



Artículo de investigación

Evaluación de la resistencia/peso en una viga de material compuesto híbrido con fibras de algodón/vidrio

Strength-to-weight ratio assessment of a cotton-glass fibers hybrid composite beam

Manuel Secundino Delgado , Dariana Ayli Sebastián Cruz , Marcela Muñoz Martínez , Evelyn Estrada Ramírez , Erik Daniel Mauricio Jiménez , Enrique Alcudia Zacarias , Juan Antonio Paz González , Mauricio Leonel Paz González , Juan Antonio Ruíz Ochoa 

Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Tecnología, Universidad Autónoma de Baja California, Blvd Universitario 1000, Unidad Valle de Las Palmas, 22260 Tijuana, Baja California, México

Autor de correspondencia: Enrique Alcudia Zacarias, Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Tecnología, Universidad Autónoma de Baja California, Blvd Universitario 1000, Unidad Valle de Las Palmas, 22260 Tijuana, Baja California, México. Correo electrónico: ealcudia@uabc.edu.mx. ORCID: 0000-0001-6206-573X.

Enviado: 23 de Agosto del 2023

Aceptado: 21 de Octubre del 2023

Publicado: 22 de Noviembre 2023

Resumen. – *En este trabajo se presenta resultados sobre la evaluación de la resistencia/peso en una viga tipo I de material compuesto híbrido con fibras de algodón/vidrio (64% fibras de algodón y 36% fibras de vidrio). Se realizaron simulaciones numéricas a flexión a través del programa ANSYS y una prueba experimental a flexión en la máquina de ensayos Shimadzu AG-Xplus 100kN. Los resultados mostraron que es posible obtener una geometría optimizada dentro de la viga a través de la remoción estratégica de zonas de material sin comprometer la integridad estructural. Además, la prueba experimental a flexión en la viga de material compuesto mostró un valor superior en la relación de resistencia/peso (44) en comparación con la viga optimizada de aluminio 6061-T6 (39.65); este comportamiento se atribuye a que los materiales compuestos reforzados con fibras son generalmente menos densos en comparación con los metales, y a la distribución de las fibras de algodón y vidrio dentro de la viga.*

Palabras clave: Material compuesto híbrido; Viga tipo I; Ensayo a flexión; Simulación numérica.

Abstract. – *In this work, the strength-to-weight ratio on I-beam of a cotton-glass fibers hybrid composite (64% cotton fibers and 36% glass fibers) was assessed. Numerical simulations were carried out under flexural loads and a flexural test were carried out using a Shimadzu AG-X plus 100kN testing machine. The results showed that it is possible to obtain an optimized geometry within the beam through the strategic removal of material zones without compromising the structural integrity. Furthermore, the flexural test on the composite beam showed a higher value in the strength/weight ratio (44) compared to the optimized 6061-T6 aluminum beam (39.65); this behavior can be explained because fiber-reinforced composites are generally less dense compared to metals, and to the distribution of cotton and glass fibers within the beam.*

Keywords: Hybrid composite material; I-beam; Flexural test; Numerical Simulation.





1. Introducción

Actualmente, los materiales compuestos tienen un amplio crecimiento en diferentes industrias, tales como, automotriz, aeroespacial, marítimo y energías eólicas. Este comportamiento se debe principalmente a que los materiales compuestos tienen la ventaja de obtener componentes estructurales con alta durabilidad, buena resistencia a fatiga y excelente relación resistencia/peso [1–6]. Sin embargo, los materiales compuestos presentan las desventajas de una baja resistencia a impacto, problemas sobre delaminación, bajas propiedades mecánicas transversales, y baja interfaz fibra-matriz [7, 8].

Un enfoque que permite disminuir estas desventajas es la hibridación, el cual consiste en la combinación de dos o más fibras dentro del laminado. Los resultados sobre la hibridación en materiales compuestos han demostrado un mejor desempeño ante impacto, alta rigidez y resistencia, alta tenacidad a la fractura, y reducción la relación peso/costo [9–13].

La hibridación se puede realizar entre fibras sintéticas y fibras naturales. Una de las combinaciones entre fibras sintéticas con mayor aplicación es la combinación entre fibras de vidrio y carbono, la cual permite obtener un material compuesto con un desempeño mecánico superior en comparación con la fibra de vidrio y con mejor relación resistencia/peso [14–17].

Al día de hoy, el enfoque del cuidado del medio ambiente ha permitido el crecimiento de las fibras naturales en aplicaciones estructurales, ya que estas fibras tienen la ventaja de baja densidad, alta resistencia, bajo costo de producción y ser biodegradables [18–21].

Investigaciones recientes han demostrado que la hibridación entre fibras sintéticas y/o naturales permite mejoras en el desempeño a tensión y

flexión del material compuesto [22–27]. Kureemun et al. [28] demostraron que diferentes secuencias de apilado entre fibras de lino y carbono, razón de hibridación del 8%, permiten un aumento en la resistencia a tensión del 50%.

Chen et al. [29] estudiaron laminados híbridos de fibras de carbono/vidrio/basalto y obtuvieron una mejora en el módulo a flexión al colocar capas de fibras de carbono en los lados de tensión y compresión. Además, obtuvieron una mayor resistencia a flexión colocando fibras basalto y vidrio en una secuencia de apilado tipo sándwich con una relación híbrida del 50%. Wang et al. [30] demostraron en un laminado de fibras vidrio/lino un aumento de 3.22 veces en la resistencia a flexión en comparación con un laminado de fibras de lino.

En la construcción de estructuras a través de elementos de acero se tiene un grave problema por los efectos de la corrosión, ya que este fenómeno afecta el comportamiento estructural y reduce la vida de servicio de las estructuras. Por lo tanto, en la búsqueda de nuevas alternativas la utilización de materiales compuestos reforzados con fibras resulta ser un buen candidato, ya que tienen una alta resistencia a la corrosión y altas propiedades mecánicas [31]. Por ejemplo, en los últimos 20 años se han construido puentes alrededor del mundo a través de materiales compuestos reforzados con fibras, ya sea que estos materiales fueron utilizados para la construcción parcial o total de todos los elementos que conforman a los puentes [32–36].

Un elemento mayormente utilizado para la construcción de estructuras es la viga tipo I. En la actualidad, se ha estudiado la influencia de las fibras en la fabricación parcial o total de este elemento estructural, los resultados han mostrado que la resistencia y rigidez aumentan ante la presencia de las fibras [37–40].



En el presente trabajo se evaluó la relación resistencia/peso de una viga estructural tipo I de material compuesto híbrido de fibras de algodón/vidrio. Por lo cual, se realizaron simulaciones numéricas y una prueba experimental a flexión de una viga fabricada de material compuesto.

