

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

Recebido: 01/06/2024 | Correções recebidas: 31/07/2024 | Aceito: 02/08/2024 | Publicado: 01/09/2024

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 descolamento 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 biapoias, 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.

Citar como: Soares, P. B. Lazzari, P. M. Campos Filho, A. Lazzari, B. M. (2024), “Previsão do comportamento de vigas de concreto armado reforçadas ao cisalhamento com 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.

Contribuição de cada autor

Palloma Borges Soares: conceituação, redação, curadoria de dados, análise formal e metodologia; Paula Manica Lazzari e Américo Campos Filho: conceituação, análise formal, metodologia e supervisão; Bruna Manica Lazzari: conceituação e metodologia.

Licença Creative Commons

Copyright 2024 dos autores. Este trabalho é um artigo de acesso aberto publicado sob os termos e condições de uma Licença Internacional Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC BY 4.0).

Discussões e correções subsequentes à publicação

Qualquer disputa, incluindo as respostas dos autores, será publicada na segunda edição de 2025, desde que as informações sejam recebidas antes do fechamento da primeira edição de 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.

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

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.

Informação Legal

A Revista ALCONPAT é uma publicação trimestral da 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 direitos para uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos concedidos pelo Instituto Nacional de Direito de Autor. Editor responsável: Dr. Pedro Castro Borges. A responsável pela última atualização desta edição foi a Unidade de Informática da ALCONPAT, Elizabeth Sabido Maldonado.

As opiniões dos autores não refletem necessariamente a posição do editor.

A reprodução total ou parcial do conteúdo e das imagens da publicação é realizada de acordo com o código COPE e a licença CC BY 4.0 da Revista ALCONPAT.

1. INTRODUÇÃO

Ao longo da vida útil de estruturas de concreto armado pode ocorrer uma redução no seu desempenho estrutural em função de diversos fatores, tornando estas estruturas deficientes para resistir aos esforços para o qual foram projetadas. Além disso, algumas estruturas antigas são consideradas estruturalmente inseguras devido a alterações em normas técnicas. Portanto, deve-se realizar uma verificação estrutural destas edificações, a fim de avaliar os esforços, solicitações, níveis de segurança e definir o método de intervenção a ser adotado para sua adequação. Dentre os métodos de intervenção, o reforço estrutural é um dos mais utilizados, visto que este consiste na elevação da resistência, ou de outras propriedades, de uma estrutura ou um elemento estrutural, proporcionando um desempenho superior ao previsto em projeto. Há inúmeras técnicas de reforço de elementos estruturais, entre elas está a protensão externa, o aumento da seção transversal por meio de uma camada adicional de concreto armado, bem como a aplicação de reforços externos através da colagem de chapas de aço ou materiais compósitos a base de fibras.

Dos métodos supracitados, um dos mais utilizados é a aplicação de reforços externos com chapas de aço coladas com resina epóxi, contudo, esse método apresenta baixa resistência à corrosão e um elevado peso próprio, ocasionando assim problemas no manuseio e necessidade de sistema de escoramento. Diante disso, pesquisas começaram a ser desenvolvidas em busca de materiais com comportamentos mais eficientes, o que possibilitou desenvolver uma técnica de reforço que consiste na utilização de materiais compósitos, denominados de polímeros reforçados com fibras (PRF), que apresentam propriedades como baixo peso específico, elevada resistência à tração, resistência à corrosão, elevada resistência à fadiga e bom amortecimento ao choque. Além disso, possui facilidade de assumir formas complexas, facilidade de manuseio e aplicação, e não apresenta limitações de comprimento. Dentre os tipos de materiais compósitos, os polímeros reforçados com fibras de carbono (PRFC) são os mais indicados para o reforço estrutural de elementos de concreto armado, uma vez que as fibras de carbono são as que possuem melhores propriedades mecânicas, possibilitando soluções de reforço leves e com aumentos significativos da capacidade resistente dos elementos estruturais através de uma pequena quantidade de reforço (Mhanna; Hawileh; Abdalla, 2021). Por outro lado, o uso do PRF apresenta algumas desvantagens, incluindo o custo elevado e o comportamento pobre em altas temperaturas, atribuído especialmente às resinas epóxi utilizadas para ligar as fibras.

Com o intuito de avaliar e prever o comportamento do PRFC, faz-se necessário realizar uma análise aprofundada dos elementos estruturais reforçados com esse material. Para isso, optou-se por utilizar o método dos elementos finitos (MEF), o qual possibilita simular facilmente diversas disposições geométricas, condições de contorno e carregamento, assim como realizar análises não lineares de estruturas de concreto armado e modelagem da aderência entre materiais, através da utilização dos elementos de interface. Diante disso, o objetivo deste trabalho é demonstrar a viabilidade de simular computacionalmente o comportamento de vigas de concreto armado biapoiadas, sem e com reforço ao esforço cortante com PRFC, utilizando o método dos elementos finitos com o emprego do programa ANSYS customizado, versão 19.2. Conforme Soares (2022) e Soares et al. (2023), especial atenção será dada à previsão das tensões de aderência na interface entre o reforço e a viga de concreto, a fim de identificar falhas por perda de aderência do sistema de reforço.

2. MODELOS CONSTITUTIVOS DOS MATERIAIS

A principal característica do comportamento do concreto é apresentar uma baixa resistência à tração e alta resistência à compressão. Portanto, para representar o comportamento deste material foram utilizados dois modelos constitutivos distintos, os quais foram implementados por Lazzari et al. (2017a), Lazzari et al. (2019), Hoffman et al. (2022) e Machado et al. (2023), através da

ferramenta de customização UPF (*User Programmable Features*) do ANSYS, contudo, foram feitas algumas alterações nestes modelos por Soares (2022) e Soares et al. (2023).

