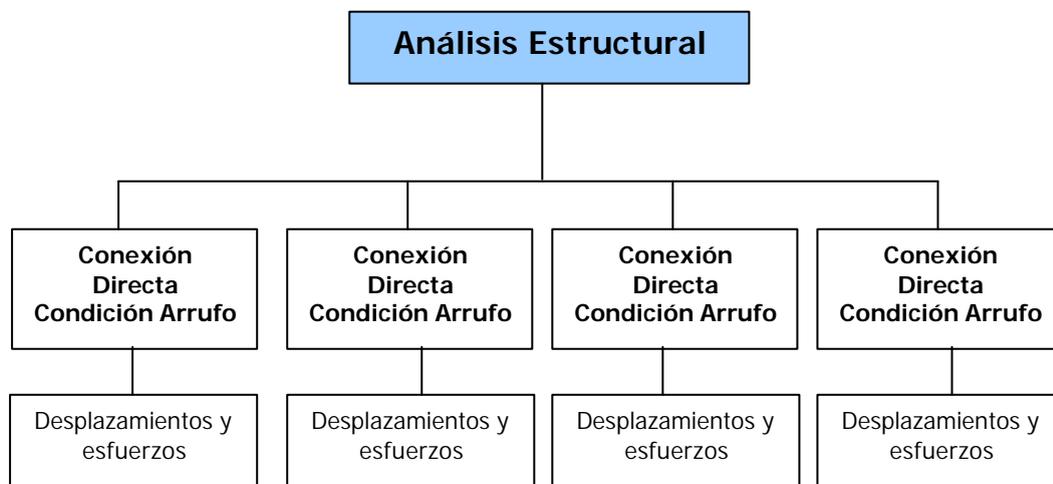


Figura 28. Organigrama de exposición de resultados

## 2.4.1 Conexión Directa en Condición de Arrufo.

- Desplazamientos

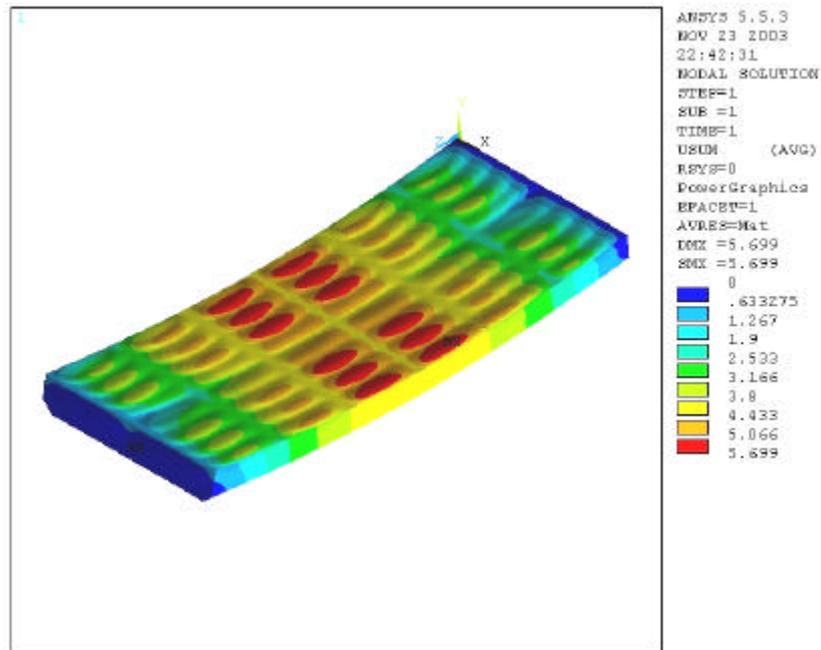


Figura 29. Barcaza completa (USUM mx = 5.699 mm.)

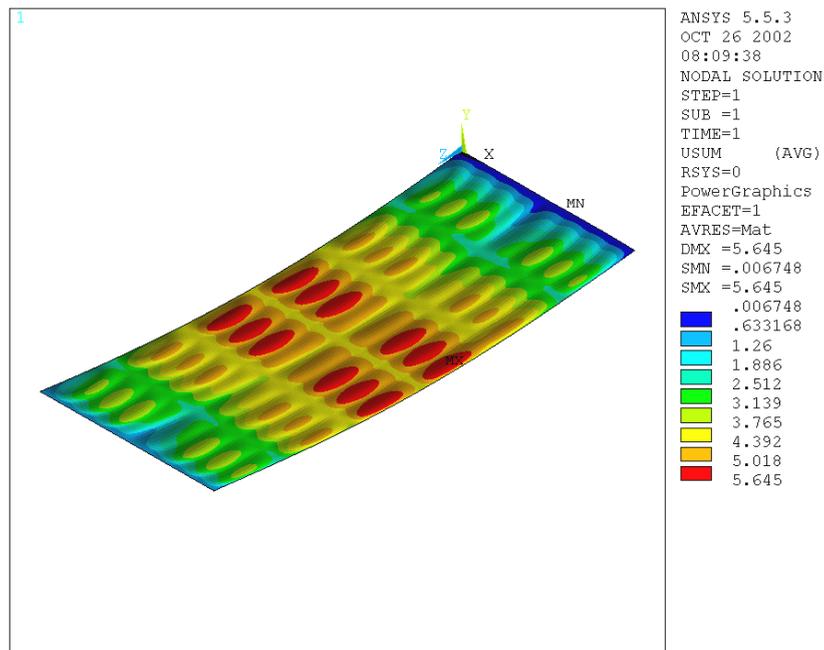


Figura 30. Cubierta (USUM mx = 5.645 mm)

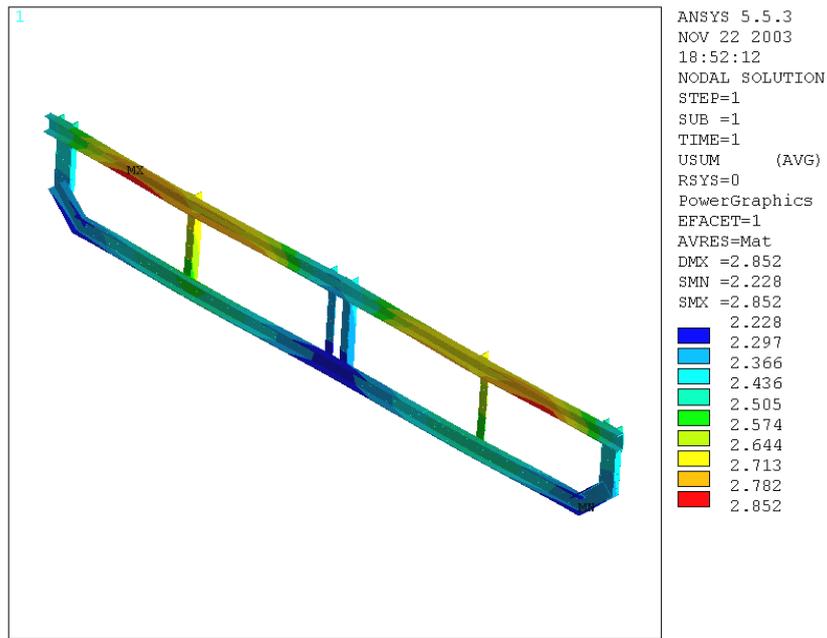


Figura 31. Cuaderna Maestra (USUM mx = 2.852 mm)

- **Esfuerzos**

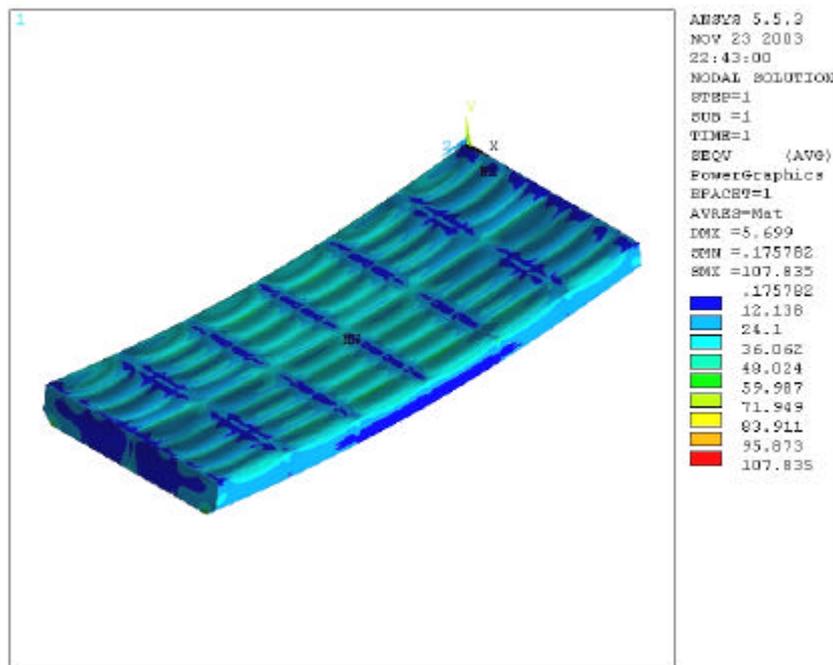


Figura 32. Barcaza completa (SEQV mx = 107.835 MPa)

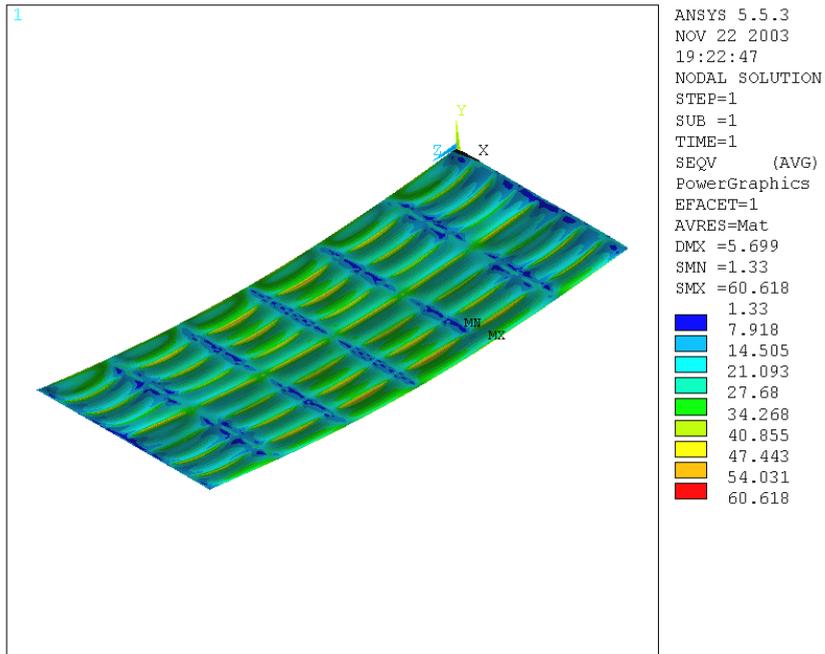


Figura 33. Cubierta (SEQV mx = 60.618 Mpa)

