

## **PROCESO DE MODELIZACIÓN DE ESTRUCTURAS COMPLEJAS PARA ANÁLISIS CON ELEMENTOS FINITOS**

**Por: José R. Marín L.<sup>1</sup>, y, G. Marcelo Yungán Z.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Facultad de Ingeniería Marítima y Ciencias del Mar, ESPOL, Guayaquil, jrmarin@espol.edu.ec

<sup>2</sup>Ing. Naval, gyungan@espol.edu.ec

### **RESUMEN**

Se describe cómo se puede utilizar el programa AutoCAD para generar el “plano tridimensional” de una estructura compleja, para luego importarla desde el programa SAP2000 para proceder a su análisis estructural aplicando el Método de Elementos Finitos, MEF. El proceso incluye las siguientes etapas: Definición del Espacio de Trabajo, Desarrollo de formas, Selección y Definición de Elementos, Almacenamiento de la información por capas, e, Importación desde SAP2000. Este proceso ha sido empleado exitosamente en algunos trabajos para analizar estructuras de buques, [3], [4], [5] y [6], que son sistemas de elevada complejidad. Una vez que el modelo, llamémoslo Geométrico, es importado desde SAP2000, se puede complementarlo en su parte estructural, esto es, incluir propiedades seccionales (Inercias, áreas, espesores), propiedades mecánicas del material, cargas (concentradas ó distribuidas), y, finalmente las condiciones de soporte. Finalmente se podrá estructuralmente, analizar el sistema.

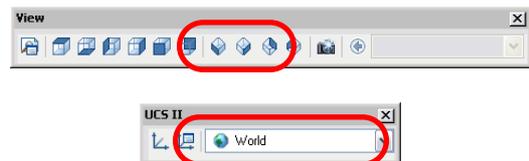
### **1. Introducción**

La estructura de un buque es muy compleja, porque su geometría en el espacio incluye superficies con curvatura en ambas direcciones, y además consta de planchas y refuerzos en las tres direcciones. Si un análisis estructural es requerido, quizá la única opción sea la aplicación del método de Elementos Finitos. Sin embargo, la definición de una geometría tan complicada empleando directamente las facilidades de estos programas se torne en una tarea tediosa. En estas condiciones, parece razonable emplear AutoCAD, programa específicamente desarrollado para definir planos y en general geometrías, extendiéndolo en su aplicación al ambiente tridimensional. En este trabajo se va a compartir la experiencia que se ha desarrollado en la Facultad de Ingeniería Marítima y Ciencias del Mar de la ESPOL, [3], [4], [5] y [6], para modelar estructuras relacionadas a buques empleando AutoCAD, y

que posteriormente fueron analizadas con el MEF.

### **2. Definición del Espacio de Trabajo**

Para empezar a trabajar en 3D con el programa AutoCAD, es conveniente ubicarnos en una vista Isométrica (en la barra de herramientas View), y en el sistema de coordenadas Global (en la barra de herramientas UCS II).



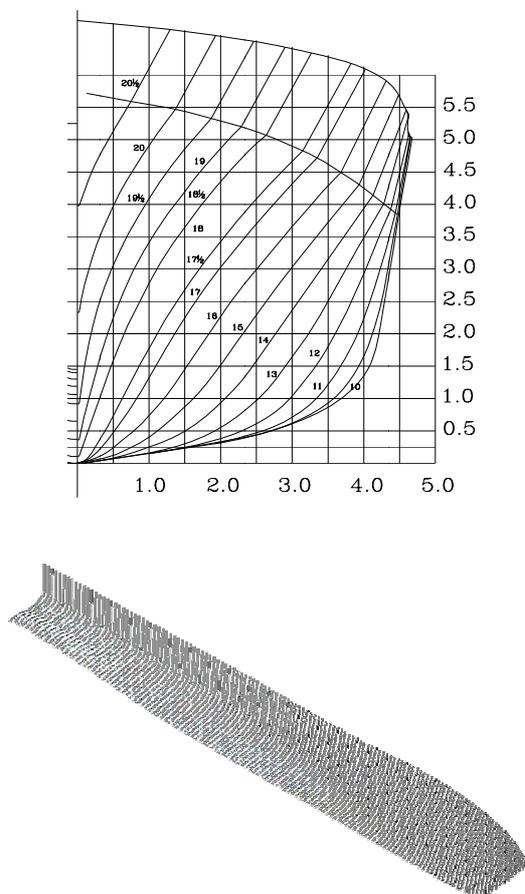
*Figura 1.- Comandos para definir el espacio de trabajo en 3D*

Típicamente en Ingeniería Naval, cuando se trata de definir las formas, se ubica la embarcación con el eje x apuntando en la

dirección Proa-Popa, y el eje z en dirección vertical. Ese es el sistema de referencia que normalmente se ha empleado para definir las formas en las experiencias que se mencionaron previamente.

