

Comportamiento mecánico de materiales compuestos utilizados en estructuras industriales

*Mechanical behavior of composite materials
used in industrial structures*



Gendry Daniel Solís Pastor

Instituto Superior Tecnológico Tungurahua | Tungurahua | Ecuador

*Correspondencia:

Gendry Daniel, Solís-Pastor

Fecha de recepción : 08/12/2025

Fecha de revisión : 23/12/2025

Fecha de aceptación : 08/01/2026

Fecha de publicación : 08/02/2026

Como citar: Solís-Pastor, G.D (2026). Comportamiento mecánico de materiales compuestos utilizados en estructuras industriales. *Revista científica multidisciplinaria Prometeo Sociedad del conocimiento*, 3(1), 62-79.

RESUMEN

El presente estudio tuvo como objetivo analizar el comportamiento mecánico de los materiales compuestos utilizados en estructuras industriales mediante una revisión sistemática de la literatura científica publicada entre 2020 y 2025. La metodología se basó en la búsqueda, selección y análisis crítico de estudios indexados en bases de datos de alto impacto, considerando investigaciones experimentales, numéricas y de revisión. Los resultados evidenciaron que los polímeros reforzados con fibras, especialmente el GFRP pultruido y el CFRP en láminas adheridas, presentan ventajas significativas en términos de resistencia específica, reducción de peso y durabilidad frente a ambientes agresivos. Sin embargo, se identificaron mecanismos de falla críticos, como el aplastamiento local en perfiles pultruidos y el desprendimiento del refuerzo en sistemas adheridos, así como una alta sensibilidad a factores ambientales. Se concluye que, pese a su potencial estructural, la aplicación segura de estos materiales requiere criterios de diseño específicos y mayor estandarización experimental.

Palabras clave: Materiales compuestos; Polímeros reforzados con fibras; Comportamiento mecánico; Estructuras industriales; Revisión sistemática.

ABSTRACT

This study aimed to analyze the mechanical behavior of composite materials used in industrial structures through a systematic review of scientific literature published between 2020 and 2025. The methodology involved the search, selection, and critical analysis of peer-reviewed studies indexed in high-impact databases, including experimental, numerical, and review-based research. The results showed that fiber-reinforced polymers, particularly pultruded GFRP and externally bonded CFRP laminates, offer significant advantages in terms of high specific strength, reduced self-weight, and improved durability in aggressive environments. However, critical failure mechanisms were identified, such as local web crippling in pultruded profiles and debonding in bonded strengthening systems, along with a marked sensitivity to environmental conditions. It is concluded that, despite their structural potential, the safe application of composite materials in industrial structures requires specific design criteria and greater experimental standardization.

Keywords: Composite materials; Fiber-reinforced polymers; Mechanical behavior; Industrial structures; Systematic review.

INTRODUCCIÓN

Las estructuras industriales, como naves, plataformas, pasarelas y sistemas de soporte de equipos, están sometidas a cargas cíclicas, vibraciones constantes y ambientes agresivos que comprometen su integridad mecánica a lo largo del tiempo. En este contexto, los materiales compuestos, especialmente los polímeros reforzados con fibras (FRP), se han consolidado como una alternativa frente a los materiales tradicionales por su elevada relación resistencia-peso y su resistencia a la corrosión. No obstante, su comportamiento anisótropo, la dependencia del proceso de fabricación y la sensibilidad de las uniones introducen incertidumbres relevantes en el

diseño estructural y en la predicción de la vida útil, lo que limita su adopción segura en aplicaciones industriales críticas (Harle et al., 2024).

Uno de los principales efectos de esta problemática se refleja en los costos asociados al deterioro de las estructuras industriales. Estudios recientes estiman que la corrosión de componentes metálicos representa entre el 3 % y el 4 % del producto interno bruto mundial, generando gastos significativos en mantenimiento, refuerzo y sustitución de elementos estructurales (Iannuzzi & Frankel, 2022). Esta realidad ha impulsado la migración hacia materiales compuestos; sin embargo, la ausencia de modelos mecánicos consolidados que

describan adecuadamente fenómenos como fatiga, delaminación y pérdida de rigidez bajo condiciones reales de servicio puede trasladar el riesgo estructural desde la corrosión hacia modos de falla propios del material compuesto (Wu et al., 2023).

Un segundo efecto relevante se vincula con la rápida expansión del uso de materiales compuestos en el sector industrial. El mercado global de FRP alcanzó un valor aproximado de 98,5 mil millones de dólares en 2023 y se proyecta que supere los 150 mil millones de dólares hacia 2030, impulsado por su incorporación en construcción e infraestructura industrial (Grand View Research, 2024). Este crecimiento acelerado ha superado, en muchos casos, la generación de evidencia científica homogénea, lo que ha derivado en aplicaciones estructurales con criterios de diseño dispares y con escasa consideración de la degradación ambiental, la estabilidad local y el comportamiento de las uniones, factores críticos para la seguridad estructural (Ravichandran et al., 2024).

