

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA**  
**Escuela Técnica Superior de Ingeniería Naval y Oceánica**



**PROYECTO FIN DE CARRERA**

---

**ESTUDIO DE DIFERENTES TÉCNICAS DE MODELIZACIÓN EN LA  
CONSTRUCCIÓN NAVAL. APLICACIÓN MEDIANTE RAM-SERIES.**

---



**Titulación:** Ingeniería Naval y Oceánica  
**Alumno:** Tania Planes Nieto  
**Director:** Sergio Amat Plata  
Sonia Busquier Sáez

## INDICE

---

0.- Motivación	7
----------------	---

### PARTE I: CAD/CAM/CAE y su aplicación en el diseño naval

---

1.- Introducción	11
2.- CAD/CAM	13
2.1.- Introducción al CAD/CAM	13
2.2.- Fundamentos del CAD/CAM	14
2.3.- CAD/CAM/CAE en la Ingeniería Naval	16
2.3.1.- MaxSurf	17
2.3.2.- MultiSurf	18
2.3.3.- HullForm	20
2.3.4.- Defcar	23
2.3.4.1.- Puntos de control	24
2.3.4.2.- Definición de las formas del casco	24
2.3.5.- FORAN	25
2.3.5.1.- Definición de Formas	26
2.3.5.2.- Formas de Casco, cubiertas y mamparos	26
2.3.5.3.- Alisado, curvatura y control de suavizado	27
2.3.5.4.- Referencias Topológicas	27
2.3.5.5.- Generación automática de planos	27
2.3.5.6.- Arquitectura Naval	27
2.3.5.7.- Estructura del Buque	28
2.3.5.8.- Estándares	28
2.3.5.9.- Modelado Estructural	28
2.3.5.10.- Generación de información gráfica	29
2.3.5.11.- Armamento	30
2.3.5.12.- Librería de modelos	30
2.3.5.13.- Diagramas de servicios	30
2.3.5.14.- Definición del modelo 3D	30
2.3.5.15.- Dibujos isométricos	31
2.3.5.16.- Planos de producción y montaje	32
2.3.5.17.- Listados configurables	32

### PARTE II: NURBS

---

1.- Introducción	35
2.- Descripción matemática de las NURBS	36
2.1.- Curvas de Bézier	37
2.2.- Splines	39
2.3.- B-Splines	41

2.4.- Curvas racionales. Las cónicas.	44
2.5.- Líneas NURBS	45
2.6.- Superficies NURBS	45
3.- Aplicación de NURBS en el modelado de un buque	46
3.1.- Superficies NURBS	48
3.1.1.- Nudos y puntos de control	49
3.1.2.- Propiedades de los nudos	50
3.1.3.- Inserción de nudos múltiples	52
3.1.4.- Peso de los puntos de control	53
3.2.- Curvas B-Spline en un buque	54
3.3.- De curvas a superficies NURBS	54

### **PARTE III: FEM – Método de Elementos Finitos**

---

1.- Introducción	59
2.- Método de Elementos Finitos (FEM)	60
2.1.- Método Matemático	62
3.- FEM en el Análisis de Estructuras Navales	65

### **PARTE IV: Modelador de Superficies vs Modelador de Sólidos**

---

1.- Introducción	73
2.- Matemática BEZIER vs NURBS. El polígono de control de superficies y curvas	74
3.- Modeladores de Superficies	78
3.1.- Asociativo	78
3.1.1.- Libre	78
3.1.2.- Dirigido por curvas	78
3.2.- No Asociativo	79
4.- Clases de Superficies, A y B. Características.	79
5.- Reglas para la generación correcta de un modelo de superficies	81
5.1.- Método general de las superficies teóricas	84
5.2.- Incorrecciones que se deben evitar	85
5.3.- Norma para el paso a un modelador de sólidos	88
6.- Objetivos de la generación de superficies	90
6.1.- Base de generación de superficies: Ingeniería Inversa, Dibujos	92
6.1.1.- Desde dibujos	92
6.1.2.- Desde digitalizados	93

### **PARTE V: Ejemplos de Modelización Naval**

---

1.- ANSYS	97
1.1.- Introducción	97
1.2.- Consideraciones previas al modelado	97
1.3.- Modelización	98
1.4.- Mallado	102

1.5.- Análisis de la estructura	103
1.5.1.- Condiciones de contorno	104
1.5.2.- Cargas aplicadas	104
1.5.3.- Análisis de Resultados.	106
2.- RAM-SERIES	109
2.1.- Introducción	109
2.1.1.- Definición del análisis	109
2.2.- Modelo CAD	110
2.2.1.- Unidades	111
2.3.- Modelo CAE	112
2.3.1.- Materiales	112
2.3.1.1.- Láminas	113
2.3.1.2.- Vigas	114
2.3.2.- Cargas	115
2.3.2.1.- Cargas de ola	115
2.3.2.2.- Peso equivalente	116
2.3.3.- Condiciones de contorno	116
2.3.3.1.- Simetría transversal	116
<b>PARTE VI</b>	
<hr/>	
VI.- Conclusiones	119
<b>PARTE VII</b>	
<hr/>	
VII.- Bibliografía	123



## 0. MOTIVACIÓN

A largo de los años y, especialmente, con los avances tecnológicos propios del último siglo, todas las ramas de la ingeniería han ido modernizándose a pasos agigantados en sus procesos productivos. La construcción naval no es una excepción.

Poco a poco, mediante herramientas informáticas cada vez más precisas, se han ido realizando avances en este mundo. Inicialmente, la ingeniería naval contaba con el CAD, el CAE y el CAM, cuyas sucesivas versiones aportaron mejoras que ayudaron al desarrollo del diseño naval. Aparecieron las curvas NURBS que adquirieron un papel trascendental dado que permitían representar cualquier figura, así como, los elementos finitos, FEM, que dan un soporte imprescindible hoy en día para el cálculo del comportamiento de las estructuras.

Gracias a estos programas, donde antes se requería de grandes planos e instrumentos de trazado de curvas manuales, como junquillos y pesos, ahora tenemos a nuestro alcance computadoras de gran capacidad y precisión milimétrica.

Este proyecto pretende presentar una visión general del estado de la cuestión, realizando un estudio de cada uno de los programas de ayuda al diseño naval:

- Dividido en 5 grandes bloques, iniciamos el estudio en CAD, CAE y CAM y los diferentes programas genéricos de la ingeniería o específicos del diseño naval que se utilizan hoy en día para el diseño de un barco.
- En el segundo bloque, nos centramos en las curvas NURBS y en la importancia que tienen, pues con ellas podemos representar cualquier carena de buque. Dicha herramienta nos permite confeccionar planos y modelizar cualquier superficie para su posterior uso, ya sea para cálculos estructurales, hidrostáticos, hidrodinámicos, etc.
- El tercer bloque explica los FEM, su desarrollo matemático y su posterior uso en el mundo naval. Gracias a estos programas podemos estudiar como actuaría la estructura de un buque en diferentes situaciones de carga y con diferentes comportamientos de las olas.

- Los siguientes dos bloques son más prácticos. En el cuarto, se realiza un estudio comparativo entre el modelador de superficies y el modelador de sólidos, resaltando en cada uno de los casos cuáles son sus ventajas y desventajas. Actualmente existe una gran guerra entre diferentes diseñadores navales sobre cuál de ellos es mejor. Con este pequeño bloque se quiere demostrar por qué no hay una única opinión acerca de qué es mejor.
- Finalmente, el último bloque ejemplifica dos de los programas de FEM más utilizados en este mundo: ANSYS y RAM-SERIES. Este último, mucho menos conocido, aunque con mucha más capacidad para el estudio de buques ya que es específico.

A pesar de que existen diversos estudios específicos sobre cada uno de estos programas, pensamos que no existe ningún estudio comparativo sobre las diferentes herramientas a nuestro alcance, y eso es lo que pretendemos presentar en este PFC.

Así pues, presentamos aquí una visión global de las diferentes herramientas mencionadas a través de un estudio de todos estos programas tanto desde un punto de vista matemático como desde un punto de vista práctico, intentando resaltar las fortalezas y especificidades de cada uno de ellos, para que un usuario final que decidiera diseñar un buque utilizando herramientas informáticas pueda, después de realizar esta lectura, escoger aquellas herramientas que se ajusten más a las necesidades que tenga el buque en cuestión.

# **PARTE I: CAD/CAM/CAE y su aplicación en el diseño naval**



## 1. INTRODUCCIÓN

Hace décadas, los ingenieros dibujaban con instrumentos de dibujo tradicionales: lápiz, regla, etc.. Pero la utilización del ordenador se ha extendido de tal modo que el uso de equipos informáticos se ha vuelto imprescindible en la realización de dibujos.

Su desarrollo empezó en Estados Unidos hace unos 60 años. El Dr. Patrick Hanratty concebía en 1957 el primer software CAM llamado "PRONTO" por eso el Dr. Hanratty ha sido muchas veces llamado el padre del CAD/CAM.

A principios de los 60 Iván Sutherland inventa en el laboratorio Lincoln (MIT) el primer sistema gráfico CAD llamado "Sketchpad". Por el alto precio de estos ordenadores solo algunas compañías de aviación o automóviles desarrollaron en los 60 estos tipos de software.

Durante los años 70 este tipo de software comenzó su migración de la pura investigación hacia su uso comercial. Aunque todavía el software fuera desarrollado por grupos internos de grandes fabricantes de automoción y aeroespaciales como General Motors, Mercedes-Benz, Renault, Nissan, Toyota, Lockheed, McDonnell-Douglas, Dassault. Dassault empresa Francesa de aviación desarrolla el primer programa CAD/CAM llamado DRAPO, iniciales de definición y realización de aviones por ordenador.

En los años 80 el empleo del CAD/CAM se generaliza en las empresas industriales. Había comenzado como un tema de investigación que fue floreciendo comercialmente con el avance de los ordenadores, pero se convirtió en una dura competencia entre diferentes firmas comerciales.

A partir de los 90 la industria del CAD/CAM genera un volumen de mercado de miles de millones de euros con empresas como la francesa DassaultSystèmes con su famoso software "CATIA" o las estadounidenses ParametricTechnology y Autodesk entre otras muchas más.

Las fresadoras de control numérico por computadora (CNC) se han desarrollado en base a las fresadoras convencionales. En estas fresadoras convencionales las herramientas son desplazadas al menos en 3 ejes (X, Y, Z...) gracias a unas manivelas movidas a mano.

La base de los controles numéricos es bastante simple, se reemplaza las manivelas por motores de posicionamiento y algo de electrónica para controlar la posición de la herramienta. Existen bastante “kits” para transformar una fresadora convencional en una de control numérico.

Los primeros controles numéricos no utilizaban interfaz, controlaban la posición de las herramientas gracias a una banda perforada. Pronto se controlaron estas maquinas con un pequeño ordenador, un teclado y una pantalla. Entonces el operador podía teclear la secuencia de movimientos (G-codes o programa numérico) que debía realizar la maquina.

El siguiente paso fue utilizar un ordenador personal conectado al controlador CNC a través de un cable serie o USB. Por lo tanto en este caso el operador puede hacer funcionar la fresadora CNC mientras prepara el siguiente programa numérico.

Los sistemas de CAD sirven para definir virtualmente las formas de cualquier objeto. Los primeros sistemas de CAD que se crearon fueron los sistemas en 2D, denominados tableros electrónicos.

Posteriormente se crearon los sistemas en 3D, tanto los Modeladores de Superficies como los Modeladores de Sólidos muy básicos, estos últimos se han desarrollado de tal manera que son la base para el desarrollo de producto, mayor rapidez de generación de los modelos y que se pueden parametrizar, es decir que en el proceso de creación y desarrollo del producto se puede cambiar cualquier parámetro (dimensión o relación tecnológica como función a optimizar) que afecte a la forma geométrica de la pieza o producto, aunque en los modeladores de superficies ahora se puede utilizar algo similar a la parametrización que es la asociatividad.

Lo que todavía no han logrado los modeladores de sólidos es ser lo suficientemente flexibles y adaptables en cuanto formas libres, por lo tanto esta parte, por ahora es exclusiva y justifica la utilización de modeladores de superficies.

Lo que es interesante es el grado de conexión entre un modelador de superficies y un modelador de sólidos, como se verá más adelante.

Todo el proceso de creación de un producto - un barco, un avión, un coche, o una tostadora, etc. - se puede definir desde su estado conceptual hasta la fabricación del utillaje en el ordenador con sistemas de CAD/CAM/CAE/PDM-PLM/FEM, es decir definición y creación de las formas virtualmente exactas, realizar los cálculos de ingeniería necesarios para su

desarrollo, y por último definir el sistema o sistemas de mecanizado para la realización del utillaje en su caso o conectarlo con los procesos de fabricación necesarios. En este proyecto se va a estudiar cada una de los diferentes programas informáticos que pueden ayudar a la creación de un barco.

## **2.- CAD/CAM**

### **2.1- Introducción al CAD/CAM**

El Diseño y la fabricación asistidos por ordenador (CAD/CAM – Computer Aided Design / Computer Aided Manufacturing) es una disciplina que estudia el uso de sistemas informáticos como herramienta de soporte en todos los procesos involucrados en el diseño y la fabricación de cualquier tipo de producto. Esta disciplina se ha convertido en un requisito indispensable para la industria actual que se enfrenta a la necesidad de mejorar la calidad, disminuir los costes y acortar los tiempos de diseño y producción. La única alternativa para conseguir este triple objetivo es la de utilizar la potencia de las herramientas informáticas actuales e integrar todos los procesos, para reducir los costes (de tiempo y dinero) en el desarrollo de los productos y en su fabricación.

El uso conjunto de herramientas de diseño y de fabricación ha dado lugar a la aparición de una nueva tecnología denominada ‘Fabricación Integrada por Ordenador’ e incluso se habla de la ‘Gestión Integrada por Ordenador’ como el último escalón de automatización hacia el que todas las empresas deben orientar sus esfuerzos. Esta tecnología consiste en la gestión integral de todas las actividades y procesos desarrollados dentro de una empresa mediante un sistema informático. Para llegar a este escalón sería necesario integrar, además de los procesos de diseño y fabricación, los procesos administrativos y de gestión de la empresa que se centra en los procesos de diseño y fabricación, básicos para la gestión integrada.

CAD o diseño asistido por computador hace referencia a la tecnología implicada en el uso de ordenadores para realizar tareas de creación, modificación, análisis y optimización de un diseño. De esta forma, cualquier aplicación que incluya una interfaz gráfica y realice alguna tarea de ingeniería se considera software de CAD. Las herramientas de CAD abarcan desde herramientas de modelado geométrico hasta aplicaciones a medida para el análisis u optimización de un producto específico. Entre estos dos extremos se encuentran herramientas

de modelado y análisis de tolerancias, cálculo de propiedades físicas (masa, volumen, momentos, etc.), modelado y análisis de elementos finitos, ensamblado, etc.

La función principal en estas herramientas es la definición de la geometría del diseño (pieza mecánica, arquitectura, circuito electrónico, etc.) ya que la geometría es esencial para las actividades subsecuentes en el ciclo de producto.

La geometría de un objeto se usa en etapas posteriores en las que se realizan tareas de ingeniería y fabricación. De esta forma se habla también de Ingeniería asistida por Ordenador o Computer Aided Engineering (CAE) para referirse a las tareas de análisis, evaluación, simulación y optimización desarrolladas a lo largo del ciclo de vida del producto. De hecho, este es el mayor de los beneficios de la tecnología CAD, la reutilización de la información creada en la etapa de síntesis en las etapas de análisis y también en el proceso CAM.

El termino CAD se puede definir como el uso de sistemas informáticos en la creación, modificación, análisis u optimización de un producto. Dichos sistemas informáticos constarían de un hardware y un software. El termino CAM se puede definir como el uso de sistemas informáticos para la planificación, gestión y control de las operaciones de una planta de fabricación mediante una interfaz directa o indirecta entre el sistema informático y los recursos de producción.

## **2.2.- Fundamentos del CAD/CAM**

Los fundamentos de los sistemas de Diseño y fabricación asistidos por ordenador son muy amplios, abarcando múltiples y diversas disciplinas, entre las que cabe destacar las siguientes:

- Modelado geométrico: En esta disciplina se estudian los métodos de representación de entidades geométricas. Existen tres tipos de modelos: alámbricos, de superficies y sólidos, y su uso depende del objeto a modelar y la finalidad para la que se construya el modelo. Se utilizan modelos alámbricos para modelar perfiles, trayectorias, redes, u objetos que no requieran la disponibilidad de propiedades físicas (áreas, volúmenes, masa). Los modelos de superficie se utilizan para modelar objetos como carrocerías, fuselajes, zapatos, personajes, donde la parte fundamental del objeto que se está modelando es el exterior del mismo. Los modelos sólidos son los que más información contienen y se usan para modelar piezas mecánicas, envases, moldes, y en general, objetos en los que es necesario disponer de información relativa a propiedades físicas como masas, volúmenes, centro de gravedad, momentos de inercia, etc.

- Técnicas de visualización: Son aquellas que se usan para la generación de imágenes del modelo. Los algoritmos usados dependerán del tipo de modelo, abarcando desde simples técnicas de dibujo 2D para el esquema de un circuito eléctrico, hasta la visualización realista usando trazado de rayos para el estudio de la iluminación de un edificio. Es habitual utilizar técnicas específicas para la generación de documentación dependiente de la aplicación.
- Técnicas de interacción grafica: Son el soporte de la entrada de información geométrica del sistema de diseño. Entre ellas, las técnicas de posicionamiento y selección tienen una especial relevancia. Las técnicas de posicionamiento se utilizan para la introducción de coordenadas 2D o 3D. Las técnicas de selección permiten la identificación interactiva de un componente del modelo, siendo por tanto esenciales para la edición del mismo.
- Interfaz de usuario: Uno de los aspectos más importantes de una aplicación CAD/CAM es su interfaz. Del diseño de la misma depende en gran medida la eficiencia de la herramienta.
- Base de datos: Es el soporte para almacenar toda la información del modelo, desde los datos de diseño, los resultados de los análisis que se realicen y la información de fabricación. El diseño de las bases de datos para sistemas CAD/CAM plantea una serie de problemas específicos por la naturaleza de la información que deben soportar.
- Métodos numéricos: Son la base de los métodos de cálculo empleados para realizar las aplicaciones de análisis y simulación típicas de los sistemas de CAD/CAM.
- Conceptos de fabricación: Son aquellos que se refieren a máquinas, herramientas y materiales, necesarios para entender y manejar ciertas aplicaciones de fabricación y en especial la programación de control numérico.
- Conceptos de comunicaciones: Son aquellos que se usan para interconectar todos los sistemas, dispositivos y máquinas de un sistema CAD/CAM.

Otra forma alternativa de estudiar los componentes del CAD/CAM se basa en cómo se implementan. Según este criterio el CAD estaría formado por el hardware más el software de diseño y el CAM estaría formado por el hardware más el software de fabricación y además los mecanismos de comunicación necesarios para establecer la comunicación con las maquinas y

robots.

### **2.3.- CAD/CAM/CAE en la Ingeniería Naval**

Como complemento a lo descrito hasta este momento se pretende a continuación presentar una serie de herramientas CAD para el diseño naval. Debido a la complejidad de la mayoría de los entornos de diseño de naval disponibles, se muestra una comparativa con diferentes programas comerciales. Los modelos representarán a barcos y partes de los mismos, para cuya descripción se han utilizado superficies NURBS, pues permiten conseguir un buen control sobre las formas navales. Se han estudiado los mecanismos para ocultar al máximo las características de las estructuras de datos utilizadas, así como las operaciones específicas sobre modelos navales.

En el diseño de embarcaciones propulsadas intervienen una multitud de técnicas provenientes de diferentes áreas de la Ciencia y la Ingeniería (Teoría del Buque, Dibujo Naval, Análisis de estructuras, Dinámica de Fluidos y Resistencia de Materiales). Debido a la complejidad de los factores que intervienen en el proceso de diseño, se han estudiado diversas soluciones a los diferentes problemas, aunque de forma separada. En el campo del Diseño de Formas, a principios de los años 70 (MacCallum 1972) mostró que el ordenador sería una herramienta muy importante, casi esencial. Desde entonces, tanto el software como el hardware han evolucionado, pasándose de los primeros sistemas basados en parches de Bézier (MacCallum 1972) a los paquetes de CAD modernos basados en B-Splines (Rogers y Satterfield 1980) y NURBS (Larsson 1990). Además, en paralelo se ha conseguido una evolución importante en otras áreas como en CFDs (Computational Fluid Dynamics) y VPPs (Velocity Prediction Programs) (Larsson 1990). Si bien se han conseguido avances importantes desde el punto de vista de la interacción hombre-máquina, la realidad es que la mayoría de los sistemas de diseño naval son muy poco intuitivos y/o presenta serias restricciones con respecto a los modelos navales.

Se presentan a continuación una serie de entornos disponibles para el diseño naval en ordenadores personales. Las características principales de estas herramientas son: eficiencia, eficacia, facilidad de uso y potencia en el manejo de superficies. De todas formas requieren de

unos conocimientos previos de este tipo de software para adentrarse en el funcionamiento del mismo.

### **2.3.1.- MaxSurf**

Este software se basa en superficies NURBS en el cual siempre recalcula cuando redibuja. Posee un dibujado de la malla altamente personalizable y operaciones estándar para la modificación de superficies (adición, borrado, traslación, rotación, duplicado, modificación de atributos, agrupamiento). También posee operaciones estándar sobre los puntos de control (inserción y borrado por columnas, entrada manual o por ratón, control fácil) y permite realizar cálculos básicos (curva de áreas, hidrostáticas básicas). A pesar de ello no incorpora cálculos de estabilidad, renderizado, ajuste a formas definidas por el usuario, módulos específicos para apéndices y velas.

Maxsurf proporciona una rápida, flexible e intuitiva manera de modelar todo tipo de cascos, superestructuras y apéndices. Un número ilimitado de superficies trimadas de tipo NURBs se pueden utilizar para modelar cualquier tipo de buque, desde veleros hasta las embarcaciones más grandes que existen.

El módulo de diseño de Maxsurf, provee al ingeniero, arquitecto, constructor o diseñador naval, las herramientas de diseño necesarias para crear formas suaves y optimizadas, de manera rápida, precisa y con poco tiempo de entrenamiento. Cualquier número de superficies NURBs puede ser unido, cortado y manipulado para crear un modelo completo listo para el análisis hidrostático o generar planos de detalles constructivos.

Una gama de comandos facilita la manipulación interactiva directa de la forma de la superficie con el ratón o el teclado. Maxsurf permite la transformación automática de la forma del casco para obtener las dimensiones y las características hidrostáticas deseadas. Los puntos de control se pueden arrastrar con el ratón, ajustar numéricamente, o manipular con una variedad de comandos de suavizado.

Entre las características principales de Maxsurf se destacan:

- Número ilimitado de las superficies tipo NURBs
- Trimado dinámico de superficies
- Superficies desarrollables
- Superficies cónicas
- Transformación de la forma del casco

- Escalado proporcional del modelo
- Intersección de superficies
- Cambio dinámico del contorno de superficies
- Visualización coloreada de las curvaturas de las superficies
- Visualización de la curvatura de cualquier línea en cualquier superficie
- Rotación tridimensional dinámica del modelo
- Movimiento interactivo de los puntos de control
- Unión, agrupación y enmascarado de entidades de diseño
- Múltiples vistas dinámicas
- Edición gráfica o numérica
- Combinar varios modelos
- Cálculo de área superficiales y volúmenes
- Curva interactiva de áreas
- Importación y exportación vía DXF e IGES
- Copiar y pegar desde y a Microsoft Office

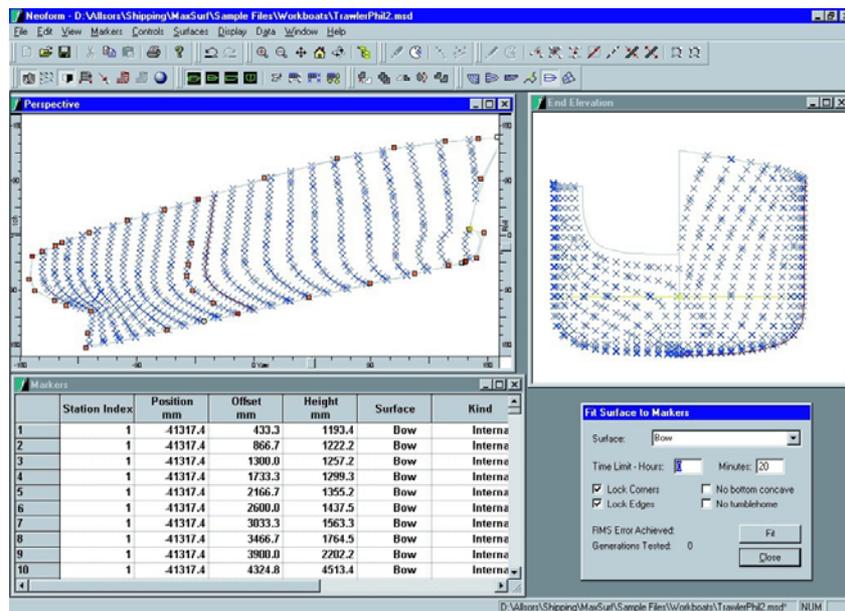


Figura 1 – Ejemplo de diseño de un buque mediante el software MaxSurf

### 2.3.2.- MultiSurf.

Software basado en superficies NURBS. Siempre recalcula cuando redibuja y posee un dibujo de la malla personalizable, con renderizado opcional. Uno de los problemas que tiene

este software es que tiene restricción en las operaciones para la modificación de superficies (adición, borrado, modificación de atributos), con un procedimiento de creación muy complejo (se ha de conocer la representación interna de las NURBS). De la misma manera también tiene operaciones restringidas sobre los puntos de control.

Cálculos básicos (hidrostáticas básicas, momentos de inercia, normal de la curvatura). No incorpora cálculos de estabilidad, transformaciones adecuadas sobre las superficies, ajuste a formas definidas por el usuario, módulos específicos para apéndices y velas.

Entre las características principales de MultiSurf se destacan:

- Combinaciones precisas y duraderas entre superficies.
- Variación paramétrica: MultiSurf actualiza el modelo completo al cambiar los objetos subyacentes.
- Una superficie para cada propósito: 30 tipos de superficie permiten utilizar la superficie adecuada para cada aspecto del diseño (no está limitado a NURBS como otras aplicaciones).
- Herramientas de carenado: las visualizaciones de las curvaturas de superficie y perfiles de curvatura ayudan a perfeccionar tu diseño.
- Varias ventanas de representación y alambres de uno o más modelos; cualquier punto de vista.
- Visualización dinámica.
- Puntos por arrastrar y soltar; utiliza incrementos snap, cuadrícula. Actualización dinámica durante el arrastre que permite ver en tiempo real el efecto sobre el modelo al mover un punto
- Utiliza filtros, capas y muestra/oculta para facilitar la visualización y selección
- Muestra la curva o superficie original para la comparación
- Escala, desplaza, gira el modelo (o partes del mismo) en cualquier dirección
- Niveles ilimitados de deshacer/rehacer

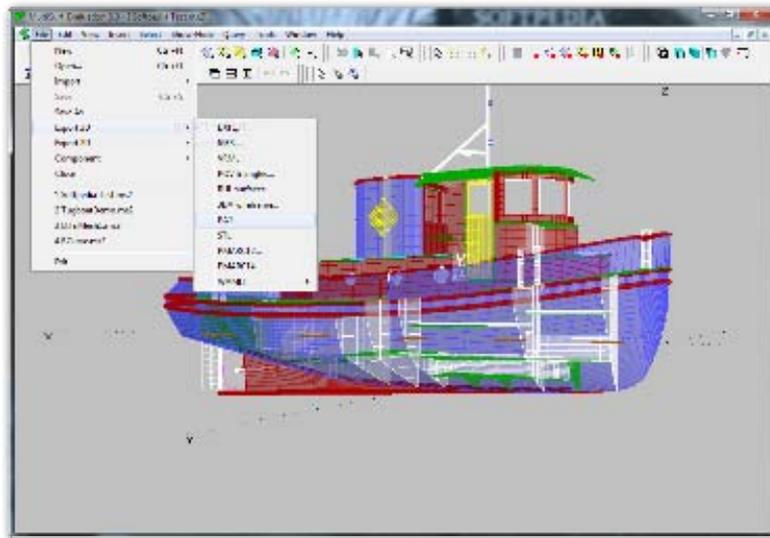


Figura 2 – Ejemplo de modelado de un buque mediante el software MultiSurf

### 2.3.3.- HullForm.

Este software está basado en curvas de Bézier (sin parches), una para cada cuaderna y siempre se recalcula cuando redibuja. Tiene un manejo muy complicado de los puntos de control, restringidos a formas básicas. Posee cálculos completos (curva de áreas, curva de superficie mojada, hidrostáticas básicas, estabilidad, arrastre en olas) y también dispone de módulo de renderizado. No incorpora una interfaz orientada a las superficies.

Entre las características principales de Hullform se destacan:

#### Carenado y diseño:

- Basados en una red de 400 líneas y 100 secciones transversales.
- Usa splines cúbicas naturales ponderadas longitudinalmente, curvas de Bézier cuadráticas.
- Agrega, elimina, edita secciones en una vista isométrica de todas las líneas y secciones.
- Agrega, elimina y edita líneas.
- Reubica y redefine secciones.
- Cambia unidades de medida.
- Cambia la escala de todo o parte del diseño.
- Introduce desvíos de diseño existente.
- Admite el catamarán.
- Genera perfiles de aluminio NACA automáticamente.
- Diseña el casco utilizando múltiples superficies de intersección.
- Tallo redondeado.

- Travesaño redondo y rastrillado.
- Detalle en la edición de sección.
- Conversión automática de monocasco en catamarán.
- Generación automática de largueros.
- Desarrollo de la placa.
- Tanques internos para daños y evaluaciones de estabilidad operativa.
- Conserva el diseño de "superposición" para la visualización de referencia cuando se trabaja en un diseño similar.

#### Hidrostática:

- Fija o libre flotante.
- Informes en la pantalla para cualquier ángulo de escora.
- Escribe valores hidrostáticos en forma de tabla en un archivo de texto.
- Tablas y gráficos cruzados hidrostáticos, todos exportables a procesadores de texto y hojas de cálculo.

#### Vista:

- Ortogonal - plan, perfil (elevación) y cuerpo (elevación de fin).
- Perspectiva - completa, puerto y medio estribor. Las vistas en perspectiva pueden girarse y los efectos de perspectiva ajustarse utilizando las teclas de flecha del teclado o la barra de desplazamiento. Dibuja líneas justas entre secciones, vistas de superficies sombreadas y animadas.
- Como en cualquier vista ortogonal o de perspectiva.

