

MaLECoN: un nuevo material híbrido laminado fibra-metal para construcción naval.

M.A. Herreros, J.C. Suárez, P. Pinilla, S. Miguel, F. López, I. Diez de Ulzurrun
Grupo de Investigación en Materiales Híbridos.
Departamento de Arquitectura y Construcción Navales
ETSI Navales - UPM. Avda. Arco de la Victoria, s/n, 28040 Madrid, España

Resumen:

Existe la necesidad perentoria de nuevos materiales para construcción naval que sean capaces de satisfacer los requerimientos de diseño y fabricación de estructuras más ligeras, a la vez que resistentes, que permitan velocidades de desplazamiento más elevadas y menores consumos energéticos. El acero presenta una serie de limitaciones que dificultan la mejora continuada en la línea marcada para la fabricación de estructuras ligeras, resistentes y seguras. Los materiales compuestos son livianos y resistentes, pero los sistemas de fabricación son costosos y precisan de más mano de obra especializada; por otra parte, son muy sensibles al daño por impacto y pueden presentar problemas de degradación de sus propiedades mecánicas debido a la absorción de agua. 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. El material híbrido multicapas está formado por láminas metálicas alternando con otras de material compuesto y de adhesivo estructural, consiguiéndose prestaciones en servicio mejoradas. Este material ha sido patentado en la Oficina Española de Patentes y Marcas, junto con su procedimiento de fabricación. La extensión internacional de la patente a más de treinta países ha sido ya presentada y está siguiendo el procedimiento de concesión.

Abstract:

New materials for shipbuilding, capable of satisfying the design and fabrication requirements for lighter structures that are in turn resistant, permit higher speeds of movement and lower energy consumption are needed. Steel has a series of limitations that impede continued improvement in the line of constructing light, resistant and safe structures. Composite materials are light and resistant, but the manufacturing processes are more labor-intensive and costly; in addition they are very sensitive to damage from impact and can present problems of degradation of their mechanical properties through water absorption. Fiber-metal hybrid materials combine the high resistance to impact and durability, and the versatile manufacturing of metals with a specific strength and stiffness in the direction of the fiber, as well as good resistance to fatigue, characteristics of the composites. This hybrid multilayered material is formed by layers of metal alternating with others of composite and structural adhesives, with improved in-service performance. We hold a Spanish patent on this material and its manufacturing system, and international extensions to more than thirty countries are already in due course.

1. Introducción.

En las industrias marítimas existe un interés creciente en el diseño y fabricación de estructuras cada vez más ligeras, que permitan la explotación comercial de buques más veloces, con mayor capacidad de carga de pago, mayor autonomía y un menor consumo de combustible.

La competencia en precios en la industria naval ha sido tradicionalmente muy fuerte y se ha incrementado durante los últimos años. Para mantener la posición en el mercado y ganar nuevos contratos, los astilleros

han de esforzarse en aumentar la productividad y eficiencia, rebajando los costes generales y los relativos a la mano de obra.

En todas las tentativas 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. No únicamente por los potenciales ahorros directos que se pueden obtener comprando el material correcto en el instante preciso, reduciendo de esta manera los costes financieros, sino también por la importancia de evitar carencias en el aprovisionamiento y no retrasar o detener por esta causa el proceso productivo. Lo cual es de vital importancia.

Como regla general, se puede tomar la siguiente distribución de costes para un buque de nueva construcción, aunque sin olvidar que para ciertos tipos de buques estos números pueden variar ligeramente

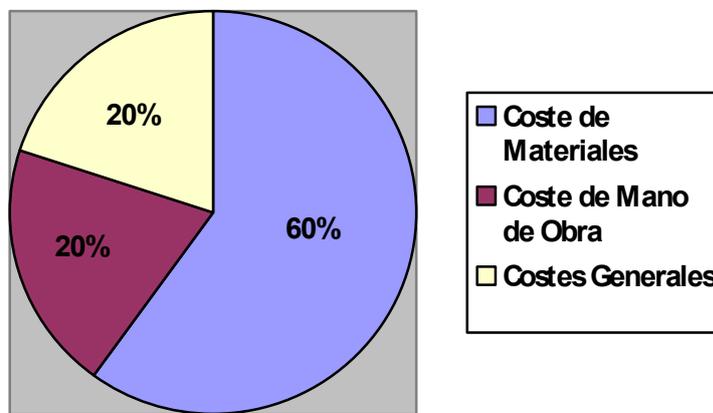


Figura 1. "Distribución de costes de fabricación de obra nueva"

Como queda patente, 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. Para buques de guerra el coste de los materiales puede ser incluso superior, alcanzando en ocasiones hasta un 80% del coste total. La competitividad ha de ser buscada, pues, en la optimización de los materiales empleados y no tanto en la reducción de los costes laborales, especialmente 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, multicascos tri o pentamaranes, buques de efecto superficie, sustentación dinámica jet-foils, SWATH's etc) modulares más ágiles y medioambientalmente más eficientes (menores emisiones y consumo de combustible) con una amplia capacidad de operación automatizando esta al máximo y con un ciclo de vida de coste reducido que incluya un diagnóstico inteligente (menor coste de mantenimiento) aspecto en el que los materiales híbridos cuentan con la gran ventaja de poder embeber fibras ópticas para la monitorización en su propia estructura.

Y en el caso de los buques destinados a las operaciones militares, además capacidad para asegurar su operatividad en las diferentes localizaciones de los teatros de operaciones tácticos y estratégicos (focalizando estos esfuerzos en la predicción y control de los movimientos de la plataforma, en su maniobrabilidad, en la minimización de los registros térmicos, acústicos y magnéticos, en la mejora de diseño y construcción de cascos, estructuras y propulsores y en general en todo aquello que mejore la capacidad de respuesta de la

plataforma).

Es decir nuevas funciones que requieren nuevos materiales, puesto que los materiales convencionales nos son capaces de cubrir las necesidades tecnológicas que estas nuevas aplicaciones demandan [1,4,5,6,17,18].

2. MaLECoN®.

Se trata de 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 si 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. El 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.

Las estructuras de materiales híbridos fibra-metal combinan lo mejor 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. Así, 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, características 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/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 emergente 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 nuestro producto: Malecón. 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 caparazones 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.

