

Predicción del comportamiento de vigas de hormigón armado reforzadas a cortante con PRFC

P. B. Soares^{1*} , P. M. Lazzari¹ , A. Campos Filho¹ , B. M. Lazzari² 

*Autor de Contacto: pallomaborges24@gmail.com

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v14i3.753>

Recibido: 01/06/2024 | Correcciones recibidas: 31/07/2024 | Aceptado: 02/08/2024 | Publicado: 01/09/2024

RESUMEN

Este trabajo presenta el modelado computacional de vigas de hormigón armado, reforzadas a cortante con polímeros reforzados con fibra de carbono (PRFC), utilizando el método de elementos finitos (FEM) y utilizando el software ANSYS personalizado, versión 19.2. Es importante resaltar que para modelar la interfaz hormigón-refuerzo se utilizaron elementos de contacto y modelos de zonas cohesivas bilineales disponibles por ANSYS. Estos modelos se utilizaron con el fin de identificar los modos de ruptura prematura provocados por el desprendimiento del refuerzo, lo que provoca un mal aprovechamiento de las propiedades de resistencia del PRFC. Los elementos estructurales utilizados en este análisis fueron doce vigas de hormigón armado biapoyadas, sin y con refuerzo a cortante con PRFC, las cuales fueron ensayadas experimentalmente por Khalifa (1999). Del análisis de los resultados, se pudo comprobar, que los modelos numéricos desarrollados fueron capaces de predecir con buena precisión el comportamiento de las vigas simuladas, tanto en términos de carga-desplazamiento, como de la carga y modo de falla de las vigas.

Palabras clave: estructuras de hormigón armado; refuerzo estructural; PRFC; MEF; ANSYS.

Citar como: Soares, P. B. Lazzari, P. M. Campos Filho, A. Lazzari, B. M. (2024), “Predicción del comportamiento de vigas de hormigón armado reforzadas a cortante con PRFC”, Revista ALCONPAT, 14 (3), pp. 241 – 254, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v14i3.753>

¹ Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre/RS, Brasil.

² Escola Politécnica, PUCRS, Porto Alegre/RS, Brasil.

Contribución de cada autor

Palloma Borges Soares: conceptualización, redacción, curación de datos, análisis formal y metodología; Paula Manica Lazzari y Américo Campos Filho: conceptualización, análisis formal, metodología y supervisión; Bruna Manica Lazzari: conceptualización y metodología.

Licencia Creative Commons

Los derechos de autor (2024) son propiedad de los autores. Este trabajo es un artículo de acceso abierto publicado bajo los términos y condiciones de una licencia internacional Creative Commons Attribution 4.0 International License ([CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)).

Discusiones y correcciones posteriores a la publicación

Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el segundo número del año 2025 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del primer número del año 2025.

Behavior prediction of reinforced concrete beams shear strengthened with CFRP

ABSTRACT

This work presents the computational modeling of reinforced concrete beams, strengthened to shear with carbon fiber-reinforced polymers (CFRP), using the finite element method (FEM) and the customized ANSYS software, version 19.2. It is important to emphasize that contact elements and bilinear cohesive zone models provided by ANSYS were used to model the concrete-reinforcement interface. These models were used in order to identify the modes of premature failure caused by the debonding of the reinforcement, which causes poor use of the CFRP's resistance properties. The structural elements used in this analysis were twelve simply supported reinforced concrete beams, without and with shear reinforcement using CFRP, which were experimentally tested by Khalifa (1999). From the analysis of the results, it was observed that the developed numerical models were able to accurately predict the behavior of the simulated beams, both in terms of load-displacement, as well as the load and rupture mode of the beams.

Keywords: reinforced concrete structures; structural reinforcement; CFRP; FEM; ANSYS.

Previsão do comportamento de vigas de concreto armado reforçadas ao cisalhamento com PRFC

RESUMO

Este trabalho apresenta a modelagem computacional de vigas de concreto armado, reforçadas ao cisalhamento com polímeros reforçados com fibras de carbono (PRFC), através do método dos elementos finitos (MEF) e com a utilização do software ANSYS customizado, versão 19.2. É importante ressaltar que foram utilizados elementos de contato e modelos de zona coesiva bilineares disponibilizados pelo ANSYS para modelagem da interface concreto-reforço. Estes modelos foram utilizados a fim de identificar os modos de ruptura prematura ocasionados pelo desprendimento do reforço, o que ocasiona o baixo aproveitamento das propriedades de resistência do PRFC. Os elementos estruturais utilizados nesta análise foram doze vigas de concreto armado biapoiadas, sem e com reforço ao esforço cortante com PRFC, as quais foram ensaiadas experimentalmente por Khalifa (1999). A partir da análise dos resultados, foi possível constatar que os modelos numéricos desenvolvidos conseguiram prever com boa precisão o comportamento das vigas simuladas, tanto em termos de carga-deslocamento, quanto a carga e o modo de ruptura das vigas.

Palavras-chave: estruturas de concreto armado; reforço estrutural; PRFC; MEF; ANSYS.

Información Legal

Revista ALCONPAT es una publicación cuatrimestral de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, Internacional, A. C., Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, alconpat.int@gmail.com, Página Web: www.alconpat.org

Reserva de derechos al uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derecho de Autor. Editor responsable: Dr. Pedro Castro Borges. Responsable de la última actualización de este número, Unidad de Informática ALCONPAT, Ing. Elizabeth Sabido Maldonado.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor.

La reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación se realiza en apego al código COPE y a la licencia CC BY 4.0 de la Revista ALCONPAT.

1. INTRODUCCIÓN

A lo largo de la vida útil de estructuras de concreto armado, puede ocurrir una reducción en el desempeño estructural en función de diversos factores, haciendo que estas estructuras, sean deficientes para resistir los esfuerzos para lo cual han sido proyectadas. Además de eso, algunas estructuras antiguas, son consideradas estructuralmente inseguras debido a las alteraciones de las normas técnicas. Por lo tanto, se debe realizar una verificación estructural de estos edificios, con el fin de evaluar los esfuerzos, solicitudes, niveles de seguridad y definir el método de intervención a adoptar para su adecuación. Entre los métodos de intervención, el refuerzo estructural es uno de los más utilizados, ya que consiste en elevar la resistencia, u otras propiedades, de una estructura o un elemento estructural, proporcionando un rendimiento superior al previsto en el proyecto. Hay numerosas técnicas para el refuerzo de elementos estructurales, entre las que se encuentran el pretensado exterior, el aumento de la sección transversal mediante una capa adicional de hormigón armado, así como la aplicación de refuerzos exteriores mediante la unión de placas de acero o materiales compuestos a base de fibras.

