

El papel de los materiales compuestos avanzados en la construcción moderna

Abad Arcos Alomía¹ y Aarón Rivas Menchi^{1*}

¹ Unidad de Materiales, Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C.

* Dirección para correspondencia: aaron.rivas@cicy.mx

Los materiales para la construcción comenzaron a usarse desde que el ser humano sintió curiosidad por entender y transformar su entorno. Esa curiosidad, motor del ingenio humano, se reflejó en el aprovechamiento de lo que había alrededor para levantar viviendas y fabricar herramientas, marcando el inicio de la Edad de Piedra. En esos primeros pasos, por ejemplo, se utilizó paja mezclada con arcilla para construir casas. Con el tiempo, las sociedades fueron incorporando materiales más eficientes y técnicas más refinadas (Moropoulou *et al.*, 2005).

Asimismo, se perfeccionaron los métodos de construcción. Prueba de ello son las edificaciones del Imperio Romano, en las que emplearon un concreto sin refuerzo compuesto por agregados gruesos (toba volcánica) y un mortero hidráulico a base de cal y ceniza volcánica, además de arena y agua. Obras como el Panteón de Roma o el Coliseo muestran la extraordinaria durabilidad de este material. Estudios recientes sugieren que parte de esa longevidad se relaciona con un mecanismo de autorreparación del concreto romano (Seymour *et al.*, 2023).

A comienzos del siglo XX aparecieron otros materiales diseñados para las necesidades de una creciente revolución industrial. Ya no bastaba con que fueran

duraderos y resistentes: también debían ofrecer una mayor relación resistencia-peso y rigidez-peso, para que las estructuras soportaran más carga sin volverse excesivamente pesadas y cubrieran mayores distancias entre apoyos sin depender exclusivamente de arcos y cúpulas. Estas características también facilitaron el transporte y la instalación, e impulsaron la construcción de edificios más altos y puentes más largos en ciudades con crecientes necesidades de infraestructura. En este contexto, se incorporó el concreto armado, una combinación de concreto (cemento, grava, arena y agua) reforzado con varillas de acero, que aporta mayor capacidad para resistir cargas de tensión y flexión, propiedades que el concreto por sí solo no posee.

Te preguntará qué son los materiales compuestos. Aunque suene a un término complejo, la idea es sencilla: son materiales formados por dos o más componentes distinguibles entre sí. Por lo general, uno de ellos constituye la matriz, es decir, la fase continua que ocupa la mayor parte del volumen, mientras que el otro funciona como refuerzo (por ejemplo, fibras o partículas) y se incorpora para mejorar propiedades como la resistencia o la rigidez. A lo largo de este texto, verás que varios de los materiales mencionados pueden considerarse materiales compuestos.

A lo largo del siglo XX, el desarrollo de los materiales compuestos se disparó, impulsado por la fabricación de fibras de ingeniería (vidrio, carbono, aramida, etc.; véase la Figura 1). La clave de estas fibras es su gran relación longitud-diámetro y sus elevadas propiedades mecánicas, lo que les permite actuar como un refuerzo

muy eficiente, siempre que se asegure una buena adhesión y una adecuada dispersión en la matriz.

Al combinar estas fibras con distintas matrices (resinas poliméricas, metales, cerámicas o cementicias) y optimizar la colocación de las fibras y el procesamiento del compuesto, es posible crear materiales ligeros con propiedades mecánicas, eléctricas, químicas o térmicas superiores a las de los compuestos tradicionales. A este tipo de materiales se les conoce como materiales compuestos avanzados (MCA).



Figura 1. Diámetro aproximado de fibras de ingeniería usadas en MCA. La comparación con un cabello humano permite visualizar la escala micrométrica de las fibras empleadas como refuerzos.