El producto está patentado en España y se ha solicitado la extensión internacional en Europa y Japón:

- La patente española, 2261070 B2, tiene Fecha de Concesión del 18/04/07 y fue publicada en el Boletín Oficial de la Propiedad Industrial el 16/6/07

- La solicitud de patente europea tiene fecha de presentación en lengua inglesa ante la Oficina Europea de Patentes 29/9/07. Existe informe previo positivo de búsqueda internacional PCT de fecha 05/10/06 (Nº de Publicación Internacional WO 2006/103309 A3)
- La solicitud de extensión de la patente a Japón fue presentada en lengua japonesa en la Oficina de Patentes Japonesa el 16/11/07 (International Application No. PCT/ES2006/000152). La agencia de patentes en Tokyo que lleva el procedimiento es Miyoshi & Miyoshi.

Malecón, ha finalizado ya la fase investigación aplicada y se encuentra actualmente en fase de preparación de un demostrador de la tecnología. Esta segunda fase concluirá, previsiblemente, antes de finales de 2008 y dejará listo el material para unos primeros ensayos en estructuras reales.

3. Materiales alternativos y competidores. Diferencias y Ventajas de Malecon.

En la, tan tradicional y conservadora, área de la construcción naval estos materiales han sido empleados muy poco hasta la fecha, siendo la construcción en acero la dominante salvo en aspectos muy concretos ó en aplicaciones muy específicas en las que la madera y el GFRP tienen su mercado.

Analizaremos seguidamente, de forma sucinta, las razones de esta escasa aplicación de los materiales híbridos.

En el viaje arte de la construcción naval únicamente se ha producido una gran revolución y esta fue el paso de la madera al acero, pero quizás ahora estemos en puertas de otro gran cambio, el empleo generalizado de los materiales híbridos como en la industria aeronáutica.

Es de todos conocido que el ambiente marino es extremadamente hostil para los buques y sus estructuras, que sufren los embates del mar, del viento y de su propia carga. La construcción generalizada en acero para las estructuras primaria, secundaria y de menor nivel con elementos soldados, si bien ha sido un gran avance, tiene los inconvenientes conocidos 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 avance en la construcción naval han sido los 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. Es claro que 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 que son mucho más caras que la fibra de vidrio.

La razón de ello es que los materiales compuestos no tienen la resistencia en el plano suficiente que requieren las estructuras de los buques de gran porte, que en 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 los nuevos materiales capaces de satisfacer los requisitos de diseño y fabricación de estructuras resistentes y ligeras, capaces de permitir grandes velocidades con un menor consumo energético. 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, fácilmente conformable y mecanizable, soldable, tiene un comportamiento y propiedades muy estudiadas y bien conocidas, es muy tenaz y resistente al impacto. Por otra parte, las desventajas más acusadas son su elevada densidad y los problemas de corrosión que presenta. Se han propuesto y usado otros materiales alternativos en este sector de actividad: aceros de alto límite elástico, aleaciones de aluminio y materiales compuestos de matriz polimérica. 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 escantillado, también se encuentran problemas en el incremento de las tensiones residuales introducidas durante la construcción. Estas se desarrollan en áreas tales como las intersecciones de refuerzos, donde las secuencias de soldeo originan tensiones residuales que son difíciles de aliviar en aceros de alto límite elástico. Cuando se usan estos aceros, se requiere un especial cuidado con el diseño de detalle y con los procedimientos constructivos. Son materiales que no “perdonan” un error, produciéndose un fallo catastrófico debido a su escasa capacidad de deformación plástica.

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, además, problemas de corrosión-fatiga. Los materiales compuestos utilizados en construcción naval (matriz de poliéster o viniléster, reforzada con fibra de vidrio) son ligeros y resistentes, pero los procesos de fabricación son más laboriosos y caros; además, son muy sensibles al daño por impacto y pueden presentar problemas de deterioro de sus propiedades mecánicas por absorción de agua (ósmosis).

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

- Desde el punto de vista del diseño, se tienen estructuras más simples, con menos elementos de refuerzo y, por tanto, más fáciles de fabricar y de reparar. El peso de la estructura se aligera en un porcentaje significativo.
- Desde el punto de vista de las prestaciones del material, se logra una mayor rigidez por unidad de peso, alarga la vida a fatiga y mejora el comportamiento frente a la corrosión, se consigue una mejor respuesta frente a sobrecargas e impactos, amortigua las vibraciones estructurales y sirve como material de acondicionamiento acústico.

- 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.
- Desde el punto de vista económico, el empleo de Malecón permite rebajar los costes de fabricación y reparación. También se obtienen ventajas en los costes de operación de la embarcación al verse reducido el consumo de combustible, el mantenimiento a lo largo de su vida en servicio. Los costes de protección y seguridad son, asimismo, menores en comparación con los materiales tradicionales.

Existen otros intentos de introducir nuevos materiales y diseños en construcción naval, con el mismo objetivo de obtener estructuras más ligeras, rápidas y seguras.

Existen dos formas de obtener este objetivo:

- i. Diseñar estructuras más ligeras a base de reemplazar los refuerzos tradicionales con elementos con mayor rigidez a flexión.
- ii. Utilizar materiales más ligeros, con una rigidez específica más elevada.

En ambos casos, las construcciones tipo sándwich son las más frecuentemente encontradas. En cualquier sándwich existen dos capas externas o pieles entre las cuales se coloca un núcleo de material más ligero. Existen numerosos conceptos de sandwich. "Metawell" es un sándwich fabricado con pieles de aluminio y un núcleo de chapa corrugada unida mediante adhesivos de fusión en caliente. "SPS composite plates" combina pieles de acero o aluminio con un núcleo de poliuretano inyectado. En otras ocasiones, se han propuesto sándwiches donde el núcleo empleado es espuma de aluminio, madera de balsa e incluso hormigón ligero. En todos ellos se mejora la rigidez a flexión por unidad de peso y muchas de las ventajas anteriormente señaladas para Malecón en comparación con los materiales tradicionales también pueden ser aplicadas a este tipo de materiales sándwich. 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.

Frente a los nuevos materiales tipo sándwich, Malecón ofrece una serie de ventajas en distintos aspectos:

- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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 Malecón 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. Sin embargo, para fabricar este tipo de material es necesario utilizar una tecnología específica que es la “infusión de resina a vacío” *Resin Transfer Moulding*, como alternativa al moldeo en abierto, que 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:

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

Sin embargo, la 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:

- 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.
- 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).
- 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.
- 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.
- 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 tecnologías de fabricación diferenciales respecto a los procedimientos tradicionales.

4. Tendencias actuales.

En la actualidad, los buques se fabrican casi por completo en acero, utilizando planchas de gran espesor y numerosos refuerzos longitudinales y transversales soldados a las planchas. Puesto que el objetivo es la reducción del peso de los buques construidos con la tecnología y materiales actuales, caben plantearse dos alternativas bien diferenciadas, aunque relacionadas entre sí: Construcción de estructuras ligeras y Construcción con materiales ligeros.

