

Investigação Numérica do Comportamento de Viga em Concreto Armado Reforçada com Laminado de PRFC Utilizando Elementos de Contato

Nathália Flores Cogo¹, Paula Manica Lazzari², Alexandre Luis Braun³

¹ UFRGS / Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil / nathalia.cogo@ufrgs.br

² UFRGS / Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil / p.manica.lazzari@gmail.com

³ UFRGS / Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil / alexandre.braun@ufrgs.br

Resumo

Os Polímeros Reforçados com Fibras de Carbono (PRFC) têm se destacado como um material promissor para reforço estrutural, devido às suas excelentes propriedades mecânicas, baixo peso específico e, principalmente, à sua natureza não corrosiva. A técnica mais conhecida e utilizada para aplicar o PRFC como reforço é a sua colagem externa à estrutura (*Externally Bonded Reinforcement* – EBR), especialmente sob a forma de laminado. A compreensão detalhada do comportamento dos elementos estruturais envolvidos nesse sistema de reforço exige análises refinadas, como o Método dos Elementos Finitos (MEF). Nesse contexto, a presente pesquisa teve como objetivo analisar numericamente o comportamento de vigas em concreto armado reforçadas à flexão com laminados de PRFC pela técnica EBR, utilizando o MEF por meio do *software* ANSYS. Para isso, foram realizadas modelagens computacionais de vigas do estudo experimental de Pereira *et al.* (2024). O modelo numérico proposto considerou as não-linearidades geométricas e físicas dos materiais, especialmente na interface entre a viga e o laminado de PRFC com a implementação dos elementos de contato e do Modelo de Zona Coesiva Bilinear. Os resultados das análises demonstram que o modelo numérico desenvolvido é capaz de prever adequadamente o comportamento da viga reforçada com o laminado de PRFC, evidenciando a importância da modelagem da interface concreto/PRFC.

Palavras-chave

PRFC; reforço estrutural; laminado; MEF, interface, elementos de contato.

1 Introdução

Os Polímeros Reforçados com Fibras (PRF) têm ganhado cada vez mais destaque na área de reforço estrutural devido à sua elevada resistência à tração e à fadiga, baixo peso específico, baixa condução térmica e natureza não corrosiva. Além disso, oferecem vantagens como facilidade de transporte, instalação e adaptação a diversas superfícies (Hollaway; Leeming, 1999). Dentre as fibras comerciais, as fibras de carbono se destacam por apresentar maior módulo de elasticidade e resistência específica. O excelente desempenho mecânico associado ao baixo peso específico dessas fibras tornam os Polímeros Reforçados com Fibra de Carbono (PRFC) o compósito ideal para reforçar estruturas sensíveis ao peso e à deflexão (Garcez; Meneghetti; Silva Filho, 2008).

A técnica mais utilizada para empregar o PRFC como reforço é a colagem externa deste compósito à estrutura, conhecida em inglês como *Externally Bonded Reinforcement* (EBR). Nesse método, o compósito pode ser aplicado em diferentes elementos estruturais como reforço à flexão, ao cisalhamento e ao confinamento, podendo estar sob a forma de mantas, tecidos ou laminados. Segundo Yang *et al.* (2021), o uso do PRFC com a técnica EBR é amplamente aceito e eficaz na melhoria da capacidade de flexão de estruturas de concreto armado. Contudo, esse sistema tende a falhar prematuramente devido ao descolamento do PRFC, impedindo a plena utilização de sua capacidade resistente. Portanto, ainda que esse sistema de reforço seja eficaz e consolidado, ele ainda exibe desafios a serem explorados, destacando a necessidade de maiores pesquisas sobre o tema.

A compreensão detalhada do comportamento de estruturas de concreto armado reforçadas com laminados de PRFC requer um método de análise refinado, como o Método dos Elementos Finitos (MEF). Neste sentido, este artigo tem como objetivo analisar numericamente vigas de concreto armado reforçadas à flexão com laminados de PRFC pela técnica EBR. Para isso, foram realizadas modelagens computacionais das vigas do estudo experimental de Pereira *et al.* (2024), utilizando o *software* ANSYS, versão 21.2.

2 Modelos constitutivos

Para a modelagem do concreto, foram adotados modelos constitutivos customizados na interface UPF (*User Programmable Features*), utilizando a sub-rotina USERMAT (Lazzari *et al.* (2019), Hoffman *et al.* (2022) e Schimanowski *et al.* (2024)). O comportamento do concreto sob compressão foi descrito por um modelo elastoplástico com endurecimento. Para a regra de endurecimento, foi adotado o diagrama tensão-deformação sob compressão uniaxial proposto pelo *fib* Model Code 2020 (2024). Já para reproduzir o comportamento do concreto sob tração, esse foi modelado como um material elástico com amolecimento, com base na formulação de Hinton (1988). Isto é, o concreto apresenta comportamento elástico linear até o início do processo de fissuração, a partir do qual seu comportamento passa a ser descrito por um modelo de fissuras distribuídas.