### 3. Desarrollo de Formas

A partir del plano de Líneas de Formas, se desarrollan las cuadernas, y posteriormente hay que ubicarlas en el espacio. Para esto se mueve cada una longitudinalmente sobre el eje x. Esto se logra seleccionando la cuaderna, y luego aplicando el comando *MOVE*.



*Figura 2.- Plano de Estaciones y Estaciones en el espacio.*

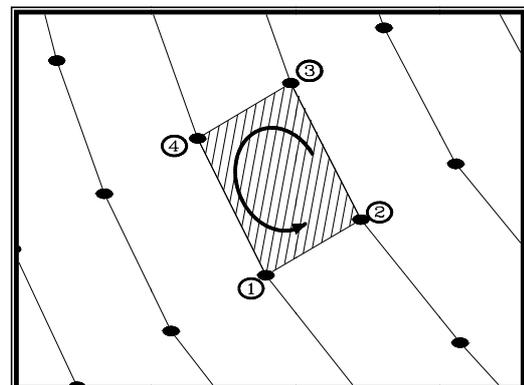
### 4. Selección y Definición de Elementos

Para este paso, se debe definir cómo se va a modelar la estructura del buque. Por ejemplo, una forma conveniente sería representar los elementos principales como segmentos de plancha, y los secundarios como vigas. De esta manera la complejidad del modelo, dado que toma más esfuerzo definir en elementos

plancha que elementos Viga. Si el sistema que se desea modelar es únicamente el bloque de un buque, entonces simplemente se puede representar tanto los elementos primarios como secundarios como elementos Plancha.

Los elementos Viga en el MEF deben representarse en AutoCAD como elementos lineales, usando el comando *LINE*, mientras que los elementos Plancha<sup>1</sup>, deben representarse como elementos *3D FACE*.

**Comando *3D FACE*.**- Genera elementos planos, especificando los vértices, siendo posible trabajar con tres ó cuatro puntos. Esto significa que el usuario debe definir estos elementos, uno a uno, seleccionando los vértices en el sentido contrario o a favor de las manecillas del reloj. Es recomendable que todos ellos sean desarrollados en un solo sentido, ya que esto definirá los ejes locales del elemento plano con la misma orientación, al momento de importarlo desde el programa SAP2000.



*Figura 3.- Generación de superficies con el comando 3D FACE*

**Comando *EDGESURF*.**- Genera automáticamente una malla de superficies planas entre cuatro bordes cerrados. Para aplicar este comando primero se seleccionan dos bordes opuestos, los cuales determinan la primera dirección, posteriormente se seleccionan los restantes dos bordes opuestos, los cuales determinarán la segunda dirección de particiones que tendrá el cuadrilátero en donde se va a generar la superficie plana. Para asignar el número de particiones en que se

<sup>1</sup> Posteriormente habrá que definir en el MEF si se quiere incluir efectos en el Plano, ó, de Flexión, ó ambos.

divide la superficie cuadrilátera se utilizan los comandos SURFTAB1, que controla las subdivisiones en la segunda dirección, y, SURFTAB2 que controla las subdivisiones en la primera dirección.

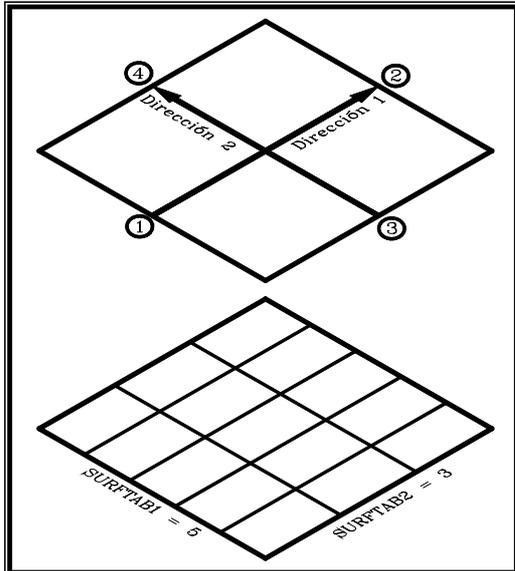


Figura 4. Generación de superficies con el comando EDGESURF

La malla generada con el comando EDGESURF no es reconocida por el programa SAP2000 al momento de importarla, por lo que es necesario descomponerla primero en superficies independientes del tipo 3D FACE con ayuda del comando EXPLODE.

