Estado del arte sobre el diseño y construcción de puentes de armadura para situaciones de emergencia con materiales compuestos por polímeros reforzados con fibras de vidrio (GFRP)

Autor: Ing. Jhon Fredy Cajicá Salazar [a]

Director: Ing. Jaime Erasmo Garzón Moreno [b]

[a] Estudiante de maestría en ingeniería civil con énfasis en ingeniería estructural, Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Bogotá D.C, Colombia. Correo electrónico: jhon.cajica@mail.escuelaing.edu.co.

[b] Profesor titular maestría en ingeniería civil con énfasis en ingeniería estructural, Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Bogotá D.C, Colombia. Correo electrónico: jaime.garzon@escuelaing.edu.co.

Palabras clave:

Puente
Emergencia
GFRP
Totalmente compuesto
FRP

Resumen

Los puentes con materiales compuestos FRP han tenido un desarrollo notable recientemente para pasarelas peatonales o prototipos de puentes vehiculares que han sido inicialmente investigados experimentalmente con ensayos estáticos y dinámicos antes de ser puestos en servicio. En el caso de los puentes vehiculares para situaciones de emergencia, se tiene principalmente como potencial aplicación una solución innovadora de un prototipo de puente modular hibrido FRP-Acero de armadura espacial con vigas triangulares invertidas, que consta de un tablero ortotrópico de aluminio y vigas con cordones inferiores de perfiles tubulares circulares, diagonales del alma y verticales GFRP. El desarrollo más reciente alcanza una luz de 51,0m con barras tensoras inferiores GFRP y arrostramientos de celosía (diagonales GFRP y transversales de aluminio) que unen el cordón inferior de las vigas triangulares con el fin de mejorar la resistencia a flexión y torsión.

Keywords:

Bridge
Emergency
GFRP
All Composite
FRP

Abstract

Bridges with FRP composite materials have had a remarkable development recently for pedestrian walkways or vehicular bridge prototypes that have been initially investigated experimentally with static and dynamic tests before being put into service. In the case of vehicular bridges for emergency situations, the main potential application is an innovative solution of a prototype FRP-Steel hybrid modular bridge with spatial reinforcement with inverted triangular beams, consisting of an orthotropic aluminum deck and beams with lower chords of circular tubular profiles, diagonal web and vertical GFRP. The most recent development reaches a span of 51,0m with GFRP lower tension bars and lattice braces (GFRP diagonal and aluminum cross braces) that join the lower chord of the triangular beams in order to improve resistance to bending and torsion.

1. Introducción

En el presente trabajo se presenta un estado del conocimiento sobre la aplicación de materiales compuestos por polímeros reforzados con fibras (FRP).

Se ha visto a nivel internacional que existen estructuras con materiales FRP ya construidas, pero generalmente son de pequeñas luces, debido a que son muy pocos los estándares o códigos de diseño.

Como es sabido los materiales compuestos FRP presentan muchas ventajas en comparación con materiales tradicionales, como su alta relación resistencia/peso, gran resistencia a la corrosión y a fenómenos ambientales, baja conductividad eléctrica y magnética. Sin embargo, también son susceptibles a fenómenos de incendio, fatiga y fluencia.

Pero son materiales muy versátiles en dimensiones, y propiedades físicas, mecánicas y químicas.

Los perfiles pultruidos tubulares circulares con materiales FRP, se pueden utilizar para resistir fuerzas principalmente axiales en un sistema estructural de armadura espacial con conexiones y tablero en acero.

2. Materiales compuestos

Las fibras sintéticas con matrices poliméricas se suelen denominar materiales compuestos *(Ruano & Ruano, 2015)*.

Las fibras son generalmente filamentos largos de carbono o vidrio como materiales más usados y con diámetros del orden de las micras, y también resisten la totalidad de la carga por su elevada resistencia a la tracción en comparación con la matriz polimérica que envuelve y protege a las fibras, así como también transfiere la tensión entre fibras. Las matrices poliméricas tipo epoxi son las más usadas en aplicaciones estructurales por su estabilidad termoquímica, y se clasifican en termoestables y termoplásticas. Las termoestables, como el epoxi son las más utilizadas en ingeniería mecánica.

El porcentaje en volumen de fibras de un material compuesto suele ser mayor al 60% y el resto suele ser polímero.

Los diseños apropiados con compuestos FRP ofrecen beneficios adicionales, como resistencia a explosiones, golpes y fatiga con interferencias acústicas y magnéticas reducidas *(GangaRao, 2016)*.

La resistencia a la tracción de los compuesto GFRP es de aproximadamente el mismo orden del acero (170-240 MPa). La desventaja de estos materiales es su reducida resistencia al fuego y su vulnerabilidad a varios fenómenos de daño y modos de falla complejos. También los materiales GFRP tienen un módulo de elasticidad bajo (aproximadamente 1/8 del módulo del acero), lo que genera grandes deformaciones y fenómenos de pandeo importantes. Debido a su bajo peso y esbeltez, las estructuras de FRP también son sensibles al pandeo aeroelástico *(Alocci & Valvo, 2019)*.

Una de las propiedades más relevantes de estos materiales es su comportamiento elástico anisótropo en comparación al acero que es un material isótropo. El origen de la anisotropía se debe a la diferencia de rigidez entre la matriz y las fibras con su direccionamiento. La resistencia mecánica de la matriz es en gran medida menor a la de las fibras por tal motivo los materiales compuestos presentan mayor resistencia y rigidez en la dirección de las fibras y menor en la dirección opuesta lo que lleva a una mayor complejidad en el cálculo tensional.

Otra de las grandes propiedades de los materiales compuestos es la relación resistencia/peso que es de 3 a 5 veces mayor a la del acero estructural.

