



Artículo

Estructuras resilientes y sostenibles a través de SHM basado en EMI

Evaluación de una innovadora cuerda C-FRP

Técnica de fortalecimiento

Nikos A. Papadopoulos *, María C. Naoum

George M. Sapidis y Constantin E. Chalioris

Laboratorio de Hormigón Armado y Diseño Sísmico de Estructuras, Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad Demócrito de Tracia, 67100 Xanthi, Grecia; mnaoum@civil.duth.gr (MCN); gsapidis@civil.duth.gr (GMS); chaliori@civil.duth.gr (CEC)

* Correspondencia: nikpapad@civil.duth.gr

Resumen: Los miembros de hormigón armado (CR) en estructuras de CR existentes son susceptibles a corte crítico debido a su diseño poco reforzado. Por lo tanto, implementar una técnica de retrofitting es esencial para eliminar las víctimas que podrían surgir de colapsos repentinos y catastróficos debido a la fragilidad de estos miembros. Entre otras técnicas propuestas, el uso de cuerdas de polímeros reforzados con fibra de carbono (C-FRP) para aumentar la resistencia al corte de elementos estructurales de RC ha demostrado ser una aplicación de refuerzo prometedora. Además, se empleó un método de impedancia electromecánica (basado en EMI) que utiliza titanato de circonato de plomo (habilitado por PZT) para evaluar la eficiencia del esquema de refuerzo. Inicialmente, la técnica propuesta se aplicó a cuerdas C-FRP sometidas a pruebas de extracción. Por lo tanto, se logró una correlación de la resistencia a la tracción de la cuerda con las respuestas EMI del parche PZT utilizando el índice métrico de desviación cuadrática media (RMSD). Posteriormente, el método se implementó con los datos adquiridos experimentalmente de cables C-FRP, utilizados como refuerzo de corte en una viga rectangular de gran altura. Las cuerdas se instalaron utilizando el esquema Embedded Through Sección. Además, se intentó un enfoque para evaluar la capacidad de carga residual basada en las respuestas EMI adquiridas al estar incrustados y unidos a los PZT de las cuerdas, demostrando resultados prometedores y buena precisión en comparación con la predicción analítica de las cuerdas C-FRP. Contribución a la resistencia al corte.



Cita: Papadopoulos, NA; Naoum, MC;

Sapidis, GM;

Chalioris, CE Resiliente y

Estructuras sustentables a través de

Evaluación SHM basada en EMI de un

Innovadora técnica de

fortalecimiento de cuerdas C-FRP. *Aplica. Mec.*

2024, 5, 405–419. <https://doi.org/10.3390/applmech5030024>

appliedmech5030024

Recibido: 28 de abril de 2024

Revisado: 30 de mayo de 2024

Aceptado: 5 de junio de 2024

Publicado: 21 de junio de 2024



Copyright: © 2024 por los autores.

Licenciatario MDPI, Basilea, Suiza.

Este artículo es un artículo de acceso abierto.

distribuido bajo los términos y

condiciones de los Creative Commons

Licencia de atribución (CC BY) (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Palabras clave: monitoreo de salud estructural (MSS); impedancia electromecánica (EMI); transductor piezoeléctrico (PZT); cuerda C-FRP; técnica de modernización por corte; extraer

1. Introducción

Una porción significativa de los miembros de concreto reforzado (CR) dentro de estructuras de CR existentes a menudo sufren de un refuerzo insuficiente contra el corte, principalmente debido a disposiciones de diseño obsoletas e inadecuadas. Estos miembros son vulnerables al agrietamiento crítico por corte, lo que plantea el riesgo de fallas frágiles debido a su capacidad de resistencia y deformación insuficientes [1,2]. Como resultado, la implementación de técnicas de modernización para reforzar la capacidad de carga de corte se vuelve imperativa para mitigar las posibles víctimas derivadas de colapsos repentinos y catastróficos de estos frágiles miembros del RC [3,4].

Entre la variedad de técnicas de modernización disponibles, el revestimiento de RC es una opción popular para abordar las deficiencias en los miembros de RC dentro de los subconjuntos estructurales existentes [5,6]. Numerosos estudios han destacado los beneficios del revestimiento RC convencional para aumentar la capacidad de carga [7], la rigidez y la eficiencia general de la respuesta estructural [8,9].

Sin embargo, a pesar de su eficacia, el revestimiento RC convencional tiene limitaciones. Desafíos como las alteraciones en las características dinámicas estructurales resultantes de aumentos significativos en la masa y la rigidez y la naturaleza intensiva en mano de obra del proceso han estimulado a los investigadores a explorar técnicas de modernización alternativas utilizando materiales alternativos. Este impulso hacia la innovación tiene como objetivo superar los inconvenientes asociados con las tecnologías convencionales.

Revestimiento de RC y al mismo tiempo mejora eficazmente la integridad estructural y el rendimiento de los miembros de RC existentes [10-12].

Otra vulnerabilidad de las estructuras de CR erigidas bajo regulaciones obsoletas es su susceptibilidad a problemas morfológicos derivados de una falta de conciencia sobre el diseño sísmico [13].

La construcción de elementos estructurales cortos introduce riesgos a la respuesta sísmica de la estructura. Los elementos cortos, como columnas cortas y vigas altas, son propensos a exhibir modos de falla frágil, reduciendo así su contribución a la ductilidad general de la estructura [14]. Las vigas de gran altura, principalmente, son elementos estructurales críticos en estructuras de RC debido a su fuerte comportamiento a cortante [15].

En general, la falla por corte en estructuras de RC puede resultar en colapsos repentinos e inesperados de secciones o incluso de toda la estructura, poniendo así en peligro la integridad y seguridad de los ocupantes [16]. Estas deficiencias estructurales subrayan la necesidad urgente de medidas de modernización y fortalecimiento para mejorar la resiliencia sísmica de las estructuras de CR existentes y mitigar los riesgos asociados que plantean las fallas inducidas por corte.

Una viga se clasifica como profunda o corta según su relación de corte, que se determina mediante la ecuación (1). Específicamente, si la relación de corte, calculada mediante la ecuación (1), cae por debajo de 2,5, la viga se clasifica como profunda. Esta clasificación es crucial en ingeniería estructural, ya que ayuda a identificar vigas con un comportamiento de corte distintivo, informando consideraciones de diseño y estrategias de modernización para garantizar la integridad y seguridad estructural.

$$\alpha_s = \frac{av}{d} = \frac{M}{Vd} \leq 2,5 \quad (1)$$

donde av representa el tramo cortante del elemento, d significa la altura estática y M y V denotan las magnitudes del momento flector y la fuerza cortante de la sección transversal, respectivamente.

Según el principio de Saint-Venant, la aplicación de carga externa induce regiones perturbadas dentro de vigas profundas, donde los soportes se superponen, anulando así las áreas donde se aplica el principio de Bernoulli a la viga en flexión. En consecuencia, el análisis de vigas de gran altura requiere la adopción de técnicas de simulación de puntales y tirantes, donde el hormigón asume la responsabilidad de transferir las fuerzas de compresión mientras que el refuerzo longitudinal aborda las fuerzas de tracción.

La respuesta mecánica de las vigas de gran altura está profundamente influenciada por sus propiedades geométricas, condiciones de carga y la presencia de refuerzo transversal. En las estructuras de RC, las vigas de gran altura plantean una necesidad apremiante de intervenciones de refuerzo debido a su ductilidad limitada y a la provisión inadecuada de refuerzo transversal.

La incapacidad de rehabilitar ampliamente la infraestructura y las estructuras existentes ha estimulado el desarrollo de nuevas metodologías de seguimiento y fortalecimiento. Estos enfoques innovadores buscan abordar las deficiencias de las estructuras RC existentes y al mismo tiempo mejorar su resiliencia y longevidad frente a la carga dinámica y los desafíos ambientales.

2. Innovación propuesta y objetivo del estudio En las

últimas décadas, los polímeros reforzados con fibras (FRP) unidos externamente con resinas epoxi han surgido como soluciones de referencia para rehabilitar [17-19], reforzar, mejorar y reparar el hormigón armado (RC).) estructuras. Estas aplicaciones abarcan varios elementos estructurales [20], incluidas vigas reforzadas por corte [21,22], vigas reforzadas por torsión [23] y subconjuntos viga-columna reforzados por cortante [24], debido a sus innumerables ventajas. .

Estas ventajas incluyen alta resistencia a la tracción y a la fatiga, propiedades livianas y una resistencia excepcional a la corrosión [25,26]. Cabe destacar que los polímeros reforzados con fibra de carbono (CFRP) destacan por su rendimiento superior en estas propiedades en comparación con otros FRP.

Además, los CFRP cuentan con una alta rigidez, lo que les permite satisfacer las demandas de refuerzo de las estructuras de hormigón y al mismo tiempo adaptarse a la deformación de los elementos estructurales [27]. Esta característica mejora su idoneidad para aplicaciones de modernización donde es primordial mantener la integridad estructural bajo diferentes condiciones de carga.