De los métodos mencionados anteriormente, uno de los más utilizados es la aplicación de refuerzos externos con placas de acero pegadas con resina epoxi, sin embargo, este método tiene una baja resistencia a la corrosión y un alto peso propio, lo que provoca problemas en el manejo y la necesidad de un sistema de apuntalamiento. Ante esto, se comenzaron a desarrollar investigaciones en busca de materiales con comportamientos más eficientes, lo que permitió desarrollar una técnica de refuerzo que consiste en el uso de materiales compuestos, llamados polímeros reforzados con fibra (FRP), los cuales tienen propiedades como bajo peso específico, alta resistencia a la tracción, resistencia a la corrosión, alta resistencia a la fatiga y buena amortiguación de impactos. Además, tiene facilidad para asumir formas complejas, facilidad de manejo y aplicación, y no tiene limitaciones de longitud. Entre los tipos de materiales compuestos, los polímeros reforzados con fibra de carbono (CFRP) son los más adecuados para el refuerzo estructural de elementos de hormigón armado, ya que las fibras de carbono tienen las mejores propiedades mecánicas, permitiendo soluciones de refuerzo ligeras con aumentos significativos de la capacidad de resistencia de los elementos estructurales a través de una pequeña cantidad de refuerzo (Mhanna; Hawileh; Abdalla, 2021). Por otro lado, el uso de FRP tiene algunas desventajas, incluido el alto costo y el mal comportamiento a altas temperaturas, especialmente atribuido a las resinas epoxi utilizadas para unir las fibras. Para evaluar y predecir el comportamiento del CFRP, es necesario realizar un análisis en profundidad de los elementos estructurales reforzados con este material. Para ello, se decidió utilizar el método de elementos finitos (MEF), que permite simular fácilmente diversas disposiciones geométricas, condiciones de contorno y carga, así como realizar análisis no lineales de estructuras de hormigón armado y modelar la adherencia entre materiales, mediante el uso de elementos de interfaz. Por lo tanto, el objetivo de este trabajo es demostrar la factibilidad de simular computacionalmente el comportamiento de vigas de hormigón armado de doble apoyo, sin y con armadura a la fuerza cortante con CFRP, utilizando el método de elementos finitos con el uso del programa ANSYS personalizado, versión 19.2. Según Soares (2022) y Soares et al. (2023), se prestará especial atención a la predicción de esfuerzos de adherencia en la interfaz entre la armadura y la viga de hormigón, con el fin de identificar fallos por pérdida de adherencia del sistema de refuerzo.

2. MODELOS CONSTITUTIVOS DE LOS MATERIALES

La principal característica del comportamiento del hormigón es que tiene una baja resistencia a la tracción y una alta resistencia a la compresión. Por lo tanto, para representar el comportamiento de este material, se utilizaron dos modelos constitutivos distintos, los cuales fueron implementados

por Lazzari et al. (2017a), Lazzari et al. (2019), Hoffman et al. (2022) y Machado et al. (2023), a través de la herramienta de personalización ANSYS UPF (User Programmable Features), sin embargo, se realizaron algunos cambios a estos modelos por Soares (2022) y Soares et al. (2023). Para el hormigón comprimido o a compresión, se adoptó el modelo elastoplástico con endurecimiento, que se compone de un criterio de fallo, un criterio de plastificación y una regla de endurecimiento. Para el criterio de falla se utilizó la superficie de ruptura de Ottosen, según lo recomendado por el Código de Modelo fib 2010 (2013). Además, se consideró que el hormigón comprimido presenta un endurecimiento isotrópico y que la superficie plastificante tiene la misma forma que la superficie de ruptura. La regla de endurecimiento, por su parte, establece cómo se mueven las superficies de plastificación (superficie de carga) durante la deformación plástica, estando determinada por la relación entre la tensión efectiva y la deformación plástica efectiva, permitiendo así extrapolar los resultados de un ensayo uniaxial simple a una situación multiaxial. Por lo tanto, se adoptó como regla de endurecimiento la curva correspondiente al diagrama tensión-deformación para hormigón bajo compresión uniaxial, propuesta por el Código Modelo fib 2010 (2013). Por otro lado, el hormigón tensado se modeló como un material elástico con reblandecimiento, donde el hormigón se comporta como un material elástico-lineal hasta su fallo, y luego de eso, se adopta el modelo de fisuras distribuidas con rigidez a tracción, que se especifica mediante un criterio de fisuración, una regla para la colaboración del hormigón entre grietas y un modelo para la transferencia de esfuerzos cortantes, lo cual concuerda con el modelo de comportamiento sugerido por Hinton (1988). Además, a partir del agrietamiento de un determinado punto de integración, la rigidez según los ejes locales de la fisura, se consideró desacoplada la rigidez según los ejes de fisura local. Así, para cada una de las dos direcciones principales paralelas al plano de fisura, se utilizan diagramas tensión-deformación correspondientes a tensiones uniaxiales, y si hay un acortamiento en una de estas direcciones, el diagrama de deformaciones adoptado es el del hormigón comprimido, y si se produce un alargamiento, el diagrama pasa a ser el del hormigón tensado.

También se adoptó un nuevo criterio en el modelo de hormigón fisurado, que fue implementado por Titello (2020), que consiste en considerar el efecto de rigidización a tracción en función de la orientación de la armadura, lo que permite un análisis más preciso de las vigas sin armadura transversal. Así, si no se utilizan refuerzos transversales, el efecto de rigidez a tracción se considera solo para las fisuras verticales, y con el fin de reducir errores, las fisuras que forman un ángulo de hasta 15° con la vertical se clasifican como verticales. Dado que en las estructuras de hormigón armado se considera que las barras de acero solo resisten las deformaciones axiales, se utilizó un modelo uniaxial para describir su comportamiento. Para los aceros obtenidos por laminación en caliente, con un límite elástico bien definido, se utilizó el modelo elastoplástico perfecto, mientras que, para los aceros endurecidos en frío, se adoptó el modelo elastoplástico con endurecimiento lineal a partir del 85% del límite elástico (Lazzari et al., 2017b). En cuanto al modelo numérico de la interfaz entre el hormigón y la armadura de CFRP, se optó por utilizar el Modelo de Zona Cohesiva (CZM), ya que es ampliamente utilizado en el análisis de problemas que involucran materiales compuestos, ya que evita la singularidad, es fácil de implementar en métodos numéricos, así como permite desprestigiar las dimensiones de la región adherente. Es importante destacar que el CZM utiliza la relación entre tensión y desplazamiento relativo para el análisis de interfaz (Sarturi, 2014; Ouyang; Li, 2009).

Además, según Medeiros (2019), la gran mayoría de las simulaciones numéricas desarrolladas admiten, que la interfaz entre el hormigón y el CFRP está dominada por desplazamientos tangenciales, por lo tanto, se consideró que la interfaz tiene un comportamiento impulsado por el Modo II de separación, en el que la relación entre la tensión de adhesión y el desplazamiento presenta un formato bilineal, y los parámetros del modelo implementado en ANSYS se definieron a partir de uno de los modelos de interfaz más precisos propuestos en la literatura, que es el modelo bilineal de Lu et al. (2005), cuyos detalles se encuentran en Soares (2022) y Soares et al. (2023).

