

# ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE UN CATAMARÁN DE MATERIALES COMPUESTOS

M. Salas; R. Luco y R. Ojeda

Instituto de Ciencias Navales y Marítimas  
Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Universidad Austral de Chile  
Casilla 567, Valdivia, Chile.

**Resumen.** El presente trabajo presenta el análisis estructural mediante el método de elementos finitos de un catamarán construido de materiales compuestos dispuestos en paneles sándwich. Las propiedades mecánicas de los materiales compuestos son obtenidas mediante experimentación y comparación con métodos teóricos disponibles. Cargas de olas son aplicadas al modelo obteniéndose distribuciones de esfuerzos en el material y zonas de concentración de tensiones.

**Abstract.** This paper presents the finite element structural analysis of a catamaran built of composite material sandwich panels. Mechanical properties of composite materials are obtained through experimentation and comparison with available theoretical methods. Wave loads are applied in order to obtain stress distributions and to identify highly stressed areas.

## 1. INTRODUCCIÓN

Los materiales compuestos aplicados a estructuras navales han experimentado un notable desarrollo tecnológico en años recientes. Hoy en día es común su aplicación en embarcaciones deportivas, recreativas y de uso militar. La favorable relación peso/resistencia-estructural hacen de los materiales compuestos una alternativa cada vez más atractiva cuando se requiere un casco de bajo peso y capaz de soportar cargas rigurosas del medio marino.

Aún cuando las aplicaciones de materiales compuestos a estructuras navales son crecientes esto no significa que se cuente con un conocimiento acabado de las propiedades y comportamiento de dichos materiales. Típicamente deberán obtenerse las propiedades mecánicas por medio de la experimentación y teniendo en cuenta factores variables tales como contenido de resina en el laminado, orientación de las fibras de refuerzo, material y densidad del material núcleo usado en el sándwich.

## 2. LA EMBARCACIÓN EN ESTUDIO

La embarcación fue construida con sistema sándwich, es decir dos capas de material laminado, una exterior y una interior, y un núcleo, en este caso espuma de PVC. Las capas laminadas están constituidas de diferentes tipos de tejido de vidrio, especialmente unidireccionales, biaxiales y triaxiales. La fibra de vidrio fue aplicada en una matriz de resina vinylester hasta alcanzar espesores de diseño para las diversas regiones del casco. El

proceso de laminado fue manual en un 40% y al vacío en un 60%, realizándose los controles de calidad correspondientes a fin de eliminar zonas de baja impregnación de resina.

La nave utilizada para desarrollar este trabajo, corresponde a un diseño de Crowther Multihulls (Australia) y fue construida en Astilleros Alwoplast Ltda. (Chile). Las características principales de la embarcación son:

Eslora Total:	16.76 m
Manga Máxima:	6.00 m
Puntal de Diseño:	2.40 m
Calado:	0.80 m
Desplazamiento:	18.00 ton

La figura 1 muestra el arreglo general del catamarán

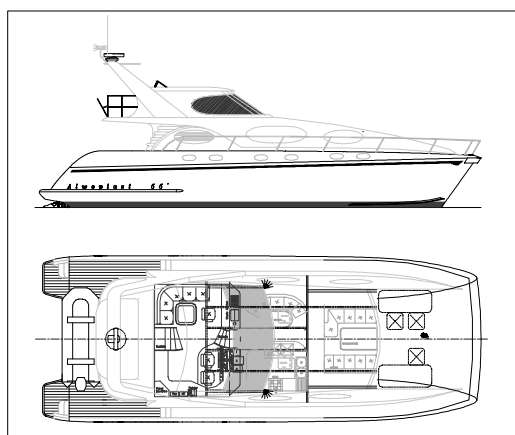


Fig. 1. Arreglo General del Catamarán

### 3. PROPIEDADES MECÁNICAS

Un aspecto clave en el Análisis Mediante el Método de Elementos Finitos de una embarcación construida de materiales compuestos es la determinación de las propiedades mecánicas del material. En general las propiedades mecánicas de los materiales compuestos no están disponibles en la literatura técnica. En efecto, los materiales constituyentes, básicamente resina y fibra de vidrio, pueden combinarse en una infinidad de maneras diferentes, no solo es variable la relación resina/vidrio, conocida como el contenido de vidrio, también la orientación de las fibras puede disponerse a voluntad según la dirección de las cargas principales. Existen algunos métodos teóricos disponibles para estimar las propiedades mecánicas de los materiales compuestos [1-3], sin embargo estos métodos no son confiables para determinar las propiedades de compuestos que incluyan varias capas de laminados con diversas orientaciones de las fibras. La situación es aún más compleja en laminados sándwich donde debe considerarse el comportamiento mecánico del material núcleo actuando en conjunto con las capas laminadas.