2. Metodología

Primero, a partir de una geometría inicial de la viga tipo I se realizaron simulaciones numéricas de una prueba a flexión para determinar la geometría optimizada que permitió obtener la mejor relación resistencia/peso en la viga. Posteriormente, con esta geometría optimizada

se construyó una viga de material compuesto híbrido con fibras de algodón/vidrio. Finalmente, con esta viga se realizó una prueba experimental a flexión para obtener la relación resistencia/peso, a través del registro de la carga máxima a flexión comparado con el peso final de la viga construida.

2.1 Simulación numérica

2.1.1 Viga inicial

En la Figura 1 se muestran las dimensiones iniciales del perfil de la viga tipo I. Con respecto a la longitud de la viga, se tiene un tamaño de 304.80 mm.

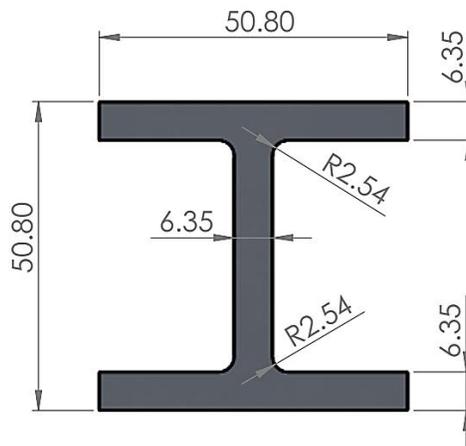


Figura 1. Geometría inicial del perfil de la viga tipo I (dimensiones en mm).

Posteriormente, se realizó el dibujo en sólido a través del programa SolidWorks, en la Figura 2

se muestra la versión 3D de la viga con las dimensiones iniciales.

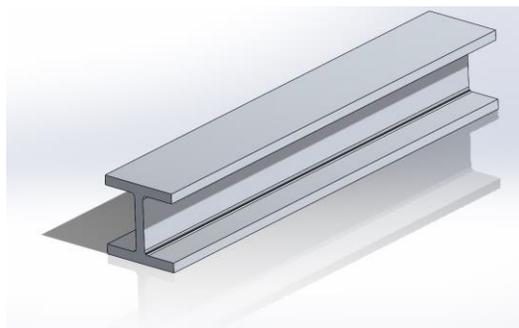


Figura 2. Dibujo en sólido de la viga tipo I con las dimensiones iniciales.



Las simulaciones numéricas se realizaron a través del programa ANSYS. En la Figura 3 se muestra la configuración de la simulación en la viga tipo I. La prueba a flexión es del tipo tres puntos, en la parte inferior se encuentran dos soportes en forma de rodillos con un diámetro de

30mm y la distancia entre soportes es de 290mm. Con respecto a la aplicación de la carga, se realizó en la parte superior de la viga a través una nariz con diámetro de 5mm y ubicado en el centro de la viga.

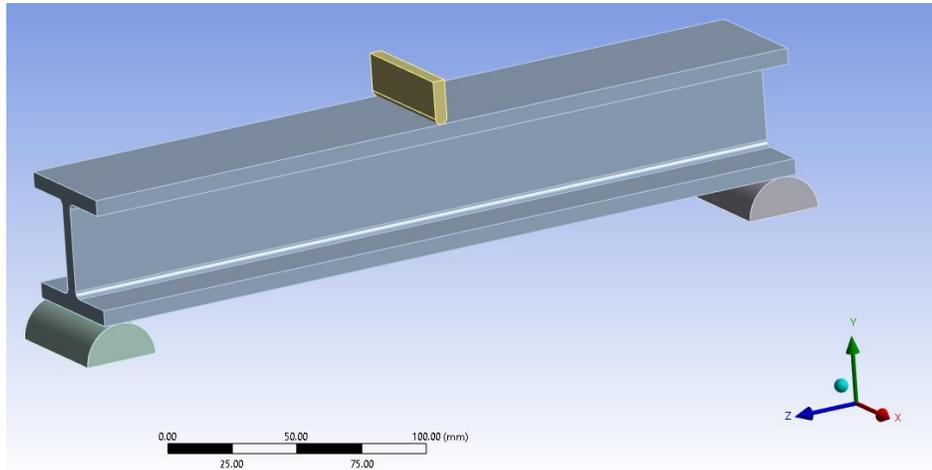


Figura 3. Configuración de la simulación a flexión en la viga tipo I.

2.1.2 Viga optimizada

El proceso de optimización de la viga inicial se realiza con el objetivo de mejorar la relación resistencia/peso. Una manera de lograr este objetivo es disminuir el peso de la viga sin comprometer la capacidad de resistencia de la viga. Por lo tanto, en la viga inicial, descrito en la sección anterior, se realizaron simulaciones numéricas sobre la distribución del factor de seguridad, el cual permite comprender la distribución de los esfuerzos y la carga dentro de la viga. Posteriormente, con esta información es posible conocer en que zonas de la viga no se encuentra presente la carga aplicada y así poder retirar material en esas zonas.

2.2 Manufactura

Después de obtener la geometría de la viga optimizada, se realizó la manufactura de la viga

utilizando material compuesto híbrido con fibras de algodón/vidrio. El proceso de manufactura fue por aplicación manual de resina sobre las fibras y un molde conformado de cuatro perfiles de acero ASTM A36. La tela de fibra de vidrio seleccionada es un tejido bidireccional con una densidad superficial de 80 g/m^2 . Por otro lado, la tela de algodón es un tejido bidireccional con una densidad superficial de 60 g/m^2 . Con respecto a la cantidad de capas y la secuencia de apilado, en la Figura 4 se muestra la distribución de las fibras en la viga de material compuesto. En la base inferior y superior se distribuyeron 20 capas de fibras, 8 son capas de fibras de vidrio y 12 son capas de fibras de algodón. Por otro lado, en el lateral izquierdo y derecho se distribuyeron 24 capas de fibras, 8 son capas de fibras de vidrio y 12 son capas de fibras de algodón. Por lo tanto, el porcentaje de fibras de vidrio son del 36% y un 64% son fibras de algodón dentro de la viga de material compuesto.