3. MODELADO COMPUTACIONAL

Para realizar las simulaciones numéricas propuestas en este trabajo, se utilizó el método de elementos finitos (MEF), ya que permite considerar el comportamiento no lineal de materiales de concreto y acero, así como las fallas por pérdida de adherencia del sistema de refuerzo, mediante la introducción de elementos especiales en la región de interfaz. Para ello, se decidió utilizar el programa de elementos finitos ANSYS (Analysis Systems Incorporated), versión 19.2, el cual cuenta con un lenguaje denominado APDL (ANSYS Parametric Design Language) que proporciona al usuario un mayor control sobre la simulación numérica. Además, ANSYS pone a disposición en su biblioteca una serie de elementos finitos, y la elección se realiza según el tipo de problema a estudiar, la función estructural y el esfuerzo computacional.

Para el modelado de los elementos estructurales analizados en este trabajo se utilizó el elemento SOLID186 para representar el hormigón, el cual es un elemento cuadrático tridimensional compuesto por 20 nudos y con tres grados de libertad por nudo, correspondientes a la traslación según los ejes X, Y y Z. Se decidió utilizar este elemento debido a los buenos resultados que proporciona, sin necesidad de una gran discretización de la malla, provocando así una reducción considerable en el tiempo de análisis estructural. Es importante destacar que el SOLID186 es compatible con el elemento REINF264, lo cual es esencial para la representación del hormigón con armadura incorporada.

Por lo tanto, para representar discretamente los refuerzos de acero, que están incorporados y perfectamente adheridos al sólido de hormigón, se adoptó el REINF264 de elementos finitos, que es apropiado para simular fibras de refuerzo con orientaciones arbitrarias, y cada fibra se modela por separado y solo tiene rigidez axial. Es importante tener en cuenta que las coordenadas nodales, los grados de libertad y las conectividades del elemento REINF264 son idénticas a las del elemento finito en el que se inserta, en este caso, el elemento SOLID186. En cuanto al material, la geometría y la orientación de los elementos de refuerzo, se adoptó el método con malla independiente que utiliza los elementos MESH200, que son solo elementos de malla, que no contribuyen a la solución del problema, sino que definen la posición para la creación de los elementos de refuerzo.

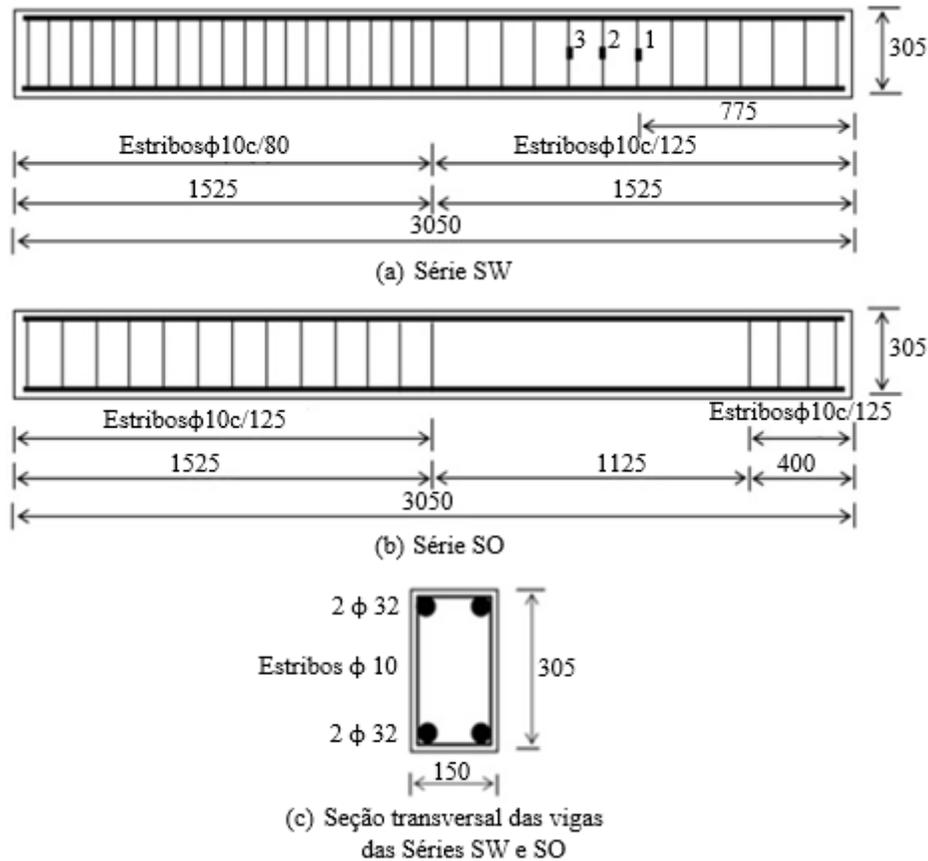
En cuanto al modelado de la armadura de CFRP, se utilizó el SHELL281 de elementos finitos, que es un elemento de cáscara que tiene 8 nudos, con seis grados de libertad por nudo, considerando las rigideces a flexión y membrana. Sin embargo, como el refuerzo de CFRP resiste principalmente los esfuerzos de tracción, se definió que el elemento presentaría solo rigidez de la membrana, lo que resultaría en tres grados de libertad por nudo (traslación según los ejes X, Y y Z). Para modelar la interfaz entre hormigón y armadura se adoptó el método de definición de contacto por pares, que consiste en asociar el elemento de contacto con un elemento objetivo, a través de un conjunto de constantes reales. Como elemento de contacto, se utilizó el CONTA174, que es apropiado para representar el contacto de desplazamiento entre una superficie deformable de un sólido o cáscara 3D, y la superficie objetivo, que está formada por TARGE170 elementos.

Para la implementación del modelo constitutivo de hormigón, modelo elastoplástico con agrietamiento, se utilizó la subrutina USERMAT3D, que es puesta a disposición por el sistema de personalización, que utiliza el lenguaje de programación FORTRAN y es compatible con el elemento tridimensional utilizado para representar el hormigón (SOLID186). En cuanto a los refuerzos, se adoptó el modelo constitutivo BISO (Bilinear Isotropic Hardening), disponible en la librería interna de ANSYS.

4. CARACTERÍSTICAS ESTRUCTURALES Y DEL MODELO NUMÉRICO

En este trabajo se simuló doce vigas de hormigón armado de doble soporte probadas experimentalmente por Khalifa (1999). Estas vigas se dividían en dos series, denominadas SW y

SO, en función de la existencia o ausencia de estribos en la mitad derecha de la viga. La serie SW está compuesta por cuatro vigas con estribos en toda su longitud, como se muestra en la figura 1a. La serie SO tiene ocho vigas, que no tienen estribos en la mitad derecha de la viga, como se puede ver en la figura 1b. Todas las vigas ensayadas por Khalifa (1999) tienen una sección transversal de 150x305 mm, Figura 1c, armadura longitudinal superior e inferior compuesta por dos barras de 32 mm de diámetro, así como armadura transversal compuesta por estribos con un diámetro de 10 mm y con espaciamiento de 80 mm y 125 mm, como se muestra en la Figura 1a y la Figura 1b. En la Tabla 1 se presentan las propiedades de los materiales que constituyen las vigas simuladas.