A rigidez do concreto é avaliada com base nos diagramas tensão-deformação correspondentes às forças uniaxiais para cada uma das direções principais do plano fissurado. Assim, os diagramas tensão-deformação do concreto sob compressão (figura 1-a) e sob tração (figura 1-b) são utilizados quando o encurtamento e o alongamento ocorrem em uma das direções. Para representar os efeitos reológicos do concreto, os fenômenos de retração e fluência foram incluídos na modelagem. As formulações adotadas seguem as diretrizes do CEB-FIP Model Code 1990 (1993) e foram implementadas de acordo com a metodologia descrita por Quevedo *et al.* (2018).

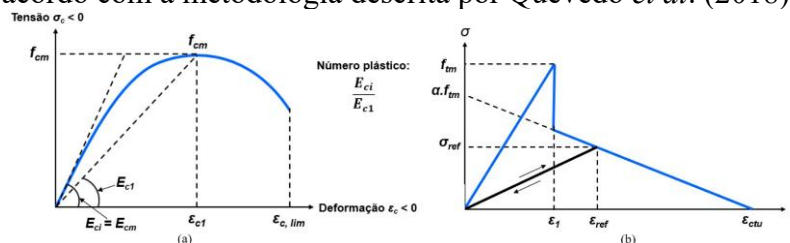


Figura 1 – Diagrama tensão-deformação do concreto (Lazzari (2016)).

Para as barras de aço, considerou-se que essas resistem essencialmente a esforços uniaxiais; portanto, foram representadas por um modelo elastoplástico uniaxial, com comportamento elastoplástico perfeito quando obtidas por laminação à quente (figura 2a) e comportamento elastoplástico com endurecimento linear quando obtidas por laminação à frio (figura 2b).

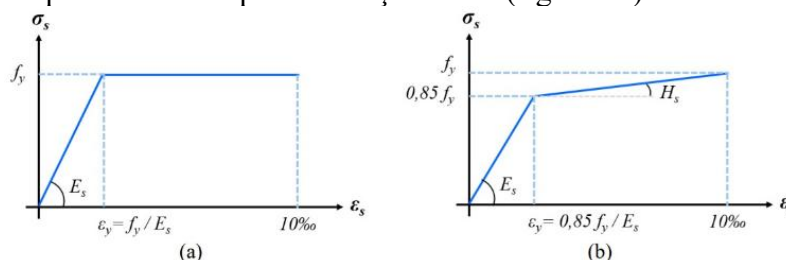


Figura 2 – Diagrama tensão-deformação do aço (Lazzari (2016)).

O PRFC apresenta comportamento elástico linear, com uma pequena redução da rigidez na transição do primeiro para o segundo estágio no diagrama tensão-deformação (figura 3). Após atingir a tensão de ruptura, o compósito perde a sua capacidade resistente. O modelo constitutivo BISO (*Bilinear Isotropic Hardening*) foi adotado para representar tanto as barras de aço quanto o laminado de PRFC.

O Modelo de Zona Coesiva (*Cohesive Zone Model - CZM*) com o Modo II de separação foi adotado para representar o comportamento da interface entre o concreto e o PRFC através da relação entre tensão tangencial e deslocamento relativo de nós em faces opostas na interface entre o aderente e o adesivo (Silva; Campilho, 2012). Na figura 4 é apresentado o modelo bilinear proposto por Lu *et al.* (2005) e utilizado neste trabalho, o qual baseia-se no deslizamento (s_0) correspondente à tensão máxima de aderência ($\tau_{m\acute{a}x}$) e no deslizamento máximo (s_f), que caracteriza a falha por descolamento da interface.

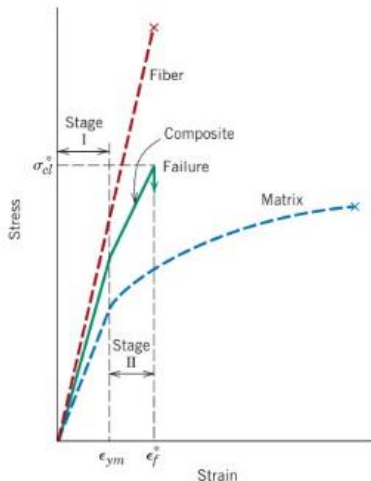


Figura 3 – Diagrama tensão-deformação do PRFC (Callister e Rethwisch (2009)).

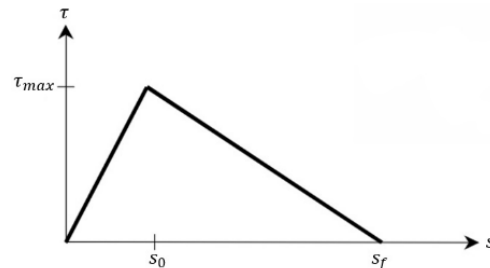


Figura 4 – Relação bilinear tensão de aderência-deslizamento (adaptado de CEB-FIP (2001)).

3 Elementos Finitos

O elemento SOLID186 foi empregado para a modelagem do concreto. Trata-se de hexaedro de 20 nós com funções de forma quadráticas e três graus de liberdade de translação por nó. O elemento ainda suporta os modelos constitutivos personalizáveis da USERMAT e é compatível com o elemento REINF264, permitindo que o concreto seja representado pelo modelo incorporado de armadura.

O elemento REINF264 foi empregado para a modelagem das armaduras longitudinais e transversais. Trata-se de um elemento de reforço cujas coordenadas nodais, graus de liberdade e conectividade são análogas ao do elemento base no qual está inserido (SOLID186). Nesta pesquisa, as armaduras foram modeladas pelo modelo incorporado com aderência perfeita entre o concreto e o aço.