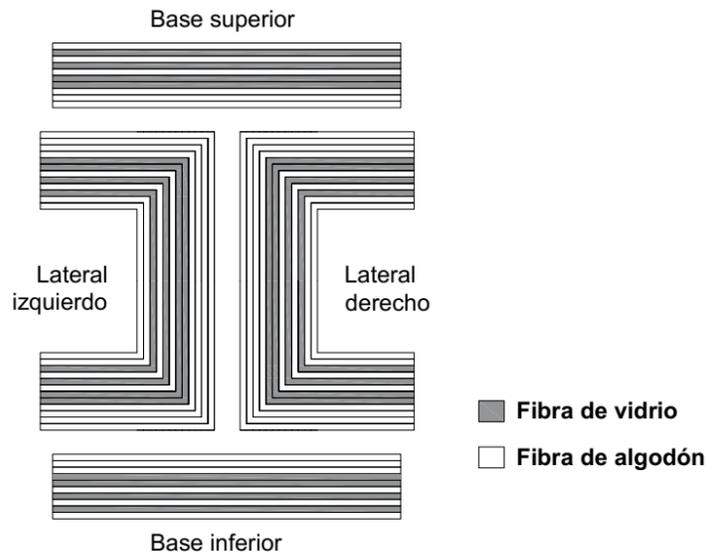


Figura 4. Cantidad de capas de fibras y secuencia de apilado en la viga de material compuesto.

2.3 Prueba experimental

Finalmente, se realizó un ensayo a flexión de tres puntos con la viga fabricada de material compuesto híbrido con fibras de algodón/vidrio. El ensayo a flexión consiste en la aplicación de una carga central en la parte superior de la viga, la cual es introducida a través de un elemento tipo nariz.

Este elemento se desplaza hacia abajo y durante su recorrido se registran los valores de fuerza y desplazamiento a través de la máquina de ensayos. Se utilizó la máquina de ensayos universales Shimadzu AG-X plus 100 kN a una velocidad de prueba de 5 mm/min. La nariz de carga tiene un diámetro de 5mm y los soportes un diámetro de 30mm. La distancia entre soportes es de 290 mm. Por lo cual, la relación entre la distancia de los soportes y la altura de la viga es 5.8.

3. Resultados y discusión

3.1 Simulación con geometría inicial

La primera simulación se realizó en una viga tipo I con la geometría inicial descrita en la sección 2.1.1. El material que se utilizó para la viga fue aluminio 6061-T6. La masa de la viga con la geometría inicial fue de 734.60 gramos. El tamaño de los rodillos soportes, la punta nariz, y la distancia entre soportes se encuentran descritos en la sección 2.1.1. La malla se construyó con 356,453 elementos con un tamaño de 1 mm, ver Figura 5.

En la Figura 6 se muestran los resultados del análisis del factor de seguridad en la viga tipo I con la geometría inicial. El factor de seguridad de la viga fue de 0.992 ubicada en la zona de nariz de carga y con una fuerza aplicada en el centro de 24,000 N. Estos valores indican que la viga de aluminio falla en la zona de la nariz de carga a ese nivel de fuerza máxima.

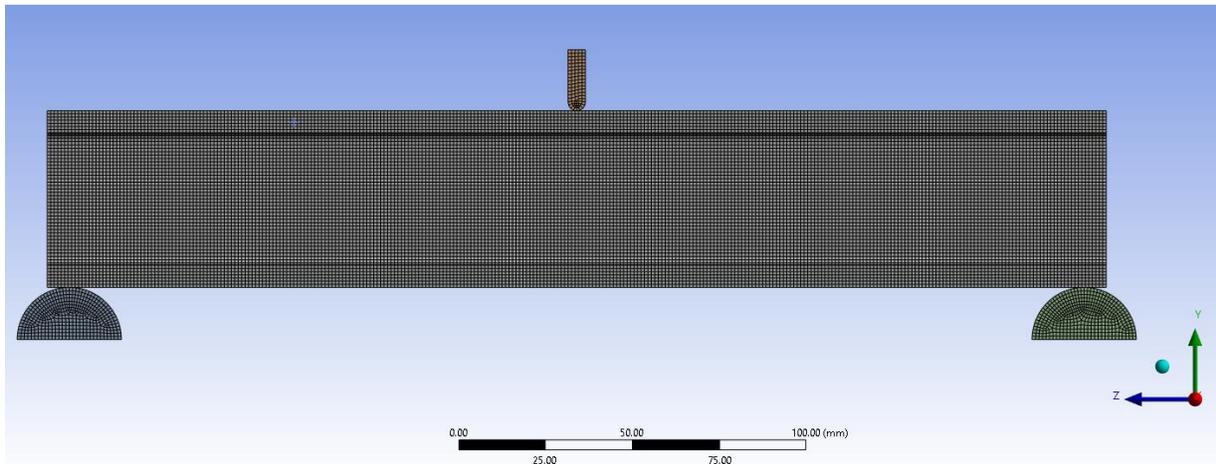


Figura 5. Mallado de la viga tipo I y los elementos de la prueba de flexión.

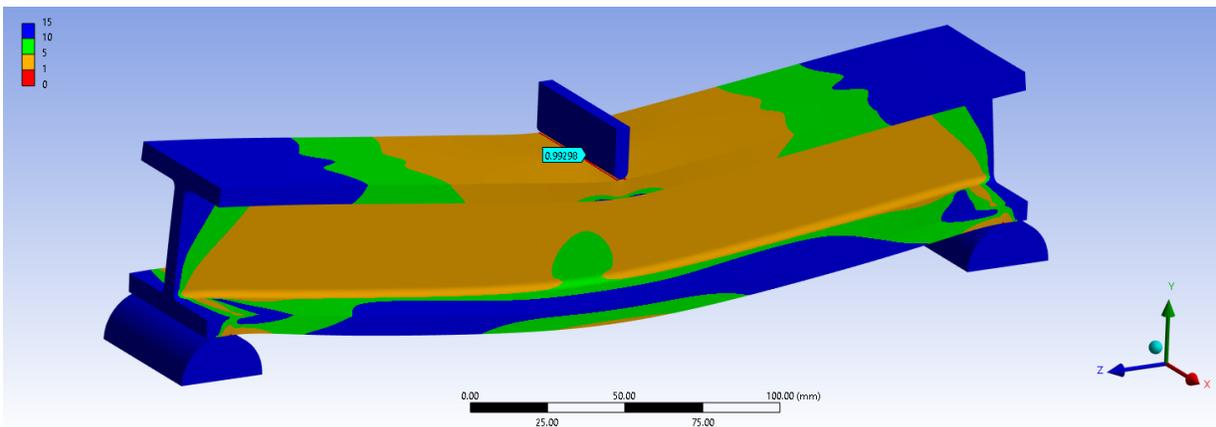


Figura 6. Resultados del factor de seguridad en la viga tipo I con geometría inicial.