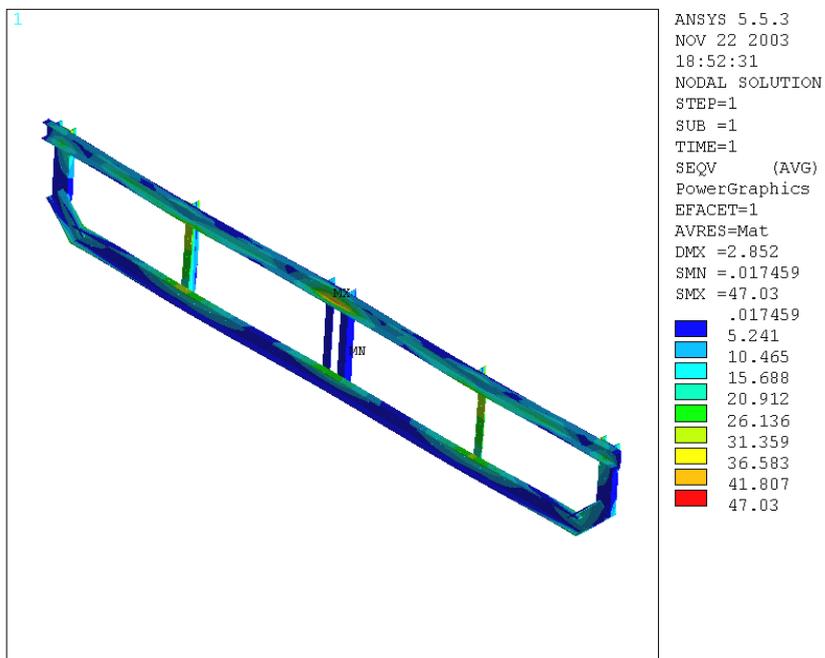


Figura 34. Cuaderna maestra (SEQV mx = 47.03 MPa)

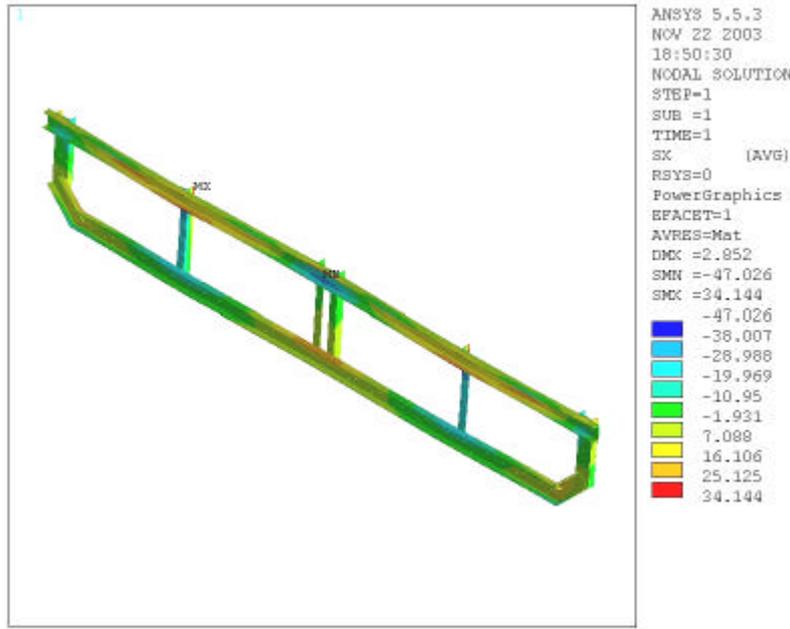


Figura 35. Cuaderna Maestra (SX min = -47.826 MPa, SX mx = 34.144 MPa)

## 2.4.2 Conexión Indirecta en Condición de Arrufo

- Desplazamientos

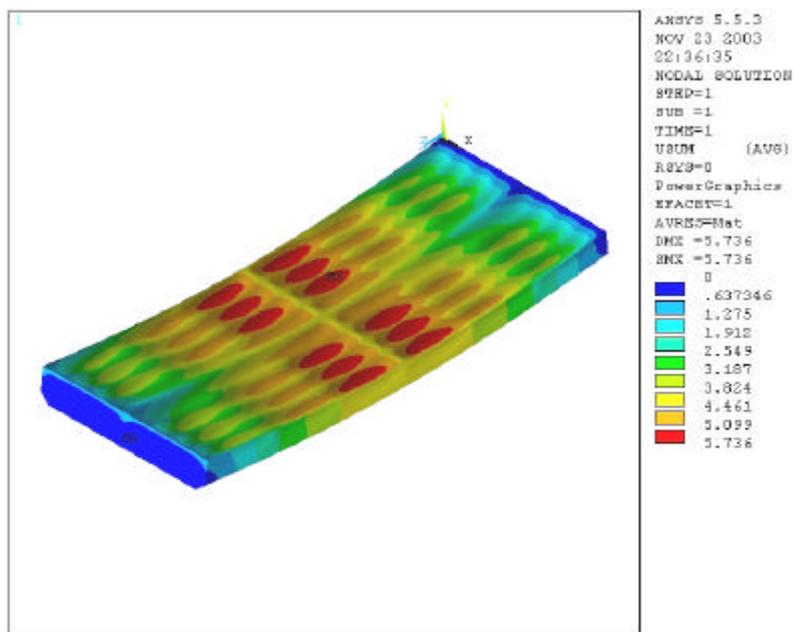


Figura 36. Barcaza completa (USUM mx = 5.734 mm)

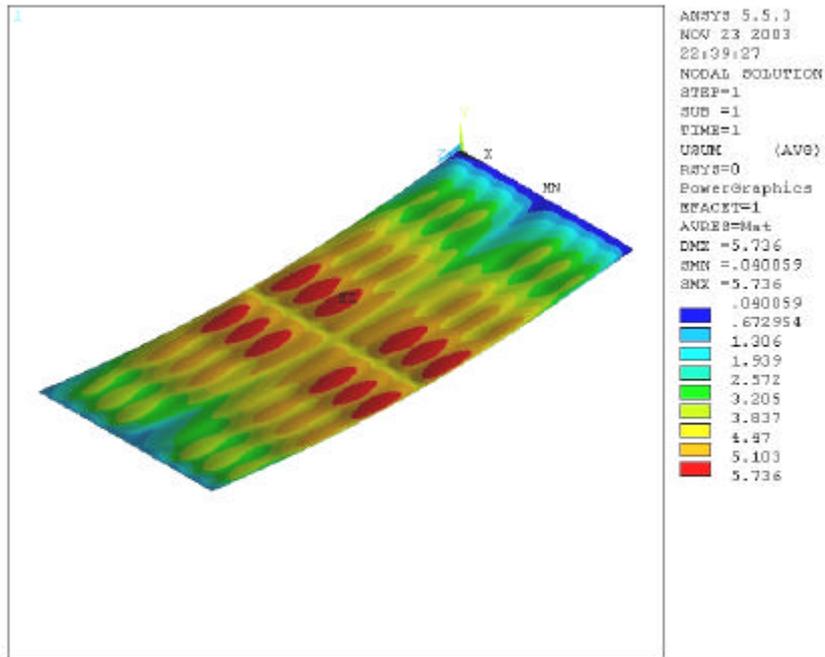


Figura 37. Cubierta (USUM mx= 5.736 mm)

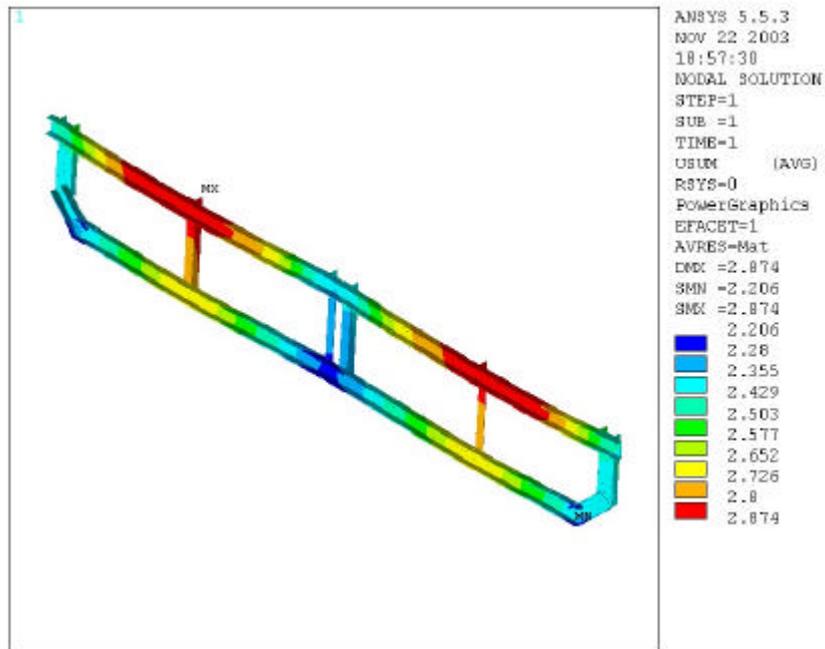


Figura 38. Cuaderna maestra (USUM mx = 2.874 mm)

- Esfuerzos

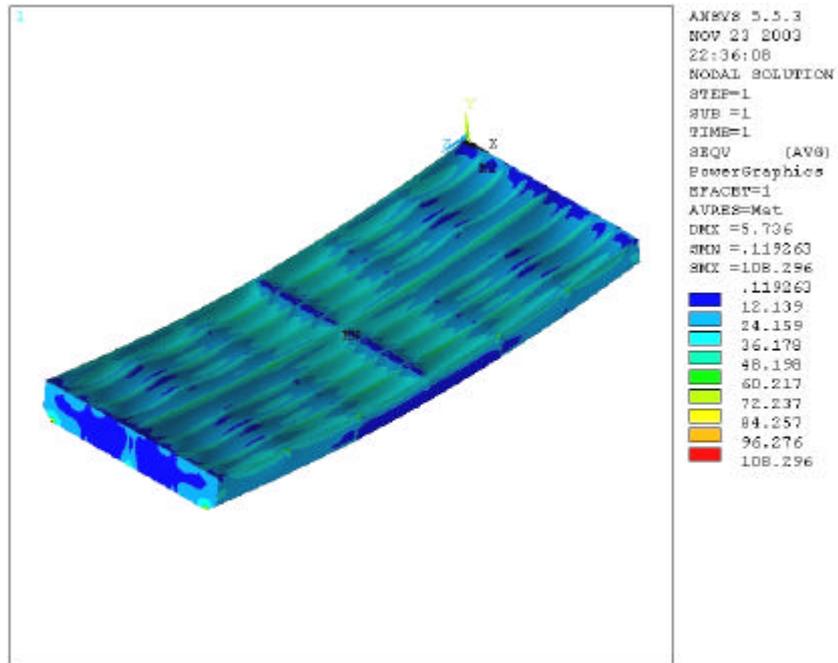


Figura 39. Barcaza completa (SEQV mx = 108.296 MPa)

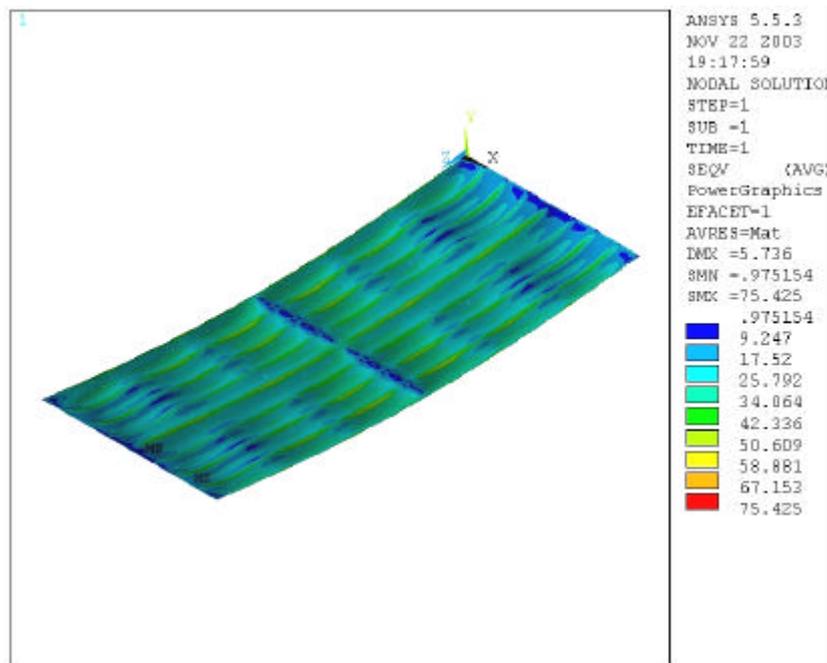


Figura 40. Cubierta (SEQV mx = 75.425 MPa)