Dimensiones en mm ▪ Ubicación de los extensómetros

Figura 1. Detalle de las vigas (Khalifa; Nanni, 2002).

Tabla 1. Propiedades de los materiales.

Material	Especificaciones	Resistencia a la compresión (MPa)	Tensión de cedencia (MPa)	Resistencia a la tracción (MPa)	Módulo de elasticidad (GPa)
Concreto	Serie SW	19,3	-	2.2	20
	Serie SO	27,5	-	2.7	25
Acero	$\phi = 32\text{mm}$	-	460	730	200
	$\phi = 10\text{mm}$	-	350	530	200
PRFC	$t_f = 0,165\text{ mm}$	-	-	3790	228

Khalifa (1999) dividió cada serie de vigas en dos grupos de acuerdo con la relación entre la luz de cizallamiento (a) y la altura útil de la viga (d), y se utilizó la relación a/d igual a 3 y 4, lo que resultó

en cuatro grupos de haces denominados SW3, SW4, SO3 y SO4. En cuanto al refuerzo de CFRP, una viga de cada grupo no fue reforzada con CFRP y se denominaron SW3-1, SW4-1, SO3-1 y SO4-1. Las otras vigas fueron reforzadas con CFRP adherido externamente y siguiendo tres configuraciones de refuerzo, como se muestra en la Figura 2, siendo denominadas SW3-2, SW4-2, SO3-2, SO3-3, SO3-4, SO3-5, SO4-2 y SO4-3.

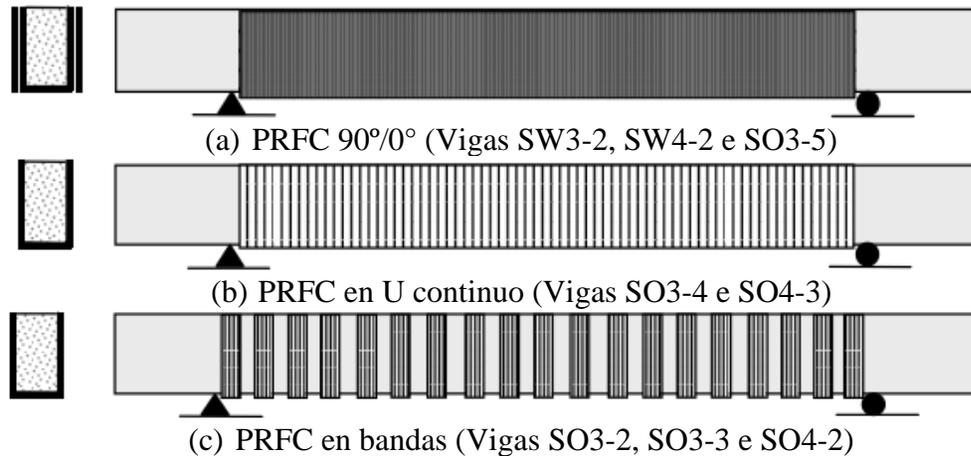


Figura 2. Representación esquemática de las configuraciones de refuerzo (Khalifa; Nanni, 2002).

En cuanto a la carga, todas las vigas se ensayaron a flexión en cuatro puntos y para ello se aplicó una carga concentrada a una viga de distribución de acero con el fin de generar las dos cargas concentradas. Para las vigas con una relación a/d de 3, las cargas se aplicaron a una distancia de 760 mm de los apoyos, y para las vigas con una relación a/d de 4, a una distancia de 1020 mm. Con el fin de monitorear los desplazamientos verticales en puntos específicos de las vigas, se utilizaron cuatro LVDT (transformadores diferenciales variables lineales). Para realizar la simulación numérica de las vigas biapoyadas de Khalifa (1999), se modeló solo la mitad del ancho de las vigas, considerando que las vigas presentan simetría tanto en geometría como en carga, a lo largo de la sección transversal. Con el fin de evitar la concentración de tensiones en los puntos de aplicación de carga y apoyos, se modelaron losas con el elemento SOLID186, con unas dimensiones de 10x2x7,5 cm y un módulo de elasticidad cinco veces mayor que el del hormigón ($E = 100.000$ MPa).

En la Figura 3 se muestra la discretización de la malla y de todos los elementos finitos adoptados en el modelo de vigas, donde en la Figura 3a se muestra la viga SO4-1, que es una viga sin armadura, en la Figura 3b se muestra la viga SW3-2, que tiene un refuerzo continuo de CFRP y en la Figura 3c se muestra la viga SO4-2, reforzada con tiras de CFRP. La Figura 4 muestra la discretización de la sección transversal de las vigas sin armadura, Figura 4a, y con armadura CFRP, Figura 4b. Para modelar el adhesivo utilizado para unir el compuesto de CFRP a la superficie de hormigón, se adoptó el elemento SOLID186 y un módulo de elasticidad de 2,5 GPa. El adhesivo se modeló en dos capas, una sobre la superficie del hormigón y otra sobre la superficie del compuesto de CFRP, permitiendo así la generación de elementos CONTA174 y TARGE170 entre las capas adhesivas. El elemento de contacto CONTA174 se generó en la capa adhesiva conectada a la armadura de CFRP y el elemento objetivo TARGE170 se generó en la capa adhesiva en contacto con la viga, Figura 5. Como se describe en el ítem 2 de este trabajo, las propiedades del modelo de interfaz se obtuvieron a partir del modelo y formulaciones propuestos por Lu et al. (2005), permitiendo así obtener los valores de esfuerzo de adhesión máximo, rigidez tangencial de la interfaz y desplazamiento máximo, los cuales se presentan en la Tabla 2.

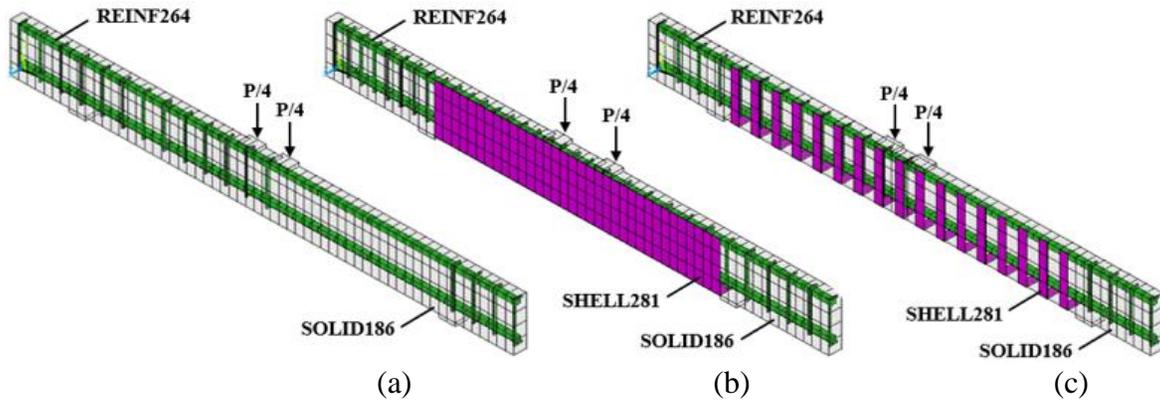


Figura 3. Discretización en elementos finitos de las vigas: (a) SO4-1; (b) SW3-2 e (c) SO4-2.