Los ejes locales para ambas superficies se definen de la siguiente manera:

- El eje “3” local positivo es perpendicular a la superficie del elemento y apunta hacia el observador si la superficie es generada en el sentido contrario al de las manecillas del reloj, si se genera en el otro sentido, el eje apuntará en la otra dirección.
- El eje “2” local positivo se encuentra en el plano de la superficie creada y es perpendicular al eje anterior, y, resulta de la intersección entre el plano del elemento y el plano “3” local – “Z” global positivos. Cuando el elemento está ubicado paralelo al plano “X”-“Y” global, el eje “2” local positivo es paralelo al eje “Y” global positivo.

- El eje “1” local positivo se encuentra también en el plano de la superficie creada y sigue la regla de la mano derecha.

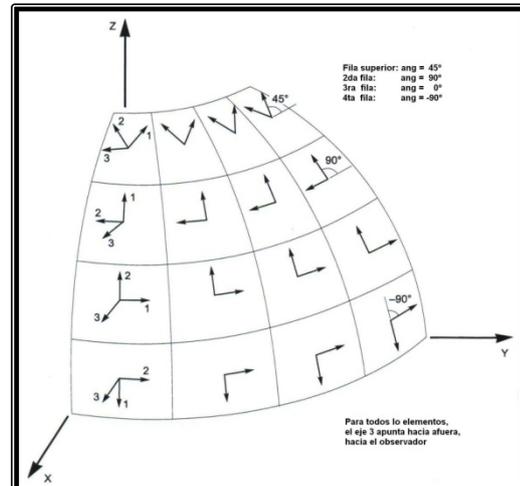


Figura 5. Sistema de Ejes locales para elementos planos

Las mallas EDGESURF son muy útiles cuando la superficie a crearse es uniforme, como puede ser el caso de una barcaza, ó, el cuerpo medio paralelo de una embarcación, mientras que las superficies 3D FACE son útiles en sectores no uniformes, como puede ser la proa de la misma.

En el apéndice de este trabajo se muestra un ejemplo de la generación de elementos planos en la modelización de la conexión estructural de una tobera con el fondo de un remolcador.

## 5. Almacenamiento por Capas (Layers)

Cuando el modelo a desarrollarse es muy complejo, como en el caso de la estructura de un barco, es necesario organizar los elementos por capas (LAYERS). Esta clasificación se la realiza generalmente en el caso de elementos lineales por tipo de refuerzos utilizados, y, en el caso de elementos planos por espesores de planchaje registrados, o, en ambos casos puede ser por zonas definidas en el modelo. Para desarrollar esta organización, los elementos generados en el programa AutoCAD son almacenados en diferentes capas o “LAYER”, y se recomienda utilizar colores para una mejor visualización.

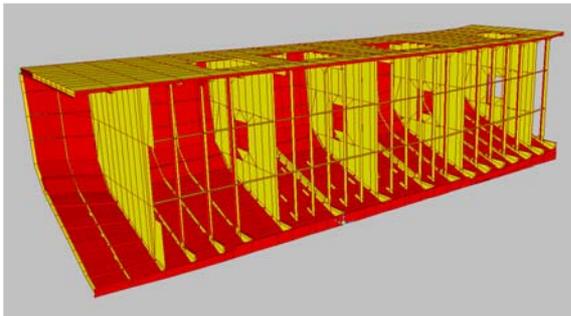
En el apéndice se presenta un ejemplo que muestra dos tipos de elementos en el bloque de

un buque atunero, almacenados en capas independientes.

Finalmente para terminar con el trabajo de generar un modelo estructural en el programa AutoCAD, este puede ser guardado con formato dxf ó dwg, para luego proceder a importarlo desde el programa SAP2000.

## 6. Importación desde SAP2000

Una vez desarrollado el modelo estructural con el programa AutoCAD, es necesario importarlo desde el programa SAP2000, y para esto se realiza el siguiente proceso: desde el menú principal se selecciona la opción `File/Import/AutoCAD .dxf File...` Luego en el cuadro de diálogo que presenta, se busca y abre el archivo generado con AutoCAD, se escoge las unidades a trabajar, teniendo en consideración que las unidades de longitud sean las mismas con las que se trabajó en el archivo de AutoCAD. A continuación es necesario definir los ejes globales para el sistema de referencia, los cuales deben ser iguales para los modelos en los dos programas utilizados. Es necesario repetir esta instrucción tantas veces como capas (*LAYER*) hayan sido desarrollados en el archivo de AutoCAD.