Sin embargo, a pesar de los numerosos beneficios que ofrecen los materiales FRP, existen preocupaciones en torno a su aplicación en entornos estructurales reales. Problemas como la delaminación prematura

Se han planteado fallas y baja resistencia al fuego, lo que provocó una cuidadosa consideración durante su implementación [28]. La cohesión reducida observada en la zona interfacial entre el compuesto de FRP y la superficie del concreto puede conducir a una respuesta de deformación inferior a la diseñada, disminuyendo en consecuencia la eficiencia de adaptación de los FRP aplicados debido a una desunión prematura [29,30].

Abordar estas preocupaciones y optimizar el rendimiento de los materiales FRP en aplicaciones estructurales siguen siendo áreas críticas de investigación y desarrollo. Al mejorar la resistencia de la unión interfacial, mejorar las propiedades de resistencia al fuego y explorar técnicas innovadoras de modernización, se puede lograr todo el potencial de los FRP para mejorar la durabilidad y la resiliencia de las estructuras de RC.

Además, una extensa investigación en la literatura existente ha identificado consistentemente el modo de falla predominante en elementos RC modernizados que utilizan compuestos de FRP adheridos externamente con epoxi como desunión o delaminación prematura de la capa de FRP del sustrato de concreto. Este modo de falla generalmente es inducido por concentraciones de alta tensión y está asociado con falla frágil [31]. Este fenómeno es particularmente prevalente en elementos de CR en forma de T sujetos a esquemas de refuerzo en forma de U, donde la presencia de la losa restringe la aplicabilidad del FRP que se envuelve alrededor de la sección transversal y limita la accesibilidad para la correcta implementación del anclaje final, exacerbando así el riesgo de fallo prematuro de la desunión.

En este contexto, Chalioris et al. investigaron los beneficios potenciales de una nueva técnica de refuerzo para mejorar la capacidad de corte y mejorar la ductilidad de vigas altas de RC críticas para el corte [27]. El estudio se centró en el refuerzo transversal utilizando únicamente cuerdas C-FRP. Se exploraron dos configuraciones diferentes para implementar cables C-FRP: sección pasante integrada (ETS) para vigas de sección transversal rectangular y montada cerca de la superficie (NSM) para vigas altas con bridas en forma de T. En ambos casos, el desempeño experimental de la técnica de refuerzo por corte aplicada arrojó resultados prometedores, ya que las vigas críticas por corte bajo examen finalmente experimentaron falla por flexión. Estos hallazgos resaltan la eficacia del enfoque de refuerzo propuesto para mejorar el desempeño estructural de las vigas de gran altura de RC y mitigar el riesgo de falla inducida por corte.

Por lo tanto, el uso de cuerdas C-FRP para reforzar la resistencia al corte de los elementos estructurales de RC surge como una técnica de refuerzo prometedora. La versatilidad en las disposiciones de anclaje para estas cuerdas permite el pleno aprovechamiento de su alta resistencia a la tracción, proporcionando flexibilidad en las estrategias de diseño de modernización. Además, los cables C-FRP se pueden desplegar en múltiples configuraciones, incluso dentro de muescas preranuradas a lo largo de la altura de la viga (NSM) [32,33] o incrustadas a través del alma de la viga (ETS). Esta adaptabilidad permite a los ingenieros adaptar el enfoque de refuerzo para adaptarlo a los requisitos y limitaciones específicos de cada elemento estructural, maximizando así la eficacia de la intervención de refuerzo.

Si bien las técnicas propuestas presentan ventajas potenciales, importantes deficiencias requieren una mayor exploración. Investigaciones anteriores se han concentrado predominantemente en la detección temprana de daños en el refuerzo de FRP adherido con epoxi, proponiendo metodologías de pruebas no destructivas (END), particularmente en el refuerzo de estructuras de RC con materiales compuestos de FRP. Sin embargo, muchos de estos métodos resultan poco prácticos para estructuras grandes y complejas, debido a las limitaciones estructurales y la necesidad de un conocimiento previo de la ubicación del daño. Además, la mayoría de los enfoques de END se caracterizan por procedimientos que requieren mucho tiempo, altos costos, requisitos de acceso in situ y una falta de capacidades de monitoreo continuo en tiempo real. Estas limitaciones subrayan la necesidad de técnicas más robustas y versátiles para abordar eficazmente los desafíos de monitoreo estructural y detección de daños [16].

Como se destacó anteriormente, garantizar la integración perfecta de los elementos estructurales existentes con los materiales de refuerzo presenta un desafío multifacético lleno de incertidumbres. En consecuencia, monitorear la integridad estructural de los elementos estructurales modernizados se considera beneficioso para extender de manera segura su vida útil. Numerosos investigadores han profundizado en el ámbito de las técnicas de Monitoreo de la Salud Estructural (MAS) aplicables a elementos de concreto [34-36]. Sin embargo, las investigaciones dirigidas específicamente al SHM de los materiales

el hormigón que incorpora macrofibras sintéticas dispersas [37,38], los compuestos de FRP [39–41] y los estudios centrados en elementos estructurales reforzados con C-FRP son relativamente escasos en la literatura [42–45].

Si bien se reconoce ampliamente la importancia de la MAS para mejorar la durabilidad y seguridad de las estructuras de concreto, sigue habiendo una brecha notable en la investigación sobre la aplicación de estas técnicas al concreto reforzado con fibras y a elementos reforzados con FRP. Abordar esta brecha a través de investigaciones integrales sobre metodologías SHM adaptadas a estos materiales tiene un gran potencial para avanzar en el campo del monitoreo estructural y garantizar el desempeño a largo plazo de las estructuras modernizadas.

La fase experimental de este estudio implicó la implementación de un novedoso sistema de monitoreo en una viga reforzada por corte sometida a cargas de flexión en cuatro puntos, con el objetivo de evaluar la efectividad de la técnica de fortalecimiento con cuerda C-FRP. El método SHM propuesto empleó un sistema basado en impedancia electromecánica (EMI) habilitado con sensores piezoeléctricos de circonato-titanato de plomo (PZT) para el monitoreo inalámbrico de impedancia (WiAMS) [46].

En esta configuración experimental, las respuestas de frecuencia de voltaje de los parches PZT colocados a lo largo del perímetro de la cuerda C-FRP se registraron bajo diferentes niveles de carga aplicada. Estas condiciones de carga correspondían a diferentes estados de salud estructural o condiciones de daño. Además, se hicieron esfuerzos para evaluar cuantitativamente la contribución de los cables C-FRP a la resistencia al corte de la viga RC. Esta evaluación se facilitó mediante el análisis de los valores estadísticos del índice de daños derivados de los datos de monitoreo. Al correlacionar la respuesta del sistema de monitoreo con la carga aplicada y las condiciones de salud estructural, se obtuvieron conocimientos valiosos sobre el desempeño y la efectividad de la técnica de fortalecimiento de cuerdas C-FRP.

En el marco de este estudio experimental, el objetivo principal fue evaluar la viabilidad de EMI como método SHM aplicado para monitorear la integridad estructural, la eficacia y el rendimiento de cables C-FRP utilizados como técnica de modernización en una viga rectangular profunda. Se incorporaron sensores piezoeléctricos a lo largo de las cuerdas durante la instalación para lograr este objetivo. Luego se capturaron las respuestas de voltaje de estos PZT en el dominio de la frecuencia en varios estados de la carga aplicada y las correspondientes condiciones de salud estructural (niveles de carga).

Además, se llevó a cabo una evaluación del rendimiento de la técnica de modernización en los niveles de carga examinados. Esta evaluación se llevó a cabo utilizando valores derivados de la desviación cuadrática media (RMSD), un índice de daño estadístico comúnmente utilizado. Un aspecto único de este estudio implica el establecimiento de una metodología combinada, que incorpora las respuestas de los parches PZT incrustados dentro de las cuerdas de C-FRP durante las pruebas de extracción como datos de homogeneización de referencia. Al integrar datos tanto de la configuración experimental como de las pruebas de extracción, se logró una evaluación integral del rendimiento de la cuerda C-FRP bajo diversas condiciones de carga.

3. Programa Experimental

3.1. Características de la Viga Profunda

La Viga Profunda R poseía una sección transversal rectangular en su longitud, midiendo $L = 1,6$ m, con un ancho de $b = 150$ mm y una altura de $h = 300$ mm. El refuerzo longitudinal de la Viga R-Deep se dispuso simétricamente, compuesto por 2 barras de $\varnothing 14$ colocadas tanto en la zona de compresión como en la de tracción. Además, se colocaron estribos de $\varnothing 8/50$ sólo en los extremos de la Viga R-Profunda, cerca de los soportes, para asegurar el refuerzo longitudinal y evitar el desconchado del hormigón.

La luz de corte de la viga fue $\alpha = 400$ mm y el recubrimiento total de concreto fue de 35 mm, lo que resultó en un canto efectivo de 265 mm. En consecuencia, se calculó que la relación de corte α/d era 1,51. Se instaló verticalmente un cable C-FRP de un solo eslabón en el tramo de corte derecho, mientras que en el tramo de corte izquierdo, el cable se insertó en un orificio perforado con una inclinación de aproximadamente 52° . Ambas cuerdas se instalaron como refuerzo ETS. Todos los detalles de la viga se ilustran en la Figura 1.

cuerdas un ataque -un nserto nto te re oes.
Relleno de huecos con resina epoxi para eliminar huecos y mejorar la coherencia entre los materiales incrustados.

