

EL CÁLCULO DE LOS MATERIALES COMPUESTOS POR ELEMENTOS FINITOS.

Javier García de la Figal
Ing.; DrC. Profesor Fac. Ing. Mecánica, ISPJAE
Pedro A. Rodríguez Ramos
Ing.; DrC. Profesor Fac. Ing. Mecánica, ISPJAE

RESUMEN

Se describen en el trabajo diferentes contenidos básicos relacionados con los composites y su utilización en nuevas tecnologías de la rama naval, lo que está provocando la necesidad de incluir estos conocimientos en la preparación universitaria a los efectos de potenciar que la educación profesional en la rama naval en Cuba, tenga un permanente fortalecimiento de su profesionalidad, sustentada en una amplia cultura general e integral y el desarrollo de un pensamiento flexible y creativo. En el presente trabajo se muestran los principales aspectos vinculados al cálculo de los composites y algunos ejemplos de su empleo.

INTRODUCCION

Materiales Compuestos o Composites son aquellos constituidos por la combinación de dos a más constituyentes de propiedades diferentes, los que se combinan al nivel macroscópico, no siendo solubles entre sí.

Uno de los constituyentes es la **fase reforzadora** y la otra, en la que se encuentra embebida, es la **matriz**. Ejemplos de materiales compuestos son: el concreto u hormigón, el acero galvanizado y los plásticos reforzados con fibras de vidrio. El empleo de los composites se remonta a los años 2500 a.n.e. aproximadamente, en los templos de Mesopotamia, donde se empleaban ladrillos en forma de conos de piedra martillados dentro de la pared de arcilla. El fin era prevenir la erosión y el desgaste. Los antiguos egipcios los emplearon en las momias, en forma de limo con resinas naturales, en sus embarcaciones donde emplearon papiro con brea, así como en maderas unidas con goma, para diversos usos. Pero no es hasta el año 1930 que se inventa la moderna fibra de vidrio, la que en unión de las resinas, dan origen al moderno composite.

Los composites o materiales compuestos modernos son en realidad una amplia variedad de combinaciones de materiales con aplicaciones en ingeniería, que se han ido desarrollando en las últimas décadas. Permiten conseguir propiedades y características nuevas o mejores que las de los materiales tradicionales (mayores rigideces y resistencias, dilataciones térmicas nulas, etc). Una característica común es que son materiales más ligeros que los aceros y que el hormigón, pues los materiales empleados como matrices y muchos de los refuerzos, son de por sí materiales ligeros.

Entre los materiales empleados como reforzadores se encuentran los conocidos como materiales cerámicos, que se caracterizan por sus altos puntos de fusión y sus elevadas resistencias al desgaste. Se trata de materiales como óxidos (Al_2O_3 , SiO_2 , los más baratos y empleados), carburos (SiC) y nitruros (BN). Con ellos se aumentan las temperaturas de trabajo y la resistencia al desgaste, de los materiales compuestos con ellos confeccionados. Los materiales cerámicos se han empleado también como matrices, aunque más raramente, obteniéndose composites aptos para trabajar a muy altas temperaturas. Se trata de materiales tales como la alúmina o el silicato de Calcio – Aluminio, que se refuerzan con fibras de Carbono o con SiC .

Varios de los muchos composites desarrollados son, sin embargo de difíciles tecnologías de fabricación, y de componentes de difícil adquisición en el mercado, además de costosos, lo que hace que algunos sean realmente raros.

DESARROLLO

Los principales tipos de materiales compuestos actualmente desarrollados y que han logrado algún tipo de aplicación en las ingenierías, se brindan en el cuadro sinóptico que se da a continuación.

En este trabajo se hará referencia fundamentalmente a los plásticos reforzados con fibras, o sea los denominados PRF.

Composites reforzados con dispersos (fillers).

(Producidos por la metalurgia de polvos, fundamentalmente).

1. Con base de Aluminio o sus aleaciones. Al_2O_3 (aumento de resistencia, dureza y resistencia alta temp) **polvos** O reforzado con partículas de Si y Ni.
2. Con base de Níquel o Ni-Cr (20 % Cr) Reforzado con óxidos de Toro, o de Hafnio (HfO_2), y con partículas de W, Ti o Al.

Composites reforzados con fibras (también con alambres).