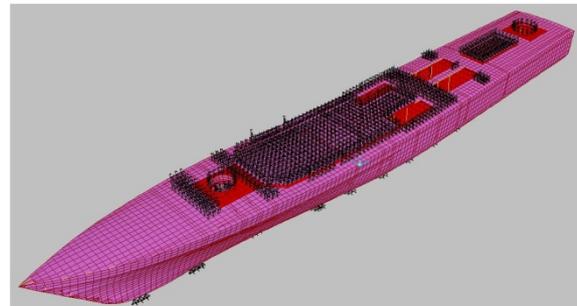
*Figura 6.- Modelo estructural del bloque de un buque atunero importado desde SAP2000, [5].*

## 7. Modelo Estructural

**Propiedades Mecánicas del material.-** Una vez importados los elementos geométricos (Líneas ó Segmentos Planos) desde SAP2000, el siguiente paso en el desarrollo del modelo estructural es asignar las propiedades mecánicas del mismo, es decir asignar espesores a los elementos primarios y el

planchaje, áreas e inercias efectivas a los elementos estructurales secundarios y, características mecánicas del material. Para esto se realiza el siguiente proceso: para elementos planos se selecciona desde el menú principal la opción `Assign/Area/Sections...`, luego en el cuadro de diálogo que presenta se selecciona adicionar una nueva sección con el espesor requerido para el elemento correspondiente. Para elementos líneas se selecciona desde el menú principal la opción `Assign/Frame/Frame Sections...`, y en el cuadro de diálogo que presenta se escoge la opción adherir nueva propiedad en la que se incluye el área de la sección y la inercia efectiva correspondiente.

**Condiciones de Frontera.-** Una vez que al modelo estructural se le han asignado las propiedades estructurales, el siguiente paso en el desarrollo del mismo es asignarle restricciones que puedan representar adecuadamente, en el caso de una embarcación, una flotación en aguas tranquilas ó una varada en dique. Cuando la embarcación está flotando, se utilizan resortes para quitar la singularidad del sistema de ecuaciones, mientras que cuando está varada en dique se utilizan soportes simples. El proceso para asignar estas restricciones es el siguiente: para los resortes, desde el menú principal se selecciona la opción `Assign/Joint/Springs...`, y en cuadro de diálogo que presenta se asignan las rigideces para los desplazamientos y rotaciones. En cambio para los soportes simples, desde el menú principal se selecciona la opción `Assign/Joint/Restraints...`, y en el cuadro de diálogo que presenta se escoge la opción de soportes simples.



*Figura 7.- Carga distribuida en las nodos que conectan refuerzos, y soportes simples*

**Cargas.-** Las cargas concentradas presentes en cualquier estructura pueden ser representadas como pesos puntuales aplicados en los nodos. El proceso para ingresarlos es el siguiente: desde el menú principal se selecciona la opción *Assign/Joint Loads/Forces...*, y en el cuadro de diálogo que presenta se ingresa el valor numérico de la carga y la dirección en que se aplica.

Para ingresar la fuerza que genera la presión hidrostática, se desarrollan los siguientes tres pasos:

- Definir un patrón de nodos.
- Asignar un patrón de carga sobre los nodos.
- Asignar la presión sobre una superficie.

Para realizar estos pasos en SAP2000, se realiza el siguiente proceso:

- Primero desde el menú principal se selecciona la opción *Define/Joint Patterns...*, y en el cuadro de diálogo que presenta se especifica un nombre para el patrón de nodos.
- Como segundo paso desde el menú principal se selecciona la opción *Assign/Joint Patterns...*, y en el cuadro de diálogo que presenta se ingresa la distribución de presión presente a un calado determinado.
- Por último desde el menú principal se selecciona la opción *Assign/Area Loads/Surface Pressure (All)...*, y en el cuadro de diálogo que presenta se especifica el tipo de presión y la cara del elemento plano sobre la que se aplica.

Debe recordarse que, cuando un buque flota, no tiene puntos de apoyo que signifiquen desplazamientos conocidos (nulos). Entonces, a pesar de que se haya logrado un equilibrio Estático (a través de calado y asiento adecuados), será necesario incluir resortes ficticios para suplir la falta de condiciones de frontera geométricas del problema; esto hará que se elimine la singularidad y el problema alcance solución única.

