

# Materiales Compuestos Avanzados en Unidades Terrestres y Navales

JOSE MARIA PINTADO SANJUANBENITO, Dr. Ingeniero Aeronáutico

**H**ace tres o cuatro años que en España se oye hablar cada vez con más insistencia de los denominados "Materiales Compuestos Avanzados" ("Composites" en inglés), especialmente dentro del contexto de temas tan de actualidad como Reconversión Industrial o Nuevas Tecnologías y generalmente en relación más o menos directa con la Industria de Defensa.

Estos nuevos materiales con fama de revolucionarios en muchos aspectos, eran relativamente jóvenes en el resto del Mundo, ya que el primer elemento operativo a base de fibras de boro y matriz epoxi (B/E) que se empleó en un avión de combate, fue en los revestimientos del estabilizador horizontal del Grumman F-14 "Tomcat" hace tan sólo 15 años.

Los primeros materiales compuestos de tipo estructural que se utilizaron, aunque no clasificados como "avanzados" por la mayoría de los expertos, fueron los plásticos reforzados con fibra de vidrio, a partir fundamentalmente de finales de la 2.<sup>a</sup> Guerra Mundial. Fue en 1959 cuando se produjeron las primeras fibras utilizables de boro a nivel de laboratorio y el primer preimpregnado útil de boro/epoxi estuvo disponible en 1966, siendo seguido en 1967 por varios preimpregnados experimentales de carbono/epoxi. En el año 1977, el consumo de materiales compuestos avanzados (es decir, con refuerzo a base de fibras de boro, carbono y kevlar 49) alcanzó los 383.000 kg que fueron consumidos casi en su totalidad por las Industrias Aeroespacial y Deportiva (esencialmente raquetas de tenis, palos de golf y cañas de pescar de carbono y embarcaciones de recreo de kevlar). Ese mismo año, el consumo de plásticos reforzados con fibra de vidrio, fue del orden de unas 1.000 veces superior.

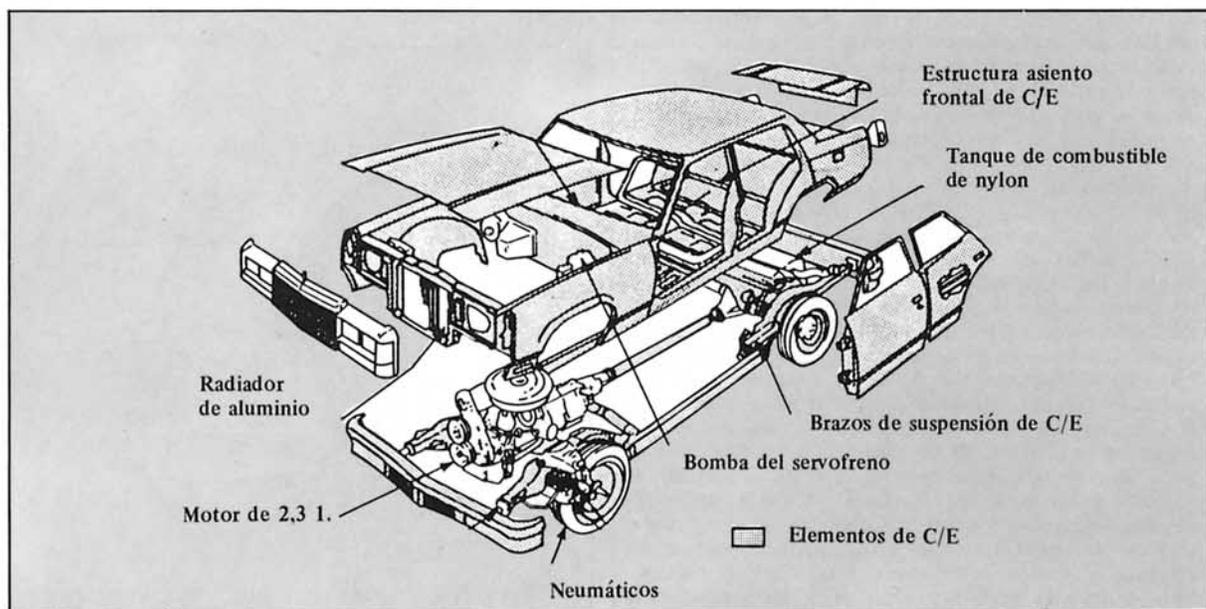


Figura 1. Programa Ford LTV. Ford Granada realizado en su mayor parte de C/E

En las líneas que siguen, se entenderán por Materiales Compuestos tanto los reforzados con fibras sintéticas avanzadas, como los reforzados con fibras de vidrio, dado que desde un punto de vista de respuesta mecánica, diseño, cálculo, etc., son conceptualmente similares y responden todos ellos a la idea de embeber fibras de elevadas propiedades mecánicas en una matriz, cuyo papel fundamental es el de transmitir las cargas aplicadas sobre el material compuesto a las fibras, mediante la deformación por cortadura de dicha matriz. De hecho, un "manejo" o haz de fibras sin embeber en una matriz, no tiene apenas utilidad como material de ingeniería por muy resistentes o rígidas que sean las fibras. Sin la presencia de la matriz, no existiría un material compuesto efectivo.