3. Con base no metálica (Plásticos reforzados con fibras, PRF) Plásticos reforzados con fibras de vidrio (PRFV) Plásticos reforzados con fibras de grafito (PRFG) Plásticos reforzados con Boro (PRFB). Plásticos reforzados con fibras orgánicas (Aramida)
4. Con base metálica Matriz de Magnesio. Reforzado con elementos de alto punto de fusión (B o C). Matriz de Aluminio comercial o sus aleaciones. Reforzado con alambres de acero de alta resistencia; o fibras de Boro (aumento de E en 3-4 veces); o de C (gran disminución de la densidad). Matriz de Titanio, reforzado con alambres de Be; o con fibras cerámicas de alto punto de fusión: (Al_2O_3), carburos (SiC); o alambres de metales de alta fusión y alta temp. de recristalización (W, Mo). También fibras de boro. Matriz de Ni o de Ni-Cr. Con alambres de tungsteno como reforzador.

Empleo de composites de PRF en la década de 1990.

Área de empleo	% de empleo.
Aeroespacial – militar	0.76
Equipos de negocios	5.22
Construcción	20.00
Productos de consumo	5.8

Equipos resistentes a corrosión	12.5
Eléctrico / electrónico	10.00
Marina	11.80
Transportación	31.00
Otros	2.12

Tabla 1 .- Uso de los principales composites de PRF.

Tipo de composite	Aplicaciones.
Vidrio / epoxy	Partes de aviones y automóviles, recipientes y tanques.
Boron / epoxy	Muy alta rigidez, baja resistencias a impactos. Estructuras de aviones y estabilizadores.
Grafito / epoxy	Altas rigideces y resistencias. Estructuras de industria aeroespacial, equipos agrícolas, de manipulación de cargas, dispositivos médicos.
Aramida / epoxy	Altas resistencias, incluida al impacto. Tanques de presión, equipos y estructuras de industria aeroespacial, partes de automóviles.
Vidrio / poliéster	Las menores resistencias y rigideces de todos. Confección de sheet molding compound (SMC), paneles de camiones y autos, grandes chumaceras y otras piezas de grandes dimensiones. Embarcaciones.

Materiales empleados en los Composites.

Reforzadores. Los reforzadores de los composites, pueden presentarse en forma de polvos, de fibras, o de alambres. Los **polvos** a su vez, pueden ser:

- **Partículas.**- Son elementos de muy pequeñas dimensiones, empleados para mejorar determinadas propiedades. Son conocidos como fillers y se presentan en forma de polvos, por lo que generalmente se vinculan con la Metalurgia de polvos. Son muy empleados materiales de alto punto de fusión, conocidos como materiales cerámicos, tales como: óxidos (Al_2O_3 , SiO_2 , los más baratos y empleados), carburos (SiC) y nitruros (BN). También son empleados variados elementos, como Si, Ni, Ti, Al o W. Ejemplos: Partículas de aluminio en gomas; o carburos de silicio en aluminios. Un material muy conocido que cae en este grupo, es la gravilla y arena en el cemento (hormigón).
- **Hojuelas.**- Empleadas para incrementar la resistencia a flexión de las placas y vigas. Se trata de polvos en forma de hojuelas, de espesores tan finos como 0.01 – 0.1 μm . Pero son difíciles de orientar y hay pocos materiales que se prestan a su uso (vidrio, mica, Al_2O_3).

Las fibras.- Consistentes en hilos muy finos (“pelos” o filamentos), con diámetros que oscilan entre 10 y 400 μm . Pueden ser de longitudes pequeñas o largas. Cuando son largas, se agrupan de forma torsionada, para formar un fino cordón; o sin torsionarse, formando un apretado haz. Así se tienen las fibras redondas y las rectangulares, respectivamente. Pueden ser también fibras cortas dispuestas aleatoriamente (por ejemplo los tejidos Mat).

Los materiales más empleados en forma de fibras son: el vidrio, el grafito (C), la aramida y el boro (B). Otros materiales empleados en forma de fibras, sobre todo con matrices metálicas son: elementos puros, como el propio C o el B; materiales cerámicos como óxidos (Al_2O_3) o carburos (SiC); o alambres de metales puros (tales como Molibdeno, Mo, o Wolframio W).

Los alambres permiten incrementos grandes de las propiedades del material, pues se emplean materiales muy resistentes en el alambre, tales como aceros de alta resistencia, el berilio (Be), o metales de alta fusión y alta temperatura de recristalización (como el wolframio o tungsteno W, o el molibdeno Mo). Se emplean fundamentalmente con matrices metálicas.

Matrices. Los materiales empleados como matrices en los composites, son los siguientes.

- **Polímeros.** Tales como el poliéster, epoxy, uretano, resinas fenólicas, poliamida (o Nylon) y otros

polímeros.