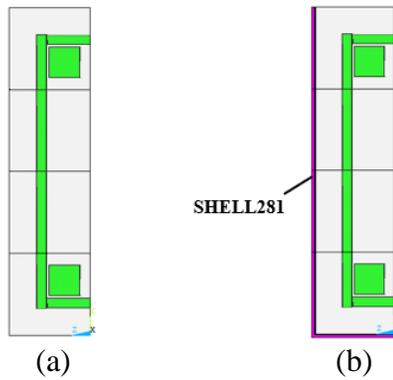


Figura 4. Secciones transversales de las vigas: (a) sin refuerzo; (b) PRFC en U.

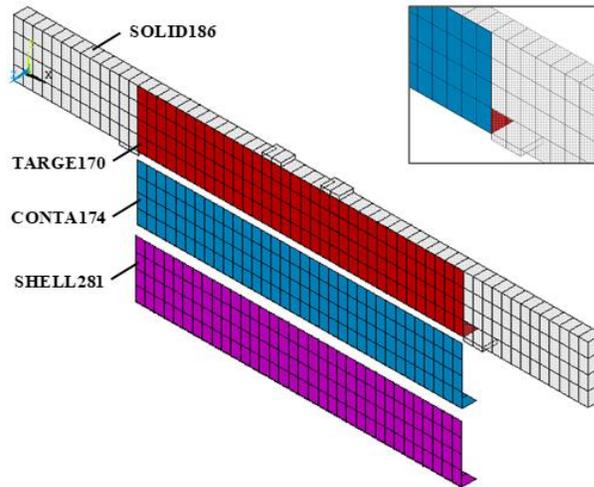


Figura 5. Elementos CONTA174 y TARGE170 en el modelo de la viga SW3-2.

Tabla 2. Parámetros del modelo de la interfaz.

Serie	Tensión máxima de adherencia τ_{fl} (kN/cm ²)	Rigidez tangencial K_t (kN/cm ³)	Desplazamiento máximo s_0 (cm)
SW	0,317	77	0,0182
SO	0,366	77	0,0169

5. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS NUMÉRICOS

En este ítem se realiza un análisis comparativo entre los resultados numéricos y los experimentales obtenidos por Khalifa (1999), los cuales también fueron abordados en los trabajos de Khalifa, Belardi y Nanni (2000) y Khalifa y Nanni (2002). Para ello, se presentan los resultados a través de curvas de carga frente a desplazamiento en el tramo de cortante de interés, así como por tensiones en hormigón, armadura y armadura en CFRP. También se analizó el comportamiento de la interfaz a través de los resultados de tensiones y desplazamientos obtenidos por los elementos de contacto. Con el fin de simular la carga utilizada en el ensayo experimental, se impuso un desplazamiento vertical en los puntos donde actuaban las cargas concentradas, cuyo valor adoptado fue al menos un 50% superior al observado en el ensayo experimental. En vista de la cantidad de resultados obtenidos para las doce vigas simuladas, se decidió presentar los resultados de tres vigas, uno para cada modo de falla identificado, así como un resumen de los resultados de todas las vigas ensayadas, como se muestra en la Tabla 3. Es importante destacar que un análisis completo de los resultados de todas las vigas se puede encontrar en el trabajo de Soares (2022).

En la Figura 6 se presentan los resultados de carga-desplazamiento, tanto para los ensayos experimentales como para los análisis numéricos, de las vigas SW3-1 y SW3-2. A partir del análisis de estos resultados, se comprobó que la simulación numérica representa muy bien el comportamiento de las dos vigas analizadas, ya que las curvas obtenidas numéricamente tienen la misma carga máxima que las curvas obtenidas en los ensayos experimentales. En cuanto al modo de falla de estas vigas, se pudo verificar, a través del análisis computacional, que la viga SW3-1 se rompe por cortante, debido a que los estribos alcanzan el límite elástico máximo (35 kN/cm^2) antes de iniciar el proceso de flujo de armadura longitudinal (46 kN/cm^2), como se muestra en la Figura 7. Por otro lado, en la viga SW3-2, la tensión en el hormigón en la dirección z, Figura 8, presenta un valor muy superior al valor de la resistencia a la tracción del hormigón ($0,22 \text{ kN/cm}^2$), evidenciando así que el fallo de la viga se produjo por fallo en el hormigón. El modo de falla de las vigas SW3-1 y SW3-2 está de acuerdo con lo observado por Khalifa (1999) en las pruebas experimentales, ya que se encontró que la falla de la viga SW3-1 ocurrió por cortante, como se muestra en la Figura 13a, y de la viga SW3-2 se debió al agrietamiento del concreto, como se muestra en la Figura 13b.

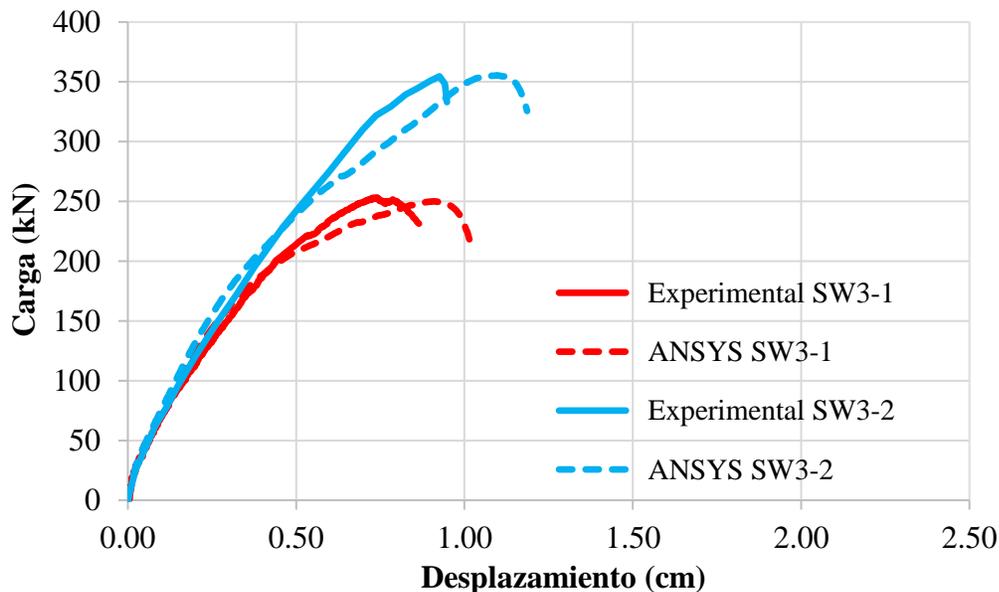


Figura 3. Diagrama carga-desplazamiento de las vigas del grupo SW3.

