

2

LOS NUEVOS MATERIALES  
EN LA CONSTRUCCIÓN NAVAL.  
COMPUESTOS E HÍBRIDOS

**D. Miguel Ángel Herreros Sierra**

*Departamento de Arquitectura y Construcciones Navales*



## D. Miguel Ángel Herreros Sierra

*Grupo de Investigación en Materiales Híbridos  
Dep. de Arquitectura y Construcciones Navales*

### Formación:

- Ingeniero Naval (programa de estudios de 6 años) 1986, Universidad Politécnica de Madrid.
- Doctor Ingeniero Naval 2003, Universidad Politécnica de Madrid.
- Auditor Energético, 1995 Universidad Politécnica de Madrid
- Máster en el método de elementos finitos FEM, 1996 UNED.

### Actividades Académicas:

- Profesor Titular de Universidad, en el Departamento de Arquitectura y Construcción Navales de la Universidad Politécnica de Madrid.
- Miembro del Laboratorio de Prueba de Materiales, dentro de la red de laboratorios certificados de la CAM.
- Miembro del Grupo de Investigación de Materiales Híbridos
- Miembro del CIME Centro de Investigación en Materiales Estructurales.

### Actividades Profesionales:

- 2009- ... Fundador de la empresa spin-off Tekhimat S.L., para el diseño desarrollo y fabricación de materiales híbridos estructurales.
- 1997-... Secretario de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Navales de la Universidad Politécnica de Madrid.
- 1995-1997. Secretario del Departamento de Enseñanzas Básicas de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Navales de la Universidad Politécnica de Madrid
- 2004- Coordinador Erasmus de la E.T.S.I.N.
- 1987-1994 CAD Manager, División de Ingeniería en AID-IBERIA; EBRO-KUBOTA y CADTECH.

### Áreas de investigación y publicaciones:

- Materiales Híbridos Estructurales, Adhesión y Adhesivos, Mecánica de la Fractura, NDT.
- 2 Patentes internacionales (EEUU y Japón) y 1 patente nacional. Premio 2007 a la mejor patente de la CAM.
- Primer premio de la competición UPM para la creación y desarrollo de empresas tecnológicas competitivas 2008.
- Participación en más de 25 proyectos nacionales e internacionales para agencias gubernamentales, y entidades públicas y privadas
- Mas de 35 escritos en revistas nacionales e internacionales conferencias, libros o capítulos de libros

## 2 • LOS NUEVOS MATERIALES EN LA CONSTRUCCIÓN NAVAL. COMPUESTOS E HÍBRIDOS

**D. Miguel Ángel Herreros Sierra**

*Departamento de Arquitectura y Construcciones Navales*

### **RESUMEN:**

El acero ha sido el material responsable del desarrollo de la construcción naval a lo largo del siglo XX, pero presenta una serie de limitaciones que le hacen incapaz de satisfacer los requerimientos de diseño y fabricación de estructuras más ligeras, más resistentes y seguras, que permitan velocidades más altas, con un menor consumo energético. Los materiales compuestos son ligeros y resistentes, y sus sistemas de fabricación son costosos y precisan de mano de obra especializada, característica que pueden compartir con los híbridos, pero los primeros son especialmente sensibles al daño por impacto y pueden presentar problemas de degradación de sus propiedades mecánicas debido a la absorción de agua, estando limitado el tamaño de las construcciones que los emplean. Los materiales híbridos laminados fibra-metal combinan la elevada resistencia al impacto y la durabilidad, junto a la versatilidad en los procesos productivos propios de los materiales metálicos, con la resistencia y rigidez específicas en la dirección de las fibras, así como un buen comportamiento a fatiga, característica de los materiales compuestos. Los materiales híbridos multicapa como SPS® o MALECON® consiguen prestaciones en servicio mejoradas que permiten prever un futuro prometedor para ellos si bien es necesario avanzar en su caracterización, análisis de sus características resistentes, de su comportamiento como aislantes frente a la vibración y el ruido, su comportamiento a fatiga y corrosión y su resistencia al fuego, y caracterizar totalmente sus procesos productivos y de unión adhesiva y soldada aplicando técnicas como la soldadura laser o por fricción que permiten un aporte de calor limitado y localizado. El Grupo de Materiales Híbridos de la ETSIN ha desarrollado y patentado soluciones estructurales de este tipo como MALECON® y DRONA® especialmente

pensados para aplicaciones navales tanto estructurales, como aquellas en las que sea necesario un excelente comportamiento de aislamiento y disipación de energía por impacto.

## 1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, los buques se fabrican casi por completo en acero, utilizando planchas de gran espesor y numerosos refuerzos longitudinales y transversales que soldados al forro constituyen una estructura resistente pero pesada, inconveniente que ha tratado de resolverse mediante el empleo de las estructuras de aluminio y en construcciones menores empleando como alternativa el PRF con distintas fibras de refuerzo dependiendo de la aplicación.

La competencia en precios en la industria naval ha sido siempre muy fuerte. Al objeto de mantener su posición y ganar nuevos contratos, el astillero debe aumentar su productividad y eficiencia, a la vez que rebaja los costes generales y los relativos a la mano de obra.

En general cuando se trata de mejorar la competitividad se suele dar poca importancia al capítulo de los materiales empleados aunque es éste, sin duda, uno de los más importantes factores de coste.

Como regla general para un buque de nueva construcción la distribución de costes esperable es de un 60% para los materiales frente a un 40% de mano de obra y gastos generales, con algunas variaciones para buques especializados, pues para un buque de guerra el coste de los materiales puede alcanzar hasta un 80% del coste total, pero estos números “gordos” permiten establecer órdenes de magnitud claros. Un 10% de ahorro en la mano de obra proporciona un ahorro global del 2%, mientras que un 10% de ahorro en el capítulo de materiales supone un 6% de los costes de la nueva construcción. La competitividad puede mejorarse con una adecuada selección de los materiales empleados y no tanto con la reducción de los costes laborales, algo especialmente difícil en países con una mano de obra cara.

Los actuales retos en la investigación y la tecnología naval se centran en el desarrollo de plataformas, buques convencionales ó multicasco, de efecto superficie y sustentación dinámica etc., más ágiles y medioambientalmente más eficientes, con una amplia capacidad de operación automatizada al máximo y con un ciclo de vida de coste reducido que puede incluir un diagnóstico proactivo, aspectos en el que los materiales compuestos y en especial los híbridos cuentan con la gran ventaja de permitir la monitorización en su propia estructura embebiendo fibra sensores de fibra óptica en su estructura sin alterar su comportamiento y características.

Centrados en el objetivo de la reducción del peso de los buques cons-

truidos con la tecnología y materiales actuales, cabe plantearse dos alternativas bien diferenciadas, aunque relacionadas entre ellas que son la construcción de estructuras más ligeras, en base a remplazar los refuerzos tradicionales con elementos con mayor rigidez a flexión y la construcción con materiales ligeros con una rigidez específica más elevada.

En ambos casos, las construcciones tipo sándwich son las más frecuentes, y se fabrican con pieles de aluminio y un núcleo de chapa corrugada unida mediante adhesivos de fusión en caliente, o una combinación de pieles de acero o aluminio con un núcleo de poliuretano inyectado, o núcleos de espuma de aluminio, madera de balsa e incluso hormigón ligero. En todos ellos se mejora la rigidez a flexión por unidad de peso, pero en ninguno se logran mejoras respecto a la resistencia del material en el propio plano, cuando este es un aspecto crucial en construcciones nuevas por encima de un cierto tamaño.