- Aplicación de ligera tensión al extremo de las cuerdas para lograr el anclaje final formación.

- Adición de más resina epoxi a la superficie de las vigas para lograr una mayor suavidad surcos.

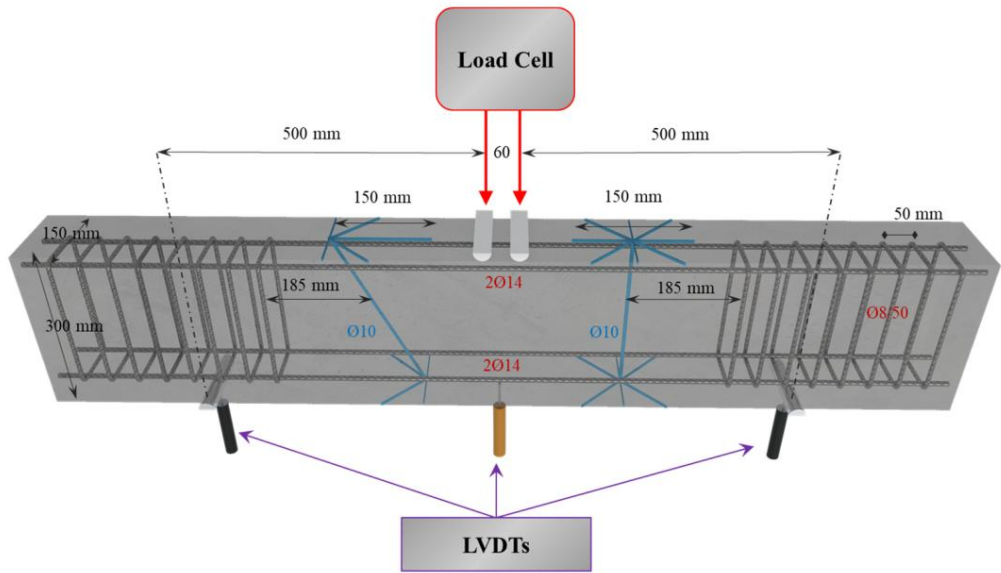


Figura 1. Detalles de geometría y refuerzo de la viga R-Deep Beam.

El proceso de instalación del ETS para las Cuerdas C-FRP en "R-FRP" fue el siguiente:

3.2. Materiales

• Formación de las borlas del anclaje y perforación de los orificios al alma de la viga.
El estudio utilizó cuerda C-FRP fabricada con fibras de carbono flexibles unidireccionales. • Uso de aire comprimido y un cepillo especial para eliminar el polvo atrapado en el interior.
Las especificaciones proporcionadas por el fabricante incluían un área de la sección transversal de los orificios aproximadamente 28 mm², un alargamiento mínimo antes de rotura del 1,6% y una rigidez (módulo de elasticidad) de 240 GPa para las fibras no impregnadas.
Posteriormente se procedió a la saturación de la cuerda con resina epoxi (Sikadur-52, SIKA Hellas, Kryoneri, Grecia) con las propiedades descritas en la Tabla 1. Este proceso tenía como objetivo mejorar las propiedades mecánicas y la durabilidad de la cuerda C-FRP. Además, pasta epoxi (Sikadur-330, SIKA Hellas, Kryoneri, Grecia) para rellenar y sellar los materiales incrustados.
Resina perforada para el montaje experimental, asegurando una adecuada adherencia e integridad estructural.

- Adición de más resina epoxi a la superficie de las vigas para conseguir ranuras más suaves.

3.2. Materiales

El estudio utilizó cuerda C-FRP fabricada con fibras de carbono flexibles unidireccionales. Las especificaciones proporcionadas por el fabricante incluían un área de sección transversal de aproximadamente 28 mm², un alargamiento mínimo antes de rotura del 1,6%, y una rigidez (módulo de elasticidad) de 240 GPa para las fibras no impregnadas.

Posteriormente, la cuerda se sometió a saturación con resina epoxi (Sikadur-52, SIKA Hellas, Kryoneri, Grecia), con las propiedades descritas en la Tabla 1. Este proceso tuvo como objetivo mejorar las propiedades mecánicas y la durabilidad de la cuerda C-FRP. Además, pasta epoxi (Sikadur-330, SIKA Hellas, Kryoneri, Grecia) para rellenar y sellar las ranuras perforadas para la configuración experimental, asegurando la adhesión adecuada y la integridad estructural.

Para evaluar las propiedades mecánicas del hormigón, cilindros de hormigón estándar con dimensiones de 150 mm de diámetro y 300 mm de altura fueron sometidos a pruebas de resistencia a la compresión y a la rotura. El día de la prueba, el promedio de las vigas de concreto Se midieron resistencias a la compresión y a la tracción en 28,0 MPa y 2,70 MPa, respectivamente. La mezcla de concreto utilizada en los experimentos contenía un máximo de partículas de agregado con un diámetro de 16 mm.

Las barras de acero deformadas (14 mm) tenían un límite elástico de 580 MPa, mientras que las barras suaves los estribos de acero (8 mm) tenían un límite elástico de 310 MPa.

La mezcla de hormigón utilizada en los experimentos contenía partículas de agregado con un diámetro máximo de 16 mm.

Las barras de acero deformadas (14 mm) tenían un límite elástico de 580 MPa, mientras que las barras suaves los estribos de acero (8 mm) tenían un límite elástico de 310 MPa. 410

Tabla 1. Propiedades mecánicas de cuerdas C-FRP.

Tabla 1. Propiedades mecánicas de los cables C-FRP.					
Material	Propiedades mecánicas del material		Propiedades mecánicas		
	Cuerda C-FRP	Resistencia a la tracción (TS)	Módulo elástico en tensión		
Cuerda C-FRP	SikaWrap FX-50C	2100 GPa	230 GPa		
SikaWrap FX-50C	(Laminado)	Resistencia a la tracción en rotura de tensión	2100 GPa	0,87%	
(Laminado)	Sikadur 300	Elongación en rotura de tensión	TS	0,87%	45MPa
		Módulo elástico en tensión			3,5 GPa
Sikadur 300		TS	45MPa		
	Sikadur 330	Módulo elástico en tensión	TS	3,5 GPa	30MPa
		Módulo elástico en tensión			4,5 GPa
Sikadur 330		TS	30 MPa		
	Sika Anchorfix 3+	Módulo elástico en tensión	Fuerza compresiva	4,5 GPa	114 MPa
Sika Anchorfix 3+		Fuerza compresiva	114 MPa		

3.3. Configuración de prueba

La viga se sometió a pruebas utilizando una configuración de flexión de cuatro puntos, como se ilustra en 3.3.

Configuración de prueba

Figura 2. Un actuador hidráulico, controlado por una máquina servocontrolada, aplica una carga gradual. La viga se

de la carga (fuerza monotónica) en la superficie superior de las vigas, a través de dos ure 2. Un actuador hidráulico,

controlado por una máquina servocontrolada, aplicó una

Realizándose de acero espaldado de uniformemente y colocados a una distancia de 60 mm. La viga se apoya en sus bordes aumentando la carga (fuerza monótona) a la superficie superior de las vigas a través de dos

mediante dos soportes de rodillos de acero a cada lado. Una celda de carga de alta precisión con rodillos de acero

espaciados y colocados a 60 mm de distancia. La viga estaba apoyada en sus bordes por dos precision de 0,05 kN, midió la fuerza aplicada con la máxima precisión. Soportes de rodillos

de acero a cada lado. Una celda de carga de alta precisión con una exactitud de

Se emplearon transductores diferenciales (LVDT) para medir las deflexiones de las vigas.

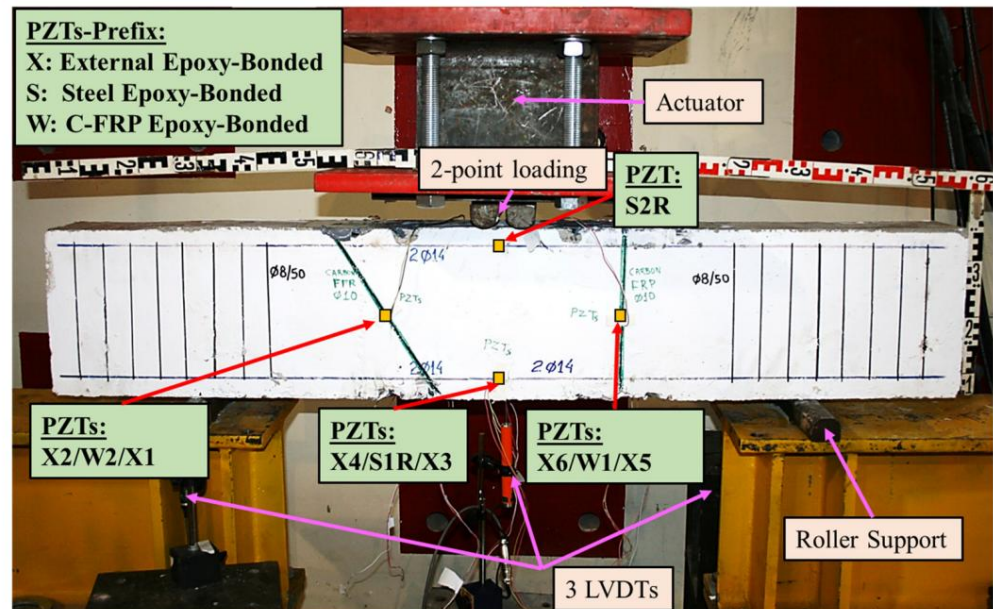


Figura 2. Configuración de prueba, instrumentación y configuración de PZT.