Entre los MCA sobresalen los plásticos reforzados con fibras (FRP, por sus siglas en inglés), debido a sus altas prestaciones mecánicas, ligereza y a que cuentan con procesos de fabricación consolidados. Gracias a estas características, se empezaron a usar en sectores como el automotriz y el aeroespacial. Por ejemplo, en automóviles deportivos pueden emplearse en la fabricación del chasis, mientras

que algunos aviones comerciales más eficientes en consumo de combustible incorporan hasta un 50 % de FRP en su estructura. Desde la década de 1980, los FRP adquirieron protagonismo en el sector de la construcción en algunos países y, desde entonces, su uso se ha extendido progresivamente en obras civiles alrededor del mundo. Su alta relación resistencia-peso permite obtener elementos resistentes y ligeros, lo que reduce las cargas propias de la estructura y facilita el reforzamiento de obras existentes sin comprometer sus apoyos o cimentación.

Materiales compuestos en la construcción moderna

Los MCA más utilizados en ingeniería civil son los FRP y el concreto reforzado con fibras (FRC, por sus siglas en inglés). Actualmente, los FRP se usan en la rehabilitación y el reforzamiento de elementos de concreto armado, como vigas y columnas. Los FRP pueden adoptar diversas formas gracias a su versatilidad y a los diferentes métodos de fabricación; por su parte, los FRC permiten variar el tipo de fibra y su proporción para mejorar propiedades mecánicas o evitar el agrietamiento durante el endurecimiento del concreto, según lo que requiera el diseñador.

Con el tiempo, los retos en infraestructura civil se han vuelto cada vez mayores. Un ejemplo claro son los puentes. Los primeros se construyeron de piedra y, aunque algunos aún perduran, están limitados por su gran peso, las cortas distancias entre apoyos que cubren, la complejidad constructiva y la necesidad de

cimientos muy robustos. En cambio, los puentes modernos incorporan metales en su estructura y piezas de concreto prefabricadas, lo que permite superar varias de esas limitaciones. Sin embargo, los puentes enfrentan otros problemas, como el deterioro causado por el ambiente. En este contexto, los FRP y FRC pueden ser de gran utilidad, especialmente en obras donde el peso y la exposición ambiental son factores críticos (Oprışan *et al.*, 2010).

Polímeros reforzados con fibra de carbono: fabricación e investigación actual

Entre las fibras de ingeniería, las de carbono destacan por combinar alta resistencia y rigidez con bajo peso. A diferencia del acero, no se corroen de la misma manera y pueden emplearse como refuerzo sin añadir carga significativa a la estructura. Sin embargo, sus mejores propiedades se presentan solo en la dirección longitudinal de la fibra.

Las primeras fibras de carbono se obtuvieron mediante la carbonización de fibras vegetales. En este proceso, el material se calienta a altas temperaturas, que pueden superar los 1000 °C, en una atmósfera inerte, sin oxígeno, para evitar su combustión y favorecer una estructura rica en carbono. Su gran impulso llegó en la década de 1960, cuando Roger Bacon (Bacon, 1960) desarrolló fibras de carbono de alto rendimiento con un proceso más rentable a partir de poliacrilonitrilo (PAN), una fibra polimérica usada como precursor.

El interés por los polímeros reforzados con fibra de carbono (CFRP) sigue creciendo. Diversos reportes proyectan que el mercado mundial crecerá a una tasa anual compuesta del 11 % en la próxima década (Fortune Business Insights, 2026). En América Latina, se proyectó un valor cercano a 10 mil millones de pesos en 2025, ubicándose entre las regiones con mayor crecimiento y concentrándose principalmente en los sectores automotriz y de la construcción. En México, el uso de estos materiales ha aumentado particularmente en la industria automotriz.

En contraste, en el ramo de la construcción su adopción aún no es masiva, por lo que existe un amplio campo de oportunidad para su expansión. Este escenario podría acelerarse ante el incremento del costo de los alambres de acero y otros productos metálicos para construcción, cuyos índices han aumentado más del 80 % y 90 %, respectivamente, en la última década, según el Índice Nacional de Precios al Productor (INPP) del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI).

Ahora bien, para la fabricación de los FRP, incluidos los CFRP, se utiliza como matriz un polímero; entre los más empleados destacan las resinas epóxicas, por su buena adherencia, resistencia química y propiedades mecánicas. Existen métodos consolidados para fabricar estos materiales a diferentes escalas: algunos permiten altas tasas de producción (más de 10 mil unidades por año) en elementos como tubos, vigas y varillas, mientras que otros procesos se emplean con tasas de producción menores, pero permiten fabricar elementos de formas complejas.