Al considerar todos estos aspectos que tienen que ver con el diseño estructural y su respuesta a las cargas de servicio del buque en navegación, a los impactos, y a la transmisión térmica y de ruidos y vibraciones y a la disminución del peso de la estructura, con sus implicaciones en la velocidad y el consumo, se plantean las diversas soluciones que se mencionan seguidamente y que se centran en los denominados buques híbridos o de estructura híbrida y en las soluciones que emplean materiales estructurales híbridos y celulares.

## 2. ESTRUCTURAS LIGERAS

Frente a estas opciones un laminado fibra-metal resulta una alternativa más que prometedora por diversas razones, ya que extiende el beneficio de las propiedades híbridas a la totalidad del casco, permite un amplio uso de los adhesivos estructurales y tiene la ventaja de evitar soluciones mecánicas en las zona de unión entre las estructuras de solo acero y solo compuesto, como son los remaches e insertos plásticos o metálicos.

Programas experimentales que lleva a término la U.S.Navy como los, X-Craft, SeaFlayer, HDV, SWD etc de buques altamente sofisticados y diseñados para optimizar su eficacia operativa, conllevan en muchos casos el empleo de nuevos materiales híbridos capaces de ofrecer lo mejor de sus componentes resolviendo algunos de los inconvenientes que estos plantean por separado, con soluciones de estructuras más convencionales pero empleando nuevos materiales ó con estructuras mixtas en que las zonas centrales del buque se construyen en acero, en su totalidad o creando una celosía que constituye la estructura primaria que se cierra con laminados compuestos.

Existen dos variantes para este tipo de estructuras ligeras: una opción es emplear acero en la sección central del casco (donde se precisa mayor re-

sistencia y rigidez) y materiales compuestos en proa y popa (donde las formas son más complejas); la otra opción es construir una estructura de barras de acero y utilizar paneles de material compuesto en el forro del casco. En ambos casos, las uniones de materiales disímilares crean puntos débiles en la estructura y son difíciles de resolver satisfactoriamente.

Otra opción consiste en reducir el número de refuerzos estructurales aumentando el momento de inercia de los paneles y, a ser posible, disminuyendo su peso. Las construcciones sándwich realizadas completamente de acero son un buen ejemplo.



También existen estudios de cascos para submarinos, torpedos y AUV's contruidos de un material híbrido similar a Malecon®, es decir un sándwich, en este caso en configuración cilíndrica de la que ya hemos preparado muestras de nuestro material, con caras exteriores metálicas y núcleo compuesto viscoelástico, que tienen un comportamiento resistente en inmersión similar a las configuraciones tradicionales pero un magnífico comportamiento en la amortiguación de las firmas acústica de estos objetos, lo que no solo supone una ventaja para buques de guerra, también para los buques de investigación y pesqueros.

Figura 1. "Panel curvo compuesto fabricado con Malecon®"

### 3. MATERIALES LIGEROS

En lo referente a la construcción utilizando materiales más ligeros, la idea es sustituir los materiales tradicionales con otros de menor peso específico. Normalmente estos son menos rígidos y precisan el empleo de un mayor número de refuerzos estructurales. En realidad, la opción más interesante es una combinación de las dos descritas anteriormente: la utilización de estructuras sándwich pero utilizando materiales que sean lo más ligeros posible.

Como antes se ha mencionado la definición del tipo de servicio o misión del buque, su operatividad y la zona de navegación condicionan su diseño y las características de los materiales que pueden o deben emplearse. Así no es igual la navegación fluvial, que la costera o de cabotaje, que la navegación transoceánica y tampoco resulta igual, en un enfoque de operación y mantenimiento, el tipo de estructura y materiales a emplear,

que puede quedar incluso definida por la específica misión del buque como puede ser el caso de los dragaminas o de los rompehielos.

Cada material posee sus cualidades características y sus aplicaciones para las cuales resulta el más adecuado, de modo que dependiendo de la aplicación, un material puede resultar mejor que otro. Pero cuando las aplicaciones resultan más complejas, al elegir un material incurrimos en penalizaciones en algunos aspectos de su respuesta si bien potenciamos otros, por ellos una combinación inteligente de varios materiales puede ofrecer una respuesta mejor que sus componentes por separado. Así, como ya hemos comentado, los laminados metal-plástico, ofrecen las ventajas de su ligereza combinada con una elevada rigidez y resistencia así como un comportamiento mejorado en fatiga y fractura.

A continuación se enumeran algunas de las tecnologías en competencia, cada una con diferente grado de desarrollo, para substituir a los materiales tradicionales y que recogen los principios considerados anteriormente para aligerar el peso de las estructuras marinas:

Metawell: Paneles sándwich fabricados en aluminio, formados por dos pieles y un núcleo consistente en una lámina sinusoidal unida mediante adhesivos de fusión en caliente.

SPS (Sandwich Plate System): Dos pieles de acero o de otro metal soldadas a unos perfiles perimetrales para lograr una cavidad estanca y un núcleo de poliuretano inyectado.

Sándwiches con núcleos de espuma de aluminio: Unidos a las pieles de aluminio mediante adhesivo.

ULIVES: Sándwiches con núcleos de espuma de aluminio generada in situ mediante tecnología de polvos y con unión metalúrgica a las pieles.

DE-LIGHT Transport: Developing lightweight modules for transport systems featuring efficient production and lifecycle benefits at structural and functional integrity using risk based design 11/2006 – 10/2009; Sixth Framework Program

EUCLID RTP3.2: European Cooperation for the long term in defence Survivability, Durability and Performance of Naval Composite Structures

INBAT: Innovative Barge Trains for Effective Transport on Inland Shallow Waters 4/2001 – 8/2004; Fifth Framework Program

InnoRegio – Maritime Alliance: Lightweight design structures in shipbuilding. Subproyecto “Development of plate elements made of foamed aluminium and/or mineral foams mainly for wall systems as modular lightweight design structures”

LASS: Lightweight construction applications at sea.

Sand.Core: Coordination Action on Advanced Sandwich Structures in the Transportation Industry 1/2004 – 6/2006; Sixth Framework Program.

SANDWICH: Advanced composite sandwich steel structures 4/2000 – 6/2003; Fifth Framework Program

BONDSHIP: Bonding of lightweight materials for cost effective production of high speed craft and passenger ships; Fifth Framework Program – EU (FFP); 4/2000 – 6/2003

CRASHCOASTER: Crashworthy side structures for improved collision damage survivability of coasters and medium sized RoRo cargo ships; FFP; 5/2000 – 4/2004

EUREKA E2772 – BALTECOLOGICALSHIP: Environment Friendly Ships For Baltic Area; Eureka Project; 12/2001 – 2/2005

FASDHTS: High-tensile steel 690 in fast ship structures; FFP; 4/2000 – 6/2004

Finalmente es posible señalar, como se indica en las “Rules for the Application of Sandwich Panel Construction to Ship Structure” de Lloyds, que son de aplicación junto con las “Rules and Regulations for the Classification of Ships” de la misma sociedad, para los casos de construcción ó reparación de buques empleando sándwiches con caras exteriores de acero, que este tipo de estructuras pueden ser empleadas hasta en elementos tan delicados o conflictivos como: Cubiertas superiores en Portacontenedores y LNGs, mamparos longitudinales, mamparos de colisión, estructuras de apoyo de timones y pods, dobles fondos, miembros estructurales primarios, mamparos corrugados etc., como se recoge el epígrafe 1.5 de dichas reglas, teniendo en cuenta además que el material Malecón se ajusta con total exactitud a la definición de Steel Sandwich Panel en el epígrafe 2.2.