O elemento SHELL281 foi utilizado para representar os laminados de PRFC. Trata-se de um elemento de casca com oito nós e seis graus de liberdade por nó: três translações (membrana) e três rotações (flexão). Como o laminado de PRFC resiste essencialmente a esforços de tração, apenas a rigidez da membrana foi considerada.

O contato na interface entre o concreto e o laminado de PRFC foi modelado pela abordagem do contato por pares. Essa abordagem consiste em associar um elemento de contato (CONTA174) a um elemento alvo (TARGE170) por meio de um conjunto de constantes reais. O CONTA174 é um elemento tridimensional com 8 nós, cujas características geométricas são as mesmas da face do elemento sólido ou de casca com o qual está conectado. Neste estudo, o CONTA174 foi criado na camada adesiva em contato com o laminado de PRFC, enquanto TARGE170 foi criado na camada adesiva em contato com a viga. Assim, o contato foi modelado entre as camadas adesivas.

4 Características do estudo experimental

Pereira *et al.* (2024) conduziram um estudo experimental de vigas de concreto armado em escala real reforçadas à flexão com laminados de PRFC utilizando a técnica EBR. Neste estudo, foram analisadas

duas das vigas ensaiadas no programa experimental dos autores: uma viga testemunho (VT) e uma viga reforçada (VR). O detalhamento geral das vigas ensaiadas é ilustrado na figura 5. As armaduras utilizadas são da classe CA-50 e o cobrimento adotado para elas foi de 3 cm.

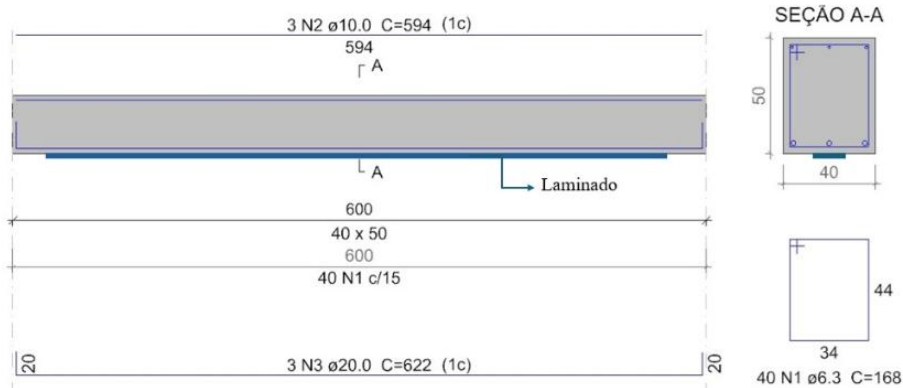


Figura 5 – Detalhamento das vigas (adaptado de Pereira *et al.* (2024)).

A viga VR foi reforçada com um laminado de PRFC de 100 mm de largura, 1,4 mm de espessura e 440 cm de comprimento, centralizado na face inferior da viga. O laminado utilizado foi do tipo pré-fabricado, com características comerciais de resistência à tração de 2.800 MPa, módulo de elasticidade de 170 GPa e deformação na ruptura de 16%. O adesivo utilizado para colar o laminado à viga foi a base de resina epóxi.

Os autores indicaram os resultados de caracterização do concreto e do laminado de PRFC. O concreto apresentou resistência média à compressão de 44,53 MPa aos 28 dias e 48,34 MPa aos 112 dias, com módulo de elasticidade correspondente à 32,41 GPa e à 32,50 GPa, respectivamente. O laminado de PRFC exibiu resistência à tração média de 2.215,73 MPa e módulo de elasticidade de 154,72 GPa. Para o aço, foram adotados os valores de 550 MPa para a tensão de escoamento e 200 GPa para o módulo de elasticidade.

As vigas foram avaliadas por meio de ensaios de flexão em quatro pontos, cuja configuração é ilustrada na figura 6. Os deslocamentos verticais foram registrados por dois LVDTs posicionados no meio do vão. As deformações foram monitoradas por *Strain Gauges* (SGs): no concreto, com um SG no meio do vão na face comprimida; no aço, com um SG no centro de uma barra longitudinal inferior; e no laminado, com SGs distribuídos ao longo do comprimento, incluindo um no centro.

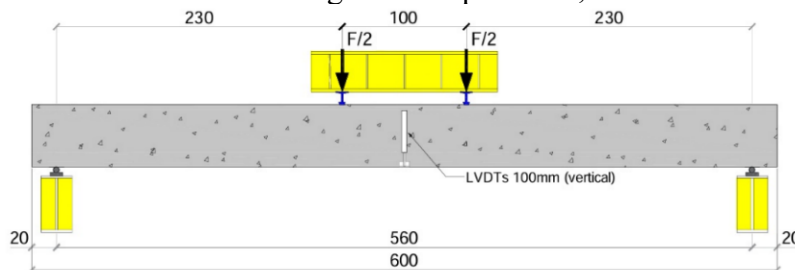


Figura 6 – Desenho esquemático do ensaio (dimensões em cm) (Pereira *et al.* (2024)).