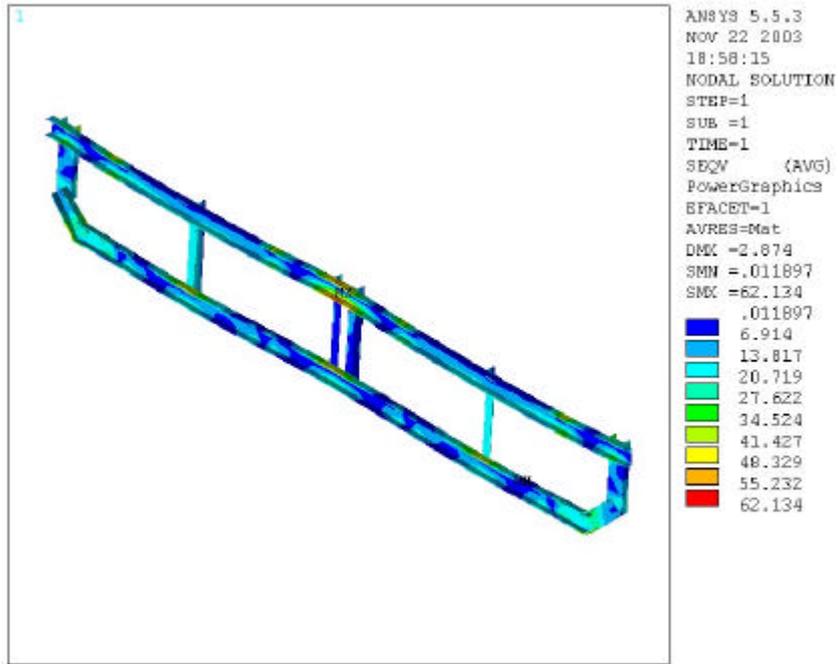


Figura 41. Cuaderna maestra (SEQV mx = 62.134 MPa)

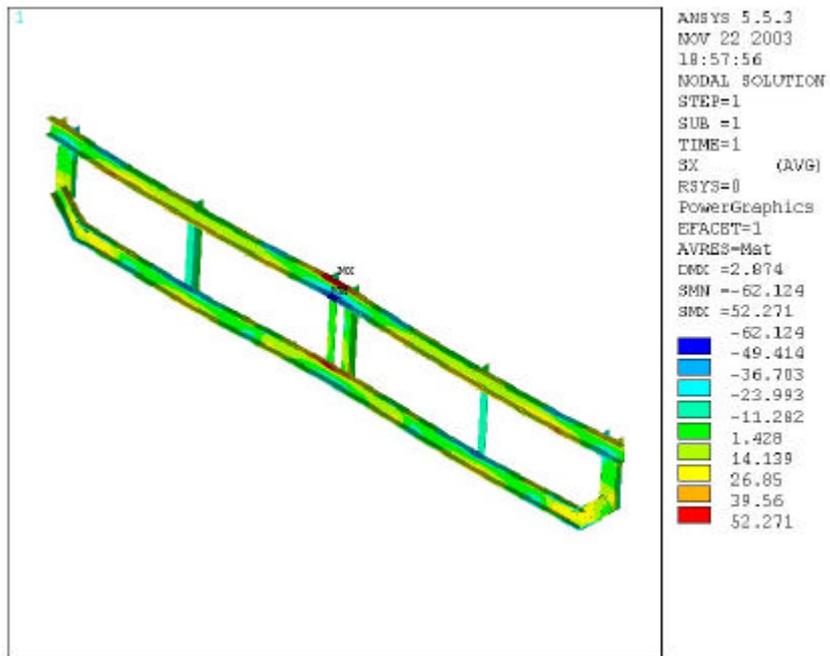


Figura 42. Cuaderna maestra (SX min = -62.124 MPa, SX mx = 52.271 MPa)

### 2.4.3 Conexión Directa en Condición de Quebranto

- Desplazamientos

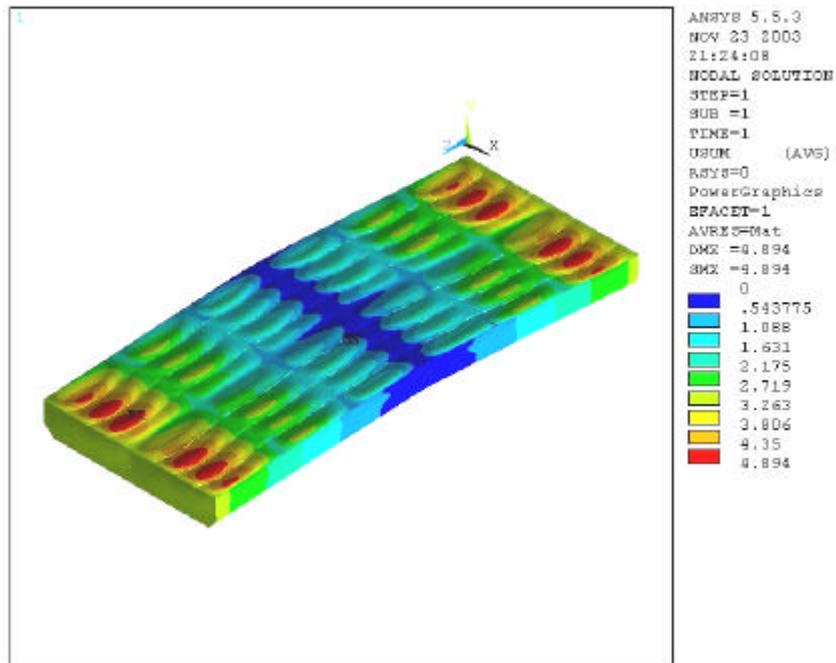


Figura 43. Barcaza completa (USUM mx = 4.894 mm)

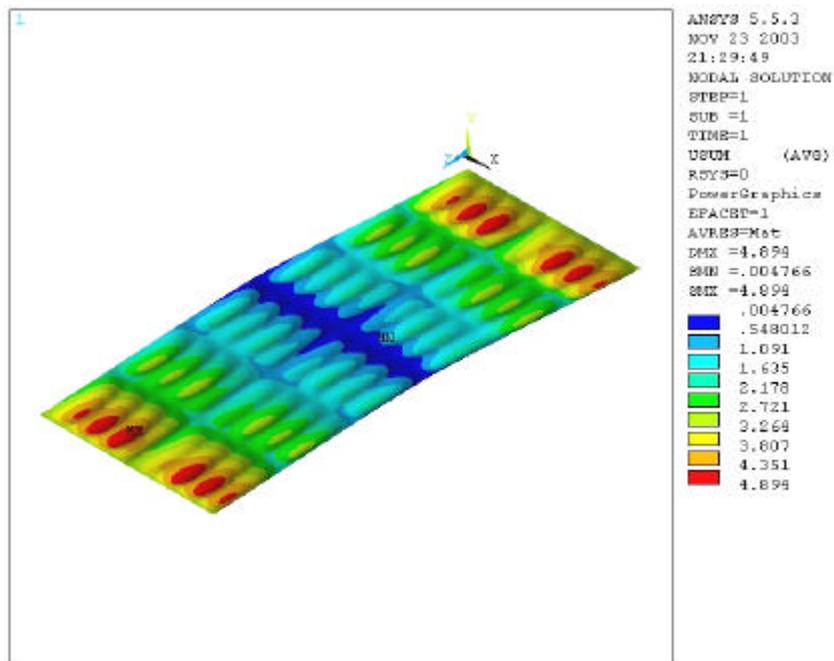


Figura 44. Cubierta (USUM mx = 4.894 mm)

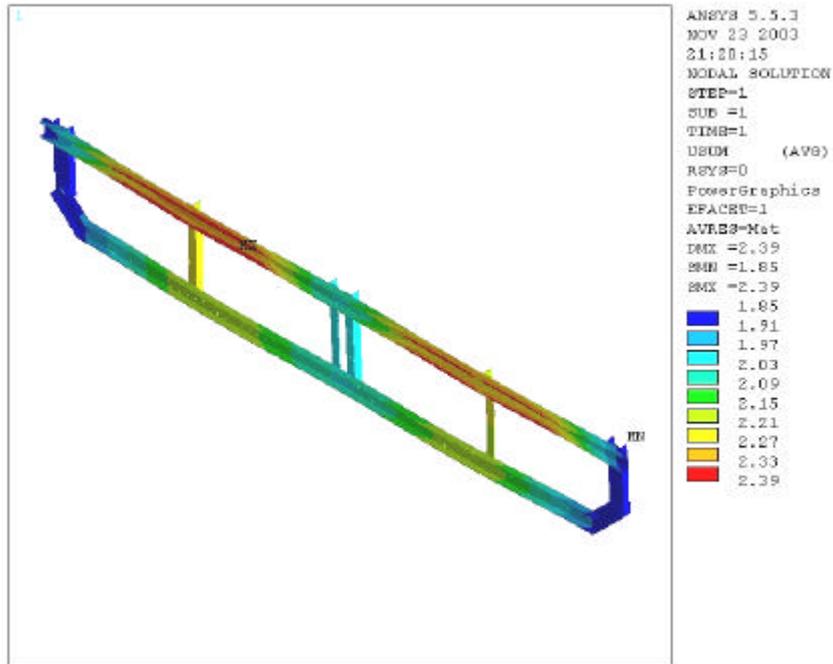


Figura 45. Cuaderna maestra (USUM mx = 2.39 mm)

- Esfuerzos

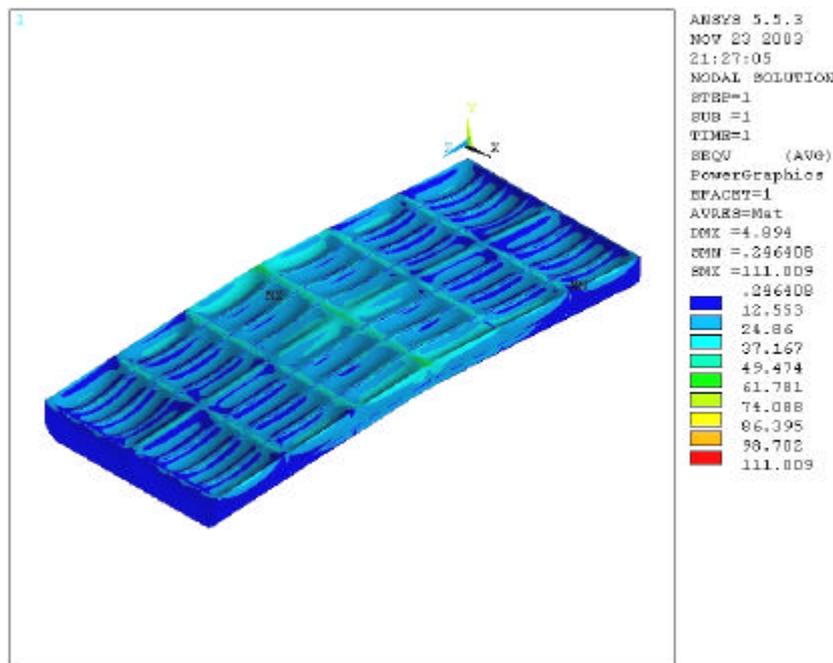


Figura 46. Barcaza completa (SEQV mx = 111.009 MPa)