#### Desarrollo de la placa:

- Evalúa y muestra el desarrollo de una superficie entre cualquier par de líneas adyacentes del casco.
- Traza la forma de cualquier superficie desarrollada (para el corte de placa).
- Exporta las placas laminadas a un fichero DXF.

#### Largueros:

- Calcula ubicaciones de largueros entre cualquier par adyacente de líneas del casco, para el recuento de larguero fijo o el espaciado de larguero fijo.

- Incluye muescas de larguero en vistas de marco (ve la salida de archivo).

Arrastra los cálculos:

- Seis esquemas de arrastre empíricos (Gerritsma 1981 y 1996, Holtrop y Mennen, Oortmerrssen, Savitski, Savitski y Brown).
- Resumen detallado de arrastre para cualquier velocidad.
- Traza cualquier combinación de curvas de seis arrastre contra la velocidad.

Entrada de datos:

- Lee desvíos verticales de la flotación curva (por ejemplo, efectos de onda de estabilidad).
- Importa desvíos de un diseño ya existente en una variedad de formatos tabulares.
- Importa algunos archivos DXF.
- Importa archivos GHS.

Salida de archivo:

- Imprime o traza cualquier presentación.
- Contornos de marco con correcciones de espesor y muescas de larguero (incluyendo recortes inclinados en esquinas y agujeros en las esquinas del marco).
- Desplazamientos laterales de líneas de agua.
- Salida VRML de la superficie del casco.
- Escribe una representación DXF de 2 o 3 dimensiones del casco, para el uso de programas CAD.
- Exporta el archivo GHS.

Funciones de utilidad:

- Ejecuta cualquier programa en el menú de Hullform.
- Servidor DDE.

Imprime/traza la salida:

- Imprime en cualquier impresora o dispositivo trazador compatible con Windows.
- Traza en cualquier impresora compatible con gráficos o cualquier trazador compatible con Windows.

- Escribe cualquier vista a una gama de formatos gráficos (especialmente WMF, DXF y HPGL).

Interfaz gráfica de usuario:

- Utiliza cualquier pantalla compatible con Windows.
- Compatibilidad con el ratón para todas las funciones normales además de edición de línea y sección.
- Ayuda contextual.
- Control de usuario de los colores en la pantalla a color.

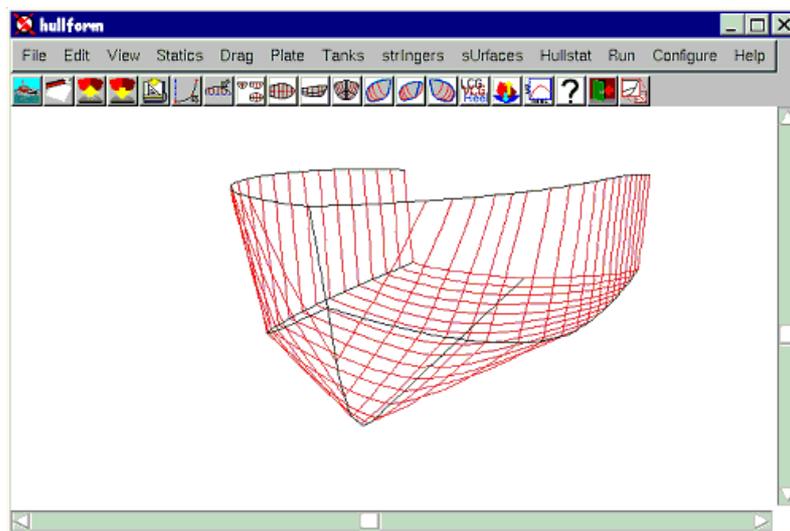


Figura 3 – Ejemplo de modelado de un buque mediante el software Hullform

#### 2.3.4.- Defcar

Defcar usa superficies para definir las formas del buque. Permite la definición de manera tridimensional continua, con las siguientes ventajas:

- Rapidez y facilidad en la modificación de las formas.
- Alisado sin errores. El sistema obtiene formas mucho mejor alisadas que cualquier otro procedimiento.
- La superficie se define de forma continua en lugar de discreta.
- Mayor precisión y menos errores en modificaciones posteriores.
- La modificación local en una zona se transmite automáticamente a toda la superficie, manteniendo las formas siempre alisadas.

El proyecto de un buque a partir de una existente diseñado con Defcar es enormemente fácil, rápido y potente.

Entre las características principales de Hullform se destacan:

- Diseño de formas de cualquier tipo.
- Modificación interactiva de la forma del casco.
- Cálculo básico de las líneas hidrostáticas.
- Importación/exportación DXF, IGES.
- Salidas a impresora.

#### **2.3.4.1.- Puntos de control**

Mediante el movimiento de los puntos de control se permite el diseño interactivo de las formas del casco.

El usuario gobierna la forma de la superficie moviendo sus "puntos de control". El sistema admite múltiples superficies (parches) conectadas unas con otras para definir las formas en su totalidad. Las conexiones entre parches pueden ser de diferente orden de continuidad. El sistema gestiona internamente las modificaciones producidas en un parche que puedan afectar a otros. El usuario puede realizar durante el proceso de proyecto Cálculos de Arquitectura Naval de forma interactiva, con objeto de comprobar el efecto que las modificaciones en las formas tienen sobre los parámetros fundamentales del buque: desplazamiento, centro de carena, coeficientes, etc.

En cualquier momento, el usuario puede visualizar el diagrama de curvaturas para facilitar el alisado de las formas

#### **2.3.4.2.- Definición de las formas del casco**

La definición de las formas del casco puede realizarse de tres maneras:

- Identificación: El usuario tiene las formas de un buque preexistente y desea introducirlo en el sistema DEFCAR, realizando una identificación. Este procedimiento es frecuentemente utilizado en la práctica. El usuario deberá introducir los puntos de referencia de las formas, a partir de las cuales DForm ayudado por el usuario, irá adaptando las superficies a los puntos de referencia. La precisión puede ser del orden de 1mm.

- **Transformación:** En este caso, el usuario va a obtener un nuevo buque partiendo de otro previamente definido con DForm. Este es el método más rápido para proyectar. El sistema, ayudado por el usuario, modifica las superficies de un buque previamente diseñado con DEFCAR para obtener otro nuevo. Pueden obtenerse formas muy distintas al buque base con procedimientos sencillos.
- **Generación:** Puede darse el caso de un nuevo tipo de buque de formas muy distintas que impidan utilizar las de otro proyecto previo. El proceso en este caso sería definir los perfiles del buque, las líneas principales que limitan los cuerpos de popa y proa etc. Posteriormente se crean las superficies que se apoyan en estas líneas, y, a partir de aquí, se modifican hasta la forma deseada.

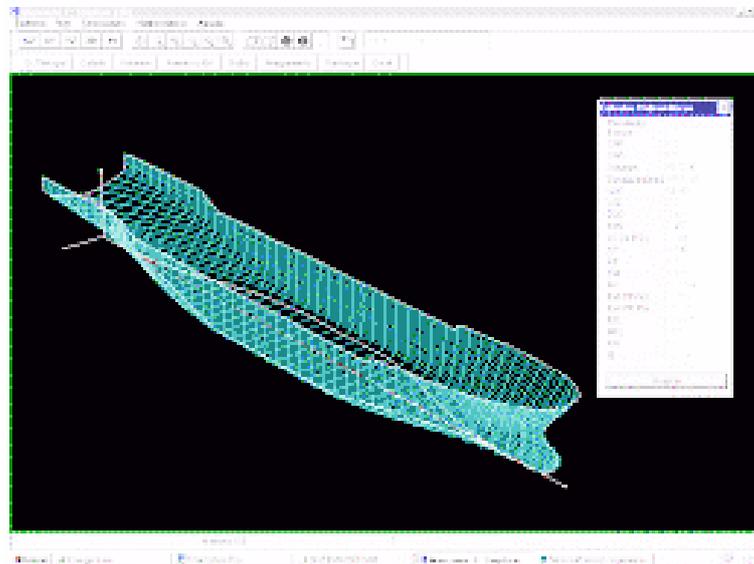


Figura 4 – Ejemplo de modelado de un buque mediante el software Defcar

### 2.3.5.- FORAN

El programa FORAN es un software integrado del diseño de buques desarrollado por SENER Ingeniería Sistemas, S.A. y es usado en la mayoría de los Astilleros españoles, tanto públicos como privados, y además de utilizarse extensamente en España, es uno de los más extendidos en todo el mundo. Gran parte del trabajo lo realizan empresas de ingeniería ajenas a los astilleros y, frecuentemente, muy alejadas de ellos. Con objeto de facilitar la coordinación entre astilleros y empresas de ingeniería, y entre estas últimas, los astilleros tienden a distribuir el trabajo por zonas, de modo que los interfaces geométricos entre zonas realizadas

por empresas distintas sean pequeños y claramente definidos. FORAN, está basado en la construcción, en forma concurrente, de un modelo 3D de producto en que se incluyen las características geométricas y los atributos de la estructura del casco y de los equipos, calderería, tuberías, conductos de ventilación, canalizaciones eléctricas y restantes elementos del buque. La coherencia y compatibilidad del modelo de producto se consigue, básicamente, mediante su descripción a través de una base de datos única, contra la que los usuarios desarrollan la mayor parte del trabajo de ingeniería. Ello garantiza una calidad de ingeniería muy superior a la que puede lograrse cuando no se utiliza modelo 3D.

#### **2.3.5.1.- Definición de Formas**

FORAN ofrece una impresionante capacidad para definir cualquier tipo de buque, incluidos los buques multicasco. La técnica más avanzada basada en los estándares de la industria, la definición de superficies a través de la formulación NURBS, son utilizados para crear las formas de los buques tanto empezando desde cero o con cualquier definición preliminar.

#### **2.3.5.2.-Formas del Casco, cubiertas y mamparos**

FORAN ofrece una amplia capacidad para definir cualquier clase de buque, incluidos artefactos y plataformas. Las técnicas más avanzadas, (basadas en los estándares de la industria,) en la definición de superficies a través de la formulación NURBS, son utilizados para hacer las formas de los buques.

Los parches y las curvas se pueden editar, transformar, copiar, dividir, etc. Y además se dispone de las funciones más potentes de visualización.



Figura 5 – Ejemplo de modelado de un buque mediante el software FORAN

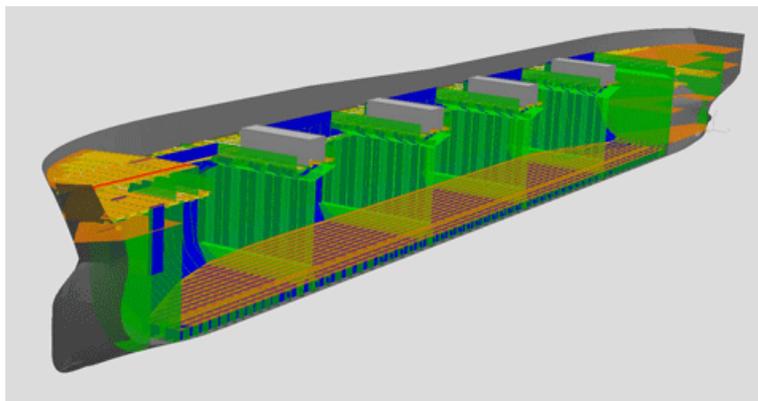


Figura 6 – Ejemplo de modelado y compartimentación de un buque mediante el software FORAN

### 2.3.5.3.- Alisado, curvatura y control de suavizado

Usando las técnicas interactivas gráficas, como curvatura de la superficie o de las curvas, el control del suavizado, se puede evaluar diferentes diseños fácil y rápidamente. Además, una completa gama de funciones de transformación de las formas permite la creación de una librería de formas y generar a partir de estar cualquier modificación. Se pueden crear todo tipo de apéndices y manipular con la definición NURBS.

Además de comenzar la definición de las formas con las entidades NURBS, se puede hacer otras aproximaciones por ejemplo a partir de una definición preliminar: El método exclusivo de FORAN para generar superficies de casco de modo tradicional y ajustar y alisar las formas del buque a través de una serie de curvas sobre planos paralelos (cuadernas, longitudinales y líneas de agua). Otra posibilidad es importar desde otro sistema o programa la información.

### 2.3.5.4.- Referencias Topológicas

Partiendo del casco como primera referencia topológica, FORAN permite a los diseñadores definir rápidamente el sistema de cuadernas de construcción y todo tipo de cubiertas y

mamparos. La numeración y las distancias de referencia del sistema de cuadernas se pueden definir desde proa a popa como de popa a proa. Las cubiertas se pueden definir con arrufo y brusca, codillos, saltillos y asimetrías de forma paramétrica. Los mamparos pueden ser tanto planos como corrugados con cualquier ley de corruga.

#### **2.3.5.5.- Generación automática de planos**

Están disponibles una gran variedad de tipos de planos: de líneas, plano de formas (bien por cuadernas de construcción o de diseño), perfiles de popa y proa, líneas de agua (con la posibilidad de definir los planos de corte), disposición general (incluyendo vistas en planta y perfil y mamparos transversales y longitudinales, módulo de carga y dibujos en perspectiva).

#### **2.3.5.6.- Arquitectura Naval**

FORAN ofrece cálculos completos de hidrostáticas, curvas de Bonjean, escala de pesos muertos, curvas de estabilidad, francobordo, esloras inundables y permitidas, curva de áreas de sección, ángulos de trimado y tabla de densidad del agua de mar, considerando situaciones de cabeceo y trimado.

#### **2.3.5.7.- Estructura del Buque**

FORAN permite una rápida definición de toda la estructura con a través de un preciso modelo 3D, que incluye el traqueado del forro y las cubiertas, los perfiles estructurales y las piezas internas.

El modelo de producto permite al sistema FORAN suministrar al departamento de producción de toda la información necesaria para la construcción del buque, incluidos el pre-armamento, el montaje, la gestión de materiales, la planificación y el control de calidad de una forma directa.

#### **2.3.5.8.- Estándares**

Toda la información relativa a normas, estándares, parámetros de configuración y otros requisitos fundamentales del astillero está centralizada en la base de datos. FORAN posee una extensa librería de estándares, con la se puede utilizar como punto de partida para crear sus propias librerías de estándares, incluidos los catálogos de materiales de planchas brutas, barras de perfiles, agujeros, despuntes, pasos de perfil, groeras, chaflanes, etc.

### **2.3.5.9.- Modelado estructural**

FORAN permite una rápida definición de un modelo completo y preciso de la estructura del buque, incluidos los traqueados de forro y cubiertas, perfiles estructurales y piezas internas. El usuario trabaja directamente en la definición del modelo de producto de todo el buque, lo que simplifica enormemente la organización e incrementa el rendimiento del proceso de diseño total.

La definición del modelo de estructura se facilita enormemente gracias al uso de potentes herramientas de copia y a mecanismos tales como el etiquetado automático, la inserción de pasos de perfil, definición paramétrica de piezas, marcados, herencia de atributos desde los elementos estructurales hacia los de detalle y a la definición de procedimientos y macros por parte del usuario.

La topología subyacente del proceso permite un fácil y rápido aprovechamiento de la información de un componente localizado en distintas partes y del uso de planchas estándares, con la geometría distinta pero calculada automáticamente.

El modelo de producto permite al sistema FORAN suministrar al departamento de producción de toda la información necesaria para la construcción del buque, incluidos el pre-armamento, el montaje, la gestión de materiales, la planificación y el control de calidad de una forma directa.

Todas las entidades de la estructura tienen asociadas un juego de atributos basados en una organización de "object-oriented". Conceptos tales como márgenes de construcción, deformaciones térmicas, factores de compensación, márgenes de curvado, etc. son manejados por el sistema para garantizar la máxima precisión en la información de los talleres. FORAN ofrece unas impresionantes capacidades para comprobar la estructura con diferentes métodos de visualización y unas extensas posibilidades para hacer búsquedas en la base de datos.

El anidado de piezas del FORAN ofrece unas excelentes herramientas automáticas y manuales para anidar las planchas y los perfiles, generando toda la información necesaria como son la secuencia de corte, los chaflanes, los porcentajes de desperdicio, longitudes de corte, de marcado de movimiento en vacío, tiempos, etc. Las salidas del anidado incluyen los planos configurables con el listado de todas las piezas. Los post-procesadores de corte a medida del FORAN generan toda la información necesaria de plancha y perfiles para las máquinas de corte o robots.

### **2.3.5.10.- Generación de información gráfica**

FORAN puede producir un amplio rango de dibujos de estructura, tanto para clasificación como para construcción. Se puede obtener del buque completo o de cualquier área del mismo las vistas de planta, perfil, secciones transversales, planos de expansión, o cualquier vista del modelo 3D.

La configuración y el estilo de estos dibujos se pueden adecuar a los requerimientos del usuario. Operaciones tales como sombreados, eliminación de líneas ocultas o cortes por cualquier sección son posibles, así como una representación simbólica de los elementos estructurales (tipo de líneas, colores, eliminando el espesor, los agujeros, pasos de perfiles, groetas, cualquier detalle, etc.). El plano generado de los elementos estructurales sigue la organización de los productos intermedios, incluyendo información de soldadura, listado de piezas y sus conexiones.

Toda la información y los planos para construir las plantillas de curvado de todos los elementos curvos son obtenidos de forma automática.

El cálculo del peso, del centro de gravedad y de la superficie de pintado son calculados automáticamente de cualquier conjunto de piezas, productos intermedios, bloques e incluyendo información de premontaje, todo ello de forma rápida y fácil.

El control de material incluye facilidades para el seguimiento de cualquier tipo de almacén y genera automáticamente resúmenes de las cantidades utilizadas así como del control de desperdicios.

#### **2.3.5.11.- Armamento**

FORAN permite la definición completa y precisa del modelo de armamento, incluyendo equipos, tuberías, conductos de HVAC, bandejas de cables y armamento estructural, todo ello dentro de una misma aplicación con modos de trabajo específicos para cada disciplina.

Los diferentes contextos de trabajo comparten funcionalidades comunes para la preparación de la escena del modelo, la detección de interferencias y el trazado y disposición rápida de elementos.

A partir del modelo de producto almacenado en la base de datos Oracle, se pueden obtener planos, informes y dibujos de fabricación y montaje durante todas las etapas de diseño.

#### **2.3.5.12.- Librerías de modelos**

La definición de modelos de equipos se realiza por combinación de diferentes objetos paramétricos y/o usando macros geométricas programadas por el propio usuario. Los modelos se almacenan en librerías según la configuración que se desee.

### **2.3.5.13.- Diagramas de servicios**

FORAN permite crear de forma rápida los diagramas de servicios distribuidos del buque. Entre sus posibilidades se incluyen la definición de símbolos gráficos, múltiples opciones para el rutado de distribuidores e inserción de accesorios, el control automático de conexiones lógicas, la obtención de listas de materiales y los cálculos de pérdidas de carga.

Existen además una amplia gama de posibilidades de visualización, y herramientas para completar la información de los diagramas y para obtener órdenes de pedido basadas en la información contenida en los mismos y en la reserva de material realizada (elementos como bridas, juntas, etc. no contemplados).

### **2.3.5.14.- Definición del modelo 3D**

Los equipos son posicionados en el buque usando como referencia el sistema de cuadernas, la definición de cubiertas y mamparos, el modelo 3d de la estructura o cualquier elemento de armamento previamente definido.

El rutado de tuberías, conductos de HVAC y bandejas de cables puede basarse en la definición de una poligonal (la generación de tubos rectos/codos/curvas la realiza el sistema de forma automática) y/o añadiendo o insertando diferentes tipos de accesorios (bridas, válvulas, etc.).

En las tareas de trazado el sistema tiene en cuenta toda la información definida previamente en la base de datos (estándares, especificaciones y componentes). Si además el servicio en el que se trabaja tiene diagrama, FORAN obtiene automáticamente los atributos de los elementos del mismo y controla la correspondencia del modelo con el diagrama.

El armamento estructural, polines, soportes, escaleras, tanques no estructurales, etc. se define combinando piezas paramétricas estándar de plancha y perfil, y usa como referencia para la definición los elementos de armamento y estructura previamente definidos. Cada pieza se trata como un elemento más de la estructura general a efectos de fabricación y extracción de información (ej. anidado).

La detección de interferencias y los informes de cálculo de pesos, superficies y C.D.G se obtienen automáticamente a partir del modelo 3D.

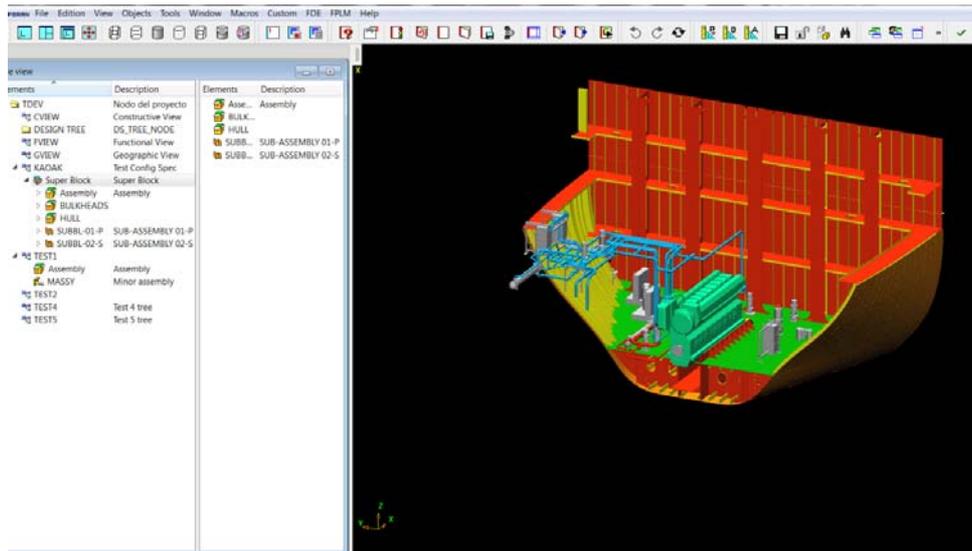


Figura 7 – Ejemplo de modelo 3D y distribución de tuberías y equipos en su interior mediante el software FORAN

### 2.3.5.15.- Dibujos isométricos

Una funcionalidad particularmente importante de FORAN es la generación automática de dibujos isométricos a medida de las necesidades y formatos del astillero. Estos dibujos pueden ser de dos tipos: spooles de fabricación (con toda la información requerida para el curvado y la situación de bridas) e isométricas de instalación/montaje (que contienen los spooles, accesorios, equipos y referencias al buque para su correcto montaje). El Sistema proporciona además de herramientas para editar de forma fácil, si resultase necesario, la información gráfica generada automáticamente (alargamiento y rotación de líneas, cambios de escala, adición de primitivas al dibujo, etc.)

### 2.3.5.16.- Planos de producción y montaje

El sistema permite generar automáticamente multitud de tipos de dibujos para producción a partir del modelo 3D. El uso de la estrategia constructiva mejora sensiblemente la generación de la información para producción.

Otra de las salidas típicas del sistema son los planos de instalación/montaje. Estos planos permiten incluir elementos de estructura y armamento, pueden ser obtenidos en cualquier vista, con diferentes niveles de precisión e incluyendo la lista de elementos integrantes.

Cuando se realiza un cambio en el modelo 3D, los planos afectados se regeneran de forma automática.

### 2.3.5.17.- Listados configurables

FORAN permite la generación de listados totalmente configurables: pedidos de materiales individualizados, informes from-to, situación de pedidos de equipos (pedido, orden, recepción, montaje, etc.). Aunque estos informes son configurables por el usuario, se proporcionan un conjunto de formatos para las tareas más usuales.

# PARTE II: NURBS



## 1. INTRODUCCIÓN

Tal y como se ha podido observar en la introducción realizada para las herramientas CAD, la evolución histórica que han sufrido los modelos matemáticos para representar curvas y superficies es similar a las mencionadas herramientas explicadas en el bloque uno del presente PFC.

La problemática nace cuando se pretenden dibujar curvas en las cuales el dibujo a mano se hace imposible.

Es ahí donde se empiezan a usar largas tiras de madera o plástico que sostenidas por pesos de plomo hacían variar la curvatura de las tiras, llamadas “splines”.

Paralelamente a todo ello empiezan a surgir los primeros computadores capaces de soportar un modelo matemático para curvas arbitrarias. Y es ahí donde nace el concepto de NURBS (Non-Uniform Rational B-Spline). Las curvas NURB son flexibles y de gran alcance, pero usarlas requiere además de eficacia una cierta comprensión de la teoría matemática.

Como definición se puede entender que las curvas NURBS son un modelo matemático muy utilizado en los gráficos por ordenador para generar y representar curvas y superficies. Son B-Splines racionales no uniformes y están pensadas para poder realizar sólidos 3D de cualquier forma y precisión, líneas 2D, círculos, arcos, etc.

Este tipo de representaciones matemáticas proporcionan un mayor control sobre curvas y superficies, frente a las curvas y superficies de Bézier (más adelante se introducirá también este concepto) que al trabajar con muchos puntos de control, dificultan una buena continuidad.

Se basa en la segmentación de las curvas, y cada segmento está afectado por los 4 puntos de control más cercanos.

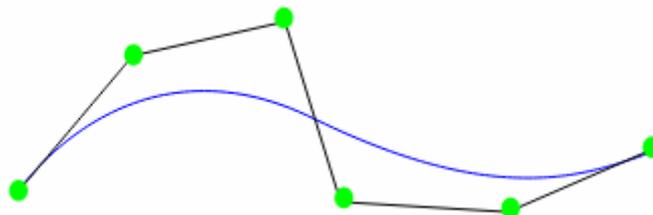


Figura 8 – Curva NURBS

Una de las ventajas de las curvas NURBS es que ofrecen una manera de representar formas arbitrarias mientras que mantienen independencia matemática de la exactitud y de la resolución.

Entre sus características principales se destacan las siguientes ventajas:

- Pueden representar virtualmente cualquier forma deseada, de puntos, líneas rectas, y polilíneas para las curvas de cualquier forma de las secciones cónicas (círculos, elipses, parábolas, e hipérbolas) con formas arbitrarias.
- Dan gran control sobre la forma de una curva. Un sistema de los puntos y de los nodos de control, que dirigen la forma de la curva, se puede manipular directamente para controlar su suavizado y curvatura.
- Pueden representar formas muy complejas con pocos datos. Por ejemplo, aproximar un círculo a través de una secuencia de la línea segmentos requeriría diez millones de segmentos para hacer un círculo en vez de un polígono. Definir el mismo círculo con una representación NURBS necesita solamente siete puntos de control.

Se pueden utilizar las NURBS como herramienta para diseñar y para controlar las formas de superficies tridimensionales, para por ejemplo, superficies de revolución, extrusión, cortes, etc.

## **2. DESCRIPCIÓN MATEMÁTICA DE LAS NURBS**

Para describir el tipo de curvas denominadas NURBS en toda su generalidad, será interesante introducir previamente un conjunto de curvas más simples que nos servirán como introducción a algunas de sus propiedades. En concreto, el orden natural de introducción de las curvas será:

1. Curvas de Bézier. Tipo de curvas que se definen mediante un polígono de control con un número fijo de puntos en función del grado.
2. Splines. Extensión de las anteriores a partir del concepto de curva definida a trozos.
3. B-splines. Otro nombre dado a las Splines cuando se representan mediante el polígono de Boor.
4. Cónicas. Curvas con término racional que describen al conjunto de: parábolas, hipérbolas, elipses, círculos, etc.

5. Curvas NURBS. B-splines con término racional. O sea, que combinan las propiedades de las B-splines con las de las cónicas.

Todas las curvas que trataremos serán paramétricas tridimensionales, siendo el espacio paramétrico en todos los casos el  $[0, 1]$ . La introducción de esta restricción en el espacio del parámetro no resta generalidad a la formulación, pues se podrían obtener ecuaciones equivalentes en el dominio genérico  $[a, b]$ , con la simple aplicación de una transformación del parámetro  $t$  tal que  $t = a + (b - a) \cdot t$ .

### 2.1. Curvas de Bézier

Las curvas de Bézier son una forma alternativa de representación de una curva polinómica. En lugar de la representación tradicional de un polinomio como:

$$\vec{P} = \vec{P}_0 + \vec{P}_1 \cdot t + \dots + \vec{P}_n \cdot t^n$$

Se escoge otra representación en la que los puntos  $\vec{P}_i$  adquieren sentido geométrico. A continuación se introduce, de manera constructiva, la definición de una curva de Bézier.

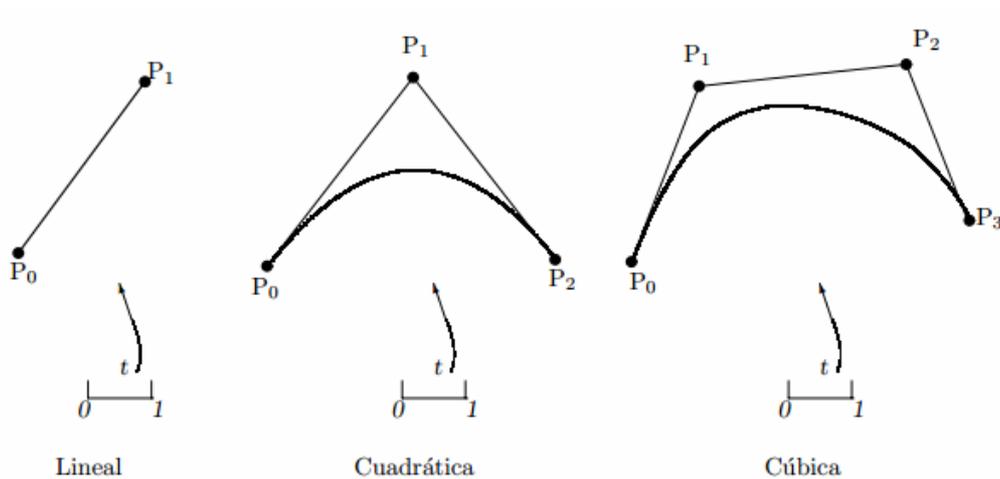


Figura 9 – Curvas de Bézier de diversos grados

Dados los puntos  $\vec{P}_0$  y  $\vec{P}_1$ , todos los puntos  $\vec{P}$  pertenecientes a  $E^3$  de la forma

$$\vec{P} = \vec{P}(t) = (1 - t) \cdot \vec{P}_0 + t \cdot \vec{P}_1 \quad t \in \mathbb{R}$$

se denominan la línea recta a través de  $\vec{P}_0$  y  $\vec{P}_1$ . Para  $0 \leq t \leq 1$ , el punto  $\vec{P}$  estará entre los dos

puntos. Por tanto podemos considerar a  $\vec{P}(t)$  como una función paramétrica de  $t \in [0, 1]$  hacia

un segmento de línea recta en  $E^3$ . Nótese que esta función se obtiene como combinación baricéntrica de dos puntos.