Para o concreto comprimido foi adotado o modelo elastoplástico com endurecimento, o qual é composto por um critério de ruptura, um critério de plastificação e uma regra de endurecimento. Para o critério de ruptura utilizou-se a superfície de ruptura de Ottosen, conforme recomenda o Código Modelo fib 2010 (2013). Além disso, foi considerado que o concreto comprimido apresenta endurecimento isotrópico e que a superfície de plastificação possui o mesmo formato da superfície de ruptura. Já a regra de endurecimento estabelece como as superfícies de plastificação (superfície de carregamento) se movimentam no decorrer da deformação plástica, sendo determinada pela relação entre a tensão efetiva e a deformação plástica efetiva, possibilitando assim, extrapolar os resultados de um simples ensaio uniaxial para uma situação multiaxial. Portanto, adotou-se como regra de endurecimento a curva correspondente ao diagrama tensão-deformação para o concreto sob compressão uniaxial, proposto pelo Código Modelo fib 2010 (2013).

Já o concreto tracionado foi modelado como sendo um material elástico com amolecimento, onde o concreto comporta-se como um material elástico-linear até a ruptura, e após isso, adota-se o modelo de fissuras distribuídas com um enrijecimento à tração (*tension stiffening*), o qual é especificado por um critério de fissuração, uma regra para a colaboração do concreto entre fissuras e um modelo para a transferência das tensões de corte, o que está em concordância com o modelo de comportamento sugerido por Hinton (1988). Além disso, a partir da fissuração de determinado ponto de integração, considerou-se desacoplada a rigidez segundo os eixos locais da fissura. Dessa forma, para cada uma das duas direções principais paralelas ao plano da fissura, são utilizados diagramas tensão-deformação correspondentes a solicitações uniaxiais, sendo que, caso ocorra o encurtamento em umas destas direções, o diagrama tensão deformação adotado é do concreto comprimido, e caso ocorra um alongamento, o diagrama passa a ser o do concreto tracionado.

Adotou-se ainda um novo critério no modelo do concreto fissurado, o qual foi implementado por Titello (2020), que consiste na consideração do efeito de enrijecimento à tração em função da orientação da armadura, possibilitando uma análise mais precisa de vigas sem armaduras transversais. Dessa forma, caso não sejam utilizadas armaduras transversais, o efeito de enrijecimento à tração é considerado apenas para fissuras verticais, sendo que a fim de reduzir erros, são classificadas como verticais as fissuras que formam um ângulo de até 15° com a vertical. Uma vez que nas estruturas de concreto armado considera-se que as barras de aço resistem somente a esforços axiais, utilizou-se um modelo uniaxial para descrever seu comportamento. Para os aços obtidos por laminação a quente, com patamar de escoamento bem definido, utilizou-se o modelo elastoplástico perfeito, enquanto para os aços encruados a frio, adotou-se o modelo elastoplástico com endurecimento linear a partir 85% da tensão de escoamento (Lazzari et al., 2017b).

Em relação a modelagem numérica da interface entre o concreto e o reforço de PRFC, optou-se por utilizar o modelo de zona coesiva (*Cohesive Zone Model - CZM*), visto que este é amplamente utilizado na análise de problemas que envolvem materiais compósitos, pois evita a singularidade, apresenta facilidade de implementação em métodos numéricos, assim como possibilita desprezar as dimensões da região aderente. É importante ressaltar que, o CZM utiliza a relação entre tensão e deslocamento relativo para a análise da interface (Sarturi, 2014; Ouyang; Li, 2009). Além disso, conforme Medeiros (2019), a grande maioria das simulações numéricas desenvolvidas admitem que a interface entre o concreto e o PRFC é dominada pelos deslocamentos tangenciais, portanto, foi considerado que a interface possui um comportamento conduzido pelo Modo II de separação, no qual a relação tensão de aderência e o deslizamento apresenta um formato bilinear, sendo que os parâmetros do modelo implementado no ANSYS foram definidos a partir de um dos modelos de interface mais precisos propostos na literatura, que é o modelo bilinear de Lu et al. (2005), cujo detalhamento está em Soares (2022) e Soares et al. (2023).

3. MODELAGEM COMPUTACIONAL

Com o intuito de realizar as simulações numéricas propostas neste trabalho, utilizou-se o método dos elementos finitos (MEF), visto que este permite a consideração do comportamento não linear dos materiais concreto e aço, bem como das falhas por perda de aderência do sistema de reforço, através da introdução de elementos especiais na região de interface. Para isto, optou-se por utilizar o programa em elementos finitos ANSYS (*Analysis Systems Incorporated*), versão 19.2, que possui uma linguagem chamada APDL (*ANSYS Parametric Design Language*) que proporciona ao usuário um maior controle sobre a simulação numérica. Além disso, o ANSYS disponibiliza em sua biblioteca uma série de elementos finitos, sendo que a escolha é realizada conforme o tipo de problema a ser estudado, função estrutural e esforço computacional.

Para a modelagem dos elementos estruturais analisados neste trabalho, foi utilizado o elemento SOLID186 para representar o concreto, que é um elemento quadrático tridimensional composto por 20 nós e com três graus de liberdade por nó, correspondentes à translação segundo os eixos X, Y e Z. Optou-se por utilizar este elemento em função dos bons resultados que o mesmo proporciona, sem a necessidade de grande discretização da malha, ocasionando assim uma redução considerável do tempo de análise estrutural. É importante ressaltar que, o SOLID186 possui compatibilidade com o elemento REINF264, o qual é essencial para a representação do concreto com armadura incorporada.

Portanto, para representar de forma discreta as armaduras em aço, que estão incorporadas, assim como perfeitamente aderidas ao sólido de concreto, adotou-se o elemento finito REINF264, o qual é apropriado para simular fibras de reforço com orientações arbitrárias, sendo que cada fibra é modelada separadamente e possui somente rigidez axial. É importante ressaltar que, as coordenadas nodais, os graus de liberdade e as conectividades do elemento REINF264 são idênticas às do elemento finito no qual está inserido, neste caso, o elemento SOLID186. Quanto ao material, geometria e orientação dos elementos de armadura, adotou-se o método com malha independente que utiliza os elementos MESH200, os quais são apenas elementos de malhas, que não contribuem para a solução do problema, mas definem a posição para criação dos elementos de reforço.