3.4. Se empleará la medición de la carga, se utilizarán transductores, concretamente de magnitud lineal, que se diferencian técnica de impedancia electromecánica (EMI) para medir las deflexiones de las vigas.

3.4. Técnica de impedancia electromecánica (EMI)

La técnica EMI utiliza transductores PZT, aprovechando las propiedades ventajosas del fenómeno piezoeléctrico. Cuando se someten a tensión mecánica, los transductores PZT generan una carga eléctrica superficial y, a la inversa, aplicar un campo eléctrico induce vibración mecánica. Por lo tanto, al aprovechar este fenómeno, la EMI activa e induce vibraciones en transductores PZT adheridos o integrados dentro de una estructura anfitriona. Cualquier El cambio en la impedancia mecánica de la estructura (o admitancia inversa) se refleja en alteraciones en la señal eléctrica extraída del PZT (ya sea en voltaje o frecuencia) respuesta). La interacción entre el PZT y la estructura del huésped se representa como una firma de admitancia que comprende una parte real (conductancia) y una parte imaginaria (suspensiva).

Al principio, las mediciones de EMI se llevaron a cabo en la viga en su estado prístino inicial. estado, estableciendo una línea base para su condición de salud declarada. Posteriormente, estas mediciones se repitieron bajo diversos escenarios de daño potencial, simulando condiciones que podría comprometer la integridad estructural. Los resultados obtenidos fueron luego meticulosamente comparar para evaluar cualquier desviación utilizando métricas estadísticas, particularmente la media raíz Desviación cuadrada (RMSD). Este análisis comparativo permitió la detección y evaluación de cambios estructurales, proporcionando información valiosa sobre el estado de salud de la viga y integridad bajo diferentes condiciones de carga. En este punto cabe mencionar que

Las medidas se repitieron bajo varios escenarios de daño potencial, simulando condiciones que podrían comprometer la integridad estructural. Luego, los resultados obtenidos se compararon meticulosamente para evaluar cualquier desviación utilizando métricas estadísticas, en particular la desviación cuadrática media (RMSD). Este análisis comparativo permitió detectar y as-

Evaluación de cambios estructurales, proporcionando información valiosa sobre el estado de salud y la

integridad de la viga bajo diferentes condiciones de carga. En este punto, cabe mencionar que todas las mediciones de voltaje se realizaron en condiciones controladas de laboratorio para evitar evitar interferencias por fluctuaciones de temperatura y humedad. interferencias debidas a fluctuaciones de temperatura y humedad.

3.5. Instalación de parches PZT
3.5. Instalación de parches PZT

El haz R-FRP estaba equipado con transductores PZT pequeños y delgados idénticos, cada uno de $10 \times 10 \times 2$ mm. Estos parches PZT, denominados PIC151, se fabricaron con unas dimensiones de $10 \times 10 \times 2$ mm. Estos parches PZT, designados como PIC151, fueron fabricados por la empresa PI Ceramics. En total, la empresa PI Ceramics posicionó estratégicamente diez PZT. Un total de diez PZT fueron ubicados estratégicamente dentro del viga en varias configuraciones, como se ilustra en la Figura 2. Seis PZT (tres colocados en la viga en varias configuraciones, como se ilustra en la Figura 2. Seis PZT (tres colocados en la parte delantera) y tres en la parte trasera) estaban unidos externamente con epoxi a ubicaciones mecánicas críticas y tres en la parte trasera) estaban unidos externamente con epoxi a ubicaciones mecánicas críticas en la superficie de hormigón, particularmente en lugares propensos a grietas por flexión y corte diagonal, la superficie de hormigón, particularmente en lugares propensos a grietas por flexión y corte diagonal, grietas, denominadas X1-X6. Se unieron dos PZT adicionales al refuerzo de acero, denominados X1-X6. Se unieron dos PZT adicionales al refuerzo de acero, con uno colocado en el medio de la barra de refuerzo tensional (S2R) y el otro en uno colocado en el medio de la barra de refuerzo tensional (S2R) y el otro en el centro de la barra de refuerzo de flexión (S1R).

Los dos parches PZT restantes se colocaron meticulosamente en las cuerdas C-FRP de acuerdo con el siguiente procedimiento: Los parches PZT se incrustaron simultáneamente según el siguiente procedimiento: Los parches PZT se incorporaron simultáneamente con

con las cuerdas insertadas en cada orificio perforado. Cada parche PZT se fijó de forma segura a las cuerdas insertadas en cada orificio perforado. Cada parche PZT se fijó de forma segura a la cuerda usando un adhesivo epoxi, y los alambres soldados se ataron cuidadosamente a la cuerda usando un componente de neumático y un alambre de acero para asegurar la posición final diseñada del parche PZT dentro del agujero. La posición de empuje fue seleccionada estratégicamente para que el parche PZT terminara adherido internamente al orificio perforado en el punto medio de la longitud transversal de la cuerda. Un alambre de acero sirvió como herramienta auxiliar para guiar el cable, el parche PZT y los alambres a través del agujero, tras lo cual fue eliminado. Estos dos parches fueron designados como W1 y W2, el respectivamente, como se muestra en la Figura 4:



Figura 4. Inserción de los transductores PZT en los orificios perforados ensamblados con las cuerdas C-FRP.

4. Resultados y discusión
4. Resultados y Discusión 4.1.
Prueba de extracción
4.1. Prueba de

extracción Para evaluar la eficacia del sistema SHM basado en EMI en la evaluación de la fuerza de unión, se realizó una prueba de extracción utilizando una configuración recta para anclar las cuerdas C-FRP, sin ningún extremo saliente. En este sentido, se fabricaron probetas cúbicas de hormigón para sirven como anfitriones para el anclaje, como se ilustra en la Figura 5.

El proceso implicó impregnar las cuerdas de C-FRP con una resina adecuada y luego insertándolos en agujeros previamente perforados dentro de las muestras del cubo. La resina de anclaje fue Se aplica para rellenar los agujeros y garantizar condiciones óptimas de unión entre la cuerda y el concreto. Dimensiones detalladas de las muestras de cubos, incluida la longitud del incrustado. La sección y la configuración del anclaje se presentan en la Figura 5. Esta configuración proporcionó una ambiente controlado para evaluar la fuerza de unión entre las cuerdas C-FRP y

Para evaluar la efectividad del sistema SHM basado en EMI en la evaluación de la resistencia de la unión, se realizó una prueba de extracción utilizando una configuración recta para anclar las cuerdas C-FRP, sin ningún extremo que sobresalga. En este sentido, las probetas cúbicas de hormigón fueron el sustrato de hormigón, lo que facilitó una evaluación precisa de la eficacia del SHM. fabricados para servir como anclajes para el anclaje como se ilustra en la Figura 5. sistema para detectar posibles defectos de unión o degradación con el tiempo.

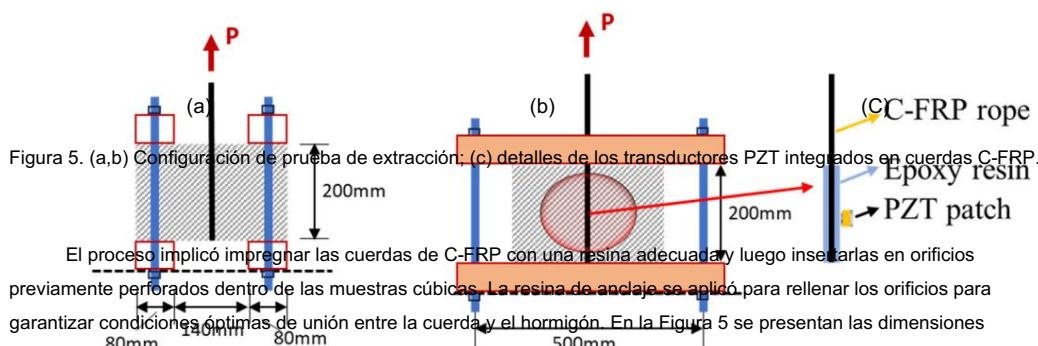


Figura 5. (a,b) Configuración de prueba de extracción; (c) detalles de los transductores PZT integrados en cuerdas C-FRP.

El proceso implicó impregnar las cuerdas de C-FRP con una resina adecuada y luego insertarlas en orificios previamente perforados dentro de las muestras cúbicas. La resina de anclaje se aplicó para rellenar los orificios para garantizar condiciones óptimas de unión entre la cuerda y el hormigón. En la Figura 5 se presentan las dimensiones detalladas de las muestras de cubo, incluida la longitud de la sección incrustada y la configuración del anclaje. Esta configuración proporcionó (a) un entorno controlado para evaluar la resistencia de la unión entre las cuerdas de C-FRP y la

Figura 5. (a,b) Configuración de prueba de extracción; (c) detalles de los transductores PZT integrados en C-FRP

(a) b) **Guías de FRP** para la reparación de uniones de pernos de acero (e) detalles de las traveseras de PZT integrados en C- el sustrato de concreto, sistema para detectar posibles defectos de unión o degradación con el tiempo.