Si realizamos la misma construcción para un grado más, o sea, creamos una nueva función de  $t$  tal que sea combinación baricéntrica de dos combinaciones baricéntricas lineales, se obtiene:

$$\begin{aligned}\vec{P}_0^1(t) &= (1-t) \cdot \vec{P}_0 + t \cdot \vec{P}_1 \\ \vec{P}_1^1(t) &= (1-t) \cdot \vec{P}_1 + t \cdot \vec{P}_2\end{aligned}$$

Insertamos ambas funciones en una nueva combinación baricéntrica,

$$\vec{P}_0^2(t) = (1-t) \cdot \vec{P}_0^1 + t \cdot \vec{P}_1^1$$

Y se desarrolla, obteniendo la parábola:

$$\vec{P}_0^2(t) = (1-t)^2 \cdot \vec{P}_0 + 2t(1-t) \cdot \vec{P}_1 + t^2 \cdot \vec{P}_2$$

Así pues, se obtiene una función paramétrica, llamada parábola, que es una aplicación del intervalo  $[0,1]$  a una curva de grado dos en el espacio y con las siguientes propiedades:

- La curva pasa por el punto inicial y final.
- La tangente de la curva en el punto inicial y final pasan por el punto central.
- La curva es continua y derivable, de grado  $C^1$  en todo el dominio.
- La curva es plana y está incluida en el polígono convexo que forman sus puntos.

Si se genera la construcción para grado  $n$ , se obtiene:

$$\vec{P}_i^r(t) = (1-t) \cdot \vec{P}_i^{r-1}(t) + t \cdot \vec{P}_{i+1}^{r-1}(t)$$

Dónde:  $r = 1, \dots, n$

$i = 0, \dots, n-r$

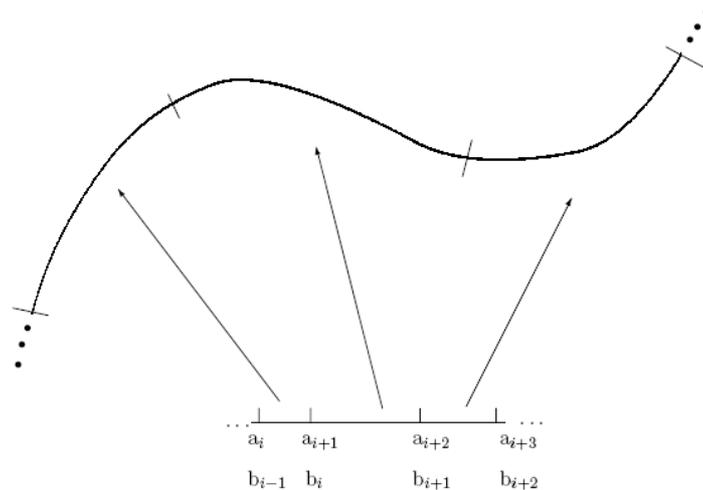
Se define la curva de Bézier de grado  $n$ ,  $\overline{P}^n$  como  $\overline{P}_0^n(t)$  en la anterior ecuación. Se puede observar que esta curva queda perfectamente definida mediante su grado  $n$ , y su polígono de control, que son los puntos  $\overline{P}_0, \dots, \overline{P}_n$ . Esta curva cumple las siguientes propiedades:

- La curva pasa por el punto inicial y por el final.
- La tangente de la curva en el  $\overline{P}_0$  y  $\overline{P}_n$  pasan, respectivamente, por los puntos  $\overline{P}_1$  y  $\overline{P}_{n-1}$  si no coinciden con los anteriores y, en general, por los más cercanos a ellos que no sean coincidentes.
- La curva es continua y derivable, de grado  $C^{n-1}$  en todo el dominio.
- La curva está incluida en el polígono convexo que forma su polígono de control.
- De las propiedades anteriores se deduce que la curva se acerca suavemente a los puntos interiores del polígono de control.
- Si el polígono de control reside en un plano, la curva estará contenida en el mismo plano.

El método usado para introducir y definir las curvas de Bézier es al mismo tiempo, una función recursiva que sirve para evaluarlas.

## 2.2. Splines

El grado de una curva de Bézier determina el número de puntos que contiene el polígono de control. Debido a ello, cuando se necesita aumentar el número de puntos para tener más flexibilidad en la definición de la curva, se debe aumentar el grado. A efectos prácticos, grados demasiado altos ( $n > 10$ ) no son aconsejables. La extensión de estas curvas para obtener otras más flexibles, es la de las curvas polinómicas a trozos. Se trata de definir una nueva curva que sea la unión de varias curvas polinómicas simples (como las curvas de Bézier) y que cumplan una serie de requisitos de continuidad en la unión entre cada dos de estas curvas polinómicas. Esta nueva curva se llamará spline.



**Figura 10 – Una curva spline formada mediante la unión de curvas de Bézier cumpliendo unos requisitos de continuidad en los puntos de unión.**

Si tenemos L curvas de Bézier unidas de manera consecutiva y cada una de ellas definida en el intervalo [0,1], tal como se muestra en la figura anterior, se puede realizar una transformación local del parámetro tal que queden definidas en  $[a_i, b_i]$ . Así se obtiene una curva global  $\vec{P}_G(t)$  como unión de todas ellas y cuyo parámetro estará definido en  $[a,b]$ . Se tiene que cumplir que:

$$a = a_0 \quad ; \quad b = b_{L-1} \quad ; \quad a_i = b_{i-1} \text{ y } b - a = \sum_{i=0}^{L-1} b_i - a_i$$

Si llamamos  $u_0, \dots, u_L$  a  $a_0, a_1, \dots, a_{L-1}, b_{L-1}$ , la curva  $\vec{P}_G(t)$  quedará perfectamente definida con los  $u_i$  y con el conjunto de los polígonos de control de las curvas de Bézier:

$$\vec{P}_{0,0}, \dots, \vec{P}_{0,n}, \dots, \vec{P}_{L-1,0}, \dots, \vec{P}_{L-1,n} \quad \text{para L curvas de grado n}$$

Por continuidad  $C^0$  de las curvas se comprueba que  $\vec{P}_{i,n} = \vec{P}_{i+1,0}$ . El conjunto de los  $u_i$  se llama *secuencia de nudos*.

En general, además de la continuidad  $C^0$  de las curvas, se deseará que tengan continuidad en las derivadas. Es interesante que el punto de unión entre dos segmentos de curva tenga el mismo grado de continuidad que las curvas mismas.

Para que la curva sea continua  $C^1$  en todo el dominio de definición, imponemos igualdad de derivadas en la unión de dos segmentos. Si se le llama  $\Delta_i$  a  $u_{i+1} - u_i$ , t al parámetro global de la curva y  $t'_i$  a los parámetros locales de cada segmento, se deduce que:

$$\frac{d}{dt} \vec{P}_G(t) = \frac{1}{\Delta_0} \frac{d}{dt'_0} \vec{P}_0(t'_0) = \frac{1}{\Delta_1} \frac{d}{dt'_1} \vec{P}_1(t'_1)$$

Como:

$$\frac{d}{dt_0} \vec{P}_0(1) = n \Delta \vec{P}_{n-1}$$

$$\frac{d}{dt_1} \vec{P}_1(0) = n \Delta \vec{P}_n$$

Entonces:

$$\Delta_1 \Delta \vec{P}_{n-1} = \Delta_0 \Delta \vec{P}_n$$

Se puede observar que para que la curva sea derivables  $C^1$  en todo el dominio, es condición necesaria pero NO suficiente que los tres puntos del polígono de control alrededor de un punto de unión deben ser colineales. Las relaciones de distancia a las que deben estar entre ellos dependen de la parametrización. Por tanto, dada una curva formada por segmentos de Bézier y con los puntos colineales 3 a 3 alrededor de los puntos de unión, será  $C^1$  en todo el dominio o no, en función de la parametrización escogida.

Suponiendo la curva  $\vec{P}_G(t)$  continua  $C^1$ , la condición de continuidad  $C^2$  en el punto  $\vec{P}_n$  implica que debe existir un punto  $\vec{P}_S$  que cumpla:

$$\begin{aligned} \vec{P}_{n-1} &= (1 - \alpha) \vec{P}_{n-2} + \alpha \vec{P}_S \\ \vec{P}_{n+1} &= (1 - \alpha) \vec{P}_S + \alpha \vec{P}_{n+2} \end{aligned}$$

Con  $\alpha = \frac{\Delta_0}{(t_2 - t_0)}$ . En la siguiente figura puede verse el criterio de continuidad  $C^2$ . La deducción de estas fórmulas se obtiene a partir de la imposición de igualdad de derivadas segundas.

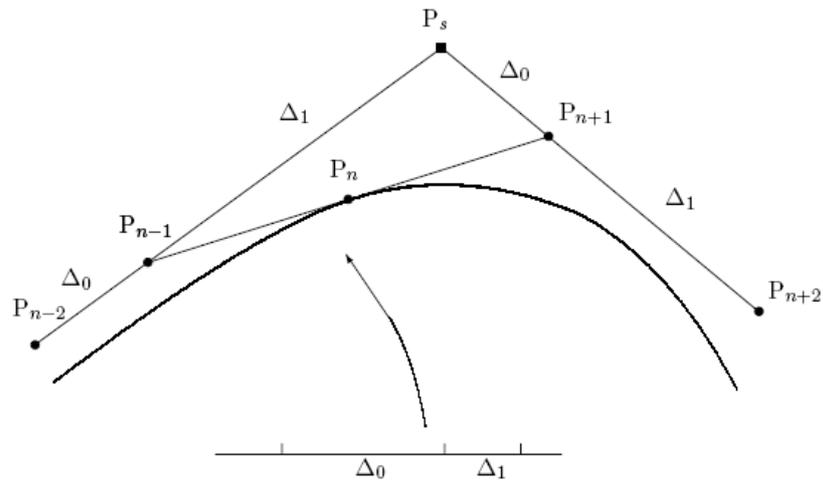


Figura 11 – La condición de continuidad  $C^2$  en el punto  $\bar{P}_n$  implica la unicidad del punto  $\bar{P}_s$

A partir de la aplicación de estos conceptos, se puede comprobar que la forma geométrica de la curva queda perfectamente definida con los polígonos de control de los segmentos de Bézier. Por otro lado, la continuidad de la curva variará en función de la parametrización escogida. Por tanto, con una misma forma geométrica se pueden obtener curvas con diferentes grados de continuidad en función del tipo de parametrización escogida. Se debe hacer constar que una transformación del tipo  $t' = \alpha + \beta t$  para toda la secuencia de nudos, no cambia ni la forma de la curva ni su grado de continuidad.

### 2.3. B-Splines

Las curvas B-Splines son curvas spline definidas mediante el polígono B-spline y la secuencia de nudos. Una curva B-spline viene definida por su grado, su polígono de control y su secuencia de nudos. Como una B-spline es una curva formada por diversos segmentos polinómicos, el grado de la línea será el mismo grado que tendrá cada uno de los segmentos.

El orden de una curva es el grado más uno.

El polígono de control es un conjunto de puntos en el espacio donde algunos de ellos pueden estar repetidos. La curva pasará por el primer y por el último punto y se acercará, de manera suave, a todos los otros puntos.

La secuencia de nudos, es un conjunto de números reales en forma de lista no decreciente. Normalmente se definen en el intervalo  $[0,1]$  y, por tanto, el primero valdrá 0 y el último 1. Si un mismo valor está repetido  $r$  veces, se dice que tiene multiplicidad  $r$ . Diferentes multiplicidades implicarán diferentes propiedades en relación al punto de control que corresponde al nudo. En concreto, una multiplicidad igual al orden supondrá que la curva

interpole al punto correspondiente. El primer nudo de la lista y el último tendrán multiplicidad igual al orden para asegurar la interpolación de los puntos extremos.

El número de puntos y el de nudos deben cumplir que:

$$N_k = N_p + o$$

Dónde:  $N_k$  es el número de nudos,  $N_p$  el número de puntos y  $o$  el orden.

Para evaluar una curva de este tipo se pueden usar varios algoritmos. Una de ella proviene de la inserción de nudos y se enuncia de la siguiente manera: Dada una curva definida por su grado  $n$ , polígono de control  $\vec{P}_1, \dots, \vec{P}_L$  y nudos  $u_0, \dots, u_{L+n}$ , para evaluarla en  $u$  tendremos que encontrar  $u_i$  tal que:  $u \in [u_i, u_{i+1}]$ . El valor de la curva en  $u$  será:

$$\vec{P}_i^k(u) = \frac{u_{i+n-k} - u}{u_{i+n-k} - u_{i-1}} \vec{P}_{i-1}^{k-1}(u) + \frac{u - u_{i-1}}{u_{i+n-k} - u_{i-1}} \vec{P}_i^{k-1}(u)$$

Para:  $k = 1, \dots, n-r$

$i = i-n-k+1, \dots, i+1$

$$\vec{P}_i^0(u) = \vec{P}_i$$

Entonces:

$$\vec{s}(u) = \vec{P}_{i+1}^{n-r}(u)$$

Donde  $r$  es la multiplicidad del nudo  $u_i = u$ . Si no existe ese nudo, entonces  $r = 0$ . Se deduce de esta ecuación que la evaluación de la curva pasa por calcular recursivamente una serie de interpolaciones lineales.

En ocasiones nos encontramos con que no disponemos de una secuencia de nudos y que ésta se debe calcular.

Un caso típico es cuando un usuario crea interactivamente una línea dando los puntos de control o modificándolos. El programa debe calcular los nudos por sí solo. Otro caso en el que debe calcularse esta lista es en la interpolación de puntos mediante B-splines.

Así pues, y enunciando el problema: Dado el polígono de control de la curva  $\vec{P}_1, \dots, \vec{P}_L$  y su grado  $n$ , se debe calcular una posible secuencia de nudos  $u_0, \dots, u_{L+n}$  tal que la curva resultante tenga unos cambios de curvatura suaves y que el parámetro de la curva se aproxime al parámetro arco (o sea, que el avance de la curva sea lo más constante posible).

Este cálculo se puede realizar mediante 2 técnicas:

- Parametrización constante – Todos los incrementos de parámetro son iguales. Es la más sencilla. Si la separación entre puntos es muy distinta de unos a otros, puede dar avances muy poco constantes.
- Parametrización chord length – El incremento relativo del parámetro es igual a la relación de la distancia entre puntos de control (el segundo y penúltimo puntos no se

tienen en cuenta). Así pues,  $u_0 = 0$ , 
$$\Delta u_i = \frac{\|\Delta \vec{P}_i\|}{u_{L+n}}$$

Esta parametrización introduce información geométrica dentro de la lista y da, en general, mucho mejores resultados. En particular, el avance en la curva al incrementar el parámetro es mucho más constante.

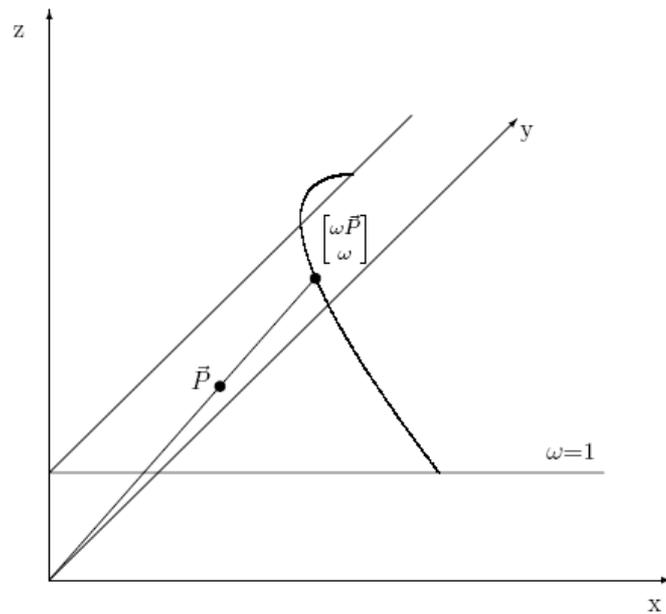
Para interpolación de puntos mediante B-splines, los algoritmos se aplicarán a los puntos a interpolar en lugar de a los puntos de control. Esto es debido a que se necesita conocer la lista de nudos, para poder calcular los puntos de control.

Cuando se desea dibujar en una pantalla gráfica o en un fichero un conjunto de entidades geométricas, la primitiva de dibujo de que se dispone en la librería gráfica es la de pintado de líneas rectas. Por tanto, para representar una curva ésta debe descomponerse en un conjunto elevado de segmentos rectos. La obtención de estos segmentos puede realizarse de dos maneras:

- Evaluar la curva a pequeños intervalos del parámetro  $t$ .
- Insertar un conjunto de nudos mediante la ecuación que nos evaluaba la curva y dibujar el polígono de control resultante. El nuevo polígono de control representará la curva con mayor precisión a medida que se vayan insertando más nudos. El número de nudos insertados en cada zona puede depender de la curvatura de la curva en la zona. Este método permite dibujar la curva con menos operaciones para igual precisión.

## 2.4. Curvas racionales. Las cónicas.

Una cónica en el espacio  $E^2$  es la proyección de una parábola en  $E^3$  sobre un plano.



**Figura 12 – Proyección de una curva polinómica cuadrática en el espacio  $E^3$  al plano  $z=\omega=1$ . La curva resultante es una cónica en  $E^2$ .**

Si se proyecta en el plano  $z=1$  con centro de proyección el origen de coordenadas, partir de un punto  $[x \ y \ z]^T$ , se obtiene la proyección  $[x/z \ y/z \ 1]^T$ . De esta manera se comprueba que una cónica, expresada como una curva de Bézier cuadrática, tiene la forma:

$$\vec{s}(t) = \frac{\omega_0 \vec{P}_0 B_0^2(t) + \omega_1 \vec{P}_1 B_1^2(t) + \omega_2 \vec{P}_2 B_2^2(t)}{\omega_0 B_0^2(t) + \omega_1 B_1^2(t) + \omega_2 B_2^2(t)}$$

Donde los  $\omega_i$  se llaman los pesos de los puntos de la curva.

Otra forma de expresar el mismo problema es considerar el punto  $[x \ y \ z]^T$ , tiene como coordenadas homogéneas al punto  $[\omega x \ \omega y \ \omega z \ \omega]^T$ , que representa a todos los puntos del hiperespacio  $E^4$  que proyectan en él. En este caso:

$$\vec{s}(t) = \sum_{i=0}^2 \vec{P}_{Hi} B_i^2(t)$$

Con  $\vec{P}_{Hi} \in E^4$ . La relación de un punto  $\vec{P}$  con su punto homogéneo asociado  $[\omega \vec{P} \ \omega]^T$ , puede observarse en la anterior figura.

## 2.5. Líneas NURBS.

Una línea NURBS es una B-spline con término racional. Las expresiones para evaluar una NURBS serán equivalentes a las de evaluación de las B-splines, añadiendo los pesos  $\omega_i$  con su evaluación, también recursiva. En el caso de operar con los puntos en coordenadas homogéneas (en  $E^4$ ), las fórmulas son idénticas.

## 2.6. Superficies NURBS.

Si se realiza la extensión de las expresiones de las líneas NURBS en dos direcciones, obtenemos las superficies NURBS. Éstas son el producto tensorial de dos líneas.

Las superficies quedarán perfectamente definidas mediante el grado y la lista de nudos en cada una de las direcciones  $u$  y  $v$ . Los puntos de control serán una cuadrícula en el espacio que en general tendrá diferente número de puntos de control según cada una de las direcciones.

La expresión general para evaluar una superficie NURBS será:

$$\vec{s}(u, v) = \frac{\sum_i \sum_j \omega_{ij} \vec{P}_{ij} N_i^m(u) N_j^n(v)}{\sum_i \sum_j \omega_{ij} N_i^m(u) N_j^n(v)}$$

La mayoría de operaciones a realizar sobre estas superficies, incluida la evaluación, pueden realizarse primero sobre un sentido, obtener como resultado una línea y aplicar la operación sobre el otro sentido. De esta manera se reduce el problema de operar sobre una superficie al problema de operar sobre un conjunto de líneas.

### 3. APLICACION DE NURBS EN EL MODELADO DE UN BUQUE.

La definición del casco de un buque es muy importante por los numerosos aspectos que engloba: diseño, hidrodinámica y construcción sobre todo. Los avances en el uso de superficies NURBS y de los programas que las manejan, han llevado a realizar un modelado tridimensional del buque, frente al tradicional uso de las dos dimensiones, y de las visiones espaciales frente a trabajar sobre el papel. El modelado sin embargo no es sencillo por la compleja topología que el casco de un buque presenta. Se describen distintas técnicas de modelado actuales, usadas por los astilleros y en la construcción de modelos a escala usados en pruebas hidrodinámicas.

El casco de un buque es una superficie compleja. Casi no existen dos buques iguales, con lo que la generación y definición de las formas es casi un trabajo artesanal, aunque el uso del ordenador posibilita el trabajo a pesar de que el diseño a mano de las formas mediante plantillas todavía sigue extendido.

Existen actualmente dos formas de modelizar el casco de un buque, mediante un modelo de alambre (Figura 13, izquierda) y mediante una o varias superficies tridimensionales (Figura 13, derecha). Si el casco del buque se corta mediante planos paralelos al eje longitudinal del mismo, se obtienen unas curvas denominadas cuadernas, que son las que aparecen en la Figura 13 izquierda. Dichas curvas pertenecen al casco del buque, y podrían formar parte de su estructura resistente, "apoyándose" en esas cuadernas el casco del buque. Si conseguimos superficies que se apoyaran en esas cuadernas, lograríamos modelizar el casco del buque, tal como se ve en la Figura 13 derecha

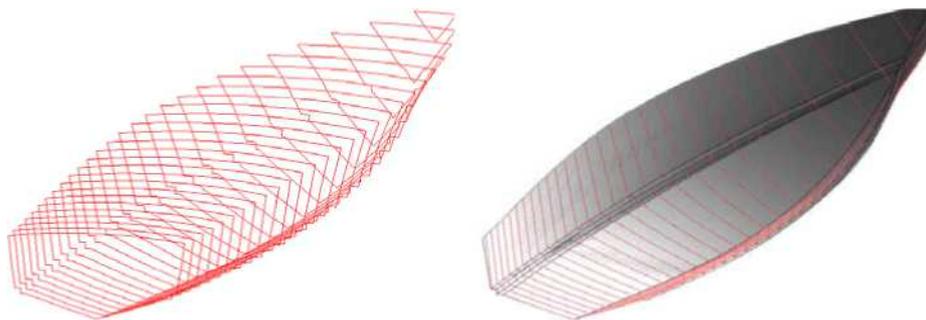
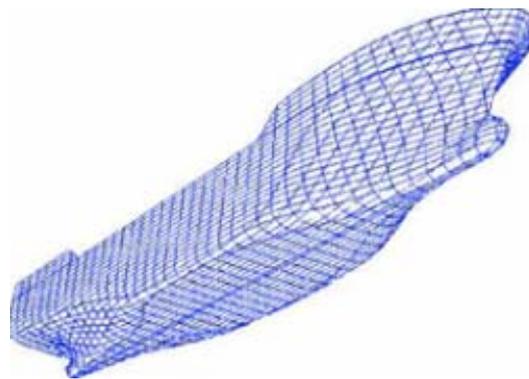


Figura 13 - Distintas modelizaciones del casco de un buque

Hasta hace unos años, la modelización del casco se basaba en modelos de alambre de las cuadernas, con una visualización eficaz, pero algo limitada del mismo; es decir que con las cuadernas del buque (normalmente 20) y el perfil (el corte del buque por su "medio"), el casco de un buque queda plenamente definido.

Si se corta el casco del buque por planos paralelos al plano de la base, se tienen unas curvas denominadas líneas de agua. Secciones perpendiculares a la vez a los planos que contienen las cuadernas y al plano base, forman unas curvas denominadas longitudinales. El modelo de alambre puede enriquecerse añadiendo a la visualización las líneas de agua y los longitudinales, como puede verse en la Figura 14 en la que se ve el modelo de alambre de un buque con bulbo de proa, geometría más compleja de la presentada en la Figura 13. La visualización en este caso es bastante buena y puede entenderse como es el bulbo de proa y la zona de popa.

Pero el uso de superficies para modelizar el casco del buque no es puramente visual. Las formas del buque han de ser "lisas" o "suaves" es decir, no presentar bollos que afectarían al comportamiento hidrodinámico del buque, aumentando la resistencia al avance. En un modelo de alambre habría que representar la curvatura de las cuadernas, o de las líneas de agua, una por una, y en caso de presentar problemas de alisado, habría que insertar más secciones de uno y otro tipo en la zona "abollada" y modificar estas secciones convenientemente para que su curvatura sea suave.



**Figura 14 - Modelización de alambre**

Si se tiene la definición de la superficie del casco, puede obtenerse de manera matemática la curvatura (media o Gaussiana) de la misma (Figura 15), detectar las zonas críticas y proceder a su alisado como veremos posteriormente. Esto es especialmente crítico en las zonas de fuerte curvatura como en el bulbo de proa. Más aún, en el caso de tener un modelo de alambre y querer obtener una cuaderna distinta de las que se tienen, la interpolación de esa curva no es fácil, sobre todo si las cuadernas presentan puntos denominados codillos, o puntos en los que se pierde la continuidad en la curvatura de las cuadernas, como ocurre en la Figura 12.

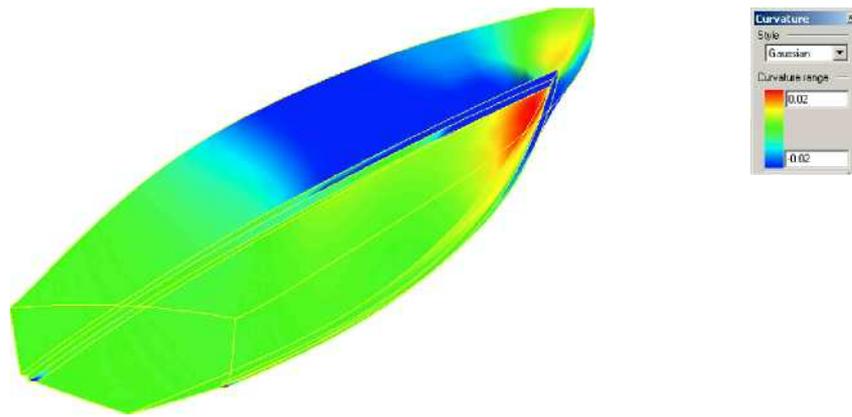


Figura 15 - Curvatura del casco de un buque

La desventaja del uso de superficies para modelizar el casco de un buque radica en que son difíciles de controlar. Mediante un modelo de alambre se tiene la certeza de que el casco pasará por los puntos de las cuadernas. Al apoyar una superficie en esas cuadernas, la sección de la superficie por el plano que contiene a la cuaderna, no dará exactamente la cuaderna (siempre se usan tolerancias), debido a las peculiaridades de las superficies que explicaremos después. Esto se mejora con la práctica del modelador y con una adecuada definición de las cuadernas sobre las que se apoyará la superficie.

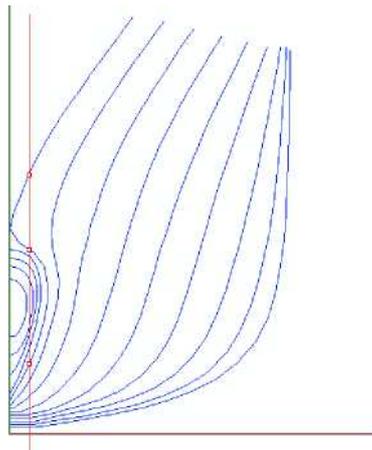
Algo a reseñar es que sin modelo de alambre, no se puede definir un modelo de superficies, pues las secciones a la superficie, que nos darían el modelo de alambre, han de ser curvas de unas determinadas características, como veremos a continuación.

### 3.1.- Superficies NURBS

Las superficies que mejor modelizan el casco de un buque son las denominadas superficies NURBS. Daremos a continuación un breve repaso geométrico a como se obtiene una superficie NURBS sin entrar demasiado en las matemáticas que las definen. Como hemos visto anteriormente, la base de estas superficies son unas curvas planas denominadas B-Splines y es imprescindible entender estas curvas para entender el funcionamiento de una superficie NURBS.

Una curva B-Spline es una curva definida a partir de un polígono de vértices denominado polígono de control, a la que se dota de un esquema de interpolación que relaciona los vértices del polígono con la curva. Hay muchas curvas que tiene asociado el mismo polígono de control.

Lo que hace únicas a las B-Splines es que la relación entre la curva y el polígono de control es una familia de polinomios o funciones base B-Splines. Las curvas B-Splines serán curvas paramétricas  $x = g(u)$ ,  $y = g(u)$ ; En el caso de un buque, el uso de coordenadas paramétricas es imprescindible pues existen cuadernas del buque que tienen más de una ordenada para la misma abscisa como pasa en las áreas cercanas a un bulbo (Figura 16). Una misma curva B-Spline estará compuesta por varios tramos de curvas de las mismas características, que serán continuas en curvatura en sus puntos de unión. El grado de estas curvas estará relacionado también con las funciones base.



**Figura 16 - Coordenadas paramétricas en las cuadernas de proa**

El parámetro  $u$  crece monótonamente de un extremo a otro de la curva, se adimensionaliza entre 0 y 1 y no es un indicativo de la distancia a lo largo de la curva, aunque puede establecerse una relación matemática entre la distancia y  $u$ . El precio que se paga al usar coordenadas paramétricas es que si queremos saber qué valor  $y$  corresponde a un valor  $x$ , hay que obtener previamente el valor  $u$ , y esto puede no ser una tarea simple.

### **3.1.1. Nudos y puntos de control**

En la Figura 17 izquierda, los vértices del polígono de control de una B-Spline que simula una cuaderna de la zona del bulbo de un buque, aparecen numerados del 0 al 5 y las líneas a puntos que los unen forman el polígono de control. La ligazón entre la posición de los vértices y la forma de la curva la dan las ya mencionadas funciones base. Como puede verse, la forma del polígono de control y la forma de la curva son parecidas, y el polígono de control llega a ser un esquema de la curva, llegándose con algo de práctica a intuir bastante bien como es la curva a partir de su polígono de control. Moviendo los vértices del polígono, o puntos de control, se cambiaría la forma de la curva.