- Metales. Aluminio, Magnesio, Titanio, y el Níquel y sus aleaciones. Poseen mayores propiedades elásticas, resistencias al desgaste y a la fatiga que los polímeros; así como mayores temperaturas de servicios que ellos, junto con una buena insensibilidad a la humedad.
- Cerámicos. Se trata de materiales tales como la alúmina o el Silicato de Calcio-Aluminio, reforzados con fibras de carbono o con carburo de Silicio (SiC). Son empleadas para trabajar a muy altas temperaturas; siendo además muy resistentes al desgaste. Aunque por su menor tenacidad, resisten poco las cargas de impacto. Estos materiales son menos vistos como matrices y especialmente en prestaciones a altas temperaturas.

Las resinas requieren de la adición de catalizadores (llamados también endurecedores) y de calor, para acelerar el proceso de polimerización o curado durante la conformación del laminado de composite. Los resinas **poliésteres** requerirían de años para su curado a temperatura ambiente, pero con el catalizador (el "methyl ethyl kethone epoxide"), se inicia el proceso, el que a continuación genera el necesario calor para acelerar las reacciones químicas del mismo. De este modo alcanza su resistencia total al cabo de las 24 horas. Las resinas **epoxicas** requieren junto a la adición del catalizador, de un calentamiento a unos 120 ° C. El calor es necesario porque el proceso de curado genera la condensación de agua, la que requiere ser convertida en vapor para ser eliminada.

Los plásticos del tipo termoplásticos, por otro lado, (la poliamida o Nylon, el polipropileno, el polieterétercetona o PEEK, y el policarbonato, que son los más empleados en composites), poseen uniones débiles entre sus moléculas, por lo que son reconfigurables repetidamente a altas temperaturas y poseen pobres propiedades mecánicas. Por esto último los termoplásticos son en general menos empleados en los composites.

Ventajas de los composites de PRF.-

Posiblemente la principal ventaja actual de los materiales compuestos de plásticos reforzados con fibras (PRF), sea su muy larga vida útil, la que puede llegar normalmente a los 50 – 60 años y más, de explotación. Unido, además a que esa larga vida requerirá de servicios de reparación y mantenimientos mínimos, se tienen las principales causas del empleo de estos materiales en muchas aplicaciones actuales. No obstante, poseen otras ventajas adicionales importantes.

- Alta estabilidad de sus dimensiones ante grandes variaciones de temperaturas. En satélites artificiales, resisten variaciones desde - 160 hasta + 94° C. Esto se logra con coeficientes de dilatación lineal del orden de $\alpha \approx 10^{-6} \text{ m / m / } ^\circ\text{C}$, o sea muy cercanos a cero.