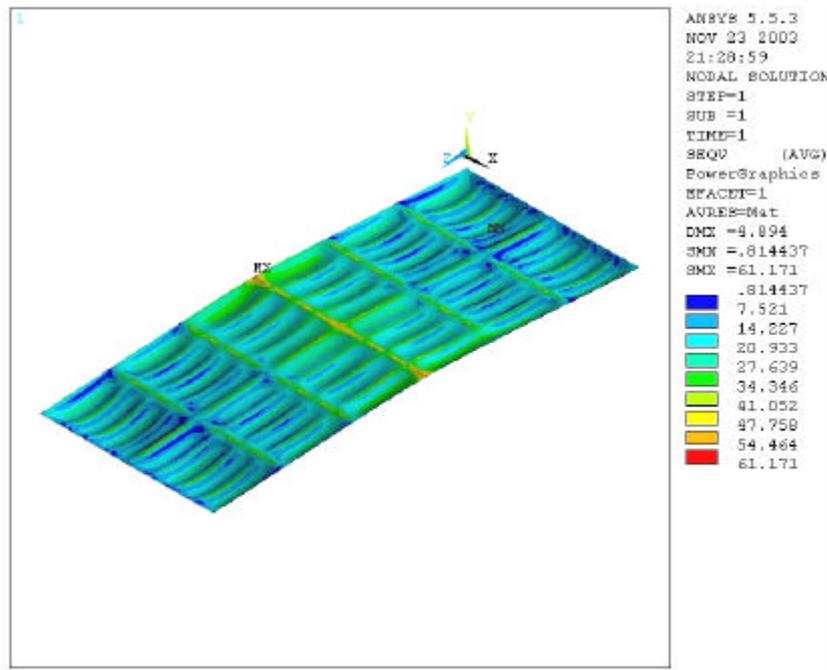


Figura 47. Cubierta (SEQV mx = 61.171 MPa)

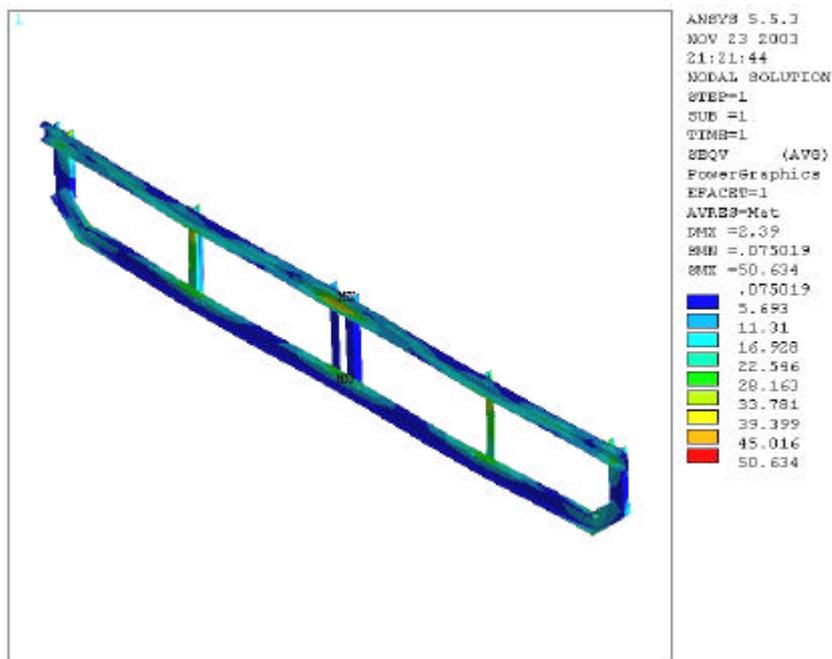


Figura 48. Cuaderna maestra (SEQV mx= 50.634 MPa)

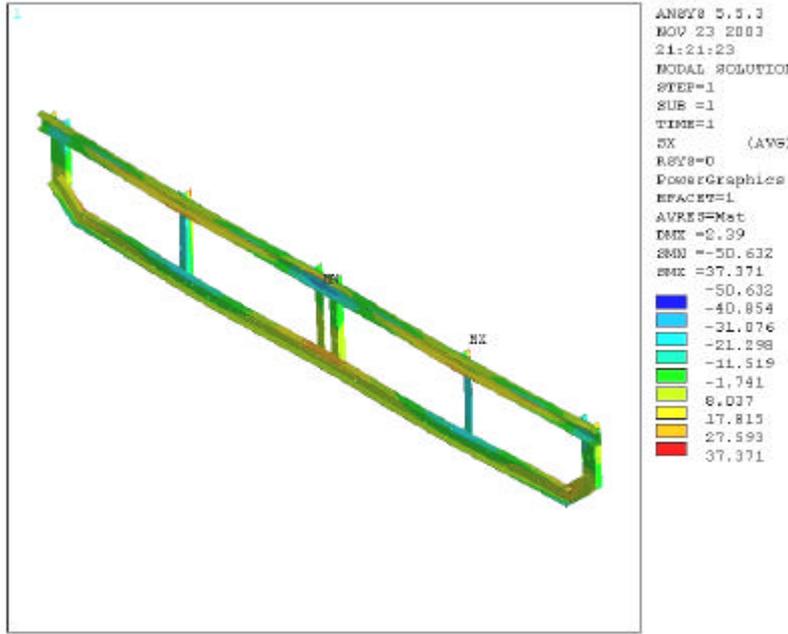


Figura 49. Cuaderna maestra (SX min = -50.634 MPa, SX mx = 37.371 MPa)

#### 2.4.4 Conexión Indirecta en Condición de Quebranto

- Desplazamientos

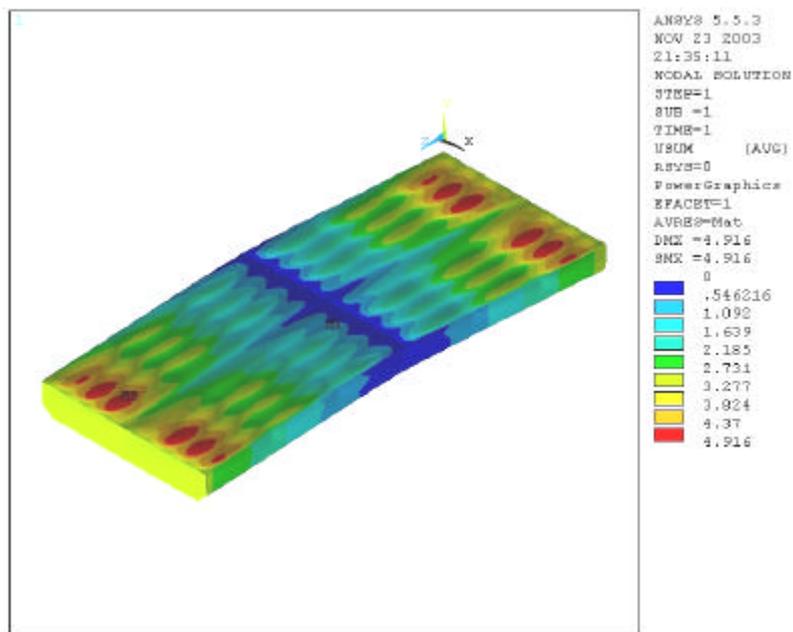


Figura 50. Barcaza completa (USUM mx = 4.916 mm)

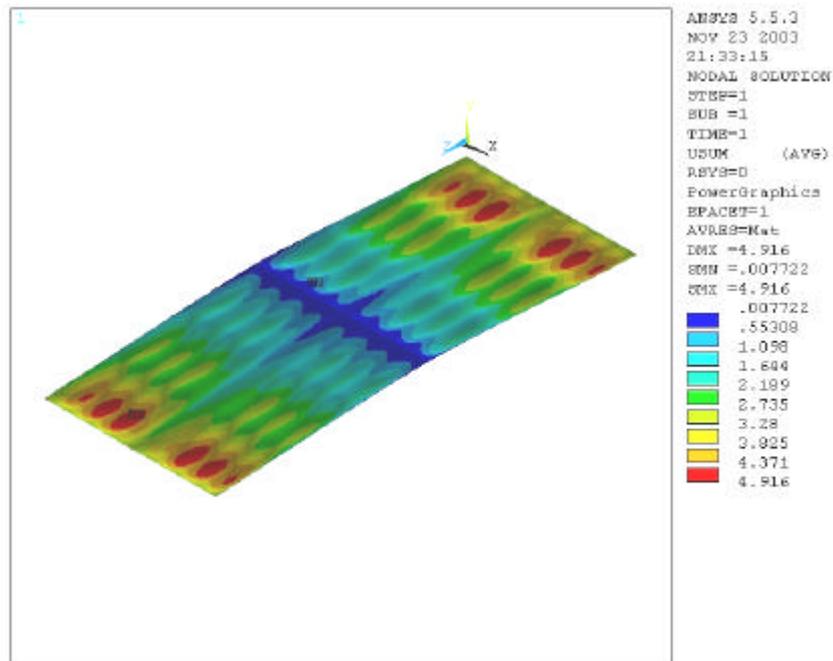


Figura 51. Cubierta (USUM mx =4.916 mm)

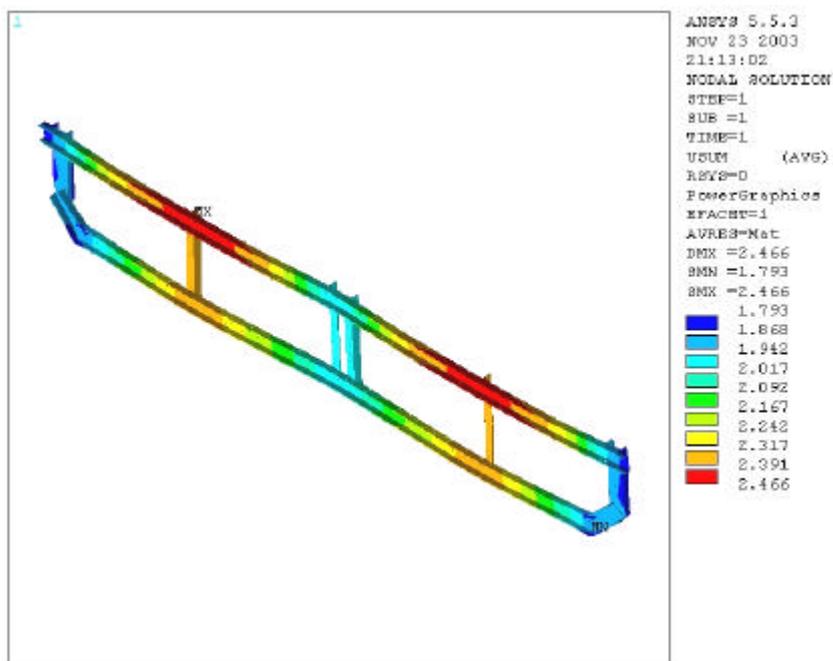


Figura 52. Cuaderna maestra (USUM mx = 2.466 mm)