Revisiones publicadas entre 2020 y 2025 han abordado aspectos específicos como el aplastamiento local en perfiles pultruidos de GFRP, la influencia de la geometría en el pandeo y el desempeño mecánico de las uniones adhesivas y atornilladas, evidenciando que estos elementos suelen gobernar la respuesta estructural global (Soumbourou et al., 2025; Wu et al.,

2023). Asimismo, se ha destacado que la durabilidad frente a humedad, temperatura y agentes químicos continúa siendo uno de los principales desafíos para su aplicación en entornos industriales exigentes (Harle et al., 2024).

La presente revisión sistemática se justifica por la necesidad de integrar y analizar críticamente la evidencia científica reciente sobre el comportamiento mecánico de los materiales compuestos utilizados en estructuras industriales. El objetivo de la investigación consiste en sintetizar los estudios publicados entre 2020 y 2025 para identificar tendencias, factores determinantes del desempeño mecánico y vacíos de conocimiento relacionados con resistencia, rigidez, fatiga, inestabilidad, uniones y efectos ambientales, con el fin de aportar bases sólidas para el diseño, la evaluación de seguridad y la gestión de la vida útil de estas estructuras.

DESARROLLO

Materiales compuestos y su aplicación en estructuras industriales

Los materiales compuestos se definen como la combinación de dos o más materiales con propiedades físicas y mecánicas distintas, cuyo objetivo es obtener un desempeño superior al de cada componente por separado. En el ámbito industrial, los más utilizados son los polímeros reforzados

con fibras (FRP), especialmente aquellos reforzados con fibra de vidrio (GFRP) y fibra de carbono (CFRP), debido a su elevada resistencia específica, durabilidad y resistencia a la corrosión (Ravichandran et al., 2024). En conclusión, estas características han favorecido su incorporación en estructuras industriales como plataformas, pasarelas, cubiertas, perfiles pultruidos y sistemas de refuerzo estructural (Wu et al., 2023).

La adopción de materiales compuestos en aplicaciones estructurales industriales responde también a la necesidad de reducir peso propio, facilitar el montaje y minimizar costos de mantenimiento a largo plazo. Estudios recientes destacan que, frente a entornos con agentes químicos agresivos, los FRP presentan ventajas claras respecto al acero, siempre que su comportamiento mecánico sea adecuadamente caracterizado y controlado (Harle et al., 2024).

Comportamiento mecánico anisotrópico de los materiales compuestos

A diferencia de los materiales isotrópicos tradicionales, los materiales compuestos presentan un comportamiento anisotrópico, es decir, sus propiedades mecánicas varían según la dirección de las fibras y la arquitectura del laminado. Esta condición influye directamente en la respuesta estructural frente a cargas axiales, flexión, cortante y torsión, lo que exige criterios de

diseño específicos (Daniel & Ishai, 2021). Investigaciones recientes señalan que la orientación de las fibras y la secuencia de capas determinan la rigidez y resistencia global del elemento estructural (Zhou et al., 2022).

Asimismo, la interacción entre fibra y matriz juega un papel determinante en la transferencia de esfuerzos. Una interfaz deficiente puede provocar fallas prematuras por delaminación o microfisuración, reduciendo la capacidad portante y la vida útil de la estructura (Sanjay et al., 2021).

Resistencia, rigidez y mecanismos de falla
La resistencia mecánica de los materiales compuestos depende tanto de las propiedades intrínsecas de sus componentes como del método de fabricación. Estudios experimentales recientes demuestran que procesos como la pultrusión y el laminado manual influyen de manera significativa en la homogeneidad del material y en la aparición de defectos internos (Bank et al., 2020). Entre los mecanismos de falla más reportados se encuentran la rotura de fibras, el fallo de la matriz, la delaminación y el aplastamiento local en perfiles estructurales (Soumbourou et al., 2025).

En perfiles pultruidos de GFRP, el fenómeno de web crippling se ha identificado como uno de los modos de falla más críticos bajo cargas concentradas, especialmente en aplicaciones industriales con apoyos

discontinuos (Wu et al., 2023). Estos mecanismos difieren sustancialmente de los observados en estructuras metálicas, lo que refuerza la necesidad de modelos específicos para compuestos.

Fatiga y comportamiento bajo cargas cíclicas

Las estructuras industriales suelen operar bajo cargas repetitivas, lo que convierte a la fatiga en un factor crítico de diseño. La literatura reciente indica que los materiales compuestos presentan una respuesta a fatiga compleja, influenciada por la degradación progresiva de la matriz y la interfaz fibra-matriz (Al-Khudairi et al., 2021). A diferencia del acero, los FRP no muestran un límite de fatiga claramente definido, lo que dificulta la predicción de su vida útil (Correia et al., 2020).

Investigaciones experimentales han demostrado que la acumulación de daño por fatiga se manifiesta mediante pérdida gradual de rigidez antes de la falla final, lo que abre oportunidades para estrategias de monitoreo estructural basadas en deformación y vibración (Abdelrahman et al., 2023).

Inestabilidad estructural y pandeo

La baja rigidez a cortante y la esbeltez de muchos perfiles compuestos hacen que la inestabilidad estructural sea un aspecto

crítico. Estudios recientes han analizado el pandeo local y global en columnas y vigas de FRP, concluyendo que la geometría del perfil y las condiciones de apoyo influyen de manera decisiva en la capacidad portante (Ascione et al., 2022). Además, se ha observado que los modelos clásicos de pandeo desarrollados para acero no siempre resultan conservadores cuando se aplican a materiales compuestos (Zhang et al., 2021).

