

Materiales Compuestos: nuevas tecnologías para su aplicación en el sector de transporte

Composite Materials: new technologies for their application in the transportation sector

Presentación: 06/09/2023

Hector Guillermo Kotik

Laboratório de Materiais Compósitos y Laboratório de Mecânica da Fratura, Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais (PEMM), Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Brasil.

hكتورkotik@metalmat.ufrj.br

Resumen

Los materiales compuestos son consumidos extensivamente por el sector de transporte, pudiendo ser encontrados en aplicaciones que van desde aviones de combate y de uso civil, camiones, tranvías, lanchas, yates, submarinos, entre otros. Nuevas tecnologías introducidas en esta familia de materiales pretenden ingresar en este sector, sea para mejorar la performance estructural, disminuir el impacto ambiental de piezas o partes de estructuras donde ya no son utilizadas, o para abrir nuevas nuevos campos de aplicación. Este artículo es una breve revisión sobre tres temas que cuyas perspectivas de aplicación en la industria de los medios de transporte son promisorias: a) el uso de compuestos reforzados con fibras naturales mallas para aumento de la rigidez, b) los compuestos autorreparables y c) la manufactura aditiva.

Palabras clave: materiales compuestos; fibras naturales; compuestos autorreparables; manufactura aditiva.

Abstract

Composite materials are employed extensively by the transportation sector and are found in applications such as combat and civil aircraft, trucks, trams, boats, yachts, submarines, among others. New technologies introduced in this family of materials aim to enter this sector, either to improve structural performance, to reduce the environmental impact of pieces or parts of structures where they are not used, or to open new fields of application. This article is a brief review of three topics whose application prospects in the transportation industry are promising: a) the use of natural-fibers reinforced composites with reinforcing grids to increase rigidity, b) self-healing composites, and c) additive manufacturing.

Keywords: composite materials; natural fibers; self-healing composites; additive manufacturing.

Introducción

Los materiales compuestos pueden ser definidos como materiales multifásicos con fracciones medibles de cada fase presente. Analizando el material, pueden distinguirse dos fases, una fase continua denominada matriz y una fase discontinua o dispersa denominada refuerzo. Estas fases pueden estar constituidas por cualquier familia de materiales que conocemos: polímeros, metales o cerámicos. Como ejemplo, podemos citar los ladrillos de barro reforzados con paja que viene siendo utilizados desde el antiguo Egipto, siendo el barro la matriz

cerámica y la paja los refuerzos de fibras poliméricas (“Éxodo 5,” n.d.). Los refuerzos pueden tener formas diversas y pueden ser clasificados por su geometría como refuerzos en forma de partículas, whiskers, fibras discontinuas, fibras continuas o láminas (Chawla, 2019).

Usar esta combinación de materiales genera propiedades que no pueden lograrse con ninguno de los materiales constituyentes actuando aisladamente. Un hecho interesante es que, en muchas combinaciones de materiales, el material compuesto resultante posee propiedades específicas (propiedad/densidad) que son superiores a los de sus constituyentes de forma aislada. Estas propiedades específicas permiten mantener la integridad de las estructuras para las que fueron diseñadas con la ventaja de una reducción del peso. El sector de transporte, sea del área civil o militar, busca constantemente disminuir el peso de sus equipamientos, máquinas e infraestructura, motivo por el cual los materiales compuestos ya son ampliamente usados. Aviones de combate y de uso civil, camiones, tranvías, lanchas, yates, submarinos, son solo algunos ejemplos de medios de transporte que tienen porcentajes crecientes de materiales compuestos en su conjunto, eso sin incluir las infraestructuras viales, ferroviarias, portuarias, entre otras, que completan el circuito logístico para este sector.

Durante las últimas décadas, los compuestos mantuvieron un estatus diferenciado, siempre siendo asociados con una performance de punta en muchas aplicaciones. Sin embargo, en los últimos meses, un evento trágico que ocurrió el 18 de junio de 2023 llevó a la prensa y a muchos expertos a cuestionar su uso. La implosión del batiscafo Titan, un tipo de sumergible perteneciente a la empresa OceanGate, llevó consigo la vida de sus cinco ocupantes durante una de sus incursiones turísticas para visitar el pecio del trasatlántico RMS Titanic. Los titulares de revistas, periódicos, así como entrevistas difundidas por la prensa, apuntaban al uso de los materiales compuestos como piezas clave del siniestro (Chapman & Devine, 2023)(Costello & Chan, 2023)(ABC News, 2023).