En una etapa todavía experimental, también se investiga la incorporación de nanomateriales, como nanotubos de carbono o grafeno, para mejorar ciertas propiedades o añadir nuevas funciones. Sin embargo, la consolidación de estas tecnologías aún enfrenta retos de costo, dispersión, escalamiento y regulación. Lo interesante de estos estudios es que buscan que los nanomateriales trabajen en conjunto con las fibras y funcionen como un "segundo refuerzo" a escala nanométrica (un nanómetro es la millonésima parte de un milímetro) dentro de los MCA. También se exploran MCA capaces de recuperar su forma inicial o modificar su respuesta física ante estímulos como presión, temperatura o humedad (Tuli *et al.*, 2024), así como estrategias que activen mecanismos de autorreparación en la matriz. Si estas funcionalidades logran consolidarse, podrían permitir que el material detecte su propio daño, facilite el monitoreo de la salud estructural de las construcciones e incluso active mecanismos para mitigar parte del daño.

Aplicaciones de los CFRP en construcción civil

En puentes, los CFRP se emplean tanto en obra nueva como en rehabilitación, especialmente en tableros, vigas y elementos de refuerzo. Su principal ventaja es que permiten aumentar o recuperar la capacidad estructural sin añadir demasiado peso. Esto disminuye las demandas sobre apoyos y cimentación y favorece diseños más eficientes y duraderos en ambientes exigentes (Kossakowski y Wciślik, 2022).

En la Figura 2a se muestra un ejemplo de aplicación de CFRP en el puente Stork, en Winterthur, Suiza.

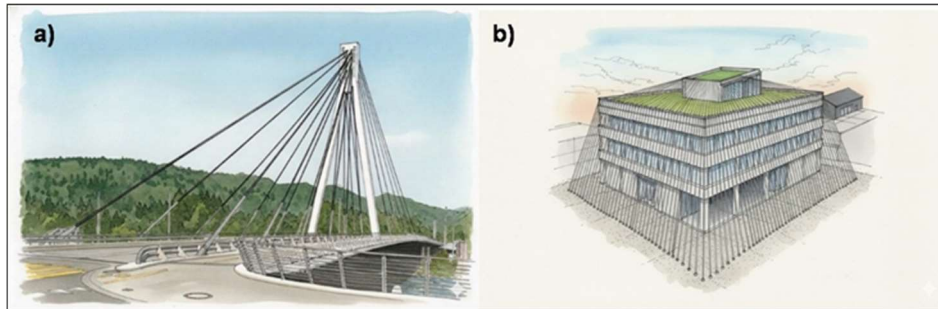


Figura 2. Ejemplos de aplicaciones de CFRP en infraestructura civil. a) Puente Stork, en Suiza, donde los elementos de CFRP contribuyen a reducir peso y mejorar el desempeño estructural. b) Edificio de Komatsu Matere, en Japón, que incorpora barras de CFRP como refuerzo ante acciones sísmicas.

En edificaciones vulnerables a catástrofes naturales, los FRP se emplean tanto en la construcción como en la rehabilitación de edificios, e incluso en elementos interiores, gracias a su capacidad de refuerzo y a su gran versatilidad de instalación (Figura 3). En vigas, por ejemplo, se utilizan láminas de CFRP como refuerzo en las zonas donde se concentran esfuerzos de tensión y corte. En columnas, estos materiales pueden aplicarse como una envoltura externa, que ayuda a reducir el riesgo de pandeo y a aumentar su capacidad de carga. Asimismo, en muros de mampostería no reforzada es posible colocar láminas de CFRP para ayudar a resistir fuerzas externas que tienden a deslizar o flexionar el muro, asociadas a asentamientos de cimentación, explosiones o acciones extremas como sismos y huracanes (Al-Salloum y Almusallan, 2003). Una forma muy ingeniosa de usar los CFRP se observa en un edificio de Komatsu Matere, en Japón, que

incorpora barras de CFRP en su estructura como refuerzo ante sismos (véase la Figura 2b).