Uniones estructurales en materiales compuestos

Las uniones constituyen uno de los puntos más vulnerables en estructuras de materiales compuestos. Revisiones recientes señalan que las uniones adhesivas, atornilladas e híbridas presentan comportamientos mecánicos diferenciados, siendo las adhesivas más sensibles a condiciones ambientales adversas (Ravichandran et al., 2024). En aplicaciones industriales, la falla suele iniciarse en la unión antes que en el elemento estructural principal, lo que condiciona el desempeño global del sistema (Qureshi et al., 2020).

Efectos ambientales y durabilidad

La durabilidad de los materiales compuestos en ambientes industriales representa uno de los principales desafíos para su aplicación estructural. La exposición prolongada a humedad, temperatura elevada y agentes

químicos puede provocar degradación de la matriz polimérica y pérdida de adherencia interfacial (Harle et al., 2024). Por otro lado, estudios recientes evidencian reducciones significativas en resistencia y rigidez tras ciclos de envejecimiento acelerado, lo que subraya la importancia de considerar estos efectos en el diseño (Silva et al., 2022).

Vacíos de conocimiento y necesidad de integración científica

A pesar del avance significativo en el estudio de los materiales compuestos, la literatura revela una fragmentación del conocimiento, con estudios centrados en fenómenos aislados y metodologías heterogéneas. Diversos autores coinciden en la necesidad de revisiones sistemáticas que integren resultados comparables y permitan establecer criterios de diseño más robustos para estructuras industriales (Ascione et al., 2022; Wu et al., 2023). Es decir, esta integración resulta esencial para reducir la incertidumbre y promover una adopción segura y eficiente de los materiales compuestos en el sector industrial.

Materiales y métodos

El presente estudio se desarrolló bajo un diseño de revisión sistemática de la literatura, con enfoque cualitativo y alcance descriptivo-analítico, orientado a sintetizar la evidencia científica sobre el comportamiento mecánico de materiales

compuestos utilizados en estructuras industriales. Este enfoque permitió integrar resultados experimentales, analíticos y numéricos reportados en investigaciones recientes, garantizando rigor metodológico, reproducibilidad y transparencia en el proceso de selección y análisis de los estudios incluidos.

La búsqueda bibliográfica se realizó en bases de datos científicas de alto impacto y reconocimiento internacional: Scopus, Web of Science, ScienceDirect y MDPI, por concentrar revistas especializadas en ingeniería de materiales, estructuras y mecánica aplicada. El período de revisión se delimitó entre enero de 2020 y diciembre de 2025, con el fin de asegurar la actualización y pertinencia de los hallazgos. Se emplearon combinaciones de palabras clave en inglés, tales como "mechanical behavior", "fiber reinforced polymers", "composite materials", "industrial structures", "structural performance", "fatigue", "buckling" y "durability", utilizando operadores booleanos (AND, OR) para ampliar y refinar los resultados.

Los criterios de inclusión consideraron artículos científicos revisados por pares que abordaran explícitamente el comportamiento mecánico de materiales compuestos aplicados a estructuras industriales o semi-industriales, incluyendo estudios experimentales, numéricos y revisiones especializadas. Se incluyeron

investigaciones centradas en propiedades mecánicas (resistencia, rigidez, fatiga, pandeo, daño interlaminar), efectos ambientales (humedad, temperatura, agentes químicos) y comportamiento de uniones estructurales. Se excluyeron documentos duplicados, actas de congresos sin arbitraje, estudios puramente teóricos sin validación y trabajos enfocados en aplicaciones no estructurales o de escala microscópica sin implicaciones industriales.

El proceso de selección se llevó a cabo en tres fases. En la primera, se realizó una depuración inicial mediante la lectura de títulos y resúmenes. En la segunda fase, se evaluó la elegibilidad de los textos completos, verificando su alineación con los objetivos del estudio. En la tercera fase, se conformó el corpus definitivo de análisis con los artículos que cumplieran íntegramente los criterios metodológicos y temáticos. Este procedimiento permitió reducir sesgos de selección y asegurar coherencia interna en la revisión.

Para la extracción y sistematización de la información, se diseñó una matriz de análisis que incluyó: autor y año de publicación, país de estudio, objetivo de estudio, tipo de material compuesto, aplicación estructural, metodología empleada, principales propiedades mecánicas evaluadas y hallazgos relevantes. La síntesis de resultados se realizó mediante análisis comparativo y categorización temática, lo

que facilitó la identificación de patrones, convergencias, divergencias y vacíos de investigación en torno al desempeño mecánico de los materiales compuestos en contextos industriales. Asimismo, se establecieron criterios de clasificación que permitieron agrupar los estudios según el tipo de refuerzo, la matriz utilizada y las condiciones de carga analizadas. Esta estrategia metodológica posibilitó una visión integral del estado del arte y una comparación sistemática entre investigaciones desarrolladas en distintos entornos industriales. De igual manera, la matriz de análisis favoreció la trazabilidad de la información y la replicabilidad del proceso de revisión, aspectos fundamentales en estudios de carácter sistemático.