Hasta la fecha de publicación de este artículo, el documento oficial del análisis de falla del Titan no ha sido publicado. Sin embargo, el impacto sobre el *status quo* de excelencia que gozaban los materiales compuestos en distintos ámbitos ha sido afectado. Este hecho puede traer a expertos y usuarios a una reflexión sobre la viabilidad de aplicar estos materiales de forma indiscriminada y sobre los varios aspectos que necesitan ser investigados y desarrollados para garantizar la integridad estructural, así como un ciclo de vida sustentable. Podemos listar los problemas asociados con los defectos originados durante la fabricación, las incertezas en la previsión de la vida útil en situaciones como fatiga multiaxial o degradación por mecanismos ambientales y mecánicos combinados, monitorear la propagación de defectos en sus etapas iniciales, la anisotropía en su tolerancia al daño, las geometrías limitadas por sus procesos de fabricación y el reciclaje, entre otros aspectos no menores en importancia.

Desarrollos recientes en los materiales compuestos han traído nuevas perspectivas para su aplicación en industrias como la del transporte para uso civil y militar, permitiendo superar algunas limitaciones existentes, mejorar la performance en aplicaciones existentes y abrir el camino para nuevas. Este artículo es una breve revisión sobre tres temas que cuyas perspectivas de aplicación en la industria de los medios de transporte son promisorias: a) compuestos reforzados con fibras naturales con mallas para aumento de rigidez, b) los compuestos autorreparables y c) la manufactura aditiva.

a) Compuestos Reforzados con Fibras Naturales

Las fibras naturales fueron usadas por el ser humano en materiales compuestos hace milenios. La constante investigación sobre nuevas fibras, con propiedades mecánicas equivalentes a las fibras de ingeniería (vidrio, basalto, carbono, boro, UHMWPE, PP, etc.) es una constante, visto que su uso en aplicaciones de alto desempeño depende de ello. En la Figura 1 es presentado un gráfico de resistencia a la tracción vs. módulo de elasticidad para varias familias de fibras. Puede ser observados algunos tipos de fibras de carbono (UHS, HS, UHM, UM) en los rectángulos negros, fibras de vidrio en celeste, fibras de boro en gris, entre otras. Las fibras naturales quedan

agrupadas en regiones con bajos módulos de elasticidad y bajos valores de resistencia a la tracción, comparadas con las fibras de ingeniería. Por esta causa, la aplicación de estas fibras quedó destinada a usos de bajo desempeño, situaciones donde la performance mecánica no sea el principal objetivo.

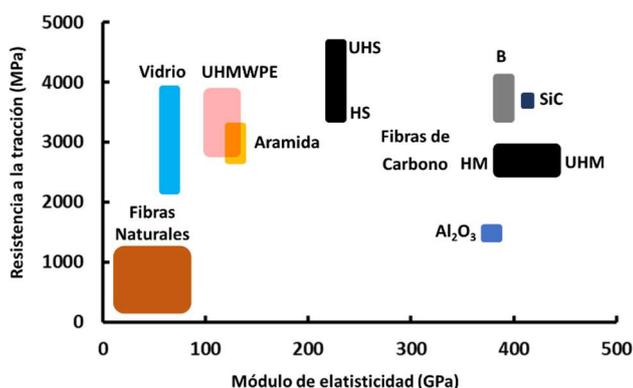


Figura 1. Gráfico resistencia a la tracción vs. módulo de elasticidad para diversas familias de fibras.