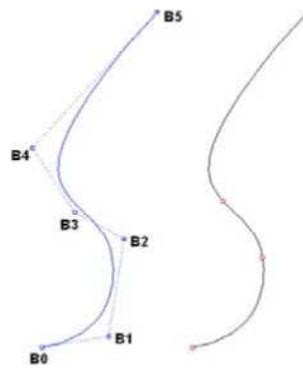


Figura 17 - Puntos de control y nudos para un B-Spline

Una curva B-Spline lleva asociado además de un polígono de control, una serie de nudos, cuya posición marca la posición de los vértices del polígono de control. En la Figura 17 derecha, los nudos se hallan marcados por puntos. Estos nudos suelen colocarse equiespaciados en  $u$  a lo largo de la curva, es decir que los puntos tramos de la Figura 17 acabarían y comenzaría para valores de  $u = 0$ ,  $u = 1/3$ ,  $u = 2/3$  y  $u = 1$ .

Existe un significado matemático y curiosamente otro físico para estos nudos: el matemático nos dice que estos nudos marcan el principio y final de los tramos de curva que componen la B-Spline, en la Figura 17 tres tramos; el físico ve la relación entre estos puntos y los puntos en los que se apoyaban unos pesos cuando se dibujaban curvas con un junquillo de plástico o metal. Cambiando la posición de apoyo de los pesos, cambiaba la forma de la curva para adaptarse mejor a la forma de los puntos por los que tenía que pasar.

Hay que distinguir entre orden y grado de un B-Spline. Grado es el mayor exponente de los polinomios que componen las funciones base. Orden es el grado más uno. En la Figura 17 se presenta un B-Spline cúbica, es decir sus funciones base son de la forma  $f(x) = a \cdot x^3 + b \cdot x^2 + c \cdot x + d$ , luego será de grado 3 y orden 4.

Un dato muy importante a considerar es que una curva B-Spline pasa por los extremos del polígono de control y que en estos puntos extremos  $u = 0$  y  $u = 1$  las tangentes coinciden con la dirección de los lados del polígono de control en estos puntos. Esto es debido a la presencia de múltiples nudos en los extremos  $u = 0$  y  $u = 1$  de un B-Spline.

### 3.1.2.- Propiedades de los nudos

El número de nudos es igual al número de puntos de control más el orden de la curva. Así en la Figura 17 debería de haber 10 nudos y en la Figura 18, 8 nudos.

Para definir la posición de estos nudos se usa la coordenada  $u$  de los mismos. En la Figura 18 se tiene una B-Spline de grado 3, y su vector de nudos sería  $[0, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 1]$  es decir que habría nudos en el principio y final de la curva, tres en el principio y tres en el final puesto que los puntos primero y último del intervalo son nudos fantasmas o imaginarios, que sólo tienen sentido para la definición matemática de la curva. Los nudos por simplicidad, suelen tomarse como se ha mencionado ya, equiespaciados en el parámetro  $u$  a lo largo de la curva. En la Figura 17 el vector de nudos sería  $[0, 0, 0, 0, 1/3, 2/3, 1, 1, 1, 1]$ .

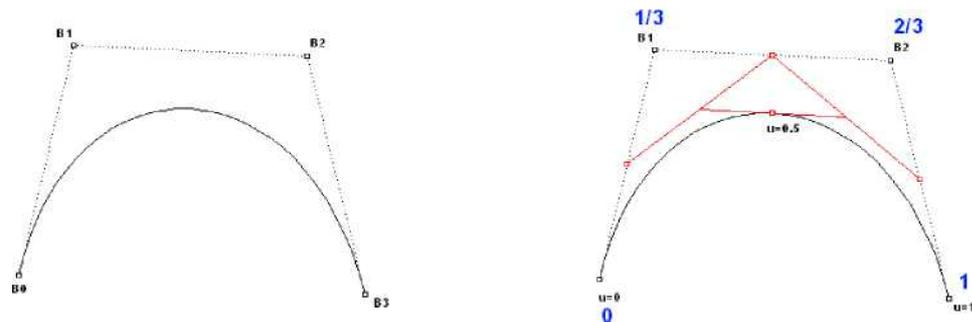


Figura 18 - Obtención de puntos en función del parámetro

Viendo la Figura 18 izquierda, con una cúbica tenemos 4 posibles condiciones a imponer, en este caso que pase por dos puntos,  $B_0$  y  $B_3$  y que cumpla que las tangentes en estos puntos sean las que marque el polígono de control, por lo que con un solo tramo se puede seguir el polígono de control dado y no habrá nudos en el interior de la B-Spline. Hemos visto que moviendo los puntos de control se cambia la curva, debido a la ligazón entre polígono y curva por las funciones base, pero si en la Figura 18 se mueve el vértice  $B_1$  ¿En qué puntos de la curva, que denominaremos puntos de edición, se conseguirá el mayor efecto? La intuición dice que en un punto cercano al vértice y es cierto. Como analogía física se puede imaginar que existen muelles entre los puntos de control y puntos de la curva. Un extremo del muelle estaría en un punto de control, el otro en el punto de edición correspondiente sobre la curva.

Para hacerlo con rigor matemático se usa el vector de nudos. Prescindiendo de los nudos fantasma, se toman series de puntos de dicho vector cuyo tamaño sea el grado de la curva, en este caso 3, y se promedia la suma de los componentes de la serie. Es decir que para el punto  $B_0$  se toma  $(0, 0, 0)$  y su promedio es 0, luego este punto influirá en  $u = 0$  que es el origen.  $B_1$  toma  $(0, 0, 1)$  y promedia y afecta en  $u = 1/3$ ,  $B_2$  toma  $(0, 1, 1)$  y afecta en  $u = 2/3$ , y  $B_3$  toma  $(1, 1, 1)$  y afecta en  $u = 1$ . En el otro ejemplo de la Figura 17,  $B_0$  da  $u = 0$ ,  $B_1$  da  $u = 1/9$ ,  $B_2$  da  $u = 1/3$ ,  $B_3$  da  $u = 2/3$ ,  $B_4$  da  $8/9$  y  $B_5$  da  $u = 1$ .

La determinación de que punto de una B-Spline tiene un parámetro  $u$  dado se hace automáticamente una vez se tiene la ecuación, y puede hacerse también de forma geométrica. Decir que estas curvas nacen no de una definición matemática, sino geométrica con Splines de grado 2 (cónicas fáciles de dibujar) a las que posteriormente se le dio el tratamiento matemático que se usa en la actualidad. Para ello, supongamos que en la Figura 18 derecha queremos obtener el punto  $u = 0.5$ . Para ello se dividen los lados del polígono de control en dos partes iguales (si quisiéramos  $u = 2/5$ , se dividirían en 5 y se tomarían dos divisiones) y se unen las divisiones correspondientes entre sí. Vuelve a realizarse la operación uniendo los puntos medios y donde este segmento corte a la curva, que será en el punto medio de dicho segmento, se tiene el punto de  $u = 0.5$  de la curva. Como se ve se trata de una interpolación lineal, sencilla desde el punto de vista geométrico pues se puede hacer con herramientas simples de dibujo, y rápido desde el punto de vista computacional. El número de interpolaciones coincide con el grado de la curva, es decir en Splines cúbicos, 3 interpolaciones, dos sobre lados del polígono de control, y la tercera sobre el segmento que una las divisiones correspondientes de estos lados.

### **3.1.3.- Inserción de nudos múltiples**

Se ha visto que una curva B-Spline pasa por los extremos del polígono de control, que es tangente al lado del polígono de control en esos puntos, y que en estos extremos existen tres nudos coincidentes. De la misma forma (Figura 19), si en un punto cualquiera de la curva B-Spline se colocan  $x$  nudos coincidentes, tal que  $x$  sea igual al grado de la curva, el polígono de control pasará por ese punto y la tangente en él llevará la dirección del polígono de control. En la Figura 19 se va viendo como al ir insertando nudos uno a uno, aumenta el número de puntos de control, y como tras haber insertado tres nudos coincidentes uno de los puntos de control, B3 acaba coincidiendo con P.

Se cumple además algo muy interesante: los puntos de control B2, B3 y B4 están alineados. Siempre que se defina una B-Spline tal que tenga  $x$  puntos de control alineados, con  $x = \text{grado}$ , tres en este ejemplo,

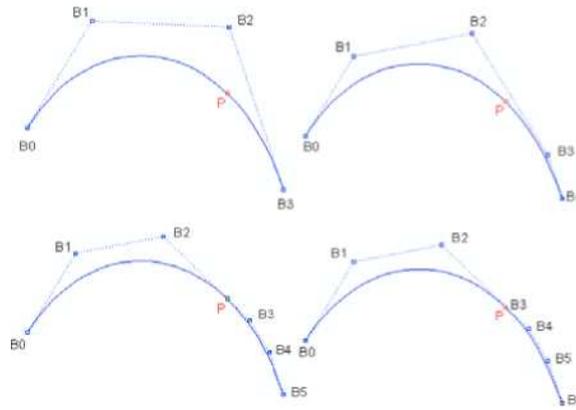


Figura 19 - Inserción múltiple de nudos

La curva resultante será tangente a la línea definida por esos  $x$  puntos de control alineados, pero no tiene por qué pasar uno de estos. Si queremos que pase por uno de estos tendremos que elegir los tres puntos de forma que uno de ellos sea el punto medio de los otros dos, o bien poner nudos de forma adecuada.

### 3.1.4.- Peso de los puntos de control

Cada punto de control lleva asociado un valor numérico denominado peso. Por defecto se trabaja con pesos igual a la unidad, pero matemáticamente puede cambiarse la forma de una curva variando los pesos de los puntos de control. Non Uniform significa que estos pesos pueden variar de un punto de control a otro.

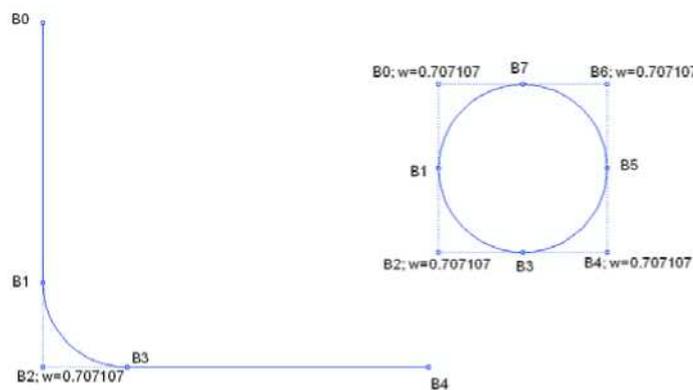


Figura 20 - Pesos no uniformes

En el caso de los buques esto es muy útil pues hay zonas circulares (pantoque, Figura 20) que puede ser fácilmente modelizadas con esta propiedad. En general un círculo puede ser generado mediante una curva NURBS, dando los pesos no uniformes adecuados, como se ve en la Figura 20.

### 3.2. Curvas B-Spline en un buque

Por las características de las formas de un buque, las curvas B-Spline de grado 3 funcionan bien en cualquier buque. Las zonas rectas y el pantoque pueden modelarse adecuadamente con las técnicas descritas en el punto anterior con una adecuada disposición de nudos y puntos de control. En la Figura 21 aparecen algunas cuadernas modelizando los puntos reales (presentados como círculos) mediante B-Splines. Con práctica puede reducirse el número de puntos de control necesarios para reproducir la cuaderna (Figura 21, derecha).

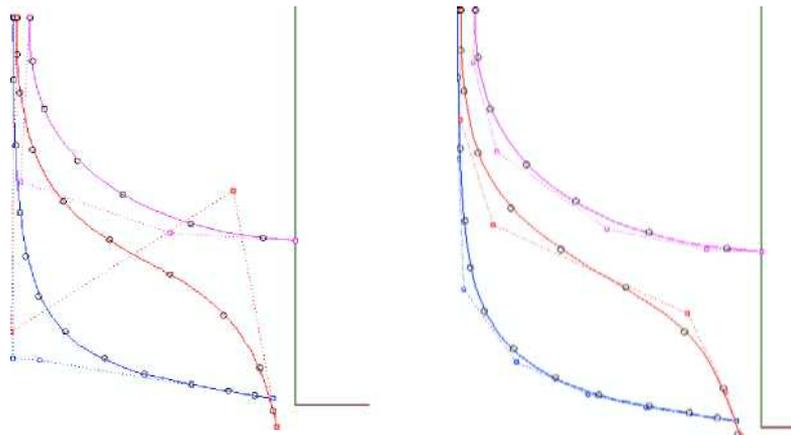


Figura 21 - Cuadernas de un buque modelizadas mediante B-Splines

### 3.3.- De curvas a superficies NURBS

Con lo visto hasta ahora sobre curvas, cuesta poco extrapolar a superficie. Si antes había un polígono de control, y un solo parámetro  $u$ , ahora se hablará de red de puntos de control y de dos parámetros  $u$  y  $v$ . El parámetro  $u$  irá de "arriba a abajo" y el parámetro  $v$  de popa a proa. En una superficie pueden dibujar curvas isoparamétricas, (Figura 22 derecha) que muestran las zonas que tienen  $u$  (curvas longitudinales) o  $v$  (transversales) constante, y de las que viendo la curvatura puede verse la suavidad del casco.

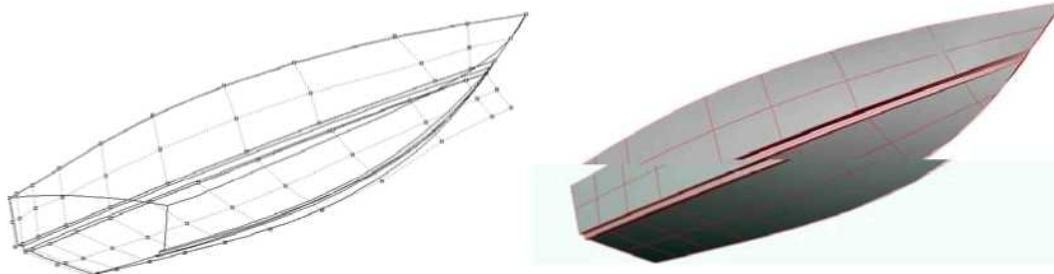


Figura 22 - Malla e Isoparamétricas del casco de un buque

Si para cada cuaderna había puntos de control, la malla tridimensional (Figura 22 izquierda) que tenga esos puntos de control se modelizará de forma adecuada al casco del buque, salvo en los extremos en los que habrá que mover los puntos para que la superficie tenga el mismo perfil de crujía que el buque.

Como en el caso de las curvas que pasaban por los extremos del polígono de control, la superficie tendrá por bordes las curvas formadas por los extremos de la red (por ejemplo la línea de cubierta). Mediante la inserción de nudos puede forzarse a la superficie a pasar por una determinada línea que no sea uno de los extremos de la superficie, como pueden ser los codillos de la Figura 22.

Moviendo los puntos de control puede conseguirse un mejor alisado (Figura 23 izquierda, en la zona de popa presenta un "bollo") de la superficie o modificar la misma para cambiar su forma si es necesario.

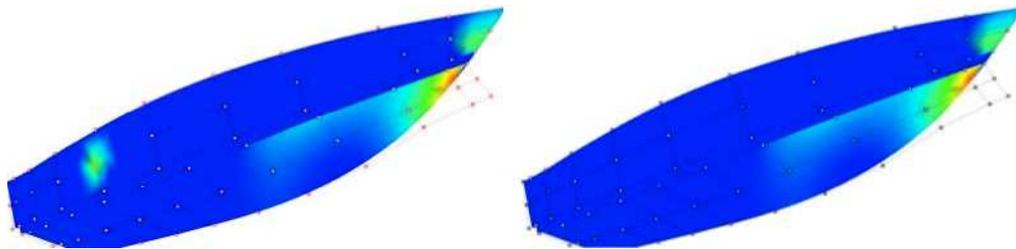


Figura 23 - Alisado mediante puntos de control

Se pueden mover puntos de control según la dirección de la normal, producto vectorial de las tangentes según  $u$  y  $v$  que se obtienen matemáticamente. Puede además jugarse con el peso de los puntos de control para simular partes cilíndricas del buque. Es importante también que las superficies puedan ser sometidas a transformaciones afines (escalar, girar,...) sin que pierdan sus propiedades, es decir que si la superficie es suave y se transforma, su transformada lo seguirá siendo.

Superficies complejas como los bulbos u otras zonas de fuerte curvatura, han de ser divididos en superficies múltiples (parches), que se intenta sean parches desarrollables para facilitar la construcción.





# **PARTE III: FEM**

# **Método de los Elementos Finitos**



## 1. INTRODUCCIÓN

Es comúnmente formulado que las estructuras, en términos generales, se dividen en: discretas o continuas. Las primeras son aquellas formadas por varios elementos claramente diferenciados. La principal característica de éstas es que se puede calcular su deformación de manera exacta mediante un número finito de elementos.

Por contra, en las estructuras continuas no es posible separar el sistema en un número de elementos finito. ¿Por qué? Porque el número de elementos de unión entre la propia estructura es infinito.

Debido a que en la ingeniería es fácil encontrarse con multitud de estructuras continuas se hace necesario poder definir un método para poder realizar un análisis de este tipo de estructuras.

En base a estos nace el método de los Elementos Finitos. Hasta la llegada de este método las estructuras continuas se resolvían de manera analítica, pero esto no resulta práctico cuando el sistema de estudio es complejo.

El concepto del método de los Elementos Finitos que se debe comprender para poder llegar a entender el método es el problema de la “discretización” mediante el cual se transforma un sistema continuo a uno discreto mediante las funciones de interpolación.

Antes de comenzar a describir el método, se cree conveniente realizar una reseña histórica de modo introductorio al método.

El método de Elementos Finitos nace del desarrollo del método de Ritz de análisis numérico por parte de Richard Courant en 1943. A partir de ese momento Turner, Clough, Martin y Topp definen más ampliamente el análisis numérico centrado en la rigidez y la deformación de estructuras complejas.

Con el paso de los años y con la aparición de la computadora se pueden resolver grandes sistemas de ecuaciones que hasta ese momento eran muy complejos de resolver (Navier, Lagrange, Cauchy).

El siguiente paso condujo a los investigadores a reducir el tiempo de cálculo. Fue en ese momento donde el desarrollo de algoritmos más eficientes tomó importancia.

El último gran cambio surgió con el uso de los ordenadores personales ya que es entonces cuando se extiende el desarrollo de programas comerciales de análisis basados en el método de Elementos Finitos.

## 2. MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS (FEM)

La idea general del método de los elementos finitos es la división de un continuo en un conjunto de pequeños elementos interconectados por una serie de puntos llamados nodos.

Las ecuaciones que rigen el comportamiento del continuo regirán también el del elemento.

De esta forma se consigue pasar de un sistema continuo (infinitos grados de libertad), que es regido por una ecuación diferencial o un sistema de ecuaciones diferenciales, a un sistema con un número de grados de libertad finito cuyo comportamiento se modela por un sistema de ecuaciones, lineales o no.

En cualquier sistema a analizar podemos distinguir entre:

- Dominio. Espacio geométrico donde se va a analizar el sistema.
- Condiciones de contorno. Variables conocidas y que condicionan el cambio del sistema: cargas, desplazamientos, temperaturas, voltaje, focos de calor,...
- Incógnitas. Variables del sistema que deseamos conocer después de que las condiciones de contorno han actuado sobre el sistema: desplazamientos, tensiones, temperaturas,...

El método de los elementos finitos supone, para solucionar el problema, el dominio discretizado en subdominios denominados elementos. El dominio se divide mediante puntos (en el caso lineal), mediante líneas (en el caso bidimensional) o superficies (en el tridimensional) imaginarias, de forma que el dominio total en estudio se aproxime mediante el conjunto de porciones (elementos) en que se subdivide. Los elementos se definen por un número discreto de puntos, llamados nodos, que conectan entre sí los elementos. Sobre estos nodos se materializan las incógnitas fundamentales del problema.

En el caso de elementos estructurales estas incógnitas son los desplazamientos nodales, ya que a partir de éstos podemos calcular el resto de incógnitas que nos interesen: tensiones, deformaciones,.... A estas incógnitas se les denomina grados de libertad de cada nodo del modelo. Los grados de libertad de un nodo son las variables que nos determinan el estado y/o posición del nodo.

El método de elementos finitos convierte las condiciones del equilibrio en un sistema de las ecuaciones algebraicas lineares para las dislocaciones nodales.

Una vez que se solucionen las ecuaciones, uno puede encontrar las tensiones y las tensiones reales en todos los elementos. Rompiendo la estructura en un número más grande de elementos más pequeños, las tensiones se aproximan a alcanzar el equilibrio con las cargas aplicadas. Por lo tanto un concepto importante en el uso de los métodos de elemento finito es éste, generalmente acercamientos finitos de un modelo del elemento la solución verdadera al problema solamente pues se aumenta la densidad del elemento.

Hay un número de pasos en el procedimiento de la solución usando métodos de elementos finitos. Todos los paquetes finitos del elemento requieren al usuario pasar con estos pasos en una forma u otra:

1. Definición de la geometría. Primero se define la geometría de la estructura que se analizará.
2. Definición de las características del material y tipo de elemento. En un análisis elástico de un sólido isotrópico éstos consisten en el módulo de Young y el cociente del Poisson del material.
3. Discretizar el objeto. La estructura se quebrará en elementos pequeños. Esto implica el definir los tipos de elementos en los cuales la estructura esté rota, así como especificar cómo la estructura será subdividida en elementos (cómo será endentada). Esta subdivisión en elementos puede ser suministrada por el usuario o, con algunos programas de elementos finitos del elemento que pueden ser elegidos automáticamente en la geometría de la estructura (automeshing).
4. Aplicar las condiciones límite y las cargas externas, se especifican las condiciones límite y las cargas externas.
5. Generar una solución, la solución se genera basada previamente en los parámetros de entrada.
6. Post-procesador, basado en las condiciones iniciales y las cargas aplicadas, se vuelven los datos después de que se procese una solución. Estos datos se pueden ver en una variedad de gráficos.

7. Refinar el acoplamiento, los métodos de elemento finito son métodos aproximados y, la exactitud de la aproximación aumenta generalmente con el número de los elementos usados.
8. El interpretar la solución, este paso es quizás el paso más crítico del análisis porque requiere el conocimiento fundamental del uso del diseñador para entender la salida del modelo.

## 2.1. Método Matemático

Considerando un sistema continuo elástico sometido a unas fuerzas superficiales  $\{t\} = \{t_x, t_y, t_z\}^T$  y a unas fuerzas por unidad de volumen  $\{X\} = \{X_x, X_y, X_z\}^T$  (las fuerzas por unidad de superficie podrían ser presiones y el peso propio sería una fuerza por unidad de volumen). El vector de desplazamiento será de la forma  $\{u\} = \{u, v, w\}^T$ . Las deformaciones correspondientes a estos desplazamientos serán:

$$\{\varepsilon\} = \{\varepsilon_{xx}, \varepsilon_{yy}, \varepsilon_{zz}, \gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}\}^T$$

Además, las tensiones debidas a estas deformaciones son:

$$\{\sigma\} = \{\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}\}^T$$

Las ecuaciones de equilibrio para un elemento diferencial de volumen se escriben de la forma:

$$\nabla\{\sigma\} + \{X\} = \mathbf{0}$$

El vector  $\{X\}$  incluye las fuerzas de inercia  $\{X\} = \{X\} - \rho\ddot{u}$ , es decir, consideramos las fuerzas de inercia como fuerzas por unidad de volumen. Multiplicando esta ecuación por una función de ponderación  $\{\delta u\}$  e integrando:

$$\int_V \{\delta u\}^T \nabla\{\sigma\} dv + \int_V \{\delta u\}^T \{X\} \cdot dv = \mathbf{0}$$

Paralelamente a todo ello, siendo:

$$\nabla(\mathbf{a}, \mathbf{b}) = \mathbf{a}\nabla\mathbf{b} + \mathbf{b}\nabla\mathbf{a}$$

Y el teorema de la divergencia:

$$\int_V \nabla \mathbf{a} \, dv = \int_S \mathbf{a} \mathbf{n} \, ds$$

Que por tanto nos permite formular:

$$\int_V \mathbf{a} \nabla \mathbf{b} = \int_S ab \mathbf{n} \, ds - \int_V \mathbf{b} \nabla \mathbf{a} \, dv$$

Esta última expresión es conocida como la fórmula de Green e introduciéndola en la expresión antes obtenida, podemos reescribir de la siguiente manera:

$$-\int_V \nabla \{\delta u\}^T \{\sigma\} \, dv + \int_S \{\delta u\}^T \{\sigma\} \mathbf{n} \, ds + \int_V \{\delta u\}^T \{X\} \, dv = 0$$

Si se asocia la función de ponderación  $\{\delta u\}$  con un desplazamiento virtual, el operador  $\nabla$  actuando sobre él será una deformación virtual:

$$\{\delta \varepsilon\} = \nabla \{\delta u\}$$

Sabiendo que el equilibrio en el contorno exige que se cumpla la relación  $\{\sigma\} \cdot \{n\} = \{t\}$  y sustituyéndolo en la ecuación antes obtenida:

$$-\int_V \{\delta \varepsilon\}^T \{\sigma\} \, dv + \int_S \{\delta u\}^T \{t\} \, ds + \int_V \{\delta u\}^T \{X\} \, dv = 0$$

En la relación anterior es posible introducir la ley de comportamiento de material mediante la matriz elástica con las propiedades de éste,  $[C]$ , de forma que:

$$\{\sigma\} = [C] \{(\varepsilon) - \{\varepsilon_0\}\} + \{\sigma_0\}$$

Siendo los vectores  $\{\varepsilon_0\}^T$  y  $\{\sigma_0\}^T$  las deformaciones y las tensiones iniciales respectivamente. Introduciendo la última expresión, suponiendo tensiones y deformaciones iniciales nulas, en la anteriormente obtenida:

$$\int_V \{\delta \varepsilon\}^T [C] \{\varepsilon\} \, dv = \int_V \{\delta u\}^T (\{X\} - \rho \{\bar{u}\}) \, dv + \int_S \{\delta u\}^T \{t\} \, ds$$

Esta última ecuación permite relacionar el sistema de cargas real y esfuerzos con el virtual de desplazamientos y se denomina Principio de los Trabajos Virtuales (PTV).

Una vez discretizada la estructura continua, se debe tomar un conjunto de funciones (funciones de interpolación) que definan de manera única el campo de desplazamientos dentro del elemento en función de los desplazamientos en los nodos del mismo:

$$\{u(x,y,z)\} = [N(x,y,z)] \{U\}$$

Siendo  $\{U\}$  el vector con los desplazamientos nodales. Una vez conocidos los desplazamientos en todos los nodos se determinan las deformaciones:

$$\{\varepsilon\} = [D] \{u\}$$

Donde  $[D]$  es el operador diferencial que depende del problema en estudio. Sustituyendo el valor del desplazamiento se obtiene:

$$\{\varepsilon\} = [D] [N] \{U\}$$

Donde se obtiene el valor de las deformaciones en función de los desplazamientos nodales. Sustituyendo la ecuación anterior en la expresión del PTV obtenemos que:

$$-\int_V [B]^T [C][B] \{U\} dv + \int_V [N]^T (\{X\} - \rho [N] \{\ddot{U}\}) \{t\} dv + \int_S [N]^T \{t\} ds = \mathbf{0}$$

Reordenando esta expresión, se puede definir un sistema de la forma:

$$[M] \{\ddot{U}\} + [K] \{U\} = \{P\}$$

Donde se pueden definir:

Matriz de masa:

$$[M] = \int_V [N]^T \rho [N] dv$$

Matriz de rigidez:

$$[K] = \int_V [B]^T [C][B] dv$$

Matriz de cargas nodales:

$$\{P\} = \int_V [N]^T \{X\} dv + \int_S [N]^T \{t\} ds$$

Las anteriores matrices se calculan para cada uno de los elementos. Realizando una transformación de coordenadas a las llamadas coordenadas unitarias del elemento, las matrices quedan en función de parámetros puramente geométricos y se facilita la integración numérica. Antes de realizar el ensamblaje de todas las ecuaciones hay que realizar la

transformación a coordenadas globales con el objetivo de tener todas las matrices formuladas respecto al mismo sistema de coordenadas.

Una vez que se dispone de las matrices y vectores elementales en coordenadas globales su acoplamiento en el sistema puede realizarse según el llamado método directo, por el que sumamos en cada posición nodal la contribución realizada por los distintos elementos.

Antes de obtener la solución al sistema de ecuaciones planteado es necesario imponer las condiciones de desplazamientos nodales que sean conocidas. El sistema resultante se puede subdividir en dos términos: uno que contenga los desplazamientos impuestos y otro las incógnitas. Resolviendo este sistema tendremos la solución. Una vez conocidos los desplazamientos nodales es posible calcular otro tipo de magnitudes (deformaciones, tensiones, etc.).

### **3.- FEM EN EL ANÁLISIS DE ESTRUCTURAS NAVALES**

A continuación se pretende presentar la aplicación de metodologías modernas en el análisis de estructuras navales mediante el método de elementos finitos.

El método de elementos finitos constituye una herramienta habitual para desarrollar diferentes tipos de problemas en computador, con lo cual se ha logrado estudiar eficientemente el comportamiento de una embarcación, tanto estática como dinámicamente, y con esto tener la capacidad de predecir concentración de tensiones, deformaciones, frecuencias naturales y modos de vibración de partes específicas de la estructura. Entre las aplicaciones del Método de Elementos Finitos (FEM) en el campo de la ingeniería naval se destaca: Análisis modal de embarcaciones, cargas de impacto de olas, análisis de estado de cargas, verificación de propiedades mecánicas de materiales compuestos, optimización hidrodinámica de yates, etc.

Con la alta competitividad de los astilleros del mundo, la reducción de tiempo y coste en el diseño naval es fundamental para desarrollar proyectos de cualquier envergadura y con este método se logra una agilización continua en el proceso de ingeniería básica de un proyecto. Sin embargo las aplicaciones a estructuras navales particulares no son comunes en los astilleros.

Algunas de las aplicaciones existentes en el mercado son usadas para realizar el escantillonado previo de los refuerzos en las diferentes situaciones del buque en la mar de quebranto y arrufo.

En un buque de nueva construcción, la cantidad de información que se maneja es muy elevada, gestionándose íntegramente en dos dimensiones hasta alcanzar la última fase de proyecto previa a la fabricación; donde ya empieza a ser común realizar el desarrollo del acero en tres dimensiones. Por lo tanto, durante la evolución del proyecto no se dispone en ningún momento de una representación 3D del buque completo, lo que obliga en numerosas ocasiones a realizar modificaciones una vez que el buque está ya construido, elevando de esta manera el coste de su fabricación y retrasando los tiempos de entrega.

Dichas modificaciones se podrían evitar con un modelo 3D, que permitiera la visualización simultánea de todos sus componentes, tal y como sucede cuando ya está construido.