- Esfuerzos

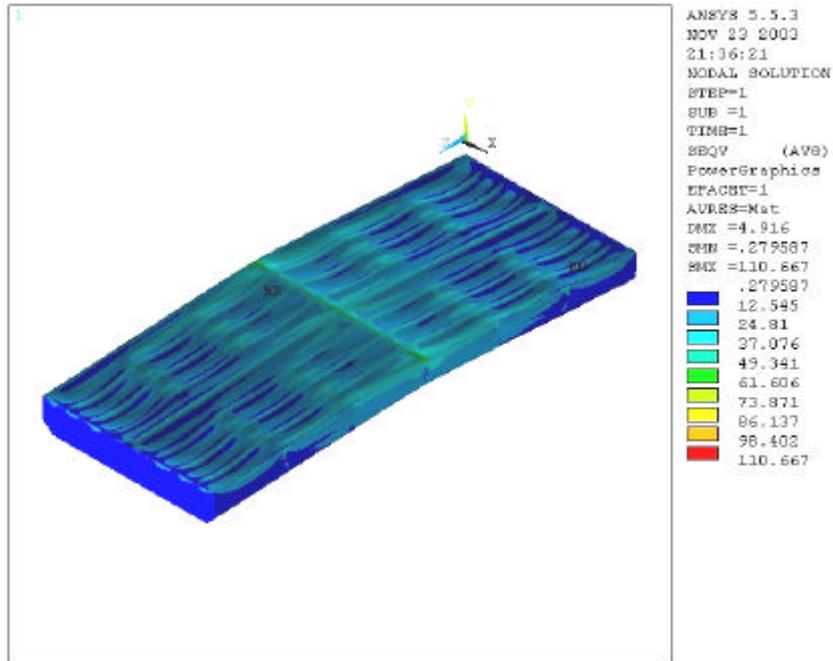


Figura 53. Barcaza completa (SEQV mx = 110.667 MPa)

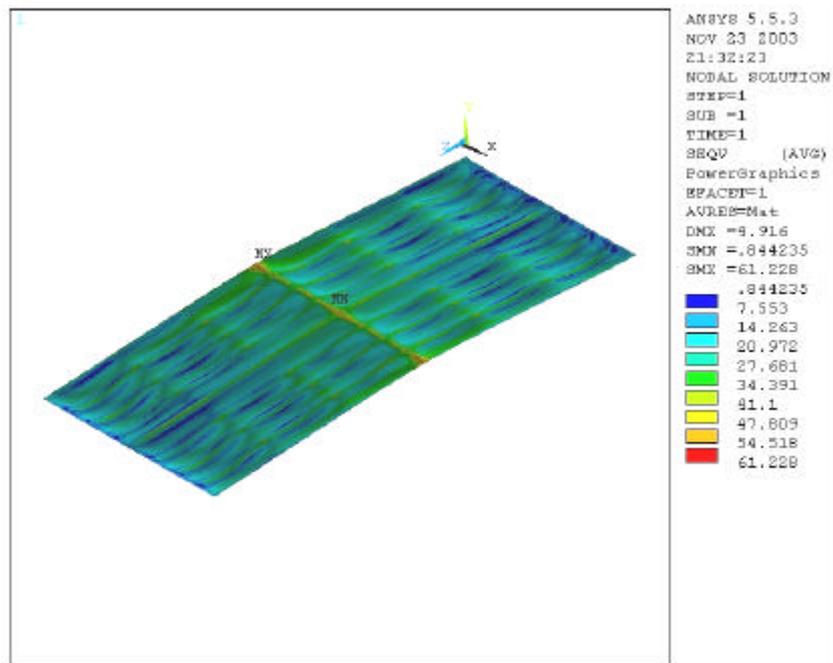


Figura 54. Cubierta (SEQV = 61.228 MPa)

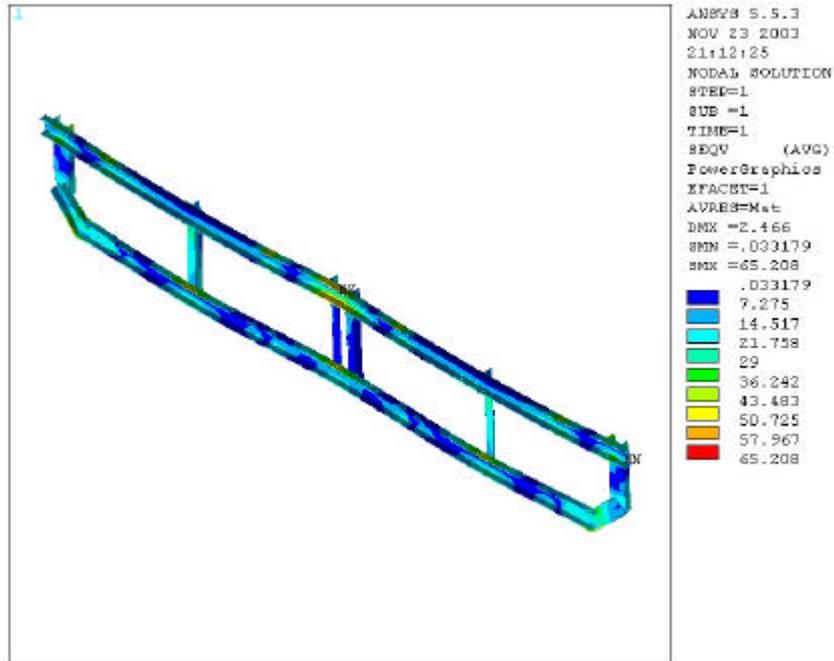


Figura 55. Cuaderna maestra (SEQV = 65.208 MPa)

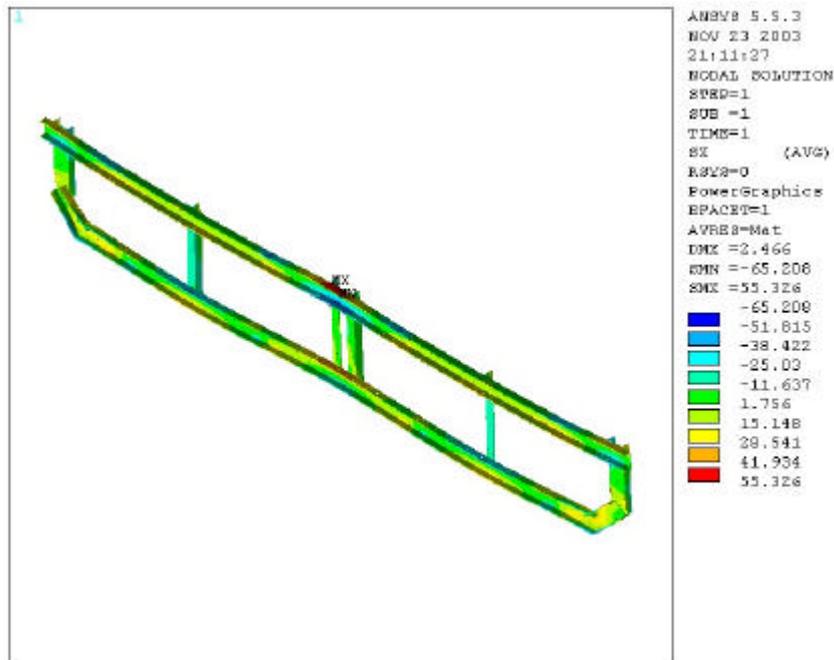


Figura 56. Cuaderna maestra (SX min = -62.124 MPa, SX mx = 52.271 MPa)

## 2.5 RESULTADOS DEL ANÁLISIS ESTRUCTURAL

Los resultados obtenidos en el análisis estructural se muestran en el anexo F.

Como resultado general se observa que los esfuerzos no sobrepasan el esfuerzo de fluencia del material, tanto en las láminas como en la estructura.

Al comparar el comportamiento de ambos paneles se puede observar que la conexión indirecta presenta valores de desplazamientos más altos. Si bien el valor de desplazamiento total máximo (USUM), no varía apreciablemente de un tipo de conexión a otro (menos del 1%), la geometría de la misma si se ve más afectada (ver figura 57).

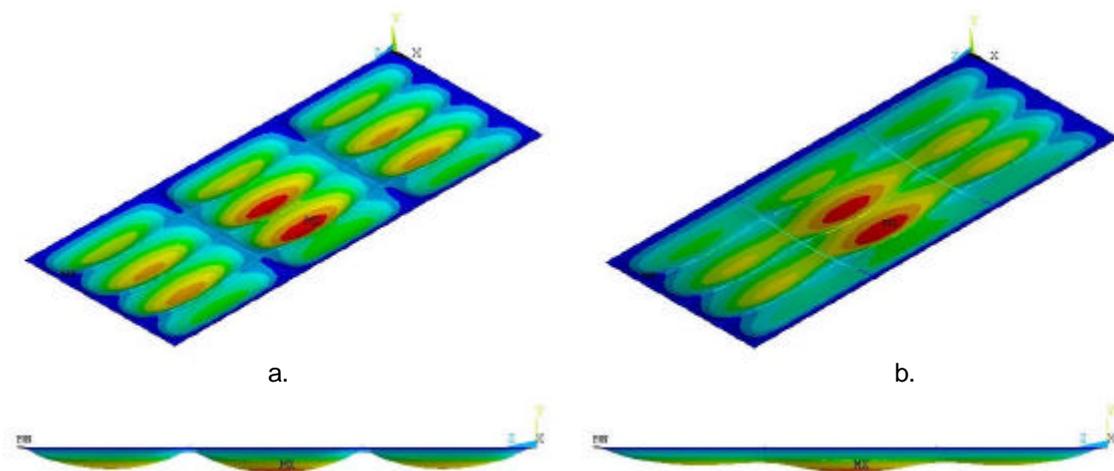


Figura 57. Diferencias de deformaciones entre el panel de conexión directa (a) e indirecta (b)

En cuanto a los esfuerzos, al igual que en los desplazamientos, la conexión indirecta presenta mayores valores que la conexión directa, pero en este caso las diferencias son mas apreciables, alcanzando valores hasta del 53.09% para el SX mx de la sección estructural en la condición de arrufo. Sin embargo esto no quiere decir que represente un a situación critica, pues esta muy por debajo del esfuerzo de fluencia.

### 3. ANALISIS MODAL

#### 3.2 DESCRIPCIÓN DEL MODELO

Para realizar el análisis modal se utilizan los mismos modelos de la embarcación creados para el análisis estructural, sin embargo, a estos no se les aplica ningún tipo de carga, y se hace necesario modificar su enmallado.

Debido a la alta capacidad computacional requerida para resolver estos tipos de análisis, y a que no es posible realizar un análisis de convergencia, se utiliza un tamaño global de elementos de 150 para enmallar el modelo. Además, la reducción del número de elementos no afecta en gran medida la respuesta final un análisis modal.

La distribución de los elementos para el tamaño global seleccionado, se muestra a continuación en la tabla 3.

Tabla 3. Número de elementos

Modelo	Elementos SHELL63		Elementos BEAM188	Total elementos
Directo (Arrufo y Quebranto)	Malla Mapeada	5988	3806	7711
	Malla Libre	323		
Indirecto (Arrufo y Quebranto)	Malla Mapeada	5988	1400	7388

### 3.2 SOLUCIÓN DEL MODELO

Para realizar el análisis modal se extraen los 10 primeros modos de la barcaza para cada uno de los casos: conexión directa y conexión indirecta. Debido a que se aprecia una gran concentración de modos en un rango pequeño de frecuencia, se extiende el análisis a los 50 primeros modos para calcular su densidad para cada 1/3 de octava lo que no debe ser superior a 10. Los datos obtenidos se muestran en la tabla 4.