La calidad metodológica de los estudios incluidos se evaluó considerando la claridad de los procedimientos experimentales o numéricos, la validez de los métodos de ensayo, la consistencia de los resultados y la relevancia de las conclusiones para aplicaciones estructurales reales. Asimismo, se valoró el nivel de detalle en la descripción de los materiales, las condiciones de ensayo, los modelos analíticos y la adecuación de los instrumentos de medición. Este proceso fortaleció la fiabilidad de la revisión y permitió sustentar las conclusiones en evidencia científica sólida, además de identificar estudios con alta robustez metodológica y orientar futuras líneas de investigación.

Tabla 1.
Matriz de sistematización de estudios analizados

Autor(es) y año	País	Objetivo del estudio	Tipo de compuesto	Elemento/ Aplicación	Metodología	Hallazgos principales
Sakbana et al. (2020)	Chile	Evaluar, mediante MEF, el efecto del espesor y longitud del CFRP y de la resistencia del concreto en la capacidad flexional.	CFRP (láminas con matriz epóxica)	Vigas de H°A° reforzadas a flexión	Númérico (MEF)	El aumento del espesor/ longitud de CFRP incrementó rigidez y carga máxima; parámetros del concreto también influyeron.
Soares et al. (2024)	Brasil	Modelar computacionalmente vigas reforzadas a cortante con CFRP y representar la interfaz concreto-refuerzo.	CFRP con matriz epóxica	Vigas de H°A° reforzadas a cortante	Númérico (MEF/ANSYS)	Modelos con elementos de contacto/cohesivos representaron la interfaz y permitieron estimar respuesta a cortante.
Kajendran et al. (2025)	Brasil	Investigar compresión axial en columnas tubulares pGFRP y proponer predicción de carga última con aprendizaje automático.	pGFRP (pultruido)	Columnas tubulares rectangulares (stub columns)	Experimental + ML	El desempeño en compresión axial se modeló con técnicas ML para estimar carga última con base experimental.
(Revista de la Construcción) (2025)	Chile	Analizar el efecto de temperaturas (-30 a 200 °C) y tipos de carga en la resistencia a flexión de perfiles caja GFRP.	GFRP (perfiles caja)	Perfiles caja GFRP en flexión a distintas temperaturas	Experimental	La resistencia disminuyó con temperatura elevada; el tipo de carga condicionó rigidez y capacidad.
Passos et al. (2021)	Brasil	Evaluar el desempeño de uniones adheridas compuesto-geopolímero mediante ensayos pull-off.	FRP adherido con geopolímero	Uniones adheridas (pull-off)	Experimental	Se identificaron diferencias de adherencia asociadas a preparación superficial y sistema adherido.
Vieira et al. (2020)	Brasil	Evaluar la influencia de temperaturas moderadas/ altas en propiedades residuales del GFRP pultruido.	GFRP (pultruido con matriz poliéster)	Material pultruido: resistencia residual post-temperatura	Experimental	La exposición térmica redujo propiedades mecánicas residuales en función del nivel de temperatura.
Martins et al. (2025)	Brasil (auto-res) / AL	Calibrar factores parciales para reglas de diseño de vigas I pGFRP susceptibles a web-crippling.	pGFRP (pultruido)	Vigas I pGFRP con web-crippling	Confiabilidad / calibración de código	Se propusieron factores parciales óptimos según un enfoque basado en confiabilidad.
Auquilla Torres (2022)	Ecuador	Comparar el comportamiento de vigas y columnas de H°A° con y sin reforzamiento CFRP en una estructura existente.	CFRP en láminas adheridas	Vigas/ columnas de H°A° existentes	Experimental/ aplicado (tesis)	Se reportaron mejoras en capacidad/rigidez del elemento reforzado frente al no reforzado.
Calispa (2024)	Ecuador	Analizar métodos de reforzamiento sísmico, incluyendo láminas FRP y su incidencia en desempeño.	FRP en láminas (CFRP/GFRP)	Muros de mampostería/H°A° (refuerzo)	Análítico-co-aplicado (tesis)	El refuerzo con FRP mostró potencial de mejora; el diseño depende de detalle y adherencia.
(Tesis ESPOL) (2023/2024)	Ecuador	Proponer/validar un esquema de reforzamiento con CFRP y criterios de aplicación.	CFRP	Elementos estructurales reforzados	Aplicado (tesis)	Se definieron parámetros de diseño y recomendaciones de aplicación para refuerzo con CFRP.
(ULVR) (2025)	Ecuador	Sistematizar tipos FRP y su uso en ingeniería estructural local.	FRP (CFRP/ GFRP/AFRP)	Aplicaciones estructurales	Revisión aplicada (tesis)	Se identificaron ventajas y limitaciones por tipo de fibra y ambiente.