Las cualidades de los CFRP permiten usarlos en climas extremos, incluso a bajas temperaturas, ya que en muchas aplicaciones pueden mantener un comportamiento estable frente al frío y, con ello, propiedades mecánicas relativamente estables. Además, su resistencia a la corrosión los vuelve especialmente atractivos en edificaciones de zonas costeras, donde la alta humedad y la presencia de sales afectan a los materiales de refuerzo convencionales como el acero. En estructuras de concreto armado, la humedad y los cloruros pueden penetrar a través de la porosidad del concreto y activar reacciones electroquímicas que degradan el acero, reducen su sección efectiva y comprometen la integridad del elemento; a este proceso se le conoce como corrosión.

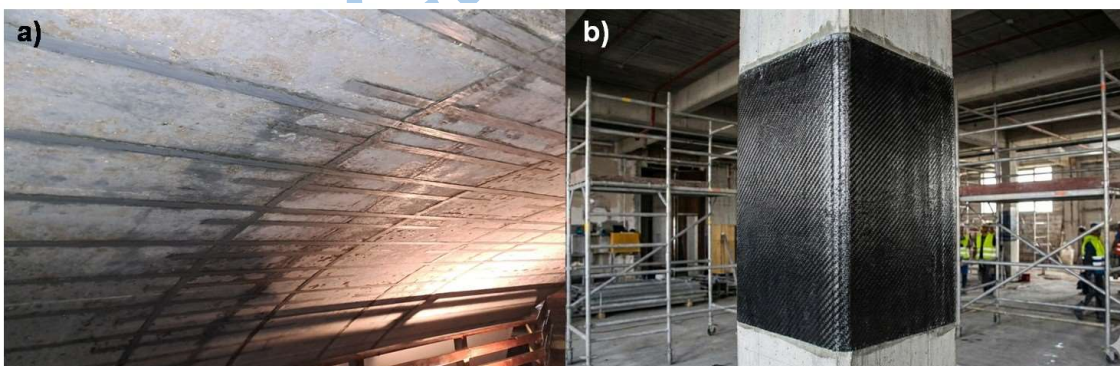


Figura 3. Aplicaciones de CFRP en rehabilitación estructural. a) Rehabilitación del muelle de Progreso. b) Columna reforzada con una envoltura externa de CFRP. Estos ejemplos muestran cómo los FRP pueden emplearse para intervenir estructuras existentes sin añadir peso excesivo.

Beneficios y retos en el uso de materiales compuestos avanzados

Aunque algunos FRP, como los de fibra de vidrio, se han adoptado más por su menor costo, otros, como los CFRP, siguen siendo más caros debido a la complejidad de producir fibras de carbono. Sin embargo, sus beneficios en durabilidad, ligereza y menor necesidad de mantenimiento pueden compensar la inversión inicial a lo largo de la vida útil de la estructura.

A pesar de sus ventajas, los materiales compuestos avanzados también plantean retos importantes para su adopción a gran escala. En muchos diseños, los FRP pueden exhibir un comportamiento más frágil, lo que implica la posibilidad de fallas súbitas si se supera su capacidad de carga. Además, su respuesta mecánica es direccional: no resisten, se deforman ni se dilatan igual en todas las direcciones. Por ello, los FRP pueden reducir su eficiencia como refuerzo si no se instalan con la orientación adecuada. Además, los cálculos estructurales se vuelven más complejos.

También existe incertidumbre en algunos aspectos de su desempeño, como la resistencia a compresión en comparación con el acero. A esto se suma que ciertas matrices poliméricas, como las resinas epóxicas, pueden sufrir hinchamiento y degradación por humedad, reduciendo la cohesión y la resistencia del MCA con el tiempo. Finalmente, cuando se usan como refuerzo externo, aparecen modos de falla adicionales y se requiere mano de obra especializada y un control estricto de

la capa adhesiva (por ejemplo, evitando burbujas) para asegurar una unión confiable (Zaman *et al.*, 2013).