El panel tipo ‘’Sandiwch’’ es el compuesto hibrido conformado por un núcleo central y dos capas rígidas en los extremos, estas capas proveen un gran momento de inercia para la resistencia a la flexión mientras se reduce el peso por el núcleo central aligerado.

3. Métodos de fabricación

Los primeros puentes con materiales compuestos se realizaron usando un proceso de fabricación básico de laminado húmedo. Más tarde se utilizó un proceso de pultrusión que involucra una tracción continua de los filamentos de fibras y capas a través de un baño de resina y posteriormente en un molde caliente. En la última década, se usa el proceso de infusión al vacío que utiliza la presión negativa de vacío para infusión de fibras secas con resina, la cual es colocada en un molde y sellada en una cámara hermética. La infusión al vacío resulta en un alto precio por unidad de peso del material más que la pultrusión *(Pyrzowski & Miśkiewicz, 2017)*.

4. Puentes de emergencia

Actualmente, los puentes de emergencia estandarizados más utilizados son el puente Bailey y el puente D. Un problema clave de los puentes de acero, son los grandes costos de inspección y reparación necesarios para mitigar la corrosión *(Blaga, Dos Santos, Bancila, & Amancio-Filho, 2015)*.

Los materiales GFRP en comparación con el acero, tienen un módulo de elasticidad más bajo, una resistencia al cizallamiento más baja y una ductilidad deficiente. Sin embargo, mediante la incorporación de perfiles GFRP en una configuración de armadura espacial, es una forma estructural con alta rigidez debido a la distribución de cargas donde los miembros están sometidos principalmente a fuerzas axiales en lugar de fuerzas cortantes. Con el diseño de los miembros a compresión en una armadura espacial, se toma la ventaja de su estabilidad para introducir un comportamiento a grandes

deformaciones no lineales a través del pandeo progresivo de los miembros en compresión *(Yang, Bai, & Ding, 2015)*. A modo de comparación, el tiempo de montaje del puente de armadura pesada (HTB) utilizado en China con una viga de celosía con cordones de acero es de 240 minutos y pesa 402,5 kN. También el puente de viga mediana (MGB) del Reino Unido tiene un tiempo de montaje de 200 minutos y pesa 403,0 kN. El puente propuesto FRP-Acero presenta ventajas en comparación con los puentes tradicionales para casos de emergencia. Uno de los desarrollos recientes de un puente de 51m con una armadura espacial hibrida GFRP-Aluminio peso solo 162,0 kN con un tiempo de montaje estimado de 160 minutos *(Mao et al., 2019) Figura 3.*

5. Resistencia al fuego

En la mayoría de los casos el criterio limitante para la resistencia al fuego es la temperatura de transición vítrea de la resina en las zonas sometidas a compresión, y se puede alcanzar a temperatura de alrededor de los 100°C. Se ha encontrado que se puede evitar la protección contra el fuego en sistemas estructurales redundantes (estáticamente indeterminados) donde las fallas locales no causan el colapso de la estructura (Correia, Bai, & Keller, 2015).

6. Uso de materiales compuestos

Los compuestos de polímero reforzado con fibra de vidrio (GFRP) surgieron en las últimas dos décadas como materiales adecuados para construcción, y su propósito principal no es reemplazar materiales tradicionales, sino ser aplicados como una alternativa eficiente *(Blaga et al., 2015)*.

El primer puente compuesto GFRP está siendo disputado por el puente Ginzi Highway de 12m de luz en Bulgaria (*Figura 1*), y el puente Miyun en Beijing, China, ambos construidos en 1982. Se estima que aproximadamente 300 puentes en todo el mundo se construyen en su totalidad con plásticos reforzados con fibras (estructuras totalmente FRP). Las ventajas de elementos de puentes GFRP son facilidad de producción, transporte e instalación y requiere un mantenimiento mínimo *(Blaga et al., 2015)*.

Figura 1. Puente Compuesto Ginzi Highway, Bulgaria.

Tomada de (Blaga et al., 2015).

El uso de los materiales compuestos en la ingeniería civil ha tenido un aumento importante en las últimas dos décadas en puentes, estructuras de arquitectura singular y estructuras off-shore. Países como Estados Unidos, Japón, Suiza y Dinamarca cuentan ya con varios puentes y estructuras de ingeniería realizadas con materiales compuestos, pero por la ausencia de normativas de diseño son de pequeñas luces. Muchas de estas estructuras están basadas en diseños de los materiales tradicionales lo cual no es muy recomendado porque la literatura especializada recomienda la búsqueda de formas optimas que aprovechen al máximo las características anisótropicas de estos materiales cumpliendo con los estándares de servicio y seguridad establecidos *(Ruano & Ruano, 2015)*.

Los materiales compuestos presentan grandes ventajas en la aplicación para puentes peatonales. Los materiales compuestos empezaron a utilizarse en la década de 1980 pero eran muy costosos para competir en la industria de la construcción. Las primeras aplicaciones fueron principalmente para reforzamiento y rehabilitación de estructuras de puentes existentes usando laminas y tiras. El material más común en la construcción es el polímero reforzado con fibras de vidrio GFRP *(Pyrzowski & Miśkiewicz, 2017)*.

7. Conexiones de perfiles GFRP

Las conexiones de elementos GFRP actualmente juegan un papel central en las actividades de investigación y desarrollo de la comunidad de diseño estructural. A priori solo hay tres formas de unir materiales y piezas y dependen de fuerzas mecánicas y/o químicas o utilizan fuerzas físicas. Las técnicas de unión para aplicaciones estructurales GFRP son la unión adhesiva, la sujeción mecánica, y las conexiones atornillada hibridas, también la soldadura, pero solo en el caso de polímeros termoplásticos y algunas geometrías de juntas *(Blaga et al., 2015)*.