Las matrices más utilizadas hoy en día son las poliméricas, de entre las que caben destacar las de poliéster, epoxi, poliimidas y fenólicas entre las termoestables, habiéndose ya comenzado a trabajar con algunas termoplásticas, que parecen ofrecer ventajas desde el punto de vista de reparabilidad y procesado.

En mucho menor grado, pero con tendencia a un futuro crecimiento, se están desarrollando matrices metálicas (aluminio y titanio entre otras) y cerámicas para empleo a elevadas temperaturas.

En lo referente a las fibras, aparte de las de vidrio-E que son las más comunes, existen las de vidrio S, D, C y M y entre las fibras denominadas avanzadas, las de carbono (de bajo, medio y alto módulo) y las de poliaramida (kevlar), ambas de muy amplia utilización, así como las de boro, carburo de silicio y alúmina de menor consumo. En la tabla 1 se presentan algunas características importantes de las fibras mencionadas.

Habiéndose esbozado de modo muy resumido la historia y naturaleza de lo que se entenderá por material compuesto en el resto de este breve artículo, llega el momento de plantear la pregunta motivo del mismo: ¿Qué posibilidades ofrece el empleo de esta nueva familia de materiales a las Unidades Terrestres y Navales del Ejército? ¿Está justificado el aparente interés de la Industria en ofrecer este nuevo producto a la Defensa? ¿Qué desarrollos se han acometido en otras naciones? ¿Qué ventajas se obtienen y qué problemas quedan por resolver? A lo largo de los siguientes apartados se tratará de responder, al menos parcialmente, a estas cuestiones, sin profundizar demasiado en ellas, pero intentando proporcionar unas ideas generales que, sin querer ser dogmáticas, permitan a cada cual hacerse una idea de la potencialidad de estos nuevos materiales en algunas aplicaciones marítimas y terrestres de posible interés en el contexto de la Defensa.

TABLA 1. Algunas características interesantes de fibras de diversos tipos

Fibra	Densidad	Módulo Elástico	Resistencia a tracción	Diámetro	Módulo (*) específico	Resistencia (*) específica
	(g/cm <sup>3</sup> )	(GPa)	(MPa)	( $\mu$ )	(x10 <sup>8</sup> cm)	(x10 <sup>6</sup> cm)
Vidrio-E	2,54	72	3.400	↑	2,89	13,65
Vidrio-S	2,48	85	4.440		18,26	
Vidrio-D	2,16	53	2.450	3-30	2,50	11,57
Vidrio-C	2,49	70	2.800	↓	2,86	11,47
Vidrio-M	2,89	110	3.100		10,94	
Kevlar-29	1,44	62	2.700	12	4,38	19,13
Kevlar-49	1,46	130	2.750	12	9,06	19,21
Nomex	1,38	16	500		1,18	3,70
Boro (en W)	2,49	400	3.620	100-200	16,35	14,83
Boro (en C)	2,21	260	3.450	100-150	16,58	15,92
Borsic	2,71	400	3.100	100-150	15,03	11,67
SiC (en W)	3,32	430	3.100	100-150	13,19	9,52
SiC (en C)	3,05	400	3.450	100	13,35	11,54
Alúmina (FP)	3,96	380	1.520	20,3	9,77	3,92
Grafito						
PAN HM	1,85	380	2.200	7,1	20,91	12,13
PAN HTS (T 300)	1,74	210	2.350	7,6	12,29	13,78
Rayon (T 50)	1,66	393	2.170	6,1	24,10	13,33
"Pitch" (tipo P)	1,99	345	1.380	5,1-10,2	17,65	7,07
"Pitch" (UHM)	2,05	690	2.400	11,2	34,26	11,94
Thornel 75	1,83	525	2.650	5,3	29,21	14,77
Monocristal						
Cerámico (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	3,96	450	42.750	10,2-25,4	11,57	110,11
Metálico (Fe)	7,75	210	13.100	127	2,76	17,24

(\*) Valores del módulo y resistencia divididos por la densidad.

## VENTAJAS DERIVADAS DEL EMPLEO DE LOS MATERIALES COMPUESTOS

Si se quisiera suspender un bloque de 100 toneladas de una barra de 1 m de longitud realizada en diversos materiales, el peso de dicha barra sería de 4 kg si fuera de acero de alta resistencia, de 4,6 kg si de duraluminio y de 3,4 kg si el material de la barra fuera una aleación de titanio. Empleando materiales compuestos, el peso de la misma barra para sostener las 100 Tm sería de 1,3 kg si fuera de vidrio-E/epoxi, y tan sólo de 0,9 kg si el material fuera kevlar-49/epoxi o carbono/epoxi.

La elevada resistencia específica y asimismo elevada rigidez específica (o por unidad de masa) de los materiales compuestos, son causa fundamental de la considerable mejora en efectividad y prestaciones que se obtiene al hacer uso de ellos. En efecto, al poderse lograr considerables reducciones de peso estructural (en algunos elementos superiores al 50%), puede aumentarse por ejemplo la capacidad de carga útil, aumento que podría utilizarse en incrementar la autonomía o la capacidad operativa de las unidades terrestres o navales.