Es decir la construcción naval actual requiere de estos nuevos materiales y estrategias de construcción, puesto que los materiales convencionales nos son capaces de cubrir las necesidades tecnológicas que las nuevas aplicaciones demandan.

#### **4. MATERIALES ALTERNATIVOS. VENTAJAS Y DIFERENCIAS**

En el mundo de la construcción naval la gran revolución fue el paso de la madera al acero. La construcción generalizada en acero para las estructuras primaria y secundaria con elementos soldados, ha sido un gran avance, pero plantea ciertos inconvenientes conocidos, debidos unos a que el medio marino es extremadamente hostil para el buque y sus estructuras, bajo la acción el mar, del viento y de su carga, y otros inherentes al proceso constructivo, entre los que destaca la gran cantidad de



zonas afectadas por el calor más sensibles a la corrosión y con peor respuesta a la fatiga, lo que supone a la larga mayores costes de operación y mantenimiento.

Un gran avance en la construcción naval lo ha representado la irrupción de los materiales compuestos, por su capacidad de conformado, su menor coste de mantenimiento y su mayor cociente resistencia-peso, que, si bien suponen un mayor coste inicial en la construcción, conducen a un menor coste total en la vida en servicio del buque.

Un menor peso supone menos combustible y mayor capacidad de carga de pago con menores costes, lo que añadido a la capacidad de mejorar las formas, supone un comportamiento del buque más eficiente y medioambientalmente mejor.

Pero la construcción en compuestos también plantea problemas, como la rotura de fibras, las microgrietas, las deslaminaciones, los contaminantes, la porosidad, la distribución de la matriz y las fibras, su orientación y en general todos los aspectos que tiene que ver con las propiedades microestructurales del compuesto.

El “otro” gran problema de este material es que, en un buque de más de 60 metros de eslora, es muy difícil construir su estructura primaria solo empleando materiales compuestos, pues se requiere acudir a fibras de refuerzo como el carbono u otras, que son mucho más caras que la fibra de vidrio, y que pueden estar permitidas en aplicaciones singulares como los veleros de competición o ciertos buques especiales, pero cuyo uso comercial queda claramente restringido por su precio.

La razón de ello es que los materiales compuestos no tienen la resistencia suficiente en el plano que requieren las estructuras de los grandes buques, ya que estos en su navegación sufren permanentemente situaciones de tracción y compresión según se encuentren en arrufo o en quebranto sobre la ola. En estos grandes buques, los esfuerzos cortantes en el plano determinan la condición crítica de diseño, que no es el máximo momento a flexión del buque como viga, el cual es el criterio crítico de diseño de las embarcaciones de menor eslora.

Por esta razón son necesarios nuevos materiales capaces de satisfacer los requisitos de diseño y fabricación de estructuras resistentes y ligeras, capaces de permitir grandes velocidades y un menor gasto de energía. En este sentido los materiales híbridos fibra-metal combinan alta resistencia al impacto y durabilidad, la versátil manufactura de los metales y las características mecánicas de los compuestos.

El acero, material tradicionalmente empleado en la fabricación de embarcaciones y otras estructuras marinas, tiene una serie de limitaciones que impide seguir mejorando en la línea de construir estructuras ligeras, resistentes y seguras. Entre sus virtudes se puede citar que es barato, fá-

cilmente conformable y mecanizable, soldable, tiene un comportamiento y propiedades muy estudiadas y bien conocidas, es muy tenaz y resistente al impacto.

Siendo sus desventajas más acusadas su elevada densidad y los problemas de corrosión que presenta. Como alternativa se han ido proponiendo otros materiales alternativos como los aceros de alto límite elástico, las aleaciones de aluminio y los materiales compuestos de matriz polimérica reforzados con fibras de diferente configuración, características y origen. Todos ellos hacen posible aligerar las estructuras, al tener una resistencia específica más elevada que la del propio acero, pero siempre a costa de desatender alguna otra prestación importante para un material que ha de ser usado en aplicaciones navales.

Los aceros de alto límite elástico son, en general, más difíciles de soldar y, fundamentalmente, más proclives a la fractura. Además de que la vida a fatiga se ve reducida por un incremento general de las tensiones en la estructura asociado a la reducción en el escantillonado, también se producen problemas debidos al incremento de las tensiones residuales introducidas durante la construcción que se desarrollan en áreas tales como las intersecciones de refuerzos, donde las secuencias de soldeo originan tensiones residuales que son difíciles de aliviar en estos aceros.

Las aleaciones de aluminio aportan la ventaja de su menor densidad respecto al acero, pero también son menos rígidas y, en consecuencia, los ahorros de peso no son tan importantes como cabría esperar; también son más difíciles de soldar que el acero y presentan problemas añadidos como el de la fatiga-corrosión.

Los materiales compuestos utilizados en construcción naval, en general de matriz de poliéster o viniléster, reforzada con fibra de vidrio u otras de aplicación muy especializada, son ligeros y resistentes, pero los procesos de fabricación son más laboriosos y caros; además, son muy sensibles al dañado por impacto y pueden presentar problemas de deterioro de sus propiedades mecánicas por absorción de agua (ósmosis), a demás de la muy importante y ya señalada limitación en las dimensiones de la construcción final al quedar limitada la resistencia en el plano.

## 5. CARACTERIZACIÓN DE UN PANEL HÍBRIDO SÁNDWICH

Como las características, los modos de fabricación y de uso, y las limitaciones de servicio de las construcciones navales que emplean únicamente materiales compuestos son conocidas podemos centrarnos en la caracterización de los paneles híbridos, como alternativa más adecuada.

Los paneles sándwich de material híbrido son la síntesis del concepto. En ellos se combinan los materiales con una geometría y escala especí-

ficas, conformando las caras y el núcleo unidos mediante adhesivos que proporcionan continuidad estructural, proporcionando a la estructura una rigidez y resistencia elevadas con un peso lo menor posible.

La separación de las caras mediante el núcleo incrementa el momento de inercia  $I$  y el módulo de la sección  $Z$  del panel, con un mínimo incremento en el peso, obteniéndose una estructura eficiente para soportar cargas de flexión y pandeo.

Las caras externas soportan la mayoría de la carga, de manera que han de ser rígidas y resistentes; constituyen la cara externa del material híbrido y han de ser resistentes a la acción medioambiental. El núcleo ocupa la mayor parte del volumen, debe ser ligero y lo suficientemente rígido y resistente para soportar las tensiones de cortadura, de manera que el panel en su conjunto funcione como un conjunto resistente.

Hemos considerado al panel sándwich como una estructura constituida por caras de material A unidas y soportadas por un núcleo de material B, cada uno con su densidad y módulo de elasticidad propio. Pero el conjunto debe considerarse como un material con sus propiedades y características, lo cual resulta útil para la comparación de este material híbrido con los materiales monolíticos convencionales.

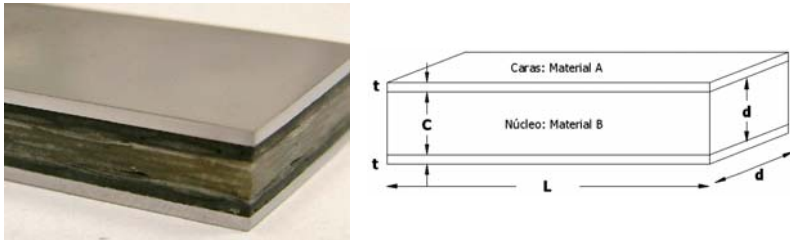


Figura 2. "Geometría del panel sándwich"

El criterio que suele emplearse para comparar las prestaciones es la rigidez a flexión por unidad de anchura,  $S_w$ , dividida por la masa por unidad de área,  $m_a$ .