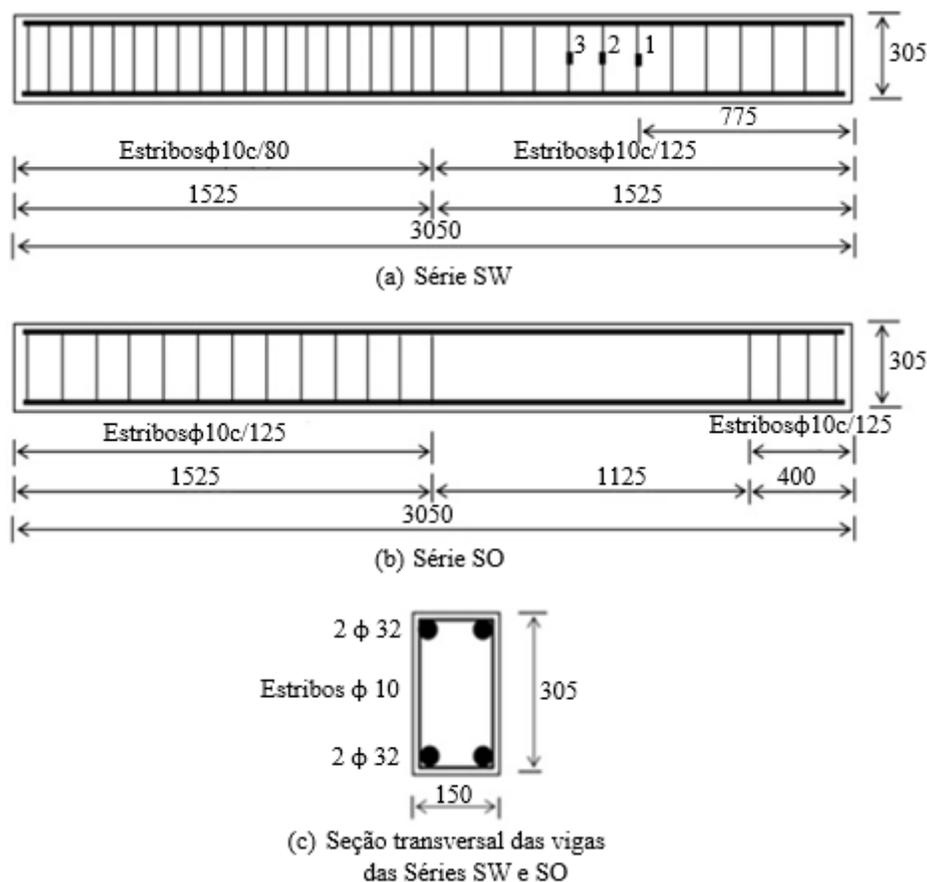
Em relação a modelagem do reforço de PRFC, utilizou-se o elemento finito SHELL281 que é um elemento de casca que possui 8 nós, com seis graus de liberdade por nó, considerando as rigidezes à flexão e de membrana. No entanto, como o reforço em PRFC resiste principalmente a esforços de tração, definiu-se que o elemento apresentaria somente rigidez de membrana, resultando assim, em três graus de liberdade por nó (translação segundo os eixos X, Y e Z). Para modelagem da interface entre o concreto e o reforço, adotou-se o método de definição de contato por pares que consiste em associar o elemento de contato a um elemento alvo, através de um conjunto de constantes reais. Como elemento de contato utilizou-se o CONTA174, que é apropriado para representar o contato deslizante entre uma superfície deformável de um sólido ou casca 3D, e a superfície alvo que é constituída por elementos TARGE170.

Para implementação do modelo constitutivo do concreto, modelo elastoplástico com fissuração, utilizou-se a sub-rotina USERMAT3D, que é disponibilizada pelo sistema de customização, o qual utiliza a linguagem de programação FORTRAN e é compatível com o elemento tridimensional utilizado para representar o concreto (SOLID186). Em relação as armaduras, adotou-se o modelo constitutivo BISO (*Bilinear Isotropic Hardening*), disponível na biblioteca interna do ANSYS.

4. CARACTERÍSTICAS ESTRUTURAIS E DO MODELO NUMÉRICO

Neste trabalho foram simuladas doze vigas de concreto armado biapoiadas ensaiadas experimentalmente por Khalifa (1999). Estas vigas foram divididas em duas séries, denominadas de SW e SO, em função da existência ou não de estribos na metade direita da viga. A série SW é

composta por quatro vigas com estribos ao longo de todo o seu comprimento, como mostra a Figura 1a. A série SO possui oito vigas, as quais não possuem estribos na metade direita da viga, como pode-se observar na Figura 1b. Todas as vigas ensaiadas por Khalifa (1999) possuem seção transversal de 150x305 mm, Figura 1c, armadura longitudinal superior e inferior composta por duas barras de 32 mm de diâmetro, bem como armadura transversal composta por estribos com diâmetro de 10 mm e com espaçamento de 80 mm e 125 mm, como mostra a Figura 1a e a Figura 1b. Na Tabela 1 são apresentadas as propriedades dos materiais constituintes das vigas simuladas.



Dimensões em mm

▪ Localização dos extensômetros

Figura 1. Detalhamento das vigas (Khalifa; Nanni, 2002).

Tabela 1. Propriedades dos materiais.