[illegible]

entorno controlado para evaluar la fuerza de unión entre las cuerdas de C-FRP y el sustrato de concreto, lo que facilitó una evaluación precisa de la efectividad del sistema SHM en la detección de posibles vínculos, defectos o degradación con el tiempo.

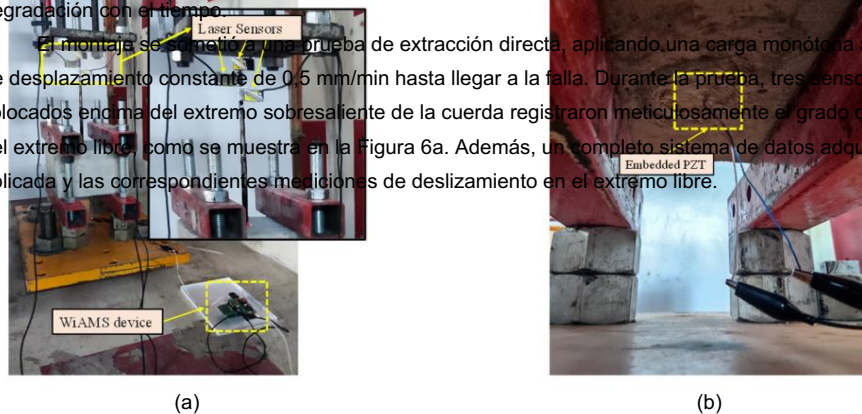


Figura 6. (a) Configuración de prueba de extracción y dispositivo WAMS, (b) vista invertida del dispositivo integrado. Figura 7. Transductores PZT instalados en la configuración de los cables C-FRP.

Además, se adhirió un parche PZT estratégicamente ubicado en la suela dentro del cubo de hormigón (Figura 6b). Este parche PZT jugó un papel crucial en el seguimiento y captura de la respuesta estructural del sistema de anclaje, proporcionando información valiosa sobre el comportamiento de unión entre el cable C-FRP y el sustrato de hormigón durante toda la prueba de retirada.

El diagrama voltaje-frecuencia correspondiente a la prueba de extracción se muestra en la Figura 6. (a) Configuración de prueba de extracción y dispositivo WiAMS; (b) vista invertida del empotramiento 7. En una línea continua negra, la respuesta en la condición pristina de la cuerda C-FRP es transductores PZT instalados en la configuración de los cables C-FRP.

representado y anotado como "Saludable". Además, en líneas continuas cian y azul, se representan las mediciones de respuesta de voltaje en la etapa ascendente y la resistencia máxima a la tracción.

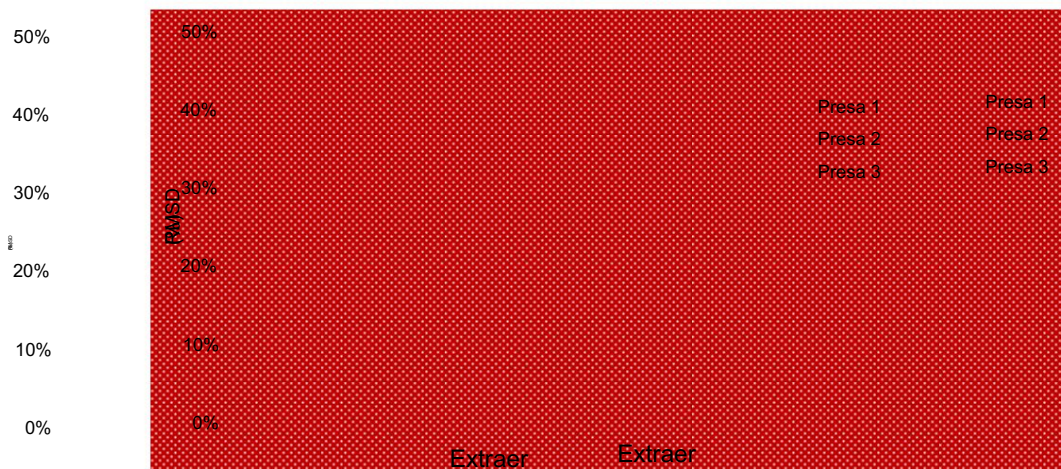
Además, se adjuntó un parche PZT estratégicamente colocado a la cuerda interior y se denominó "Dam1" y "Dam2", respectivamente. Además, en el verde continuo

el orificio pretaladrado del cubo, como se ilustra en la Figura 6b. Este parche PZT jugó una línea crucial: se representa y denota la medición de voltaje en la etapa descendente posterior al pico.

como "Dam3". Tras el escrutinio del diagrama, se observaron desviaciones discernibles en la Curvas de respuesta entre el estado no dañado y diferentes niveles de daño simulado.

$$\text{RMD} = \frac{\sum_{r=1}^M \sum_{f=1}^F V_p(f,r) \sum_{D=1}^D V_p(f,r) - \sum_{f=1}^F V_p(f,r) \sum_{D=1}^D V_p(f,r)}{2} \quad (3)$$

Con base en los resultados obtenidos de la prueba de extracción y los valores del índice RMSD extraídos en niveles de carga específicos hasta la fractura final del cable C-FRP (como se muestra en la Figura 9), la evaluación del corte residual se intentó la capacidad de carga de fuerza. Esta evaluación se realizó mediante un enfoque de homogeneización, que implicó correlacionar los valores de RMSD de la prueba de extracción con los adquiridos de la viga profunda.



La carga de extracción máxima registrada fue de aproximadamente 27 kN, correspondiente a un desplazamiento de 2 mm. Los pedazos de PZT adheridos se mostraron en la Figura 10. Los valores de la resistencia y su rendimiento RMSD obtenidos de los pedazos adheridos se muestran en la Tabla 1. Inicialmente, se estandarizó la desviación cuadrática media (RMSD) ded dentro de los pedazos de PZT adheridos en relación con los valores obtenidos del centro de la carga de extracción. Este proceso de homogeneización permitió una comparación directa y válida de la prueba de extracción. Este proceso de homogeneización permitió una comparación directa y válida de la prueba de extracción. Se ilustra en la Figura 11. La resistencia al corte residual de las cuerdas W1 y W2, respectivamente. Se ilustra en la Figura 11. La resistencia al corte residual de las cuerdas W1 y W2, respectivamente. Se ilustra en la Figura 11. La contribución de los valores de RMSD del sistema de monitoreo habilitado para PZT con aquellos de la resistencia a la tracción están inherentemente interconectados. Esta alineación con lo obtenido de la prueba de extracción, se obtuvo valiosa sobre la información experimental de corte residual de las cuerdas, en la que la cuerda se cortó en dos pedazos en el punto de falla. Como resultado, la resistencia y su rendimiento bajo diferentes condiciones de carga.