Hoy en día, existe una técnica de unión con alta eficiencia de conexión para tubos de FRP pultruidos, denominada conexión de dientes preapretados (PTTC). Esta conexión tiene una capacidad de transferir una gran fuerza axial por el esfuerzo interlaminar de los materiales compuestos de FRP, que es mayor que el de la resina pura y el esfuerzo de compresión radial mejora la resistencia al corte interlaminar (Zhang, Zhao, Li, Tao, & Gao, 2018).

8. Puentes con materiales compuesto FRP

Las pasarelas totalmente compuestas se han realizado principalmente mediante una de dos tecnologías de fabricación: moldeo por transferencia de resina asistido por vacío (VARTM) o su variación estadounidense: proceso de moldeo por infusión de resina de compuestos Seemann (SCRIMP) y pultrusión. Las estructuras totalmente compuestas se han fabricado con vidrio, carbono, aramida, y otros compuestos de fibra, pero en la mayoría de los casos, las fibras de vidrio brindan la mejor relación calidad-precio (es decir, la capacidad de cumplir con los criterios de diseño requeridos al menor costo). La resina de ester de vinilo es la opción predominante para la matriz que une las fibras. Es rentable, pero duradera durante un largo tiempo de servicio (Siwowski, Kulpa, Rajchel, & Poneta, 2018).

El desarrollo de puentes FRP en Indonesia, sigue los lineamientos de lo que se ha desarrollado para puentes vehiculares y peatonales en Estados Unidos en la década de 1980.

Algunos de los de los aspectos que se deben tener en cuenta en los materiales FRP; es el deterioro debido al aumento de temperatura sobre todo con cargas de compresión y cortante, y la exposición por más de 3000 horas a los rayos ultravioleta, lo que es muy importante en países tropicales *(Sidik & Irawan, 2020)*.

La mayoría de aplicaciones directas de compuestos FRP para puentes, es para tableros de tráfico vehicular, en otras aplicaciones debido a la falta de guías o códigos se realizó un uso mínimo de vigas totalmente compuestas como miembros principales para puentes vehiculares. Los materiales compuestos son frágiles en el sentido de ser linealmente elásticos hasta la falla, por eso se proponen sistemas combinados con materiales tradicionales como el concreto o el acero. En los Estados Unidos en 2003, ya había más de 1000 puentes peatonales FRP construidos, de modo que el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (*USDA*) redacto una guía sobre puentes FRP y la *AASHTO* publico las especificaciones de la guía para el diseño de puentes peatonales FRP. Hasta los años 1990, la armada de los Estados Unidos desarrollo un puente militar compuesto (CAB) como una alternativa más ligera a los clásicos puentes de acero. En Canadá, se desarrolló un sistema de puente GFRP rápidamente desplegable con una alta capacidad de carga. En Malasia, un puente portable usando materiales compuestos FRP fue diseñado para operaciones de rescate de desastres y defensa (Hung, Sung, Chang, Yin, & Yeh, 2016).

Varios investigadores contribuyeron a la investigación y el desarrollo de sistemas sándwich de FRP para fines estructurales y se centraron en mejorar los materiales del núcleo, ya sea mediante manipulación celular (CM), cara corrugada (CF), refuerzo de fibra (FR), disposición geométrica (GA), introducción de un sistema de capa intermedia (IL) o híbridos (H) para fabricar compuestos sándwich de mayor rendimiento (Manalo, Aravinthan, Fam, & Benmokrane, 2017).

Los modos de falla de los sistemas sándwich de FRP dependen principalmente de la naturaleza del material del núcleo, los núcleos de espuma comúnmente utilizados tienen baja resistencia y módulo de cizallamiento y compresión. Por lo tanto, muchos investigadores han dedicado esfuerzos significativos para desarrollar y/o modificar el material del núcleo para producir sistemas sándwich con rendimientos más altos. El refuerzo localizado y la introducción de fibras para mejorar las propiedades del núcleo de espuma implican un proceso complejo como el tejido o la tecnología de inyección, que puede incrementar aún más el costo de producción. También aumenta la cantidad de resina recogida durante el moldeo, lo que aumenta el peso del panel. La capa intermedia aumenta la cantidad del material utilizado, lo que aumenta el costo. La rigidez aumentada al utilizar una estructura de núcleo compleja se obtiene con un coste de mecanizado añadido y materiales desperdiciados. Estos aspectos importantes deben abordarse en el desarrollo de nuevos materiales de núcleo para avanzar en el uso de sistemas sándwich FRP en aplicaciones de ingeniería civil *(Manalo et al., 2017)*.

La fatiga es un aspecto critico en el diseño de sistemas sándwich FRP bajo cargas repetitivas *(Osgood 1982)*.

(Hale & Amir, 2014) encontraron que es necesario limitar la carga máxima aplicada y esta no debería exceder el 35 y el 21% de la resistencia estática ultima para los sistemas sándwich de FRP con nervios y el 30% y 45% para aquellos sin nervios en descarga completa y en carga completamente invertida, respectivamente para lograr una vida útil de fatiga de 2 millones de ciclos. (Thomas, Jan, Julia, & Michael, 2014) realizaron ensayos de fatiga en vigas GFRP con núcleo de madera de Balsa a gran escala, con una junta adhesiva en el centro, para el puente Avançon bajo cargas al 10% y 60% de la carga de falla, y no mostraron signos de daños durante cinco (5) millones de ciclos que corresponde a una vida útil de 100 años del puente.

La durabilidad de los sistemas sándwich FRP depende de algunas variables como la temperatura elevada, la resistencia al fuego, la luz ultravioleta y la entrada de álcalis u otro liquido como algunas de las propiedades en servicio más importantes que deben tenerse en cuenta al utilizar materiales compuestos de FRP en aplicaciones de ingeniería civil.