Usualmente los métodos teóricos asumen una o más de las siguientes restricciones

- El laminado es delgado
- La distribución de la deformación es lineal en el espesor del material
- La deformación en el sentido perpendicular a la línea media es despreciable
- Deformaciones de corte fuera del plano son nulas.

Condiciones que en general no se aplican a estructuras navales, esto indica que el método más confiable para obtener las propiedades mecánicas es la experimentación con probetas fabricadas del mismo modo como se construiría una parte de la embarcación. Normalmente las propiedades se obtienen siguiendo algún procedimiento establecido tal como las reglas de American Standard for Material Testing o la norma Europea EN63 para el ensayo de Plástico Reforzado con Fibra de Vidrio. La experimentación con probetas, sin embargo, es cara, complicada y requiere bastante tiempo, por estas razones a veces se prefiere realizar estimaciones teóricas para caracterizar los materiales modelados con elementos finitos.

#### 3.1. La Regla de las Mezclas

La regla de las mezclas o método de Tsai – Halping [4-5], relaciona el volumen de los materiales componentes y sus propiedades individuales. El método es válido dentro del rango de comportamiento lineal y permite calcular diversas propiedades. La forma de calcular las principales propiedades mecánicas se indica a continuación.

#### Densidad

La expresión para calcular densidad ( $\rho$ ) es

$$\rho = V_m \rho_m + V_f \rho_f \quad (1)$$

donde  $m$  y  $f$  indican propiedades correspondientes a la matriz (resina) y a las fibras respectivamente. Por ejemplo  $V_f$  corresponde al volumen de fibras presente en el laminado.

#### Módulo de elasticidad.

El modulo de elasticidad  $E_1$  o modulo de Young para cargas aplicadas en forma paralela a fibras unidireccionales es

$$E_1 = V_m E_m + V_f E_f \quad (2)$$

El subíndice 1 indica que la propiedad es referida a la dirección de las fibras.

Cuando las cargas se aplican en una dirección perpendicular a las fibras, o sea en la dirección 2, cada material componente actúa independientemente y la expresión del módulo de elasticidad es

$$\frac{1}{E_2} = \frac{V_m}{E_m} + \frac{V_f}{E_f} \quad (3)$$

#### Coefficiente de Poisson y Módulo de Corte

El coeficiente de Poisson  $\nu$  y el módulo de corte  $G$  en el plano 1-2 se pueden obtener de las siguientes expresiones,

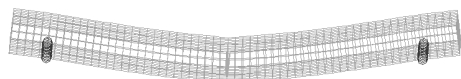
$$\nu_{12} = V_f \nu_f + V_m \nu_m \quad (4)$$

$$G_{12} = \frac{G_f * G_m}{V_m G_f + V_f G_m} \quad (5)$$

#### 3.2. Validación de Propiedades Mecánicas Obtenidas Teóricamente

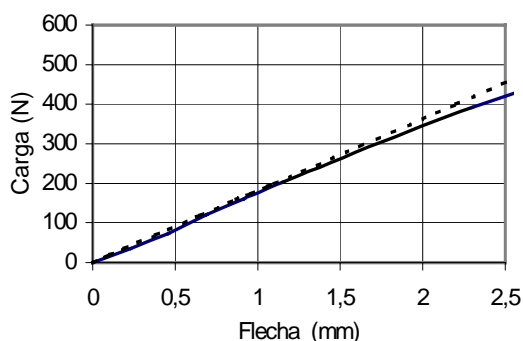
A fin de obtener un cierto grado de confianza en los resultados obtenidos teóricamente se realizaron un número limitado de pruebas experimentales con laminados similares a los dispuestos en el catamarán. La deflexión obtenida en estos ensayos fue comparada con la deflexión calculada mediante el método de los elementos finitos (MEF).

La figura 2 muestra el modelo de elementos finitos del laminado sándwich. Las capas fueron modeladas con 1200 elementos de placas y corresponden a fibra de vidrio en una matriz de resina vinylester. El núcleo fue modelado con 2400 elementos sólidos para representar la espuma de PVC de densidad 80 kg/m<sup>3</sup>.



**Fig. 2.** Modelo de Elementos finitos del Laminado Sándwich

Las flechas obtenidas para una luz no apoyada de 250 mm se muestran en la figura 3.