La rigidez a flexión del panel por unidad de anchura,  $S_w$ , viene dada por

$$S_w = (EI)_{sand} = \left[ \frac{1}{12} (d^3 - c^3) E_c \right] \left\{ \frac{1}{1 + \frac{BE_c tc}{2G_n L^2}} \right\} \quad (1)$$

donde las dimensiones,  $d$ ,  $c$ ,  $t$  y  $L$  corresponden a las indicadas en la figura 3,  $E_c$  es el módulo de Young del material de las caras y  $G_n$  es el módulo de rigidez a cortadura del núcleo, donde la constante numérica  $B$  depende únicamente del tipo de carga considerado.

La ecuación anterior es el producto de dos términos. El primero, entre corchetes, sería el valor obtenido si la rigidez a flexión fuera el único modo de deformación considerado. El segundo término, entre llaves, es un factor de ponderación, menor que la unidad, de la rigidez debido al efecto de la cortadura en el núcleo.

Si el núcleo resiste de manera adecuada las tensiones de cortadura, el segundo término puede ser despreciado.

Considerando el panel sándwich como un todo, se puede definir un módulo aparente, el módulo de un material homogéneo con la misma rigidez a flexión que el sándwich, esto es

$$(EI)_{\text{sand}} = \frac{1}{12} (d^3 - c^3) E_c = \frac{1}{2} t d^2 E_c = \tilde{E} \frac{d^3}{12} \quad (2)$$

donde  $d^3/12$  es el momento de inercia de un panel homogéneo de espesor  $d$ .

Suponiendo en primera aproximación que  $t \ll d$ , resulta un módulo de Young aparente

$$\tilde{E} = \frac{6t}{d} E_c \quad (3)$$

El panel tiene una densidad,  $\rho$ , que es una media ponderada de las densidades del material de las caras y del núcleo

$$\rho = \frac{2t}{d} \rho_c + \left(1 - \frac{2t}{d}\right) \rho_n \quad (4)$$

Cuando el núcleo es lo suficientemente ligero, el segundo término es pequeño frente al primero, obteniéndose en tal caso la siguiente expresión que expresa el módulo de Young aparente en función del correspondiente al del material seleccionado para las pieles externas y al cociente de densidades entre núcleo y caras.

$$\tilde{E} \approx 3 \left( \frac{\rho}{\rho_c} \right) E_c \quad (5)$$

Si el material de las caras es mucho más pesado que el material del núcleo, la relación de densidades en (5) es prácticamente la unidad, de manera que la rigidez aparente resulta estar relacionada con la rigidez de las caras por un factor 3.

Dicho de otra manera, el panel sándwich a flexión es aproximadamente tres veces más eficiente que el más eficiente de los materiales compuestos con refuerzo de fibras, incluso cuando las fibras están alineadas en dirección normal al eje de flexión.

En resumen los parámetros de caracterización de un panel híbrido, que permiten la comparación de sus propiedades con las de otros materiales estructurales, son: la rigidez a flexión por unidad de anchura  $S_w$ , el módulo aparente  $E_{sand}$  y la fracción en volumen del metal FVM, que podemos ahora expresar en función del espesor de las pieles metálicas  $e_{skin}$  y del núcleo  $e_{core}$  para unas dimensiones de longitud y anchura  $l$  y  $a$ , para obtener unas curvas características

$$S_w = \frac{E_{skin}}{12} \frac{(e_{tot}^3 - e_{skin}^3)}{1 + \frac{K e_{core} e_{skin} E_{skin}}{2l^2 G_{core}}} \quad (6)$$

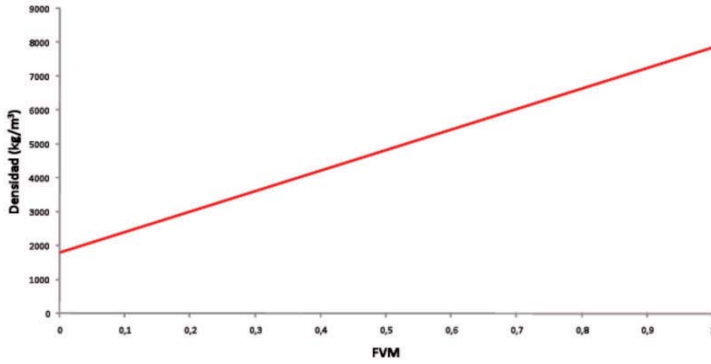
$$E_{sand} = \frac{6e_{skin}}{e_{core}} E_{skin} \approx 3 \frac{\rho_{mat}}{\rho_{core}} E_{skin} \quad (7)$$

$$FVM = \frac{\sum e_{skin}^i}{e_{total}} \quad (8)$$

De modo que el criterio de excelencia, en un diseño de rigidez definida y peso mínimo objetivo, es el parámetro  $\{M_1\}$  raíz cúbica del módulo de elasticidad longitudinal dividido por la densidad, que en función de la fracción de volumen da lugar a una densidad y un peso por unidad de área como los siguientes.

### Densidad del laminado híbrido

malecón



### Peso aéreo del laminado híbrido

malecón

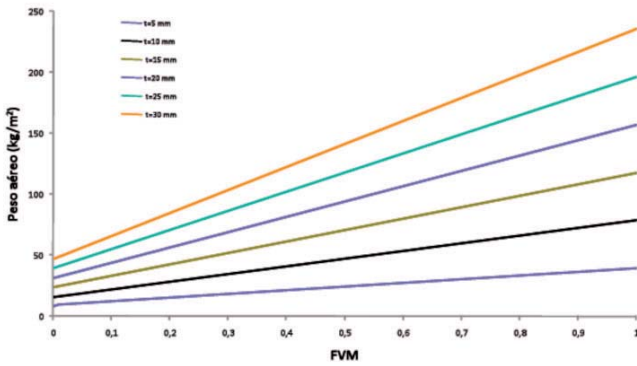


Figura 3. Densidad y peso por unidad de área del material

Resultando el siguiente módulo equivalente del material híbrido diseñado con la corrección por cortadura en el núcleo, denominador de la expresión (6).

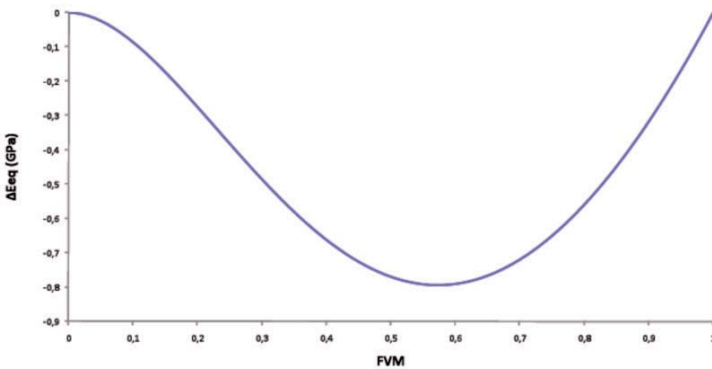
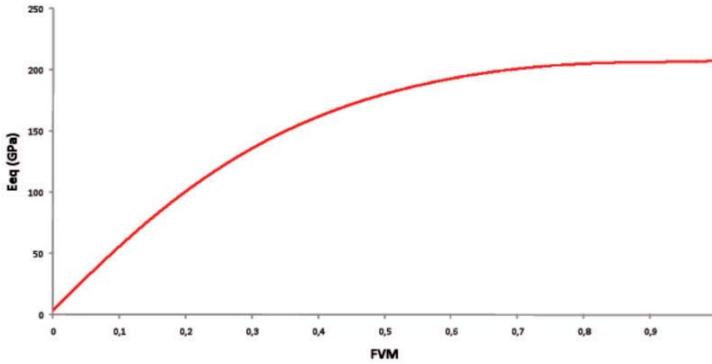


Figura 4. Módulo y corrección por cortadura del material híbrido

Esto es, por supuesto, una idealización pues el núcleo siempre se deforma algo a cortadura y tiene una cierta masa. La conclusión más relevante es que el criterio de excelencia para un diseño de peso mínimo para una rigidez impuesta, viene dado por la relación de propiedades  $E^{1/3}/\rho$ , y en esta situación la disposición de los materiales A y B formando un panel sándwich sobrepasa en prestaciones a cualquier otra geometría de híbrido A+B.