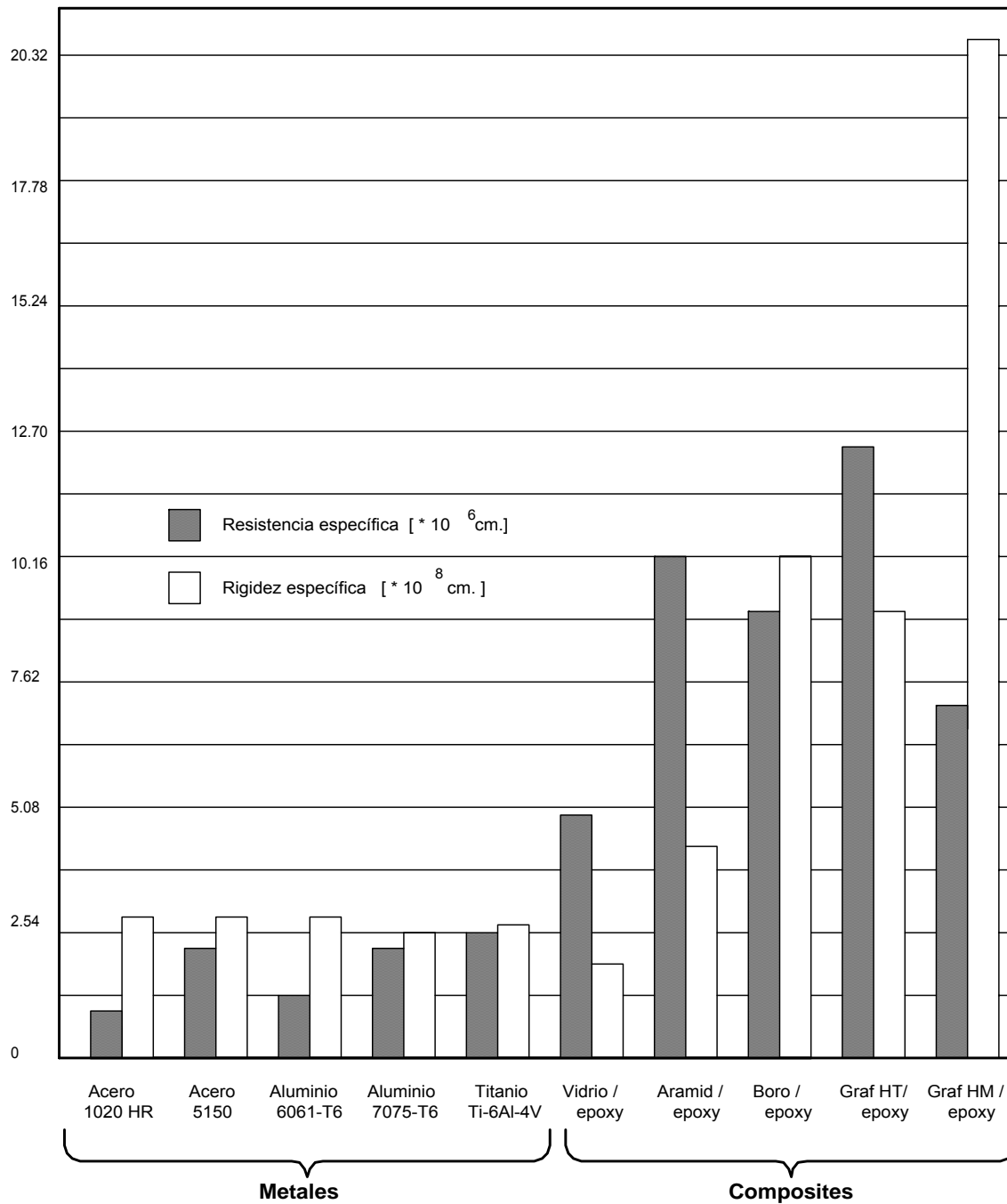


Fig. 2.- Comparación entre la resistencia y rigidez específicas de algunos metales y composites de PRF.

- Altas resistencias a la corrosión, ante la acción de diversos agentes.
- Aceptables resistencias a cargas de impacto, aunque inferiores a las de los metales.
- Mayores:
 - $$\left\{ \begin{array}{l} \text{Módulo específico} = E / \rho \\ \text{Resistencia específica} = \sigma_R / \rho, \text{ que otros muchos materiales de ingeniería.} \end{array} \right.$$

(Donde σ_R es el límite de rotura del material, E el módulo de elasticidad y ρ la densidad).

El módulo y resistencia específicos son de las más apreciadas cualidades de los composites de PRF, en comparación con los materiales tradicionales, e incluso con los mejores materiales compuestos de matrices metálicas, actualmente existentes.

- Son fuertes aislantes térmico y eléctrico. Gran amortiguamiento vibratorio.

Tabla 2 . Módulos y resistencias específicas, de varios materiales.

E / ρ [GPa·m ³ / kg]	σ_R / ρ [MPa·m ³ / kg]	Material.
0.1131	0.9377	Lámina Unidirec. Grafito/epoxy.
0.02144	0.5900	Lámina Unidirec. Vidrio/epoxy
0.06	0.2331	Lámina Croos-ply Grafito/epoxy
0.0131	0.0490	Lámina Croos-ply vidrio/epoxy
0.02652	0.08309	Acero
0.02652	0.1061	Aluminio.

Desventajas de los composites de PRF.-

- Altos costos de fabricación en comparación con los materiales de ingeniería tradicionales. Por ejemplo, la obtención por medio de laminación de una placa de grafito / epoxy cuesta 10 - 15 veces el costo de los propios materiales base. Una placa de este composite puede costar en total, unos \$650 - 900 / kg. Las de fibras de vidrio, sin embargo, son menos costosas y más competitivas con los materiales tradicionales.
- Mayor complejidad de las propiedades mecánicas, lo que provoca una mayor complicación en la obtención de las propiedades necesarias para los cálculos y diseños de las piezas. Mientras el acero requiere de hasta 4 propiedades mecánicas para los cálculos de resistencia, los composites necesitan 9, según se verá más adelante.
- Carecen de una alta combinación de resistencia con tenacidad, como la que presentan los metales. Esto los hace menos resistentes a las cargas de impacto, que aquellos.
- Menores módulos de Elasticidad que el acero, por lo que son menos rígidos (**Tabla 3**). Esta es una de sus principales desventajas frente a los aceros.
- En principio pobre unión matriz – fibra, lo que puede generar delaminación. Sobre todo con fibras de carbono (C) o de boro (B). Aunque esto se resuelve con tratamientos especiales.
- Temperaturas de trabajo no elevadas (100 – 200 °C, dependiendo de la matriz).