Material	Especificações	Resistência à compressão (MPa)	Tensão de escoamento (MPa)	Resistência à tração (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)
Concreto	Série SW	19,3	-	2.2	20
	Série SO	27,5	-	2.7	25
Aço	$\phi = 32\text{mm}$	-	460	730	200
	$\phi = 10\text{mm}$	-	350	530	200
PRFC	$t_f = 0,165 \text{ mm}$	-	-	3790	228

Khalifa (1999) dividiu cada série de viga em dois grupos em função da relação entre vão de cisalhamento (a) e altura útil da viga (d), sendo que foi utilizada a relação a/d igual a 3 e 4, o que

resultou em quatro grupos de vigas denominados de SW3, SW4, SO3 e SO4. Em relação ao reforço de PRFC, têm-se que uma viga de cada grupo não foi reforçada com o PRFC e foram denominadas de SW3-1, SW4-1, SO3-1 e SO4-1. As demais vigas foram reforçadas com PRFC colados externamente e seguindo três configurações de reforço, como mostra a Figura 2, sendo denominadas de SW3-2, SW4-2, SO3-2, SO3-3, SO3-4, SO3-5, SO4-2 e SO4-3.

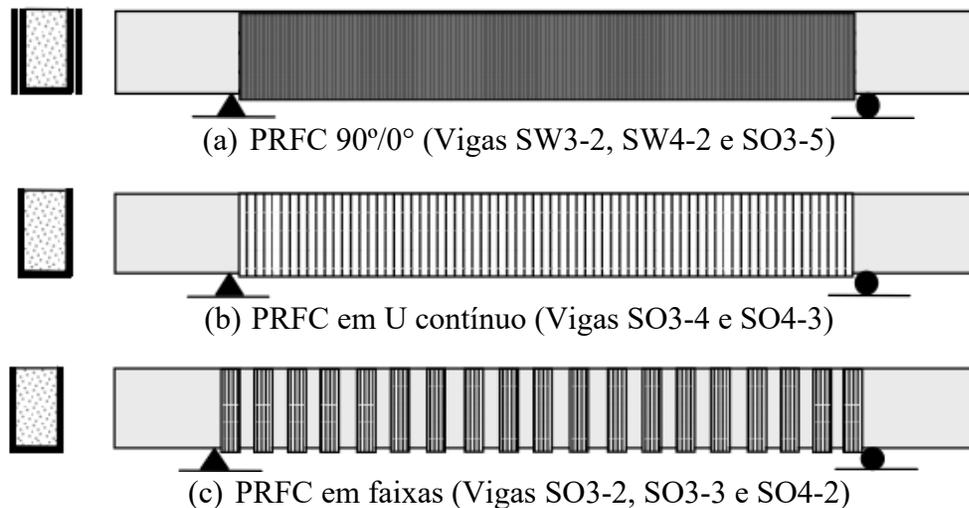


Figura 2. Representação esquemática das configurações de reforço (Khalifa; Nanni, 2002).

Quanto ao carregamento, todas as vigas foram ensaiadas à flexão a quatro pontos e para isso aplicou-se uma carga concentrada em uma viga de distribuição de aço com o intuito de gerar as duas cargas concentradas. Para as vigas com relação a/d igual a 3 as cargas foram aplicadas a 760 mm de distância dos apoios e para as vigas com relação a/d igual a 4 a uma distância de 1020 mm. A fim de monitorar os deslocamentos verticais em pontos específicos das vigas, foram utilizados quatro LVDTs (*linear variable differential transformers*). Para realização da simulação numérica das vigas biapoiadas de Khalifa (1999), fez-se a modelagem apenas da metade da largura das vigas, tendo em vista que as vigas apresentam simetria tanto de geometria, quanto de carregamento, ao longo da seção transversal. A fim de evitar a concentração de tensões nos pontos de aplicação do carregamento e nos apoios, foram modeladas placas com o elemento SOLID186, com dimensões de 10x2x7,5 cm e módulo de elasticidade cinco vezes maior que o do concreto ($E = 100.000 \text{ MPa}$). A Figura 3 apresenta a discretização da malha e todos os elementos finitos adotados no modelo das vigas, onde a Figura 3a apresenta a viga SO4-1, que é uma viga sem reforço, a Figura 3b mostra a viga SW3-2, a qual possui reforço de PRFC contínuo e a Figura 3c expõe a viga SO4-2, reforçada com faixas de PRFC. Já na Figura 4 pode-se observar a discretização da seção transversal das vigas sem reforço, Figura 4a, e com reforço de PRFC, Figura 4b. Para modelar o adesivo utilizado para colar o compósito PRFC à superfície do concreto adotou-se o elemento SOLID186 e módulo de elasticidade de 2,5 GPa. O adesivo foi modelado em duas camadas, sendo uma na superfície de concreto e a outra na superfície do compósito de PRFC, permitindo assim a geração dos elementos CONTA174 e TARGE170 entre as camadas de adesivo. O elemento de contato CONTA174 foi gerado na camada de adesivo ligada ao reforço PRFC e o elemento alvo TARGE170 foi gerado na camada de adesivo em contato com a viga, Figura 5. Conforme descrito no item 2 deste trabalho, as propriedades do modelo de interface foram obtidas a partir do modelo e formulações propostos por Lu et al. (2005), possibilitando assim obter os valores de tensão máxima de aderência, rigidez tangencial da interface e deslizamento máximo, os quais são apresentados na Tabela 2.

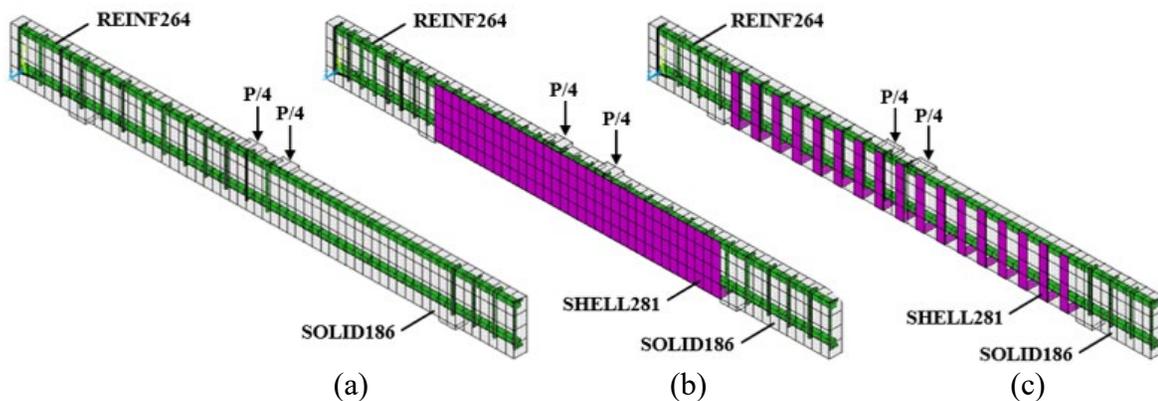


Figura 3. Discretização em elementos finitos das vigas: (a) SO4-1; (b) SW3-2 e (c) SO4-2.