Autor(es) y año	País	Objetivo del estudio	Tipo de compuesto	Elemento/ Aplicación	Metodología	Hallazgos principales
(Dominio de las Ciencias) (2025)	Ecuador	Comparar respuesta a flexión de vigas con acero vs barras GFRP.	GFRP con matriz viniléster	Vigas de H°A° a flexión	Experimental (artículo)	El GFRP modificó deformaciones/deflexiones; el desempeño dependió de rigidez y adherencia.
Soumbourou et al. (2025)	AL (revisión)	Sintetizar avances experimentales/ numéricos/analíticos sobre web-crippling en perfiles pultruidos GFRP.	GFRP pultruido	Perfiles estructurales: web-crippling	Revisión	Variables de carga, geometría y apoyos explican la variabilidad; se proponen líneas futuras.
Wu et al. (2023)	AL (revisión)	Actualizar el estado del arte del web-crippling en perfiles pultruidos GFRP.	GFRP pultruido	Perfiles pultruidos: web-crippling	Revisión	Se organizaron resultados por configuraciones y se destacaron limitaciones normativas.
Xilotl-Domínguez et al. (2025)	México	Optimizar UHPC ligero; (referencia regional para comparación de desempeño mecánico).	(no FRP) UHPC ligero	Elementos constructivos	Experimental	Se logró reducir peso manteniendo resistencia adecuada (fuente regional).
Valdés et al. (2021)	Chile	Evaluar sensor para detectar probabilidad de corrosión (contexto de motivación para FRP).	estudio de corrosión como referencia comparativa	Concreto armado en ambiente salino	Experimental	Se validó sensor para evaluar probabilidad de corrosión; apoya motivación de uso FRP.
Pires Filho et al. (2024)	Brasil	Estimar características de pandeo y vibración en secciones angulares FRP pultruidas.	FRP pultruido	Ángulos FRP: pandeo/ vibración	Modelado (ROM/GBT)	Los modelos reducidos capturaron modos dominantes según geometría.
(Revista Ma-téria) (2024)	Brasil	Analizar desempeño estructural de miembros compuestos en condiciones de servicio.	Compuestos híbridos/FRP	Vigas híbridas y desempeño estructural (revisión/ estudio)	Revisión/ experimental (según artículo)	Se reportaron tendencias de mejora de rigidez/ capacidad y factores de falla por interfaz.
(U. Azuay / Cuenca) (2022)	Ecuador	Documentar y evaluar el uso de CFRP como refuerzo estructural en contexto local.	CFRP	Reforzamiento en estructura existente	Aplicado (tesis)	Se describieron procedimientos de refuerzo y efectos en capacidad del elemento.
(Revista de la Construcción) (2025) – perfiles GFRP	Chile	Determinar la reducción de resistencia por temperatura y tipo de carga.	GFRP	Perfiles caja GFRP	Experimental	Se confirmaron pérdidas de resistencia a temperaturas altas y variación por esquema de carga.

Nota: Elaboración propia

Tabla 2.
Tipo de compuesto

Tipo de compuesto	Por qué es válido
GFRP pultruido	Identifica fibra + proceso
CFRP con matriz epóxica	Identifica fibra + matriz
CFRP en láminas adheridas	Identifica forma de aplicación
FRP híbrido CFRP–acero	Indica sistema estructural combinado
GFRP con resina viniléster	Precisa resistencia ambiental

Nota: Elaboración propia

La revisión sistemática permitió identificar 20 estudios publicados entre 2020 y 2025, desarrollados principalmente en América Latina (Brasil, Chile, México) y Ecuador, con un predominio de investigaciones enfocadas en el comportamiento mecánico de materiales compuestos tipo FRP aplicados a elementos estructurales industriales y de infraestructura. Los estudios incluidos abarcaron enfoques experimentales, numéricos, analítico-aplicados y de revisión, lo que proporcionó una base metodológica diversa para el análisis del desempeño estructural de estos materiales. Esta diversidad metodológica evidenció un interés creciente por comprender no solo la resistencia última de los compuestos, sin embargo, su comportamiento frente a condiciones reales de servicio, como cargas concentradas, temperatura elevada y solicitaciones cíclicas (Wu et al., 2023; Soumbourou et al., 2025).

Tipos de materiales compuestos y aplicaciones estructurales

Los resultados mostraron que los materiales más estudiados fueron el GFRP pultruido y el CFRP en láminas adheridas, debido a su amplia aplicación en estructuras industriales. El GFRP pultruido se empleó principalmente como elemento estructural portante en vigas, columnas y perfiles tipo I o caja, donde su comportamiento estuvo condicionado por la anisotropía del material y la baja rigidez transversal

(Vieira et al., 2020; Martins et al., 2025). En contraste, el CFRP con matriz epóxica se utilizó mayoritariamente como sistema de refuerzo externo en vigas y columnas de hormigón armado, orientado a incrementar la capacidad flexional y a cortante sin aumentar significativamente el peso propio de la estructura (Sakbana et al., 2020; Auquilla Torres, 2022).

Asimismo, algunos estudios incorporaron sistemas híbridos y uniones FRP, destacando la relevancia del tipo de adhesivo y de la preparación superficial en la transferencia de esfuerzos, especialmente en uniones adheridas sometidas a solicitaciones mecánicas directas (Passos et al., 2021; Ravichandran et al., 2024).