1. **Introduction**
 2. **Background**
 3. **Methodology**
 4. **Results**
 5. **Discussion**
 6. **Conclusion**
 7. **References**
 8. **Appendix**
 9. **Figure 1**
 10. **Figure 2**
 11. **Figure 3**
 12. **Figure 4**
 13. **Figure 5**
 14. **Figure 6**
 15. **Figure 7**
 16. **Figure 8**
 17. **Figure 9**
 18. **Figure 10**
 19. **Figure 11**
 20. **Figure 12**
 21. **Figure 13**
 22. **Figure 14**
 23. **Figure 15**
 24. **Figure 16**
 25. **Figure 17**
 26. **Figure 18**
 27. **Figure 19**
 28. **Figure 20**
 29. **Figure 21**
 30. **Figure 22**
 31. **Figure 23**
 32. **Figure 24**
 33. **Figure 25**
 34. **Figure 26**
 35. **Figure 27**
 36. **Figure 28**
 37. **Figure 29**
 38. **Figure 30**
 39. **Figure 31**
 40. **Figure 32**
 41. **Figure 33**
 42. **Figure 34**
 43. **Figure 35**
 44. **Figure 36**
 45. **Figure 37**
 46. **Figure 38**
 47. **Figure 39**
 48. **Figure 40**
 49. **Figure 41**
 50. **Figure 42**
 51. **Figure 43**
 52. **Figure 44**
 53. **Figure 45**
 54. **Figure 46**
 55. **Figure 47**
 56. **Figure 48**
 57. **Figure 49**
 58. **Figure 50**
 59. **Figure 51**
 60. **Figure 52**
 61. **Figure 53**
 62. **Figure 54**
 63. **Figure 55**
 64. **Figure 56**
 65. **Figure 57**
 66. **Figure 58**
 67. **Figure 59**
 68. **Figure 60**
 69. **Figure 61**
 70. **Figure 62**
 71. **Figure 63**
 72. **Figure 64**
 73. **Figure 65**
 74. **Figure 66**
 75. **Figure 67**
 76. **Figure 68**
 77. **Figure 69**
 78. **Figure 70**
 79. **Figure 71**
 80. **Figure 72**
 81. **Figure 73**
 82. **Figure 74**
 83. **Figure 75**
 84. **Figure 76**
 85. **Figure 77**
 86. **Figure 78**
 87. **Figure 79**
 88. **Figure 80**
 89. **Figure 81**
 90. **Figure 82**
 91. **Figure 83**
 92. **Figure 84**
 93. **Figure 85**
 94. **Figure 86**
 95. **Figure 87**
 96. **Figure 88**
 97. **Figure 89**
 98. **Figure 90**
 99. **Figure 91**
 100. **Figure 92**
 101. **Figure 93**
 102. **Figure 94**
 103. **Figure 95**
 104. **Figure 96**
 105. **Figure 97**
 106. **Figure 98**
 107. **Figure 99**
 108. **Figure 100**
 109. **Figure 101**
 110. **Figure 102**
 111. **Figure 103**
 112. **Figure 104**
 113. **Figure 105**
 114. **Figure 106**
 115. **Figure 107**
 116. **Figure 108**
 117. **Figure 109**
 118. **Figure 110**
 119. **Figure 111**
 120. **Figure 112**
 121. **Figure 113**
 122. **Figure 114**
 123. **Figure 115**
 124. **Figure 116**
 125. **Figure 117**
 126. **Figure 118**
 127. **Figure 119**
 128. **Figure 120**
 129. **Figure 121**
 130. **Figure 122**
 131. **Figure 123**
 132. **Figure 124**
 133. **Figure 125**
 134. **Figure 126**
 135. **Figure 127**
 136. **Figure 128**
 137. **Figure 129**
 138. **Figure 130**
 139. **Figure 131**
 140. **Figure 132**
 141. **Figure 133**
 142. **Figure 134**
 143. **Figure 135**
 144. **Figure 136**
 145. **Figure 137**
 146. **Figure 138**
 147. **Figure 139**
 148. **Figure 140**
 149. **Figure 141**
 150. **Figure 142**
 151. **Figure 143**
 152. **Figure 144**
 153. **Figure 145**
 154. **Figure 146**
 155. **Figure 147**
 156. **Figure 148**
 157. **Figure 149**
 158. **Figure 150**
 159. **Figure 151**
 160. **Figure 152**
 161. **Figure 153**
 162. **Figure 154**
 163. **Figure 155**
 164. **Figure 156**
 165. **Figure 157**
 166. **Figure 158**
 167. **Figure 159**
 168. **Figure 160**
 169. **Figure 161**
 170. **Figure 162**
 171. **Figure 163**
 172. **Figure 164**
 173. **Figure 165**
 174. **Figure 166**
 175. **Figure 167**
 176. **Figure 168**
 177. **Figure 169**
 178. **Figure 170**
 179. **Figure 171**
 180. **Figure 172**
 181. **Figure 173**
 182. **Figure 174**
 183. **Figure 175**
 184. **Figure 176**
 185. **Figure 177**
 186. **Figure 178**
 187. **Figure 179**
 188. **Figure 180**
 189. **Figure 181**
 190. **Figure 182**
 191. **Figure 183**
 192. **Figure 184**
 193. **Figure 185**
 194. **Figure 186**
 195. **Figure 187**
 196. **Figure 188**
 197. **Figure 189**
 198. **Figure 190**
 199. **Figure 191**
 200. **Figure 192**
 201. **Figure 193**
 202. **Figure 194**
 203. **Figure 195**
 204. **Figure 196**
 205. **Figure 197**
 206. **Figure 198**
 207. **Figure 199**
 208. **Figure 200**
 209. **Figure 201**
 210. **Figure 202**
 211. **Figure 203**
 212. **Figure 204**
 213. **Figure 205**
 214. **Figure 206**
 215. **Figure 207**
 216. **Figure 208**
 217. **Figure 209**

Además, todos los valores del índice RMSD obtenidos de los dos PZT adheridos e integrados dentro de los cables de sección pasante se estandarizaron con respecto a los valores obtenidos en el Nivel de carga 1 (22 % Vmax) de la prueba de extracción. Este proceso de homogeneización permitió la comparación directa con el Nivel de carga 2 (59% Vmax) y el Nivel de carga 3 (82% Vmax), la resistencia al corte residual de las cuerdas W1 y W2 respectivamente, se muestra en la Figura 11.

Alineando los valores del índice RMSD del sistema de monitoreo habilitado para PZT con los del Nivel de carga 5 (Vmax) obtenido de la prueba de extracción, se obtuvieron conocimientos valiosos sobre la resistencia al corte residual de las cuerdas y su rendimiento en diferentes condiciones de carga.

Condición de Carga	W1 (Adherido)	W1 (Integrado)	W2 (Adherido)	W2 (Integrado)
Nivel de carga 1 (22% Vmax)	100%	100%	100%	100%
Nivel de carga 2 (59% Vmax)	~85%	~85%	~85%	~85%
Nivel de carga 3 (82% Vmax)	~75%	~75%	~75%	~75%
Nivel de carga 4 (96% Vmax)	~65%	~65%	~65%	~65%
Nivel de carga 5 (Vmax)	~55%	~55%	~55%	~55%

Figura 10. Modo de falla final de la cuerda C-FRP.

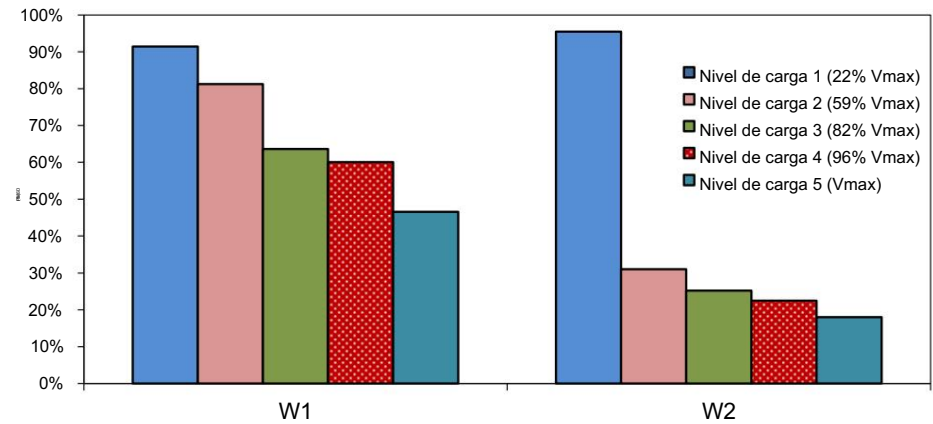


Figura 11. Capacidad de resistencia al corte residual de los cables C-FRP embebidos.

En la Figura 11, la reducción gradual de la capacidad de resistencia al corte del cable W1 puede observarse principalmente en la formación de la primera fisura que se desarrolló en el tramo derecho. observarse, a medida que aumentaba la carga, esta grieta continuó ensanchándose, lo que resultó en que el concreto absorbiera una porción significativa de los esfuerzos. En consecuencia, el aporte de una porción significativa de la resistencia de la cuerda se redujo progresivamente. Para el cable W2, la inclinación de la cuerda hacia la derecha disminuyó y se desarrolló una grieta para limitar el desarrollo de grietas en el tramo de corte izquierdo. resultó ventajoso para limitar el desarrollo de grietas y para limitar la apertura de grietas, como se muestra en la Figura 12, donde se puede observar la grieta de corte izquierda que se formó a un nivel de carga 4.

Además, esto se refleja en los valores del medidor de fisura izquierdo, donde la apertura de la fisura se redujo notablemente en comparación con el del tramo derecho. Así, hasta ese nivel de carga, la cuerda perdió aproximadamente el 78% de su resistencia al corte total estimada. Estas ideas arrojan luz sobre la interacción dinámica entre los elementos de refuerzo y la estructura Comportamiento, subrayando la importancia de consideraciones reflexivas sobre el posicionamiento y el diseño. para optimizar el rendimiento y la resiliencia contra los mecanismos de falla inducidos por cizallamiento.

Para evaluar más a fondo la eficacia de la innovadora técnica de fortalecimiento, el modelo analítico propuesto por Mofidi et al. [47] se aplicó para calcular la contribución de las cuerdas. a la resistencia total al corte de la viga en el estado de falla. Además, es fundamental garantizar que La tensión efectiva de las cuerdas C-FRP no supera el 0,4% para lograr un entrelazado suficiente de agregado del concreto e interceptar la apertura de la grieta, según lo recomendado por ACI 440.2R-08 [48].

Al implementar todos los cálculos propuestos descritos en el trabajo relevante de Chalioris et al. [27], se derivaron los siguientes valores:

$$V_{f,ETS,Rcuerda} = 39,6 \text{ kN}$$
$$V_{f,ETS,Lcuerda} = 53,3 \text{ kN}$$

Además, partiendo del supuesto de que la resistencia media a la tracción del laminado del la cuerda era de aproximadamente 2000 N/mm², la resistencia al corte residual total para la cuerda W1 fue calculado como $V_{f,ETS,Rcuerda} = 31,8 \text{ kN}$. De manera similar, para la cuerda W2, la resistencia al corte residual fue calculado como $V_{f,ETS,Lrope} = 49,2 \text{ kN}$, lo que demuestra una notable proximidad del 92,3% al resultados calculados analíticos. Estos hallazgos subrayan la efectividad de la propuesta. técnica de fortalecimiento y resaltar su potencial para estimar con precisión el valor residual Resistencia al corte en aplicaciones a escala real.