## 6. FALLO DE UN PANEL HÍBRIDO. PANDEO LOCAL POR DESLAMINACIÓN Y FRACTURA

Para caracterizar completamente el material y comprender las ventajas que supone su uso es necesario describir como trabaja en servicio y determinar sus modos de fallo, para compararlos con sus alternativas.

Un modo de fallo particularmente relevante en materiales híbridos fibra-metal es la propagación de grietas situadas en la interfase entre el metal y el material compuesto. Las zonas despegadas pueden formarse durante el proceso de fabricación del material o aparecer posteriormente, durante el servicio. En cualquier caso, el laminado híbrido está sometido a la acción de cargas locales de compresión, o de flexión, que pueden provocar fenómenos de inestabilidad, con el pandeo global de la placa o el pandeo local de los sublaminados situados por encima y por debajo de la región despegada. A medida que la deslaminación progresa, la geometría de la placa se modifica hasta alcanzar un nuevo estado de equilibrio. El proceso puede resultar en una propagación estable y parada o, por el contrario, en un crecimiento inestable hasta el fallo final.

El modo de fallo de pandeo local por deslaminación, figura 5, resulta ser fuertemente dependiente de la energía de fractura en la unión adhesiva entre el metal y el compuesto.



Figura 5. "Fallo por pandeo local de un laminado híbrido fibra-metal"

En el proceso de pandeo por deslaminación, los fenómenos de inestabilidad elástica y fractura ocurren de manera simultánea, y de hecho es posible plantear el problema con una formulación variacional de la que se puede obtener tanto la solución de equilibrio elástica como las condiciones de propagación de la grieta. Sin embargo, la forma más habitual de proceder es encontrar primero la solución del problema no lineal de equilibrio y, posteriormente, aplicar el criterio de fractura.



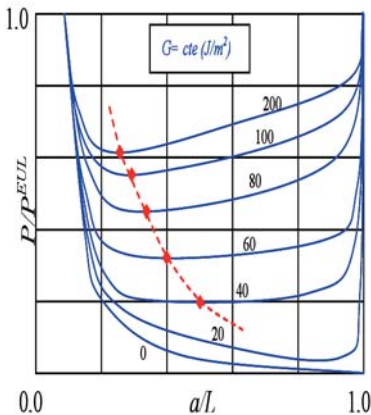
El problema de estabilidad puede ser planteado en el marco de la teoría de la elasticidad y este planteamiento tiene la ventaja de obtener como parte de la solución las tensiones interlaminares, que son, en último extremo, las responsables de la propagación de la zona despegada. No obstante, esto supone dificultades analíticas considerables, incluso recurriendo a técnicas numéricas, por tanto, la mayoría de los estudios recurren a teorías estructurales que modelan el laminado como una combinación de vigas y placas, pero donde se pierde cualquier información directa a cerca de las tensiones interlaminares.

En cuanto al fenómeno de fractura, se puede acudir al planteamiento local y obtener los factores de intensidad de tensiones,  $K_I$ , bien directamente una vez ha sido encontrada la solución poscrítica mediante la teoría de la elasticidad, o a posteriori, cuando se usa un modelo estructural de la solución obtenida numéricamente. De manera alternativa, se puede recurrir al planteamiento global y obtener la tasa de liberación de energía,  $G$ , generalmente mediante técnicas numéricas, para establecer un criterio de fractura en modo mixto.

Cuando se estudian los mecanismos de fallo de este tipo de materiales se puede comprobar que el pandeo local de la lámina metálica externa durante la flexión es muy sensible al valor de la energía de fractura adhesiva en la unión polímero-metal. La medida correcta de la energía de fractura adhesiva es pues determinante.

El daño en la zona despegada progresa cuando la energía de fractura adhesiva  $G$  supera un valor crítico  $G_C$ , que es posible determinar experimentalmente mediante ensayos adecuados.

La figura 6 muestra una serie de curvas de  $G$  en función de la longitud de la zona despegada y de la carga aplicada. Durante la fase previa al pandeo local, la lámina y el sustrato no experimentan desplazamiento



relativo alguno, de manera que las tensiones interlaminares son cero y también lo es  $G$ . En consecuencia, no habrá propagación de la zona despegada para cargas aplicadas inferiores a la que provoca el pandeo local de la lámina despegada. En la fase posterior al pandeo,  $G$  aumenta al aumentar la carga. Al alcanzar el valor crítico, comenzará la propagación de la

Figura 6. "Curva de tamaños críticos para crecimiento estable de la zona despegada en función de la Energía de Fractura Adhesiva"

zona despegada y el punto que representa el estado del sistema (a,P) se moverá a lo largo de una de las curvas  $G=G_C$ . El crecimiento será estable si P crece al aumentar a, e inestable si P decrece.

Por debajo de un cierto valor de la Energía de Fractura Adhesiva las curvas se hacen monótonamente decrecientes con el valor de "a", lo que equivale a decir que no se producirá crecimiento estable en ningún caso, sea cual sea el tamaño de la zona despegada. De manera que hay que evitar el empleo de matrices poliméricas con valores de  $G_C$  por debajo de este valor umbral,  $G_C^{th}$ , que hace que cualquier zona despegada propague inestablemente cuando se alcanza la carga necesaria. Por el contrario, para valores por encima de  $G_C^{th}$ , se tendrá propagación estable para tamaños de grieta por debajo del valor correspondiente al mínimo de cada curva. Se observa que el tamaño de las zonas despegadas que presenta propagación estable es menor a medida que crece la Energía de Fractura de la unión adhesiva. Luego, si consideramos las zonas despegadas con crecimiento estable como defectos admisibles vemos que a medida que tenemos uniones con mayor  $G_C$ , más resistentes, lo es a cambio de hacerlas menos tolerantes al daño, pues sólo defectos muy pequeños detendrán su progresión bajo carga.

La medida de la energía de fractura interfacial no es una tarea fácil. En primer lugar, porque varía con el modo de sollicitación (modo I, modo II o mixto) y también por las restricciones a la propagación de la grieta a lo largo de la línea de pegado. Para obtener la energía crítica de fractura en modo I ( $G_{Ic}$ ), se han utilizado probetas de ensayo TDCB (Tapered Double Cantilever Beam). Asimismo, se han realizado ensayos en modo mixto I+II, para distintas condiciones de mixicidad, utilizando probetas de ensayo DMMB (Dissimilar Mixed Mode Bending).

## 7. MaLECoN®

Desde hace tiempo el grupo de investigación en Materiales Híbridos, está trabajando en la caracterización del material híbrido Maleconâ que ahora se describirá sucintamente.