Tabla 4. Primeros 50 modos de la embarcación

No. De Modo	Frecuencia (Hz.)	
	Directa	Indirecta
1	0.0005	0.0004
2	0.6712	0.6716
3	1.2653	1.2703
4	1.2834	1.2811
5	1.3035	1.2870
6	1.3214	1.3046
7	1.3224	1.3229
8	1.3267	1.3263
9	1.3290	1.3439
10	1.3462	1.3454
11	1.3468	1.3600
12	1.3524	1.3774
13	1.3527	1.3901
14	1.3700	1.3928
15	1.3749	1.3969
16	1.3980	1.4355
17	1.4052	1.4400
18	1.4295	1.4490
19	1.4300	1.4567
20	1.4542	1.4607
21	1.4605	1.4642
22	1.4622	1.4682
23	1.4755	1.4720
24	1.4774	1.4847
25	1.4892	1.4996

No. De Modo	Frecuencia (Hz.)	
	Directa	Indirecta
26	1.4997	1.5092
27	1.5024	1.5096
28	1.5073	1.5119
29	1.5144	1.5138
30	1.5166	1.5293
31	1.5227	1.5359
32	1.5390	1.5424
33	1.5535	1.5524
34	1.5583	1.5616
35	1.5718	1.5639
36	1.5789	1.5835
37	1.5849	1.5915
38	1.5994	1.5942
39	1.6036	1.6112
40	1.6232	1.6198
41	1.6308	1.6508
42	1.6399	1.6566
43	1.6521	1.6599
44	1.6532	1.6773
45	1.6592	1.6808
46	1.6708	1.6848
47	1.6747	1.6982
48	1.6865	1.7005
49	1.7019	1.7073
50	1.7028	1.7085

Cada uno de estos modos es graficado con su respectiva frecuencia en la figura 58.

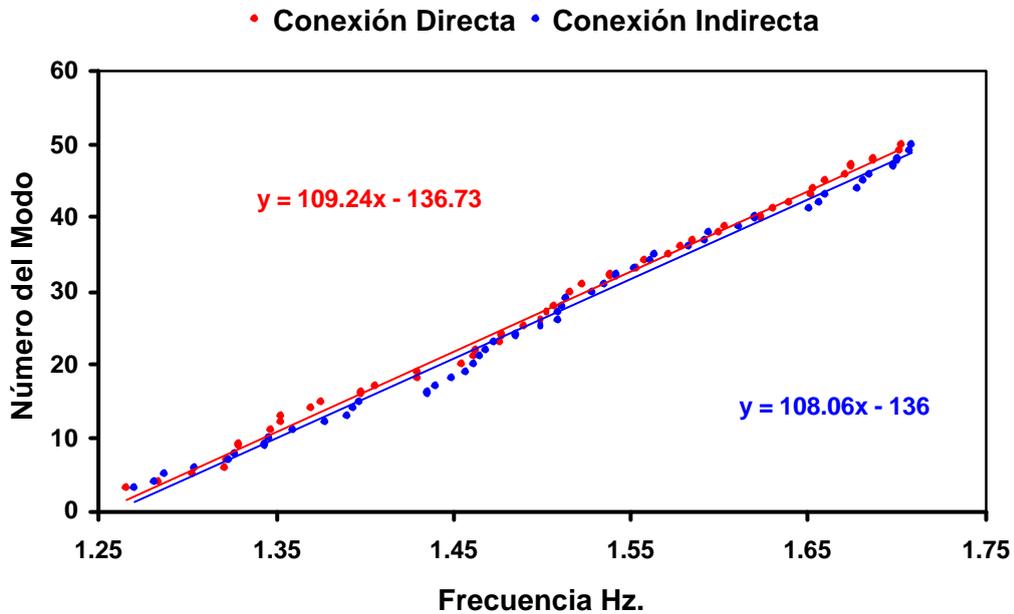


Figura 58. Frecuencia Vs Número de modos

Se procede a calcular la densidad modal por 1/3 de octava, y luego se calcula la densidad modal promedio como la pendiente de la línea sobre la que tienden a ubicarse los modos

- **Para la conexión directa**

$f_0 = 1.2653$  Hz,  $1.33f_0 = 1.6871$  Hz. Entre  $f_0$  y  $1.33f_0$  se encuentran 46 modos, por lo que la densidad modal es de 46 modos por 1/3 de octava o 109.24 modos/Hz.

- **Para la conexión indirecta**

$f_0 = 1.2703$  Hz,  $1.33f_0 = 1.6937$  Hz. Entre  $f_0$  y  $1.33f_0$  se encuentran 44 modos, por lo que la densidad modal es de 44 modos por 1/3 de octava o 108.06 modos/Hz.

Debido a lo elevado de estos valores, se dice que la embarcación posee una alta densidad modal por lo que carece de validez hacer un análisis determinístico evaluando cada modo por separado, en cambio se realiza un análisis estadístico SEA para conocer la tendencia de dicha densidad modal.

### **3.3 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE ENERGÍA (SEA)**

El rango de frecuencias que debe abarcar el análisis, depende de la frecuencia de operación del motor de la embarcación, el cual tiene 75 hp y una velocidad máxima de 5500 RPM pero opera entre el 75 y 95 % de su capacidad, es decir, entre 4125 y 5525 RPM (68.75 y 87.1 Hz)

Debido a esto se toman valores de frecuencia comprendidos entre 0 Hz. Y 140 Hz y luego se extrae el modo correspondiente a cada una de estas frecuencias.

Los datos obtenidos se ilustran en lo anexos G y H

La comparación de la distribución de modos se muestra en la figura 57.

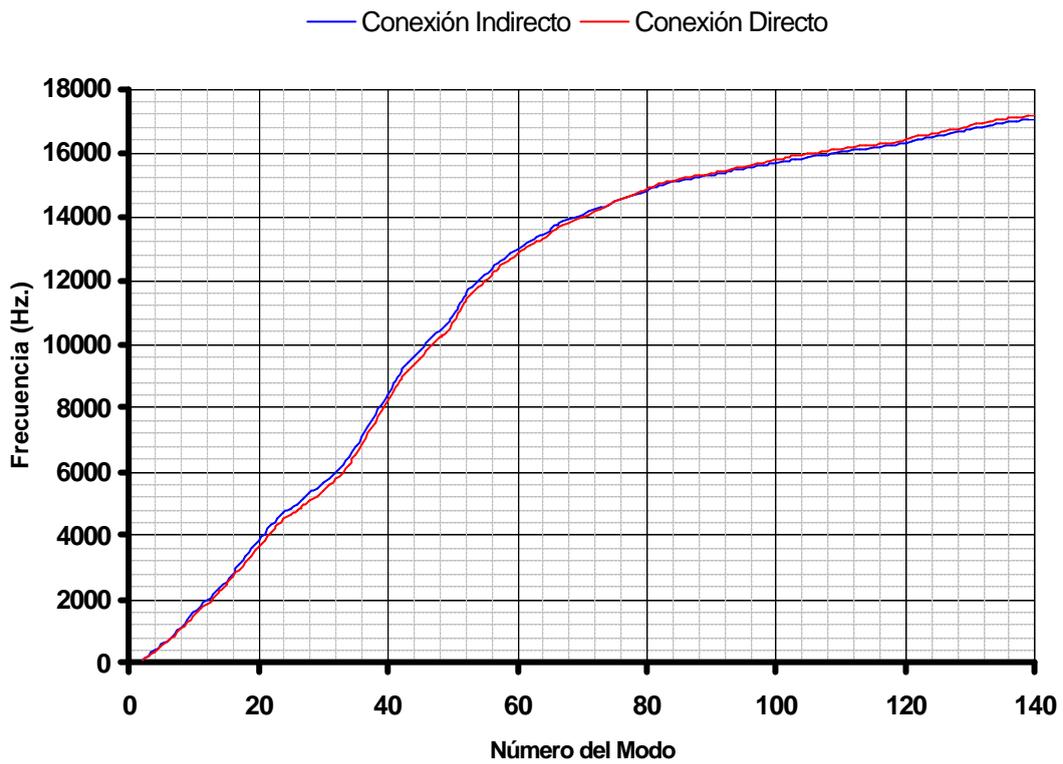


Figura 59. Distribución de modos

Se aprecia que la distribución de los modos es muy similar para los dos tipos de conexiones por lo que su densidad modal promedio también es muy similar, a raíz de esto se grafican sus densidades modales puntuales. (Ver figuras 60 y 61 para la conexión directa e indirecta respectivamente).

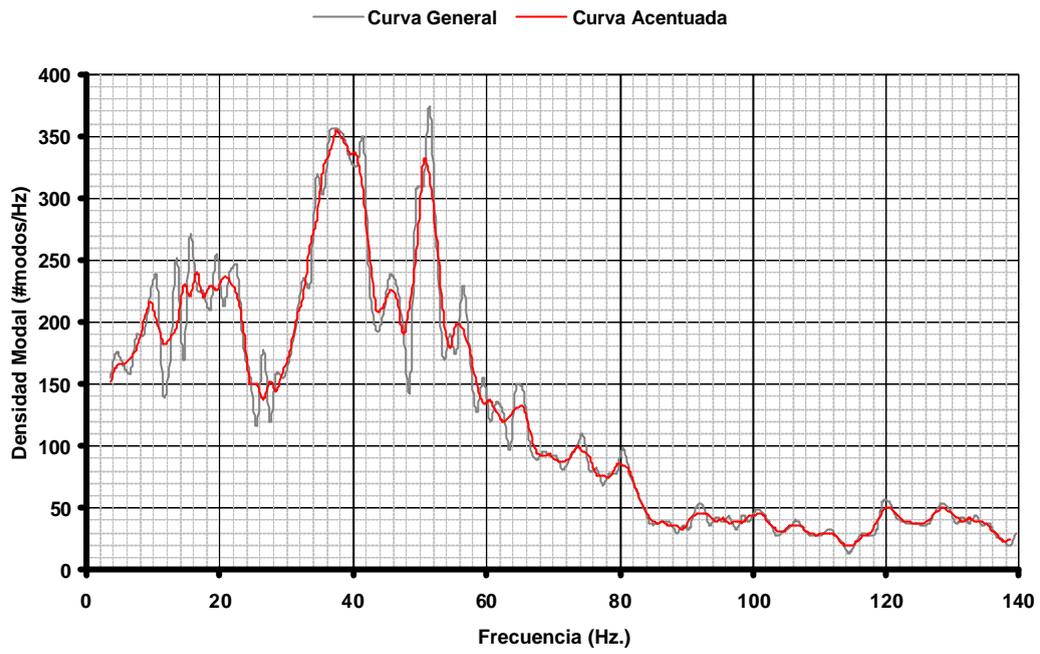


Figura 60. Densidades modales conexión directa

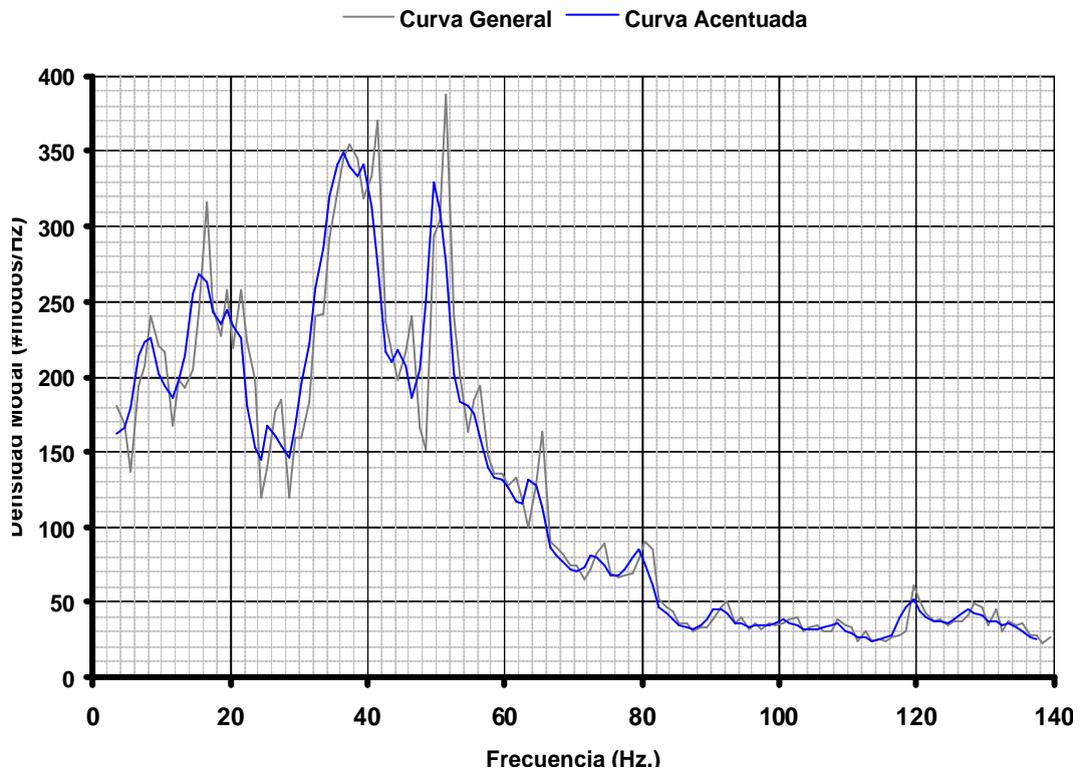


Figura 61. Densidades modales conexión indirecta

Ambos tipos de conexión presentan una distribución de densidades modales que tiende a aumentar en los primeros 50 Hz, luego decrece y tiende a estabilizarse en un valor bajo.