Casos como los de Mercedes-Benz clase A (Naik et al., 2021), utilizado como ejemplo de uso de fibras naturales en la industria automotriz en muchas publicaciones, muestra la sustitución de piezas que no requieren de alta performance mecánica. Partes como la cubierta de panel de puerta, panel de instrumentos, reposabrazos, paneles de respaldo de asiento, panel de carrocería, panel de piso, fundas de asiento, colchones de asiento, tapetes, asiento paneles traseros, fibra en los cojines del respaldo, son algunas de las piezas donde fueron empleadas fibras naturales en la forma de tejidos o de refuerzos en matrices poliméricas para conseguir substituir chapas metálicas, plásticos y fibras sintéticas.

La nueva propuesta que viene tomando fuerza en el mercado es el uso de mallas de refuerzos sobre los paneles de materiales compuestos reforzados con fibras naturales para aumentar, entre otras cosas, la resistencia y la rigidez. Ante la limitación impuesta por el módulo de elasticidad, esta solución busca aumentar el módulo de inercia del laminado de material compuestos a través de estas mallas, permitiendo mejorar la performance del material en ciertas propiedades mecánicas sin incurrir en un aumento excesivo del peso. La Figura 2 muestra un ejemplo de aplicación de estos refuerzos sobre un laminado convencional de compuesto reforzado con fibras naturales.

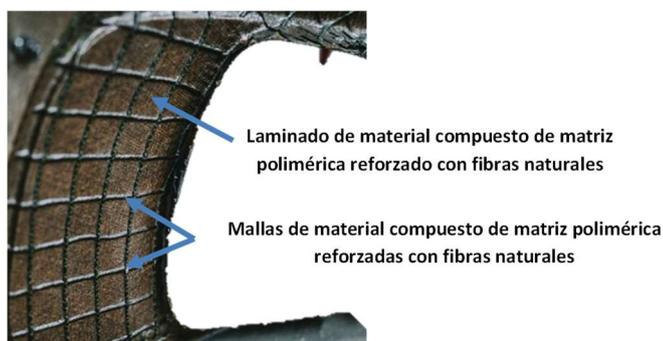


Figura 2. Ejemplo de uso de mallas para aumento de rigidez en un compuesto de matriz polimérica reforzado con fibras naturales. Adaptado de (Nehls, 2022)

Estas mallas pueden ser introducidas durante el propio proceso de manufactura del material compuesto, sea por laminación manual, infusión de resina por bomba de vacío, autoclave, etc. Esta nueva propuesta tecnológica fue empleada para el parachoques del Mercedes-AMG GT4, substituyendo a los parachoques de compuestos reforzados con fibra de carbono existentes e ofreciendo prestaciones mecánicas equivalentes en rigidez y peso, así como mejorando la seguridad (Nehls, 2022).

El uso de estas mallas extendió la gama de posibilidades de nuevos diseños de componentes que pueden encajarse perfectamente en la diversidad de demandas de la industria del sector de transporte. En la búsqueda de generar una menor huella de carbono, la introducción de fibras naturales en ciertos componentes puede ser una solución, siempre y cuando los estudios de integridad estructural y del ciclo de vida del material sean adecuadamente ejecutados (Correa et al., 2019).

b) Compuestos Autorreparables

Los compuestos de matriz polimérica usados en aplicaciones estructurales pueden sufrir esfuerzos dinámicos, como los generados por impacto de baja velocidad o fatiga, que promueven la iniciación y/o propagación de micro fisuras dentro del material, fenómeno que en su situación extrema puede generar la falla de material y limitar su vida útil. Uno de los abordajes presentes para mejorar la performance de estos materiales frente a las citadas solicitaciones mecánicas es utilizar materiales autorreparables, cuyo conjunto está dentro de los también conocidos como materiales inteligentes, que, de forma semejante a sistemas biológicos, pueden promover la auto reparación ante la presencia de daño. La idea de estos materiales es reparar automáticamente los microdaños de los componentes iniciados durante la operación con un proceso autónomo, recuperando parcial o totalmente las propiedades del material antes de la generación del daño macroscópico (Cioffi et al., 2022). La eficiencia del agente curativo puede ser calculada utilizando el parámetro η , definido a través de la ecuación (1):

$$\eta = \frac{\text{Propiedad}_{\text{curado}}}{\text{Propiedad}_{\text{original}}} \quad (1)$$

La literatura muestra un amplio abanico de posibilidades para producir polímeros autorreparables. Para el caso de los materiales compuestos reforzados con fibras existen dos mecanismos que se destacan: Películas Delgadas Termoplásticas y Termorrígidos Encapsulados.