5 Características da modelagem numérica

As vigas ensaiadas por Pereira *et al.* (2024) apresentam simetria de geometria e de carregamento, tanto na direção longitudinal quanto na transversal. Sendo assim, foi possível modelar apenas um quarto das vigas, reduzindo consideravelmente o esforço computacional das análises. As vigas foram discretizadas com um tamanho máximo de malha de 5 cm, adotada para todos os elementos. A figura 7 mostra uma vista 3D das vigas.

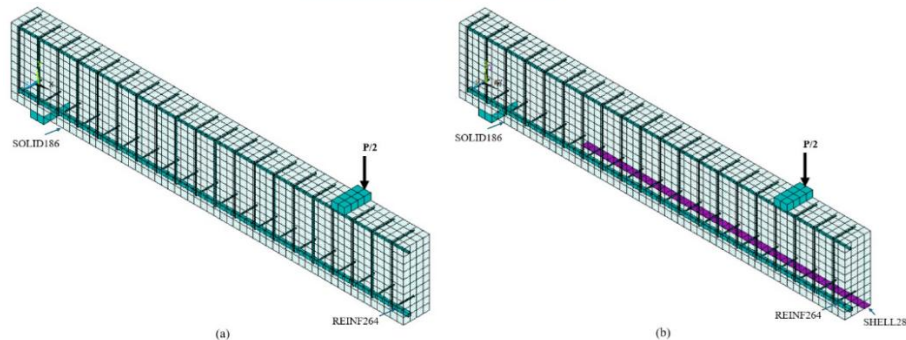


Figura 7 – Vista 3D das vigas: a) VT e b) VR.

A interface entre o concreto e o laminado de PRFC desempenha um papel fundamental no comportamento de vigas reforçadas com laminados de PRFC pela técnica EBR, especialmente no modo de falha dessas estruturas. Neste sentido, duas abordagens foram consideradas para a modelagem da interface: com aderência perfeita (sufixo ADP) e com elementos de contato (sufixo CON). No modelo com aderência perfeita, o elemento SHELL281, que representa o laminado, está em contato direto com o elemento SOLID186, que representa o concreto. Já no modelo sem aderência perfeita, a interação entre o concreto e o laminado foi representada por volumes de adesivo e por elementos de contato na região da interface.

O adesivo utilizado para aderir o laminado de PRFC à superfície de concreto foi modelado com elementos finitos quadráticos hexaédricos de 20 nós (SOLID186), distribuídos em duas camadas separadas por um espaço de 0,1 mm. Uma camada foi posicionada sobre a superfície do concreto (SOLID186) e a outra sobre a superfície do laminado de PRFC (SHELL281). Os elementos de contato foram inseridos no espaço entre as camadas adesivas, com o elemento TARGE170 na camada em contato com o concreto e o elemento CONTA174 na camada em contato com o laminado. A figura 8 apresenta as camadas da interface na viga VR-CON.

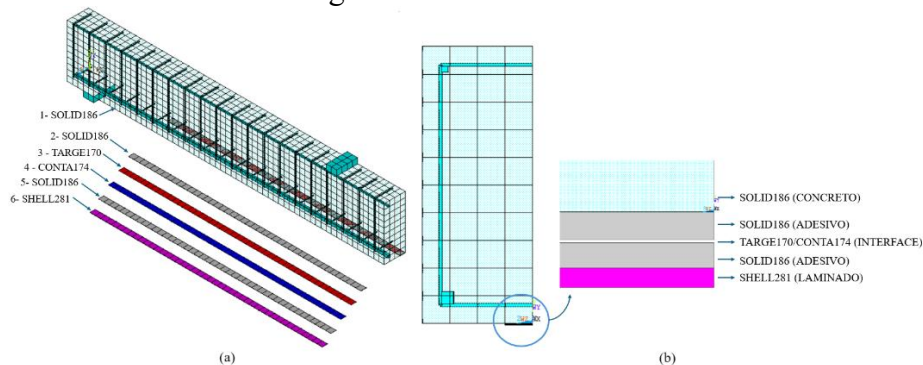


Figura 8 – Camadas da interface da VR-CON: a) Vista 3D e b) Seção transversal.

A interface foi modelada com base no CZM. O comportamento do material foi definido em função da tensão tangencial máxima e do deslizamento tangencial máximo (Lu *et al.* (2005)). Os valores dos parâmetros utilizados no modelo são apresentados na tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros da interface da viga VR-CON

Protótipo	Tensão tangencial máx. (kN/cm ²)	Deslizamento tangencial máx. (cm)	Rigidez tangencial de contato (kN/cm ³)
VR-CON	0,642	0,0246	77

6 Resultados e discussões

A análise comparativa entre os resultados numéricos e experimentais foi realizada com base nas curvas carga-deslocamento no meio do vão e nas curvas carga-deformação do concreto, aço e PRFC.

Para esses materiais, também foram avaliadas as tensões normais na direção x (σ_x) em três estágios: (a) início do processo de fissuração, (b) início da fase de plastificação e (c) carga final. Na interface concreto/PRFC, foram analisadas as tensões de aderência e o deslizamento.