9. Análisis estructural de materiales compuestos FRP

Debido a la complejidad en la concepción de los materiales compuestos, no se pueden utilizar las técnicas de análisis y diseño de los materiales convencionales, para esto se debe definir el problema y las especificaciones del elemento a diseñar, porque el número de combinaciones es ilimitado y la experimentación resulta ser costosa. Actualmente se utilizan modelos matemáticos de optimización y métodos numéricos para predecir y simular su comportamiento y hasta el momento parecen ser las herramientas adecuadas para el diseño de piezas compuestas *(Reguera & Florencia, 2013)*.

Se debe conocer el comportamiento del material, y una de las dificultades es determinar las propiedades efectivas del material compuesto a partir de las propiedades de las fibras y de la matriz. Los materiales compuestos son anisótropos, lo que genera que sus propiedades varíen de acuerdo a la dirección y posición consideradas. Para modelar el comportamiento mecánico de estos materiales se deben estudiar los mecanismos microestructurales entre los diferentes constituyentes. Así se obtiene un modelo micromecánico que representa al material como un homogéneo equivalente para determinar las propiedades elásticas de la lámina. Los nombrados modelos macromecánicos establecen las relaciones constitutivas de una lámina a partir de las propiedades efectivas mencionadas. Las relaciones constitutivas de tensiones y deformaciones de una la lámina de material anisótropo se pueden determinar a partir de la expresión *(1)*:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{13} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & Q_{13} & Q_{14} & Q_{15} & Q_{16} \\ Q_{21} & Q_{22} & Q_{23} & Q_{24} & Q_{25} & Q_{26} \\ Q_{31} & Q_{32} & Q_{33} & Q_{34} & Q_{35} & Q_{36} \\ Q_{41} & Q_{42} & Q_{43} & Q_{44} & Q_{45} & Q_{46} \\ Q_{51} & Q_{52} & Q_{53} & Q_{54} & Q_{55} & Q_{56} \\ Q_{61} & Q_{62} & Q_{63} & Q_{64} & Q_{65} & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} \quad \textbf{(1)}$$

Donde se necesita determinar las ventiuna constantes Q_{ij} para definir la relación constitutiva de tensiones y deformaciones. Sin embargo, es evidente que existen laminados multicapa de FRP donde hay múltiples capas ortótropas con dos planos de simetría ortogonales entre si y un tercer plano perpendicular a ellos.

Un laminado es balanceado si para una capa orientada con la fibras en dirección $+\theta$ existe otra capa identica con las fibras en direccion $-\theta$. Para que un laminado sea simetrico debe haber una capa +n y otra identica –n. Un laminado *cross-ply* posee fibras orientadas unicamente a 0° y 90°, por lo tanto puede ser balanceada y simetrica o asimentrica.

Una de las teorías más utilizadas para analizar el comportamiento de vigas curvas y rectas de pared delgada construidas con materiales FRP es el principio de Hellinger-Reissner y considera la deformación por corte debida a flexión y alabeo no uniforme. Esta formulación es una extensión del modelo propuesto por *Cortinez y Piovan (2002, 2006)* para la consideración de vigas curvas de pared delgada sujetas a un estado arbitrario de tensiones iniciales, siendo estrictamente válida para laminaciones simétricas y balanceadas, ortótropas y *cross-ply*.

10. Prototipos experimentales de puentes FRP

Se desarrolló un puente de armadura espacial hibrido FRP-Aluminio con vigas de celosía triangulares invertidas. Los aspectos más importantes del nuevo puente incluyen un tramo de 24m de luz y la capacidad de transportar un camión de cuatro ruedas con un peso de 50 kN. Se consideró un coeficiente de impacto μ de aproximadamente 0,122 *(Zhang, Lv, et al., 2019) Figura 2*. Durante los ensayos no se escuchó el ruido de ninguna grieta del acero y/o materiales de GFRP durante la carga estática del puente prototipo de 24m, y la inspección visual después del ensayo, no presento evidencia de grietas en los laminados de GFRP y las líneas de soldadura.

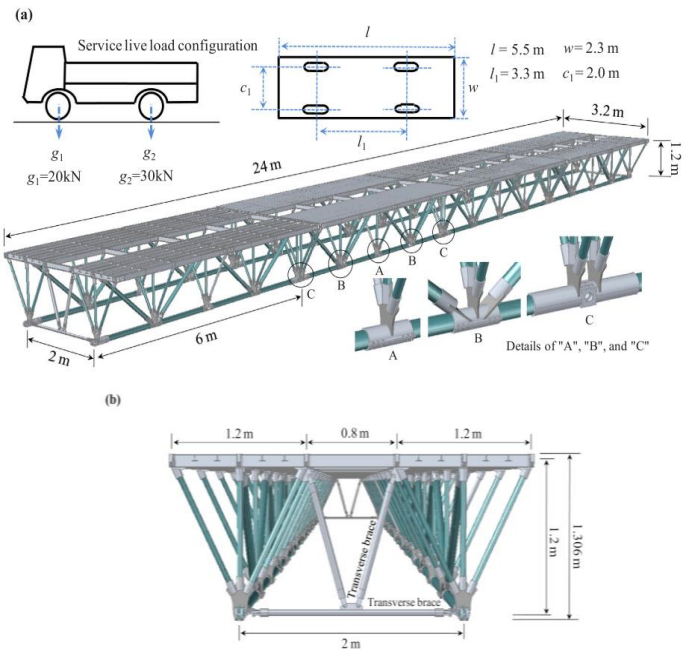

Figura 2. Diseño conceptual de puente prototipo de 24m con el sistema armadura espacial hibrida de FRP-Aluminio. *Tomada de (Zhang, Lv, et al., 2019).*

De acuerdo a los resultados de deformación estructural, el puente presenta un comportamiento casi lineal que se encuentra dentro del rango elástico. Los esfuerzos axiales son mayores a los esfuerzos de flexión en todas las secciones del puente. De modo que, los esfuerzos de flexión en toda sección transversal son casi iguales a cero, y por lo tanto pueden despreciarse. Los estados de esfuerzos en los elementos de la armadura generalmente satisfacen las características mecánicas axiales de los compuestos de GFRP pultruidos unidireccionales con baja resistencia al cortante interlaminar. De modo tal, que los perfiles tubulares GFRP pultruidos son adecuados como elementos para el cordón inferior de la armadura del puente.