Este el grupo de investigación, formado por profesores y técnicos de laboratorio<sup>1</sup> de la ETSINavales, dentro del plan que la Universidad Politécnica de Madrid, ha promovido para la creación de grandes grupos de investigación para competir nacional e internacionalmente en los

---

(1) Componentes del Grupo de Materiales Híbridos: D. Juan Carlos Suárez Bermejo, D. Francisco López Martín, D. José Illescas Molina, D. Ignacio Díez de Ulzurrun Romeo, Dña. Ana María García Núñez, Dña. Ana Soria Bartolomé, D. Miguel Ángel Herreros Sierra, D. Santiago Miguel Alonso, Dña. Paz Pinilla Cea

programas de I+D+i, ha pasado a formar parte de una estructura mayor que es el CIME, Centro de Investigación en Materiales Estructurales, centro mixto creado entre el Consejo de Investigaciones Científicas, a través del Instituto Torroja y de los grupos de investigación consolidados de la UPM, GMC de Mecánica computacional, POLCA de Polímeros para su caracterización y aplicaciones, MATESAN de Materiales estructurales avanzados y nanomateriales y MH de Materiales híbridos, en el que confluyen los grupos punteros en el área de las Escuelas de Ingenieros Industriales, Caminos, Minas, Navales y Aeronáuticos, a los que se une el CIMNE de la Universidad Politécnica de Cataluña en la simulación de los métodos numéricos en ingeniería.

El grupo está trabajando junto con la empresa spin-off de la Universidad Politécnica de Madrid TEKHIMAT S.L. responsable de la explotación comercial de esta nueva tecnología en propuestas de futuro que permitan poner en práctica sobre objetivos reales la valía del material.

MALECON® es un material híbrido laminado fibra-metal constituido por capas de acero y material compuesto de matriz de viniléster y refuerzo de fibra de vidrio. Mediante la combinación de estos materiales, el posicionamiento y orientación precisas de cada capa, y la unión de las distintas capas entre sí, mediante adhesivos estructurales elásticos, se logra como producto final unos paneles híbridos con prestaciones superiores a los materiales competidores.

El resultado es un material más ligero, resistente, tenaz y seguro, que puede ser diseñado a medida para atender los requerimientos específicos de cada zona de la estructura. El procedimiento de fabricación modular es capaz de adaptarse a geometrías tanto planas como curvas y su proceso de ensamblaje garantiza la estanqueidad y la correcta transmisión de cargas de un panel a otro, a la vez que mejora la tolerancia al daño de la estructura mediante mecanismos que detienen la propagación de grietas.

El producto está patentado en España con extensión internacional a Europa y Japón:

Frente a los materiales tradicionales, Malecon® ofrece una serie de ventajas en distintos aspectos:

1. Desde el punto de vista del diseño, se consiguen estructuras más simples, con menos elementos de refuerzo y, por tanto, más fáciles de fabricar y de reparar. Por tanto con un ahorro de peso considerable.
2. Desde el punto de vista de las prestaciones del material, se logra una mayor rigidez por unidad de peso, se alarga la vida a fatiga y se mejora el comportamiento frente a la corrosión, con una mejor respuesta frente a sobrecargas e impactos, permitiendo la amortiguación de las vibraciones estructurales y sirviendo como aislante acústico.

3. Desde el punto de vista de la seguridad y de la protección frente a accidentes, Malecón logra disipar de una manera más eficiente la energía asociada a las colisiones, detiene o retrasa la propagación de grietas consiguiendo un plus de resistencia residual y una notable tolerancia al daño, además de suponer una barrera a la propagación del fuego. El comportamiento frente a explosiones e impactos balísticos es superior al de los materiales tradicionales.

4. Desde el punto de vista económico, Malecon® permite rebajar los costes de fabricación y reparación, obteniendo también ventajas en los costes de operación y de mantenimiento a lo largo de su vida en servicio.

Frente a los nuevos materiales tipo sándwich, Malecon® ofrece también ventajas:

1. El núcleo es de material compuesto de matriz polimérica con refuerzo de fibra (unidireccional o tejido), lo cual confiere al material resistencia en el plano de la plancha, indispensable para la construcción de embarcaciones por encima de un cierto tamaño.

2. La arquitectura laminada permite diseñar a medida el material para que se adapte a las distintas partes de la estructura, con el consiguiente incremento de la eficiencia estructural.

3. La unión del núcleo a las pieles mediante adhesivos elásticos facilita que el material pueda soportar las cargas de cortadura que aparecen cuando trabaja a flexión sin que se produzcan fallos estructurales prematuros.

4. La estructura laminar permite la fabricación de los bordes en escalera, permitiendo el ensamblaje de paneles planos y curvos para la construcción modular de estructuras de gran tamaño.

5. Se pueden introducir capas específicas que mejoren la respuesta frente a la acción del fuego, la disipación de energía durante sobrecargas e impactos, el amortiguamiento de vibraciones y el acondicionamiento acústico. Todo ello sin merma de sus propiedades mecánicas.

La diferencia fundamental de Malecon® respecto a otros materiales competidores es que utiliza refuerzo de fibra continua (unidireccional o tejido) y esto le confiere una resistencia en el plano que le hace superior a todos los demás.

Para la fabricación de este material se emplea una tecnología específica que es la “infusión de resina a vacío” *Resin Transfer Moulding*, como alternativa al moldeo en abierto, el cual requiere un uso intensivo de mano de obra para grandes superficies y que produce emisiones de estireno y otros volátiles y que no garantiza la calidad final.

Esta tecnología de fabricación supone importantes ventajas para el producto final:

1. Permite aumentar la relación fibra/resina y en consecuencia mejorar las propiedades mecánicas del material.
2. Disminuye la porosidad provocada por aire o volátiles atrapados en la matriz de polímero, que influyen de manera negativa en las propiedades del material.
3. Compacta las capas de material del núcleo y se consigue mejorar la adherencia entre las distintas capas y las pieles metálicas.
4. Mejora la sistematización del proceso industrial reduciendo la dispersión en los valores de las propiedades del material, garantizando la calidad del producto final con un efecto medioambiental más respetuoso.

Es cierto que esta tecnología de infusión de resina a vacío presenta una serie de dificultades que tienen que ser tomadas en consideración y que precisan de la utilización de equipos y procedimientos específicos que complican el proceso de fabricación:

1. Necesidad de construir una bolsa de vacío que englobe toda la zona que se desea laminar. Esta técnica, que es muy empleada en la industria aeronáutica, es sin embargo incipiente en la construcción naval y la ingeniería civil.
2. Se precisan equipos de vacío (líneas de vacío en fábrica, bombas de vacío a pie de obra) con la potencia suficiente para evacuar el volumen de aire atrapado dentro de la bolsa de vacío. La resina fluirá dentro de las fibras de refuerzo secas, empapándolas y consolidándolas por efecto del vacío realizado (de ahí el nombre de infusión de resina a vacío).
3. Se precisan resinas especiales con propiedades de flujo adecuadas al proceso de fabricación: baja viscosidad y tiempo de trabajo dentro de ciertos límites para permitir la infiltración completa antes de que se produzca la reticulación y endurecimiento del polímero.
4. El empleo de adhesivos estructurales para la unión del núcleo a las pieles metálicas precisa de sistemas de aplicación de los mismos para dispensarlos con los espesores y homogeneidad requeridos.
5. La limpieza de las chapas metálicas es superior al estándar normalmente utilizado en construcción naval con planchas de acero soldadas. Se precisan operaciones de chorreado con abrasivos para obtener la limpieza y rugosidad apropiadas para el correcto funcionamiento de las uniones adhesivas.