As vigas foram carregadas em duas etapas: peso próprio e deslocamento imposto. Além disso, considerando que os protótipos foram armazenados por um período anterior ao ensaio, uma etapa preliminar foi incorporada à simulação para levar em conta os efeitos do tempo e garantir que as propriedades do material correspondessem às observadas na data do ensaio. Mais detalhes e resultados abrangentes das simulações numéricas são apresentados em Cogo (2025).

6.1 VT

A figura 9-a apresenta as curvas carga-deslocamento obtidas no programa experimental e na simulação numérica da VT. A curva numérica acompanha a curva experimental de forma satisfatória, com boa concordância entre as curvas nos estágios I, II e III. Nota-se que a curva numérica é ligeiramente mais rígida que a experimental nos estágios I e II. Ainda assim, o valor da carga de ruptura encontra-se próximo ao experimental, evidenciando a adequação do modelo numérico.

A figura 9-b exibe as curvas carga-deformação do concreto e da armadura longitudinal inferior obtidas no programa experimental e na simulação numérica da VT. As curvas numéricas do concreto e do aço reproduzem os mesmos estágios de comportamento das curvas experimentais. Além disso, as cargas nas quais ocorrem as transições desses estágios nas curvas numéricas são próximas às experimentais, evidenciando uma boa aproximação entre os resultados em ambos os materiais.

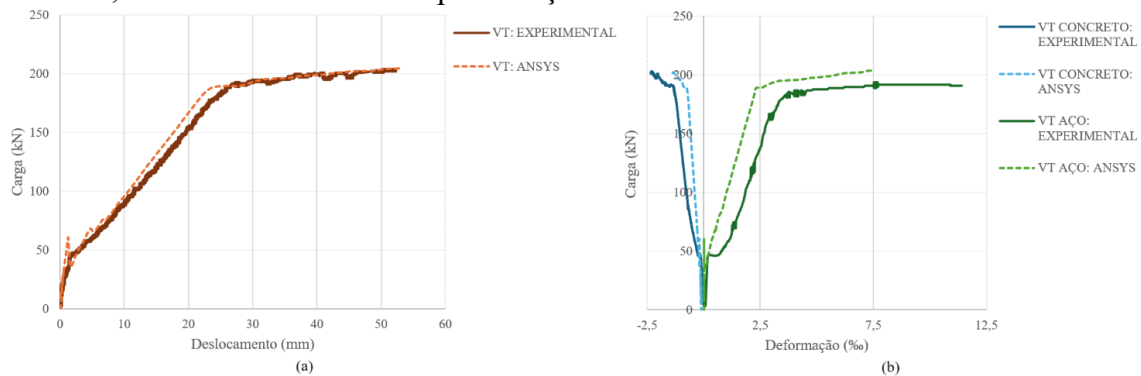


Figura 9 – Diagramas VT: a) carga-deslocamento e b) carga-deformação.

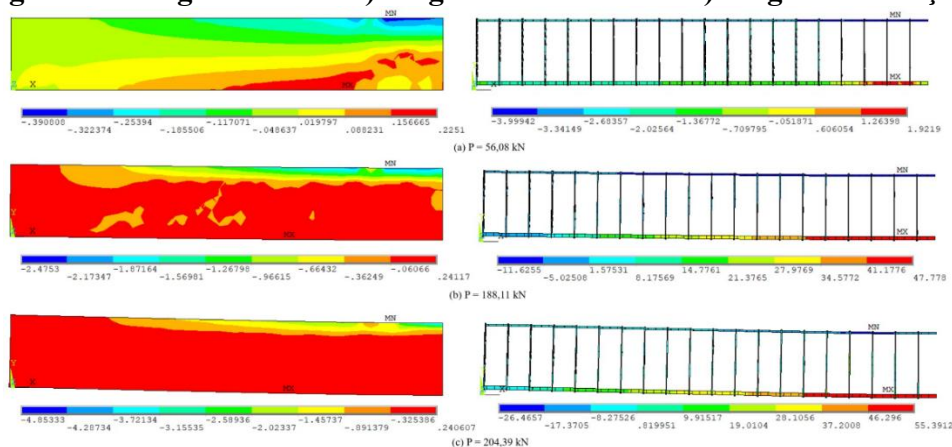


Figura 10 – Distribuição das tensões σ_x da VT: concreto e aço (kN/cm²).

As figuras 10-a, 10-b e 10-c apresentam a distribuição de tensões no concreto e no aço no início do processo de fissuração, no início da fase de plastificação e no final do carregamento da viga, respectivamente. No início do processo de fissuração, tanto o concreto quanto o aço encontram-se

pouco solicitados. À medida que a carga aumenta, observa-se um aumento gradual nas tensões de tração e de compressão tanto no concreto quanto no aço. No início da plastificação, a armadura longitudinal inferior apresentam tensões de tração elevadas, atingindo valores próximos à tensão de escoamento (55 kN/cm²) no meio do vão. Em um estágio intermediário de carregamento entre as figuras 10-b e 10-c, a armadura longitudinal inferior atinge a tensão de escoamento e permanece no regime plástico até o final do carregamento.