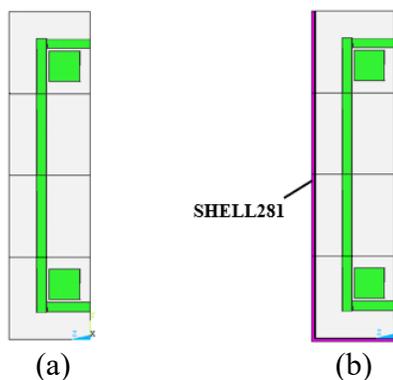


Figura 4. Seções transversais das vigas: (a) sem reforço; (b) PRFC em U.

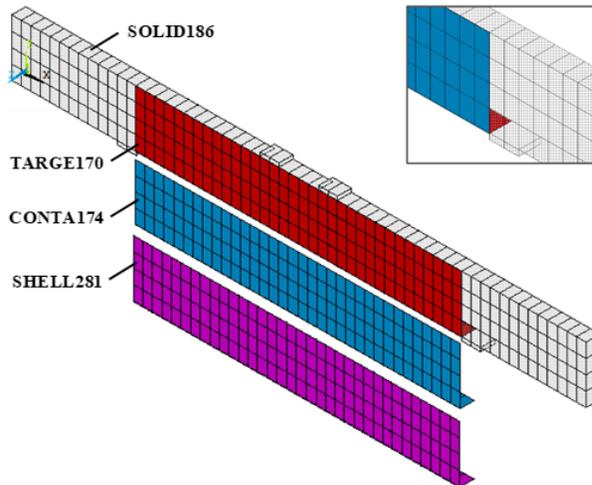


Figura 5. Elementos CONTA174 e TARGE170 no modelo da viga SW3-2.

Tabela 2. Parâmetros do modelo da interface.

Série	Tensão máxima de aderência τ_{fl} (kN/cm ²)	Rigidez tangencial K_t (kN/cm ³)	Deslizamento máximo s_0 (cm)
SW	0,317	77	0,0182
SO	0,366	77	0,0169

5. ANÁLISE DOS RESULTADOS NUMÉRICOS

Neste item, realiza-se uma análise comparativa entre os resultados numéricos e os resultados experimentais obtidos por Khalifa (1999), os quais também foram abordados nos trabalhos de Khalifa, Belardi e Nanni (2000) e Khalifa e Nanni (2002). Para isso, os resultados são apresentados através de curvas de carga versus deslocamento no vão de cisalhamento de interesse, assim como por tensões no concreto, nas armaduras e no reforço em PRFC. Analisou-se ainda o comportamento da interface por meio dos resultados de tensões e deslizamentos obtidos pelos elementos de contato. A fim de simular o carregamento utilizado no ensaio experimental, foi imposto um deslocamento vertical nos pontos em que as cargas concentradas atuavam, cujo valor adotado foi, no mínimo, 50% maior que o observado no ensaio experimental. Tendo em vista a quantidade de resultados obtidos para as doze vigas simuladas, optou-se por apresentar os resultados de três vigas, uma para cada modo de ruptura identificado, assim como um resumo dos resultados de todas as vigas ensaiadas, como mostra a Tabela 3. É importante ressaltar que, uma análise completa dos resultados de todas as vigas pode ser encontrada no trabalho de Soares (2022).

A Figura 6 apresenta os resultados de carga-deslocamento, tanto para os ensaios experimentais, quanto para as análises numéricas, das vigas SW3-1 e SW3-2. A partir da análise destes resultados, verificou-se que a simulação numérica representa muito bem o comportamento das duas vigas analisadas, uma vez que, as curvas obtidas numericamente possuem carga máxima igual as das curvas obtidas nos ensaios experimentais. Em relação ao modo de ruptura destas vigas, foi possível constatar, através da análise computacional, que a viga SW3-1 rompe por cisalhamento, pois os estribos atingem a tensão máxima de escoamento (35 kN/cm^2) antes de iniciar o processo de escoamento da armadura longitudinal (46 kN/cm^2), como mostra a Figura 7. Já na viga SW3-2, a tensão no concreto na direção z, Figura 8, apresenta valor muito superior ao valor da resistência à tração do concreto ($0,22 \text{ kN/cm}^2$), evidenciando assim que a ruptura da viga ocorreu por falha no concreto. O modo de ruptura das vigas SW3-1 e SW3-2 estão de acordo com o observado por Khalifa (1999) nos ensaios experimentais, visto que, este constatou-se que a ruptura da viga SW3-1 ocorreu por cisalhamento, como mostra a Figura 13a, e da viga SW3-2 deu-se por fendilhamento do concreto, conforme Figura 13b.