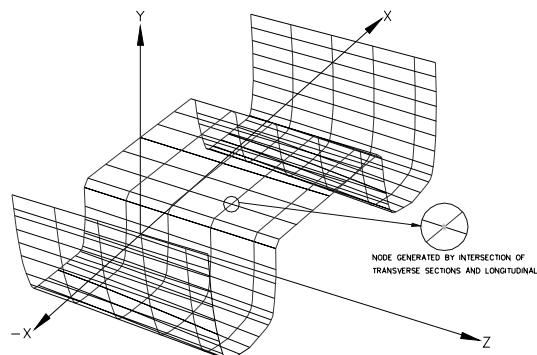
**Fig. 3.** Deflexión de laminado sándwich MEF(---) Experimento (—)

**4. MODELO DE ELEMENTOS FINITOS**

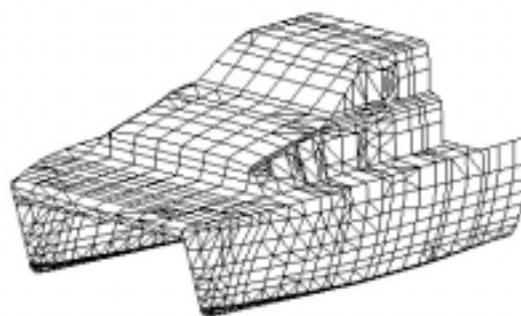
Para modelar la geometría del catamarán se empleo un método semiautomático. Mediante una herramienta CAD se definieron puntos (keypoints) en secciones transversales del catamarán, estos fueron luego exportados al programa de elementos finitos para la creación de los nodos y posteriormente los elementos constituyentes del modelo de elementos finitos.

La figura 4 muestra la definición del sistema coordenado empleado. Las características geométricas adicionales, tales como espesor de paneles, y las

propiedades mecánicas de los materiales compuestos fueron incorporadas directamente en el preprocesador del programa de elementos finitos. El modelo de elementos finitos del catamarán, presentado en la figura 5, requirió un total de 2992 nodos y 4791 elementos.



**Fig. 4.** Generación de Nodos



**Fig. 5.** Modelo de Elementos Finitos del Catamarán

Las propiedades de los materiales compuestos fueron obtenidas teóricamente. Un código computacional desarrollado por DAC (Zaragoza, España) fue utilizado para calcular tales propiedades. Los resultados se presentan en la Tabla 1.

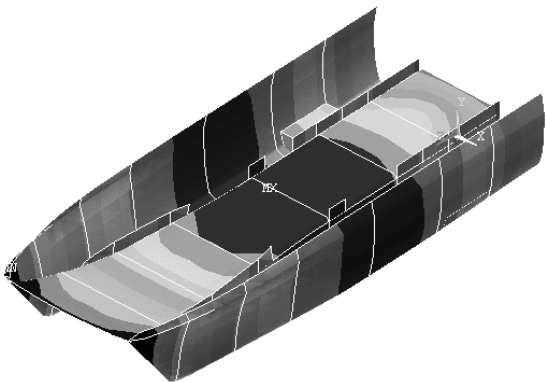
**Tabla 1.** Características de Laminados del Catamarán

Estructura	$E_1(GPA)$	$E_2(GPA)$	$G_{12}(GPA)$	$\nu_{21}$	$\nu_{12}$	espesor (mm)
Cascos-Fondo y Costados	1.391	2.702	0.733	0.243	0.472	34.33
Cubierta de Unión	1.113	2.146	0.584	0.244	0.470	44.33
Cubierta y Costados de Cabina	1.941	1.941	0.329	0.170	0.170	22.17
Techo de Cabina	1.378	1.378	0.239	0.173	0.173	32.17
Mamparos no Estancos	0.851	0.851	0.778	0.420	0.420	21.39
Mamparos Estancos	3.311	1.781	0.330	0.189	0.102	23.79
Pisos	2.162	1.047	0.573	0.419	0.238	22.95
Quilla y Vigas Longitudinales	1.392	0.440	0.147	0.361	0.114	10.590

## 5. CARGAS APLICADAS

Se estudiaron tres condiciones de carga, empuje hidrostático en aguas calmas y dos condiciones de slamming (carga de olas). La primera condición de slamming considera la embarcación flotando en el seno de una ola (Hollow Landing) y la segunda condición se refiere a la embarcación flotando en la cresta de una ola (Crest Landing). Las cargas fueron calculadas de acuerdo a las reglas DNV [6] para embarcaciones de alta velocidad.

En el caso de empuje hidrostático en aguas calmas las cargas se generan al existir diferencias entre el empuje del agua y el peso de la embarcación en la diferentes zonas del casco. La figura 6 muestra las deflexiones obtenidas en la zona inferior de la cubierta de unión (wetdeck).