Los resultados del factor de seguridad en la Figura 6 también permiten comprender la distribución de los esfuerzos y la carga dentro de la viga. Las zonas azules (factor de seguridad entre 10 y 15) indican que los esfuerzos presentes en esas zonas son muy pequeños, por lo cual, esas zonas de la viga se encuentran muy alejadas del nivel de falla del material. Las zonas color verde y naranja (factor de seguridad entre 1 y 10) muestran las zonas en donde se encuentran

mayormente concentrados los esfuerzos. Por lo tanto, se puede remover material de la viga (zonas azules) en búsqueda de reducir el peso final de la viga y mantener la resistencia a flexión de la viga. Este procedimiento se muestra en la Figura 7, se puede observar que se puede obtener una geometría optimizada de la viga tipo I, esta nueva geometría permitirá mejorar la relación resistencia/peso.

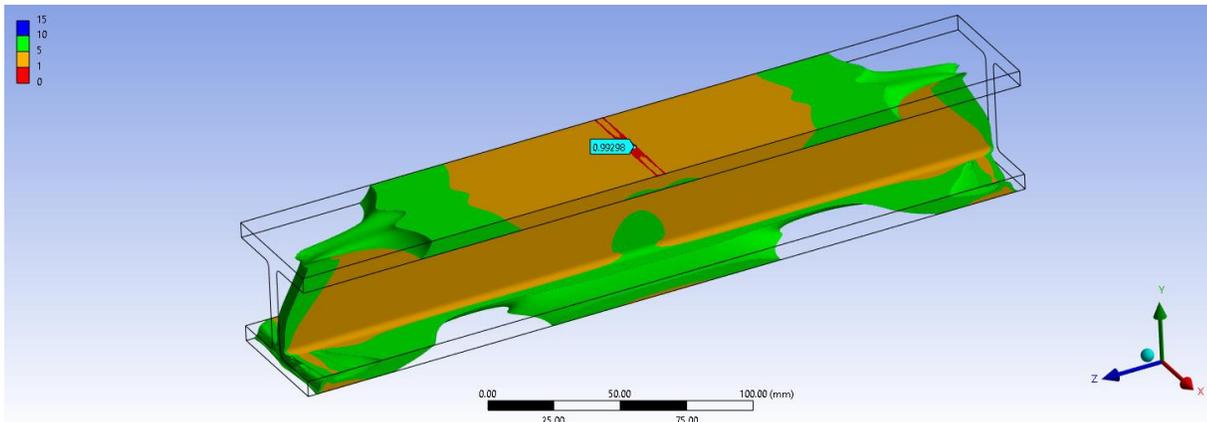


Figura 7. Remoción de material y base para obtener la geometría optimizada de la viga.

3.2 Simulación con geometría optimizada

La geometría optimizada para la viga tipo I se muestra en la Figura 8. Esta nueva geometría se obtuvo en función de los siguientes factores: a) Eliminar zonas de material en donde la distribución de la carga aplicada no se encuentra presente, esto se obtiene a través de observar la distribución de esfuerzos y el factor de seguridad,

mostrado en la sección 3.1; b) Mantener la geometría del perfil I mostrado en la sección 2.1.1, con la diferencia de cambiar la forma de la viga en su longitud, por lo cual, en la nueva geometría se retiró material de los extremos y en la parte superior de la viga; c) Fácil manufactura y proceso de recortado de la viga para obtener la geometría optimizada.

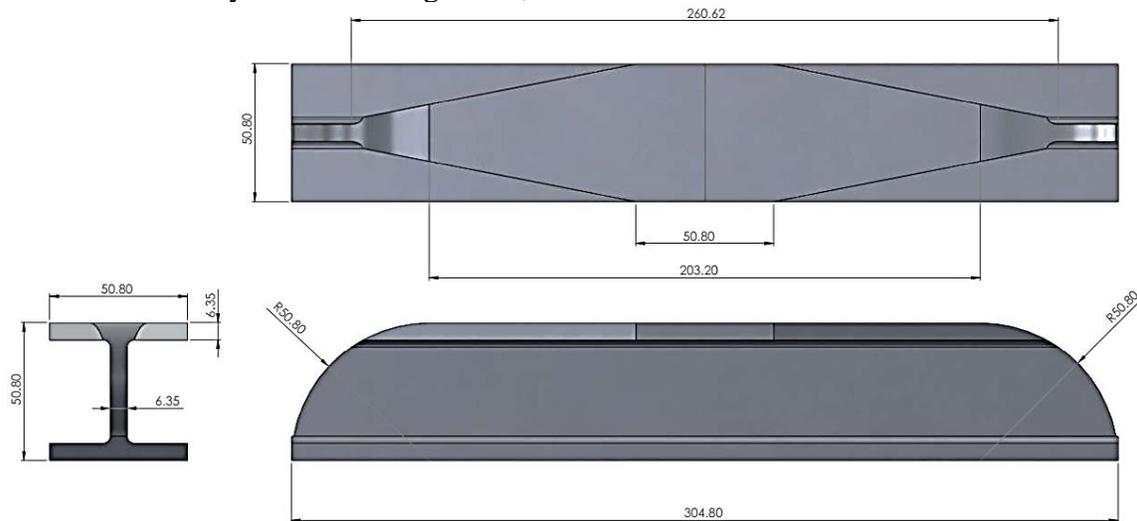


Figura 8. Geometría optimizada para la viga tipo I (Dimensiones en mm)

La segunda simulación se realizó con la geometría optimizada. El material que se utilizó para la viga fue aluminio 6061-T6. La masa de la viga con la geometría optimizada fue de 605.29 gramos. El tamaño de los rodillos soportes, la

punta nariz, y la distancia entre soportes se encuentran descritos en la sección 2.1. La malla se construyó con 195,929 elementos con un tamaño de 1mm, ver Figura 9

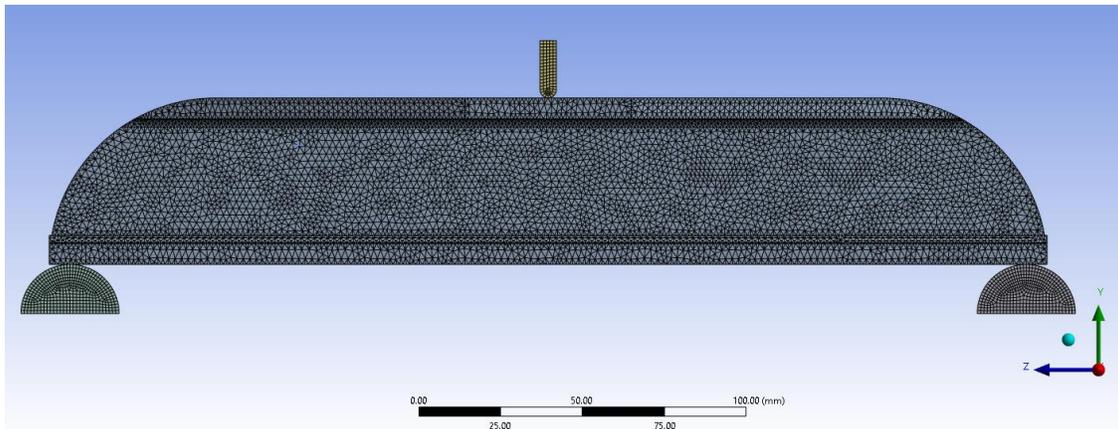


Figura 9. Mallado de la viga con la geometría optimizada.