Las películas delgadas termoplásticas se encuentran insertas dentro del material compuesto desde el proceso de manufactura. Estos agentes curativos, mediante un proceso promovido por la difusión, se adhieren químicamente a la superficie de fractura, actuando como una suerte de cierre, reduciendo el área de la fisura y, en algunos casos, eliminándola. Aunque eficaz, una limitación importante de este método de curación es que se requiere activación externa para fundir el termoplástico. Wang *et al.* (Wang et al., 2012) mostraron hace más de una década que la introducción de pequeñas áreas con filmes finos de poli(etilen-co-acrilato de metilo) (EMA) y poli(ácido etileno-co-metacrílico) (EMAA) en el plano de propagación de una fisura interlaminar consiguió actuar como agente de cura en las probetas ensayadas en fractura Modo I y recuperar la tenacidad a la fractura con un η de 46 e 88% para EMA y EMAA, respectivamente.

Los termorrígidos encapsulados son sistemas vesiculares en los que un agente activo está encerrado en una cavidad (núcleo), rodeado por una capa polímero (cáscara). Esta cáscara forma un recipiente que comúnmente tiene la forma de microcápsulas o de fibras huecas. La encapsulación del material del núcleo permite confinar físicamente el agente curativo en un depósito sólido, reduciendo su reactividad con la matriz y evitando su degradación y pérdida durante la fabricación del material compuesto. Uno de los mecanismos más simples de los observados en la literatura propone que una fisura, que propaga por el material compuesto, consigue quebrar una de estas cáscaras. La capilaridad favorece que el contenido confinado en la cavidad moje las superficies de la fisura. El agente activo, en su camino por las superficies de la fisura, puede entrar en contacto con un agente catalizador y de esta manera promover una reacción de cura. La reacción genera una especie de adhesivo entre las superficies opuestas de la discontinuidad, actuando como un puente entre estas y generando un aumento macroscópico de la tenacidad del material. El agente catalizador puede encontrarse disperso en la matriz del material compuestos o también encapsulado. La Tabla 1 muestra algunos ejemplos de eficiencia de agentes curativos termorrígidos encapsulados usados en compuestos de matriz epoxi sometidos a diferentes tipos de

ensayos mecánicos. Es de destacar el caso de la resistencia al corte interlaminar observado para el agente curativo de epoxi (Ebrahimnezhad-Khaljiri & Eslami-Farsani, 2020) donde la eficiencia es mayor que 100%.

Agente curativo	Ensayo mecánico	η
DCPD	Impacto	51% (Zhu et al., 2015)
Epóxi	Tracción / Resistencia al corte interlaminar por ASTM D6264	97% / 144% (Ebrahimnezhad-Khaljiri & Eslami-Farsani, 2020)
DCPD	Flexión	45-55% (Esmaeely Neisiany et al., 2018)
EPA	Fatiga axial	53% (Kim et al., 2019)
PDMS	Fractura con probetas TDCB	30-80% (Mangun et al., 2010)

Tabla 1. Ejemplos de eficiencia de agentes curativos usados en matrices epoxi en diferentes tipos de ensayos mecánicos.

Un sin número de piezas y estructuras del sector de transporte se ven constantemente sometidas a cargas de impacto de baja velocidad y/o ciclos de fatiga, siendo una causa recurrente de fallas en este sector. El uso de materiales autorreparables permite el uso de compuestos en estas aplicaciones, visto que el mecanismo de auto reparación puede extender la vida útil al disminuir la velocidad de degradación de las propiedades mecánicas del material.

c) Manufactura Aditiva

De acuerdo con (Liu & Wen, 2022), este proceso de manufactura, también conocida como impresión 3D, es utilizado para fabricar un objeto físico a partir de un modelo digital tridimensional (3D), normalmente depositando y uniendo una gran cantidad de capas o láminas delgadas sucesivas de materiales. Esta técnica de está en pleno auge y permite el uso de materiales de diferente naturaleza. En el caso de los materiales compuestos laminados, existe una semejanza innata con sus procesos convencionales de fabricación, visto que el concepto de la deposición de láminas es parte dominante de la gran mayoría de los procesos de fabricación existentes. En particular, existe un método de manufactura automatizado que viene siendo aplicado hace varias décadas y puede ser asociado como un tipo de manufactura aditiva: el proceso de deposición de fibra o *fiber placement*. La Figura 3 muestra un esquema del citado proceso en el cual puede observarse el ingreso de las mechas de fibras o cintas de *prepreg* por la parte superior, la región de colimación de fibras y corte, el rodillo de compactación y la deposición de las láminas o fibras sobre el molde.