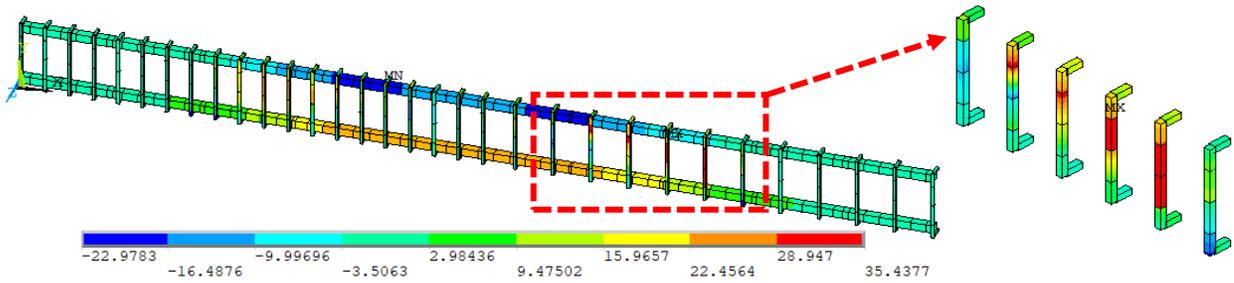


Figura 4. Tensión σ_x en la armadura de la viga SW3-1 (kN/cm²).

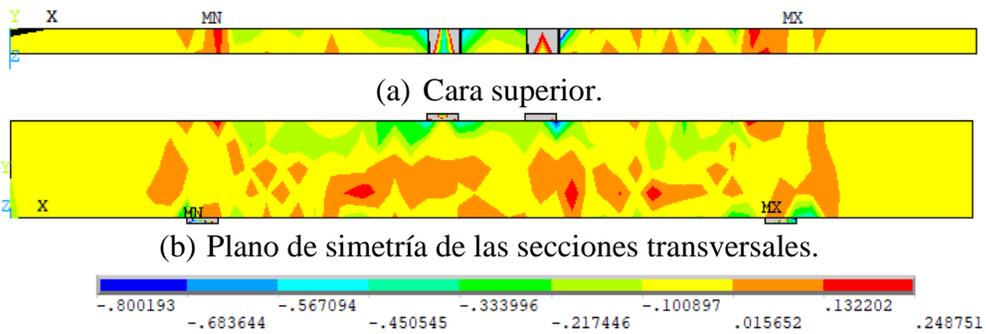


Figura 5. Tensión σ_z en el concreto de la viga SW3-2 (kN/cm²).

En la Figura 9 se presentan los resultados de carga-desplazamiento para la simulación numérica, así como para el ensayo experimental de la viga SO4-2, que se refuerza con CFRP en tiras de 50 mm. Analizando estos resultados, es posible observar que la curva obtenida numéricamente es, inicialmente, más rígida que la curva experimental, sin embargo, a partir de una carga de aproximadamente 150 kN se produce una reducción de esta rigidez y la curva presenta una carga numérica máxima muy cercana a la carga observada experimentalmente. Al verificar los resultados de las tensiones en la armadura de CFRP, Figura 10, así como las tensiones de adherencia y desplazamientos en la interfaz hormigón-refuerzo, Figura 11 y Figura 12, se encontró que esta reducción en la rigidez de la curva de carga-desplazamiento se debió al desprendimiento de la armadura en el vano de cortante de interés, ya que la interfaz alcanzó la máxima tensión de adherencia (0,366 kN/cm²) y el máximo desplazamiento (0,0169 cm), reproduciendo así el comportamiento observado en el ensayo experimental realizado por Khalifa (1999), como se muestra en la Figura 13c.

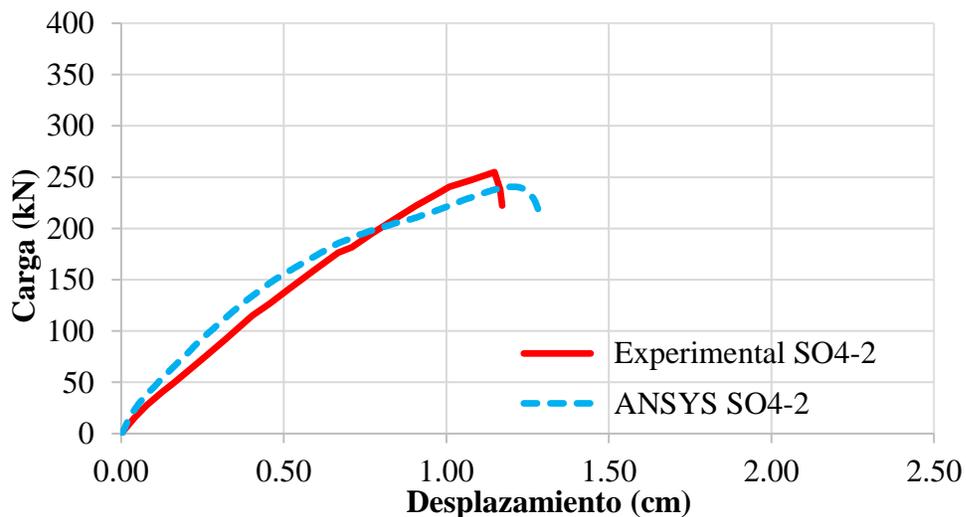


Figura 6. Diagrama carga-desplazamiento da viga SO4-2.

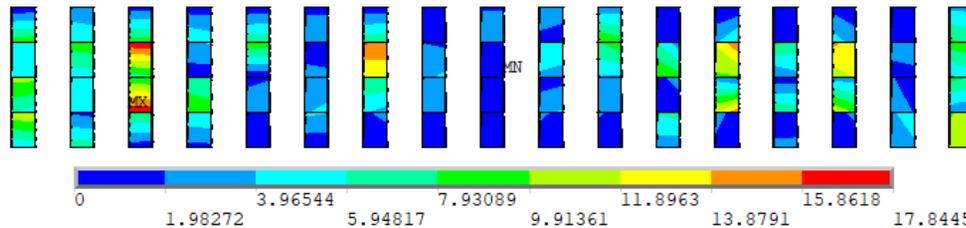


Figura 7. Tensión principal σ_1 en el refuerzo de la PRFC de la viga SO4-2 (kN/cm²).

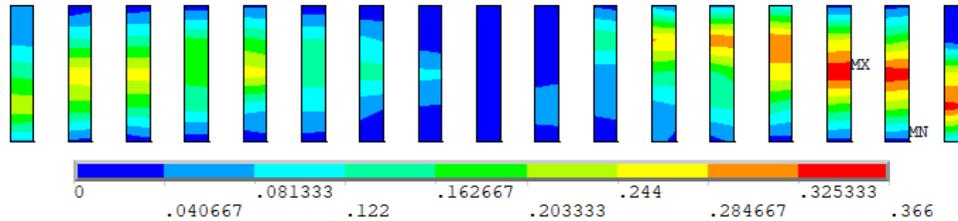


Figura 8. Tensiones de adherencia en la interfaz de la viga SO4-2 (kN/cm²).