Un menor consumo de combustible sin perjudicar otras prestaciones tales como velocidad, aceleración, capacidad de transporte, etc., puede lograrse esencialmente a base de una disminución global del peso en vacío de los vehículos, mediante la utilización de materiales compuestos avanzados. El empleo de componentes más ligeros, permite utilizar una planta motriz de menor tamaño, lo que a su vez contribuye aún más a la disminución del consumo de carburante, aspecto éste de suma importancia dado su elevado coste actual y la siempre limitada cantidad del mismo que puede almacenarse como reserva de combate para períodos de crisis.

La resistencia de estos materiales a la corrosión por agua salada y otros medios ambientes hostiles, conduce a una significativa reducción en las necesidades de pintura, protección superficial y mantenimiento preventivo, factores estos fundamentales en el caso de unidades que deban operar durante largos períodos de tiempo de modo autónomo y lejos de sus bases.

El ahorro energético logrado mediante el empleo de los materiales compuestos, no es sólo consecuencia de la disminución de consumo de carburante que se logra, sino que además procede de una menor necesidad de energía durante la fabricación de los elementos de material compuesto de matriz polimérica, frente a los elementos de acero, aluminio o titanio (Tabla 2). Asimismo, el aprovechamiento del material es mucho mayor para aquéllos que para estos últimos, en que se desperdicia gran cantidad del mismo en operaciones de mecanizado.

Una característica única de estos nuevos materiales, es la de poder hacer un material "a medida" para cada aplicación, adecuando y optimizando sus propiedades para cubrir requerimientos específicos. Se tiene así una enorme flexibilidad de diseño, pudiéndose formar cualquier configuración simple o compleja, grande o pequeña que se desee. Aprovechando la anisotropía de los materiales compuestos, pueden lograrse estructuras de gran eficiencia posicionando las fibras en las direcciones de los esfuerzos aplicados o combinando incluso dos o más tipos de fibras en el mismo elemento para conseguir propiedades especiales.

El número de piezas que forman un elemento realizado de material compuesto, puede llegar a ser considerablemente menor que si dicho elemento fuera metálico, con el consiguiente abaratamiento de los costes de manufactura al reducirse el número de operaciones a realizar. Como ejemplo ilustrativo puede citarse la sustitución de 104 piezas de acero en la carrocería original del Ford Granada modelo 1979, por tan solamente 41 piezas de carbono/epoxi en una versión experimental del mismo modelo realizada con materiales compuestos. En el caso de embarcaciones el empleo de estos materiales permite realizar construcciones monolíticas, suaves y con formas del casco perfectamente adaptables a cualquier línea de agua teórica.

Entre las ventajas adicionales que se pueden obtener al aplicar los materiales compuestos, pueden citarse:

- Alta capacidad de absorción de energía.
- Interiores totalmente secos y estanqueidad excelente en sistemas navales.
- Para algunos diseños específicos, los materiales compuestos ofrecen buenas propiedades dieléctricas, ausencia de propiedades magnéticas y baja conductividad térmica.
- Buen comportamiento en fatiga con vidas operativas mayores.
- Características de amortiguamiento ventajosas en aplicaciones tales como ballestas o árboles de transmisión.
- Coeficiente de expansión térmica nulo en el caso de compuestos carbono/epoxi, propiedad que puede resultar única en ciertas aplicaciones concretas.
- Posibilidad de sustitución de materiales escasos o de interés estratégico.

TABLA 2. Necesidades energéticas del compuesto Carbono/epoxi frente a los metales

Material	Materia prima	Factor de desperdicio	Elemento final
	(Kwh/kg)	(Kwh/kg)	(Kwh/kg)
Carbono/epoxi	33,1	3,31	72,8
Acero	35,3	11,02	220,5
Aluminio	48,5	15,43	392,4
Titanio	194,0	15,43	1.543,2

El conjunto de posibles ventajas descrito en líneas anteriores, ha sido ya perfectamente demostrado con múltiples prototipos de elementos y de sistemas completos en aplicaciones de diversos tipos.

## LA UTILIZACION DE LOS MATERIALES COMPUESTOS EN LAS UNIDADES TERRESTRES

Una idea bastante aproximada de lo que podría lograrse en vehículos convencionales sobre ruedas para uso militar, la puede dar el proyecto LTD de la casa Ford, en el que sobre la base de un modelo "Granada", se desarrolló un vehículo, realizado en su mayor parte con materiales compuestos a base de carbono/epoxi, obteniéndose una reducción en el peso total en vacío del vehículo del 33% respecto al original metálico que pesaba 1.700 kg. Como consecuencia del menor peso estructural, el motor original (un V-8) pudo ser sustituido por un V-6, sin pérdida de prestaciones (aceleración, velocidad, capacidad de carga, etc.) y en conjunto se logró un aumento de autonomía del 35,3% para la misma cantidad de combustible. La comparación del peso de varios elementos metálicos y de carbono/epoxi de este automóvil se presenta en la Tabla 3 (fig. núm. 1).