En otros campos del diseño previo del buque, como son el diseño de las líneas de agua, se afirma que para dichas condiciones el buque avanzando a velocidad uniforme está sujeto a sollicitaciones de varios tipos. La resistencia al avance en la velocidad de servicio determina la potencia de la planta propulsora, y por lo tanto, el consumo de combustible, uno de los factores de influencia determinante en la economía en servicio del buque.

La minimización de la resistencia al avance y en consecuencia de la potencia propulsora, así como el asegurar que la planta propulsora sea capaz de entregar una potencia suficiente para cumplir los citados requisitos; son por lo tanto, una de las funciones más importantes de la oficina de proyectos y aspectos de importancia crucial a nivel de diseño del buque.

La resistencia total, viene determinada por la acción de las fuerzas hidrodinámicas que dependen de una serie de contribuciones individuales entre las que se pueden incluir las siguientes: la resistencia del casco desnudo, la resistencia de los apéndices, las pérdidas de la maquinaria y de los ejes, el rendimiento propulsivo, el ensuciamiento del casco y el entorno medioambiental.

De las anteriores, la contribución más importante se debe a la resistencia del casco desnudo, que depende principalmente de las formas del buque. La optimización de las formas del buque en el sentido de minimización de la resistencia al avance, es un problema de gran complejidad, no sólo por las muchas limitaciones prácticas impuestas por las especificaciones del proyecto

(dimensiones principales, peso muerto, capacidad de carga, costes de construcción....) y otros requisitos como los criterios de estabilidad, comportamiento en la mar y maniobrabilidad, sino también por la dificultad de determinar un coste operacional mínimo, dadas las diferentes condiciones de explotación que se pueden dar.

En efecto, la optimización planteada es difícilmente aplicable en la práctica, debido a la dificultad para cuantificar el efecto de todos los parámetros involucrados, y cómo no, por la limitación del tiempo de diseño que impone la realidad, y por ello se realiza una simulación con un modelo a escala en el canal de experiencia.

Por esta razón el problema, se suele abordar de manera simplificada.

La simplificación más usual para abordar el objetivo propuesto, es considerar por separado el comportamiento del buque en aguas tranquilas y su respuesta, en olas.

La optimización hidrodinámica de las formas del casco para los buques mercantes típicos, se dirige principalmente a la minimización de la potencia requerida en aguas tranquilas; que es en la práctica, un límite inferior de la potencia propulsora. Es habitual suponer que el estado de la mar actúa incrementando la resistencia al avance. Este procedimiento lleva a un grado de acercamiento suficiente al diseño óptimo en condiciones de operación, y de paso asegura, que se alcance la velocidad mínima contractual en aguas tranquilas.

Para esta aplicación es también bastante usado el FEM en los diseños de carenas.

En la parte final del presente PFC se verán aplicaciones reales de hasta lo aquí expuesto. Pero, de momento, vamos a tratar de realizar una explicación de cómo funcionan los programas que aplican en FEM.

La estructura básica de los programas de aplicación del elemento finito al cálculo directo de estructuras, consta de tres módulos principales:

**Pre-proceso:**

Etapas en la cual se define el problema a resolver mediante las siguientes etapas:

Selección del Tipo de elemento finito, dentro de las librerías de los software se encuentra una gran variedad de tipos de elementos uni-, bi- y tridimensionales, con los cuales simulamos barras, vigas, cáscaras, placas, y elementos sólidos, etc...

Selección de las características geométricas y mecánicas del material. En esta etapa son asignados alturas, momentos de inercia, espesores, áreas transversales, módulos de elasticidad, coeficiente de Poisson, etc, para cada tipo de elemento que del modelo.

Creación de la geometría del modelo, que debe representar lo más fielmente al modelo físico en estudio, obligando a la herramienta informática en uso a presentar facilidad de generación de geometrías complejas tales como partes curvas del casco, en general todo parte de la base de generar una serie de puntos (nodos) que componen el modelo, definido en un sistema de coordenadas ya establecido, para posteriormente generar superficies y luego sólidos, dependiendo del modelo, ya que en algunos casos basta solo con superficies.

### **Solución:**

Durante la fase de solución se asigna el tipo de análisis aplicado a la estructura, las condiciones de contorno del modelo, las cargas aplicadas, y por último se procede a resolver los sistemas de ecuaciones resultantes de la etapa anterior. Dentro de los tipos de análisis podemos destacar:

Análisis estático. Determina desplazamientos, tensiones, deformaciones, etc... en la estructura analizada.

Análisis modal, que incluye la determinación de frecuencias naturales y modos de vibración.

Análisis armónicos, usado para determinar la respuesta de una estructura sometida a cargas que varían armónicamente en el tiempo.

Análisis de pandeo, usado para calcular cargas críticas y deformaciones debidas a pandeo.

En el caso de las condiciones de contorno, éstas son restricciones de desplazamientos y rotaciones que se aplican a la matriz de rigidez completa resultante, la cual relaciona las cargas aplicadas al sólido elástico con los desplazamientos.

### **Post-proceso:**

La etapa de post-proceso e interpretación de los resultados numéricos obtenidos en la etapa de solución es de gran importancia, ya que no necesariamente los resultados obtenidos son correctos. Dentro de la función del ingeniero, la acertada interpretación de la enorme cantidad de información que entregan las herramientas informáticas será preponderante a la hora de diferenciar un buen diseño de otro realizado deficientemente.

La aplicación correcta del FEM requiere desarrollar una estrategia global para la creación del modelo, tener un conocimiento a priori de la estructura a analizar y comparar el comportamiento de la estructura idealizada con el comportamiento esperado de la estructura real.





# **PARTE IV: MODELADOR DE SUPERFICIES vs MODELADOR DE SÓLIDOS**



## 1. INTRODUCCIÓN

Desde una perspectiva genérica, se puede decir que existen dos tipos de modeladores, de sólidos y de superficies. Cada uno de ellos goza de ventajas y de desventajas.

Los modeladores de sólidos hoy en día son muy intuitivos, siempre se puede trabajar con la pieza como es o un esbozo de la misma, y bien con operaciones booleanas o por medio de la generación de superficies poder definir la misma.

Siempre se tiene en cada etapa la pieza, con sus propiedades en cuanto a forma geométrica y a volumen, como centros de gravedad, inercias, etc. Existe el concepto topológico de fuera y dentro de la pieza.

Las variaciones que se puedan producir son más costosas salvo que se utilice modeladores de sólidos paramétricos, que permiten ciertos cambios mediante los parámetros, normalmente dimensiones, o ciertas funciones en las que se usan dichos parámetros. Ahora bien, por otro lado limita los grados de libertad ya que solo se puede modificar las dimensiones en el sentido que se han creado y con la referencia con la que se ha creado; Por ejemplo, en un paralelepípedo realizar un par de agujeros centrados en una de las caras del mismo, si la referencias son las caras perpendiculares a la de base o si la referencia es la distancia entre centros, el comportamiento al cambio es bastante diferente.

Por otro lado, como se ha comentado si se hace el proceso mediante operaciones booleanas, la modificación se tiene que realizar, en ciertos casos, en los sólidos “padres” de los cuales sale el sólido resultante.

La gran ventaja de los modeladores de superficies es la gran capacidad para general cualquier forma (topológicamente correcta). Y por supuesto la flexibilidad en los cambios (de formas), comparándolo con los modeladores de sólidos, estos se realizan directamente sobre las superficies.

También hay que tener en cuenta, de una manera paralela a la parametrización de los sólidos, la asociatividad en las superficies, que de alguna manera permite volver a la función que creó la superficie y cambiar cualquier valor de todos los parámetros que la definen, así como mantener las relaciones que se han establecido entre los distintos elementos que la componen.

De alguna manera también se establece una relación “padre-hijo” y un histórico igual que en el caso de la parametrización de los sólidos.

MODELADOR DE SÓLIDOS		MODELADOR DE SUPERFICIES	
VENTAJAS	DESVENTAJAS	VENTAJAS	DESVENTAJAS
INTUITIVO	POCO FLEXIBLE GEOMETRICAMENTE	MUY FLEXIBLE GEOMETRICAMENTE	POCO INTUITIVO
PARAMETRIZABLE	MANEJO CORRECTO DEL HISTORICO	ASOCIATIVO	NO PARAMETRIZABLE
RECONOCIMIENTO DE CARACTERISTICAS	SOLO MANEJO DE MATEMATICA NURBS	DIFICIL RECONOCIMIENTO DE CARACTERISTICAS	MANEJO DE NURBS Y BEZIER

Tabla 1 – Comparativa de ventajas y desventajas de los modeladores de sólidos y de los modeladores de superficies.

## 2. MATEMÁTICA BEZIER vs NURBS. El polígono de control de las superficies y curvas.

La generación de formas por ordenador se basa en la aproximación polinómica – es decir, se está hablando que la definición se realizará de forma aproximada-.

Otra consideración importante en el campo de la computación es que la forma más rápida de cálculo es la ecuación en forma paramétrica.

Cualquier superficie se puede representar en el espacio con las siguientes ecuaciones de forma implícita, explícita o paramétrica, es decir como:

$$\begin{aligned}
 F(x,y,z) &= 0 \\
 z &= F(x,y), \\
 x &= X(u,v) \quad y = Y(u,v) \quad z = Z(u,v)
 \end{aligned}$$

La forma de aproximación polinómica en la que se han desarrollado los modeladores geométricos para el ordenador han sido las curvas y superficies de Bézier. Posteriormente se complicó el algoritmo de cálculo con algoritmos de curvas y superficies múltiples como las B-Spline, y las NURBS (Non UniformRational B-Spline).

Todos ellos se basan en la combinación de familias de polinomios básicas, siendo estas más o menos complejas, pero siempre son las mismas. Del resultado de esta combinación se obtiene un polinomio más o menos complejo que se aproxima a la forma que se quiere obtener.

Una de las características importantes de estos desarrollos matemáticos es que asociado a la forma de la curva (superficie) se tiene un polígono (poliedro) de control de tal manera que si se modifica este se modifica la forma de la curva (superficie), y el cálculo es muy rápido, es decir, se tiene una gran flexibilidad de cambio geométrico.

Existen otras características o propiedades geométricas entre los polígonos de control y las formas de las curvas (superficies):

- Los puntos iniciales y finales de las curvas son comunes entre el polígono y la curva. (Para superficies se habla de las esquinas de las mismas).
- El polígono de control siempre subtiende la curva por la parte cóncava. (Lo mismo para las superficies con respecto al poliedro).

El primer y último lado del polígono de control define las tangentes (dirección y magnitud) a la curva en sus puntos iniciales y finales. (Para las superficies se habla de las tangentes en las direcciones  $u$  y  $v$  en las esquinas de las mismas).

El segundo lado del polígono de control tanto del comienzo como del final forma parte del valor de la curvatura (radio de curvatura) en los puntos iniciales y finales. (Igualmente válido para los mismos lados del poliedro asociado a una superficies teniendo en cuenta sus direcciones principales  $u$  y  $v$ ).

Si el polígono de control cruza la curva significa que existe un punto de inflexión. Esto significa una discontinuidad en la función de la curvatura (radios de curvatura). De igual forma se puede aplicar a las superficies solo que aquí se habla de curvas de inflexión, las ecuaciones de la curvatura se refieren a las direcciones principales, ( $u$ ,  $y$ ,  $v$ ).

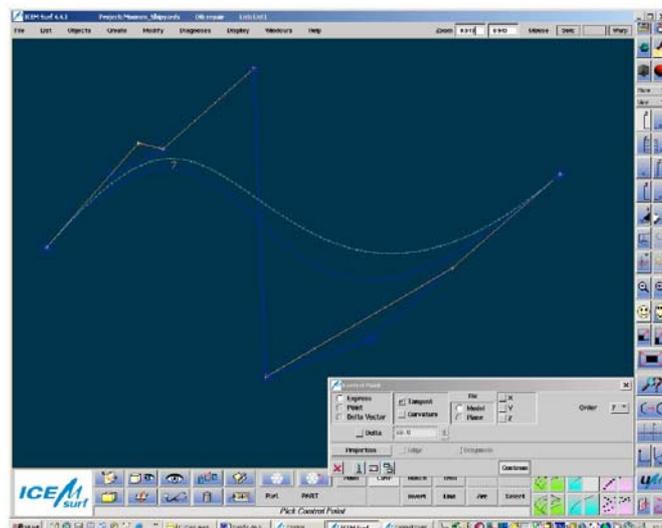


Figura 24 – Descripción de una curva.

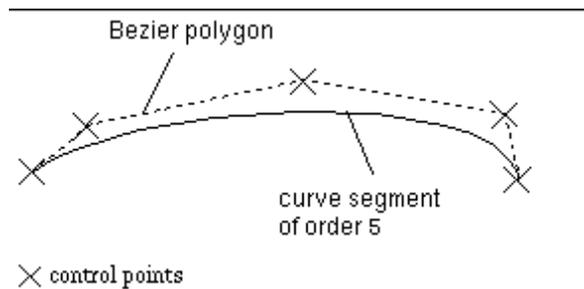
**Características del algoritmo de Bézier:**

La definición del parámetro para las curvas de Bézier siempre está entre 0 y 1.

$$t \in [0,1]$$

$$u \in [0,1]$$

$$v \in [0,1]$$



**Figura 25 – Definición de las curvas de Bézier**

El orden de una ecuación es el número de vértices del polígono de control, incluidos los puntos iniciales y finales (lo mismo para las direcciones u y v de una superficie).

*Grado polinomio = Orden Bézier-1*

$$C(t) = \sum_{i=0}^n P_i B_{i,n}(t)$$

La cantidad de puntos de control afecta a la calidad. El polígono, normalmente, no debería tener inflexiones.

**Características de los algoritmos múltiples segmentos (B-Spline NURBS):**

La definición del parámetro en este caso no está entre 0 y 1.

Una curva NURBS se parametriza usando puntos de control con peso. Esto posibilita la realización de arcos circulares y cónicas de una manera precisa.

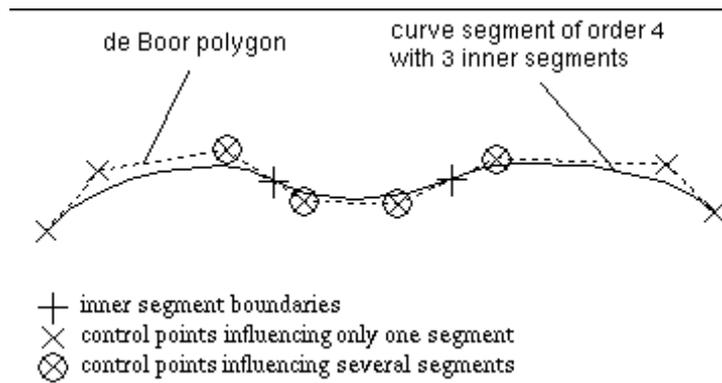


Figura 26 – Definición de una NURBS

Los puntos interiores pueden tener diferente grado de multiplicidad, lo que implica una continuidad entre segmentos en posición (multiplicidad=0, número de puntos=1), tangencia (multiplicidad=1, número de puntos=2) y curvatura (multiplicidad=2, número de puntos=3).

$$\text{Grado polinomio} = \text{Orden segmentos} + \text{Suma Multiplicidades} - 1$$

La relación ya no es la misma que en el algoritmo de Bézier y depende de la multiplicidad de los nudos.

$$C(t) = \frac{\sum_{i=0}^n N_{i,p}(t)w_i P_i}{\sum_{i=0}^n N_{i,p}(t)w_i}$$

	Matemática Bezier	Matemática NURBS
Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Una sola curva.</li> <li>- Sencillez de estructura y uso.</li> <li>- Poca cantidad de puntos de control.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Una sola curva.</li> <li>- Posibilidad de formar curvas complejas.</li> <li>- Posibilidad de tener curvas exactas.</li> <li>- La calidad de conexión entre segmentos internos se puede definir explícitamente.</li> </ul>
Desventajas	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Flexibilidad limitada.</li> <li>- El orden puede llegar a ser muy alto (max=16).</li> <li>- Los valores de las curvas son aproximados.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- El orden es el mismo para todos los segmentos.</li> <li>- Muchos segmentos en la curva pueden dificultar la manipulación.</li> <li>- El orden y el número de segmentos se incrementa automáticamente.</li> </ul>
Edición	- La modificación afecta a toda la curva (tanto los puntos de control como los puntos de la curva).	- La modificación NO afecta a toda la curva (tanto los puntos de control como los puntos de la curva).

Tabla 2 – Comparativa entre la matemática de Bézier y la NURBS

### **3. MODELADORES DE SUPERFICIES**

Sin tener en cuenta la matemática que utilizan los modeladores de superficies(NURBS o Bézier), estos se pueden subdividir en asociativos y no asociativos:

#### **3.1. Asociativo**

La creación de ciertos elementos como curvas y/o superficies están relacionadas a la geometría de referencia, por ejemplo, la generación de una superficie mediante 4 curvas, depende de la forma de las curvas. Eso no presenta mucha importancia, a priori, pero, si de alguna manera se modifica cualquiera de las curvas, la superficie se modificara de una manera similar. Por supuesto que se han de cumplir ciertas restricciones, como por ejemplo, que las curvas se corten o que se crucen con una cierta tolerancia o margen.

También se puede considerar la generación de elementos mediante ciertos comandos y siempre que se requiera se puede volver al comando que generó el elemento y variar las condiciones, para obtener una curva o superficie diferente. Por ejemplo podría ser un comando que conecta dos curvas con el control de la forma y las transiciones de curva a curva, siempre se puede volver al comando y variar por ejemplo la conexión, si en posición, tangencia o curvatura.

##### **3.1.1. Libre**

Esta subdivisión se puede establecer para diferenciar los sistemas que no dependen de las curvas para generar las superficies, sino más bien, se pueden utilizar cuando se quiera. No se necesita generar una curva para generar una superficie. En este caso se puede tener ciertas ventajas pero también ciertas desventajas que se comentarán más adelante.

##### **3.1.2. Dirigido por curvas**

Don aquellos sistemas en los que es necesario generar curvas antes que la generación de superficies. En este caso siempre son sistemas asociativos. Una de las grandes ventajas es la conexión topológica, para la generación posterior de un sólido. Por otro lado es poco flexible geoméricamente.

### 3.2. No Asociativo

Sistemas que no tienen ninguna relación entre elementos y que una vez creados son independientes los unos de los otros. Si se quieren modificar no afectan a los otros que son base para crear estos. Para cambiar condiciones en el ejemplo de la conexión de curvas, hay que volver a lanzar el comando, borrando previamente la curva de conexión, con nuevas condiciones. O en el caso de una superficie definida por 4 curvas, se puede modificar la superficie sin tener que alterar las curvas.

## 4. CLASES DE SUPERFICIES, A y B. Características.

De la industria del automóvil se desprende la siguiente clasificación de las superficies según la calidad de las mismas. Clasificación que puede ser válida para cualquier industria.

Las superficies de clase A son aquellas que cumplen una serie de criterios, que pueden ser más o menos restrictivos dependiendo del campo de aplicación.

Deben cumplir con:

#### Criterio de Estilo:

Relacionado con la forma del objeto y la tendencia del mismo, y siempre es un criterio subjetivo. En relación con las superficies que definen el objeto, se puede considerar las líneas de brillo como referencia y comparación para ver si están bien o no. La herramienta más utilizada es la de las líneas de cebra (zebralines) o líneas de brillo (highlights). Es el criterio más importante y prevalece sobre los otros.

#### Criterio Matemático:

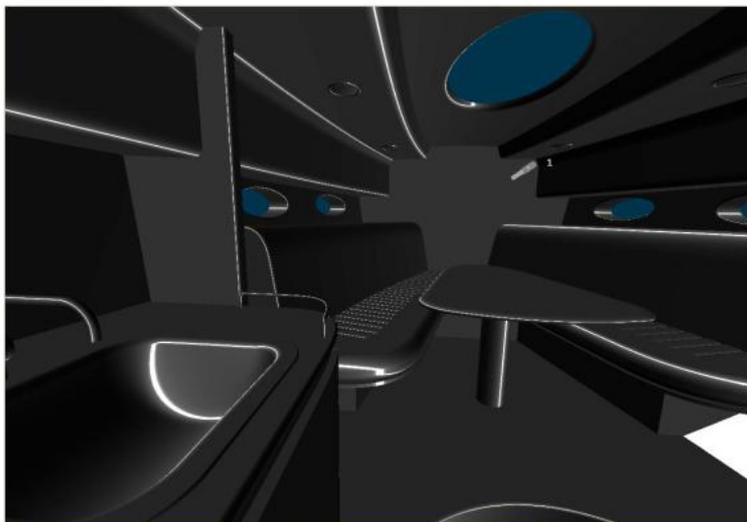
Como los objetos están hechos de “trozos” de superficies, hay que controlar la conexión entre las mismas, así como la distribución topológica (relacionada con el comienzo y final de las superficies y la relación de una superficie con las demás). Las conexiones se controlan y miden por la continuidad en posición, en tangencia y en curvatura, siempre medidas con un cierto margen, nunca de una manera exacta.

Estos valores se pueden medir en 0.02 mm. de diferencia en posición, 0°6' en tangencia y 30% en curvatura, ahora bien son valores orientativos y dependen del campo de aplicación del fabricante y del modelador de sólidos.

Criterio de Viabilidad:

Los objetos, geoméricamente, se han de poder fabricar, por ejemplo, que cumplan con un ángulo de desmoldeo o que tengan un radio mínimo necesario para evitar roturas en el conformado de chapa. También aquí se puede incluir las desviaciones de las conexiones entre superficies, que han de ser tales que cuando un sistema haga el cálculo del mecanizado (CAM), no clave la herramienta o que no deje una marca al pasar de una superficie a otra.

Ejemplos de superficies de clase A son todas aquellas superficies de estilo vistas, interiores o exteriores. La cubierta de un yate, el interior del mismo, la carrocería y el interior de un vehículo (coche, camión, motocicleta), una tostadora, etc.



**Figura 27 – Detalle de superficies de clase A. (Interior de un yate)**



**Figura 28 – Diseño del interior de un yate**

Las superficies Clase B, de igual forma han de cumplir con unos criterios parecidos:

*Criterio Matemático:*

Igual que para las superficies clase A, pero mucho menos restrictivo. Las condiciones de conexión son solo en posición y en tangente, y los valores pueden ser 0,02 mm. Y entre 0º30' y 1º o mayor incluso. Hay que tener muy en cuenta los criterios topológicos para la generación de un sólido

*Criterio de Viabilidad:*

Exactamente igual al de la Clase A, es muy importante que los objetos se puedan fabricar según su proceso de fabricación. Ángulos de desmoldeo, radios mínimos, etc.

Ejemplos de Clase B son todas aquellas superficies no vistas, que definen completamente la pieza. Refuerzos, espesores, casi todas las superficies que definen los diferentes componentes mecánicos, winches, bitas, botavaras, palos, antenas, etc...

## **5. REGLAS PARA LA GENERACIÓN CORRECTA DE UN MODELO DE SUPERFICIES**

Existen unas reglas para la definición correcta de un modelo de superficies.

Estas no siempre se han de aplicar, y son reglas y no leyes, es decir que se puede llegar a realizar un modelo de superficies correcto con diferentes soluciones y no aplicando las reglas.

El principal objetivo es una definición correcta de las formas. Las reglas son las siguientes:

- Cuantas menos unidades de superficies se utilicen mejor, si el modelo se puede hacer con una sola superficie mejor que con dos, siempre y cuando se adapten a la forma necesaria.
- El orden de las superficies ha de ser lo más bajo posible siempre y cuando se adapte a la forma deseada. Si se aumenta el orden en exceso se pueden tener ondulaciones, en lugar de tener una superficie "tensa". Para superficies de Bézier el orden máximo es 8, para las NURBS, depende de la matemática interna del sistema, pero no ha de tener muchos segmentos (el orden suele ser 4 en los segmentos internos, que asegura la continuidad de la curvatura en los extremos de los mismos). Esta regla se empieza a aplicar en los modeladores NURBS forzando el número de segmentos a 1, es decir tratar la matemática como si fuera de Bézier, controlando el orden de esos segmentos.

- Las superficies han de tener una forma lo más regular posible, deben ser rectangulares o en forma de abanico. Y por lo tanto la distribución del polígono de control ha de ser regular también.
- Los bordes de las superficies han de ser lo más regular posible, según las tres vistas principales.

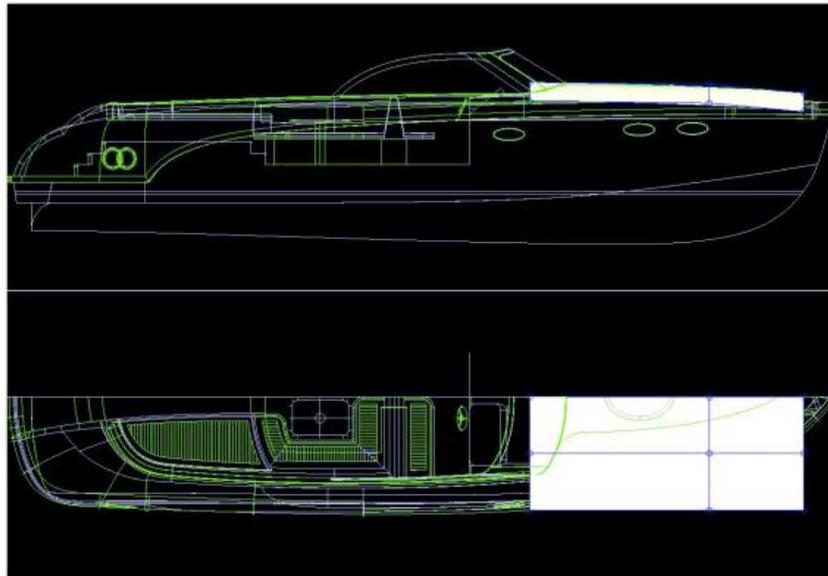
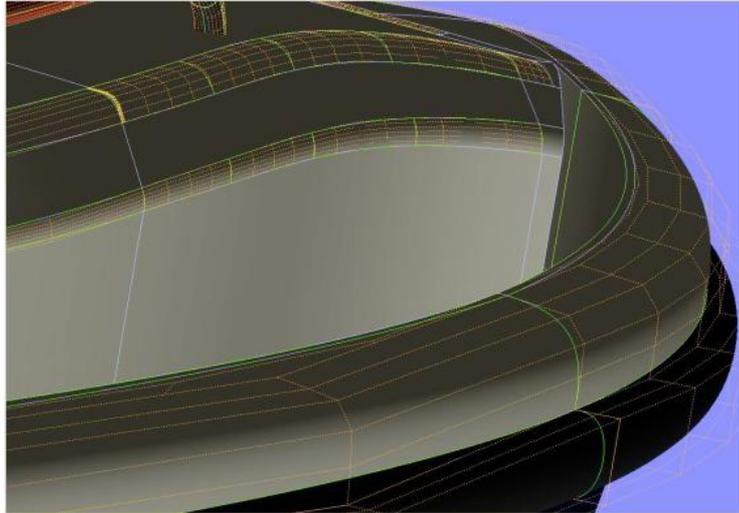


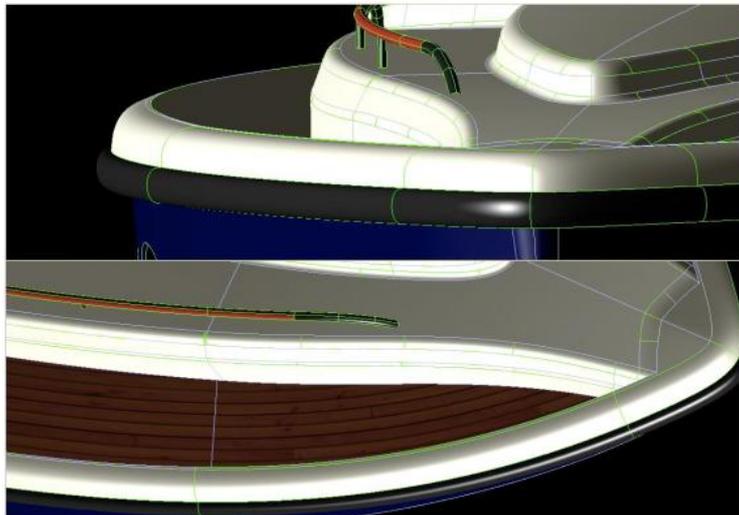
Figura 29 – Generación de un modelo

- Todos los puntos de control han de estar situados sobre la superficie, de nuevo de una forma lo más regular posible. Por ejemplo, si los bordes superior e inferior son horizontales, todas las filas de puntos de control situadas entre ambos bordes también han de ser horizontales.
- La transición de los puntos de control de una superficie a otra ha de ser suave.
- No debe haber picos ni ondulaciones en la distribución de los puntos de control.
- A ser posible, todas las superficies deben tener una buena continuidad en curvatura. Y por supuesto también en posición y en tangencia. El análisis que se puede hacer con las líneas de brillo, puede detectar las incorrecciones en posición tangente y curvatura.



**Figura 30 – Detalle de la continuidad de los bordes.**

- No debe haber áreas planas o con inflexión cerca de los bordes comunes de las superficies.
- Los bordes perpendiculares a los bordes comunes entre superficies han de tener una transición lo más suave posible, que no tengan puntos angulosos ni discontinuidades, y que sean curvas tangentes entre sí. Deben parecer la misma curva.



**Figura 31 – Detalle de la transición en los bordes.**

- Para definir donde acaba una superficie y empieza la siguiente, una buena regla que se puede aplicar es la del borde de ataque de un perfil de ala, zona “plana”, zona curvada, zona “plana”.

## 5.1. Método general de las superficies teóricas

El planteamiento que se debe hacer de las piezas a la hora de modelar es el siguiente. Hay que definir unas superficies teóricas que sobrepasen el modelo y lo más tensas posible, que definen un volumen de la pieza.

Se deben extrapolar las superficies teóricas hasta que intersecten entre sí.

La curva de intersección ha de ser una curva suave, sin ondulaciones ni inflexiones, en las tres vistas principales.

La definición de la pieza se debe realizar con superficies de acuerdo entre las superficies pasantes o teóricas. Los detalles se realizarán una vez definido las superficies teóricas y las superficies de acuerdo entre ellas.

La pieza resultante siempre será una parte de las superficies teóricas (Faces).