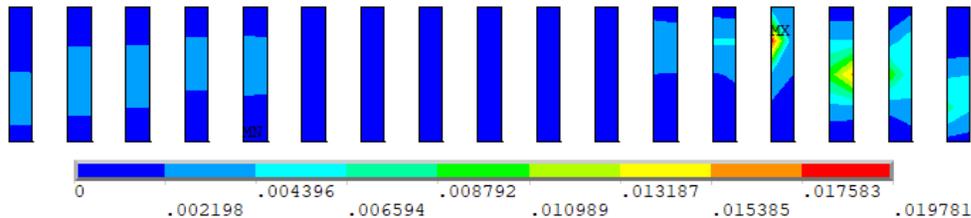


Figura 9. Desplazamientos en la interfaz de la viga SO4-2 (cm).

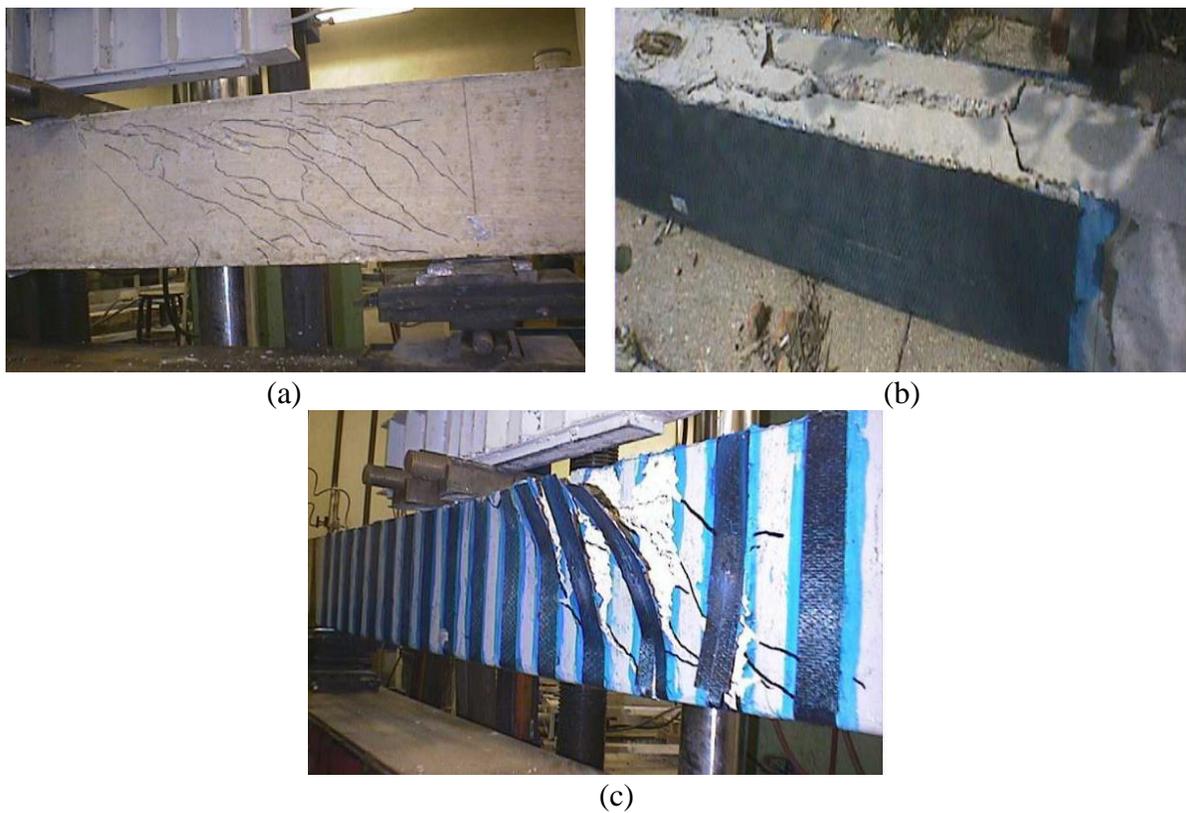


Figura 10. Modo de ruptura experimental de las vigas: (a) SW3-1; (b) SW3-2 e (c) SO4-2. (Khalifa, 1999).

En la Tabla 3 se presenta el tipo de armadura de cada viga simulada, así como los resultados numéricos y experimentales del modo de falla y la carga última, así como la variación de esta carga. A partir del análisis de estos resultados, se verificó que las simulaciones numéricas lograron identificar el mismo modo de ruptura observado en el ensayo experimental. Además, se encontró que los valores numéricos de la carga última son cercanos a los observados experimentalmente por Khalifa (1999), ya que nueve haces presentaron una variación en la carga última de hasta 10% y tres haces un valor ligeramente superior, con una variación máxima de 16.6%.

Tabla 1. Resumen dos resultados.

Nº	Descripción de la viga	Refuerzo al cizallamiento con PRFC	Experimental		Numérico		Variación (%)
			Modo de ruptura	Carga (kN)	Modo de ruptura	Carga (kN)	
1	SW3-1	-	Cizallamiento	252,8	Cizallamiento	249,9	-1,1
2	SW3-2	Dos capas (90°/0°)	Agrietamiento	354,6	Agrietamiento	355,3	0,2
3	SW4-1	-	Cizallamiento	201,2	Cizallamiento	231,6	15,1
4	SW4-2	Dos capas (90°/0°)	Agrietamiento	361,6	Agrietamiento	372,8	3,1
5	SO3-1	-	Cizallamiento	151	Cizallamiento	151	0,0
6	SO3-2	Tiras en U, 50 @ 125mm	Desprendimiento	261,9	Desprendimiento	235	-10,3
7	SO3-3	Tiras en U, 75 @ 125mm	Desprendimiento	267,1	Desprendimiento	240,4	-10,0
8	SO3-4	Una capa en U continuo	Desprendimiento	289	Desprendimiento	337,1	16,6
9	SO3-5	Dos capas (90°/0°)	Agrietamiento	339,4	Agrietamiento	321,2	-5,4
10	SO4-1	-	Cizallamiento	129,4	Cizallamiento	126,3	-2,4
11	SO4-2	Tiras en U, 50 @ 125mm	Desprendimiento	254,9	Desprendimiento	240,5	-5,6
12	SO4-3	Una capa en U continuo	Agrietamiento	311,1	Agrietamiento	341,5	9,8

A partir de los resultados de las simulaciones numéricas, se encontró que las vigas SW3-1, SW4-1, SO3-1 y SO4-1, que no cuentan con refuerzo de CFRP, se rompieron por cizallamiento, lo cual concuerda con lo observado experimentalmente, ya que las vigas de Khalifa (1999) fueron diseñadas para inducir esta falla de cortante. Además, se verificó en las simulaciones que las vigas SW3-2, SW4-2, SO3-5 y SO4-3, todas reforzadas con CFRP, no presentaron pérdida de contacto entre los elementos de interfaz, es decir, no hubo desprendimiento de la armadura, y se observó que la falla se produjo debido a la falla en el concreto que alcanzó tensiones y deformaciones muy superiores a sus valores límite. Este resultado está en línea con el comportamiento observado en el ensayo experimental realizado por Khalifa (1999), quien encontró el fracaso de estos elementos estructurales debido al agrietamiento del hormigón.