5. Conclusiones

En este proyecto experimental, una investigación sobre la efectividad de un innovador Técnica de refuerzo que implica el uso de cuerdas C-FRP como refuerzo transversal de corte. se llevó a cabo. Esta evaluación se llevó a cabo mediante la implementación de un método basado en EMI. habilitado por sensores PZT. Además, una aplicación modificada de la métrica del índice estadístico Se empleó RMSD para evaluar la eficacia de la técnica de fortalecimiento.

A diferencia del uso convencional del índice RMSD para expresar niveles de daño o impactos de carga, este estudio utilizó los valores del índice RMSD del 100% para representar el corte residual.

capacidad de fuerza. Este novedoso enfoque evaluó el rendimiento de la técnica de fortalecimiento y demostró una convergencia y precisión prometedoras con las predicciones analíticas. Este análisis comparativo mejora la comprensión de la efectividad de la técnica de refuerzo y proporciona datos valiosos para una mayor optimización y refinamiento de las estrategias de refuerzo estructural.

Además, los resultados obtenidos a través del método basado en EMI aplicado presentan una oportunidad importante para servir como una herramienta complementaria confiable para diagnosticar defectos de daño y evaluar la efectividad de los materiales a base de fibra en escenarios en tiempo real. Vale la pena señalar que la presencia de resina epoxi dentro de los orificios perforados puede afectar levemente la precisión de los resultados experimentales obtenidos mediante el enfoque habilitado por PZT basado en EMI.

Además, si bien este estudio muestra una alineación prometedora con las predicciones analíticas sobre la contribución de la cuerda a la resistencia al corte, se justifica un trabajo experimental adicional para evaluar más a fondo y mejorar la fidelidad de la metodología de evaluación propuesta. Al realizar más experimentos, el objetivo es garantizar la solidez y confiabilidad de este novedoso enfoque para aplicaciones a escala real, avanzando así en el campo de las técnicas de refuerzo estructural.

Contribuciones de los autores: Conceptualización, NAP, MCN y GMS; metodología, NAP y MCN; análisis formal, NAP y GMS; investigación, CCA, NAP y GMS; curación de datos, NAP y MCN; redacción: preparación del borrador original, NAP y MCN; redacción: revisión y edición, NAP y CCA; visualización, MCN; supervisión, CEC Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito.

Financiamiento: Esta investigación no recibió financiamiento externo.

Declaración de disponibilidad de datos: Las contribuciones originales presentadas en el estudio se incluyen en el artículo; más consultas pueden dirigirse a los autores correspondientes.

Conflictos de intereses: Los autores declaran no tener conflictos de intereses.

Referencias

1. Zhang, T.; Visintín, P.; Oehlers, DJ Resistencia al corte de vigas RC con estribos de acero. *J. Estructura. Ing.* 2016, 142, 04015135. [\[Referencia cruzada\]](#)
2. Zararis, PD Falla por compresión por corte en vigas profundas de hormigón armado. *J. Estructura. Ing.* 2003, 129, 544–553. [\[Referencia cruzada\]](#)
3. Godat, A.; L'Hady, A.; Chaallal, O.; Neale, KW Comportamiento de enlace del método de refuerzo por corte de barra ETS FRP. *J. Compos. Construcción* 2012, 16, 529–539. [\[Referencia cruzada\]](#)
4. Azam, R.; Soudki, K.; Oeste, JS; Noël, M. Comportamiento de vigas RC críticas para corte reforzadas con CFRCM. *J. Compos. Construcción* 2018, 22, 04017046. [\[Referencia cruzada\]](#)
5. Karayannis, CG; Sirkelis, GM Fortalecimiento y rehabilitación de uniones entre vigas y columnas de RC mediante revestimiento de carbono-FRP y Inyección de resina epoxi. *Tierraq. Estructura de ingeniería. Din.* 2008, 37, 769–790. [\[Referencia cruzada\]](#)
6. Karayannis, CG; Naoum, MC Comportamiento torsional de estructuras de marco RC de varios pisos debido a la interacción sísmica asimétrica. *Ing. Estructura.* 2018, 163, 93–111. [\[Referencia cruzada\]](#)
7. Tsonos, AG Efectividad de las chaquetas de CFRP en la modernización de subconjuntos de vigas y columnas después y antes de un terremoto. *Estructura. Ing. Mec.* 2007, 27, 393–408. [\[Referencia cruzada\]](#)
8. Lampropoulos, AP; Dritsos, SE Modelado de columnas RC reforzadas con RC Jackets. *Earthq Engng Struct Dyn* 2011, 40, 1689–1705. [\[Referencia cruzada\]](#)
9. Ma, C.-K.; Apandi, Nuevo México; Sofía, CSY; Ng, JH; He aquí, WH; Awang, AZ; Omar, W. Reparación y rehabilitación de estructuras de hormigón mediante confinamiento: una revisión. *Construcción Construir. Madre.* 2017, 133, 502–515. [\[Referencia cruzada\]](#)
10. Azam, R.; Soudki, K.; Oeste, JS; Noël, M. Fortalecimiento de vigas RC críticas para corte: alternativas a las láminas de CFRP adheridas externamente. *Construcción Construir. Madre.* 2017, 151, 494–503. [\[Referencia cruzada\]](#)
11. Ferreira, D.; Oller, E.; Marí, A.; Bairán, J. Análisis Numérico de Vigas RC Críticas a Cortante Reforzadas en Cortante con Láminas de FRP. *J. Compos. Construcción* 2013, 17, 04013016. [\[Referencia cruzada\]](#)
12. Baggio, D.; Soudki, K.; Noël, M. Fortalecimiento de vigas RC críticas al corte con varios sistemas de FRP. *Construcción Construir. Madre.* 2014, 66, 634–644. [\[Referencia cruzada\]](#)
13. Aguilar, V. Resistencia al corte de miembros de hormigón: desafíos, desarrollos recientes y posibilidades. *Adv. Civilización. Ing. Tecnología.* 2020, 4, 1–2. [\[Referencia cruzada\]](#)
14. Işık, E.; Ulutaş, H.; Harirchian, E.; Avcil, F.; Aksoylu, C.; Arslan, MH Evaluación basada en el desempeño de un edificio RC con columnas cortas debido a los diferentes principios de diseño. *Edificios* 2023, 13, 750. [\[CrossRef\]](#)