Otro reto importante es el comportamiento de los FRP ante altas temperaturas e incendios. Al exponerse al calor, las matrices poliméricas de los FRP pueden degradarse, perder rigidez o reducir su adherencia al concreto. Por ello, las guías de diseño como las del Instituto Americano del Concreto (ACI) consideran factores de reducción y criterios de seguridad según el tipo de FRP y las condiciones ambientales previstas. También establecen límites sobre cuánto puede depender la estructura de estos materiales. Así, en muchas aplicaciones, los FRP se usan como un refuerzo complementario y no como el único elemento responsable de resistir las cargas.

Además, la sostenibilidad de estos materiales sigue siendo un tema abierto: producir fibras de carbono consume mucha energía debido a las altas temperaturas requeridas, y muchas resinas poliméricas actuales son difíciles de reciclar. Por esta razón, una parte importante de la investigación actual busca soluciones más sostenibles, como matrices más reciclables, fibras naturales, procesos de menor impacto ambiental o estrategias para recuperar fibras de FRP al final de su vida útil, por ejemplo, como fibras cortas en FRC. El principal reto es lograr todo esto sin comprometer de manera importante el desempeño estructural final y la rentabilidad del material.

Conclusiones

El papel de los materiales compuestos avanzados en la construcción moderna es ampliar las posibilidades de diseño y contribuir a obras más seguras, versátiles, duraderas y fáciles de mantener. La combinación de resistencia, rigidez y bajo peso permite fabricar o reforzar elementos estructurales sin añadir cargas excesivas. Además, su resistencia a la corrosión los vuelve especialmente atractivos en ambientes agresivos.

Sin embargo, no son una solución universal. El desempeño depende de la orientación de las fibras, de la calidad de la unión con la estructura a reforzar, de las condiciones de instalación y del ambiente de servicio. También persisten retos importantes relacionados con su comportamiento ante altas temperaturas e incendios, su costo inicial, la degradación por humedad y la sostenibilidad de sus procesos de fabricación y reciclaje.

A medida que la investigación y la demanda de estos materiales crezcan, tienen el potencial de consolidarse como una pieza clave de la construcción moderna.

Agradecimientos

El primer autor agradece a las Estancias Posdoctorales por México SECIHTI al programa (Proyecto No. 447815). El segundo autor agradece al programa de Investigadoras e Investigadores por México de la SECIHTI (Proyecto No. 1343).

Nota

Las Figuras 1, 2 y 3b fueron generadas por IA (Gemini) según *prompts* suministrados por los autores. La Figura 3a es una fotografía propia.

Referencias

Al-Salloum YA and Almusallan TH (2003). Rehabilitation of the infrastructure using composite materials: Overview and applications. *Journal of King Saud University* 16:1-21.

Kossakowski PG and Wciślik W (2022). Fiber-reinforced polymer composites in the construction of bridges: Opportunities, problems and challenges. *Fibers* 10(37):1-16.

Moropoulou A, Bakolas A and Anagnostopoulou S (2005). Composite materials in ancient structures. *Cement and Concrete Composites* 27:295-300.

Oprîşan G, Tăranu N, Munteanu V *et al.* (2010). Application of modern polymeric composite materials in industrial construction. *Buletinul Institutului Polytechnic* 3:122-130.

Fortune Business Insights. (2026). Advanced Materials/Carbon Fiber Market. Recuperado de: <https://www.fortunebusinessinsights.com/industry-reports/carbon-fiber-market-101719>.

Seymour LM, Maragh J, Sabatini P *et al.* (2023). Hot mixing: Mechanistic insight into durability of ancient Roman concrete. *Science Advances* 9:1-13.

Tuli NT, Kathun S and Rashid AB. (2024). Unlocking the future of precision manufacturing: A comprehensive exploration of 3D printing with fiber-reinforced composite in aerospace, automotive, medical and consumer industries. *Heliyon* 10:1-38.

Zaman A, Gutub SA and Wafa MA. (2013). A review on FRP composites applications and durability concerns in the construction sector. *Journal of Reinforced Plastics and Composites* 32(24):1966-1988.

Bacon R (1960). Filamentary graphite and method for producing the same (U. S. Patent No. US2957756A). United States Patent Office.

Manuscrito aceptado