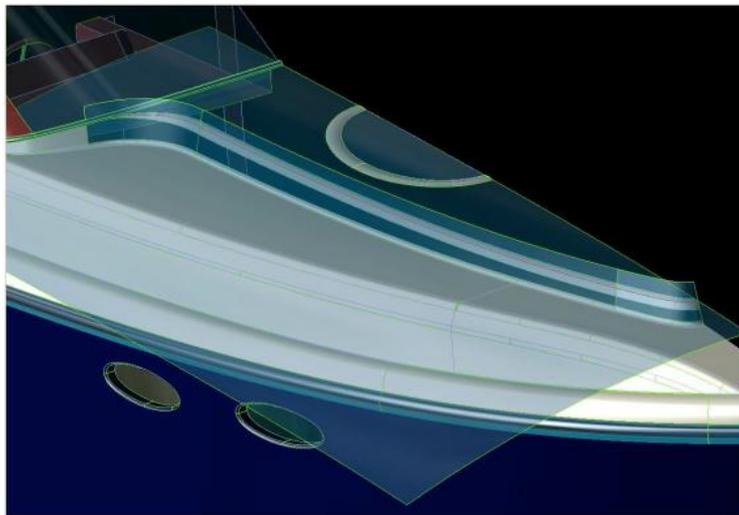


Figura 32 – Intersección de superficies.



Figura 33 – Resultado después de la intersección.

## 5.2. Incorrecciones que se deben evitar

Hay que evitar siempre las superficies triangulares, éstas siempre tienen que tener 4 lados. Para hacer una superficie triangular se ha de hacer recortándola (creando una Face).

El tener un lado degenerado o igual a 0, implica una indefinición de la normal a la superficie, por lo tanto cualquier operación que se base en la dirección de las normales a las superficies puede crear un montón de problemas. Por ejemplo, para sacar el grueso de la pieza, se realiza mediante la operación Offset, o ciertos programas de mecanizado se fijan en la dirección de la normal

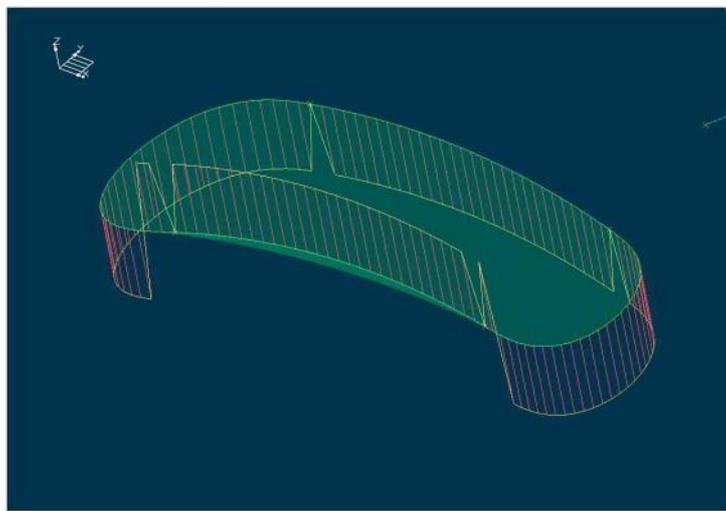


Figura 34 – Detalle de las normales.

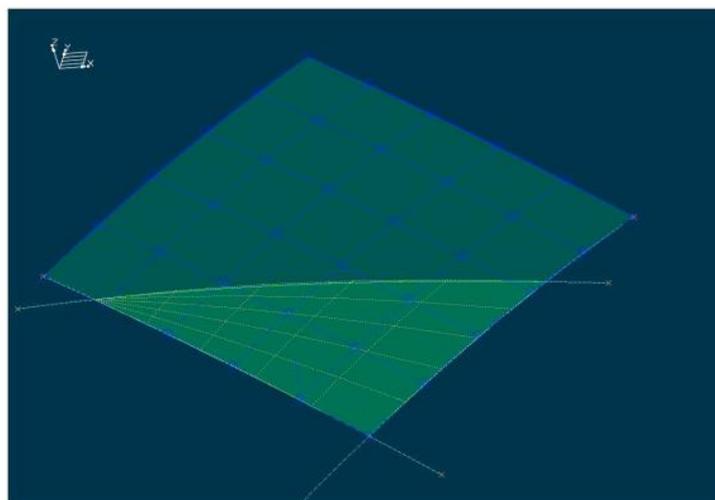


Figura 35 – Detalle específico.

La utilización de superficies de cuatro lados pero con los lados del parámetro U y V alineados en las esquinas, da los mismos resultados que en el caso anterior, la normal a la superficie en dichos puntos no está bien definida, ya que se obtiene por el producto vectorial de la tangente en U en la esquina por la tangente en V en el mismo punto. Como están a  $180^\circ$ , el resultado es nulo (aunque no es cierto, por los métodos de aproximación, pero dicha normal puede cambiar de sentido, en el peor de los casos, o tener una dirección incongruente con el resto de las normales).

También se han de evitar las superficies rectangulares con unos de sus lados muy pequeños.

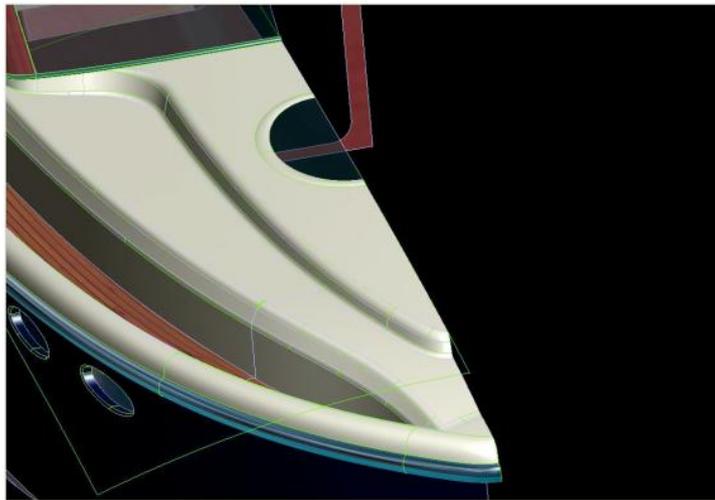


Figura 36 – Líneas de Brillo.

Respecto a las líneas de brillo saber interpretar las incorrecciones de las mismas.

Discontinuidad en posición → hueco en la línea de brillo.

Discontinuidad en tangencia → escalón en la línea de brillo. El escalón es proporcional al valor de discontinuidad de la tangencia.

Discontinuidad en curvatura → punto anguloso en la línea de brillo.

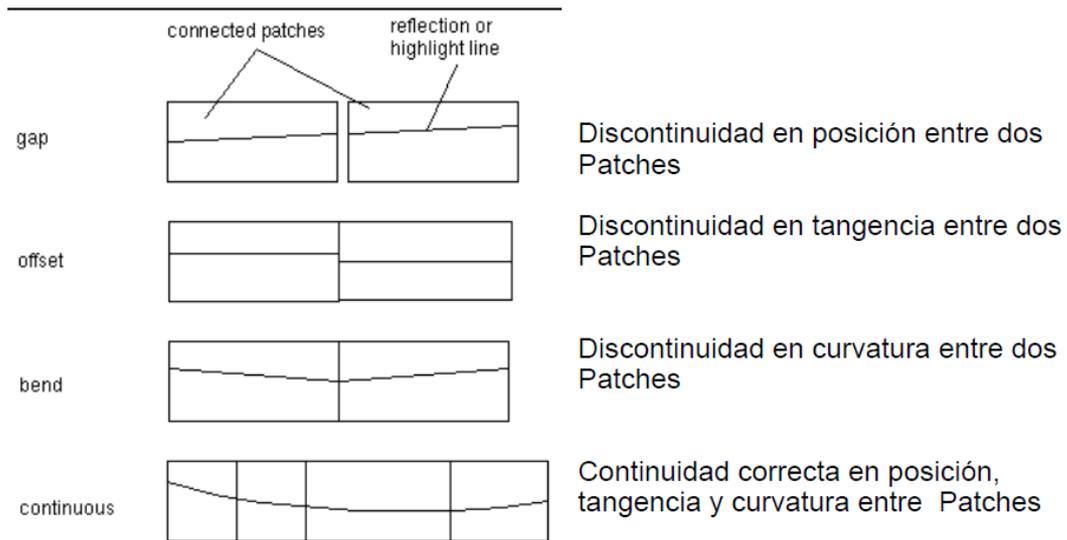


Figura 37 – Tipologías de discontinuidades

Aunque no exista continuidad en la tangencia, las líneas de brillo pueden correr de una manera suave, con pequeños escalones que a simple vista no se aprecian, desde el punto de vista desde donde se miran.

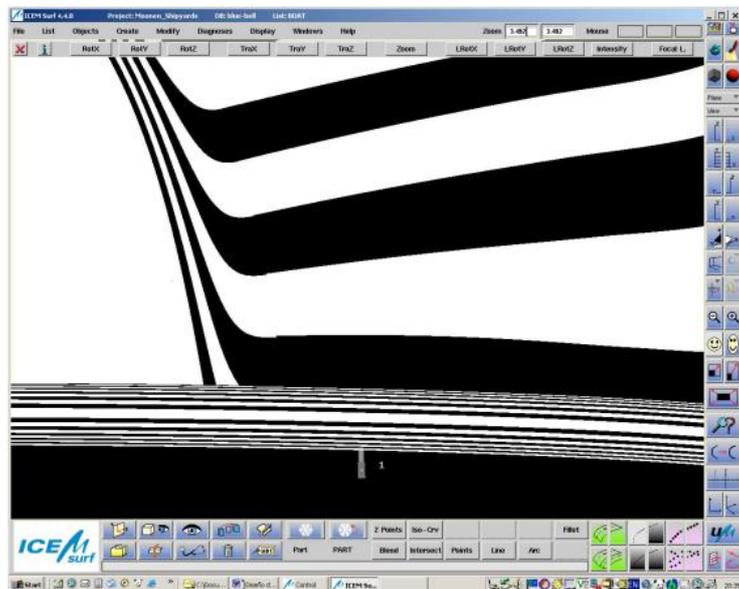


Figura 38 – Líneas de Brillo

Hay que recordar que la continuidad se establece con una cierta tolerancia. Los valores de la continuidad en posición, tangencia y curvatura pueden ser: 0,02 mm o menos se puede considerar como continuo en posición; 0° 5' o menos se puede considerar como continuo en tangencia; y un 30 % o menos se puede considerar como continuo en curvatura.

Las líneas de brillo han de fluir de una manera constante, incrementando o disminuyendo sin variar esa tendencia.

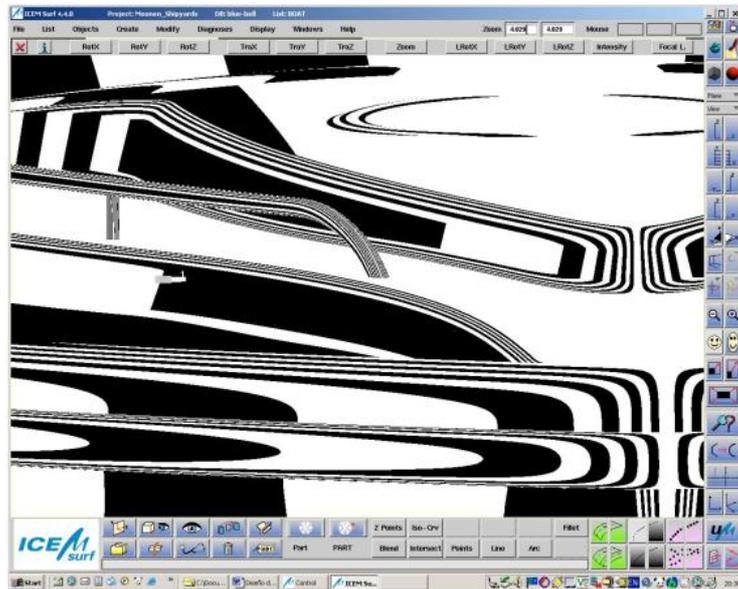


Figura 39 – Líneas de Brillo

La desviación en curvatura siempre se suele medir como una cantidad relativa, por los valores tan grandes que pueden tener.

$$Ratio \% = \frac{Ra - Rb}{Ra + Rb} \cdot 100$$

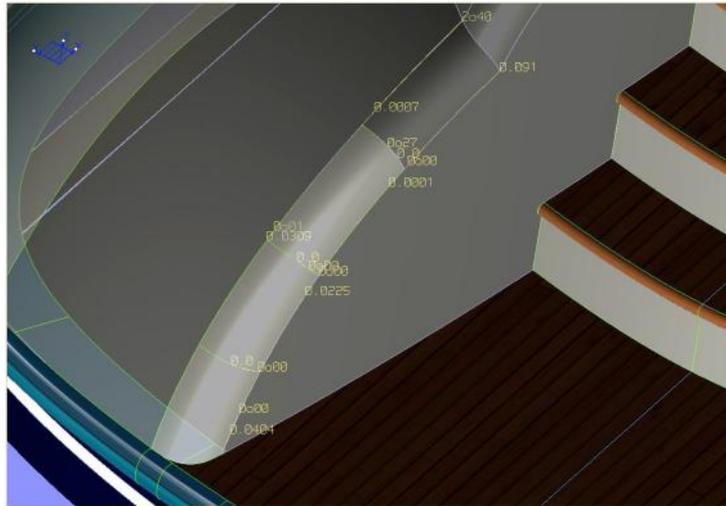
### 5.3. Norma para el paso a un modelador de sólidos

Tal y como se ha comentado anteriormente, siempre se puede pasar a un modelador de sólidos el resultado de la pieza en superficies, ya que el desarrollo posterior así lo requiere, es decir solo se definirá la piel exterior de la pieza, realizando el resto con un modelador de sólidos, por ejemplo, el grueso de la pieza, refuerzos y otras partes que son de formas geométricas sencillas, aunque de gran complejidad topológica.

Para que el modelo de superficies “funcione” dentro del modelador de sólidos ha de cumplir con una serie de requisitos topológicos.

El más importante es la definición de fronteras entre superficies y la continuidad en posición, por supuesto que hay que controlar la continuidad en tangencia y curvatura, aunque no es tan importante.

Una superficie se conecta con otra a través de uno de sus lados, para que el modelador de sólidos considere que esa frontera es la misma han de estar separadas un cierto valor (ver arriba), o lo que es lo mismo que cumpla con una tolerancia de continuidad en posición. De esta manera el sistema puede considerar esas dos superficies como una sola, en realidad, como un volumen abierto o sólido abierto.



**Figura 40 – Unión entre superficies**

Hay que tener en cuenta que los sistemas de sólidos tienen comandos automáticos de “cosido topológico”, pero pueden ser bastante peligrosos en cuanto a la tolerancia con la que trabajan. Suponiendo un cierto valor, si el sistema encuentra una desviación mayor que la tolerancia, modifica las condiciones para lograr dicha tolerancia, de cara a la posición y a la identificación de las dos fronteras en una, de esta manera se resuelve el problema de identificación de fronteras, pero respecto a la continuidad en tangencia y curvatura, puede que cambien las condiciones.

Otra consideración que hay que tener en cuenta, si se trabaja con matemática Bézier en el modelador de superficies y según el orden de los segmentos que se utiliza (máximo 8). Los modeladores de sólidos trabajan siempre con matemática NURBS, y el sistema controla el número de segmentos de cada superficie/curva, y hay algunos que no superan el orden 4 entre segmentos de NURBS, por lo que el sistema también modificará la matemática. Por ejemplo una Bézier de orden 8 la convierte en una NURBS de dos segmentos de orden 4. El problema es parecido al de antes, las condiciones de la tangente y de la curvatura pueden variar, variando por lo tanto las condiciones de continuidad de tangencia y curvatura.

Para los modeladores de sólidos paramétricos, existe una gran ventaja debido a la asociatividad de los mismos. Por ello, cuando se vuelve a pasar la información de las superficies modificadas al modelador de sólidos, éste actualiza y modifica los datos a esa nueva situación, y todo lo que se haya generado con referencia a esas superficies (sólido abierto) se actualiza y modifica también. Siempre con unas ciertas condiciones, como por ejemplo que pertenezcan al mismo conjunto y que tengan la misma denominación.

## 6. OBJETIVOS DE LA GENERACIÓN DE SUPERFICIES.

El objetivo primordial de la generación de superficies es la definición exacta de las formas.



Figura 41 – Modelado final de un yate (1)



Figura 42 – Modelado final de un yate (2)



Figura 43 – Modelado final del interior de un yate

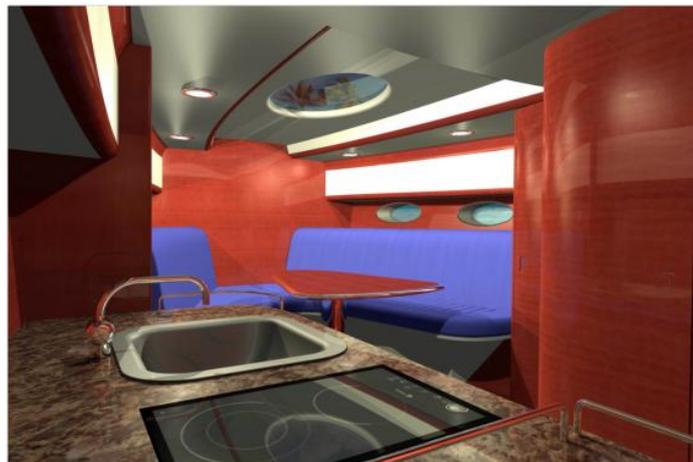


Figura 44 – Detalle del interior de un yate

Posteriormente se pueden utilizar para mecanizar, renderizar (imágenes foto realistas), mallar, o simplemente para el desarrollo del resto de la geometría.

Dentro del proceso de producción o fabricación la definición de formas es un hito importante.

- Mecanizado. Hay que definir una serie de superficies auxiliares que definen el útil, aparte de toda la ingeniería asociada al mismo. La gran ventaja es la perfección en la definición de las herramientas de fabricación.
- Mallado. Para su utilización en programas de simulación, aunque debido a las características de las mallas (espacios discretos) no hace falta una definición exacta de las formas. Siempre se pueden realizar los cálculos, sin tener el modelo real,

anticipándose a cantidad de problemas que pueden surgir a posteriori o la posibilidad de explorar diferentes soluciones.

- **Renderizado** (imágenes foto realistas). De igual manera que antes la gran ventaja de aplicación de propiedades de los materiales, colores, reflexión, transparencia. La posibilidad de ver el modelo lo más real posible, estudiando formas, y combinación de colores, materiales y texturas. Explorando diferentes soluciones de diseño.

Lo más importante es preservar la intención del diseño. Todos los trabajos que se han de realizar posteriormente no han de variar la idea inicial del diseño. Siempre que se realice dentro de unos sistemas asistidos por ordenador es mucho más fácil cumplir esto.

## 6.1. Base de generación de superficies: Ingeniería Inversa, Dibujos

Existen dos formas comúnmente utilizadas:

### 6.1.1. Desde Dibujos

Empezando por la definición de formas desde unos dibujos, por ejemplo, alzado, planta y perfil, aunque puede que no se tenga nada más que uno de los tres.

En la primera etapa siempre hay que definir el tamaño real del dibujo y la correlación entre los tres (dos) dibujos, y a partir de ahí, empezar a crear líneas, por ejemplo, en el alzado y en la planta, que posteriormente proyectadas definen las líneas en el espacio. Con el modelo de líneas en 3D, se puede empezar a modelar las superficies, que al fin y al cabo son el objetivo principal.

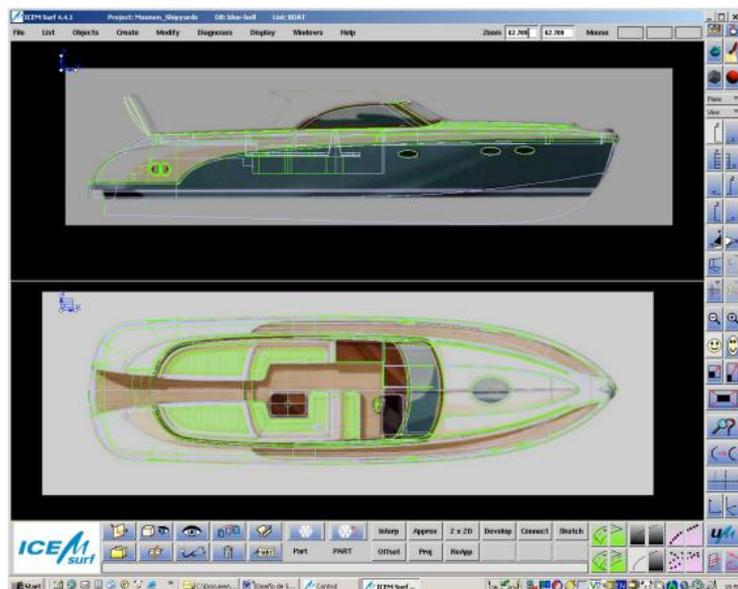


Figura 45 – Perfil y Planta del modelo.

### 6.1.2. Desde Digitalizados.

Empezando desde un digitalizado, que es la información capturada de un modelo mediante diferentes dispositivos, que puede estar a escala o no, y desde la nube de puntos o secciones, empezar a crear la superficies, que estén a una cierta distancia o tolerancia del digitalizado (nube de puntos o secciones) y que sean lo más lisas posible.

Antes de empezar a crear las superficies hay que escalar otra vez las nubes de puntos a la escala 1:1. Este método por la forma de diseño y construcción de los barcos y por el tamaño de los mismos, no se aplica. Pero en otros sectores está muy extendido. El método se denomina Ingeniería Inversa.

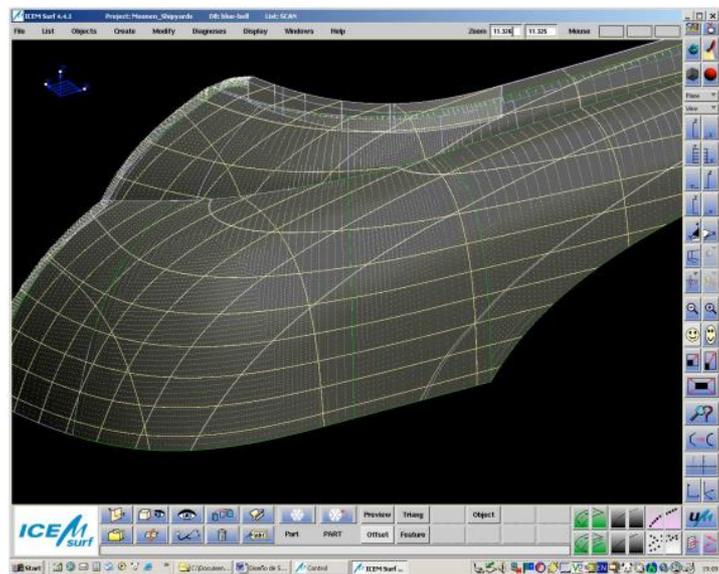


Figura 46 –Nubes de puntos escaladas.





# **PARTE V: EJEMPLOS DE MODELIZACIÓN NAVAL**



## 1. ANSYS

### 1.1. Introducción

El objetivo es analizar la estructura completa de una embarcación. En este caso, dicha estructura estará conformada por distintos laminados de materiales compuestos.

Se asumirá que el modelo CAD ha sido previamente generado mediante Autocad.

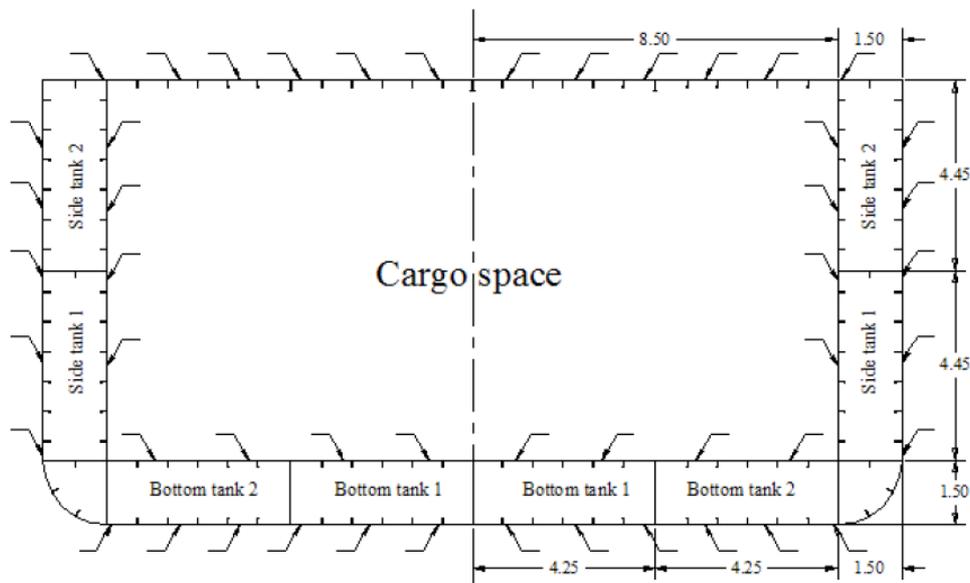


Figura 47 – Modelo CAD

### 1.2. Consideraciones previas al modelado:

Al empezar la generación de la modelización se toman, consciente o inconscientemente un número de decisiones que determinan como se simulará matemáticamente el sistema físico:

- ¿Cuáles son los objetivos de su análisis?
- ¿Modelará todo, o solamente una parte, del sistema físico?
- ¿Cuánto detalle se incluirá en el modelo?
- ¿Qué clases de elementos se usarán? ¿Su malla de elemento finito será muy densa?

En general, se intentará equilibrar el coste computacional (el tiempo de CPU, etc.) contra la precisión de resultados en función de las decisiones tomadas en base a las preguntas

anteriores que se hacen en la etapa de planificación. Estas decisiones gobernarán, en gran parte, el éxito o el fracaso del análisis final.

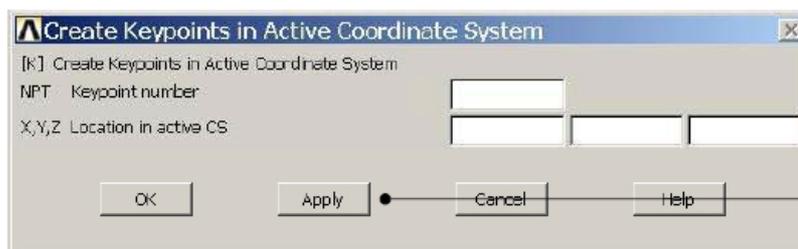
### 1.3. Modelización:

Para poder empezar la modelación de la estructura, lo primero que se debe crear son los keypoints. Éstos son los encargados de definir nuestra estructura. Inicialmente se deben definir las direcciones de los ejes de coordenadas, para evitar futuros errores. Al tratarse del estudio de un buque la lógica nos indica que:

- Eje X: Se representará la eslora del buque.
- Eje Y: Se representará la manga del buque.
- Eje Z: Se representará el puntal del buque.

Posteriormente procedemos a definir los citados key-points:

#### Preprocessor > Modeling > Create >Keypoints> In Active CS



Introducir los datos y Pulsar Apply



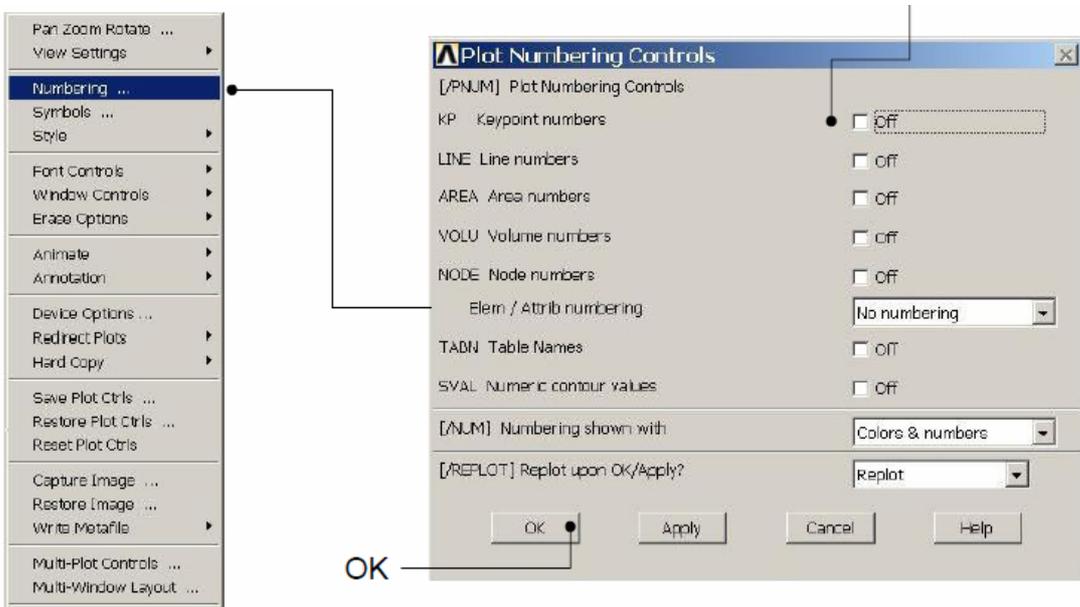
Introducir los datos y Pulsar Apply

Nota: Una casilla vacía se convierte en un cero. Está permitido poner 0.0 en cada casilla.