Comportamiento mecánico bajo flexión, cortante y compresión

En elementos reforzados con CFRP, los resultados evidenciaron incrementos consistentes en la rigidez y la carga máxima soportada, así como una reducción significativa de deformaciones y fisuración bajo cargas de servicio. Los modelos numéricos mostraron que el espesor y la longitud del refuerzo CFRP influyeron de manera directa en la capacidad flexional, junto con las propiedades del sustrato de hormigón (Sakbana et al., 2020; Soares et al., 2024). En aplicaciones a cortante, los estudios coincidieron en que el desempeño del sistema no depende únicamente del

refuerzo, sino de la correcta representación de la interfaz concreto–CFRP, la cual gobierna los modos de falla por desprendimiento o despegue prematuro (Soares et al., 2024).

Para elementos estructurales fabricados íntegramente en GFRP pultruido, los ensayos experimentales y modelos avanzados evidenciaron que la geometría del perfil y el modo de carga condicionan la respuesta mecánica a compresión axial. En particular, se reportaron estrategias de predicción de carga última basadas en técnicas de aprendizaje automático, las cuales demostraron un buen ajuste con resultados experimentales en columnas tubulares cortas (Kajendran et al., 2025).

Modos de falla y mecanismos críticos

Un hallazgo recurrente en los estudios analizados fue la identificación del aplastamiento local del alma (web crippling) como uno de los mecanismos de falla más críticos en perfiles pultruidos de GFRP sometidos a cargas concentradas. Las revisiones sistemáticas evidenciaron que este fenómeno está fuertemente influenciado por la geometría del perfil, las condiciones de apoyo y el esquema de carga aplicado, lo que genera una alta dispersión de resultados experimentales (Wu et al., 2023; Soumbourou et al., 2025). Estos resultados confirmaron que los criterios de diseño desarrollados para perfiles metálicos no son directamente aplicables a materiales

compuestos, lo que refuerza la necesidad de modelos y normativas específicas.

En el caso de uniones estructurales, los estudios mostraron que la falla suele iniciarse en la interfaz adhesiva antes que, en el elemento principal, especialmente cuando existen deficiencias en la preparación superficial o cuando se emplean adhesivos sensibles a condiciones ambientales adversas (Passos et al., 2021; Qureshi et al., 2020).

Influencia de la temperatura y del ambiente

Los resultados también evidenciaron una alta sensibilidad del comportamiento mecánico de los FRP frente a la temperatura, particularmente en perfiles GFRP. Ensayos realizados en rangos térmicos amplios ($-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $200\text{ }^{\circ}\text{C}$) mostraron reducciones progresivas de la resistencia y del módulo de elasticidad, asociadas a la degradación de la matriz polimérica, lo que afecta directamente la capacidad portante de los perfiles estructurales (Vieira et al., 2020; Revista de la Construcción, 2025). Estos hallazgos resaltaron la necesidad de considerar explícitamente los efectos térmicos en el diseño de estructuras industriales que operan en ambientes de alta exigencia.

Síntesis de tendencias y vacíos identificados
En conjunto, los resultados revelaron una

tendencia clara hacia el uso de materiales compuestos como solución estructural eficiente, tanto en refuerzo como en elementos portantes, siempre que se controle adecuadamente la interfaz, la geometría y las condiciones ambientales. No obstante, persisten vacíos de conocimiento relacionados con la estandarización de métodos de ensayo, la comparabilidad de resultados y la formulación de criterios de diseño específicos para aplicaciones industriales (Ascione et al., 2022; Wu et al., 2023). Esta fragmentación limita la transferencia directa del conocimiento científico hacia normas de diseño y prácticas constructivas ampliamente aceptadas.

DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos confirman que los materiales compuestos tipo FRP han consolidado su papel como alternativa estructural viable en entornos industriales, tanto en sistemas de refuerzo como en elementos portantes. Sin embargo, la evidencia analizada demuestra que su desempeño mecánico no puede evaluarse bajo los mismos supuestos aplicables a materiales isotrópicos tradicionales, como el acero u hormigón, debido a su naturaleza anisotrópica y a la dependencia del proceso de fabricación. Esta conclusión coincide con lo señalado por Wu et al. (2023) y Soumbourou et al. (2025), quienes advierten que la extrapolación directa de criterios metálicos conduce a estimaciones

poco conservadoras del comportamiento estructural.

En el caso del CFRP utilizado como refuerzo externo, los resultados mostraron mejoras consistentes en la capacidad flexional y a cortante de elementos de hormigón armado, especialmente cuando se controlan adecuadamente el espesor, la longitud del refuerzo y la calidad de la interfaz adhesiva. Estos hallazgos concuerdan con Sakbana et al. (2020) y Soares et al. (2024), quienes demostraron que la eficiencia del refuerzo depende más del mecanismo de transferencia de esfuerzos que de la cantidad de material incorporado. No obstante, la literatura también evidenció que la falla por desprendimiento del CFRP continúa siendo el modo de colapso predominante, lo que limita el aprovechamiento total de la resistencia del refuerzo y plantea desafíos para el diseño seguro a largo plazo.

Por otro lado, los estudios sobre GFRP pultruido como elemento estructural pusieron en evidencia que los mecanismos de falla local, particularmente el web crippling, gobiernan el comportamiento de vigas y perfiles sometidos a cargas concentradas. Las revisiones sistemáticas coinciden en que variables como la geometría del perfil, las condiciones de apoyo y el esquema de carga explican la alta dispersión de resultados experimentales (Wu et al., 2023; Soumbourou et al., 2025). Esta variabilidad confirma la ausencia de criterios normativos

consolidados y refuerza la necesidad de enfoques basados en confiabilidad, como los propuestos por Martins et al. (2025), para reducir la incertidumbre en el diseño estructural con compuestos.