Vehículos ligeros y de exploración, carros de combate y maquinaria de zapadores, camiones ligeros, medios y pesados, etc., de menor peso, no sólo serían más veloces o irían más lejos, sino que podrían circular por caminos peores o pasar puentes más débiles y mejorar sus posibilidades de ser aerotransportados, aumentando considerablemente la capacidad operativa de las unidades en que estuvieran encuadrados. Pero si además pueden ser fabricados más rápidamente y con menores necesidades de consumo energético y requieren luego menos mantenimiento, es claro que las ventajas que ofrecen son, cuando menos, tentadoras.

El Ejército de Tierra de los Estados Unidos ha desarrollado y está desarrollando diversos programas para evaluar la posibilidad de emplear los materiales compuestos en los vehículos de sus unidades, como el correspondiente a un camión de 5 Tm en el que las disminuciones logradas en el peso de componentes originalmente de acero (carrocería, chasis, etc.), al fabricarlos de compuestos híbridos a base de fibras de carbono y vidrio, han llegado en algunos casos al 50%. Otro programa tiene por objeto desarrollar para el carro M-60 diversos componentes de material compuesto, tales como las barras de torsión, ruedas tractora, tensora y todas las de camino, rodillos de retorno de las cadenas, etc. (fig. núm. 2).

Arboles de transmisión de material compuesto, llegan a pesar la mitad que si fueran metálicos, dando menos problemas de fatiga en el conjunto de la transmisión debido a sus elevadas características de amortiguamiento y logrando transmisiones más silenciosas, con menos número de piezas (en muchos casos se puede prescindir de la junta cardan intermedia) y menores requerimientos de mantenimiento.

Las carrocerías de material compuesto aguantan mejor la intemperie, son más ligeras y a veces más baratas que las metálicas. Elementos de chasis y especialmente de la suspensión se han investigado profunda-

TABLA 3. Resumen de pesos de elementos del programa de Ford "FLVP" y otros ejemplos

Componente		Peso del componente (kg)		Reducción (kg)	Relación de pesos (*)
		Acero	Carbono/epoxi		
Ford Lightweight Vehicle Program	Capota del motor	18,14	6,80	11,34	0,38
	Puerta posterior derecha	13,72	5,74	7,98	0,42
	Bisagra superior izquierda anterior	1,02	0,21	0,81	0,21
	Bisagra inferior izquierda anterior	1,21	0,35	0,86	0,30
	Larguero de seguridad de la puerta	1,75	1,09	0,66	0,62
	Brazo superior frontal de suspensión	1,75	0,76	0,99	0,43
	Brazo inferior frontal de suspensión	1,32	0,58	0,74	0,44
	SopORTE de la transmisión	1,07	0,25	0,82	0,23
	Arbol de transmisión	7,89	5,44	2,45	0,69
	Brazo lateral del aire acondicionado	4,31	1,47	2,84	0,34
	SopORTE del compresor del aire acondicionado	2,55	0,61	1,94	0,24
	Arbol de transmisión de camión pesado	63,05	31,30	31,75	0,50
Arbol de transmisión de camión ligero	15,88	8,16	7,72	0,51	
Larguero de chasis de camión	117,48	57,61	59,87	0,49	
Alojamiento del eje de remolque	133,36	92,99	40,37	0,70	

(\*) Relación de pesos = Peso del elemento de mat. compuesto/Peso del elemento de acero.