En el caso de laminados del tipo Croos-ply (u ortogonales), se logran iguales propiedades en sus dos direcciones ortogonales, comparables con las de los mejores aceros. Es decir, que si bien es cierto que el material compuesto de por sí es poco rígido, con su adecuada elaboración en varias capas formando un laminado, así como con soluciones constructivas adecuadas, se logran rigideces del orden de los aceros.

Tabla 3. Propiedades mecánicas comparativas.

X [MPa] Resistencia Longitudinal	X' [MPa] Resistencia Transversal.	E_1 [GPa] Longitudinal	E_2 [GPa] transversal	Material.
1500	40	181	38.6	Lámina Unidirec.grafito/epoxy

1062	31	10.3	8.27	Lámina Unidirec. de vidrio/epoxy
1500	1500	206	206	Acero Margaring

Compatibilidad entre matrices y reforzadores.

Las propiedades de resistencia y rigidez de las fibras son mucho más elevadas que las de los plásticos. Esto explica por qué los refuerzos brindan la resistencia y rigidez al composite, mientras que la matriz hace la función fundamental (aunque no única), de elemento de unión o aglutinante. No obstante, ésta tiene otras importantes funciones en el composite, tales como: prevenir la abrasión mecánica de las fibras, transmitir los esfuerzos entre los componentes, y en láminas unidireccionales determinar las propiedades transversales del composite, pues las fibras unidireccionales casi no ejercen función en ese sentido. Las propiedades de la lamina de composite quedarán, por tanto entre las de los 2 elementos constituyentes, como puede verse esquemáticamente en los diagramas de tracción de una lámina y sus componentes, mostrados en la Figura 1.

El problema reside en que el conjunto matriz – fibra bajo cargas, se comporta como un conjunto estructural en paralelo, en el cual la distribución de la carga externa entre los componentes ocurre de forma directamente proporcional a la rigidez de cada uno de ellos. De modo que el elemento de mayor rigidez (las fibras), serán las que siempre “absorberán” la mayor parte de la carga externa, que es lo adecuado por ser las de mayor resistencia. Pero a su vez, el proceso de alargamiento conjunto de ambas fases bajo cargas, se produce de modo que las deformaciones de los 2 componentes permanezcan iguales, garantizándose así que el proceso ocurra sin separación entre ellas, es decir, sin delaminación. O sea, que se cumple en todo momento que,

$$\varepsilon_m = \varepsilon_f$$

donde: ε_m - deformación de la matriz. ε_f - deformación de la fibra.

De modo que la primera de las 2 fases que alcance su deformación de rotura ε^R se romperá y hará fallar a todo el composite. Como se ve son las deformaciones lo realmente determinante en la resistencia de los composites.

En este sentido los composites pueden agruparse en 2 tipos muy importantes, atendiendo a la rigidez de la matriz. Algunos plásticos termoestables al ser empleados como matrices se denominan como “matrices rígidas”, por poseer módulos de Elasticidad relativamente altos, lo que hace que la deformación de rotura de la matriz ε_m^R sea menor que la deformación de rotura de la fibra ε_f^R , es decir cumplen con la relación,

$$\varepsilon_m^R < \varepsilon_f^R \quad \text{Condición con las “matrices rígidas”}.$$

Por ello son composites caracterizados porque el fallo está controlado por la matriz, y es ésta el primer componente que rompe, luego de lo cual falla todo el composite (Fig. 1 b).

Contrario al otro grupo de composites en que la matriz es “dúctil” al poseer deformaciones ε_m^R grandes, cumpliéndose que,

$$\varepsilon_m^R > \varepsilon_f^R \quad \text{Condición con las “matrices dúctiles”}.$$