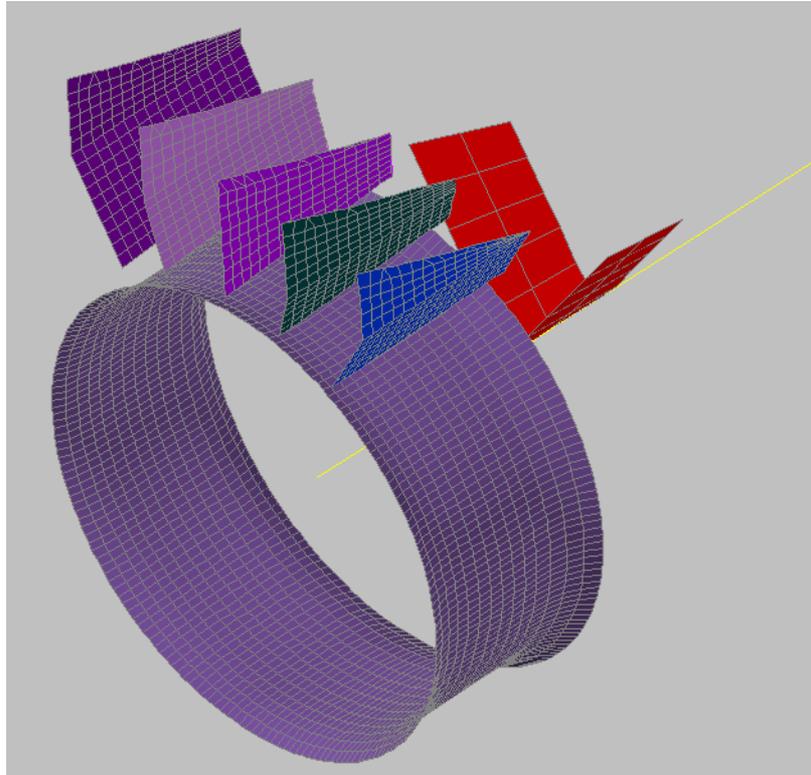
## 8. Comentarios finales

El análisis estructural empleando el MEF puede ser, cuando se trata de estructuras complejas como las de buques, la única alternativa disponible. Sin embargo, hasta alcanzar un modelo adecuado, se debe dedicar mucho esfuerzo para su representación en el espacio. Parece adecuado entonces emplear un programa desarrollado primeramente para ayudar a los ingenieros en la preparación de planos y cuerpos en el espacio, para generar el modelo Geométrico. Luego se puede importar y transformar dicho modelo para desarrollar el análisis estructural aplicando entonces el programa que emplea el Método de Elementos Finitos. El ingeniero debe recordar que el objetivo no es desarrollar un modelo, sino desarrollar un análisis de los resultados estructurales.