**Fig. 6.** Deflexiones en la cubierta de unión. Áreas oscuras representan zonas de mayor deflexión.

En los casos de slamming el peso propio de la embarcación debe ser incrementada en un factor dependiente de la aceleración vertical calculada según las reglas DNV de la siguiente manera

$$a_{cg} = \frac{V}{\sqrt{L}} \cdot \frac{3.2}{L^{0.76}} \cdot f_g \cdot g_0 \left[ \frac{m}{s^2} \right] \quad (6)$$

Donde:

- $f_g$  es un factor de aceleración dependiente del tipo de servicio que preste la embarcación.
- $g_0$  es la aceleración de gravedad.
- $L$  es la eslora de la embarcación
- $V$  es la velocidad de servicio.

El momento longitudinal en el centro del casco debido a cargas del tipo Hollow Landing puede ser calculado de la siguiente expresión

$$M_b = \frac{\Delta}{2} (g_0 + a_{cg}) (e_r - e_w) [kN - m] \quad (7)$$

donde:

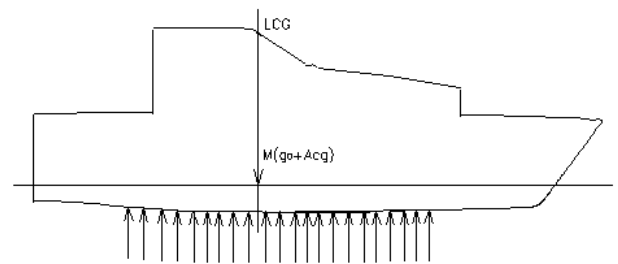
- $\Delta$  es el desplazamiento en toneladas
- $g_0$  es la aceleración de gravedad
- $a_{cg}$  es la aceleración vertical calculada anteriormente
- $e_r$  es la distancia desde las zonas de contacto con el agua y el centro de gravedad del catamarán
- $e_w$  es la mitad de la distancia entre el centro de gravedad del cuerpo de proa y el centro de gravedad del cuerpo de popa.

En el caso de cargas del tipo Crest Landing como se muestra en la figura 7, el momento longitudinal en el centro del catamarán puede ser calculado como se indica en la siguiente expresión,

$$M_b = \frac{\Delta}{2} (g_0 + a_{cg}) (e_w - \frac{l_s}{4}) [kN - m] \quad (8)$$

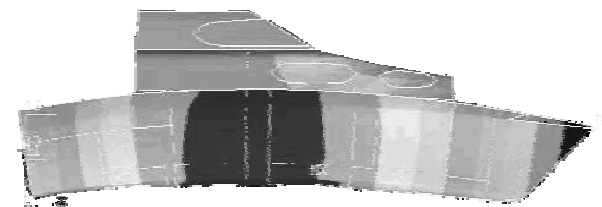
donde

- $\Delta$ ,  $g_0$ ,  $a_{cg}$  y  $e_w$  han sido previamente definidos
- $l_s$  es la longitud del área de slamming



**Fig. 7.** Carga de Slamming del tipo Crest Landing

La carga del tipo Crest Landing produce momentos de flexión mostrados en la figura 8. Las deflexiones han sido exageradas para fines ilustrativos.



**Fig. 8.** Momentos de flexión en Crest Landing. Áreas oscuras representan zonas con mayor carga.

Es claro que el mapa de distribución de esfuerzos concuerda con las cargas aplicadas. Un análisis de estructuras interiores y concentración de tensiones también es posible.

## CONCLUSIONES

Se requiere un mayor esfuerzo en investigación a fin de calcular propiedades mecánicas de materiales compuestos con un mayor grado de confiabilidad. Entretanto los cálculos experimentales proveen los resultados menos inciertos.

El método de elementos finitos es una herramienta muy útil para obtener mapas del estado de tensiones de la estructura de un multicasco, permite además una adecuada identificación de zonas de concentración de tensiones.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer a la Dirección de Investigación y Desarrollo de la Universidad Austral de Chile por el apoyo prestado, a Alwoplast (Chile) por la fabricación de probetas para los ensayos experimentales, a Crowther Multihulls (Australia) por permitir el uso de información de diseño del catamarán y finalmente a DAC (España) por calcular las propiedades mecánicas de materiales compuestos.

## REFERENCIAS

- [1] Al-Queshi, H. (1984) "Composite Materials: Fabrication and Analysis". Inst. Tec. Aero, SJ Dos Campos Brasil, 1984.
- [2] Divinycell. Technical Manual 1991.
- [3] Miravete, A. et al. "Materiales Compuestos" tomo I, Antonio Miravete y colaboradores Editado por Antonio Miravete, 2000
- [4] Smith, C.S. "Design of Marine Structures in Composite Materials". Elsevier Science Publishers. 1990.
- [5] Spyrakos, C. y Raftoyiannis, J. "Linear and non linear finite element analysis in engineering practice", Algor Publishing Division, 1997
- [6] Det Norske Veritas. Rules for high speed craft 2000.