En la Figura 10 se muestran los resultados del análisis del factor de seguridad en la viga tipo I con la geometría optimizada. El factor de seguridad de la viga fue de 0.998 ubicada en la zona de nariz de carga y con una fuerza aplicada en el centro de 24,000 N. Estos valores al ser comparados con los resultados de la viga con

geometría inicial (sección 3.1) indican que la nueva geometría optimizada permite una reducción del peso en la viga y permite conservar la integridad en su capacidad de soportar fuerzas a flexión. Por lo cual, se cumplió el objetivo de la optimización descrito en la sección 2.1.2.

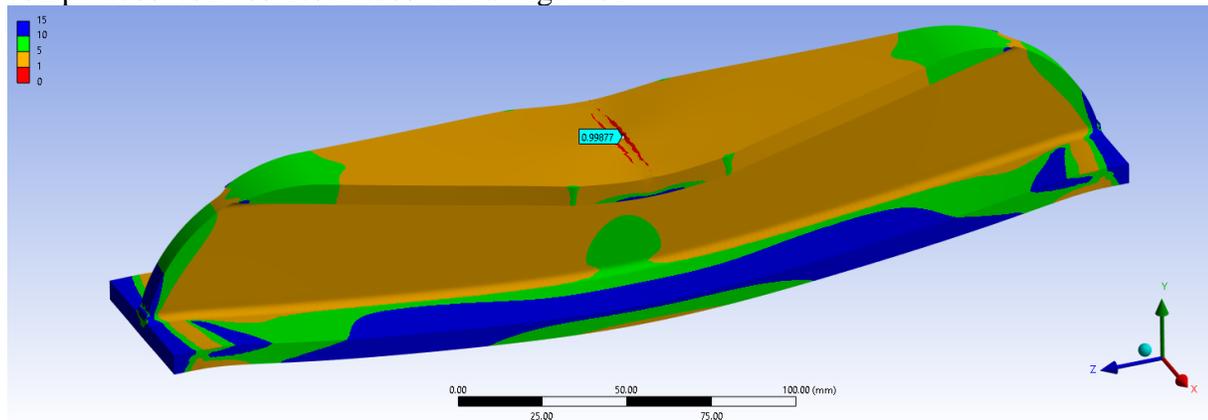


Figura 10. Resultados del factor de seguridad en la viga tipo I con geometría optimizada.

3.3 Manufactura

Después de obtener la geometría optimizada de la viga se procedió a fabricar la viga de material compuesto híbrido con fibras de algodón/vidrio. Estos materiales se describen en la sección 2.2. El proceso de manufactura de la viga fue por aplicación manual de resina sobre las fibras y un

molde. Primero, se construyó un molde con cuatro perfiles de acero ASTM A36, en la Figura 11 se muestra una fotografía. La sujeción de los perfiles de acero se realizó a través de tornillos, los cuales permiten una presión constante, y así obtener un espesor uniforme sobre toda la viga a construir.



Figura 11. Molde con perfiles de acero ASTM A36 para la construcción de la viga.

Posteriormente, a cada pieza del molde se le colocó cera desmoldante y papel cera, en la Figura 12 se muestra una fotografía. Estos materiales permiten que la fibra y la resina no se adhieran en el molde, y así poder retirar la pieza construida. Con respecto al acomodo de las capas de fibras de vidrio y algodón, la secuencia de apilado se realizó en función a lo descrito en la sección 2.2. En la Figura 13 se muestra el proceso de apilado de las fibras y la aplicación de la resina entre cada capa. Después, en la Figura 14 se muestra el proceso de cerrado del molde y la aplicación de la presión uniforme, a través de la colocación de los tornillos y tuercas. La duración

del molde cerrado fue de 24 horas, ya que es el tiempo que curado de la resina. Por último, se retira la viga de material compuesto del molde y se procede a recortar la pieza en función de las dimensiones de la geometría optimizada (sección 3.2), en la Figura 15 se muestra una fotografía. En la Figura 16 se muestra la viga de material compuesto con fibras de algodón/vidrio en su estado final, la cual tiene la geometría optimizada descrita en la sección 3.2. El pesaje final de la viga de material compuesto con la geometría optimizada fue de 280.91 gramos, la cual se realizó a través de una báscula digital.



Figura 12. Piezas del molde con cera desmoldante y papel encerado.



Figura 13. Apilado de las capas de fibras sobre el molde.



Figura 14. Proceso de cerrado del molde y presión uniforme.



Figura 15. Extracción de la viga del molde y recortado de la pieza.



Figura 16. Viga de material compuesto con la geometría optimizada

3.4 Ensayo a flexión

La configuración del ensayo a flexión se encuentra descrito en la sección 2.3. En la Figura 17 se muestra el proceso de colocación de la viga de material compuesto en la máquina de ensayo.

Después de terminada la prueba de flexión, se obtiene la gráfica fuerza-desplazamiento en el

material compuesto híbrido, ver Figura 18. Los resultados muestran que la viga de material compuesto soporta una fuerza máxima de 12,362 N con un desplazamiento vertical de la viga de 7.8 mm. Estos valores indican la capacidad de carga de la viga de material compuesto hasta su punto de falla.

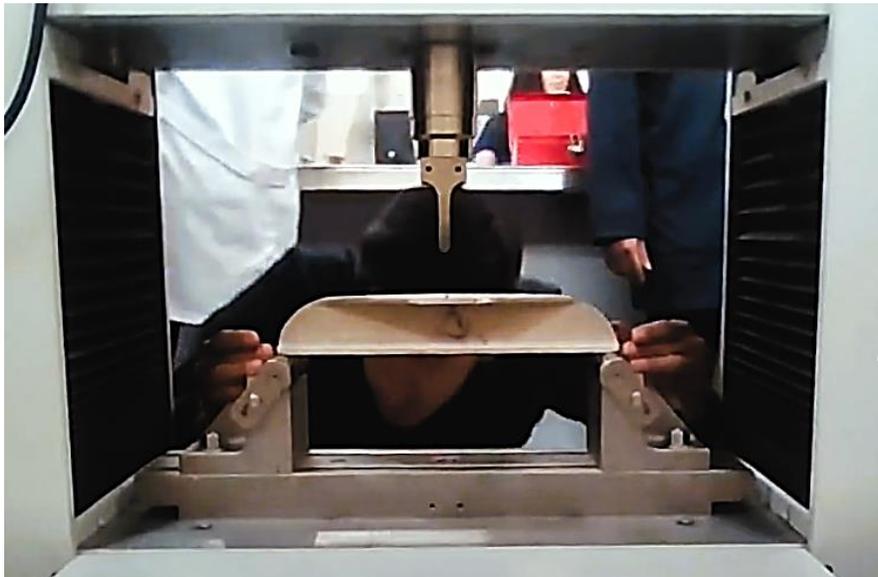


Figura 17. Colocación de la viga de material compuesto en la máquina de ensayos.