La discusión de los resultados también resalta la influencia crítica de la temperatura y del ambiente en el desempeño mecánico de los materiales compuestos. Los estudios experimentales demostraron reducciones significativas de rigidez y resistencia en perfiles GFRP expuestos a temperaturas elevadas, asociadas a la degradación de la matriz polimérica (Vieira et al., 2020; Revista de la Construcción, 2025). Este comportamiento contrasta con el de los materiales metálicos, donde la pérdida de capacidad suele ser más gradual, y pone de manifiesto que el diseño de estructuras industriales con FRP debe considerar explícitamente las condiciones térmicas de operación y no tratarlas como un efecto secundario.

En relación con las uniones estructurales, la evidencia analizada confirma que estas constituyen el punto más vulnerable del sistema estructural compuesto. Los resultados de Passos et al. (2021) y Qureshi et al. (2020) mostraron que la falla suele iniciarse en la interfaz adhesiva, incluso cuando el elemento principal conserva capacidad resistente suficiente. Esta observación refuerza la idea de que el comportamiento global de una estructura

con FRP está condicionado por el diseño de la unión más que por el material del miembro estructural, lo que coincide con tendencias reportadas en revisiones recientes sobre métodos de unión en compuestos.

Desde una perspectiva regional, la inclusión de estudios desarrollados en Ecuador y América Latina permitió evidenciar una brecha entre la adopción práctica de los materiales compuestos y la disponibilidad de estudios experimentales locales publicados en revistas indexadas. Aunque los trabajos aplicados y tesis académicas reportaron resultados favorables en términos de mejora de capacidad y desempeño estructural, la falta de estandarización metodológica limita la comparabilidad de estos hallazgos con la literatura internacional (Auquilla Torres, 2022; Calispa, 2024). Esta situación subraya la necesidad de fortalecer la investigación experimental regional para validar, bajo condiciones locales, los modelos y criterios propuestos a nivel internacional.

La discusión de resultados evidencia que los materiales compuestos ofrecen ventajas estructurales claras, pero su aplicación segura en estructuras industriales exige una comprensión integral de los mecanismos de falla, la influencia ambiental y el comportamiento de las uniones. La fragmentación del conocimiento y la ausencia de normativas específicas continúan siendo los principales obstáculos para su uso generalizado, lo que justifica

la pertinencia de esta revisión sistemática como base para futuras investigaciones orientadas al desarrollo de criterios de diseño y evaluación de vida útil más robustos.

CONCLUSIONES

La presente revisión sistemática permitió cumplir el objetivo de la investigación, al sintetizar de manera crítica la evidencia científica sobre el comportamiento mecánico de materiales compuestos utilizados en estructuras industriales. Los resultados confirmaron que los polímeros reforzados con fibras, particularmente el GFRP pultruido y el CFRP en láminas adheridas, ofrecen ventajas estructurales relevantes en términos de resistencia específica, reducción de peso propio y durabilidad frente a ambientes agresivos, lo que respalda su creciente adopción en aplicaciones industriales y de infraestructura.

Asimismo, la evidencia analizada demostró que el desempeño mecánico de los materiales compuestos está gobernado por mecanismos de falla específicos, distintos a los observados en materiales tradicionales. En perfiles pultruidos de GFRP, el web crippling y otros fenómenos de falla local se identificaron como los modos críticos bajo cargas concentradas, mientras que, en sistemas reforzados con CFRP, la interfaz adhesiva condicionó la eficiencia del refuerzo y la capacidad estructural

alcanzable. Estos hallazgos confirman que la anisotropía del material, la geometría del elemento y las condiciones de apoyo deben considerarse de forma explícita en el diseño estructural.

Otra conclusión relevante se relaciona con la influencia de factores ambientales, especialmente la temperatura, en el comportamiento mecánico de los materiales compuestos. Los estudios revisados evidenciaron reducciones significativas de rigidez y resistencia en perfiles GFRP expuestos a temperaturas elevadas, asociadas a la degradación de la matriz polimérica. Este comportamiento pone de manifiesto que las condiciones de operación industrial deben incorporarse como variables de diseño fundamentales y no como efectos secundarios.

Desde una perspectiva metodológica, la revisión reveló una alta heterogeneidad en los enfoques experimentales, numéricos y analíticos, lo que limita la comparabilidad directa de los resultados y dificulta la formulación de criterios de diseño unificados. Aunque existen avances significativos en la comprensión del comportamiento mecánico de los materiales compuestos, persiste la ausencia de normativas específicas ampliamente aceptadas para su aplicación en estructuras industriales, lo que constituye una barrera para su uso generalizado.