Sin embargo, con la carga asimétrica fuera del eje, se encontró una gran diferencia en los esfuerzos axiales para los cordones inferiores de la viga izquierda y derecha, con valores de aproximadamente 2,3 veces mayores para la viga izquierda en comparación con la derecha. Y esto se debe principalmente al momento de torsión generado por la carga vertical excéntrica.

Los esfuerzos axiales en los elementos diagonales del alma fueron casi iguales a cero. Para este caso donde se analizó la sección de flexión pura, la fuerza cortante equivalente en la viga es cero, y por lo tanto los esfuerzos axiales dentro de los elementos diagonales del alma son casi iguales a cero.

Se propone un puente de armadura espacial hibrido con perfiles FRP y tablero de aluminio de 54m *(Yan et al., 2018)*. El puente de cordones de celosía propuesto esta ensamblado por nueve (9) unidades modulares y luego reforzado con dos cordones, utilizado principalmente para trabajos de rescate de emergencia para tráfico vehicular liviano, está diseñado para soportar una carga vehicular de 250 kN.

Con fundamento en un trabajo anterior de un puente similar con 12m de longitud *(Zhang et al., 2014)*, se diseñó y construyó una estructura de cordones ligeros con una viga compuesta de armadura cajón para un puente de emergencia con longitud de 51m y capacidad de carga vehicular de 200 kN *(Mao et al., 2019) Figura 3*.

El peso total del puente es de aproximadamente 162 kN, con un tiempo estimado de montaje de aproximadamente 160 minutos.

Se realizó el ensayo de carga a flexión de la estructura en escala de tamaño real, con la condición simplemente apoyada. Para simular la carga se colocaron cuatro (4) durmientes en madera para soportar directamente la carga aplicada por bloques de acero en diferentes configuraciones para cuatro etapas de carga, de 110, 160, 210, y 230 kN; para una carga total incluyendo factor de impacto (0,15) de 230 kN. Los procesos de carga y descarga se realizaron con la ayuda de una grúa pórtico.

De acuerdo a los resultados esfuerzo-deformación, se observa que las deformaciones longitudinales en los elementos presentan una respuesta lineal-elástica como se esperaba. También se observó que los elementos están sometidos principalmente a esfuerzos axiales, que son mucho menores que la resistencia del material para todos los miembros instrumentados.

Se presentan resultados similares en un estudio posterior sobre el mismo puente de armadura espacial hibrida FRP-Aluminio de 51m *(Figura 3) (Zhang et al., 2020)*. Dentro de una misma configuración experimental se ensayaron dos condiciones de carga estática: la carga simétrica con respecto al eje del puente, y la carga asimétrica con una excentricidad de 300mm con respecto al eje. De esta forma se puede realizar una comparación razonable.

De acuerdo a las condiciones de ensayo en el sitio y la seguridad de la carga, el programa experimental se realizó con la aplicación de cargas estáticas con incrementos para medir la respuesta en seis pasos de carga; 20, 70, 120, 170, 200 y 230 kN. Antes de iniciar el ensayo de aplico una carga de 70 kN tres veces para minimizar errores de fabricación y montaje.

De acuerdo a los resultados de la respuesta carga desplazamiento, no se tiene en cuenta el desplazamiento menor promedio en los apoyos. Se observa que la respuesta es lineal elástica bajo el estado límite de servicio para las dos vigas triangulares.

En la condición de carga excéntrica, la viga izquierda presenta un desplazamiento mucho mayor que la derecha. La diferencia en la deformación vertical entre las dos vigas es de 18,1-19,7%. Se encontró de acuerdo al ensayo un desplazamiento máximo en el centro del puente para la carga de servicio de 200 kN de 364,4 mm, y es un valor menor al desplazamiento admisible de 425mm (L/120, de acuerdo al (Código de diseño 1988)).

De acuerdo a los resultados de la respuesta torsional, se puede ver que se presentó una variación lineal elástica bajo carga de servicio, como se proyectaba. La estructura propuesta presenta una resistencia a la torsión mayor, que la viga compuesta de celosía simple.

La rigidez a la flexión global del puente de armadura con cordones inferiores de 51m, es aproximadamente 3,77 veces mayor que la viga compuesta de celosía simple, pero solo 1,23 veces mayor para la rigidez a la torsión global del puente.