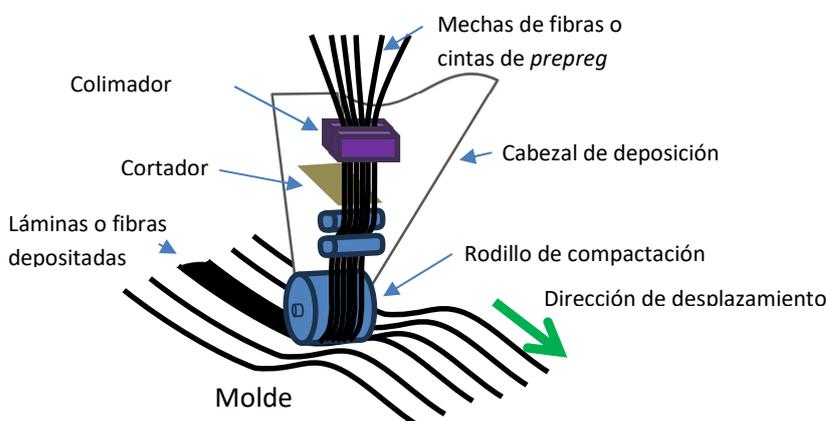


Figura 3 Esquema de un cabezal de deposición de fibras.

El *fiber placement* es un proceso automatizado, permite la deposición de fibras secas o impregnadas, contando con la opción de un rodillo de compactación calentado para generar cura parcial en matrices termorrígidas o derretimiento de matrices termoplásticas. Como ventajas, el método permite una buena velocidad de producción, control del proceso y poco desperdicio de material. Entre sus limitaciones más importantes podemos mencionar el alto costo de adquirir el equipamiento (Chawla, 2019).

Observando el proceso, existe una condición de contorno que limita la deposición de fibras y está dada por el propio molde. El molde sobre el cual son depositadas las fibras o láminas de compuestos es quien define la forma de la pieza. Es en este aspecto que la manufactura aditiva está generando un cambio significativo, depositando el material sobre sí mismo y no sobre un molde o sobre láminas próximas a un molde (Baumers et al., 2013). Este concepto elimina una importante condición de contorno del proceso, ampliando las posibilidades para producir estructuras en 3D complejas que solamente podrían ser fabricadas con los métodos convencionales usando juntas y montajes complejos.

La industria del sector de transporte puede verse enormemente beneficiada con esta tecnología, evitando los costos asociados a los moldes, a la logística de compra y transporte de piezas, al estoque de piezas mediante el uso de una almacén o depósito digital con las formas a imprimir, y la posibilidad de realizar proyectos para situaciones específicas. No es de descartar que esta tecnología encuentre nichos en aplicaciones que no necesita de una producción de grandes volúmenes y donde el costo asociado no es el principal o el único ítem para considerar.

Conclusiones

El sector de transporte es un gran consumidor de materiales compuestos y es de esperar que el uso de estos materiales aumente y/o sea más eficiente como consecuencia de la introducción de nuevas tecnologías. El uso de mallas de refuerzo en los compuestos reforzados con fibras naturales amplió el uso de estas fibras para aplicaciones como elementos estructurales alto desempeño, siendo previsto un aumento de estos materiales en los próximos años. Los termorrígidos encapsulados y las películas delgadas termoplásticas son una opción para aumentar la vida útil de materiales del sector de transporte que sufren por acumulación de daño a lo largo de la vida útil. La Manufactura Aditiva, al poder quitar la limitación geométrica impuesta por el molde, amplía el uso de estructuras 3D que presenten un mejor desempeño que sus pares producidos por técnicas convencionales.