En particular en los 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 estudian diversas soluciones de lo que se ha dado en denominar buques híbridos o de estructura híbrida y materiales estructurales híbridos y celulares.

4.1. 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 mas 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 [6].

Existen dos variantes para este tipo de estructuras ligeras: una opción es emplear acero en la sección central del casco (donde se precisa mayor resistencia 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 disimilares crean puntos débiles en la estructura y son difíciles de resolver satisfactoriamente. Otra aproximación ha sido la de 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.



Figura 2. "Panel curvo compuesto fabricado con Malecon®"

También existen estudios de cascos para submarinos [2], 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.

4.2. 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 posibles.

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 describen algunas de las tecnologías en competencia (cada una con diferente grado de desarrollo) para substituir a los materiales tradicionales (fundamentalmente acero) 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 E!2772 – 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 [3], 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.

5. Caracterización de un panel híbrido sándwich.

Los paneles sándwich son el epítome del concepto de material híbrido. En ellos se combinan dos o más materiales con una geometría y escala específicas, conformando las caras y el núcleo, para proporcionar a la estructura una rigidez y resistencia elevadas con un peso lo más liviano posible.

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

Las caras 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.

Hasta este momento hemos hablado de un panel sándwich como una estructura: caras de material A soportadas sobre un núcleo de material B, cada uno con su densidad y módulo de elasticidad propio. Pero también es posible considerarlo como una material con su conjunto característico de propiedades, y esto resulta útil para comparar este material híbrido con materiales monolíticos más convencionales.

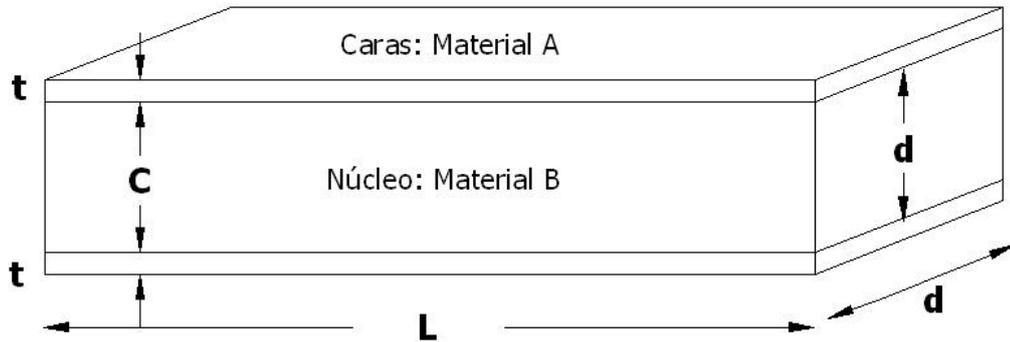


Figura 3 "Geometría del panel sándwich"

Para hacerlo debemos analizar las prestaciones del sándwich [21-25], y usaremos como criterio de excelencia 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

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

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.

La constante numérica B depende únicamente del caso de carga considerado. La ecuación (1) tiene dos términos. El primero, entre corchetes, es lo que se obtendría si la rigidez a flexión fuera el único modo de deformación considerado. El segundo término, entre llaves, es un factor de penalización 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 material híbrido, 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 , y suponiendo que $t \ll d$, entonces

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

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

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

Si el núcleo es lo suficientemente ligero el segundo término es pequeño frente al primero. Despreciando el segundo término de (4) y combinando con la ecuación (3), se obtiene

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

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.

Esto es, por supuesto, una idealización. El núcleo siempre se deforma algo a cortadura y tiene una cierta masa. Un análisis más detallado puede encontrarse en [25]. 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. Comportamiento de un panel híbrido sándwich. Modos de fallo

Al objeto de continuar con la caracterización del 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 [8,13].

6.1. Pandeo Local

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 puede verse sometido a la acción de cargas locales de compresión, o de flexión, que provocan fenómenos complejos de inestabilidad, resultando en el pandeo global de la placa o en el pandeo local de los sublaminados situados por encima y por debajo de la región despegada.

En la fase poscrítica, se generan tensiones interlaminares muy elevadas en las proximidades del frente de la grieta, que provocan la propagación de la zona despegada. A medida que la deslaminación progresa, la geometría de la placa va modificándose hasta alcanzar un nuevo estado de equilibrio. El proceso puede resultar en propagación estable y parada o, por el contrario, en crecimiento inestable hasta el fallo final. El modo de fallo de pandeo local por delaminación, figura 4, resulta ser fuertemente dependiente de la energía de fractura en la unión adhesiva entre el metal y el compuesto.



Figura 4. "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. 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 (I + II).

6.2. Influencia de la Energía de Fractura del Adhesivo

La medida del valor crítico de la energía de fractura adhesiva, G_c , es muy útil para la caracterización del comportamiento en servicio de adhesivos estructurales desde diversos puntos de vista: En investigación y desarrollo, para conocer cuantitativamente la influencia sobre el comportamiento en servicio de las variaciones en la composición del adhesivo, primers, tratamientos superficiales de los adherentes, mallas de soporte, variables de procesado y efectos medioambientales, en la evaluación de la adecuación al servicio, para determinar la capacidad de un sistema adhesivo específico para desempeñar una cierta función, para la cual están prescritas las tensiones que ha de soportar y establecer con confianza los tamaños máximos de defecto admisibles y en el desarrollo de criterios de aceptación y de control de calidad durante la fabricación, pero sólo cuando exista una base sólida que permita especificar un valor mínimo de G_c admisible.

En los materiales que estamos trabajando, 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, de la máxima relevancia.

El criterio de fallo es el habitual: La zona despegada progresará cuando la energía de fractura adhesiva G supere un cierto valor crítico G_C , que es posible determinar experimentalmente mediante ensayos adecuados.

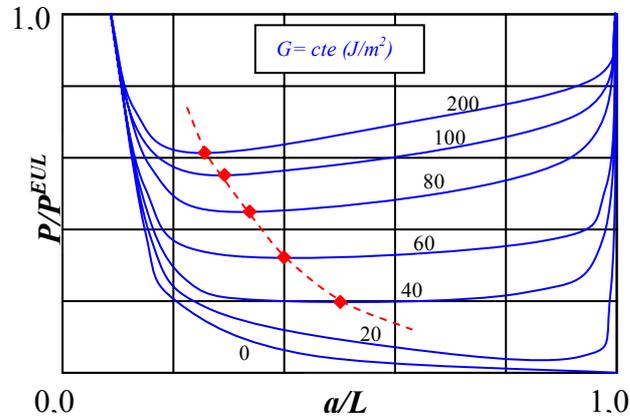


Figura 5. "Curva de tamaños críticos para crecimiento estable de la zona despegada en función de la Energía de Fractura Adhesiva"

La Figura 5 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 substrato 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 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 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. Procedimiento experimental.