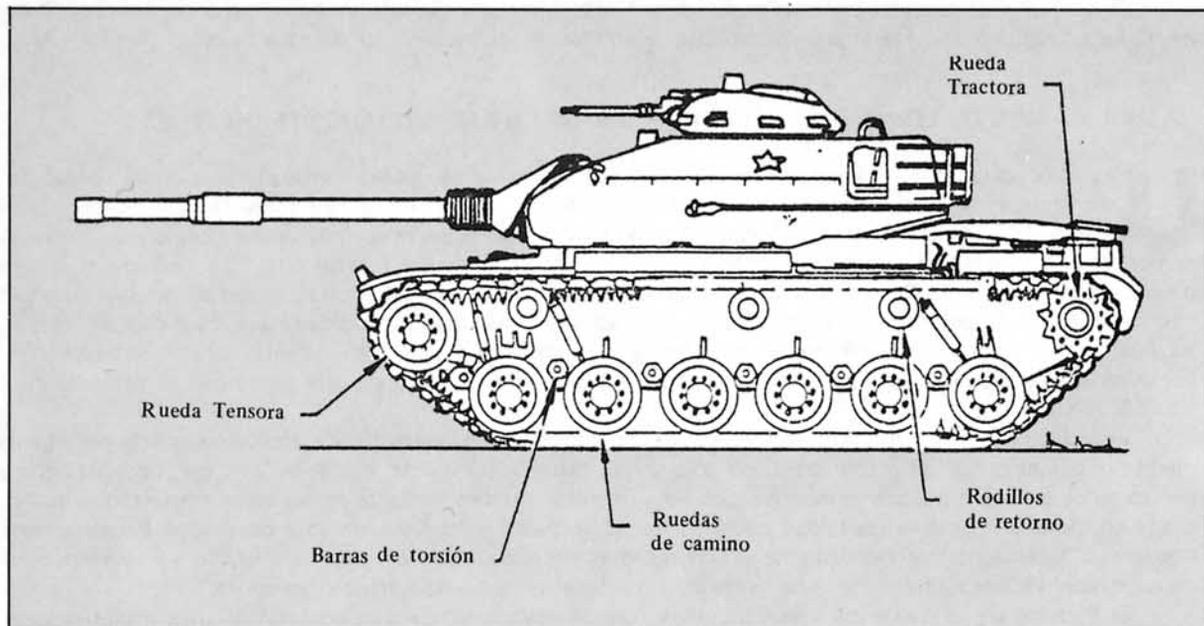


Figura 2. Elementos de material compuesto en el carro M-60

mente, siendo normal lograr en ballestas disminuciones de peso de hasta el 80% y sustituir una de acero de varias hojas por otra de material compuesto mono-hoja.

Un área de considerable interés es la de las plantas motrices, tanto a base de turbina de gas, como a base de motores de émbolo. En el primer caso, se están queriendo introducir en carros de combate pesados, de los que el pionero en su empleo es el Estadounidense M-1. En otro artículo del "Dossier" se comenta el tema de los materiales referido a las plantas motrices de aeroplanos y lo que se dice respecto a empleo de materiales compuestos en motores de turbina, es trasladable en mayor o menor grado a las turbinas de empleo en vehículos terrestres o marinos.

El motivo fundamental del empleo de los materiales compuestos en los motores de émbolo es la reducción potencial de peso en los componentes estacionarios y de fuerzas de inercia en los móviles, lo que permitiría al motor girar más rápido y aumentar así su potencia. En cuanto a los nuevos motores diesel turboalimentados, como su peso es del orden del 20 al 25% mayor que el de uno equivalente de gasolina, es evidente el interés de utilizar en su construcción materiales ligeros, para que el peso no perjudique las mejoras que se obtienen en consumo. Por otro lado y para acercar más el ciclo real al teórico adiabático de más rendimiento, hace falta aumentar las temperaturas de cámara y para ello se está estudiando el empleo de compuestos de matriz metálica y materiales cerámicos. Elementos de motor tales como empujadores, cárteres, bloques motor, émbolos, cilindros y bielas se han realizado de modo experimental en carbono/epoxi, carbono/políimida y aluminio/alúmina.

Chalecos y cascos de fibra kevlar son ya usuales en todas las unidades especiales de policía en muchas naciones del mundo y actualmente, el ejército de Israel y muchas unidades del de Estados Unidos y otras naciones, van siendo equipadas con dichos elementos de protección personal.

Para protección de vehículos ligeros, camiones y transportes acorazados de personal, se están ensayando blindajes a base de resinas epoxi, poliéster, etc., reforzadas con fibra de vidrio y de poliaramida (kevlar). En el caso de carros de combate (faldones, casco, escudo, torre, etc.), los blindajes se realizan a base de laminados con fibra de poliaramida (kevlar) y materiales cerámicos de muy elevada dureza y baja densidad. La idea fundamental de estos blindajes es la de romper o fragmentar el proyectil incidente en la capa dura de material cerámico, recogiendo luego los fragmentos con la capa posterior de tejido de poliaramida que posee una elevada resistencia a impacto (fig. núm. 3).

Se están experimentando tubos de cañón de carro de combate reforzados con fibra de carbono, para lograr mayor rigidez del tubo y más rápido amortiguamiento de las vibraciones del disparo y movimiento del carro. Presenta esta solución ventajas adicionales de disminución de peso, pero la pega de una deficiente evacuación del calor hacia el exterior del tubo.

En lo referente a municiones, se realizan en material compuesto de fibra de grafito los anillos adaptadores de los proyectiles APDFS o subcalibrados al tubo del cañón y también se están estudiando proyectiles de fibra de carbono, para aumentar su rigidez y mejorar su efectividad contra blindajes de tipo estratificado.

Otro campo de aplicación de nuevos materiales ligeros lo constituyen las máquinas y equipos de zapadores e ingenieros militares. Equipos de movimientos de tierras y puentes de campaña y de carros lanzapuentes son un ejemplo concreto de los desarrollos realizados en el Ejército de Tierra de los Estados Unidos. Un ejemplo interesante en esta línea es el programa conjunto entre EE.UU., Inglaterra y Alemania para desarrollar un puente plegable montado sobre un vehículo y que consta de tres secciones que se colocan sobre la obstrucción mediante una viga de lanzamiento de tres tramos de 7 m cada uno.

La antedicha viga de lanzamiento se construyó en fibra de grafito AS/epoxi, lográndose un peso del 50% menor que si hubiera sido de aluminio, con un margen de seguridad mucho mayor en flexión, mejor comportamiento a fatiga y una rigidez en flexión de un 16% mayor.