En los casos en los que el fallo de la viga en el ensayo experimental se produjo por el desprendimiento de la armadura, se encontraron dos comportamientos distintos en la simulación numérica. La primera se verificó en las vigas con armadura de CFRP en franjas (SO3-2, SO3-3 y SO4-2), donde la interfaz alcanza el máximo esfuerzo de adherencia y, posteriormente, el máximo desplazamiento en el tramo de interés (entre la segunda carga y el segundo apoyo), provocando una reducción de la rigidez de la curva de carga frente al desplazamiento en el momento del

desprendimiento de la armadura en el lado derecho. Además, en este momento, la armadura CFRP alcanza el valor de tensión más alto en el tramo de interés y, tras esto, la tensión comienza a disminuir en la armadura del lado derecho y, posteriormente, comienza a presentar el valor máximo en las bandas situadas en el lado izquierdo hasta que la viga alcanza la carga final. El segundo comportamiento se observó en la viga con armadura continua (SO3-4), donde la interfaz alcanza el valor máximo de desplazamiento para la carga numérica de falla, lo que indica que la falla de la viga ocurrió en el momento de la liberación de la armadura en el tramo de interés.

6. CONCLUSIONES

El objetivo principal del presente trabajo fue demostrar la aplicación de un modelo computacional para simular el comportamiento de vigas de hormigón armado con biapoyo, con y sin armadura a la fuerza cortante con CFRP, y para ello se utilizó el método de elementos finitos (MEF) y el software personalizado ANSYS. Las conclusiones se resumen a continuación:

- Se verificó que los modelos estructurales no lineales propuestos en este trabajo fueron capaces de predecir con razonable precisión el comportamiento de las vigas simuladas, tanto en términos de carga-desplazamiento como del modo de carga y falla de las vigas.
- Las simulaciones fueron capaces de predecir los diferentes modos de fallo de las vigas observados experimentalmente: fallos al cizallamiento, fallo del hormigón y situaciones de desprendimiento de armaduras.
- Los recursos de post procesamiento visual de ANSYS proporcionaron el análisis de la distribución de tensiones en hormigón, acero y refuerzos de CFRP, así como la evaluación de esfuerzos de adherencia y desplazamientos en la interfaz hormigón-refuerzo.

7. AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer a la CAPES – Coordinación de Perfeccionamiento del Personal de Nivel Superior y al CNPq – Consejo Nacional de Desarrollo Científico y Tecnológico por su apoyo en la realización de este estudio.

8. REFERENCIAS

- ANSYS, Inc. (2021), *ANSYS Help System*, version 19.2.
- Fédération Internationale du Béton (2013), *fib Model Code for Concrete Structures 2010*. 434 p.
- Hoffman, I. S.; Lazzari, B. M.; Campos, A.; Lazzari, P. M.; Pacheco, A. R. (2022), *Finite element numerical simulation of a cable-stayed bridge construction through the progressive cantilever method*. *Structural Concrete*, v. 23 (2), p. 632-651. <https://doi.org/10.1002/suco.202100662>
- Khalifa, A. (1999), *Shear performance of reinforced concrete beams strengthened with advanced composites*. 175 p. PhD Thesis, Structural Engineering Department, Alexandria University, Egypt.
- Khalifa, A.; Belarbi, A.; Nanni, A. (2000), *Shear Performance of RC Members Strengthened with Externally Bonded FRP Wraps*, Proc., 12th World Conference on Earthquake Engineering, Jan 30-Feb 04, Auckland, New Zealand, paper 305, 10 p.
- Khalifa, A.; Nanni, A. (2002), *Rehabilitation of rectangular simply supported RC beams with shear deficiencies using CFRP composites*. *Construction and Building Materials*, v. 16, n. 3, p. 135-146. [https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(02\)00002-8](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(02)00002-8)
- Lazzari, B. M.; Campos Filho, A.; Lazzari, P. M.; Pacheco, A. R. (2017a), *Using element-embedded rebar model in ANSYS for the study of reinforced and prestressed concrete structures*. *Computers and Concrete*, v. 19, p. 347-356. <https://doi.org/10.12989/cac.2017.19.4.347>
- Lazzari, P. M.; Campos Filho, A.; Lazzari, B. M.; Pacheco, A. R. (2017b), *Structural analysis of a*

- prestressed segmented girder using contact elements in ANSYS*. Computers and Concrete, v. 20, p. 319-327. <https://doi.org/10.12989/cac.2017.20.3.319>
- Lazzari, P. M.; Campos Filho, A.; Lazzari, B. M.; Pacheco, A. R.; Gomes, R. (2019), *Numerical simulation of the constructive steps of a cable-stayed bridge using ANSYS*. Structural Engineering and Mechanics, v. 69, p. 269-281. <https://doi.org/10.12989/sem.2019.69.3.269>
- Machado, G. G., Campos Filho, A., Lazzari, P. M., Lazzari, B. M.; Pacheco, A. R. (2023), *Numerical simulation by the finite element method of the constructive steps of a precast prestressed segmental bridge*. Structural Engineering and Mechanics, v. 85, n. 2, p. 163-177. <https://doi.org/10.12989/sem.2023.85.2.163>
- Medeiros, M. V. (2019), *Simulação numérica do comportamento de peças fletidas reforçadas com PRFC*. 194 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- Mhanna, H. H., Hawileh, R. A., Abdalla, J. A. (2021), *Shear behavior of RC T-beams externally strengthened with anchored high modulus carbon fiber-reinforced polymer (CFRP) laminates*. Composite Structures, v. 272, p. 114198. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.114198>
- Ouyang, Z., Li, G. (2009), *Cohesive zone model based analytical solutions for adhesively bonded pipe joints under torsional loading*. International Journal of Solids and Structures, v. 46, n. 5, p. 1205-1217. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2008.10.021>
- Sarturi, F. D. M. (2014), *Simulação computacional de estruturas de concreto reforçadas com aço e compósitos de fibra de carbono*. 234 p. Dissertação (Mestrado em Mecânica Computacional) – Programa de Pós-Graduação em Métodos Numéricos em Engenharia. Universidade Federal do Paraná, Curitiba.
- Soares, P. B. (2022), *Simulação através do Método dos Elementos Finitos do reforço ao esforço cortante de vigas de concreto utilizando polímeros reforçados com fibras de carbono*. 215 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- Soares, P. B., Lazzari, P. M., Campos Filho, A., Lazzari, B. M., Pacheco, A. R. (2023), *Identification of the failure modes of CFRP shear-strengthened reinforced concrete beams by the finite element method*. IBRACON Structures and Materials Journal, v. 16, n. 3, p. 1-21. <https://doi.org/10.1590/S1983-41952023000300004>
- Titello, E. P. (2020), *Análise da confiabilidade de vigas em concreto armado reforçado com fibras de aço em relação aos esforços transversais*. 161 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.