Con el objeto de caracterizar el material y conocer sus características y comportamiento se han preparado piezas de las que extraer probetas para su ensayo y caracterización completa. El material utilizado en la fabricación del laminado híbrido ha sido:

1. Planchas de acero de dimensiones 300 x 200 x 1,5 mm
2. Fibra de vidrio (800 g/m²) y con unas dimensiones de 320 x 220 mm
3. Resina viniléster
4. Adhesivo de poliuretano bicomponente

Los detalles de la fabricación de las diferentes probetas pueden encontrarse en J.C.Suárez et al. 2005 [11].

Una vez obtenida la pieza se corta con una sierra de cinta, obteniéndose probetas para ensayos de tracción y ensayos de flexión.

Un valor característico importante de nuestro material es el valor global de la rigidez, este valor es una función compleja de contenido en acero del material compuesto (Fracción en Volumen de Metal, FVM) y de los valores de rigidez de cada uno de los constituyentes.

Se define la Fracción en Volumen de Metal como la proporción de acero respecto a la de material compuesto que hay en el híbrido, obteniéndose mediante la expresión:

$$FVM = \frac{\sum_1^p t_{ac}}{t_{lam}} \quad (6)$$

donde: t_{ac} es el espesor de cada lámina de acero; t_{lam} el espesor total del laminado y p el número de láminas de acero. Se ha calculado la Fracción en Volumen de Metal para estas probetas, resultando un valor de $FVM=0,368$. Las probetas sólo de acero, basándonos en (6), tienen una $FVM=1$. Las probetas sólo de material compuesto (resina y tejido de fibra de vidrio) tienen una $FVM=0$.

Los ensayos de tracción se realizaron en una máquina universal de ensayos INSTRON con una capacidad de 400 kN de carga estática y 250 kN en régimen dinámico, con mordazas hidráulicas. Para la determinación del módulo de elasticidad del acero y del material compuesto se utilizó un extensómetro de cuchilla con un sensor LVDT. La velocidad de desplazamiento de mordazas fue en todos los ensayos de 0,2 mm/s. Los ensayos de flexión en tres puntos, se realizaron en una máquina universal de ensayos SERVOSIS con una capacidad de 100 kN de carga estática, con mordazas hidráulicas. Se han utilizado galgas para determinar las deformaciones producidas en el acero. La velocidad de desplazamiento de mordazas fue en todos los ensayos de 0,02 mm/s.

7.1. Ensayos realizados.

Seguidamente se detalla de modo sucinto el amplio programa de ensayos, aún en progreso, que permitirán conocer completamente las características y comportamiento en servicio de este nuevo material.

7.1.1. Ensayos de Tracción y de Flexión.

La figura 6 muestra el resultado de la curva fuerza-desplazamiento en un ensayo a tracción del material

laminado híbrido fibra-metal en comparación con el acero y el material compuesto cada uno por separado, lo que da una buena visión de sus características “híbridas”.

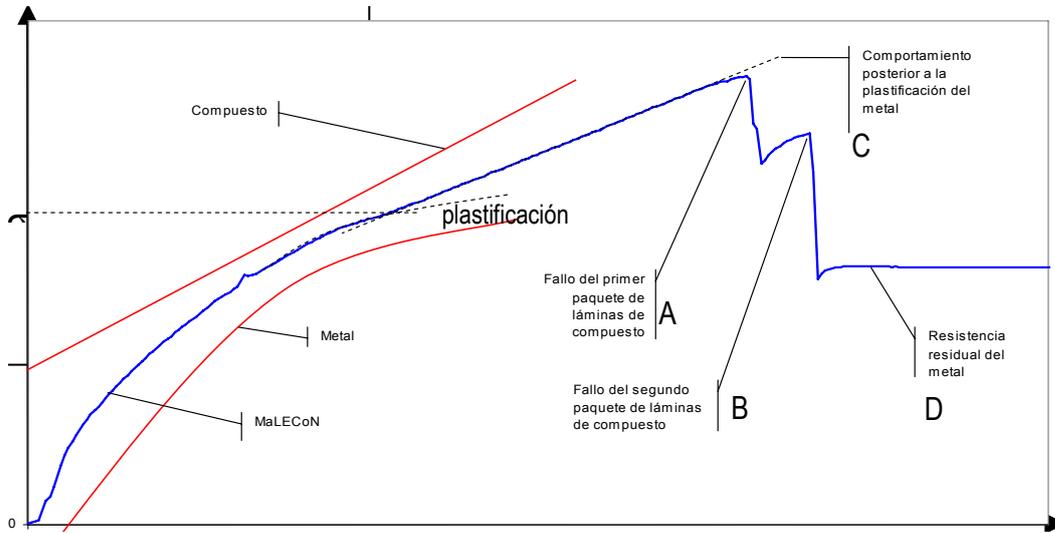


Figura. 6. “Curva fuerza-desplazamiento para el acero, el material compuesto y el material laminado híbrido fibra-metal”.

En esta figura se aprecia el comportamiento del material compuesto de tejido de fibra de vidrio con resina viniléster cuando es sometido al ensayo de tracción por separado o como parte del material híbrido. En este último se aprecia una zona de comportamiento elástico, no estrictamente lineal, a partir de la cual se puede determinar un módulo de Young de $E = 17 \text{ GPa}$.

Se observa en primer lugar un tramo recto de comportamiento elástico con una pendiente muy próxima al del material más rígido, esto es, el acero. Se produce entonces un cambio de pendiente en la curva. Para dicho valor de deformación se alcanza el límite elástico del acero y este empieza a fluir plásticamente. En ese instante empiezan a soportar la mayor parte del esfuerzo los paquetes de material compuesto, ya que las láminas de acero fluyen sin oponer gran resistencia, y por eso cambia la pendiente de la curva hacia valores menores, menor rigidez, comparados con los del acero. La deformación prosigue hasta que el material compuesto alcanza su carga máxima (C). En definitiva, el material híbrido exhibe un comportamiento por zonas doblemente lineal hasta que alcanza su carga máxima.