6.2 VR

Para a análise da viga reforçada com laminado de PRFC (VR), consideram-se dois cenários na modelagem da interface concreto/PRFC: com aderência perfeita (VR-ADP) e com elementos de contato (VR-CON). A figura 11-a apresenta as curvas carga-deslocamento obtidas no programa experimental e nas simulações numéricas da VR. Ambas as curvas numéricas acompanham a curva experimental de forma satisfatória, com boa concordância entre as três nos estádios I, II e III. As curvas numéricas apresentam o mesmo comportamento até o estágio III, a partir da qual divergem. Nessa fase, o modelo numérico da VR-CON identifica o descolamento do laminado, interrompendo a solução em uma carga próxima à experimental. Já o modelo numérico da VR-ADP não foi projetado para capturar essa falha; portanto, a solução continua até o final do carregamento imposto.

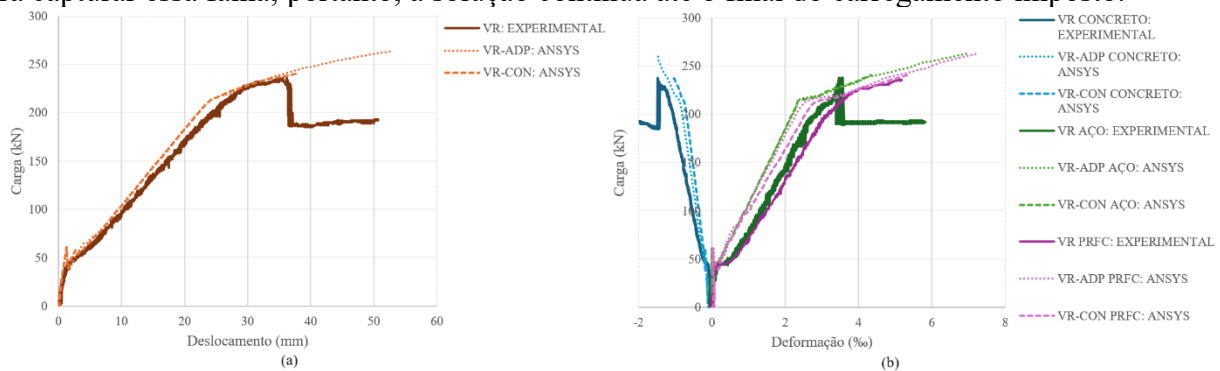


Figura 11 – Diagramas VR: a) carga-deslocamento e b) carga-deformação.

A figura 11-b apresenta as curvas carga-deformação do concreto, da armadura longitudinal inferior e do laminado de PRFC obtidas no programa experimental e nas simulações numéricas da VR. As curvas numéricas reproduzem os mesmos estágios comportamentais observados experimentalmente. Nota-se, também, que as transições desses estágios ocorrem em cargas próximas às registradas experimentalmente, o que indica boa concordância entre os resultados numéricos e experimentais. Entre as curvas numéricas, a da VR-CON apresentou a melhor aproximação com os dados experimentais, sendo interrompida em níveis de carga e deformação semelhantes aos observados experimentalmente em todos os materiais.

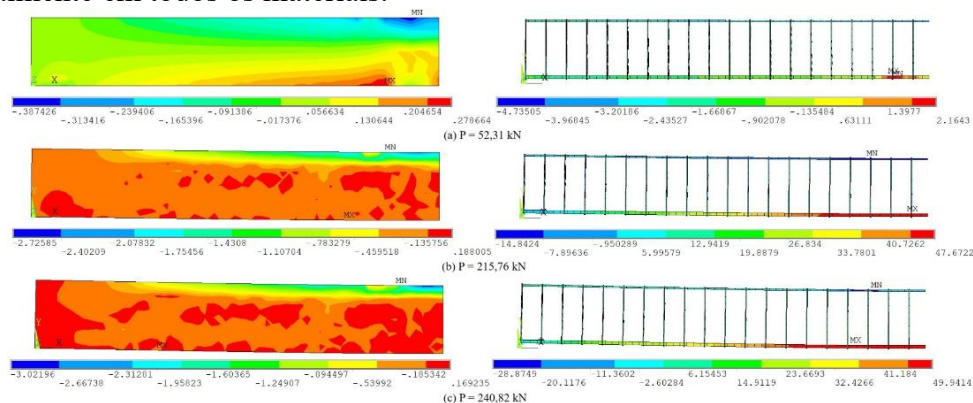


Figura 12 – Distribuição das tensões σ_x da VR-CON: concreto e aço (kN/cm²).

As figuras 12-a, 12-b e 12-c apresentam a distribuição de tensões no concreto e no aço da viga VR-CON no início do processo de fissuração, no início da fase de plastificação e no final do carregamento da viga, respectivamente. Assim como observado na VT, o concreto e o aço encontram-se pouco solicitados no início do processo de fissuração. Em sequência, as tensões de tração e de compressão no concreto se intensificaram progressivamente até o final do carregamento, sem atingir a resistência média à compressão uniaxial (f_{cm}). No início da plastificação, a armadura longitudinal inferior atingiu valores próximos à tensão de escoamento do aço (55 kN/cm²) no meio do vão. Ao final do carregamento, as armaduras permaneceram abaixo do limite do escoamento.

A figura 13 apresenta a evolução da distribuição de tensões no laminado de PRFC da viga VR-CON para os mesmos estágios de carregamento analisadas no concreto e no aço. O laminado foi progressivamente solicitado à medida que a carga aplicada aumentava, com maiores níveis de tensão de tração na região central do elemento. Na carga última, o laminado atinge aproximadamente 44,9% de sua resistência à tração, indicando que o seu aproveitamento estrutural seria mais eficiente na ausência do deslizamento do laminado.