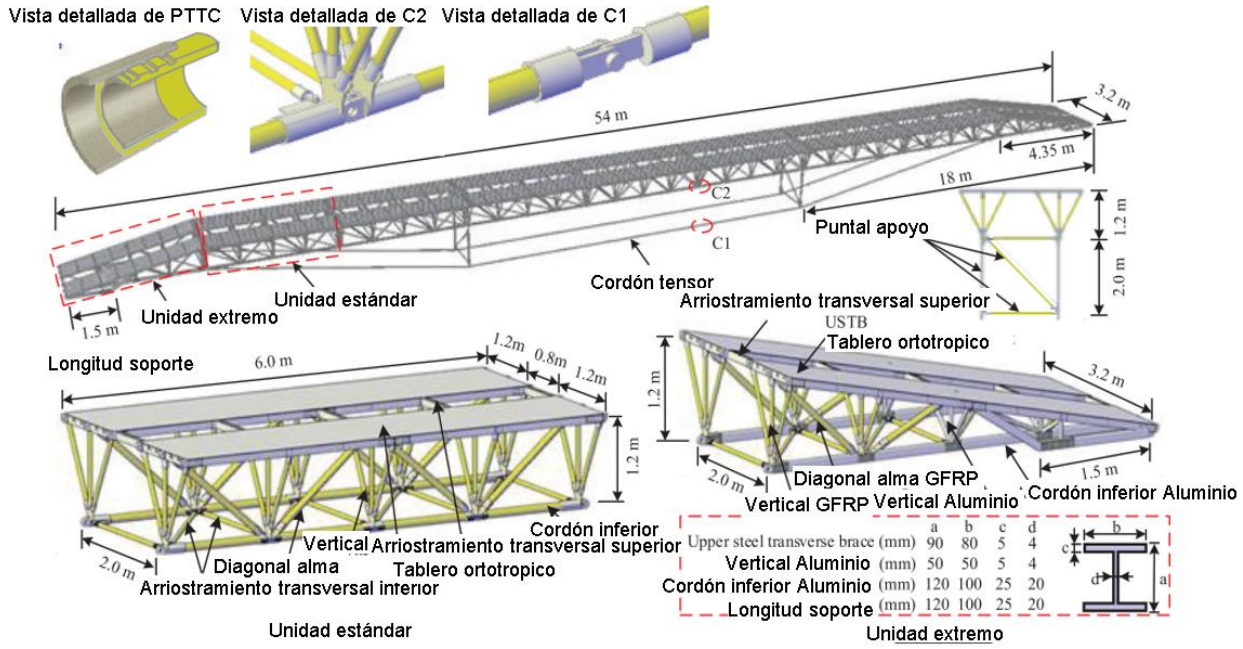

Figura 3. Concepto de diseño del puente. *Tomada de* (Mao et al., 2019).

Con el fin de validar el modelo de elementos finitos, se compararon los resultados numéricos y experimentales para los desplazamientos verticales en el centro del puente. En este caso, para las cargas excéntricas, las diferencias fueron de 1,6% y 0,84% para la viga triangular izquierda y derecha, respectivamente. También, para el valor D (diferencia de valores de desplazamiento vertical entre la viga izquierda y derecha) bajo cargas excéntricas se presenta una diferencia máxima del 11,78% entre los resultados numéricos y experimentales. Se observa que los valores numéricos son ligeramente mayores a los experimentales.

11. Análisis numérico de puentes FRP

En este caso, se realizó un análisis de elementos finitos para conocer el efecto de la variación del módulo elástico de diferentes elementos FRP del puente *(Figura 3)* sobre la deformación bajo cargas excéntricas críticas.

Se realizaron cuatro grupos de modelos de elementos finitos, con el objetivo de incrementar el modulo elástico del elemento analizado, de 50 a 150 Gpa en intervalos de 10 Gpa, manteniendo fijas las propiedades en el resto de los elementos tal como en el modelo validado anteriormente en la estructura experimental.

La *Figura 4* (a) muestra la influencia de la variación del módulo elástico sobre el desplazamiento vertical en el centro del puente para los elementos diagonales del alma, los arriostramientos inferiores, el cordón inferior y los tensores del cordón. Se observa que la influencia en el incremento del módulo elástico sobre las diagonales del alma y los arriostramientos inferiores no presentan cambios sobre el desplazamiento vertical. Sin embargo, para los elementos del cordón inferior y los tensores del cordón se presenta una disminución notable en el desplazamiento vertical con el incremento del módulo elástico. Este análisis de sensibilidad muestra que, se puede mejorar la rigidez a la flexión global del puente con un aumento en el módulo elástico para los miembros FRP de los tensores del cordón.

La *Figura 4* (b), muestra la influencia de la variación del módulo elástico sobre el ángulo torsional máximo en el centro del puente de diferentes elementos FRP. Los tensores del cordón y los arriostramientos inferiores tuvieron mayores variaciones que los demás elementos FRP. De tal manera, que se puede mejorar la rigidez torsional global del puente mejoraron las propiedades GFRP con un incremento del módulo elástico de los tensores del cordón y los arriostramientos inferiores.

12. Comparación de resultados analíticos, numéricos y experimentales

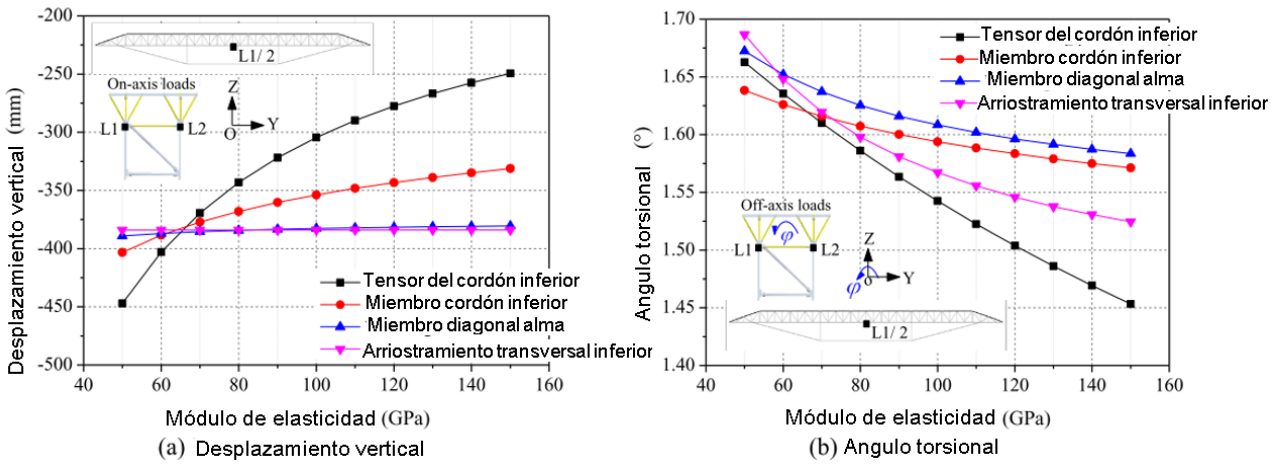

Figura 4. Influencia en el cambio del módulo elástico de diferentes elementos FRP sobre la deformación del puente. *Tomada de* (Zhang et al., 2020).