Una vez agotada la capacidad resistente del material compuesto se produce su rotura. Primero rompe uno de los paquetes de material compuesto (A), se produce una redistribución de la carga y a continuación rompe el otro paquete (B). Tras la rotura de los dos paquetes de material compuesto, todavía quedan las tres láminas de acero sin romper. Esto constituye una ventaja de este tipo de materiales frente a los materiales compuestos tradicionales (D). La deformación plástica de las tres láminas de acero continúa a partir de este punto a carga prácticamente constante. Finalmente se produce la rotura de una de las láminas, seguida de una redistribución de la carga que pasa a ser soportada por las dos láminas restantes. Rápidamente falla la segunda lámina y por último la tercera.

En el ensayo de flexión de nuestro material híbrido, la información que nos da la flecha máxima es el fallo de unión entre el adhesivo y el material metálico. Si continuamos con un ensayo de compresión hasta rotura, podremos ver como rompe la unión de una capa con otra, pero no la rotura de la fibra o el metal. Al aplicar la carga la probeta flexa y en la mitad superior el estado tensional es de compresión y en la mitad inferior es de tracción. Lógicamente la rotura se produce donde la tracción es máxima. Es de vital importancia comprobar

que la información que nos da la flecha máxima es el fallo de la unión entre el adhesivo y el metal, pero no conocemos si el metal ha deformado plásticamente antes de ocurrir este. Para ello se han puesto galgas sobre el acero del material híbrido y se ha observado el complejo comportamiento como muestra la gráfica de flexión (figura 7). A partir del ensayo de flexión se ha obtenido que la fuerza máxima es de 9500 N y el desplazamiento 5,099 mm. El segundo cambio correspondería al despegue de la segunda lámina de metal del adhesivo.

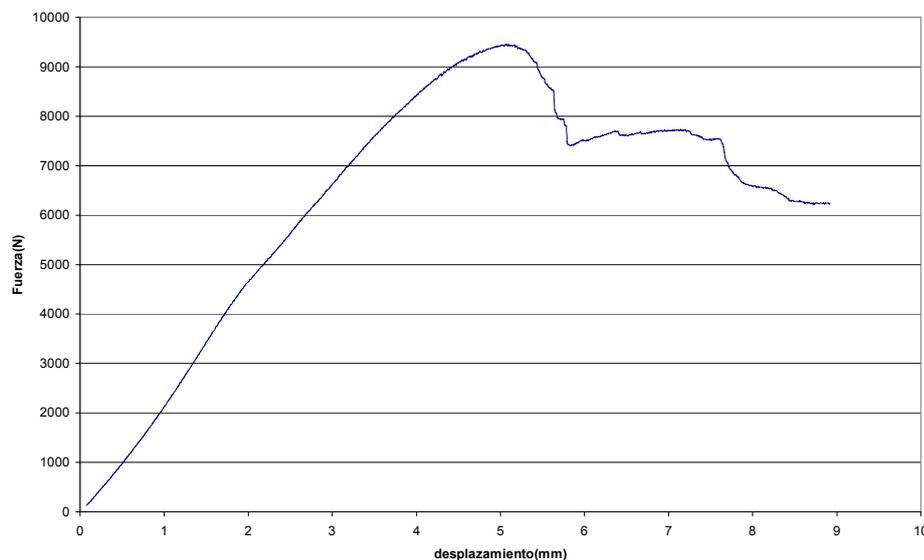


Fig. 7. "Ensayo de flexión. Curva fuerza-desplazamiento para el material laminado híbrido fibra-metal".

A partir de la curva tensión-deformación del acero hemos obtenido el valor de tensión de plastificación σ_f de 285 MPa correspondiéndole un valor de ϵ_f de 1390 $\mu\text{m/m}$.

7.1.2. Energía de fractura adhesiva en modo I: Ensayos TDCB modificados.

La aplicación del ensayo de doble viga en voladizo con sección variable (TDCB, Tapered Double Cantilever Beam) para determinar el valor crítico de la energía de fractura adhesiva en modo I, G_{IC} , presenta algunas ventajas que lo han hecho ser muy utilizado: a) permite ensayar uniones de materiales con un límite elástico muy bajo sin que se produzca plastificación de los adherentes; b) la flexibilidad de la probeta de ensayo es independiente de la longitud de la grieta. La reducción de datos se puede hacer siguiendo la norma ASTM D 3433 99 [26] utilizando una teoría de vigas simple con corrección para incluir los efectos de la cortadura.

La Figura 6 muestra un registro típico de carga frente al tiempo a lo largo de un ensayo TDCB. El primer pico, correspondiente a la propagación de la pregrieta iniciada en el adhesivo por la inclusión de la lámina de PTFE, no es tenido en cuenta pues el vértice de la grieta no es físicamente representativo de las grietas reales que se pueden encontrar en servicio. La última propagación tampoco es tomada en consideración pues el vértice de grieta se encuentra ya fuera de la zona de rampa de la probeta. Como se puede observar, existe en cada tramo de propagación una zona de deformación a carga prácticamente constante, correspondiente a la deformación exclusivamente del adhesivo elastomérico. Sigue una zona de transición hasta obtener una deformación proporcional, correspondiente a la deformación elástica de los adherentes metálicos. Finalmente el registro se empieza a separar de la proporcionalidad hasta que se llega a la carga de inicio de la propagación.

Las rectas de ajuste a las distintas regiones de proporcionalidad pueden extrapolarse, observándose como se

cortan todas ellas en un único punto que marca el límite hasta el cual el adhesivo está tomando toda la deformación y el comienzo de entrada en carga de los adherentes metálicos.