En cualquier caso, las ventajas obtenidas en el producto final compensan sobradamente las dificultades de su fabricación y la introducción de tec-

nologías de fabricación diferenciales respecto a los procedimientos tradicionales.

El material diseñado ha sido, y está siendo sometido a una serie sistemática de ensayos de caracterización para determinar su comportamiento, a tracción y compresión, en flexión a cuatro puntos y en pandeo local por tratarse de un fenómeno crítico como antes se ha dicho, así como la determinación de la energía de fractura del adhesivo para determinar el comportamiento en servicio, pues su actuación resulta clave en la redistribución de los esfuerzos.

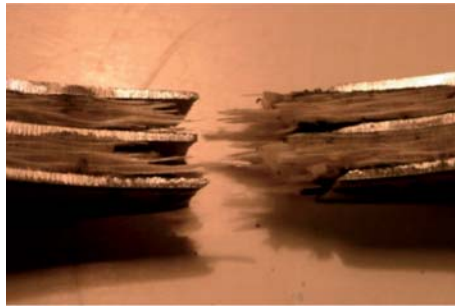
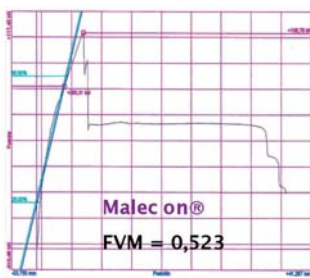


Figura 7. Análisis del comportamiento en tracción



Figura 8. Ensayo de flexión simple

Analizando la eficiencia a flexión del material híbrido podemos comprobar que el máximo de obtiene para un valor de FVM de 0,15, con un módulo de elasticidad longitudinal en el entorno de los 100 GPa para una densidad 5 veces menor.

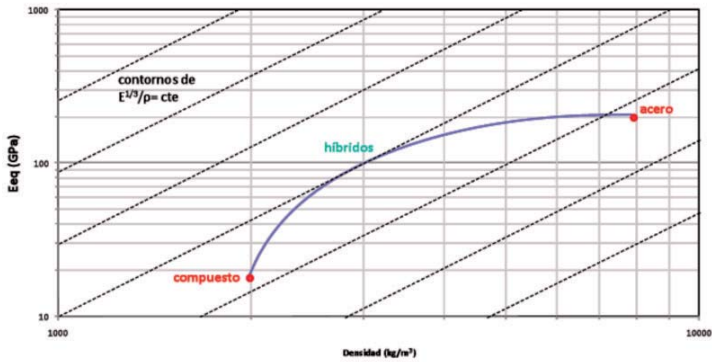
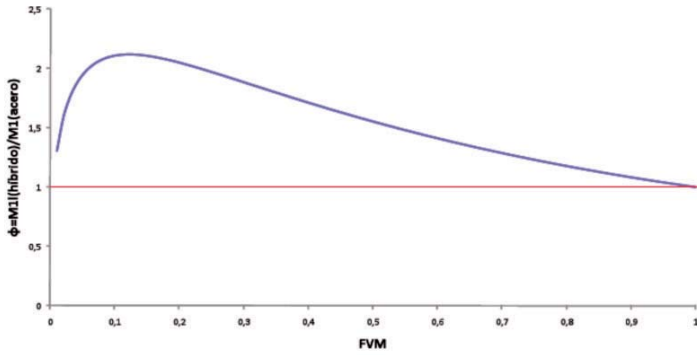


Figura 9. Eficiencia a flexión

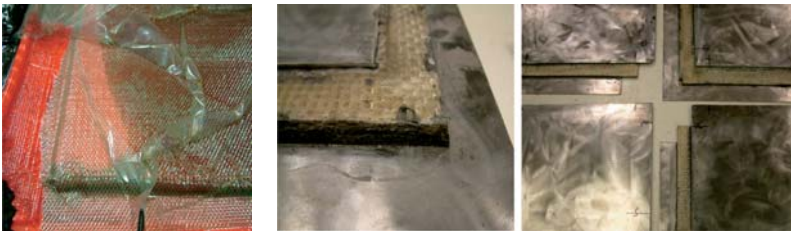


Figura 10. Proceso de infusión de resina y de ensamblado de paneles



Figura 11. Ensayo de paneles ensamblados a flexión y ensayo de paneles ensamblados a tracción-compresión en un bastidor con los dispositivos de medida extensiométricos

Se han realizado ensayos acelerados de corrosión en cámara de niebla salina para determinar el comportamiento del material y poder controlar y compensar las pérdidas por corrosión a lo largo de la vida en servicio de la estructura. En las fotografías se aprecia claramente la acción del envejecimiento sobre las pieles exteriores permaneciendo intacto el núcleo de material compuesto.



Figura 12. Ensayo de envejecimiento de material híbrido en cámara de niebla salina

Este material, o alguna de sus variantes en estudio por el grupo de investigación como Drona<sup>®</sup>, también presenta una elevada absorción de energía de impacto, lo que le hace potencialmente competitivo en la construcción naval militar como elemento estructural de defensa ante impactos de fragmentación y en general impacto de proyectiles de energía cinética. Ya que para el buque de guerra es especialmente importante conocer su capacidad para completar una misión tras un ataque, en función de los parámetros que definen su supervivencia, como son:

1. Susceptibilidad o habilidad para evitar ser impactado que será función de sus firmas, Rádar, Infrarroja, Visual, Acústica, Eléctrica, Magnética y de Presión,
2. Vulnerabilidad o nivel de daño cuando es alcanzado, en función del efecto de las armas, por Energía cinética, por Explosión, por Fragmentación, por Ondas de choque, por Fuego y humo y por Inundación y
3. Recuperabilidad o capacidad de recuperación desde un cierto nivel de daño.



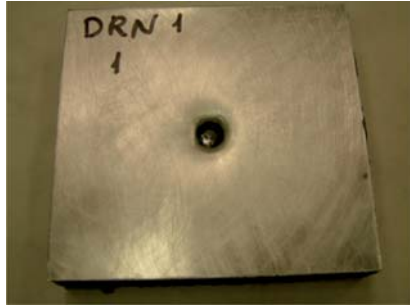


Figura 13. Ensayo de impacto de material híbrido

También se han desarrollado herramientas de diseño y cálculo por ordenador, mediante el empleo de programas de elementos finitos con la introducción de elementos que reproducen adecuadamente el comportamiento cohesivo de las uniones adhesivas y el comportamiento anisótropo de los laminados y se está preparando actualmente un amplio plan de ensayos para analizar su comportamiento al fuego y la caracterización de su comportamiento en la absorción de ruidos y vibraciones y como aislante térmico.

## CONCLUSIONES

Las estructuras de materiales híbridos fibra-metal combinan lo mejor de cada una de sus componentes, para ofrecer soluciones inteligentes con prestaciones incrementadas capaces de atender a unos requisitos funcionales y ambientales exigentes, contando con menor peso, mayor facilidad de manejo, menor coste de fabricación y mantenimiento.

De este modo, es posible combinar la elevada resistencia al impacto y durabilidad, junto con facilidad de mecanización y fabricación típicas de los materiales metálicos, con una elevada resistencia y rigidez específicas en la dirección de la fibra, así como una buena resistencia a la fatiga, característica de los materiales compuestos.

Los materiales híbridos abren nuevas posibilidades a la hora de conseguir prestaciones inalcanzables para los materiales tradicionales. La utilización de materiales de distinta naturaleza, orgánica e inorgánica, combinados a una escala adecuada y con una organización jerárquica de sus componentes da lugar a la aparición de propiedades no cubiertas por los materiales tradicionalmente empleados en diversas ramas de la ingeniería.