Entre otras aplicaciones, pueden finalmente citarse minas de tierra no detectables por medios magnéticos, cohetes, tubos lanzacohete, soportes ópticos, cureñas de cañón y escudos, depósitos de presión, tuberías, antenas y sus soportes, placas para pistas de emergencia, etc.

Una curiosa e interesante aplicación es la de material capaz de absorber las ondas de radar. De indudable interés militar, el producto final se presenta en forma de una lámina o fieltro adaptable a cualquier forma que se quiera proteger y realizado empleando fibras de carbono junto a fibras no conductoras.

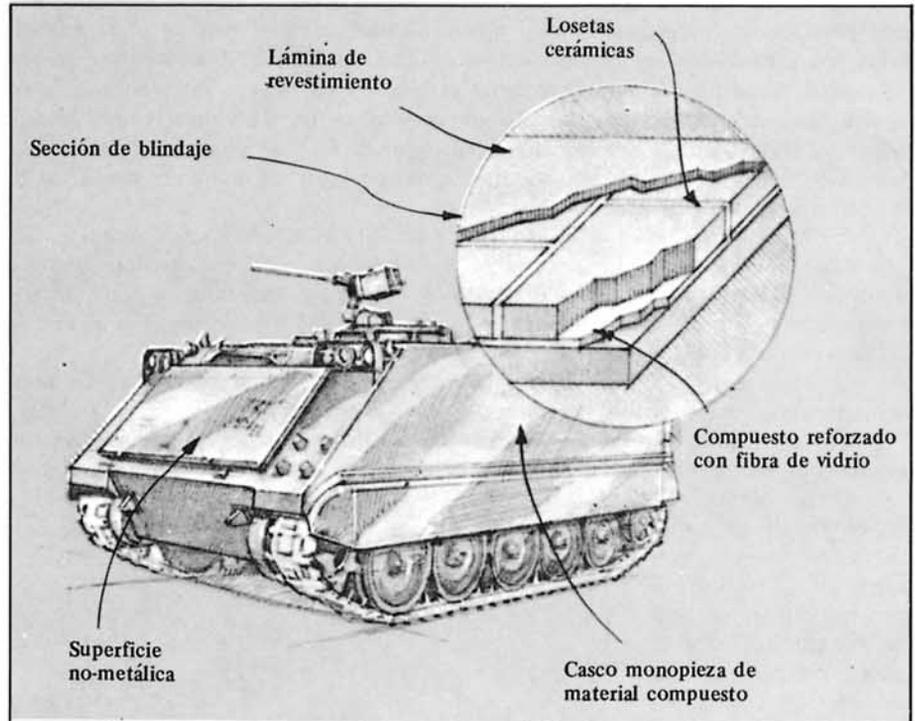


Figura 3. Un ejemplo de blindaje a base de materiales compuestos

## EL EMPLEO DE MATERIALES COMPUESTOS EN UNIDADES NAVALES

El empleo de materiales compuestos en embarcaciones militares está creciendo constantemente y promete hacerlo aún más según aumenta la experiencia en diseño y servicio. Actualmente, la construcción de embarcaciones militares de hasta 60 m de eslora realizadas en material compuesto, no plantea ya serios problemas, salvo quizás desde el punto de vista de procesos de manufactura semiautomáticos, que están desarrollándose en algunas naciones. Dragaminas de esas dimensiones se hallan ya en servicio en Inglaterra, Japón, Suecia y Finlandia. Un ejemplo interesante son los dragaminas que la casa "Intermarine" está construyendo para la "Marina Militare Italiana" (fig. núm. 4), de 50 m de eslora, 9,44 de manga y 470 Tm de desplazamiento, capaces de mantener una velocidad de 15 nudos y con una autonomía de 2.500 millas náuticas y tripulación de 39 hombres. Este navío presenta la particularidad de estar realizado con un sistema de laminación semi-automático, a fin de disminuir el número de horas-hombre de fabricación y mejorar la calidad final y además está preparado para resistir choques de explosiones submarinas de gran potencia sin dañar los paneles del fondo. La maquinaria está suspendida de las cubiertas en vez de estar apoyada en el fondo de la embarcación, como se venía realizando hasta ahora.

Otro proyecto interesante de la misma empresa italiana es el "Ngolo", navío de patrulla de alta velocidad. Con una eslora de 27,27 m y una manga de 6,80 m, es capaz de alcanzar los 40 nudos con un desplazamiento de 88.000 kg y una tripulación de 15 hombres. Su autonomía es de 1.100 millas náuticas. Sus ventajas fundamentales respecto a la construcción metálica son su inmunidad a la corrosión, bajos requerimientos de mantenimiento, bajo perfil radar y ausencia de deformación permanente de los paneles de obra viva del casco, deformación que causaría pérdida de prestaciones.

La Marina de los Estados Unidos está demostrando un elevado interés en embarcaciones de superficie de altas prestaciones, que posean muy alta velocidad, lo que requiere una notable disminución en el peso de todos los subsistemas sin perjudicar la fiabilidad. El mayor interés se dirige hacia la reducción en el peso estructural, fundamentalmente mediante el empleo de nuevos materiales de elevada resistencia específica y técnica de diseño más avanzadas. En embarcaciones de altas prestaciones, estudios realizados por la "U.S. Navy" han mostrado una disminución en peso del 53% empleando en cubiertas y mamparas una estructura "sandwich" con revestimientos de grafito/epoxi en lugar de aluminio, del 27 al 55% en cascos y de hasta el 54% en montantes y perfiles de "hidrofoils".