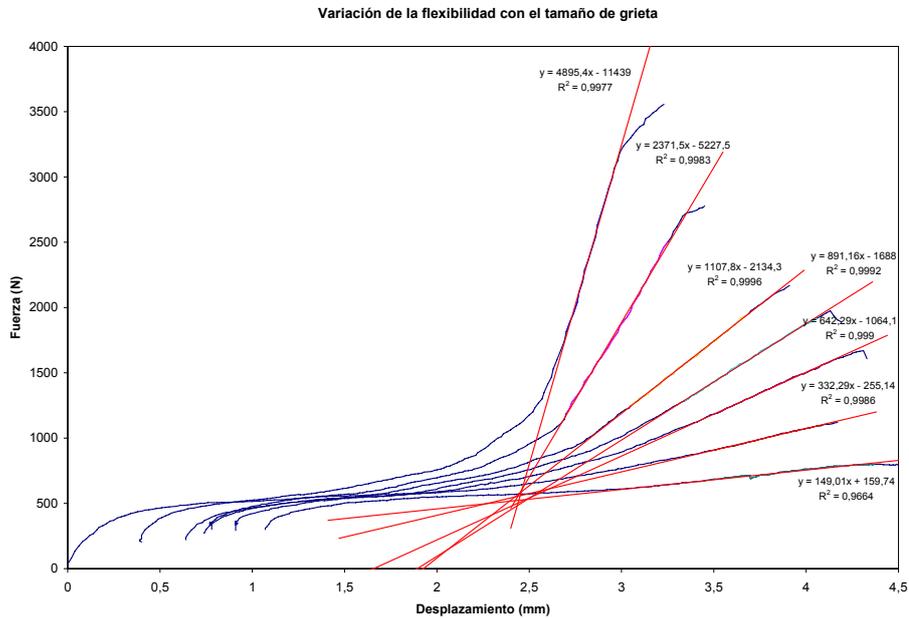


Figura 8. "Ciclos de carga-propagación-descarga en una probeta TDCB"

El hecho de que la capa de adhesivo sea suficientemente delgada y, además, el comportamiento del polímero sea altamente no lineal hace que tengamos que recurrir a la determinación experimental de la flexibilidad a lo largo del ensayo. La flexibilidad para cada longitud de grieta se mide a partir de las rectas dibujadas en la figura 8, obtenidas en la etapa de descarga-carga tras cada propagación de la grieta.

A partir de estas medidas podemos evaluar las energías de fractura adhesiva, G_{Ci} (comienzo de la propagación) y G_{Ca} (parada de grieta), en cada punto de propagación, como se muestra en la figura 9.

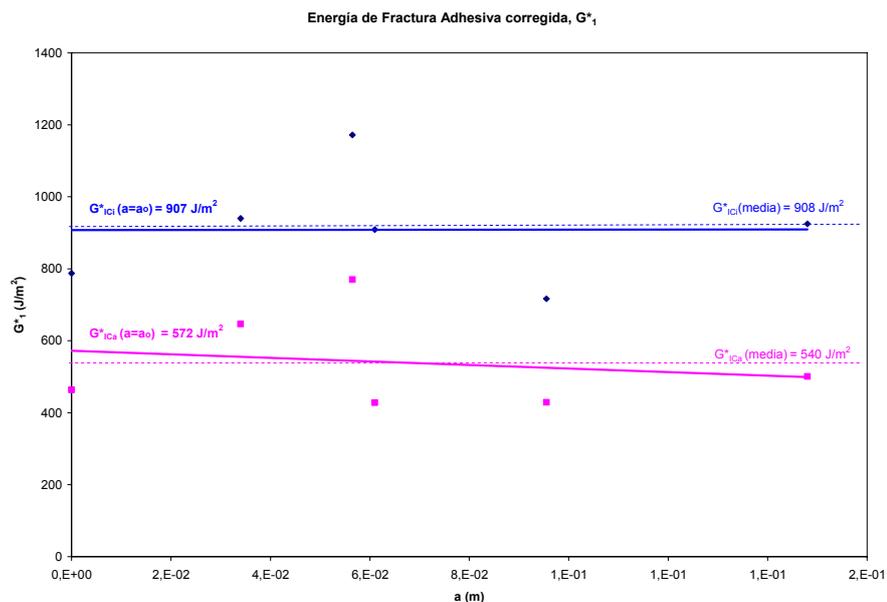


Figura 9. "Valores de la energía de fractura adhesiva en función del tamaño de grieta, reducidas a partir de las medidas experimentales de flexibilidad".

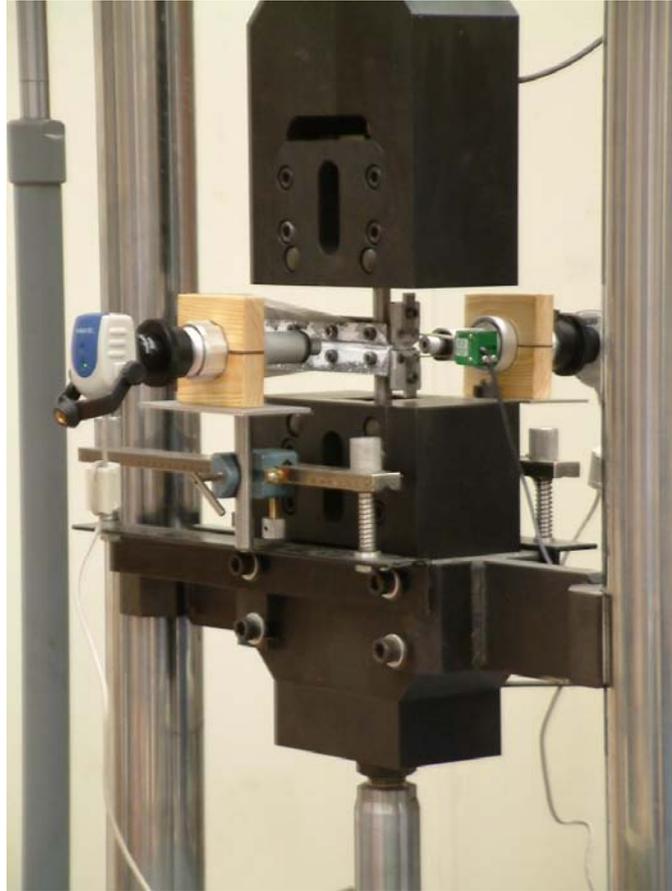


Figura 10. “Dispositivo de ensayo en el laboratorio para el cálculo de la energía de fractura adhesiva”

7.1.3. Energía de fractura adhesiva en modo I + II: Ensayos DMMB.

La figura 11 muestra una representación esquemática del ensayo DMMB mostrando las fuerzas aplicadas mediante el utillaje, que son responsables de las contribuciones a la sollicitación en los modos I y II. Imponiendo condiciones de equilibrio se puede llegar a expresiones explícitas para las cargas efectivas en cada uno de los modos

$$P_I = \frac{P_C}{B} - \frac{\alpha P(B+c)}{\alpha + \beta} \left(\frac{1}{B} - \frac{1}{2L} \right) \quad (7)$$

$$P_{II} = \frac{P(B+c)}{\alpha + \beta} \left(\frac{1}{B} - \frac{1}{2L} \right) \quad (8)$$

La energía de fractura en modo I se puede escribir como

$$G_I = \frac{P_I^2}{2W} \frac{\partial C}{\partial a} = \frac{6P_I^2 (a + \chi h)^2}{W} \sum_{i=1}^2 \frac{1}{WE_{ii}H_i^3} \quad (9)$$

Donde χ es el factor de corrección para la rotación del vértice de grieta.

