

ANÁLISE NUMÉRICA DO COMPORTAMENTO DE VIGAS EM CONCRETO ARMADO SEM REFORÇO E REFORÇADA COM LAMINADOS DE PRFC VIA MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Nathália Flores Cogo¹, Paula Manica Lazzari², Alexandre Luis Braun³

¹ UFRGS / Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil / 00576578@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

Depois de construídas, as estruturas de concreto armado estão suscetíveis à fenômenos que podem comprometer a sua durabilidade e sua capacidade de carga. Nesses casos, a estrutura pode não apresentar o mesmo desempenho para o qual foi projetada, sendo necessário realizar uma intervenção para restaurar o seu funcionamento e garantir a estabilidade e segurança da edificação. Geralmente, essa intervenção ocorre na forma de reforço estrutural, buscando elevar o desempenho da estrutura em relação ao que foi previsto em projeto. Nesse contexto, os Polímeros Reforçados com Fibras de Carbono (PRFC) têm se destacado devido às suas excelentes propriedades mecânicas, peso reduzido e por não ser corrosivo. A compreensão do comportamento dos elementos estruturais envolvidos nesse sistema de reforço exigem análises refinadas, como os métodos numéricos que se baseiam no Método dos Elementos Finitos (MEF). Nesse sentido, este trabalho tem como objetivo analisar numericamente o comportamento de vigas em concreto armado sem reforço e reforçada à flexão com laminados de PRFC utilizando o MEF por meio do *software* ANSYS. O modelo numérico desenvolvido apresentou boa concordância quando comparado aos resultados de estudos experimentais da literatura; porém, necessita de ajustes quanto a implementação do reforço.

Palavras-chave

Reforço estrutural; PRFC; Método dos Elementos Finitos.

Introdução

O crescimento dos grandes centros urbanos e da indústria impactam diretamente o setor da construção civil, exigindo constante adaptação das construções para se adequar às novas demandas, como alterações no tipo de uso, incremento de carga e mudanças no *layout* arquitetônico. Além disso, as estruturas de concreto armado estão suscetíveis à deterioração causada pela falta de manutenção, corrosão das armaduras, falhas de projeto e de execução, exposição a ambientes agressivos e sinistros como incêndios ou abalos sísmicos. Esses fenômenos podem comprometer a funcionalidade e segurança da estrutura. Nesses casos, é essencial a avaliação de um engenheiro para determinar se há a necessidade de intervenção na estrutura, podendo ocorrer na forma de substituição ou reabilitação dessa. Segundo Beber (2003), a reabilitação pode ser realizada por meio de reparo, reforço ou reforma, sendo o reforço o foco dessa pesquisa.

O código modelo da *fib* Model Code 2010 (2013) define reforço como uma intervenção que aumenta a resistência e a rigidez de estruturas acima do que foi previsto em projeto. Há diversas técnicas de reforço de estruturas de concreto armado, entre elas a aplicação externa de chapas ou de laminados, que podem ser de aço ou de materiais compósitos a base de fibras.

Os materiais compósitos, como os Polímeros Reforçados com Fibras (PRF), têm se destacado na área de reforço estrutural devido à sua alta resistência à tração e à fadiga, baixo peso específico, baixa condução térmica e por não serem corrosivos. Além disso, são materiais de fácil transporte, fixação e adaptação em qualquer superfície (HOLLAWAY; LEEMING, 1999). Dentre as fibras comerciais,

a fibra de carbono se destaca por apresentar o maior módulo de elasticidade e resistência específica. Comparadas ao aço, essas fibras possuem resistência à tração de oito a dez vezes maior com peso até cinco vezes menor. As ótimas propriedades mecânicas associadas ao baixo peso específico dessas fibras, tornam os Polímeros Reforçados com Fibras de Carbono (PRFC) o compósito ideal para reforçar estruturas sensíveis ao peso e deflexão (GARCEZ; MENEGHETTI; SILVA FILHO, 2008). A técnica mais comum no uso de PRFC como reforço é a colagem externa desse compósito a estrutura reforçada, conhecida como *Externally Bonded Reinforcement* (EBR). Essa técnica pode ser empregada em diferentes elementos estruturais como reforço à flexão, ao cisalhamento e ao confinamento, podendo o compósito estar sob a forma de mantas, tecidos ou laminados. Segundo Yang et al. (2021), a utilização do PRFC com a técnica EBR é amplamente aceita e efetiva na melhoria na capacidade de flexão das estruturas de concreto armado. Contudo, esse sistema pode falhar prematuramente pelo descolamento do elemento de reforço, não usufruindo de sua total capacidade resistente. Tal fato destaca a necessidade de estudos adicionais sobre o tema.