La *Figura 5* muestra la gráfica carga-desplazamiento para diferentes curvas de los resultados teóricos, experimentales y numéricos.

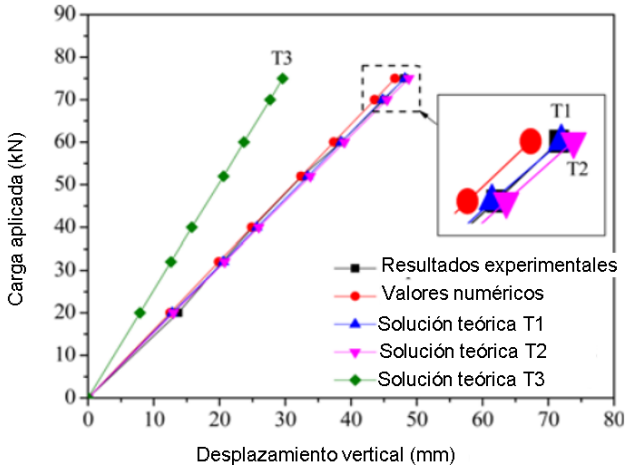

Figura 5. Solución teórica de la curva de carga-desplazamiento y su comparación con los resultados experimentales y las simulaciones numéricas. *Tomada de* (Zhang, Li, Shao, & Fan, 2019).

La curva con la leyenda "T1" corresponde a la ecuación análitica para el cálculo de la deflexión de una viga triangular invertida de armadura espacial hibrida FRP-Aluminio *(Zhang, Li, et al., 2019)*. La curva de la leyenda "T2" corresponde a la solución teórica de un estudio anterior (Li, Zhang, Zhao, & Deng, 2015). La curva con la leyenda "T3" corresponde a la ecuación de deflexión *(Zhang, Li, et al., 2019)* con la solución teórica sin considerar la deformación a cortante de la lámina del alma equivalente para la deflexión total de la viga I. También se presentan los resultados experimentales y numéricos mencionados anteriormente. En las soluciones teóricas T1 y T2 si se tuvo en cuenta esta deformación cortante.

La diferencia máxima entre T3 y los resultados experimentales es de 38,5%. Esto es porque no se consideró la deformación por cortante de las diagonales del alma de GFRP en la deflexión total de la estructura.

Por el contrario, a T3, La solución teórica T1 se aproxima bien a los resultados experimentales y numéricos con una diferencia extremadamente pequeña. Lo que demuestra la validez del modelo teórico simplificado *(Zhang, Li, et al., 2019)*. La razón de esto, es porque se consideró la deformación por cortante de la lámina del alma equivalente en la deflexión total.

13. Implementación de materiales compuestos por polímeros reforzados con fibras en Colombia

En Colombia estos materiales compuestos se están utilizando en diferentes áreas como la industrial, el mobiliario, en metalmecánica y en construcción a nivel de remodelación de viviendas, pero en realidad no se está utilizando como material principal estructural y también existen muy pocas empresas que realizan la producción de materiales compuestos por polímeros reforzados con fibras de vidrio para diferentes aplicaciones. Este panorama nos muestra que Colombia necesita más investigación en el uso de estos materiales para aplicaciones netamente estructurales sobre todo para ser usados en situaciones de

emergencia por su versatilidad en las relaciones resistencia/peso ofreciendo las ventajas de una construcción modular de fácil transporte a sitios remotos y de difícil acceso.

El camino a seguir para poder empezar a utilizar los materiales compuestos por polímeros reforzados con fibras de vidrio en Colombia para aplicaciones estructurales donde los elementos principales son perfiles y paneles sándwich para vigas, losas, armaduras, es empezar con la academia a través de diferentes trabajos de investigación a nivel analítico y experimental.

Existen referencias internacionales sobre el uso de materiales compuestos FRP, que pueden ser aplicados para el diseño de este tipo de estructuras.

Un documento que se publicó como una recopilación de guías de diseño en Europa para el cálculo de estructuras FRP es *"Prospect for New Guidance in the Design of FRP" (Ascione et al., 2016)*, y es de libre acceso. El alcance de esta guía de diseño comprende:

- ✓ Aplica para partes termoestables FRP con al menos 15% de fibras en volumen.
- ✓ Se puede utilizar para el diseño de estructuras FRP de perfiles, losas, laminas y paneles sándwich.
- ✓ Estructuras en las que no se permiten microfisuras no están en el alcance de esta guía.
- ✓ La guía no incluye barras de refuerzo FRP, cables o refuerzos externos para estructuras usando FRP.
- ✓ Los elementos estructurales que se tienen en cuenta se realizan mediante los siguientes procesos principales de fabricación de: preimpregnado, pultrusión, moldeo por compresión, moldeo por transferencia de resina, bobinado de filamentos y laminado manual. También se incluyen las estructuras sándwich, que consisten en un núcleo (espuma, madera o panal) cubierto por láminas frontales de FRP.