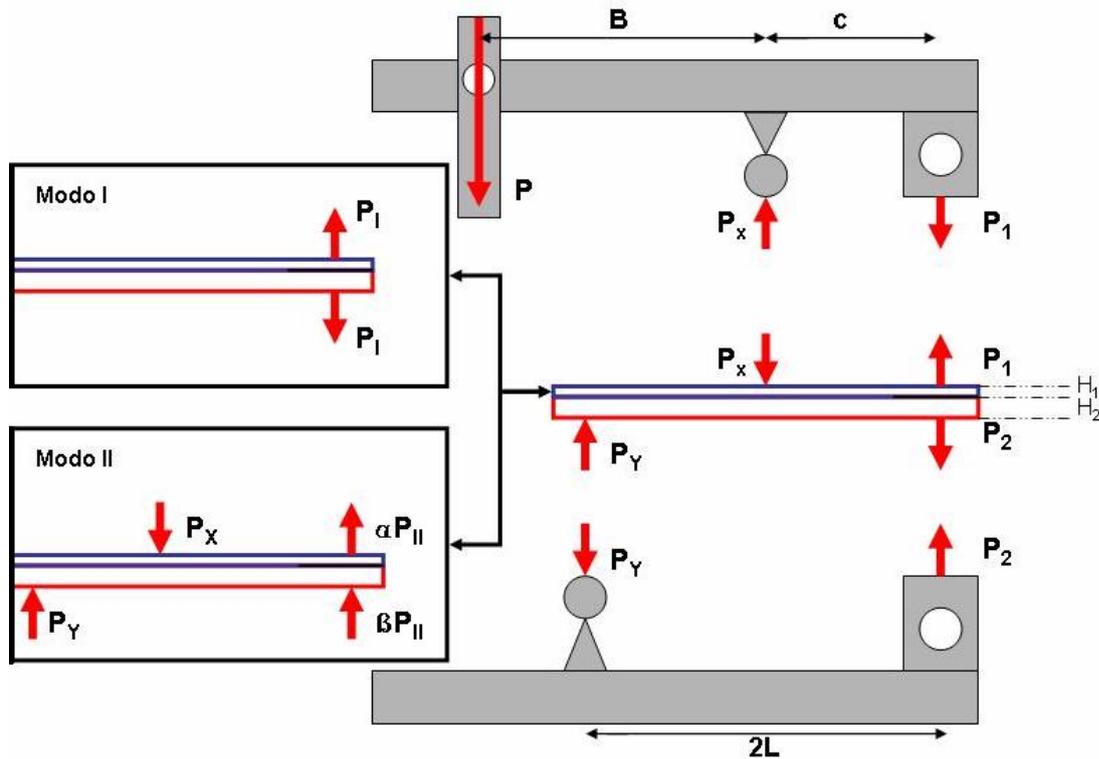


Figura 11. Contribuciones al modo I y al modo II en el ensayo DMMB

La energía de fractura en modo II, por otra parte, resulta ser

$$G_{II} = \frac{6P_{II}^2 a^2}{W^2} \left(\frac{\alpha^2}{E_{11}H_1^3} + \frac{\beta^2}{E_{21}H_2^3} - \frac{1}{H^2(H_1E_{11} + H_2E_{21})} \right) \quad (10)$$

La energía de fractura global se obtiene aplicando el principio de superposición o linealidad, y viene dada por

$$G = G_I + G_{II} \quad (11)$$

Se ha construido un útil adaptado al ensayo de uniones disimilares, que permite variar las posiciones de los puntos de introducción de la carga, consiguiendo así un amplio abanico de condiciones de mixicidad en el ensayo.

Estando el ángulo de mixicidad definido por

$$\Psi = \arctan\left(\frac{G_{II}}{G_I}\right) \quad (12)$$

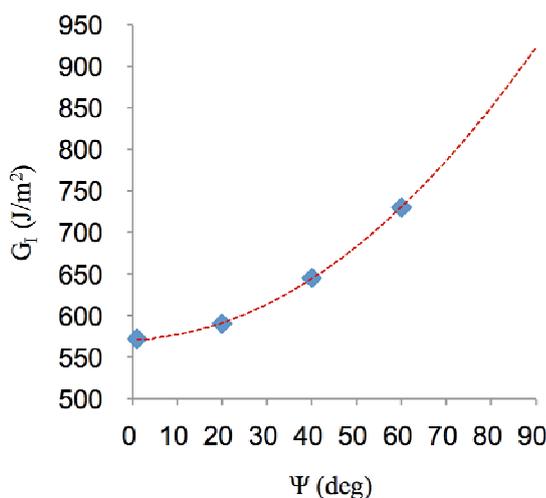


Figura 12. "Variación de la energía de fractura adhesiva en una unión poliuretano-acero solicitada en modo mixto"

Ha sido preciso el desarrollo de alguna instrumentación específica para medir las deformaciones del adhesivo en la línea de pegado, por las dificultades inherentes a la introducción de un sensor en una zona de dimensiones tan reducidas sin, por otra parte, perturbar el ensayo. Se ha dispuesto, asimismo, de un sistema de cámaras digitales para registrar a lo largo del ensayo la deformación del adhesivo y, eventualmente, el comienzo del fallo. También se han monitorizado las deformaciones en los adherentes a lo largo del ensayo mediante extensometría eléctrica, para detectar con precisión la carga crítica para la propagación de la deslaminación.

8. Conclusiones.

En este artículo hemos tratado de poner de manifiesto como los nuevos materiales están irrumpiendo en la construcción naval para proporcionar soluciones constructivas y de diseño que los materiales tradicionales no son capaces de alcanzar.

Se ha dado una visión general de las alternativas existentes y en particular de la creada y patentada por el Grupo de Materiales Híbridos de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Navales de la Universidad Politécnica de Madrid, cuyo potencial la sitúa entre las alternativas con mayores perspectivas de futuro y cuyo proceso de investigación y caracterización descrito permite definir las ventajas que MaLECoN® presenta.