El diseño y fabricación de materiales híbridos es una tecnología emer-

gente que ya ha rendido algunos frutos en campos de aplicación concretos y que será, sin duda, terreno de nuevos descubrimientos y aplicaciones en las décadas próximas.

La estrategia para el diseño de estos nuevos materiales se basa en la seguida por la propia Naturaleza en el diseño de los materiales biológicos. La tecnología humana está aún lejos de poder copiar lo logrado por la Naturaleza, pero sí es posible la utilización de los mismos principios como fuente inspiradora en el desarrollo de nuevos materiales. Nacen así los materiales bioinspirados, dentro de los cuales podemos situar a Malecon®. Efectivamente, la combinación de capas o láminas sucesivas de materiales orgánicos e inorgánicos para formar un material híbrido es la estrategia seguida por la Naturaleza para construir los caparzones de diversos animales marinos y terrestres (moluscos, crustáceos y ciertos insectos). De esta manera se logra multiplicar las propiedades en el material híbrido, haciéndolas mucho mayores que las de cada uno de los componentes por separado.

Y finalmente es posible reseñar de nuevo la gran capacidad que presentan estos materiales como Malecon® y Drona® en su aplicación para la construcción naval militar.

#### REFERENCIAS:

- [1]. Dr. P. Gruber “Engineering Challenges Driven by the Navy, and the Navy After Next”, ONR 17th Annual ISOPE Conference, Lisbon, Portugal, July 2007
- [2]. P. J. Pope “Structural performance of a hybrid sandwich submersible pressure hull. Stress and stability analysis of a stiffened cylindrical shell including through thickness shear”. MIT Ms in NAME Thesis 1995
- [3]. Lloyd’s Register “Provisional rules for the application of sandwich panel construction to ship structure”, April 2006
- [4]. Fraunhofer-Magazin, Fraunhofer-Gesellschaft and Fraunhofer group for materials and components no.2. 2005, no.1. 2003
- [5]. D. J. L. Kennedy, R. A. Dorton, S. D. B. Alexander, “The Sandwich Plate System For Bridge Decks”, Intelligent Engineering Limited, Ottawa, Ontario, International Bridge Conference, Pittsburgh, USA, June 2002,
- [6]. AMPTIAC Quarterly Vol. 7 no. 3 2003 Special Issue “SHIPS. Navy Experts Explain the Newest Material & Structural Technologies”. DoD IACs. Now from Dec. 2005 is AMMTIAC Advanced Materials, Manufacturing, and Testing Information Analysis Center
- [7]. Bouchez T. Diez de Ulzurrun I. Herreros M.A. Suárez J.C., “Mo-

delización mediante elementos finitos de la unión adhesiva en placas de un material laminado híbrido fibra-metal”. Actas de las IV jornadas sobre adhesivos 2003 pág.30/35

[8]. Suárez J.C., Miguel S., Diez de Ulzurrun I., Pinilla P., Herreros MA., López F, “Modos de fallo en un material híbrido estructural para construcción naval: MALECON®”. Anales de mecánica de la fractura vol. 21/2004 pág.350/355

[9]. Miguel S., Pinilla P, Herreros MA, Lopez F, Diez de Ulzurrun I, Suarez JC. “Ensayos mecánicos para la caracterización de un material híbrido estructural: mecánica del fallo”. Actas del congreso V jornadas sobre adhesivos pág 30/35

[10]. Herreros MA, López F, Diez de Ulzurrun I, Suárez JC, “Propagación de grietas en intercaras de uniones adhesivas en materiales híbridos estructurales” Anales de mecánica de la fractura vol. 22 2005 pág.267/272

[11]. Herreros MA, Suárez JC, Pinilla P., Miguel S., López F, Diez de Ulzurrun I “MaLECoN: un nuevo material híbrido laminado fibra-metal para construcción naval” 47º Congreso de ingeniería naval e industria marítima.

[12]. Suárez J.C., Miguel S., Diez de Ulzurrun I., Pinilla P., Herreros MA., López F, “Material híbrido estructural para construcción naval: MALECON®” Actas de MATCOMP 05 2005 ed UPV pág.461/468

[13]. Suárez JC., Herreros MA, Pinilla P, Miguel S, López F. “Energía de fractura en uniones adhesivas de materiales híbridos fibra-metal. Ensayos TDCB modificados” Anales de mecánica de la fractura vol.24 2007 pág.229/323

[14]. Diez de Ulzurrun I., López F., Herreros MA., Suárez JC “Test of deck-to-hull adhesive joints in GFRP boats” Engineering Failure Analysis. no. 14 (2007) pág.310-320 elsevier

[15]. Suárez JC, Pinilla P, Santiago S., Herreros MA., López F “Ensayo DMMB para la determinación de la energía de fractura adhesiva en modo mixto I+II” Tendencias en adhesión y adhesivos aportaciones científico –técnicas y aplicaciones industriales de los adhesivos ed. abecedario cap. 5 pág. 381-391 (2007)

[16]. Suárez JC, Pinilla P, Santiago S., Herreros MA., López F “Ensayo Iosipescu para la determinación de las propiedades a cortadura en adhesivos estructurales”. Tendencias en adhesión y adhesivos aportaciones científico –técnicas y aplicaciones industriales de los adhesivos ed. abecedario cap. 2 pág. 124-130 (2007)

[17]. Suárez JC., López F, Miguel S., Pinilla P., Herreros MA.”Medida

de la energía de fractura adhesiva en modo mixto para adhesivos elastoméricos y su influencia sobre las condiciones de fallo por pandeo local en materiales híbridos fibra-metal”. *Anales de mecánica de la fractura* vol.25 2008 pág.701/07 vol. 2

[18]. Barsoum R. The best of both worlds: hybrid ship hulls use composites and steel. *AMPTIAC Quart* 2003;7(3):55–61.

[19]. Barsoum R. Hybrid ship hull. US Patent 6,386,131; 14 May 2002.

[20]. Cao J, Grenestedt JL. Design and testing of joints for composite sandwich/steel hybrid ship hulls. *Compos Part A: Appl Sci Manuf* 2004;35:1091–105.

[21]. Thompson L, Walls J, Caccese V. Design and analysis of a hybrid composite/metal structural system for underwater lifting bodies. University of Maine Department of Mechanical Engineering. Report No. UM-MACH-RPT-01-08, June 2005.

[22]. Cao J, Grenestedt JL, Maroun WJ. Testing and analysis of a 6-m steel truss/composite skin hybrid ship hull model. *Mar Struct* 2006;19:23–32

[23] Gibson LJ, Ashby MF. *Cellular solids, structure and properties*, 2nd ed. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1997.

[24] Allen HG. *Analysis and design of structural sandwich panels*. Oxford, UK: Pergamon Press, 1969.

[25] Cordon J. Honeycomb structure. In: Dostal CA, editor. *Engineered materials handbook*. Metals Park, Ohio, USA: ASM International; 1990:721–8.

[26] Zenkert D. In: *An introduction to sandwich construction*. Solihull, London, UK: Engineering Advisory Services Ltd., Chameleon Press Ltd, 1995, ISBN 0 947817778.

[27] Ashby MF, Evans AG, Fleck NA, Gibson LJ, Hutchinson JW, Wadley HNG. *Metal foams, a design guide*. Oxford, UK: Butterworth Heinemann, 2000.

[28] Norma ASTM D 3433 99.