15. Pan, Z.; Li, B. Evaluación de metodologías de diseño de resistencia al corte para vigas RC delgadas críticas al corte. *J. Estructura. Ing.* 2013, 139, 619–622. [\[Referencia cruzada\]](#)
16. Papadopoulos, NA; Naoum, MC; Sapidis, GM; Chaliotis, CE Identificación de fisuras y desunión de fibras de vigas profundas de hormigón reforzadas con cuerdas de C-FRP contra corte mediante un sistema de monitoreo en tiempo real. *Polímeros* 2023, 15, 473. [\[CrossRef\]](#)
17. Bilotta, A.; Ceroni, F.; Di Ludovico, M.; Nigro, E.; Pecce, M.; Manfredi, G. Eficiencia de adherencia de los sistemas EBR y NSM FRP para reforzar miembros de hormigón. *J. Compos. Construcción* 2011, 15, 757–772. [\[Referencia cruzada\]](#)
18. Seo, S.-Y.; Feo, L.; Hui, D. Resistencia de adherencia de placas de FRP montadas cerca de la superficie para modernización de estructuras de hormigón. *Compos. Estructura.* 2013, 95, 719–727. [\[Referencia cruzada\]](#)
19. Breveglieri, M.; Aprile, A.; Barros, JAO Técnica de refuerzo por corte de sección transversal integrada utilizando barras de acero y CFRP en Vigas RC de Diferente Porcentaje de Estribos Existentes. *Compos. Estructura.* 2015, 126, 101–113. [\[Referencia cruzada\]](#)
20. Li, P.; Wang, H.; Nie, D.; Wang, D.; Wang, C. Un método para analizar el rendimiento de durabilidad a largo plazo de estructuras subterráneas de alcantarillas de hormigón armado bajo cargas mecánicas y ambientales acopladas. *J. Intel. Construcción* 2023, 1, 9180011. [\[Referencia cruzada\]](#)
21. Dijo, M.; Adán, MA; Mahmoud, AA; Shanour, AS Evaluación experimental y analítica de corte de vigas de hormigón reforzadas con barras de polímeros reforzados con fibra de vidrio. *Construcción Construir. Madre.* 2016, 102, 574–591. [\[Referencia cruzada\]](#)
22. Naoum, M.; Sapidis, G.; Papadopoulos, N.; Golias, E.; Chaliotis, C. Monitoreo del estado estructural de uniones entre vigas y columnas de hormigón armado mediante transductores piezoeléctricos. En *Actas de la Conferencia Internacional RILEM sobre Sinergia de Experiencia hacia la Sostenibilidad y Robustez de Materiales a Base de Cemento y Estructuras de Hormigón*, Milos, Grecia, 14 a 16 de junio de 2023; Jędrzejewska, A., Kanavaris, F., Azenha, M., Benboudjema, F., Schlicke, D., Eds.; Serie de libros RILEM. Springer Nature: Cham, Suiza, 2023; Volumen 43, págs. 945–956. [\[Referencia cruzada\]](#)
23. Turner, L.; Davies, VC Hormigón simple y armado en torsión, con especial referencia a vigas de hormigón armado. *Sel. Ing. Papilla.* 1934, 1, 165. [\[Referencia cruzada\]](#)
24. Chaliotis, CE; Papadopoulos, NA; Sapidis, G.; Naoum, MC; Golias, E. Método de monitoreo basado en EMA de uniones reforzadas entre vigas y columnas. En *Actas de la Conferencia Internacional ISCRAM*, Omaha, NE, EE. UU., 28 a 31 de mayo de 2023; págs. 853–873. [\[Referencia cruzada\]](#)
25. Alam, P.; Mamalis, D.; Roberto, C.; Floreani, C.; Brádaigh, CMÓ. La fatiga de los plásticos reforzados con fibra de carbono: una revisión. *Compos. Parte B Ing.* 2019, 166, 555–579. [\[Referencia cruzada\]](#)
26. Zhu, X.; Abe, H.; Hayashi, D.; Tanaka, H. Características de comportamiento de vigas RC con corrosión no uniforme a lo largo del reforzamiento. *J. Intel. Construcción* 2023, 1, 9180019. [\[Referencia cruzada\]](#)
27. Chaliotis, C.; Kosmidou, P.-M.; Papadopoulos, N. Investigación de una nueva técnica de refuerzo para vigas profundas RC utilizando Cuerdas de carbono FRP como refuerzos transversales. *Fibras* 2018, 6, 52. [\[CrossRef\]](#)
28. Bazli, M.; Abolfazli, M. Propiedades mecánicas de polímeros reforzados con fibras a temperaturas elevadas: descripción general. *Polímeros* 2020, 12, 2600. [\[Referencia cruzada\]](#)
29. Kytinou, VK; Gribniak, V.; Zapris, AG; Chaliotis, CE Un enfoque innovador de monitoreo de la salud para el diagnóstico de desunión de polímeros reforzados con fibra mediante pruebas de extracción y cizallamiento. En *Métodos Analíticos y Experimentales en Ingeniería Mecánica y Civil*; Springer: Cham, Suiza, 2024; Volumen 28, págs. 228–239. [\[Referencia cruzada\]](#)
30. Ju, S.; Li, D.; Jia, J. Investigación experimental y evaluación de daños de un nuevo anclaje de tipo adhesivo para fibra de carbono Tendones de polímero reforzado. *J. Civilización. Estructura. Monitor de salud.* 2023, 13, 117–132. [\[Referencia cruzada\]](#)
31. El-Sisi, AA; El-Emam, HM; El-Kholy, AE-MI; Ahmad, SS; Sallam, HM; Salim, HA Comportamiento estructural de vigas RC que contienen aberturas perforadas no reforzadas con y sin refuerzo CFRP. *Polímeros* 2022, 14, 2034. [\[CrossRef\]](#)
32. Baena, M.; Jahani, Y.; Torres, L.; Barris, C.; Perera, R. Rendimiento a la flexión y predicción de la desunión final de vigas de hormigón armado reforzadas con FRP con carbono NSM bajo diferentes temperaturas de servicio. *Polímeros* 2023, 15, 851. [\[CrossRef\]](#)
33. Perera, R.; Gil, A.; Torres, L.; Barris, C. Diagnóstico del refuerzo NSM FRP en hormigón mediante el uso de modelos de efectos mixtos y Enfoques EMI. *Compos. Estructura.* 2021, 273, 114322. [\[Referencia cruzada\]](#)
34. Pellón, L.; Ciminello, M.; Mercurio, U.; Apuleo, G.; Concilio, A. Un sistema de monitoreo del estado estructural para la detección de fallas en la línea de unión en un demostrador de sección Wingbox a gran escala. *Aplica. Mec.* 2024, 5, 36–57. [\[Referencia cruzada\]](#)
35. Ai, D.; Mo, F.; Yang, F.; Zhu, H. Detección de daños estructurales del hormigón basada en impedancia electromecánica mediante análisis de componentes principales incorporado con red neuronal. *J. Intel. Madre. Sistema. Estructura.* 2022, 33, 2241–2256. [\[Referencia cruzada\]](#)
36. Ai, D.; Zhang, D.; Zhu, H. Localización de daños en una estructura de losa de hormigón armado mediante técnica de impedancia electromecánica y algoritmo de imágenes ponderado por probabilidad. *Construcción Construir. Madre.* 2024, 424, 135824. [\[Referencia cruzada\]](#)
37. Sapidis, GM; Kansizoglou, I.; Naoum, MC; Papadopoulos, NA; Chaliotis, CE Un enfoque de aprendizaje profundo para la identificación autónoma de daños por compresión en hormigón reforzado con fibra utilizando transductores piezoeléctricos de titanato de circonato y plomo. *Sensores* 2024, 24, 386. [\[CrossRef\]](#)
38. Wang, Z.; Chen, D.; Zheng, L.; Huo, L.; Song, G. Influencia de la carga axial en la impedancia electromecánica (EMI) de los dispositivos integrados. *Transductores piezocerámicos en hormigón con fibras de acero. Sensores* 2018, 18, 1782. [\[CrossRef\]](#)
39. Naoum, MC; Papadopoulos, NA; Voutetaki, YO; Chaliotis, CE Monitoreo del estado estructural de prismas de concreto reforzado con fibras con macrofibras de poliolefina utilizando una red de materiales piezoeléctricos bajo diversas tensiones inducidas por cargas. *Edificios* 2023, 13, 2465. [\[CrossRef\]](#)

40. Naoum, MC; Sapidis, GM; Papadopoulos, NA; Voutetaki, ME Una aplicación basada en impedancia electromecánica de monitoreo en tiempo real para la tensión de flexión inducida por carga y el daño en concreto reforzado con fibras. *Fibras* 2023, 11, 34. [\[Referencia cruzada\]](#)
41. Khatir, A.; Capozucca, R.; Kathir, S.; Magagnini, E.; Benaissa, B.; Cuong-Le, T. Un aumento de gradiente mejorado y eficiente para la tensión. Predicción en viga RC reforzada con FRP NSM. *Frente. Estructura. Civilización. Ing.* 2024, en prensa.
42. Reddy, PN; Kavyateja, BV; Jindal, BB Métodos de monitoreo de la salud estructural, dispersión de fibras, propiedades micro y macro estructurales, detección y propiedades mecánicas del concreto autodetectable: una revisión. *Estructura. Concr.* 2021, 22, 793–805. [\[Referencia cruzada\]](#)
43. Perera, R.; Huerta, MC; Baena, M.; Barris, C. Análisis de vigas de hormigón armado reforzadas con FRP mediante técnica de impedancia electromecánica y sistema de correlación de imágenes digitales. *Sensores* 2023, 23, 8933. [\[CrossRef\]](#)
44. Li, D.; Zhou, J.; Ou, J. Daños, evaluación no destructiva y rehabilitación de la estructura compuesta de FRP-RC: una revisión. *Construcción Construir. Madre.* 2021, 271, 121551. [\[Referencia cruzada\]](#)
45. Khatir, A.; Capozucca, R.; Khatir, S.; Magagnini, E.; Benaissa, B.; Le Thanh, C.; Wahab, MA Un nuevo híbrido PSO-YUKI para doble Identificación de grietas en viga voladiza de CFRP. *Compos. Estructura.* 2023, 311, 116803. [\[Referencia cruzada\]](#)
46. Providakis, C.; Tsistrakis, S.; Voutetaki, M.; Tsompanakis, J.; Stavroulaki, M.; Agadakos, J.; Kampianakis, E.; Pentes, G.; Liarakos, E. Una innovadora plataforma de detección activa para el monitoreo inalámbrico de daños en estructuras de hormigón. *actual. Madre inteligente.* 2016, 1, 49–62. [\[Referencia cruzada\]](#)
47. Mofidi, A.; Chaallal, O.; Benmokrane, B.; Neale, K. Pruebas experimentales y modelo de diseño para vigas RC reforzadas en corte Uso del método FRP integrado a través de la sección. *J. Compos. Construcción* 2012, 16, 540–550. [\[Referencia cruzada\]](#)
48. ACI (Instituto Americano del Concreto). Guía para el diseño y construcción de sistemas FRP adheridos externamente para reforzar el hormigón Estructuras; ACI-440.2R-08; Instituto Americano del Concreto (ACI): Farmington Hills, MI, EE.UU., 2008; pag. 76.

Descargo de responsabilidad/Nota del editor: Las declaraciones, opiniones y datos contenidos en todas las publicaciones son únicamente de los autores y contribuyentes individuales y no de MDPI ni de los editores. MDPI y/o los editores renuncian a toda responsabilidad por cualquier daño a personas o propiedad que resulte de cualquier idea, método, instrucción o producto mencionado en el contenido.