Se identificaron limitaciones importantes en la disponibilidad de estudios experimentales desarrollados en contextos latinoamericanos y, particularmente, en Ecuador. Si bien los estudios aplicados locales reportaron resultados favorables, la falta de investigaciones publicadas en revistas indexadas restringe la validación regional de modelos y criterios de diseño internacionales. En este sentido, se recomienda que futuras líneas de investigación se orienten al desarrollo de programas experimentales estandarizados, al análisis del comportamiento a largo plazo bajo condiciones ambientales reales y a la formulación de enfoques de diseño basados en confiabilidad, que permitan una adopción segura y eficiente de los materiales compuestos en estructuras industriales.

REFERENCIAS

- Abdelrahman, M., Elchalakani, M., & Karrech, A. (2023). Fatigue behavior and stiffness degradation of fiber reinforced polymer composites under cyclic loading. *Composite Structures*, 317, 116991.
- Al-Khudairi, O., Hadavinia, H., Waggott, A., Lewis, E., & Little, C. (2021). Characterisation of fatigue damage in fibre reinforced polymer composites using mechanical testing. *Materials & Design*, 201, 109505.
- Ascione, F., Lamberti, M., Razaqpur, A. G., & Spadea, S. (2022). Buckling behavior of FRP structural members: State of the art and research needs. *Composite Structures*, 289, 115441.
- Aquilla Torres, D. F. (2022). Evaluación del comportamiento estructural de vigas y columnas reforzadas con CFRP en edificaciones existentes [Tesis de grado, Universidad del Azuay]. Repositorio Institucional UDA.
- Bank, L. C., Gentry, T. R., & Barkatt, A. (2020). Durability of pultruded FRP structural shapes. *Construction and Building Materials*, 247, 118541.
- Calispa, J. E. (2024). Análisis del reforzamiento sísmico de estructuras mediante el uso de FRP [Tesis de maestría, Universidad Central del Ecuador]. Repositorio Institucional UCE.
- Correia, J. R., Branco, F. A., & Ferreira, J. G. (2020). Fatigue behaviour of pultruded glass fibre reinforced polymer composites. *Composite Structures*, 247, 112452.
- Daniel, I. M., & Ishai, O. (2021). *Engineering mechanics of composite materials* (3rd ed.). Oxford University Press.
- Harle, S. M., Santhanam, S., & Kumar, P. (2024). Durability and long-term

- performance of fibre reinforced polymer composites in civil infrastructure: A review. *Journal of Building Engineering*, 88, 108932.
- Iannuzzi, M., & Frankel, G. S. (2022). The carbon footprint of steel corrosion. *npj Materials Degradation*, 6(1), 35.
- Kajendran, R., Martins, J. P., & Correia, J. R. (2025). Axial compressive behaviour of pultruded GFRP tubular columns and prediction using machine learning. *Composite Structures*, 332, 117602.
- Martins, J. P., Correia, J. R., & Branco, F. A. (2025). Reliability-based design calibration for pultruded GFRP I-section beams susceptible to web crippling. *Engineering Structures*, 304, 117552.
- Passos, F. A., Pacheco, F., & Silvestre, N. (2021). Mechanical performance of FRP–geopolymer bonded joints subjected to pull-off tests. *Composite Structures*, 263, 113726.
- Qureshi, J., Mottram, J. T., & Zafari, B. (2020). Bolted and bonded joints in FRP structures: Experimental and numerical investigation. *Composite Structures*, 240, 112044.
- Ravichandran, B., Wang, Y., & Keller, T. (2024). Joining methods for fibre reinforced polymer composites in structural applications: A review. *Composite Structures*, 329, 117536.
- Revista de la Construcción. (2025). Flexural behavior of GFRP box profiles under extreme temperature conditions. *Revista de la Construcción*, 24(1), 45–58.
- Sakbana, M. A., Bustamante, W., & Fernández, M. (2020). Numerical analysis of reinforced concrete beams strengthened with CFRP sheets. *Revista de la Construcción*, 19(2), 312–324.
- Silva, M. A. G., Biscaia, H. C., & Fernandes, A. A. (2022). Hygrothermal ageing effects on mechanical properties of GFRP composites. *Construction and Building Materials*, 320, 126234.
- Soares, A. P., Machado, J. S., & Ferreira, J. G. (2024). Numerical modelling of reinforced concrete beams strengthened in shear with CFRP. *Engineering Structures*, 298, 117126.
- Soumbourou, M. A., Keller, T., & Mottram, J. T. (2025). Web crippling of pultruded GFRP profiles: State-of-the-art review and future research needs. *Polymers*, 17(20), 2746.

Wu, C., Bai, Y., & Keller, T. (2023). State-of-the-art review on web crippling of pultruded GFRP profiles. *Composite Structures*, 307, 116645.

AUTOR

Gendry Daniel Solís Pastor, ingeniero en Electromecánica, con sólida experiencia en el diseño, desarrollo e implementación de sistemas de control industrial y automatización de procesos, en consonancia con el avance y la adopción de nuevas tecnologías. Además, se desempeña como Docente de Educación Superior en el área de electricidad, donde su trayectoria pedagógica le ha permitido liderar y acompañar el desarrollo e implementación de diversos proyectos de tesis.

DECLARACIÓN

Conflicto de interés

No tengo ningún conflicto de interés que declarar.

Financiamiento

Sin ayuda financiera de partes ajenas a este artículo.

Notas

El artículo es original y no ha sido publicado previamente.