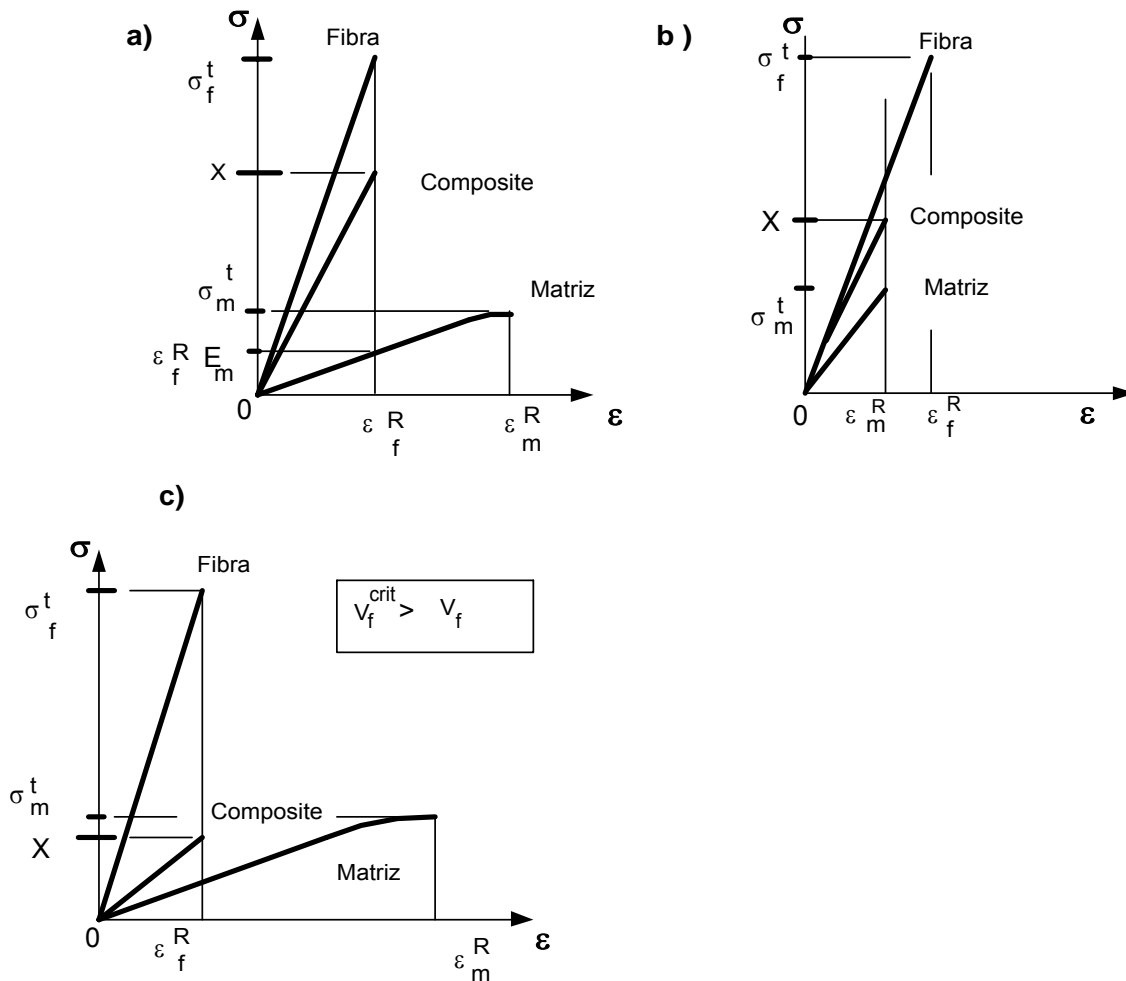


Fig. 1.- Diagramas de tracción de una lámina de Composite y sus componentes.

a) Composite de "matriz dúctil", adecuadamente diseñado. b) Composite de "matriz frágil".

c) Composite con $V_f < V_f^{crit}$.

σ_m^t - límite de rotura de la matriz. σ_f^t - límite de rotura de la fibra. ϵ_f^R - deformación de rotura de la fibra. ϵ_m^R - deformación de rotura de la matriz. X - límite de rotura del composite. E_m -módulo de elasticidad de la matriz.

Todas estas propiedades son en la dirección de las fibras.

Son entonces composites donde el fallo está controlado por las fibras (Fig. 1 a), y es el caso del empleo como matriz de algunas resinas termoresistentes, como las epóxicas y las poliésteres, casi todas las termoplásticas, así como las matrices metálicas. En ellos lo primero que rompe del composite es la fibra, que es entonces la causante del fallo total.