Siempre se deben tener los key-points numerados para un mayor control de la estructura:

**Utility Menu >PlotCtrls> Numbering**

Marcar en on la opción “KP Keypoint number”



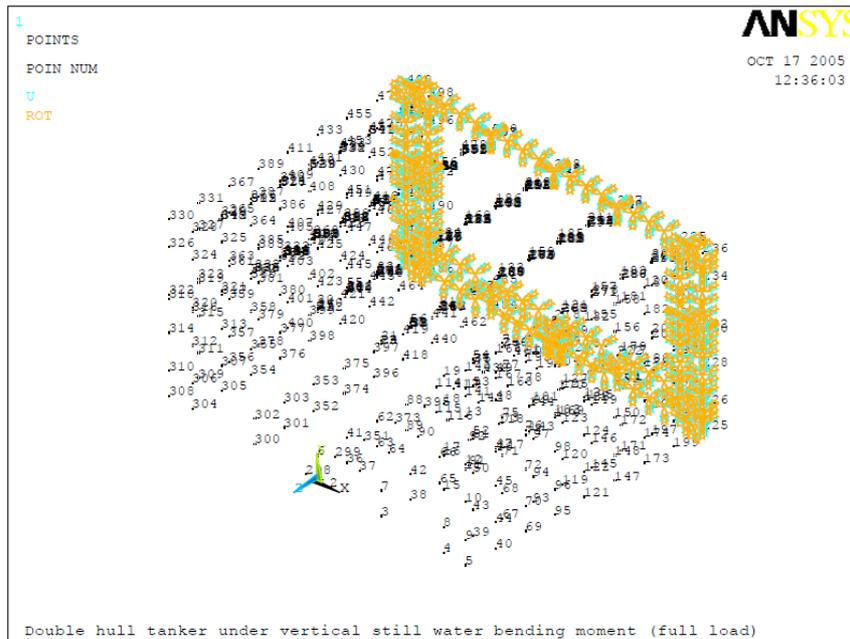
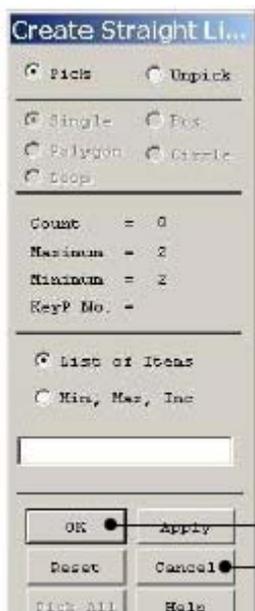


Figura 48 – Representación de los Key-Points

Una vez definidos los key-points, se deben crear las líneas que los unen entre sí:

**Preprocessor > Modeling > Create > Lines > Lines > Straight Line**

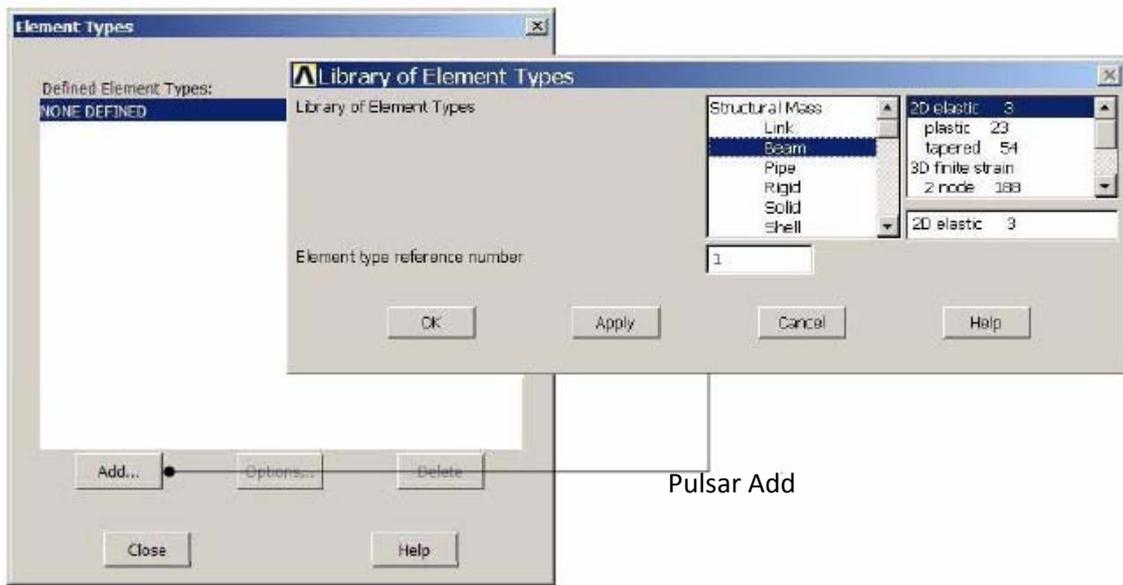


Pulsar OK o Cancel para finalizar la selección.

El objetivo es ir creando las diferentes líneas para poder crear las áreas que se van formando entre los diferentes key-points. Se tiene que tener muy en cuenta el crear solamente las áreas correspondientes a elementos que posean su pieza simétrica en la otra “mitad” de la sección con respecto al eje Z (tanto áreas longitudinales como transversales). Una vez realizado esto se podrá proceder a realizar la simetría de los elementos comentados. Y una vez acabada la

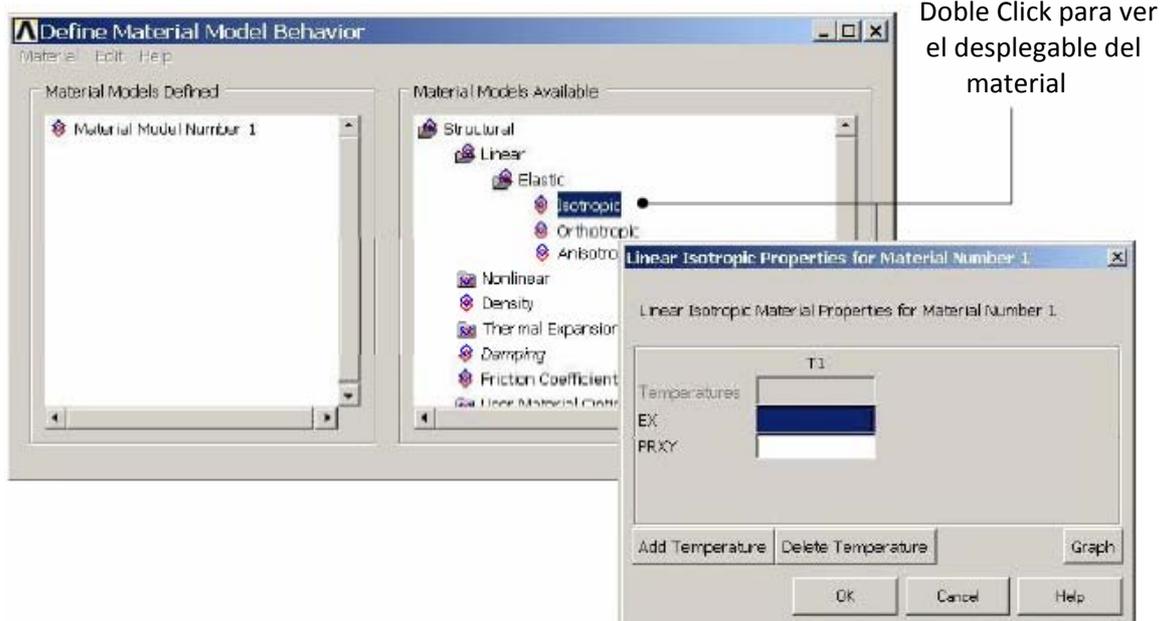
simetría se podrán colocar los elementos restantes, mamparos longitudinales, refuerzos longitudinales del mismo y refuerzos centrales, etc. Se tiene que seleccionar el tipo de elemento en cada caso. Gracias a la base de datos del programa podemos seleccionar si es una plancha, una viga, un refuerzo, etc.

**Preprocessor > Element Type > Add/Edit/Delete**



Lo siguiente a tener en cuenta serán las propiedades del material.

**Preprocessor> Material Props> Material Models**



Una vez hecha la simetría y adjuntado las piezas “no simétricas”, hemos creado todas las áreas y definido su tipo y material dándole las propiedades deseadas a nuestros elementos estructurales previamente definidos como áreas. El resultado final es el siguiente:

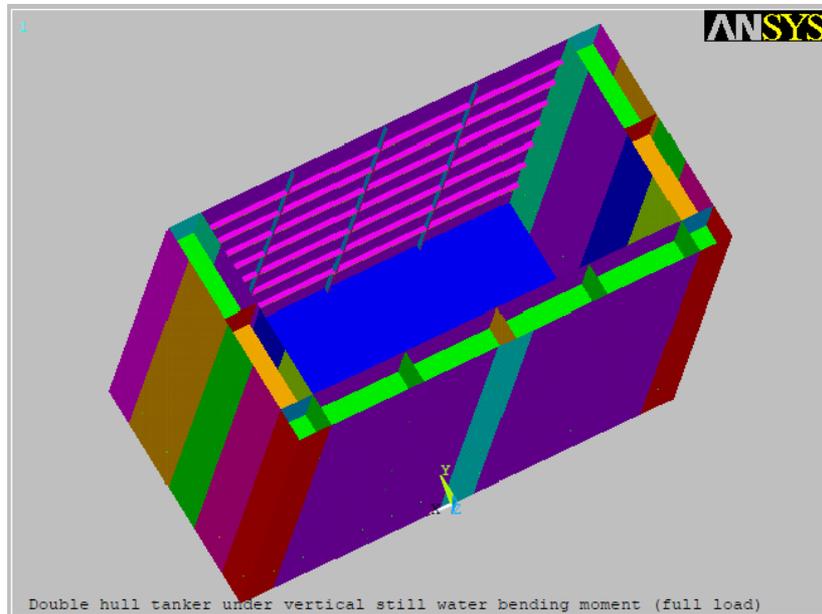
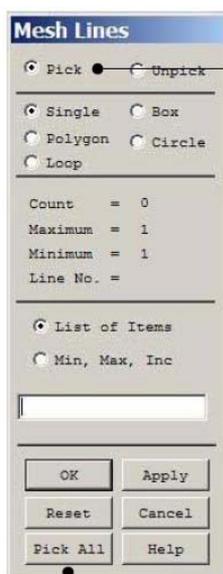


Figura 49 – Representación de las áreas

#### 1.4. Mallado.

El siguiente paso para poder proseguir con el análisis estructural de nuestro barco será crear una malla. La malla es necesaria para poder analizar la estructura bajo diferentes tipos de cargas. El tamaño de la malla tendrá gran importancia a la hora de realizar los cálculos. A mayor tamaño de malla, menor tiempo requerido para realizar los cálculos pero también menor precisión en los cálculos. A menor tamaño de malla, mejor fiabilidad de los cálculos, pero también mayor tiempo empleado.

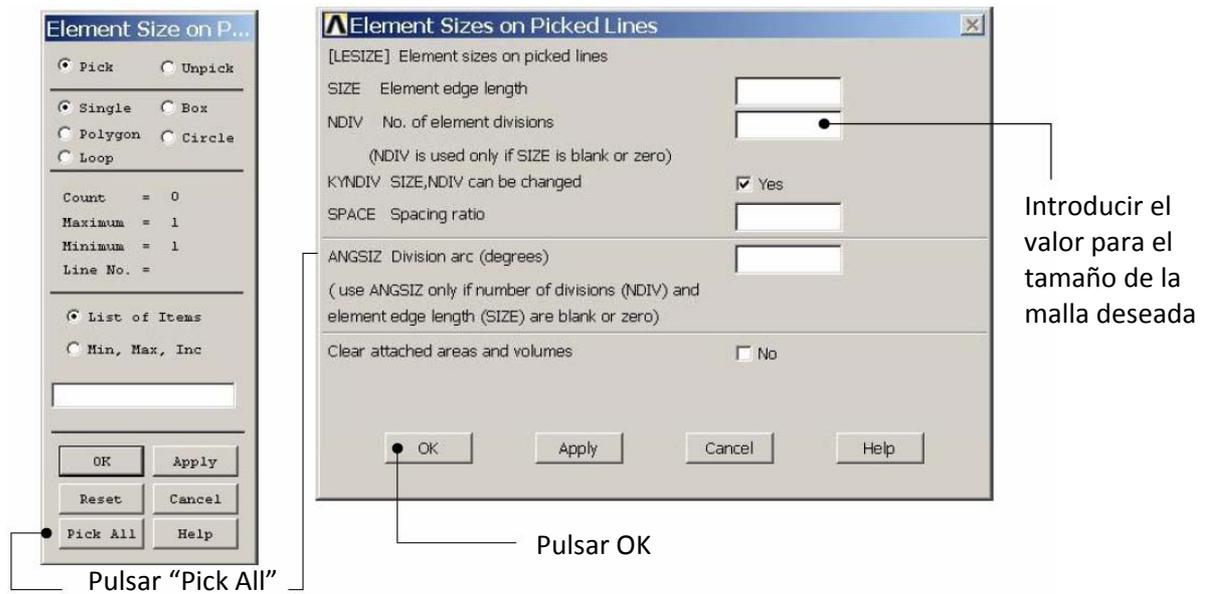
##### Preprocessor>Meshing>Mesh>Lines



Selecciona líneas individuales para mallar pulsando “Pick”

Selecciona todas las líneas definidas en la estructura para mallarlas pulsando “Pick All”

Preprocessor > Meshing > Size Cntrls>ManualSize> Lines > Picked Lines



El resultado una vez aplicada nuestra malla es:

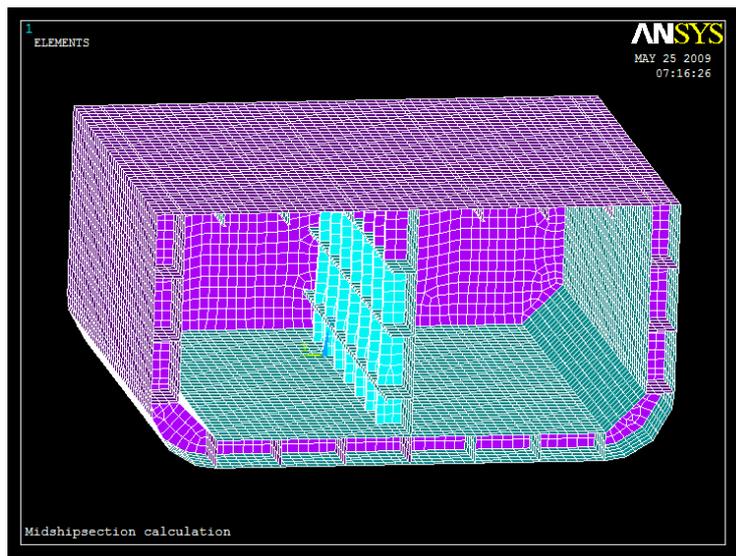


Figura 50 – Representación del mallado

Aplicado a todo el barco sería:

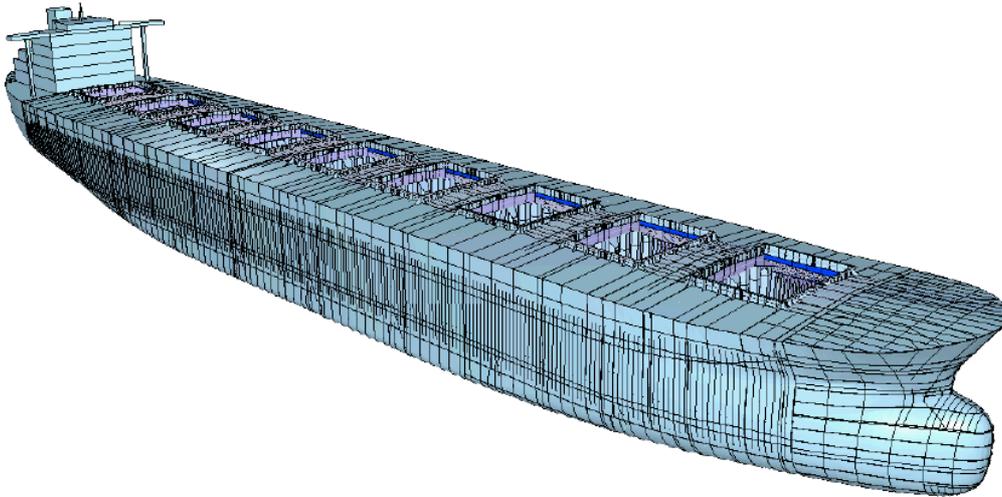


Figura 51 – Buque al completo mallado

## 1.5. Análisis de la estructura.

A continuación se procede al análisis de la estructura definiendo las diferentes cargas que nuestro buque debe soportar.

En primer lugar debemos definir las condiciones de contorno.

### 1.5.1. Condiciones de contorno:

Las condiciones impuestas en cada caso son aquellas que se acerquen lo más posible a la realidad. Por lo que en el caso de este buque, el mamparo se ha empotrado en sus bordes y también se ha restringido todas las traslaciones y rotaciones en el lugar donde van soldadas las cubiertas de trabajo e intermedia, el cielo del doble fondo, y los mamparos longitudinales, ya que estas estructuras aportan una rigidez mucho mayor a la aportada por los atiesadores.

### 1.5.2. Cargas aplicadas:

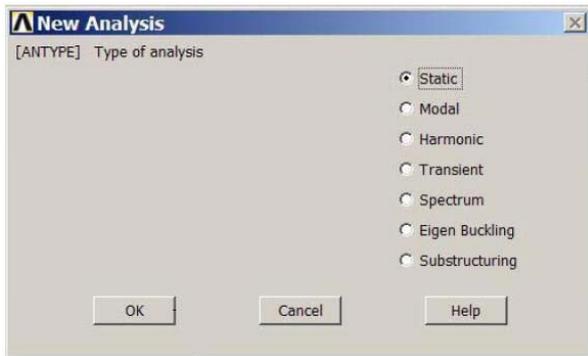
Una vez definidas las condiciones de contorno se aplican diferentes condiciones de carga según el caso que se esté estudiando. Las cargas comunes a aplicar son:

- Fuerzas cortantes
- Momentos flectores

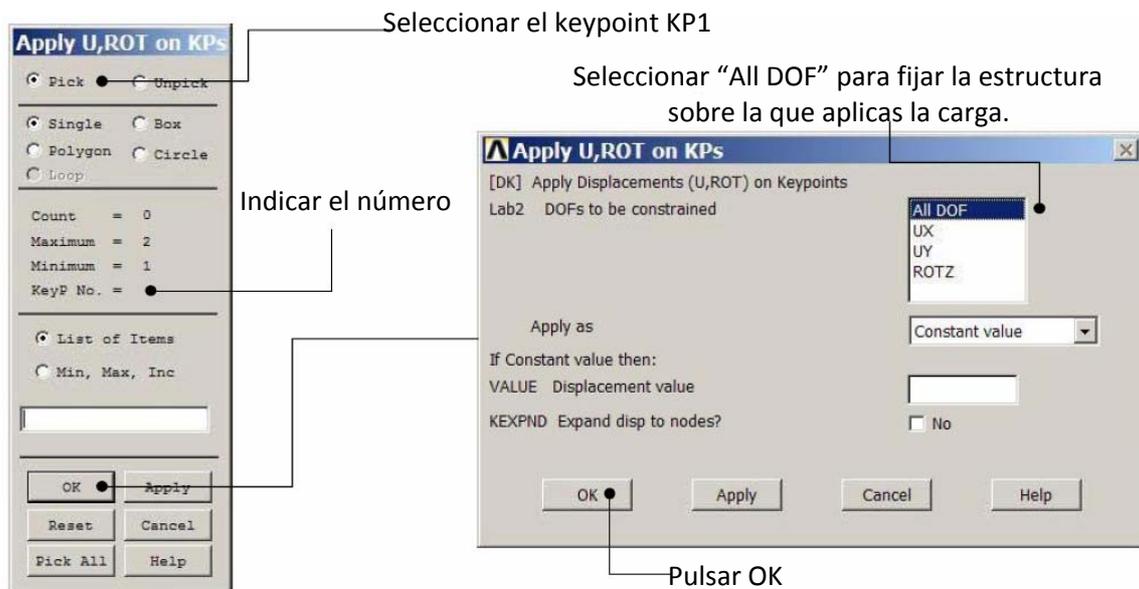
- Momentos torsores

Ejemplifiquemos como se introducirían los datos si aplicásemos una carga estática localizada:

**Solution > Analysis Type > New Analysis**



**Solution > Define Loads > Apply > Structural > Displacement > On Keypoints**



De igual manera se definiría los momentos aplicados:



### Seleccionar el Keypoint KP2

Poner la dirección de la fuerza según nos convenga FX o FY  
Indicar el número

Pulsar OK para finalizar

Introducir el valor

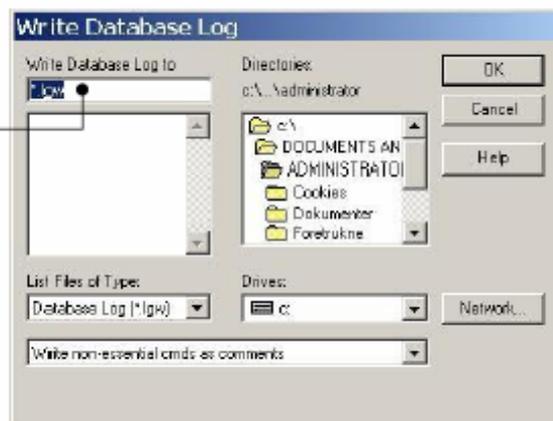
Una vez aplicadas todas las cargas que afectan a nuestro buque, se guarda el modelo para poder realizar el análisis.



Guardar el modelo

### File >Write DB log file

Nombre del modelo



El modelo de mamparo, con las cargas y las condiciones de contorno aplicadas se muestra en la figura 52:

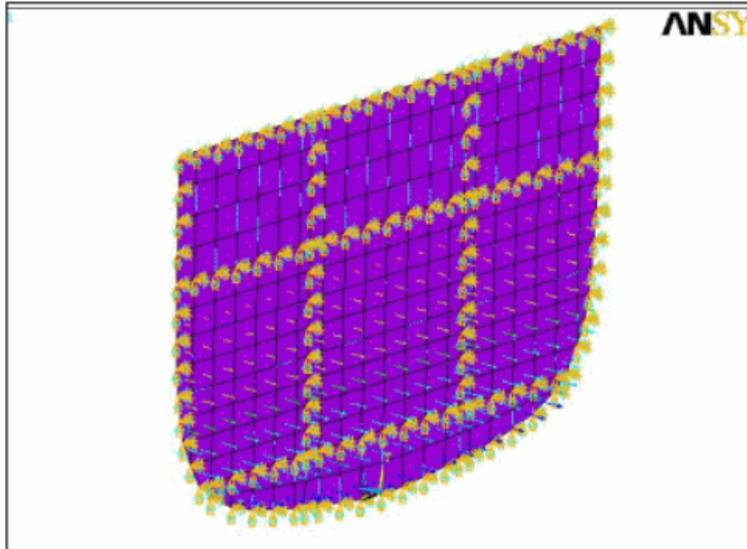
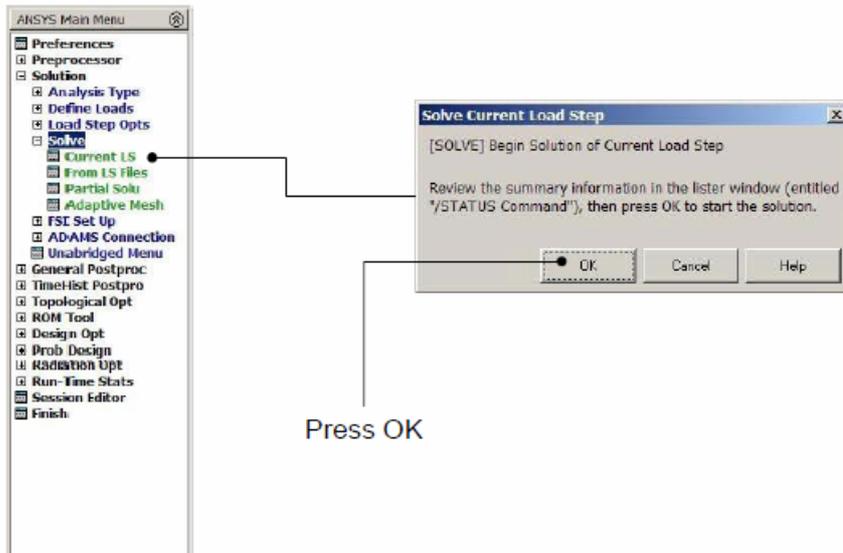


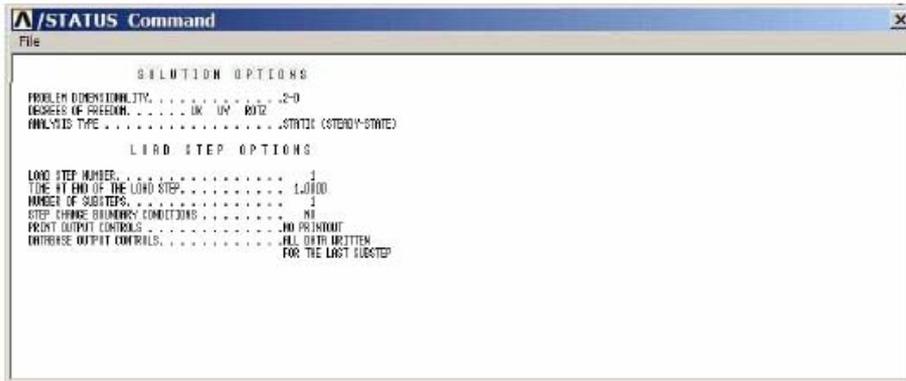
Figura 52 - Cargas aplicadas

### 1.5.3. Análisis de Resultados

Una vez que tenemos todas las cargas aplicadas, se procede a buscar la solución para poder analizar los resultados obtenidos:

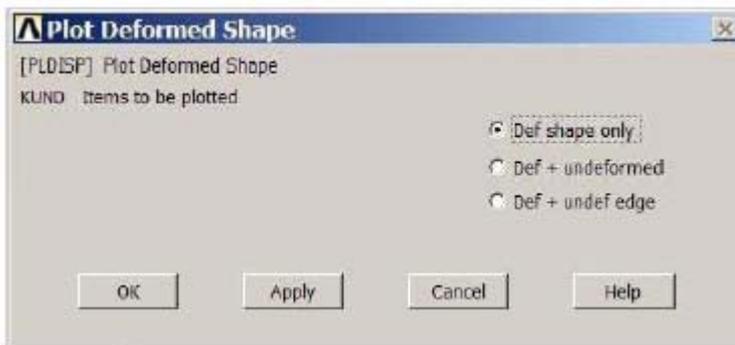
**Solution>Solve>Current LS**





Finalmente, cuando el programa ya ha buscado una solución en función de todas las variables aplicadas, se puede ver representada la respuesta que tendría de la parte estudiada.

**General Postproc> Plot Results > Deformed Shape**



Una de las representaciones más útiles en el estudio de un buque es la deformación por presión hidrostática. En la Figura 53 se pueden apreciar las deformaciones en toda la extensión del mamparo.

La deformación máxima ocurre en la parte central del mamparo, tal y como era de esperar, puesto que la parte central del mamparo de un buque es la que más sufre.

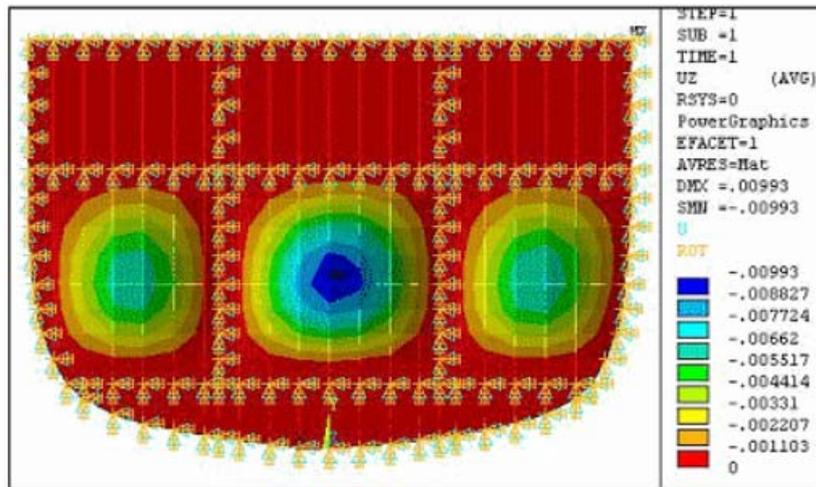


Figura 53 - Deformaciones por presión hidrostática

En el mismo análisis de resultados es posible visualizar las tensiones en distintas zonas del mamparo, tal como se muestra en la Figura 54. Detalles de cualquier punto en el mamparo, particularmente aquellos sometidos a esfuerzos elevados, pueden ser estudiados de tal forma que se deban reforzar las zonas que excedan los esfuerzos admisibles.

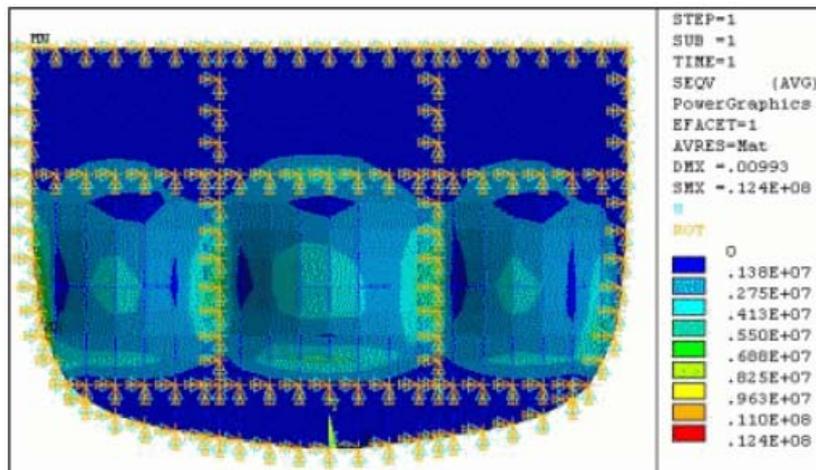


Figura 54 - Tensiones por presión hidrostática.

## 2. RAM-SERIES

### 2.1. Introducción

El objetivo es analizar la estructura completa de una embarcación de recreo. En este caso, toda dicha estructura estará conformada por distintos laminados de materiales compuestos.

Se asumirá que el modelo CAD ha sido previamente generado mediante otro software, y se ha importado en RamSeries (en formato IGES, STEP, o cualquier otro de los soportados por RamSeries). Una vez obtenida dicha geometría, este ejemplo se centrará en la generación de un modelo CAE, asignando a la estructura modelizada las correspondientes condiciones de contorno, cargas y materiales, necesarias para realizar un cálculo por elementos finitos (análisis FEM). Tanto la modelización como el cálculo FEM se realizarán en su totalidad con el programa RamSeries. Dicho programa incluye el entorno de pre-post proceso y malladorGiD, así como el código de elementos finitos RamSeries.

### 2.1.1. Definición del Análisis

Lo primero que nos vamos a encontrar al iniciar el programa, es una ventana "wizard", que nos ayudará a definir el tipo de análisis que queremos realizar.