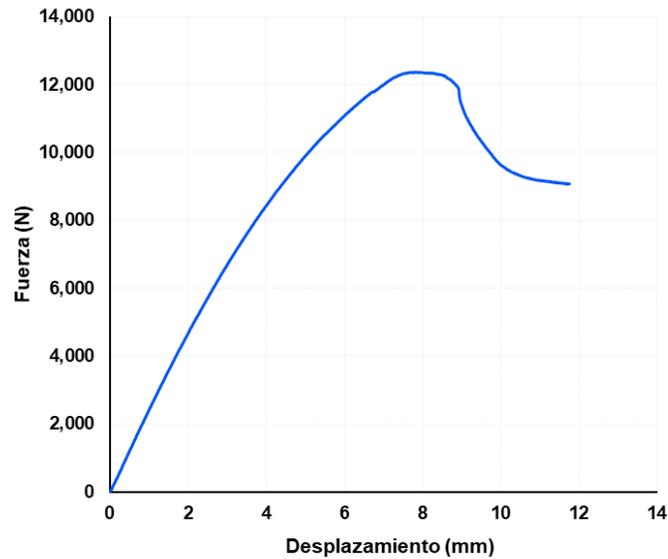


Figura 18. Gráfica fuerza – desplazamiento de la prueba de flexión en el material compuesto híbrido reforzado con fibras algodón/vidrio.

3.5 Relación resistencia/peso

Tabla 1 se muestra la relación resistencia/peso de la viga tipo I en función de diferentes tipos de materiales y geometrías, los datos se obtuvieron del análisis de resultados de la sección 3. Las simulaciones numéricas con el aluminio 6061-T6 permitieron obtener una mejora en la relación resistencia/peso en la viga tipo I de 32.67 a 39.65. Este comportamiento se obtuvo al cambiar la geometría inicial en la viga por una geometría optimizada. Por lo cual, los resultados demuestran que es posible reducir el peso de un elemento estructural sin disminuir la capacidad de resistencia a flexión del elemento.

A partir de la geometría optimizada se construyó una viga de material compuesto híbrido de fibras de algodón/vidrio (64% fibras de algodón y 36% fibras de vidrio). Los resultados mostraron que se alcanzó una relación de resistencia/peso de 44.

La relación resistencia/peso se obtiene de dividir la capacidad de carga máxima del elemento estructural entre su peso final. En la Este valor es superior en comparación con la viga de geometría optimizada de aluminio 6061-T6 con un valor de 39.65. Este comportamiento se debe a que los materiales compuestos reforzados con fibras son generalmente menos densos en comparación con los metales, y a la distribución de las fibras de algodón y vidrio dentro de la viga.

La importancia de este alto valor en relación de resistencia/peso de la viga de material compuesto reside en los beneficios de trabajar con elementos estructurales ligeros y resistentes. Por ejemplo, en la industria del transporte es una gran ventaja tener estructuras que sean ligeras y resistentes, ya que la cantidad de combustible para mover una estructura ligera es mucho menor en comparación con una estructura pesada, por lo tanto, los costos económicos serán menores. Por lo tanto, los materiales compuestos tienen un alto



potencial en el sector automotriz, energético, aeronáutico y aeroespacial.

Tabla 1. Relación resistencia/peso de la viga tipo I en función de diferentes tipos de materiales y geometrías.

Material	Geometría	Peso (gr)	Fuerza máx. (N)	Relación Resistencia/peso
Aluminio 6061-T6	Inicial	734.60	24,000	32.67
	Optimizada	605.29	24,000	39.65
Compuesto de fibras algodón/vidrio	Optimizada	280.91	12,362	44.00

4. Conclusiones

La viga tipo I de material compuesto híbrido con fibras de algodón/vidrio (64% fibras de algodón y 36% fibras de vidrio) se evaluó mecánicamente a través de una prueba de flexión, con el propósito de determinar el nivel de relación resistencia/peso que se puede obtener a través de una geometría optimizada. Los resultados mostraron lo siguiente:

a) En la viga tipo I, las simulaciones numéricas mostraron que la geometría optimizada obtuvo un aumento en el valor de relación resistencia/peso de 39.65 en comparación con la geometría inicial con un valor de 32.67. Este aumento en la capacidad de resistencia y ligereza se debe a la eliminación de zonas de material dentro del elemento estructural. Esta remoción de material se realizó de manera estratégica en zonas dentro de la viga donde los esfuerzos eran muy pequeños y su remoción no comprometía la integridad estructural.

b) Después de obtener la geometría optimizada, se fabricó una viga tipo I de material compuesto híbrido de fibras algodón/vidrio, y con un peso final de 280.91 gramos. Posteriormente, se realizó un ensayo a flexión sobre la viga de material compuesto y se obtuvo una capacidad de

carga máxima de 12,362 N. Por lo cual, se obtuvo una relación de resistencia/peso de 44.

c) En la viga tipo I de material compuesto híbrido de fibras algodón/vidrio, se obtuvo un valor superior en la relación de resistencia/peso en comparación con la viga optimizada de aluminio 6061-T6. Este comportamiento se atribuye a que los materiales compuestos reforzados con fibras son generalmente menos densos en comparación con los metales, y a la distribución de las fibras de algodón y vidrio dentro de la viga.

d) La importancia de un alto valor en relación de resistencia/peso que se obtiene al trabajar con materiales compuestos permite obtener elementos estructurales ligeros y resistentes. Por lo tanto, los materiales compuestos tienen un alto potencial en el sector automotriz, energético, aeronáutico y aeroespacial.