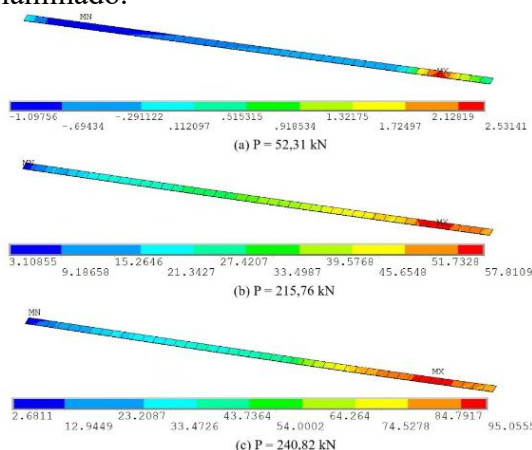


Figura 13 – Distribuição das tensões σ_x da VR-CON: concreto e aço (kN/cm²).

À medida que a viga foi carregada, as tensões de aderência e os deslizamentos correspondentes aumentaram. Esse comportamento persistiu até a interface atingir a tensão tangencial máxima prevista para a viga (figura 14-a1) e o respectivo deslizamento (figura 14-b1), caracterizando o ponto máximo da curva CZM bilinear. A partir desse ponto, as tensões de aderência começaram a reduzir, enquanto os deslizamentos continuaram a aumentar. Esse processo se sucedeu até o deslizamento atingir o seu valor máximo (figura 14-b2), associado a uma tensão de aderência reduzida (figura 14-a2), indicando a ocorrência do descolamento do laminado. Ambos os modelos, VR-ADP e VR-CON, foram capazes de representar o aumento da rigidez da viga devido à inclusão do laminado de PRFC em comparação a VR. No entanto, o modelo VR-CON demonstrou maior precisão na identificação do modo de falha observado experimentalmente, caracterizado pelo descolamento do laminado próximo à extremidade do apoio (figura 15).

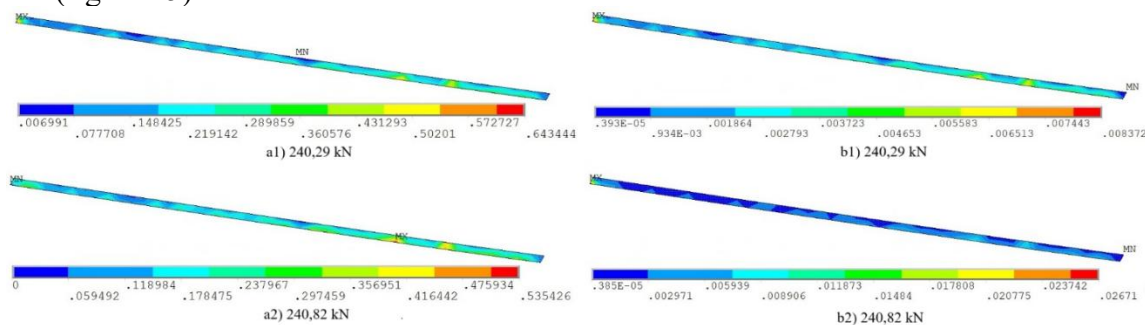


Figura 14 – Interface VR-CON: a) tensões de aderência (kN/cm²) e b) deslizamentos (cm).



Figura 15 – Modo de ruptura experimental da VR (Pereira *et al.* (2024)).

6.3 Comparativo final

A tabela 2 apresenta as cargas últimas e os modos de ruptura observados nos ensaios experimentais e nos modelos numéricos de cada viga. De modo geral, os resultados numéricos mostraram boa concordância com os resultados experimentais, tanto em termos de carga de ruptura quanto do modo de ruptura. Para a viga reforçada, o modo de ruptura foi identificado apenas no modelo que incluiu os elementos de contato na interface concreto/PRFC. A figura 16 apresenta os diagramas carga-deslocamento, experimental e numérico. Nota-se que o laminado de PRFC contribuiu para o aumento na rigidez da viga, conforme evidenciado pelos resultados experimentais e numéricos.

Tabela 2 – Carga e modo de ruptura das vigas

Protótipo	Carga última experimental (kN)	Carga última numérico (kN)	Variação (%)	Modo de ruptura experimental	Modo de ruptura numérico
VT	200,20	204,39	+2,09	Escoamento aço	Escoamento aço
VR	237,10	240,82	+1,57	Descolamento laminado	Descolamento laminado

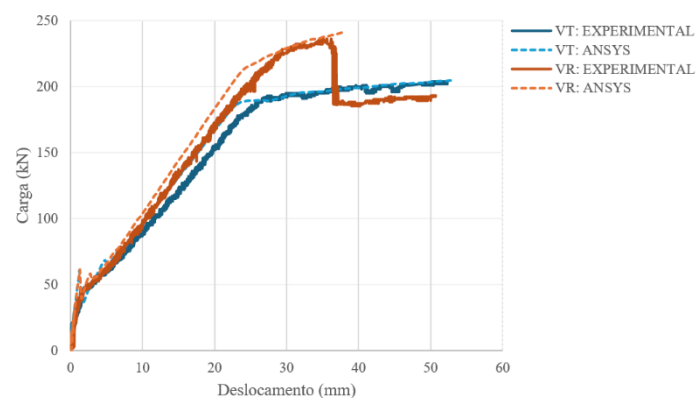


Figura 16 – Diagramas carga-deslocamento.