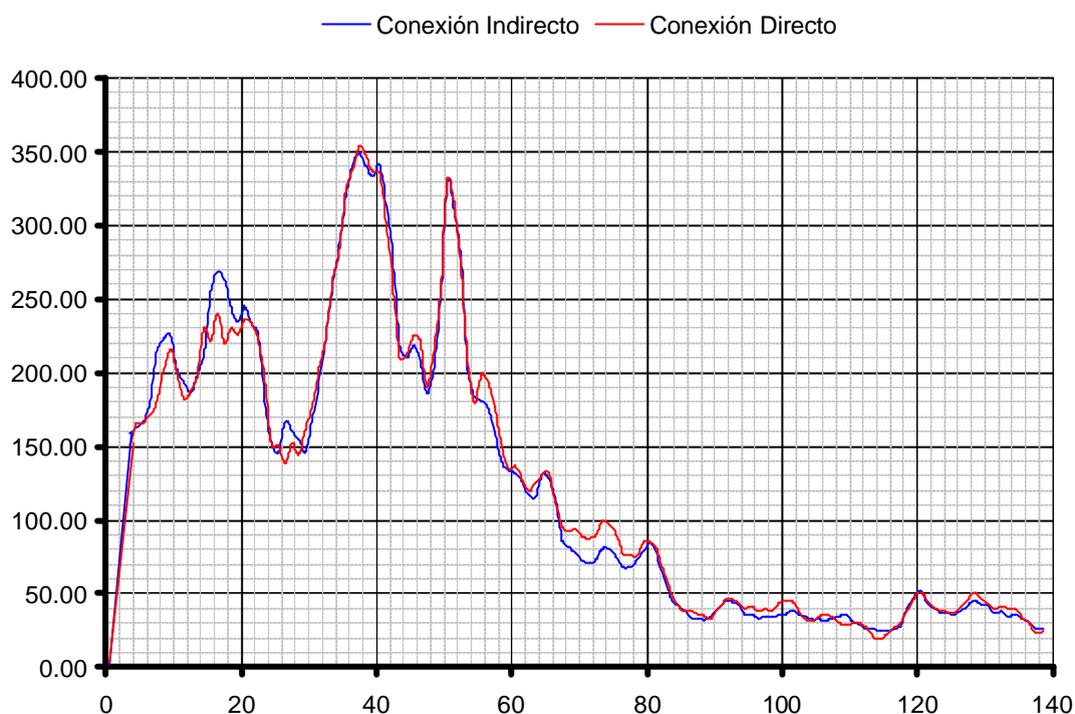


Figura 62. Superposición de densidades modales

Al ubicar las dos distribuciones sobre la misma gráfica, se puede observar que comparten los rangos de frecuencias en los que presenta mayor densidad modal, o sea, los rangos donde se ubica un mayor número de frecuencias naturales y en los que debe evitarse que trabaje la embarcación. (Ver figura 62).

Sobresalen tres de estos rangos:

1. De 15 a 22 Hz
2. De 33 a 43 Hz
3. De 49 a 53 Hz.

Siendo el rango 2 el que presenta mayores densidades modales, seguido por el rango 3 y por último el rango 1

Se comparó el comportamiento de los dos tipos de conexiones al graficar las diferencias en sus densidades modales puntuales. (Ver figura 63)

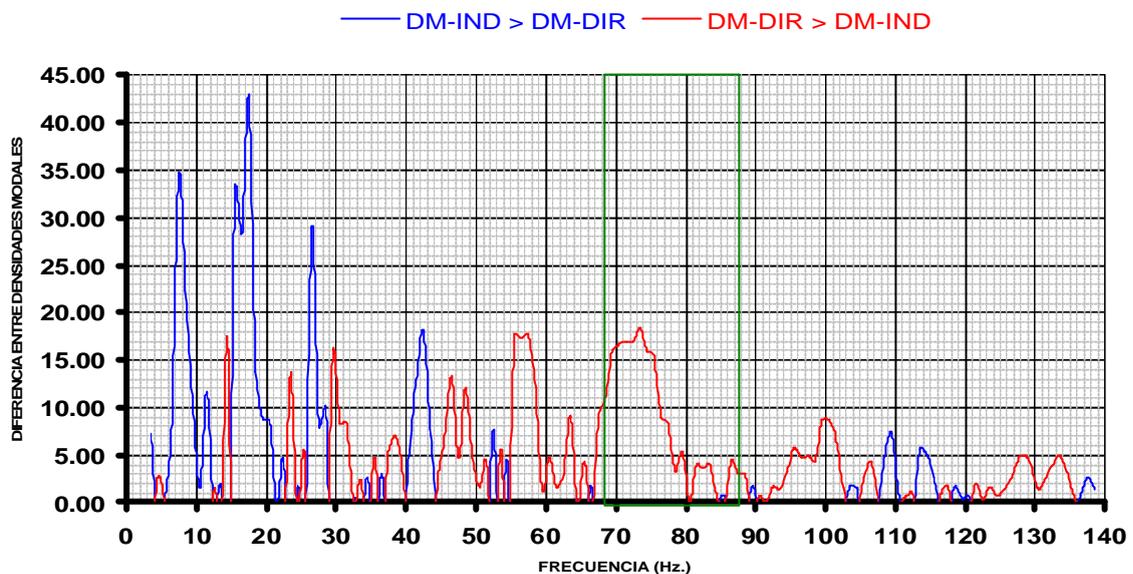


Figura 63. Diferencia entre densidades modales

La línea representa la diferencia entre las densidades modales de ambos tipos de conexión, los tramos rojos representan los rangos de frecuencia en que la densidad modal de la conexión directa es mayor que para la conexión indirecta (DIR>IND), mientras que los tramos azules representan los rangos de frecuencia en que la densidad modal de la conexión indirecta es mayor que para la conexión directa (IND>DIR).

En la grafica de la figura 63 sobresalen 8 rangos de frecuencia en los que la diferencia entre DM supera los 15 modos/Hz, estos son mostrados a continuación:

1. De 7 a 9 Hz, DM-IND > DM-DIR.
2. De 14 a 14.5 Hz, DM-DIR > DM-IND.
3. De 15 a 18.5 Hz, DM-IND > DM-DIR.
4. De 26 a 27 Hz, DM-IND > DM-DIR.
5. De 29.5 a 30 Hz, DM-DIR > DM-IND.
6. De 42 a 43 Hz, DM-IND > DM-DIR.
7. De 55.5 a 58 Hz, DM-DIR > DM-IND.
8. De 69 a 75.5 Hz, DM-DIR > DM-IND.

Siendo más crítico el rango 3, seguido por el rango 1 y el rango 4, lo que significa que para estos rangos son mucho mas fuertes las vibraciones para la conexión indirecta que para la conexión directa ya que si bien ambos presentan densidades modales altas en estos rangos, este valor es mucho más alto para la conexión indirecta.

Sin embargo, el rango No. 8 presenta especial importancia ya que se ubica dentro del rango de operación del motor de la embarcación.

#### 4. CONCLUSIONES

Los resultados arrojados en el análisis estructural por el software ANSYS 5.5 indican que para el panel con conexión directa a las láminas exteriores se presentan desplazamientos y esfuerzos menores que para el panel de conexión indirecta.

Es posible observar que mientras las diferencias en la distribución de esfuerzos son mas apreciables en la estructura (cuadernas maestras), la diferencia de distribución de desplazamientos es más apreciable en la cubierta.

Si bien el valor de desplazamiento total máximo (USUM mx) para la cubierta, no varía apreciablemente de un tipo de conexión a otro, la geometría de la misma si se ve más afectada en los puntos de conexión entre la estructura primaria y las láminas externas.

La distribución de densidades modales para ambos tipos de conexión es similar, por lo que ambos comparten los rangos de frecuencia críticos en los que debe evitarse que opere la embarcación (aproximadamente entre 5 y 58 Hz.)

En los primeros 50 Hz, la conexión indirecta presenta mayores vibraciones (mayor densidad modal) que la conexión directa, mientras que de 50 a 58 Hz, la conexión directa presenta más vibraciones. De 58 Hz en adelante la conexión directa también presenta más vibraciones, si bien este último rango no es crítico para la operación de la embarcación ya que ambas densidades modales son bajas, cobra importancia ya que abarca el rango de operación del motor.

## 5. RECOMENDACIONES

Para un futuro estudio se recomienda disponer de un modelo real o un prototipo, que permita obtener datos con los cuales se pueda afinar el modelo, y realizar su validación para el análisis modal.

Tener a disposición un software especializado, el cual permita modelar las cargas de flotación, y la incidencia del oleaje.

Extender el rango de frecuencias del análisis modal para abarcar los múltiplos de la frecuencia del motor, y el múltiplo de la velocidad de la propela por su número de hélices.

## 6. BIBLIOGRAFIA

1. CHANDRUPATLA .Tirupaathi R, BELEGUNDU Ashok D. introducción al estudio del elemento finito en ingeniería. Editorial. Prentice Hall. 2 Edición.
2. HUGHES. Owen F. Ship Structural Design, A rationally-Based, Computer Aided Optimization Approach. N&M Ingeniería Naval y Marítima. 1988
3. ASM Handbook Vol. 1. Properties and selection, iron, steel and high Performance Alloys
4. ONS, J., El Método de los Elementos Finitos en la Ingeniería de Estructuras, Edit. Marcombo, Barcelona 1982
5. Harris, Cyril M, Piersol, Allan G., Coaut. Harris shock and vibration Handbook. Editorial McGraw Hill, New York 2001

## 8. PÁGINAS WEB CONSULTADAS

- <http://www.cecalc.ula.ve>
- <http://www.quipu.uni.edu.pe>

# ANEXOS

## ANEXO A

### SHELL63 (LÁMINA) de 4 nodos.

Este elemento posee dos características principales, la primera es la capacidad de flexionarse y el comportamiento de membrana, es capaz de soportar cargas tanto normales como cargas co-planares, Posee seis grados de libertad en cada nodo (rotación y traslación en los tres ejes), esfuerzos rígidos y grandes deflexiones también están incluidos.