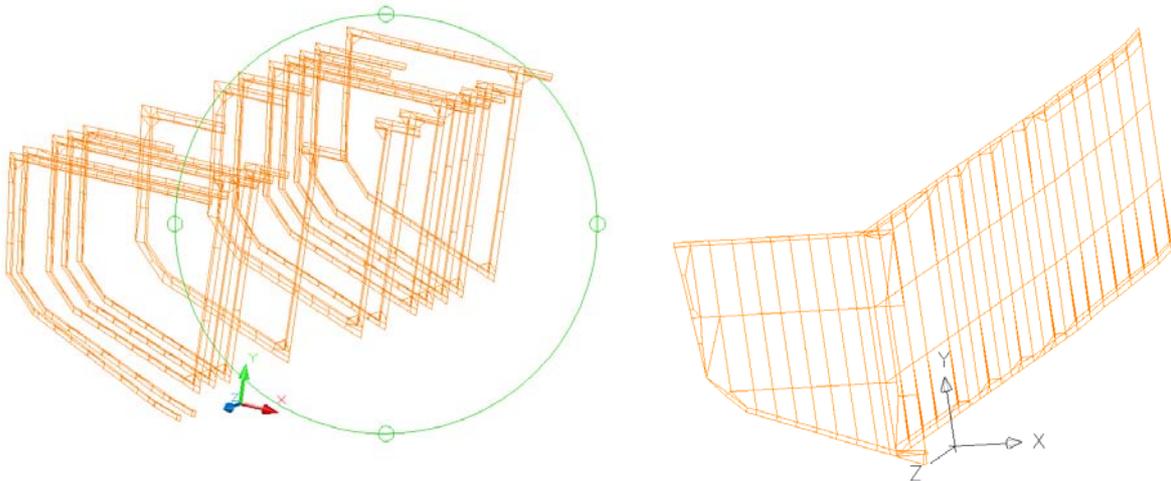
## Referencias

- [1] AutoDesk, Manual del Programa AutoCAD. AutoDesk, 2007
- [2] Computer and Structures, Manual SAP2000 v.14. CSI, 2010
- [3] de Hidalgo, Cano, R., Análisis de la Deformación de la Estructura de una Corbeta de la Armada del Ecuador durante el Proceso de Varamiento. Tesis de Ing. Naval, FIMCM-ESPOL, 2010
- [4] Galárraga, B., Análisis de la Estructura de Conexión entre una Tobera y el Fondo de un Remolcador de 8.5 Ton. de Tiro Estático. Tesis de Ing. Naval, FIMCM-ESPOL, en preparación
- [5] Potes, L., Análisis de Esfuerzos en el Alargamiento de un Buque Atunero de 37 Metros, empleando el Método de Elementos Finitos. Tesis de Ing. Naval, FIMCM-ESPOL, en preparación.
- [6] Yungán, G. M., Análisis de la Influencia del Retiro de Material Estructural durante el Varamiento de la Corbeta Esmeraldas. Tesis de Ing. Naval, FIMCM-ESPOL, 2010.

## Apéndices



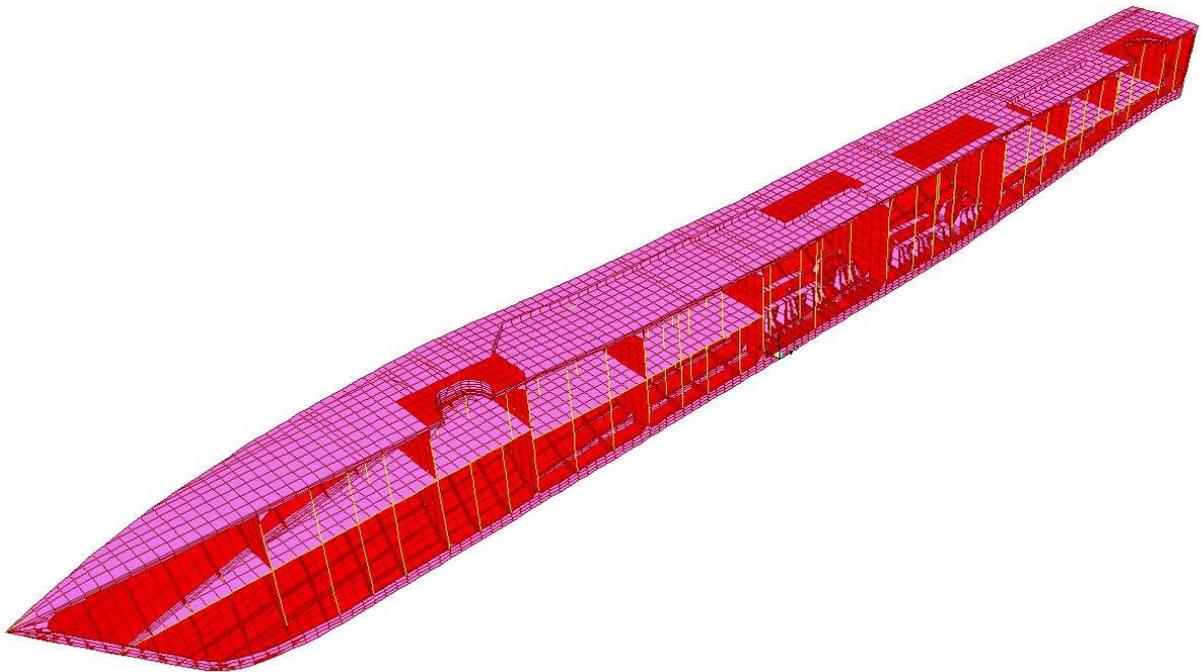
Aplicación del comando *EDGESURF* para generar la superficie interior de la tobera, las planchas de sujeción al casco, y las patas del arbotante, [4]



Almacenamiento de información por capas: a) elementos transversales, y, b) mamparo longitudinal y transversal, en el bloque de un buque atunero, [5]



Modelo de la estructura de un buque desarrollado utilizando AutoCAD, [6]



Modelo de la estructura de un buque importado desde SAP2000, [6]