Referencias

- ABC News. (2023). Sub's carbon-fiber composite hull was the "critical failure," James Cameron says. *ABC News*. <https://6abc.com/titanic-sub-updates-what-caused-implosion-oceangate-carbon-fiber-hull-james-cameron-director/13419151/>
- Baumers, M., Tuck, C., Wildman, R., Ashcroft, I., Rosamond, E. & Hague, R. (2013). Transparency Built-in. *Journal of Industrial Ecology*, 17(3), 418–431. <https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2012.00512.x>
- Chapman, I. & Devine, C. (2023). OceanGate marketed its vessel as safe. But experts say it used materials that 'simply didn't work.' *CNN Investigates*. <https://edition.cnn.com/2023/06/23/us/oceangate-submersible-titanic-safety-invs/index.html>
- Chawla, K. K. (2019). *Composite Materials* (4 Ed). Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-28983-6>
- Cioffi, M. O. H., Bomfim, A. S. C., Ambrogi, V. & Advani, S. G. (2022). A review on self-healing polymers and polymer composites for structural applications. *Polymer Composites*, 43(11), 7643–7668. <https://doi.org/10.1002/pc.26887>

Correa, J. P., Montalvo-Navarrete, J. M. & Hidalgo-Salazar, M. A. (2019). Carbon footprint considerations for biocomposite materials for sustainable products: A review. *Journal of Cleaner Production*, 208, 785–794. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.099>

Costello, T. & Chan, M. (2023). Carbon fiber, one of the Titan submersible's experimental materials, comes under scrutiny. *U.S. News*. <https://www.nbcnews.com/news/us-news/carbon-fiber-one-titan-submersibles-experimental-materials-comes-scrut-rcna90856>

Ebrahimnezhad-Khaljiri, H. & Eslami-Farsani, R. (2020). The tensile properties and interlaminar shear strength of microcapsules-glass fibers/epoxy self-healable composites. *Engineering Fracture Mechanics*, 230, 106937. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2020.106937>

Esmaeely Neisiany, R., Lee, J. K. Y., Nouri Khorasani, S., Bagheri, R. & Ramakrishna, S. (2018). Facile strategy toward fabrication of highly responsive self-healing carbon/epoxy composites via incorporation of healing agents encapsulated in poly(methylmethacrylate) nanofiber shell. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 59, 456–466. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2017.11.007>

Éxodo 5. (n.d.). In *Antiguo Testamento* (p. 7).

Kim, S. Y., Sottos, N. R. & White, S. R. (2019). Self-healing of fatigue damage in cross-ply glass/epoxy laminates. *Composites Science and Technology*, 175, 122–127. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2019.03.016>

Liu, J. & Wen, P. (2022). Metal vaporization and its influence during laser powder bed fusion process. *Materials & Design*, 215, 110505. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.110505>

Mangun, C. L., Mader, A. C., Sottos, N. R. & White, S. R. (2010). Self-healing of a high temperature cured epoxy using poly(dimethylsiloxane) chemistry. *Polymer*, 51(18), 4063–4068. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2010.06.050>

Naik, V., Kumar, M. & Kaup, V. (2021). A Review on Natural Fiber Composite Material in Automotive Applications. *Engineered Science*. <https://doi.org/10.30919/es8d589>

Nehls, G. (2022). Mercedes-AMG GT4 race cars now equipped with Bcomp natural fiber composite bumpers. *CompositesWorld*. <https://www.compositesworld.com/news/mercedes-amg-gt4-race-cars-now-equipped-with-bcomp-natural-fiber-composite-bumpers>

Wang, C. H., Sidhu, K., Yang, T., Zhang, J. & Shanks, R. (2012). Interlayer self-healing and toughening of carbon fibre/epoxy composites using copolymer films. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 43(3), 512–518. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2011.11.020>

Zhu, D. Y., Rong, M. Z. & Zhang, M. Q. (2015). Self-healing polymeric materials based on microencapsulated healing agents: From design to preparation. *Progress in Polymer Science*, 49–50, 175–220. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2015.07.002>