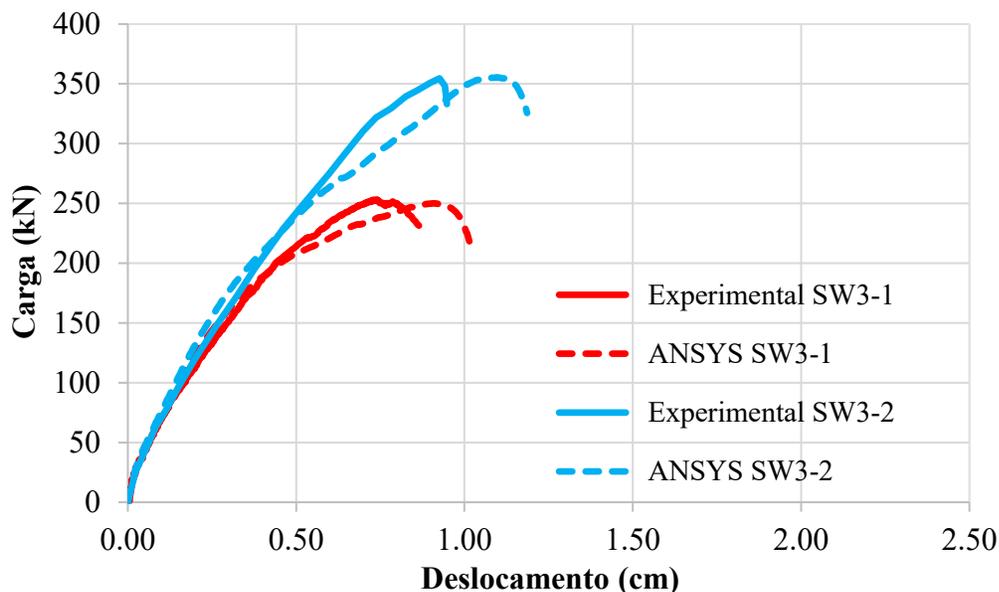


Figura 3. Diagrama carga-deslocamento das vigas do grupo SW3.

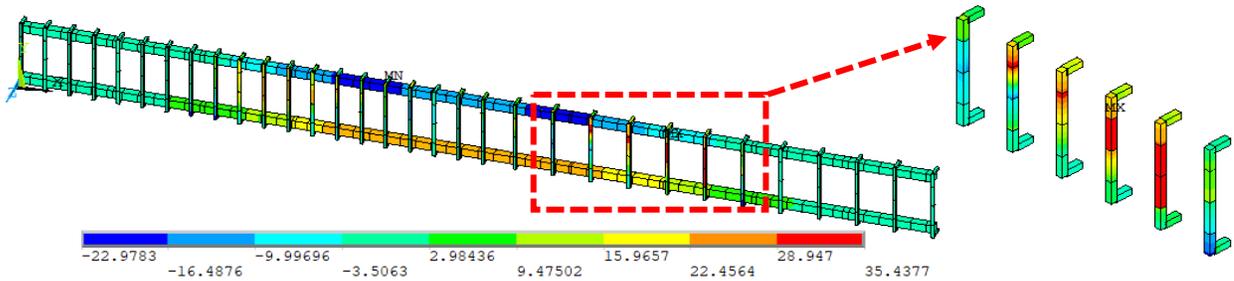


Figura 4. Tensão σ_x na armadura da viga SW3-1 (kN/cm²).

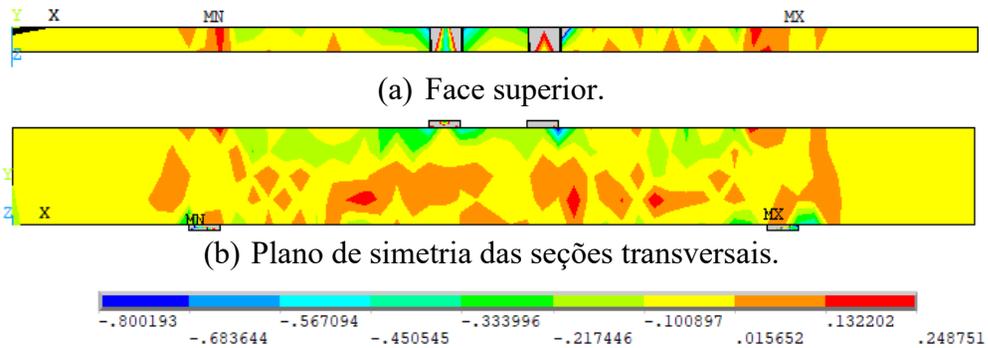


Figura 5. Tensão σ_z no concreto da viga SW3-2 (kN/cm²).

A Figura 9 apresenta os resultados de carga-deslocamento para a simulação numérica, assim como para o ensaio experimental da viga SO4-2, a qual é reforçada com PRFC em faixas de 50 mm. Analisando estes resultados, é possível observar que a curva obtida numericamente é, inicialmente, mais rígida que a curva experimental, contudo, a partir de uma carga de aproximadamente 150 kN ocorre uma redução nessa rigidez e a curva apresenta carga máxima numérica muito próxima da carga observada experimentalmente. Verificando os resultados de tensões no reforço de PRFC, Figura 10, assim como as tensões de aderência e deslizamentos na interface concreto-reforço, Figura 11 e Figura 12, constatou-se que essa redução na rigidez da curva de carga-deslocamento ocorreu devido ao descolamento do reforço no vão de cisalhamento de interesse, uma vez que, a interface atingiu a tensão de aderência máxima (0,366 kN/cm²) e o deslizamento máximo (0,0169 cm), reproduzindo assim o comportamento observado no ensaio experimental realizado por Khalifa (1999), como mostra a Figura 13c.

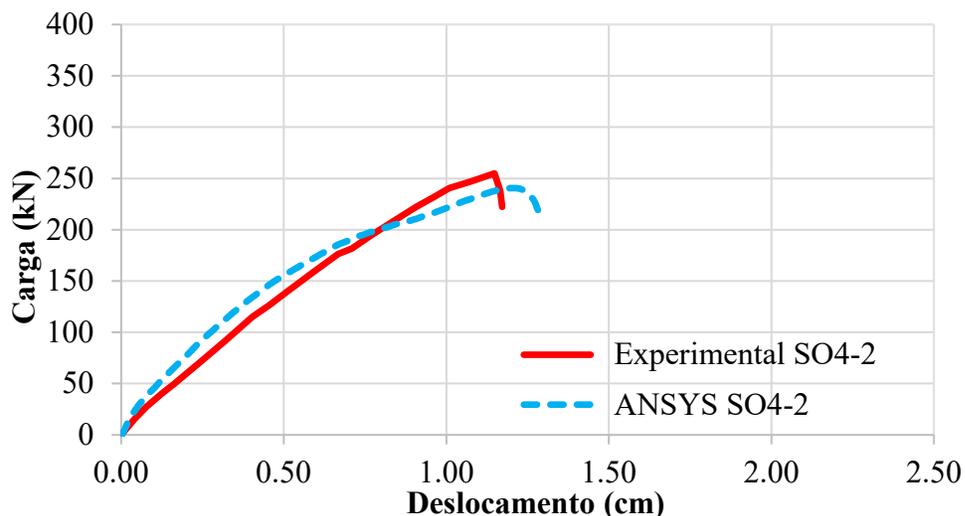


Figura 6. Diagrama carga-deslocamento da viga SO4-2.