7 Conclusões

O modelo numérico desenvolvido para a análise não linear de vigas em concreto armado reforçadas com laminados de PRFC pela técnica EBR demonstrou ser capaz de prever o comportamento das vigas de Pereira *et al.* (2024). A concordância entre o modelo numérico e o programa experimental foi constatada tanto nos diagramas carga-deslocamento e carga-deformação, quanto pelas cargas e modos de ruptura de cada protótipo. Além disso, foi constatado o aumento da capacidade de carga da viga com a aplicação do laminado de PRFC, em conformidade com os resultados experimentais.

A influência da modelagem da interface entre o concreto e o laminado de PRFC no comportamento estrutural da viga reforçada foi investigada por meio da comparação entre duas abordagens: aderência perfeita e elementos de contato. Verificou-se que o tipo de modelagem influencia a carga e modo de

ruptura, bem como a distribuição de tensões e deformações nos elementos estruturais. A identificação do modo de ruptura da viga reforçada só foi possível com a implementação dos elementos de contato e do CZM bilinear, os quais permitiram avaliar o deslizamento do laminado a partir das tensões de aderência e dos deslizamentos na interface. Dessa forma, a abordagem com elementos de contato mostrou-se mais adequada para representar o comportamento da viga reforçada, evidenciando a importância da sua implementação nesse tipo de análise.

8 Referências

- CALLISTER, W.; RETHWISCH, D. Materials Science and Engineering: An Introduction, 8th Edition. Wiley, 2009.
- CEB-FIP. Externally Bonded FRP Reinforcement for RC Structures - Bulletin 14. Lausanne, 2001.
- COGO, N. F. Análise numérica do comportamento de vigas em concreto armado reforçadas com laminados de PRFC via Método dos Elementos Finitos. 2025. 159 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2025.
- COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON. CEB-FIP Model Code 1990. London, Thomas Telford, 1993.
- FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON (FIB). fib Model Code for Concrete Structures 2020. Lausanne, Switzerland, 2024.
- GARCEZ, M.; MENEGHETTI, L.; FILHO, L. C. S. Structural performance of RC beams poststrengthened with carbon, aramid, and glass FRP systems. *Journal of Composites for Construction*, v. 12, p. 522–530, 2008.
- HINTON, E. Numerical Methods and Software for Dynamic Analysis of Plates and Shells. Pineridge Press, 1988.
- HOFFMAN, I. S.; LAZZARI, B. M.; FILHO, A. C.; LAZZARI, P. M.; PACHECO, A. R. Finite element numerical simulation of a cable-stayed bridge construction through the progressive cantilêver method. *Structural Concrete*, v. 23, no. 2, pp. 632–651, 2022.
- HOLLAWAY, L.; LEEMING, M. Strengthening of Reinforced Concrete Structures: Using Externally-Bonded FRP Composites in Structural and Civil Engineering. London: Taylor & Francis, 1999.
- LAZZARI, P. M. Simulação numérica das etapas construtivas de pontes estaiadas através do método dos elementos finitos. 2016. 301 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.
- LAZZARI, P. M.; FILHO, A. C.; LAZZARI, B. M.; PACHECO, A. R.; GOMES, R. R. S. Numerical simulation of the constructive steps of a cable-stayed bridge using ANSYS. *Structural Engineering and Mechanics*, v. 69, pp. 269–281, 2019.
- LU, X.; TENG, J.; YE, L.; JIANG, J. Bond–slip models for FRP sheets/plates bonded to concrete. *Engineering Structures*, v. 27, n. 6, p. 920–937, 2005.
- PEREIRA, M. F.; DALFRÉ, G. M.; FERREIRA, M. de A.; CATÓIA, B.; OLIVEIRA, J. R. de; CANATO, R. L. Vigas de concreto armado em escala real reforçadas à flexão com laminados de CFRP passivos e protendidos. *Anais do 65º Congresso Brasileiro do Concreto (CBC2024)*. São Paulo: IBRACON, 2024.
- QUEVEDO, F. P. da M.; SCHMITZ, R. J.; MORSCH, I. B.; FILHO, A. C.; BERNAUD, D. Customization of a software of finite elements to analysis of concrete structures: long-term effects. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, v. 11, p. 696–718, 2018.
- SCHIMANOWSKI, E. R. Z.; FILHO, A. C.; LAZZARI, B. M.; LAZZARI, P. M. Numerical simulation of punching shear in flat slabs with spherical voids subjected to symmetric and asymmetric loadings. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, v. 17, no. 3, e17316, 2024.
- SILVA, L.; CAMPILHO, R. Advances in numerical modeling of adhesive joints. *Computational Mechanics*, 2012.
- YANG, J.; JOHANSSON, M.; AL-EMRANI, M.; HAGHANI, R. Innovative flexural strengthening of RC beams using self-anchored prestressed CFRP plates: Experimental and numerical investigations. *Engineering Structures*, v. 243, p. 112687, 2021.