En el caso del hidrofoil PCH-1 (fig. núm. 5), se han logrado disminuciones en peso del 44% en el flap interno de control del perfil posterior, al sustituir el original de acero por uno avanzado a base de compuesto carbono/epoxi con un larguero de titanio. Asimismo, el montante y perfil anterior de este ingenio que eran inicialmente de acero redujeron su peso inicial de 2.217 kg en un 60% al realizarlos en material compuesto carbono/epoxi.

Otros ingenios en que se está tendiendo a una aplicación masiva de materiales compuestos son los vehículos de colchón de aire, de efecto "suelo" o "superficie" y lanchas planeadoras.

La sustitución de blindajes de acero por los de kevlar en navíos diversos reduce a la mitad el peso necesario de blindaje, lo que se traduce en ahorros de peso no ya de kilos, sino de toneladas.

Otro interesantísimo campo de aplicación de los materiales compuestos es el de los submarinos. Parece ser que los compuestos grafito/epoxi ofrecen grandes promesas para cascos de presión de inmersión profunda, debido a su elevadísimo módulo específico y excepcionales propiedades de resistencia a fatiga. Pueden lograrse cascos cilíndricos que sin rigidizadores, podrán operar a profundidades de 6.000, con factores de seguridad superiores a 2,0. Este tipo de cascos podría duplicar la flotabilidad neta de los actuales cascos avanzados de metal, dividiendo a la mitad el peso de un vehículo tripulado de inmersión profunda. El rendimiento estructural del casco de un sumergible definido como  $(\text{Presión} \times \text{Volumen}) / \text{Peso}$ , se convierte en preocupación fundamental al buscarse cada vez mayores profundidades operativas y dicho rendimiento puede duplicarse con el adecuado empleo de los materiales compuestos avanzados.

En algunos submarinos de exploración ya se emplean cascos de fi-

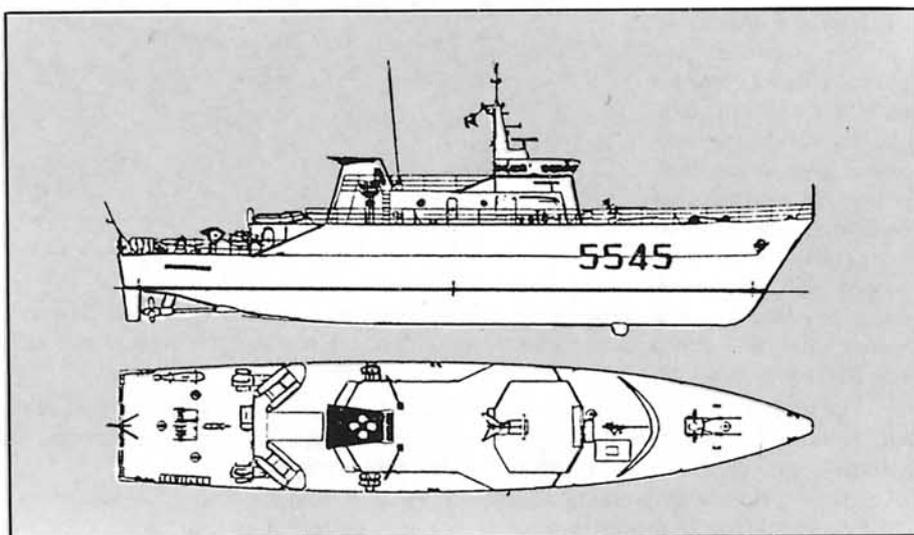


Figura 4. Dragaminas de 50 m de eslora realizado en material compuesto por la firma italiana Intermarine