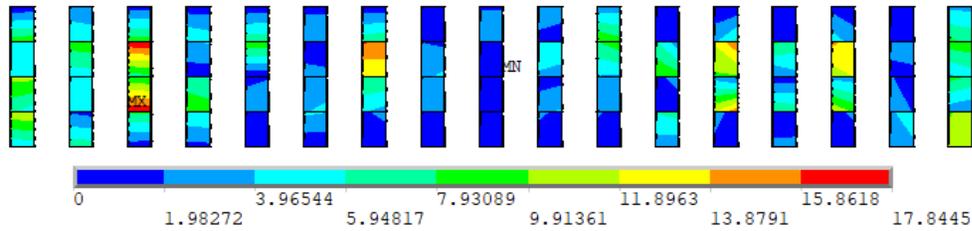


Figura 7. Tensão principal σ_1 no reforço de PRFC da viga SO4-2 (kN/cm²).

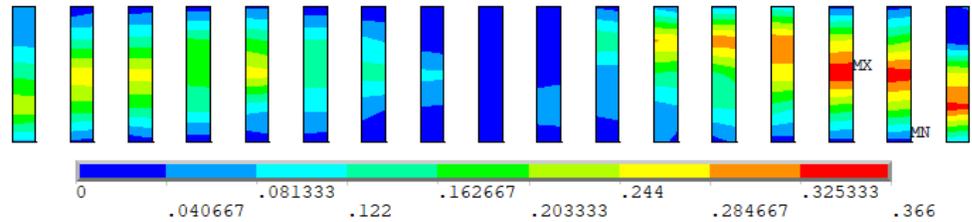


Figura 8. Tensões de aderência na interface da viga SO4-2 (kN/cm²).

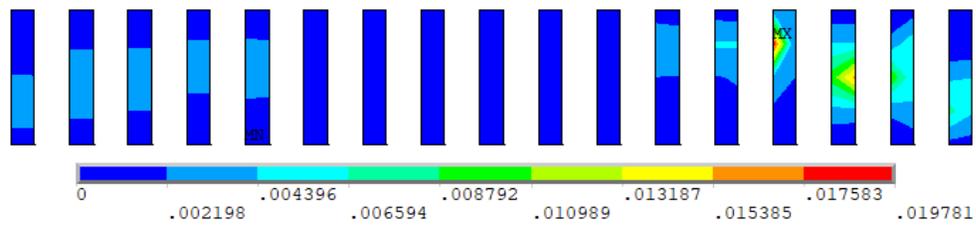


Figura 9. Deslizamentos na interface da viga SO4-2 (cm).

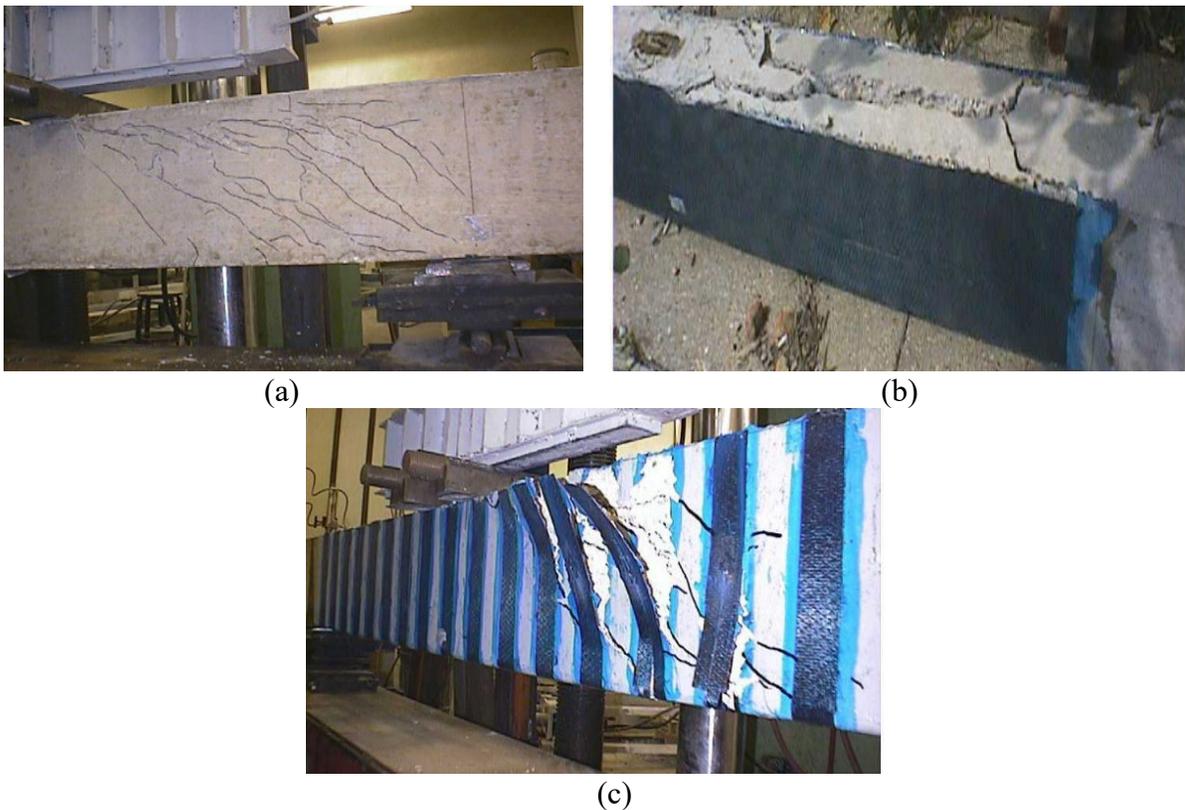


Figura 10. Modo de ruptura experimental das vigas: (a) SW3-1; (b) SW3-2 e (c) SO4-2. (Khalifa, 1999).