En la Fig. 1 a) se representan los diagramas de tracción de un composite y sus componentes, con "matriz dúctil", mientras que en la Fig. 1 b) con "matriz frágil", en los cuales se ve como la fase de menor deformación de rotura ϵ^R es la que controla la rotura del composite. De los diagramas puede observarse también una de las deficiencias más importantes de todos los composites de matrices poliméricas: la baja rigidez resultante del composite, alejada de las altas rigideces de las fibras. En la Fig. 1 c) se muestran los diagramas de una lámina inadecuadamente diseñada, en donde la resistencia a tracción X del composite, queda menor que la de la matriz σ_m^t , lo cual es un mal diseño pues se trata de valores muy bajos de resistencias.

Cálculo de los Composites.

Lámina.- Es una placa de material compuesto, generalmente de espesor muy fino (≤ 1 mm). Debe recordarse también que desde el punto de vista estructural, una placa es un elemento estructural, 2 de cuyas dimensiones son mucho mayores que la tercera, es decir, que el espesor.

Laminado.- Es un conjunto de láminas colocadas una encima de la otra, en la dirección del espesor, y fuertemente unidas entre sí, por la matriz.

La lámina está constituida por la matriz y el reforzamiento. A pesar de poder ser la matriz isotrópica, (como en la mayoría de los materiales empleados como tales), si el reforzamiento no lo es (los casos del aramid y el grafito), la lámina quedará con algún tipo de anisotropía. Pero in-

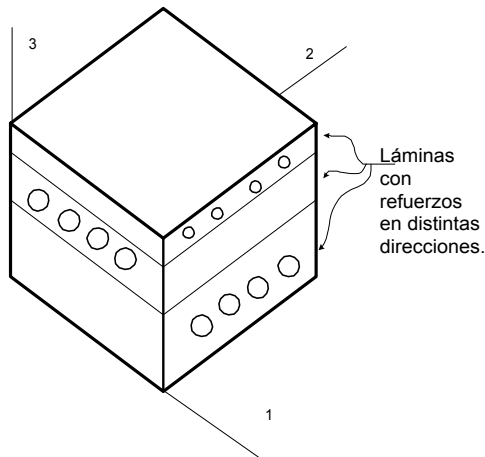


Fig. 3.- Esquema de un laminado.

cluso si el refuerzo es isotrópico (como los vidrios) cuando se emplean en forma de fibras o alambres, debido a su ubicación en la lámina ésta quedará siempre con anisotropía en alguna dirección. O sea que ningún composite de PRF con refuerzos de fibras o alambres es isotrópico.

Se trata pues, de laminados con propiedades ortotrópicas, es decir con propiedades diferentes en los ejes ortogonales 1, 2, 3 del laminado. Para el cálculo de estos tipos de elementos se requieren muchas más propiedades que para los materiales de ingeniería tradicionales. Entre esas nuevas propiedades necesarias de cada lamina, están las siguientes.

E_1 - Módulo de elasticidad en la dirección 1.

E_2 - Módulo de elasticidad en la dirección 2.

G_{12} - Módulo de distorsión en el plano 1,2.

μ_{12}, μ_{21} - coeficientes de Poisson en el plano 1, 2.

X - Límite de rotura a tracción longitudinal.

X' - Límite de rotura a compresión longitudinal.

Y - Límite de rotura a tracción transversal.

Y' - Límite de rotura a compresión transversal.

S - Límite de rotura tangencial (en el plano de la lámina).

Todas deben ser determinadas para cada una de las láminas que conforman el laminado de composite. Esto constituye sin dudas, una de las serias limitaciones que han demorado una difusión más amplia aún de estos materiales.

El cálculo a resistencia y a rigidez de los composites, también tiene mayores complicaciones que con los materiales isotrópicos tradicionales. De hecho, no son posibles realizarlos si no es con la ayuda de programas de computación, tales como el Mathcad, el Excel, el Matlab, y otros semejantes, con los cuales realizar las complejas operaciones matemáticas necesarias. Pero últimamente se están empleando con mucho éxito los modernos programas profesionales de Elementos Finitos, con los cuales no sólo se realizan los cálculos, sino que se hace el modelo completo del comportamiento de la pieza o equipo de composite, bajo sus condiciones de operación. Creciente es el empleo de estos medios en el diseño y cálculo de embarcaciones marítimas de todo tipo y en otras muchas construcciones.

En las siguientes figuras se muestra el modelo por Elementos Finitos de una patana especializada, que sirviera de base fundamental para el dimensionamiento, cálculo y diseño de sus partes componentes, todo construido de laminados de materiales compuestos. Estas patanas son la base de un sistema de tratamiento de aguas negras, actualmente instalado en un centro turístico de Cuba.