El proceso seguido en el desarrollo de Malecón ha sido hasta el momento presente a escala de laboratorio. Se ha realizado el diseño conceptual del material y la evaluación de los distintos parámetros que entran en juego en las prestaciones finales del mismo: naturaleza de los componentes, espesores, geometrías, configuraciones, etc. A continuación, se ha llevado a cabo un trabajo sistemático para la puesta a punto del proceso de fabricación para la fabricación de planchas de pequeño tamaño, fijando los parámetros de operación más relevantes: viscosidades, tiempos de flujo, propiedades elásticas de los adhesivos, utillajes de posicionamiento, bolsas de vacío, infusión de la resina, etc. Una vez fabricados los paneles con la calidad y la repetitividad necesarias se ha pasado a la realización de ensayos de caracterización para obtener las propiedades básicas del material: ensayos de tracción, de compresión, de flexión en cuatro puntos, determinación de energías de adhesión, impacto, etc. También se ha avanzado en la puesta a punto de 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.

La segunda fase del desarrollo, en la que actualmente nos encontremos, se dirige a la caracterización de la respuesta del material en condiciones más próximas a las de servicio. Para ello se está realizando una serie de elementos estructurales de mayores dimensiones, con ensamblaje de varios paneles construidos por separado. Se ensayarán a flexión y a cortadura para comprobar la eficacia de las uniones estructurales, tanto en condiciones de carga estáticas como dinámicas, y los modos de fallo al alcanzar su estado límite. Durante el primer semestre de 2008 se han diseñado y fabricado los utillajes de ensayo, se han fabricado los paneles individuales y se han ensamblado para formar los elementos estructurales. Durante el segundo semestre de 2008 se instrumentarán las piezas con extensometría eléctrica y óptica y se realizarán los ensayos programados. Durante los primeros meses de 2009 se dispondrá de los resultados de los ensayos y se realizará los análisis de los mismos, ayudados por los modelos de ordenador, para determinar las prestaciones de la estructura y sugerir los cambios pertinentes en el diseño. Paralelamente se están realizando ensayos acelerados de corrosión en cámara de niebla salina para determinar el comportamiento del material y poder introducir los sobrespesores necesario para compensar las pérdidas por corrosión a lo largo de la vida en servicio de la estructura.

Con todo ello, se pasaría a la tercera y última fase del desarrollo del material que consistiría en la fabricación de un elemento estructural real y su montaje a bordo de un buque en construcción, para su seguimiento durante un cierto periodo de tiempo en condiciones reales de servicio. Esta fase requiere la colaboración directa de algún astillero, y el objetivo es que comience dentro del año 2009. La duración de esta tercera fase depende del alcance y objetivos de la prueba. No obstante, a partir de un cierto punto su extensión en el tiempo no debe interferir con la realización simultánea de acciones de tipo comercial. Dentro del año 2010 se habrían obtenido los datos necesarios que permitirían defender antes las autoridades de homologación y certificación la idoneidad del material para las aplicaciones consideradas.

Resumen de propiedades y características:

- El material es más ligero y el ahorro en peso es variable de acuerdo con el porcentaje de FRP utilizado que puede modificarse en función de las necesidades, creando diseños con estructuras más simples, con menos elementos de refuerzo y, por tanto, más fáciles de fabricar y de reparar.
- El nuevo material puede ser diseñado para ser isótropo o anisótropo en su comportamiento elástico lo que le proporciona una enorme versatilidad y adaptabilidad a las distintas partes de la estructura.
- Se ha determinado experimentalmente un complejo comportamiento a tracción de los materiales híbridos, con una relación fuerza desplazamiento doblemente lineal, muy diferente del de cada uno de sus constituyentes por separado con unos saltos discretos en la rotura de las capas de compuesto con una resistencia residual aportada por el acero, lo que proporciona un comportamiento "noble" como el del acero.
- El comportamiento a fatiga es mejora gracias a su arquitectura multicapas, se logra una mayor rigidez por unidad de peso.
- En el ensayo de flexión se ha determinado experimentalmente el valor de fuerza y desplazamiento en la flecha máxima, correspondiente al fallo de la unión metal-adhesivo, tras la deformación plástica del acero.
- La posible corrosión queda restringida a la capa externa metálica y es controlada de manera más eficiente.
- La resistencia al impacto es más elevada que la de los materiales compuestos, siendo posible la utilización de capas intermedias específicamente diseñadas para soportar ondas de choque, obteniendo una mejor respuesta frente a sobrecargas e impactos, amortiguando las vibraciones estructurales y sirviendo como material de acondicionamiento acústico

- La seguridad frente al fuego se ve mejorada por el hecho de estar el polímero encapsulado entre capas metálicas. El comportamiento frente a explosiones e impactos balísticos es superior al de los materiales tradicionales
- Es posible mejorar la absorción de ruidos mediante la introducción de alguna capa de materiales absorbentes del sonido, si bien su capacidad intrínseca ya es superior.
- La fabricabilidad es mejor que la de los materiales compuestos pues las caras externas, metálicas, actúan como moldes durante la infusión de resina y el posterior curado y 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.
- El proceso de fabricación mediante infusión de resina al vacío, disminuye la porosidad provocada por aire o volátiles atrapados en la matriz de polímero, que influyen de manera negativa en las propiedades del material, compacta las capas de material del núcleo y se consigue mejorar la adherencia entre las distintas capas y las pieles metálicas y finalmente mejora la repetitividad reduciendo la dispersión en los valores de las propiedades del material, garantizando la calidad del producto final y evitando la emisión de volátiles teratógenos.
- Las técnicas de unión de los paneles son más eficientes, al combinar uniones adhesivas para las capas internas con uniones soldadas en las capas metálicas exteriores.
- Proporciona mejores cualidades medioambientales y colabora al desarrollo sostenible de las industrias náuticas.
- Económicamente, el empleo de Malecón permite rebajar los costes de fabricación y reparación, obteniendo ventajas en los costes de operación de la embarcación al verse reducido el consumo de combustible, el mantenimiento a lo largo de su vida en servicio.

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., “Modelización 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]. 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
- [12]. 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
- [13]. 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
- [14]. 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)
- [15]. Suárez JC, Pinilla P., Santiago S., Herreros MA., López F "Ensayo losipescu 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)
- [16]. 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
- [17]. Barsoum R. The best of both worlds: hybrid ship hulls use composites and steel. AMPTIAC Quart 2003;7(3):55-61.
- [18]. Barsoum R. Hybrid ship hull. US Patent 6,386,131; 14 May 2002.
- [19]. 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.
- [20]. 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.
- [21]. 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
- [22] Gibson LJ, Ashby MF. Cellular solids, structure and properties, 2nd ed. Cambridge, UK: Cambridge

University Press, 1997.

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

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

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

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

[26] Norma ASTM D 3433 99.