5. Reconocimiento de autoría

Manuel Secundino Delgado: Investigación; Metodología; Análisis. *Dariana Ayli Sebastián Cruz:* Investigación; Metodología; Análisis. *Marcela Muñoz Martínez:* Investigación; Metodología; Análisis. *Evelyn Estrada Ramírez:* Investigación; Metodología; Análisis. *Erik Daniel Mauricio Jiménez:* Investigación;



Metodología; Análisis. *Enrique Alcudia Zacarias*: Conceptualización; Metodología; Investigación; Análisis; Escritura. *Juan Antonio Paz González*: Investigación; Análisis; Escritura. *Mauricio Leonel Paz González*: Investigación; Análisis. *Juan Antonio Ruíz Ochoa*: Investigación; Análisis.

Referencias

[1] M. Das, S. Sahu, and D. R. Parhi, "Composite materials and their damage detection using AI techniques for aerospace application: A brief review," *Mater Today Proc*, vol. 44, pp. 955-960, Jan. 2021, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.005>

[2] U. Fasel, D. Keidel, L. Baumann, G. Cavolina, M. Eichenhofer, and P. Ermanni, "Composite additive manufacturing of morphing aerospace structures," *Manuf Lett*, vol. 23, pp. 85-88, Jan. 2020, <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2019.12.004>

[3] A. Tiwary, R. Kumar, and J. S. Chohan, "A review on characteristics of composite and advanced materials used for aerospace applications," *Mater Today Proc*, vol. 51, pp. 865-870, Jan. 2022, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.06.276>

[4] S. M. Shohel, S. Sen Gupta, and S. H. Riyad, "Weight optimization and finite element analysis of automobile leaf spring: A design construction referred to electric vehicle," *IOP Conf Ser Mater Sci Eng*, vol. 1259, no. 1, p. 012024, Oct. 2022, <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1259/1/012024>

[5] F. Rubino, A. Nisticò, F. Tucci, and P. Carlone, "Marine Application of Fiber Reinforced Composites: A Review," *Journal of Marine Science and Engineering* 2020, Vol. 8, Page 26, vol. 8, no. 1, p. 26, Jan. 2020, <https://doi.org/10.3390/jmse8010026>

[6] S. S. P. Reddy, R. Suresh, M. B. Hanamantraygouda, and B. P. Shivakumar, "Use of composite materials and hybrid composites in wind turbine blades," *Mater Today Proc*, vol. 46, pp. 2827-2830, Jan. 2021, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.02.745>

[7] S. Kannivel, H. Subramanian, V. Arumugam, and H. N. Dhakal, "Low-Velocity Impact Induced Damage Evaluation and Its Influence on the Residual Flexural Behavior of Glass/Epoxy Laminates Hybridized with Glass Fillers," *Journal of Composites Science* 2020, Vol. 4, Page 99, vol. 4, no. 3, p. 99, Jul. 2020, <https://doi.org/10.3390/jcs4030099>

[8] A. A. Xavier da Silva, Í. J. de Araújo Silva, A. C. M. Miranda, A. Manes, and S. C. Amico, "Influence of hybridization on the mechanical and dynamic mechanical properties of aramid/S2-glass hybrid laminates," *Mater Today Commun*, vol. 32, p. 104021, Aug. 2022, <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2022.104021>

[9] M. Wang, Z. Pan, Z. Wu, and Z. Ying, "Effect of carbon/Kevlar asymmetric hybridization ratio on the low-velocity impact response of plain-woven laminates," *Compos Struct*, vol. 276, p. 114574, Nov. 2021, <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.114574>

[10] U. Szeluga, B. Kumanek, and B. Trzebicka, "Synergy in hybrid polymer/nanocarbon composites. A review," *Compos Part A Appl Sci Manuf*, vol. 73, pp. 204-231, Jun. 2015, <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2015.02.021>

[11] S. N. A. Safri, M. T. H. Sultan, M. Jawaid, and K. Jayakrishna, "Impact behaviour of hybrid composites for structural applications: A review," *Compos B Eng*, vol. 133, pp. 112-121, Jan. 2018,



<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.09.008>

[12] A. Wagih, T. A. Sebaey, A. Yudhanto, and G. Lubineau, "Post-impact flexural behavior of carbon-aramid/epoxy hybrid composites," *Compos Struct*, vol. 239, p. 112022, May 2020, <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112022>

[13] S. N. A. Safri, M. T. H. Sultan, M. Jawaid, and K. Jayakrishna, "Impact behaviour of hybrid composites for structural applications: A review," *Compos B Eng*, vol. 133, pp. 112-121, Jan. 2018, <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.09.008>

[14] M. Kalantari, C. Dong, and I. J. Davies, "Multi-objective robust optimisation of unidirectional carbon/glass fibre reinforced hybrid composites under flexural loading," *Compos Struct*, vol. 138, pp. 264-275, Mar. 2016, <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.11.034>

[15] G. Czél, M. Jalalvand, and M. R. Wisnom, "Design and characterisation of advanced pseudo-ductile unidirectional thin-ply carbon/epoxy-glass/epoxy hybrid composites," *Compos Struct*, vol. 143, pp. 362-370, May 2016, <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.02.010>

[16] R. Murugan, R. Ramesh, and K. Padmanabhan, "Investigation of the mechanical behavior and vibration characteristics of thin-walled glass/carbon hybrid composite beams under a fixed-free boundary condition," vol. 23, no. 8, pp. 909-916, Aug. 2016, <https://doi.org/10.1080/15376494.2015.1056394>

[17] E. Alcudia-Zacarías, A. Abúndez-Pliego, J. Mayén, J. Colín-Ocampo, A. Blanco-Ortega, and

W. M. Alcocer-Rosado, "Experimental Assessment of Residual Integrity and Balanced Mechanical Properties of GFRP/CFRP Hybrid Laminates under Tensile and Flexural Conditions," *Applied Composite Materials*, vol. 27, no. 6, pp. 895-914, Dec. 2020, <https://doi.org/10.1007/s10443-020-09839-x>

[18] K. L. Pickering, M. G. A. Efendy, and T. M. Le, "A review of recent developments in natural fibre composites and their mechanical performance," *Compos Part A Appl Sci Manuf*, vol. 83, pp. 98-112, Apr. 2016, <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2015.08.038>

[19] A. Wang, X. Liu, Q. Yue, and G. Xian, "Tensile properties hybrid effect of unidirectional flax/carbon fiber hybrid reinforced polymer composites," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 24, pp. 1373-1389, May 2023, <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.03.078>

[20] S. Saroj, S. Nayak, and D. K. Jesthi, "Effect of hybridization of carbon/glass/flax/kenaf fibre composite on flexural and impact properties," *Mater Today Proc*, vol. 49, pp. 502-506, Jan. 2022, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.03.094>

[21] G. Velmurugan, T. Shaafi, M. S. Bhagavathi, and V. Siva Shankar, "Evaluate the tensile, flexural and impact strength of hemp and flax based hybrid composites under cryogenic environment," *Mater Today Proc*, vol. 50, pp. 1326-1332, Jan. 2022, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.08.244>