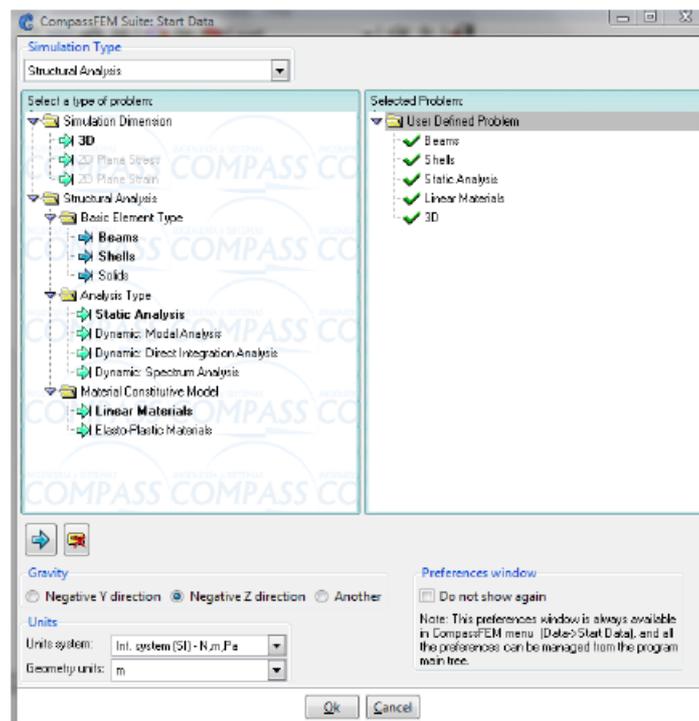


Figura 55–Tipo de Análisis

Es posible definir distintos de análisis, algunos de relativa complejidad. En nuestro caso, nos limitaremos de momento a cálculos **estáticos**, y **lineales** (tanto en materiales como en geometría). Por tanto, la configuración a elegir, será la mostrada en la imagen anterior (UserDefinedProblem). Así, el árbol del programa quedará como sigue (Data->Data (Internal)):

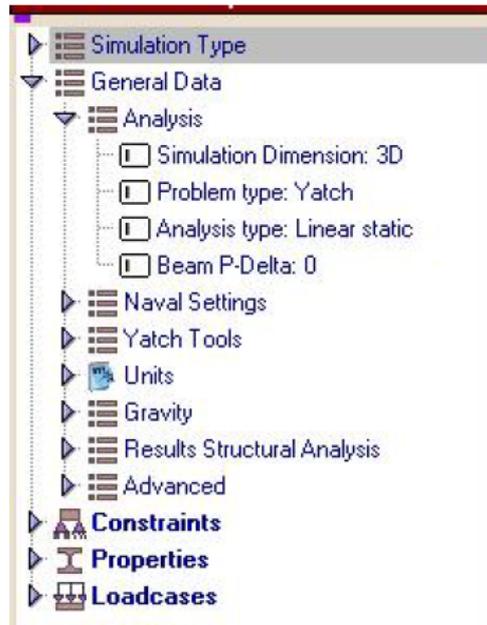


Figura56 - Análisis

En este caso particular, y para poder definir los materiales compuestos, así como para hacer uso de las cargas de ola (junto con el equilibrado automático sobre la misma), es necesario activar el tipo de problema "Yatch".

## 2.2. Modelo CAD

El modelo CAD es una representación 3D del casco de una lancha, así como de su estructura resistente interna (cuadernas, baos, varengas, vagras, mamparos, cubiertas, etc..).

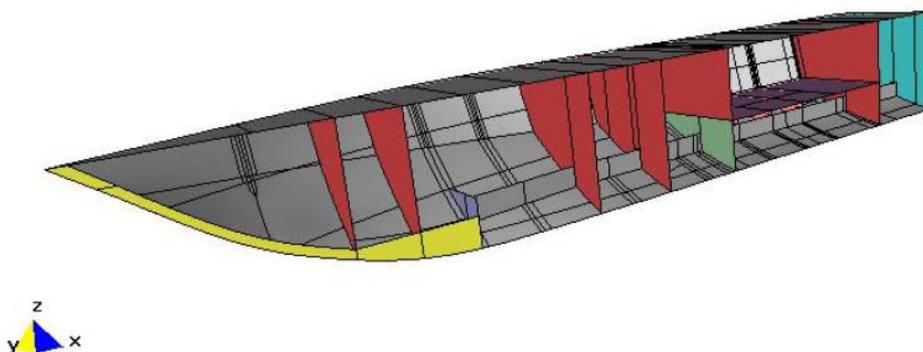


Figura57– Modelo CAD

Como se ha comentado anteriormente, el modelo (en formato IGES) se ha importado directamente en RamSeries:

*Files->Import->IGES*

Normalmente, tras una importación suele ser necesario hacer uso de las herramientas para reparar y condicionar la geometría para un cálculo FEM. Por ejemplo:

- Colapsado (*Geometry->edit->Collapse->[Model, Surfaces, Lines or Points]*)
- Reparación automática (*Utilities->RepairModel*)
- Verificación de entidades superiores (*View->HigherEntities*)

En muchos casos, se puede ganar algo de tiempo, permitiendo que el programa haga un colapsado automático tras la importación. La tolerancia de dicho colapso puede imponerla el usuario, o bien se puede dejar que el propio programa decida la más conveniente.

(*Utilities->Preferences->Exchange->[Automatic Collapse after Import]+[Automatic Import Tolerance]*)

### 2.2.1. Unidades

El modelo así creado tendrá unas ciertas dimensiones, a las que corresponderán unas unidades.

Dichas unidades (que serán las que le llegarán al código de cálculo con la malla) pueden definirse y modificarse en GeometryUnits. Así mismo, pueden modificarse las unidades generales con las que van a definirse el resto de las magnitudes físicas involucradas en el análisis (General Units).

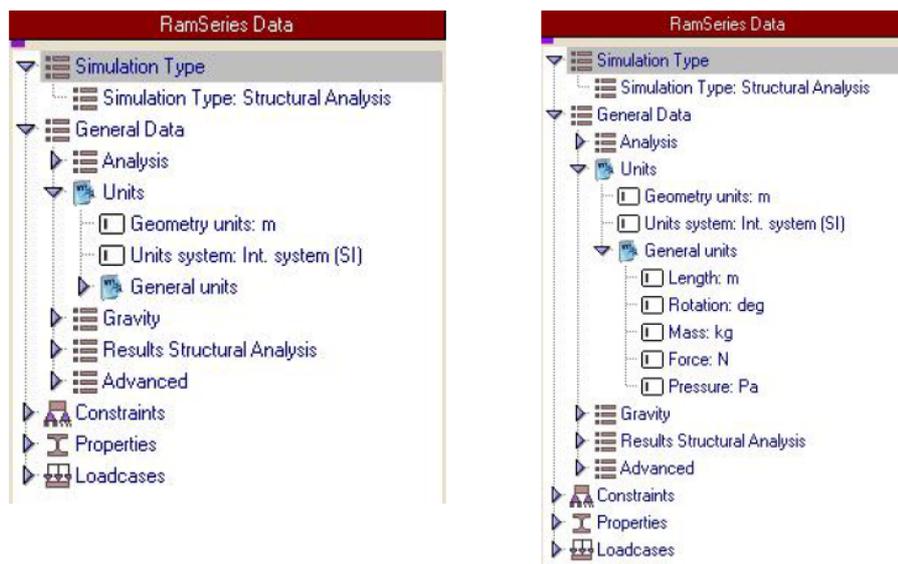


Figura 58– Modificación Unidades

### 2.3. Modelo CAE

A continuación, se asignarán al modelo las condiciones necesarias para que represente la realidad física que se pretende analizar mediante elementos finitos.

### 2.3.1. Materiales

En este caso, será necesario crear los materiales compuestos que posteriormente se usarán para generar los laminados a aplicar sobre las superficies.



Figura 59 - Materiales

Cada material nuevo puede crearse introduciendo directamente sus propiedades mecánicas como compuesto refuerzo-matriz (fibra -resina), o bien introducir por separado las propiedades de la resina y de la fibra, dejando que el programa calcule internamente las propiedades del compuesto (botón *[Fiber-Resin]*).

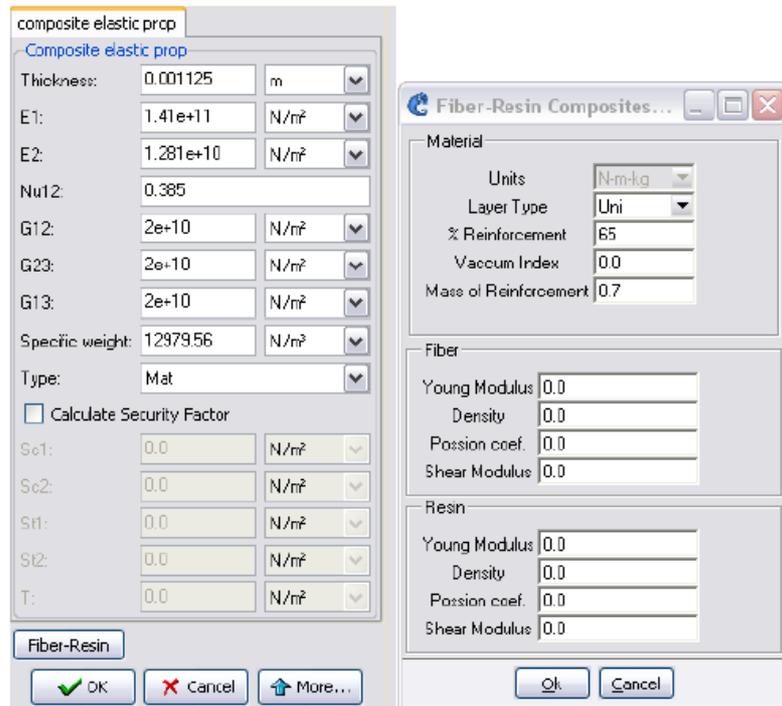


Figura 60– Propiedades mecánicas

### 2.3.1.1. Láminas

Una vez creados todos los materiales necesarios, se puede proceder a crear los distintos laminados, y a aplicarlos sobre las distintas partes de la estructura ( *Properties->Shells->Laminate Shell->[Edit]* ) La ventana de creación de laminados es la siguiente:

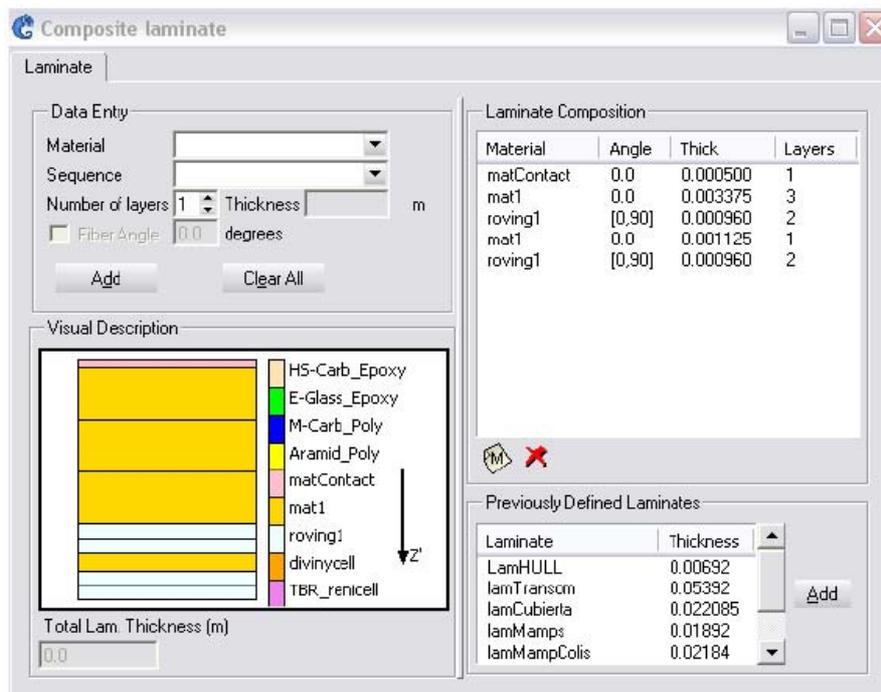


Figura 61 - Laminado

Aquí, es importante fijarse en el sentido del eje local Z' de la superficie a la que se le asigna el laminado, dado que la secuencia de laminado es importante, y se tendrá en cuenta a través del sentido de dicho eje.

Habrà que asignarle, por tanto, ejes locales a las superficies sobre las cuales se vaya a aplicar un laminado cuya secuencia de laminación se desee considerar.

### 2.3.1.2. Vigas

En este caso, se definirán refuerzos con distintos núcleos, y distintos laminados.

Aquí también hay que poner especial atención en definir unos ejes locales adecuados y asignárselos a las líneas que representan los refuerzos, de modo que las propiedades mecánicas de la sección correspondan a la orientación requerida de la misma. La orientación de los ejes locales de la sección, según los cuales están definidas sus propiedades resistentes, se indica en la imagen que aparece en la ventana de creación de refuerzos de materiales compuestos (*Properties->Beams->Naval Stiffeners->[Edit]*).

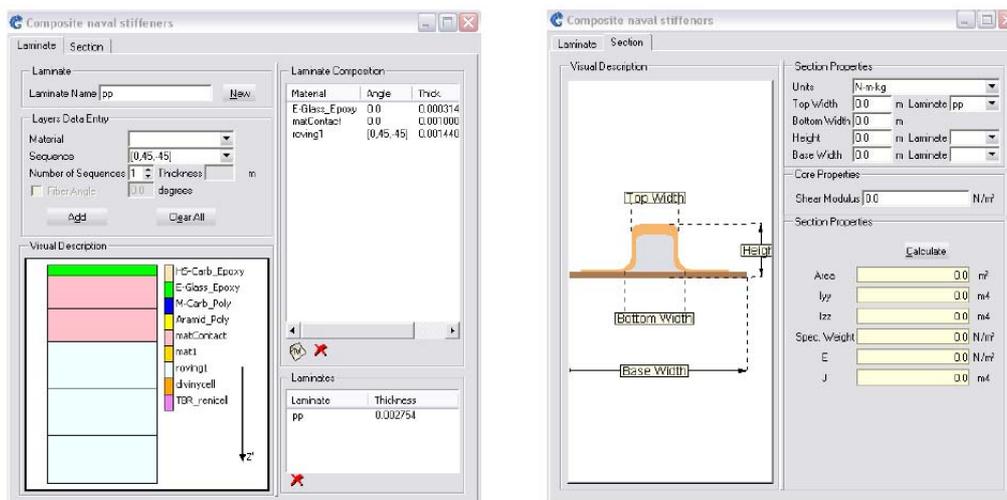


Figura 62 - Refuerzos

Se crearán y asignarán los ejes locales necesarios. Esto se puede hacer desde *Data->Local Axes->Open*. Para crear cada juego de ejes: *Generic->Create->[X and angle]*.

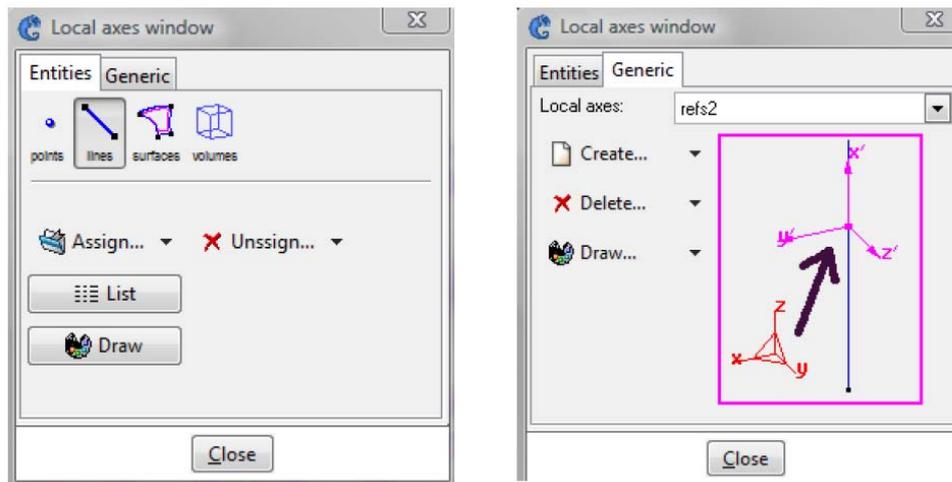


Figura 63– Ejes locales

### 2.3.2. Cargas

Las cargas que se impondrán en este caso serán: la **presión hidrostática** sobre el casco generado por una **ola**, y una carga repartida por todo el casco, equivalente al **desplazamiento** del casco correspondiente al calado que se haya impuesto al generar la carga de la ola.

#### 2.3.2.1. Carga de Ola

Esta carga ( *Loadcases->Loadcase 1->Shells->Wave Load->[Edit]*) se define de forma sencilla con los siguientes parámetros:

- Amplitud de la ola
- Condición de arrufo o quebranto (por defecto), o un desfase introducido por el usuario
- Dos puntos de referencia en proa y popa del casco (y en el plano de crujía), que definan el calado.
- El perfil de ola: Sinusoidal, o trocoidal.

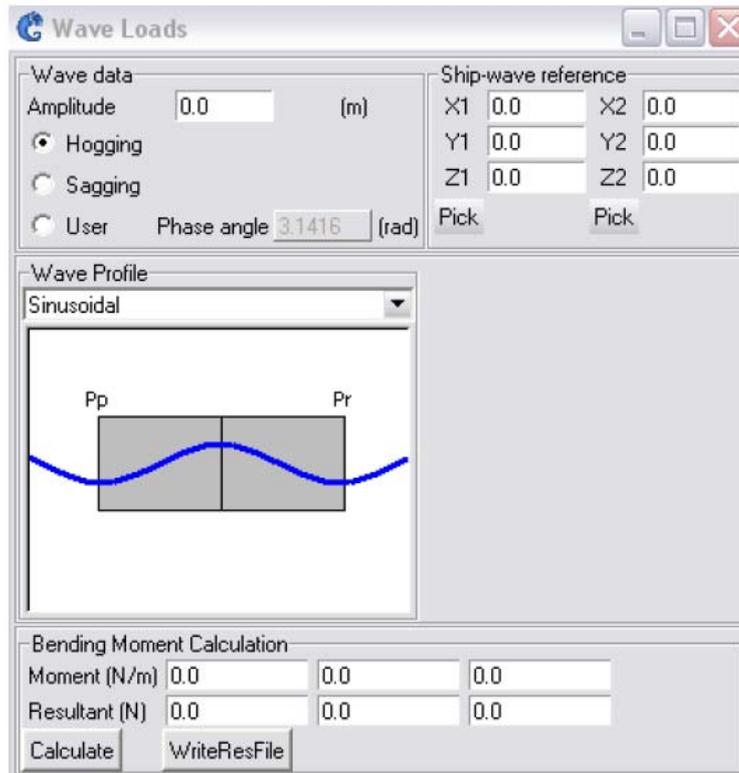


Figura 64– Carga de la ola sinusoidal

Esta carga se aplicará únicamente sobre las superficies del casco exterior.

En este caso, hay que cerciorarse que las normales a las superficies afectadas apuntan hacia el lado contrario donde estará el agua: *View->Normals->Surfaces*

### 2.3.2.2. Peso equivalente

Una vez determinado el empuje vertical sobre el casco por estar flotando sobre la ola definida anteriormente, es necesario repartir un peso equivalente por la estructura, de manera que se puede lanzar el cálculo usando la herramienta de equilibrado automático (*General Data->Naval Settings-Ship Balance->{Yes}*)

### 2.3.3. Condiciones de contorno

#### 2.3.3.1. Simetría Transversal

Se aplicarán condiciones de simetría, asumiendo que el plano Y=0 corresponde con el plano de crujía de la embarcación.

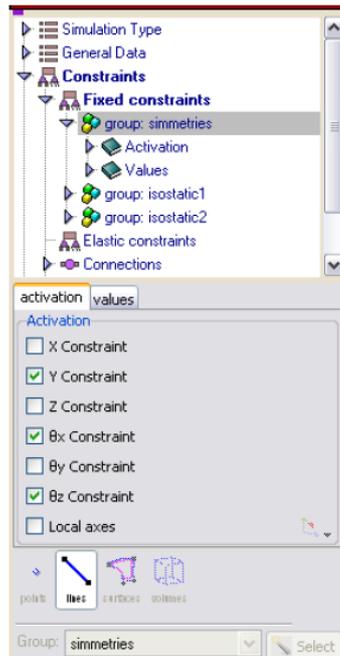


Figura 65– Condiciones de contorno (1)

Se aplicarán, además, condiciones de contorno mínimas en los puntos de proa y popa (condiciones isostáticas). Una estructura *isostática* es aquella que puede analizarse utilizando únicamente las ecuaciones de equilibrio de la estática.

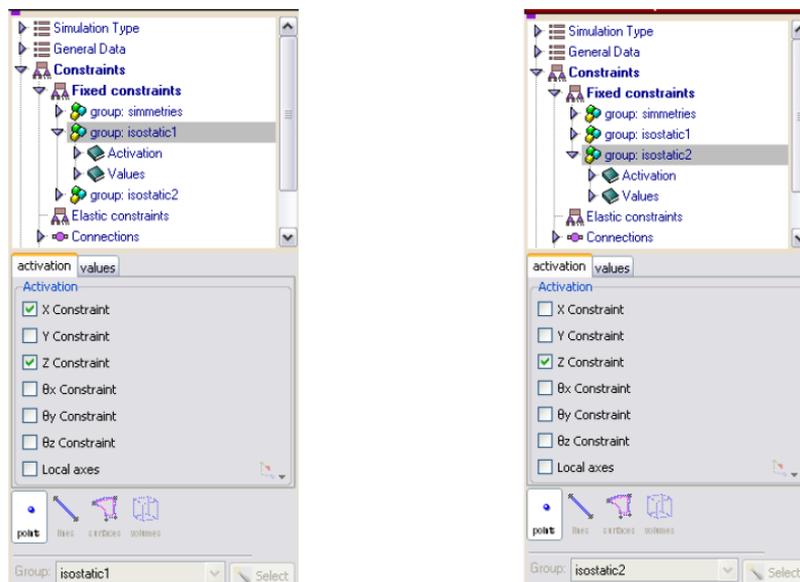


Figura 66 –Condiciones de contorno (2)



## VI.- Conclusiones

A lo largo de este PFC se ha presentado una visión global de las diferentes herramientas que existen para el diseño naval. Se ha realizado un pequeño estudio de todos estos programas tanto desde un punto de vista matemático como desde un punto de vista práctico. En el diseño de buques intervienen una multitud de factores que provienen de diferentes ramas de estudio, como Teoría del Buque, Dibujo Naval, Diseño de Formas, Análisis de estructuras, Dinámica de Fluidos y Resistencia de Materiales. En cada una de estas ramas de la Ingeniería se han hecho avances por separado evolucionando diferentes herramientas informáticas para cada área. Por ese motivo se dificulta en exceso la decisión de qué programa es mejor, ya que en cada uno de ellos prima un objetivo diferente.

Sin embargo, las características principales de estas herramientas siguen siendo comunes: eficiencia, eficacia, facilidad de uso y potencia en el manejo de superficies.

Los expertos se ponen de acuerdo en que es necesario utilizar programas de CAD para realizar el diseño del buque. En la parte I se han estudiado aquellos programas de CAD más utilizados en el mundo naval. Todos ellos tienen algo en común: actualmente prácticamente todos los paquetes de CAD utilizan curvas NURBS para su desarrollo. Eso es debido a que mediante curvas NURBS de grado 3 se tiene un gran dominio del diseño pudiéndose modelar de forma correcta las cuadernas de un buque (siendo siempre recomendable usar el mismo número de puntos de control por cuaderna). Con esos puntos de control de las curvas que definen las cuadernas se consigue formar una malla de puntos de control que permite definir la superficie NURBS que modela el casco. Además, mediante la inclusión de nodos y cambiando los pesos de los puntos de control pueden modelarse codillos y pantoques (zonas cilíndricas), pudiendo modelar el barco con todos sus detalles.

La mayoría de estos programas específicos navales son modeladores de superficies. En este PFC se ha intentado resaltar las ventajas y desventajas de un modelador de superficies frente a uno de sólidos. Lo más importante en un modelador de superficies es la definición exacta de las formas que se han diseñado y la conservación del “intento de diseño”, así como el poder avanzar posibles fallos o rectificaciones debido a los problemas que surjan de viabilidad, o bien por el propio diseño o por los procesos de fabricación, por costes y/o imposibilidades técnicas.

Otra gran ventaja es la posibilidad de realizar maquetas virtuales para la aceptación y validación del diseñador y, por descontado, del cliente.

Por otro lado, se debe valorar la carga de trabajo que hay que realizar con un modelador de superficies, y hasta donde hay que definir el modelo matemático con respecto al proyecto que se está realizando. Dentro de los modeladores de superficies hay que tener en cuenta si se van a retocar la definición de las formas o simplemente se definen y no se alisan o modifican para ajustarlas. Esto influye en la elección del tipo de modelador, respecto a la matemática utilizada, Bézier o NURBS.

También hay que hacer una valoración referente al paso de la información a un modelador de sólidos, ya que casi siempre hay que hacer un trabajo extra para que el modelo sea topológicamente coherente con las tolerancias del modelador de sólidos. Por ejemplo, si se define la forma de una cubierta y referente a los refuerzos y al espesor de la pieza dependen del proceso de fabricación (la laminación), no es necesario definir la pieza como un sólido y, por tanto, las tolerancias no son tan restrictivas. Se puede tener una discontinuidad mayor en posición, debido a que los programas de mecanizado son más “permisivos” con dicha discontinuidad.

A pesar de la comparativa, sigue quedando como gran incógnita qué es mejor, si un modelador de superficies o un modelador de sólidos. Así, para un mismo buque, si tenemos poco tiempo, se obtienen mejores resultados con un modelador de sólidos que con uno de superficies; en cambio, si tenemos más tiempo, con el de superficies podemos llegar a mejorar todo lo que queramos el diseño, mientras que en el de sólidos tenemos un límite. Por tanto, en base al estudio realizado podemos concluir que un modelador de superficies será mejor para aquellas embarcaciones exclusivas, por ejemplo, las de regatas, donde prima de gran manera el diseño de formas, así como su alisado para la facilidad del planeo. Son estructuras únicas que permiten la inversión de muchísimas horas en un solo proyecto, además de la gran inversión económica que eso significa. Sin embargo, un modelador de sólidos siempre será mejor para embarcaciones de recreo o buques donde prima mucho el factor económico y el tiempo de respuesta. Por ello, de cara a un astillero, siempre será mejor uno de sólidos ya que la opción de parametrizar les abre un gran abanico de posibilidades ante nuevas esloras sin mucho esfuerzo extra.

Por otro lado, en este PFC no solo se ha tenido en cuenta la importancia del diseño del casco y de su comportamiento frente a las olas, sino también cómo actuará la estructura teniendo en cuenta a las diferentes presiones a las que se verá sometido durante su vida útil. Para ello es para lo que se utilizan los programas de elementos finitos.

El método de los elementos finitos permite analizar diversos tipos de problemas, ya sea estático, dinámico, etc., de una estructura naval, por compleja que sea ésta, y poder abordar el problema en sus diferentes ámbitos, obteniendo resultados de valor práctico y con exactitud imposible de alcanzar de otra forma. Un modelo tridimensional en elementos finitos permite analizar cualquier zona del buque, aislándola y pudiendo observar su comportamiento particular, en la condición de carga aplicada al modelo global.

Antes de comenzar cualquier tipo de análisis, es recomendable hacer un estudio detallado de lo que se persigue con la modelación, evitando con esto “errores de partida”, que pueden llevar a rehacer el modelo, o en situaciones extremas, transformar un problema de fácil solución en uno prácticamente inabordable, ya que el objetivo del método es facilitar la tarea de diseño.

Como aporte final en este PFC se han ilustrado dos programas de FEM. ANSYS, uno de los programas de elementos finitos más conocido y ampliamente utilizado en el mundo de la ingeniería, y RAM-SERIES, programa menos conocido pero específico para embarcaciones y por lo tanto más intuitivo y con más posibilidades para el diseño de un buque. RAM-SERIES posee en su biblioteca todos los tipos de materiales utilizados hoy en día en la construcción tanto de buques como de embarcaciones de recreo, además de los diseños de perfiles de refuerzos más utilizados y muchos otros detalles específicos de la construcción naval. Todo ello lo hace ser más fiable en sus resultados finales.



## VII.- Bibliografía.

### **Revistas:**

- M. SALAS. "Modal Analysis of Ship Structures Using the Finite Element Method". Journal of the Pan-American Institute of Naval Engineers. Mayo de 2000.

### **Libros:**

- Gerald Farin. Curves and surfaces for CADG.ACADEMIC PRESS, INC., third edition, 1993.

- Foley, van Dam, Feiner, and Hughes. Computer Graphics. Principles and practice. Addison-Wesley, second edition, 1993.

- P. Lancaster and K. Salkauskas.Curve and Surface Fitting.Academic press, first edition, 1988.

- D.F. Rogers, An Introduction to NURBS With Historical Perspective, Academic Press, San Diego, CA, 2001.

- Bézier, Pierre – A View of the CAD/CAM Development Period – Annals of the History of Computing Volume 20, Number 2, 1998

- CAD/CAM Publishing – Computer Aided Design Report (CADCAMNET) – 1981-2007

- O.C. Zienkiewicz, R.L. Taylor. "El Método de los Elementos Finitos". MacGraw-Hill Barcelona,CIMNE 1994.

- SaeedMoaveni. "Finite Elements Análisis: They and application with ANSYS".UpperSaddleriver Prentice-Hall 1999.

- B. Szabó, I. Babuska, Finite Element Analysis.

- F. Cirak, M.J. Scott, E.K. Antonsson, M. Ortiz, P. Schröder, Integrated modeling, finite-element analysis, and engineering design for thin-shell structures using subdivision.

- Cook, R.D., Milkus, D.S., Plesha, M.E., and Will R.J., Concepts and Applications of Finite Element Analysis, Fourth Edition, John Wiley&Sons Inc. 2002.

- Hueing-Huang Lee , Finite Element Simulation with ANSYS Workbench,SDC Publications.

**Artículos de Proceedings en Conferencias (Publicados):**

- M. Salas, R. Luco y R. Villavicencio. "Dynamic Structural Analysis of a Fishing Vessel". Summer School "Safety at Sea". Technical University of Gdansk, GDANSK Polonia, 28-29 Agosto de 2001.

- R. Luco, M. Salas, M. Tarfaoui and V. Bertram."Finite Element Structural Modelling of a Composite-Material Multihull". HIPER'02. 3rd International Conference on High-Performance Marine Vehicles. Bergen, Noruega, 14-17 Sept. 2002.

- J. Espinosa, R. Luco, M. Salas, M. López and E. Oñate."Advanced Finite Element Method for Hydrodynamic Analysis of Americas Cup and IMS Racing Boat".High Performance Yacht Design Conference. Auckland, New Zealand. 3-6. Dec. 2002.

- M. Salas; R. Luco y R. Ojeda."Análisis Estructural de un Catamarán de Materiales Compuestos". XX Congreso del Grupo Español de Fractura, 2 al 4 de Abril, Benicàssim, España.

- R. Ojeda, B. GangadharaPrusty and M. Salas. Composite Catamarans under Slamming Loads: A case Study. Proceedings "Pacific 2004". Sydney, Australia 2-5 de Febrero 2004.

**Webs:**

<http://www.arqhys.com/construccion/cad-historia.html>

Wikipedia>Courant-Friedrichs-Lewy condition.

**Apuntes:**

-Dimensionamiento de Estructuras Navales (DEN) – IST (Universidad Técnica de Lisboa) Pr. Yordan Garbatov.

- Comportamiento de Estructuras Navales (CEN) – IST (Universidad Técnica de Lisboa) Pr. Yordan Garbatov.