También existe una guía de diseño para puentes peatonales FRP de la *AASHTO* (*American Association of State Highway and Transportation Officials*) *"Guide Specifications for Design of FRP Pedestrian Bridges, 1st Edition, 2008"*, que se puede comprar en la página web.

14. Conclusiones

- ✓ En la actualidad existe un gran número de puentes vehiculares de gran importancia construidos con materiales FRP, y en su mayoría son híbridos donde la cimentación y la subestructura son construidos con concreto, y la superestructura tiene losa de concreto y vigas FRP. Estas estructuras han tenido un buen comportamiento dada su corta edad de construcción.
- ✓ Para los puentes desplegables para situaciones de emergencias con materiales de polímero reforzado con fibras de vidrio (GFRP) o fibras hibridas vidrio/carbono (HFRP), se han desarrollado prototipos experimentales de armaduras espaciales con vigas de celosía triangulares invertidas como una solución eficiente desde el punto de vista de la rigidez global para la optimización en el uso de los materiales aprovechando su gran resistencia longitudinal para soportar principalmente fuerzas axiales en perfiles tubulares circulares.
- ✓ El presente trabajo pretende estimular el inicio de la investigación en el uso de los materiales compuestos de polímeros reforzados con fibras en Colombia, como estructuras para casos de emergencia dadas sus ventajas de bajo peso y gran resistencia, entre otras, en comparación con materiales tradicionales. Es de resaltar que actualmente las mejores soluciones en la mayoría de los casos, se presentan como diseños y construcciones hibridas de los materiales compuestos y tradicionales, como el acero y el concreto.

15. Referencias

Alocci, C., & Valvo, P. S. (2019). Feasibility study of a hybrid FRP-steel cable-stayed pedestrian swing bridge. *Engineering Structures*, *189*, 359–372. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.03.087

Ascione, L., Caron, J.-F., Godonou, P., van IJselmuijden, K., Knippers, J., Mottram, T., … Tromp, L. (2016). Prospect for New Guidance in the Design of FRP. In *Eur 27666 En*. https://doi.org/10.2788/851558

Blaga, L., Dos Santos, J. F., Bancila, R., & Amancio-Filho, S. T. (2015). Friction Riveting (FricRiveting) as a new joining technique in GFRP lightweight bridge construction. *Construction and Building Materials*, *80*, 167–179. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.01.001

Correia, J. R., Bai, Y., & Keller, T. (2015, September 1). A review of the fire behaviour of pultruded GFRP structural profiles for civil engineering applications. *Composite Structures*, Vol. 127, pp. 267–287. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.03.006

GangaRao, H. (2016). Infrastructure Applications of Fiber-Reinforced Polymer Composites. In *Applied Plastics Engineering Handbook: Processing, Materials, and Applications: Second Edition* (pp. 675–695). https://doi.org/10.1016/B978-0-323-39040-8.00032-8

Hale, M., & Amir, F. (2014). Static and Fatigue Behavior of Sandwich Panels with GFRP Skins and Governed by Soft-Core Shear Failure. *Journal of Composites for Construction*, *18*(2), 4013046. https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000445

Hung, H. H., Sung, Y. C., Chang, K. C., Yin, S. H., & Yeh, F. Y. (2016). Experimental testing and numerical simulation of a temporary rescue bridge using GFRP composite materials. Construction and Building Materials, 114, 181–193. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.199

Sidik, I., & Irawan, R. (2020). Structural behavior of open truss FRP bridge without side support. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, *930*(1), 012040. https://doi.org/10.1088/1757-899X/930/1/012040

Siwowski, T., Kulpa, M., Rajchel, M., & Poneta, P. (2018). Design, manufacturing and structural testing of all-composite FRP bridge girder. *Composite Structures*, *206*, 814–827. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.08.048

Thomas, K., Jan, R., Julia, de C., & Michael, O.-A. (2014). GFRP-Balsa Sandwich Bridge Deck: Concept, Design, and Experimental Validation. *Journal of Composites for Construction*, *18*(2), 4013043. https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000423

Yan, X., Zhao, Q., Zhao, D., Ke, M., Zeng, Z., & Zhang, D. (2018). Experimental investigation of bending stiffness of a novel 54m FRP space truss string bridge. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, *452*(2). https://doi.org/10.1088/1757-899X/452/2/022103

Yang, X., Bai, Y., & Ding, F. (2015). Structural performance of a large-scale space frame assembled using pultruded GFRP composites. Composite Structures, 133, 986–996. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.07.120

Zhang, D., Li, F., Shao, F., & Fan, C. (2019). Evaluation of Equivalent Bending Stiffness by Simplified Theoretical Solution for an FRP–aluminum Deck–truss Structure. *KSCE Journal of Civil Engineering*, *23*(1), 367–375. https://doi.org/10.1007/s12205-018-1093-4

Zhang, D., Lv, Y., Zhao, Q., & Li, F. (2019). Development of lightweight emergency bridge using GFRP–metal composite plate-truss girder. *Engineering Structures*, *196*. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109291

Zhang, D., Yuan, J., Zhao, Q., Li, F., Gao, Y., Zhu, R., & Zhao, Z. (2020). Static performance of a new GFRP–metal string truss bridge subjected to unsymmetrical loads. Steel and Composite Structures, 35(5), 641–657. https://doi.org/10.12989/scs.2020.35.5.659

Zhang, D., Zhao, Q., Huang, Y., Li, F., Chen, H., & Miao, D. (2014). Flexural properties of a lightweight hybrid FRP-aluminum modular space truss bridge system. *Composite Structures*, *108*, 600–615. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2013.09.058

Zhang, D., Zhao, Q., Li, F., Tao, J., & Gao, Y. (2018). Torsional behavior of a hybrid FRP-aluminum space truss bridge: Experimental and numerical study. Engineering Structures, 157, 132–143. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.12.013