La geometría, localización de nodos y el sistema de coordenadas para este elemento se muestran en la figura A.

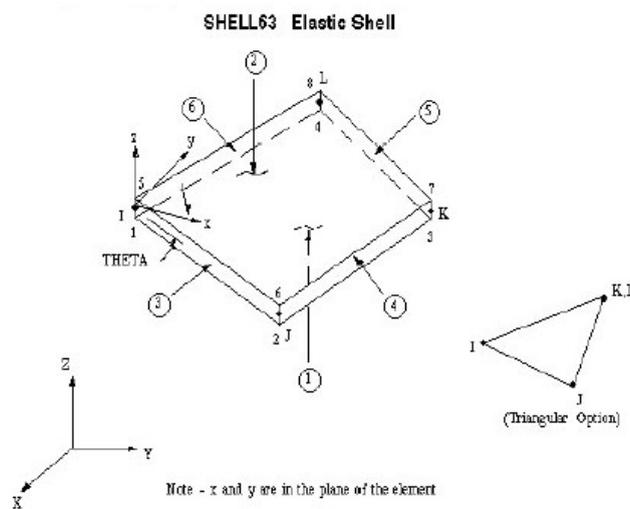


Figura A

Este elemento esta definido por cuatro nodos, cuatro espesores, y un fundamento elástico rígido.

Constantes reales: Las constantes reales definen las propiedades del elemento utilizado, en este análisis se escogió el Shell 63, el cual posee cuatro espesores (para elementos no uniformes). El espesor de los perfiles estructurales es constante por lo cual se trabajara con un solo espesor a través del elemento. Este espesor es 4.7625 mm.

## ANEXO B

### **BEAM 188 3-D Linear Finite Strain Beam (Viga linear de deformación finita)**

Beam 188 3-D es un elemento recomendable para analizar estructuras de vigas con relación de esbeltez moderada. Este elemento esta basado en la teoría de vigas de Timoshenko. Se incluyen efectos de deformación por cortante.

El beam 188 es un elemento de viga en tres dimensiones representado por una línea (dos nodos), con seis grados de libertad en cada nodo. Los grados de libertad en cada nodo incluyen desplazamientos en las direcciones X, Y y Z, y rotaciones alrededor de éstos. No esta restringido el pandeo de la sección transversal. Este elemento es recomendable para aplicaciones lineales, grandes rotaciones, y/o grandes deformaciones no lineales.

Beam188 Incluye también condiciones de rigidez a los esfuerzos, lo que permite al elemento analizar problemas de estabilidad torsional, lateral y flexionante.

A este elemento puede ser usado con cualquier sección transversal. Ya sea importado de la librería de secciones comunes o definidas por el usuario.

Los datos de salida del elemento están disponibles para las estaciones de integración de éste y en los puntos de integración de la sección. Las estaciones de integración (puntos de Gauss) a lo largo de la viga se muestran a continuación en la figura B1.

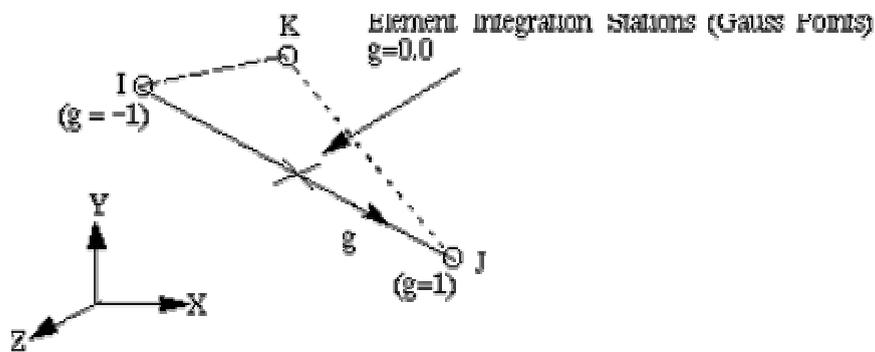


Figura B1.

Las deformaciones de la sección, las fuerzas (incluyendo momentos flectores) pueden ser obtenidas en estas secciones de integración. El elemento soporta opciones de salida para extrapolar dichos valores a los nodos del elemento.

Beam188 provee valores relevantes de la sección (área de integración, posición, función de Poisson, funciones derivativas). Cada una de estas secciones esta conformada por un conjunto de 9 nodos (ver figura B2). Que ilustran el modelo de las secciones para una viga rectangular y una de canal.

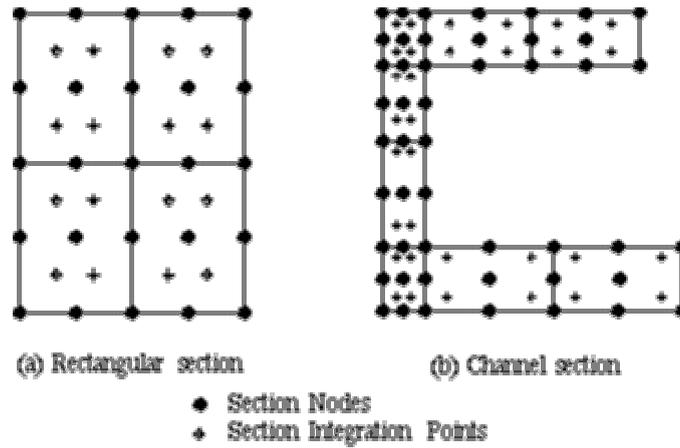


Figura B2.

Las fuerzas son aplicadas en los nodos (los cuales definen el eje  $x$ ), si eje neutro no es co-lineal con el eje  $X$  la aplicación de una fuerza axial causaría pandeo. Así mismo una fuerza cortante causara momentos y deformaciones torsionales si el centroide y el centro de cortante de la sección transversal no coinciden.

Si se requiere mayor información acerca de este elemento, puede buscarse en la sección de ayuda del programa ANSYS 5.5

## ANEXO C

### Propiedades de la sección Compuesta

Área	:	2410.1600
Perimeter	:	738.4000
Centroide	:	X: 100.0000 Y: 73.1977
Productos de inercia:		X: 17078403.1979 Y: 27806678.0019
Moments of inertia:		X': 4165000.2795 Y': 3705078.0019
Producto de inercia :		XY: 17641816.0000
Radio de giro	:	X: 84.1784 Y: 107.4117

## ANEXO F

<b>ANÁLISIS ESTRUCTURAL</b>		<b>Arrufo</b>			<b>Quebranto</b>			
		<b>Conexión Directa</b>	<b>Conexión Indirecta</b>	<b>Diferencia (%)</b>	<b>Conexión Directa</b>	<b>Conexión Indirecta</b>	<b>Diferencia (%)</b>	
<b>Cubierta</b>	<b>SEQV (MPa)</b>	60.618	75.425	24.43	61.171	61.228	0.09	
	<b>USUM (mm)</b>	5.699	5.736	0.65	4.894	4.916	0.45	
<b>Sección Estructural</b>	<b>SEQV (MPa)</b>	47.03	62.134	32.12	50.634	65.208	28.78	
	<b>USUM (mm)</b>	2.852	2.874	0.77	2.39	2.466	3.18	
	<b>SX (MPa)</b>	<b>Tensión</b>	34.144	52.271	53.09	37.371	55.326	48.05
		<b>Compresión</b>	47.026	62.124	32.11	50.632	65.208	28.79
<b>Barcaza Completa</b>	<b>SEQV (MPa)</b>	107.835	108.296	0.43	111.009	110.667	-0.31	
	<b>USUM (mm)</b>	5.699	5.736	0.65	4.894	4.916	0.45	

SEQV      *Esfuerzo equivalente de Von Misses*  
 USUM      *Desplazamiento total*  
 SX         *Esfuerzos Axiales*

## ANEXO G

### Frecuencias Naturales para la Conexión Indirecta

Frecuencia Hz.	No. De Modo	Frecuencia Hz.	No. De Modo	Frecuencia Hz.	No. De Modo
2	92	49	10570	96	15530
3	218	50	10864	97	15566
4	399	51	11168	98	15598
5	568	52	11556	99	15634
6	705	53	11797	100	15668
7	899	54	11998	101	15704
8	1106	55	12162	102	15742
9	1346	56	12347	103	15782
10	1567	57	12541	104	15812
11	1784	58	12689	105	15845
12	1951	59	12825	106	15879
13	2149	60	12961	107	15909
14	2342	61	13088	108	15940
15	2546	62	13221	109	15979
16	2789	63	13339	110	16014
17	3105	64	13439	111	16047
18	3351	65	13568	112	16071
19	3578	66	13732	113	16101
20	3836	67	13822	114	16125
21	4055	68	13909	115	16150
22	4313	69	13991	116	16174
23	4536	70	14066	117	16200
24	4734	71	14141	118	16228
25	4854	72	14206	119	16258
26	4993	73	14278	120	16319
27	5170	74	14360	121	16370
28	5355	75	14449	122	16413
29	5474	76	14518	123	16450
30	5634	77	14585	124	16489
31	5793	78	14653	125	16523
32	5977	79	14722	126	16560
33	6218	80	14800	127	16597
34	6460	81	14891	128	16638
35	6752	82	14976	129	16687
36	7075	83	15028	130	16733
37	7421	84	15074	131	16767
38	7775	85	15118	132	16812
39	8121	86	15154	133	16843
40	8440	87	15190	134	16880
41	8774	88	15220	135	16915
42	9144	89	15253	136	16951
43	9381	90	15286	137	16979
44	9597	91	15324	138	17007
45	9795	92	15371	139	17030
46	10012	93	15422	140	17056
47	10252	94	15458		
48	10418	95	15498		

## ANEXO H

### Frecuencias Naturales para la Conexión directa

Frecuencia Hz.	No. De Modo	Frecuencia Hz.	No. De Modo	Frecuencia Hz.	No. De Modo
2	91	49	10350	96	15602
3	214	50	10657	97	15645
4	369	51	10967	98	15677
5	545	52	11341	99	15721
6	709	53	11603	100	15760
7	868	54	11774	101	15809
8	1058	55	11964	102	15855
9	1247	56	12140	103	15894
10	1469	57	12370	104	15922
11	1706	58	12543	105	15953
12	1847	59	12671	106	15987
13	2016	60	12826	107	16027
14	2268	61	12946	108	16061
15	2437	62	13081	109	16089
16	2706	63	13209	110	16117
17	2932	64	13306	111	16146
18	3157	65	13455	112	16179
19	3367	66	13601	113	16206
20	3622	67	13702	114	16227
21	3835	68	13791	115	16241
22	4076	69	13887	116	16264
23	4322	70	13979	117	16294
24	4501	71	14071	118	16322
25	4658	72	14152	119	16353
26	4774	73	14242	120	16408
27	4952	74	14341	121	16463
28	5072	75	14450	122	16506
29	5231	76	14530	123	16545
30	5386	77	14612	124	16583
31	5557	78	14681	125	16621
32	5759	79	14759	126	16657
33	5995	80	14837	127	16695
34	6223	81	14935	128	16743
35	6541	82	15013	129	16797
36	6844	83	15077	130	16846
37	7198	84	15129	131	16883
38	7555	85	15167	132	16926
39	7906	86	15204	133	16964
40	8238	87	15243	134	17008
41	8564	88	15282	135	17044
42	8912	89	15312	136	17082
43	9140	90	15348	137	17109
44	9333	91	15381	138	17134
45	9540	92	15432	139	17153
46	9778	93	15484	140	17182
47	10009	94	15520		
48	10203	95	15563		