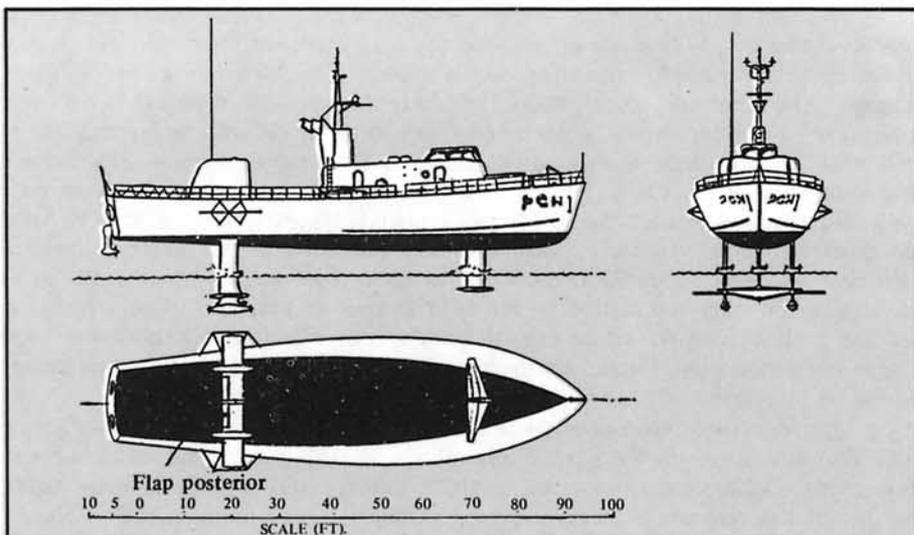


Figura 5. Hidrofoil Norteamericano PCH-1

bra de vidrio y kevlar y en los submarinos militares es usual el emplear compuestos de vidrio/epoxi en los domos de proa, carenados hidrodinámicos, e incluso los timones (AGSS-555). Las carenas del periscopio, antenas, etc., utilizadas para evitar problemas de ruido, vibraciones y producción de estelas a profundidad de periscopio, se han intentado realizar en fibra de vidrio, pero su baja rigidez ha conducido a resultados no demasiado buenos, lo que ha reconducido el problema hacia el empleo de fibra de carbono, que parece ser ideal para dicha aplicación, debido a su elevada rigidez y excelente resistencia.

Algunos compuestos de matriz metálica se encuentran en fase de estudio para posibles aplicaciones marinas: Grafito/Al para montantes y perfiles de hidrofoils; SiC/al para superestructuras y cubiertas de navíos y cascos de sumergibles, así como torpedos y minas; grafito/Pb para placas de baterías de submarinos nucleares, que podrían así duplicar su vida operativa, etc.

## INCONVENIENTES FUNDAMENTALES A CONSIDERAR Y PROBLEMAS AUN POR RESOLVER

**E**videntemente, no todo van a ser ventajas y es interesante conocer los posibles inconvenientes que pueden presentarse cuando se está evaluando la posibilidad de emplear estos nuevos materiales. Asimismo, es interesante tener una idea de los problemas que aún quedan por resolver. Entre los primeros, pueden citarse como fundamentales:

a) Materias primas y semielaborados relativamente caros: Inicialmente el precio de estos materiales era tremendamente elevado, lo que al conducir a una relación coste/eficacia desfavorable, hacía que no fuera rentable su empleo salvo en la Industria Aeroespacial y en aplicaciones de Defensa. La tendencia general, sin embargo, es a un descenso progresivo de los precios, que al permitir un mayor consumo, conduce a su vez a un mayor abaratamiento del material.

b) Procesos y Tecnologías de fabricación especiales: En muchos casos, cuando se requiere una buena calidad y adecuada repetibilidad del producto, los procesos requieren equipos caros con control constante sobre todas las variables que intervienen en dicho proceso y la necesidad de personal cualificado. Actualmente se tiende a procesos totalmente automatizados y controlados mediante ordenador, lo que probablemente origine un considerable aumento en el empleo futuro de "robots", hecho que a su vez planteará el nuevo problema del diseño de elementos que deberán construirse de forma automatizada.

c) Lagunas de conocimientos. Al no conocerse con precisión la respuesta del material en servicio, se diseñan estructuras de tipo "seguro al fallo" o sobredimensionadas, con la consiguiente falta de aprovechamiento total de las posibilidades del material.

d) Comportamiento no inmediatamente intuitivo.

e) Experiencia anterior sólo relativamente útil, siendo necesario desarrollar nuevas tecnologías.

f) Control de calidad aún no maduro y garantía de producto relativa.

g) Disponibilidad de materias primas precaria si no existe fabricación nacional de ellas. Estos materiales pueden considerarse "estratégicos".

Como algunos de los problemas que se presentan a la hora de utilizar materiales compuestos pueden citarse:

a) Correcta elección de fibra y matriz, es decir, que sean compatibles y respondan adecuadamente a sus funciones respectivas dentro del material y en la aplicación a que se destina dicho material.

b) Elección del método adecuado de preparación del material compuesto.

c) Carencia de una teoría que describa la respuesta real del material a solicitaciones medio ambientales externas.

d) Caracterización cara. Bases de datos utilizables en diseño no siempre disponibles o fiables.

e) Problemas de fractura, fatiga, reparabilidad, etc.

Finalmente, hay que tener siempre muy presente en el empleo de estos materiales una característica fundamental de los mismos que es su anisotropía. Es una gran ventaja empleada de modo adecuado, pues permite optimizar diseños y realizar algunos que de otro modo serían irrealizables, pero puede convertirse en un enorme problema si no se tiene presente, ya que puede conducir al fracaso del diseño.

En definitiva y a pesar de los inconvenientes existentes, son tan interesantes las ventajas que se obtienen, que los materiales compuestos avanzados encuentran cada día una mayor utilización y actualmente se muestran como los más prometedores nuevos materiales para las aplicaciones aeroespaciales y de alta tecnología, así como para el resto de los sectores industriales, a medida que los precios de material y tecnología bajan lo suficiente, como consecuencia de un aumento de la demanda y del abaratamiento inherente a las mejoras tecnológicas. ■