[22] C. Dong, "Flexural properties of symmetric carbon and glass fibre reinforced hybrid composite laminates," *Composites Part C: Open Access*, vol. 3, p. 100047, Nov. 2020, <https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2020.100047>



- [23] A. Wagih, T. A. Sebaey, A. Yudhanto, and G. Lubineau, "Post-impact flexural behavior of carbon-aramid/epoxy hybrid composites," *Compos Struct*, vol. 239, p. 112022, May 2020, <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112022>
- [24] H. Jiang, X. Liu, S. Jiang, and Y. Ren, "Hybrid effects and interactive failure mechanisms of hybrid fiber composites under flexural loading: Carbon/Kevlar, carbon/glass, carbon/glass/Kevlar," *Aerosp Sci Technol*, vol. 133, p. 108105, Feb. 2023, <https://doi.org/10.1016/j.ast.2023.108105>
- [25] E. Massarwa, I. Emami Tabrizi, and M. Yildiz, "Mechanical behavior and failure of glass/carbon fiber hybrid composites: Multiscale computational predictions validated by experiments," *Compos Struct*, vol. 260, p. 113499, Mar. 2021, <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.113499>
- [26] A. Wang, X. Liu, Q. Yue, and G. Xian, "Tensile properties hybrid effect of unidirectional flax/carbon fiber hybrid reinforced polymer composites," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 24, pp. 1373-1389, May 2023, <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.03.078>
- [27] M. J. Mochane et al., "Recent progress on natural fiber hybrid composites for advanced applications: A review," *Express Polym Lett*, vol. 13, no. 2, pp. 159-198, Feb. 2019, <https://doi.org/10.3144/expresspolymlett.2019.15>
- [28] U. Kureemun, M. Ravandi, L. Q. N. Tran, W. S. Teo, T. E. Tay, and H. P. Lee, "Effects of hybridization and hybrid fibre dispersion on the mechanical properties of woven flax-carbon epoxy at low carbon fibre volume fractions," *Compos B Eng*, vol. 134, pp. 28-38, Feb. 2018, <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.09.035>
- [29] D. Chen, G. Sun, M. Meng, X. Jin, and Q. Li, "Flexural performance and cost efficiency of carbon/basalt/glass hybrid FRP composite laminates," *Thin-Walled Structures*, vol. 142, pp. 516-531, Sep. 2019, <https://doi.org/10.1016/j.tws.2019.03.056>
- [30] H. Wang, L. Yang, and H. Wu, "Study on mechanical and thermomechanical properties of flax/glass fiber hybrid-reinforced epoxy composites," *Polym Compos*, vol. 42, no. 2, pp. 714-723, Feb. 2021, <https://doi.org/10.1002/pc.25860>
- [31] X. Zou, H. Lin, P. Feng, Y. Bao, and J. Wang, "A review on FRP-concrete hybrid sections for bridge applications," *Compos Struct*, vol. 262, p. 113336, Apr. 2021, <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.113336>
- [32] S. Navaratnam, K. Selvaranjan, D. Jayasooriya, P. Rajeev, and J. Sanjayan, "Applications of natural and synthetic fiber reinforced polymer in infrastructure: A suitability assessment," *Journal of Building Engineering*, vol. 66, p. 105835, May 2023, <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.105835>
- [33] H. Auman, C. Stratford, and A. Palermo, "An Overview of Research and Applications of FRP in New Zealand Reinforced Concrete Structures", vol. 30, no. 2, pp. 201-208, Apr. 2020, <https://doi.org/10.1080/10168664.2019.1699491>
- [34] J. Smits, "Fiber-Reinforced Polymer Bridge Design in the Netherlands: Architectural Challenges toward Innovative, Sustainable, and Durable Bridges," *Engineering*, vol. 2, no. 4, pp. 518-527, Dec. 2016, <https://doi.org/10.1016/J.ENG.2016.04.004>



[35] G. Hegemier and L. Stewart, "Application of fiber-reinforced polymers to reinforced concrete bridges," *Innovative Bridge Design Handbook: Construction, Rehabilitation and Maintenance*, pp. 777-794, Jan. 2016, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800058-8.00030-X>

[36] J. Smits, "Fiber-Reinforced Polymer Bridge Design in the Netherlands: Architectural Challenges toward Innovative, Sustainable, and Durable Bridges," *Engineering*, vol. 2, no. 4, pp. 518-527, Dec. 2016, <https://doi.org/10.1016/J.ENG.2016.04.004>

[37] L. F. Hussein, F. S. Abbas, A. Al-Balhawi, A. S. D. AL-Ridha, and H. H. Hussein, "Investigating the elastic and plastic behavior of I-steel beams by using carbon fiber laminates," *Mater Today Proc*, vol. 56, pp. 2714-2720, Jan. 2022, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.09.396>

[38] L. Yan, J. Zhang, and K. Luo, "Numerical Analysis of Two I-shaped GFRP Composite Bridge with Corrugated Webs," *Advances in Civil Engineering*, vol. 2021, 2021, <https://doi.org/10.1155/2021/8869198>

[39] A. Siddika, M. A. Al Mamun, W. Ferdous, and R. Alyousef, "Performances, challenges and opportunities in strengthening reinforced concrete structures by using FRPs - A state-of-the-art review," *Eng Fail Anal*, vol. 111, p. 104480, Apr. 2020, <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104480>

[40] W. Chen, T. M. Pham, H. Sichembe, L. Chen, and H. Hao, "Experimental study of flexural behaviour of RC beams strengthened by longitudinal and U-shaped basalt FRP sheet," *Compos B Eng*, vol. 134, pp. 114-126, Feb. 2018, <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.09.053>

Derechos de Autor (c) 2023 Manuel Secundino Delgado, Dariana Ayli Sebastián Cruz, Marcela Muñoz Martínez, Evelyn Estrada Ramírez, Erik Daniel Mauricio Jiménez, Enrique Alcudia Zacarias, Juan Antonio Paz González, Mauricio Leonel Paz González, Juan Antonio Ruíz Ochoa



Este texto está protegido por una licencia [Creative Commons 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Usted es libre para compartir —copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato— y adaptar el documento —remezclar, transformar y crear a partir del material— para cualquier propósito, incluso para fines comerciales, siempre que cumpla la condición de:

Atribución: Usted debe dar crédito a la obra original de manera adecuada, proporcionar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que tiene el apoyo del licenciante o lo recibe por el uso que hace de la obra.

[Resumen de licencia](#) - [Texto completo de la licencia](#)