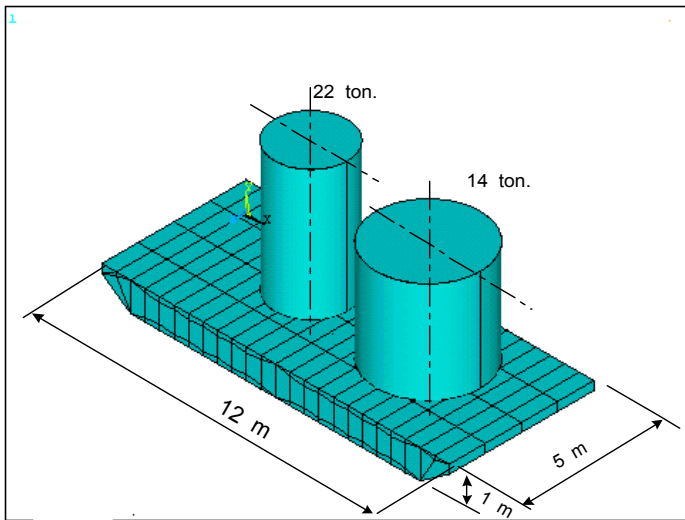


Fig. 4.- Modelo de Elementos Finitos de la patana PTR – 1.

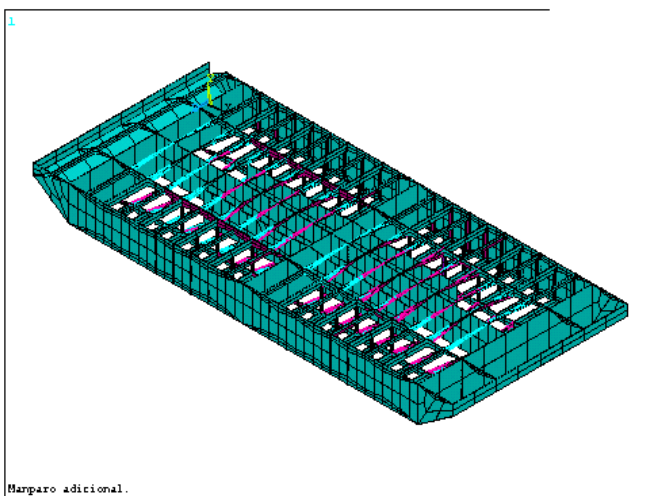


Fig. 5.- Reforzamientos (refuerzos, varengas, baos, esloras y mamparos), junto con los costados del modelo de Elementos Finitos elaborado.

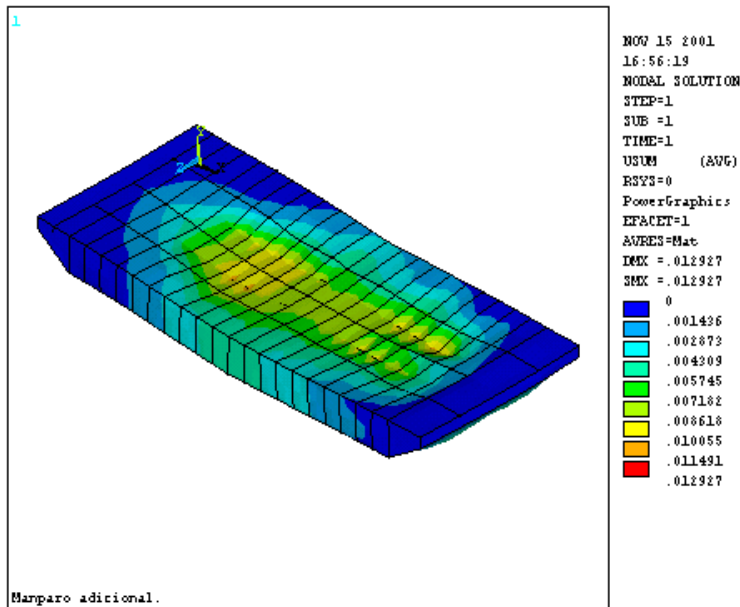


Fig. 6 .- Desplazamientos verticales en los nodos, del modelo bajo cargas, [m].

CONCLUSIONES

Producto de los cálculos realizados con estos modelos, fueron posibles diseñar todos los reforzamientos (refuerzos, varengas, baos, esloras y mamparos), junto con los costados, cubierta y fondo de las patanas, decidiendo los tipos de laminados necesarios en cada uno de ellos. Con esto se logró una optimización en el uso de los materiales necesarios, con grandes ahorros económicos en sus construcciones.

BIBLIOGRAFIA

- García de la Figal J. Los composites. Materiales del curso de posgrado, 58 pag. 2003