A Tabela 3 apresenta o tipo de reforço de cada viga simulada, bem como os resultados, numéricos e experimentais, de modo de ruptura e carga última, assim como a variação desta carga. A partir da análise destes resultados, verificou-se que as simulações numéricas foram capazes de identificar o mesmo modo de ruptura observado no ensaio experimental. Além disso, constatou-se que os valores numéricos da carga última são próximos aos observados por Khalifa (1999) experimentalmente, visto que nove vigas apresentaram uma variação na carga última de até 10% e três vigas um valor um pouco superior, com variação máxima de 16,6%.

Tabela 1. Resumo dos resultados.

Nº	Descrição da viga	Reforço ao cisalhamento com PRFC	Experimental		Numérico		Variação (%)
			Modo de ruptura	Carga (kN)	Modo de ruptura	Carga (kN)	
1	SW3-1	-	Cisalhamento	252,8	Cisalhamento	249,9	-1,1
2	SW3-2	Duas camadas (90°/0°)	Fendilhamento	354,6	Fendilhamento	355,3	0,2
3	SW4-1	-	Cisalhamento	201,2	Cisalhamento	231,6	15,1
4	SW4-2	Duas camadas (90°/0°)	Fendilhamento	361,6	Fendilhamento	372,8	3,1
5	SO3-1	-	Cisalhamento	151	Cisalhamento	151	0,0
6	SO3-2	Faixas em U, 50 @ 125mm	Descolamento	261,9	Descolamento	235	-10,3
7	SO3-3	Faixas em U, 75 @ 125mm	Descolamento	267,1	Descolamento	240,4	-10,0
8	SO3-4	Uma camada em U contínuo	Descolamento	289	Descolamento	337,1	16,6
9	SO3-5	Duas camadas (90°/0°)	Fendilhamento	339,4	Fendilhamento	321,2	-5,4
10	SO4-1	-	Cisalhamento	129,4	Cisalhamento	126,3	-2,4
11	SO4-2	Faixas em U, 50 @ 125mm	Descolamento	254,9	Descolamento	240,5	-5,6
12	SO4-3	Uma camada em U contínuo	Fendilhamento	311,1	Fendilhamento	341,5	9,8

A partir dos resultados das simulações numéricas, constatou-se que as vigas SW3- 1, SW4-1, SO3-1 e SO4-1, as quais não possuem reforço de PRFC, romperam por cisalhamento, o que está de acordo com o observado experimentalmente, visto que as vigas de Khalifa (1999) foram dimensionadas para induzir essa ruptura por cisalhamento. Além disso, foi verificado nas simulações que as vigas SW3-2, SW4-2, SO3-5 e SO4-3, todas reforçadas com PRFC, não apresentaram perda de contato entre os elementos da interface, isto é, não ocorreu o descolamento do reforço, tendo sido observado que a ruptura ocorreu devido à falha no concreto que atingiu tensões e deformações muito superiores aos seus valores limites. Este resultado vai ao encontro do comportamento observado no ensaio experimental realizado por Khalifa (1999), que constatou a falha desses elementos estruturais devido ao fendilhamento do concreto.

Nos casos que a falha da viga no ensaio experimental ocorreu devido descolamento do reforço contou-se na simulação numérica dois comportamentos distintos. O primeiro foi verificado nas vigas com reforço de PRFC em faixas (SO3-2, SO3-3 e SO4-2), onde a interface atinge a tensão máxima de aderência e, posteriormente, o deslizamento máximo no vão de cisalhamento de interesse (entre a segunda carga e o segundo apoio), ocasionando uma redução na rigidez da curva

de carga versus deslocamento no momento do desprendimento do reforço do lado direito. Além disso, neste momento, o reforço de PRFC atinge o maior valor de tensão no vão de cisalhamento de interesse e, após isto, a tensão começa a diminuir no reforço do lado direito e, posteriormente, passa a apresentar valor máximo nas faixas localizadas no lado esquerdo até a viga atingir a carga última. O segundo comportamento foi observado na viga com reforço contínuo (SO3-4), onde a interface atinge o valor máximo de deslizamento para a carga de ruptura numérica, indicando que a ruptura da viga ocorreu no momento do descolamento de reforço no vão de cisalhamento de interesse.

6. CONCLUSÕES

O objetivo principal do presente trabalho foi demonstrar a aplicação de um modelo computacional para simular o comportamento de vigas em concreto armado biapoiadas, sem e com reforço ao esforço cortante com PRFC, sendo que para isso utilizou-se o método dos elementos finitos (MEF) e o software ANSYS customizado. As conclusões estão resumidas abaixo:

- Foi verificado que os modelos estruturais não lineares propostos neste trabalho conseguiram prever com razoável precisão o comportamento das vigas simuladas, tanto em termos de carga-deslocamento quanto do modo de carga e falha das vigas.
- As simulações conseguiram prever os diferentes modos de falha das vigas observados experimentalmente: falhas ao cisalhamento, fendilhamento do concreto e situações de descolamento do reforço.
- Os recursos visuais de pós-processamento do ANSYS propiciaram a análise da distribuição de tensões no concreto, no aço e no reforço de PRFC, bem como a avaliação das tensões de aderência e deslizamentos na interface concreto-reforço.

7. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior e ao CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico o apoio para realização deste estudo.

8. REFERÊNCIAS

- 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.