O entendimento do comportamento das estruturas de concreto armado reforçadas com PRFC requer um método de análise refinado, como os baseados no Método dos Elementos Finitos (MEF). O *software* ANSYS é um programa amplamente reconhecido no meio acadêmico e que utiliza o MEF como método de análise. Nesse contexto, este estudo busca analisar numericamente vigas de concreto armado sem reforço e reforçadas à flexão com laminados de PRFC, utilizando a versão 24.1 do *software* ANSYS.

1. Elementos constituintes do reforço

Os materiais compósitos são formados por dois ou mais componentes com propriedades distintas, sendo constituídos prioritariamente por uma fase contínua (matriz) e uma fase dispersa (partículas ou fibras). As propriedades dos compósitos são função das características e da proporção de cada fase, sobretudo das características geométricas e espaciais da fase dispersa (CALLISTER; RETHWISCH, 2009). Os materiais compósitos, cuja matriz é polimérica e o material disperso é a fibra, recebem o nome de Polímeros Reforçados com Fibras (PRF). Nesta pesquisa, é dado enfoque aos Polímeros Reforçados com Fibras de Carbono (PRFC).

Segundo o código modelo da fib Model Code 2010 (2013), a principal função das fibras em um compósito é suportar as tensões, enquanto a da matriz é transferir as tensões para a fibras e protegê-las. As fibras representam de 40% a 70% do volume de um compósito e possuem módulo de elasticidade superior ao da matriz; portanto, a capacidade resistente do compósito é praticamente regida pelas fibras. Na construção civil, as fibras contínuas e alinhadas em uma única direção são as mais utilizadas pela eficiência na transferência de tensões.

A matriz é responsável por incorporar e proteger as fibras, garantindo a transferência das tensões externas para elas. Conforme Hollaway (1993), a alta resistência do compósito depende da boa transferência de tensões da matriz para a fibras. Para isso, é necessário que o módulo de elasticidade da matriz seja significativamente inferior ao das fibras. O adesivo utilizado na colagem do PRFC ao substrato também desempenha um papel crucial na transferência das tensões, principalmente as cisalhantes. As resinas epóxi são a classe de polímeros mais utilizadas tanto como matriz, quanto adesivo, devido à sua alta aderência a diversos substratos, resistência mecânica e aplicação (HOLLAWAY; LEEMING, 1999)

2. Propriedades dos PRFC

O comportamento mecânico de um compósito depende de alguns fatores, como a direção de aplicação da carga, o volume de cada fase e a relação tensão-deformação do material (CALLISTER; RETHWISCH, 2009). Nas aplicações de reforço estrutural, os PRFC são projetados em sua maioria para resistir à esforços de tração, apresentando maior resistência à tração na direção longitudinal das fibras. Sendo assim, é importante que as fibras sejam orientadas em uma única direção, conferindo

maior resistência e módulo de elasticidade ao compósito. De acordo com o guia ACI440.2R (2017), os PRFC sob tração apresentam uma relação tensão-deformação elástica linear até a ruptura, que ocorre de maneira abrupta e frágil. Nesse caso, a matriz e a fibra devem trabalhar segundo o critério de ruptura dúctil e frágil, respectivamente, caso contrário o compósito pode colapsar (MACHADO, 2010). No que tange o módulo de elasticidade do compósito, esse valor varia conforme a demanda de carga e deformabilidade de cada aplicação estrutural (GARCEZ, 2007).

Segundo Machado (2010), os PRFC exibem excelente desempenho frente à corrosão, à ataques químicos, à fadiga e carregamentos cíclicos, além da elevada resistência e rigidez. Destaca-se, também, a extrema leveza desses compósitos, da ordem de 1,6 a 1,9 g/cm³, o que os tornam ideais para aplicações que demandam materiais leves e resistentes.

3. Aplicação do PRFC como reforço à flexão

Esta pesquisa aborda a aplicação do PRFC como reforço à flexão em vigas de concreto armado. As técnicas mais utilizadas para esse tipo de reforço são a *Externally Bonded Reinforcement* (EBR) e a *Near Surface Mounted* (NSM) (Figura 1). Nesta pesquisa é dado enfoque à técnica EBR, que consiste na colagem externa do compósito à face tracionada da peça. Essa técnica é amplamente utilizada em reforço estrutural com PRFC por ser uma solução efetiva e de fácil aplicação, além de ser amparada por diretrizes normativas internacionais consolidadas.

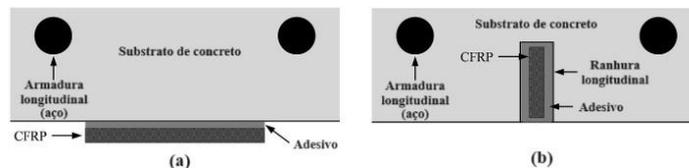


Figura 1 – Principais técnicas de reforço: a) EBR; b) NSM (adaptado de MOSHIRI et al., 2020)

A técnica EBR apresenta dois sistemas de aplicação: os pré-fabricados e os curados *in situ*. O primeiro sistema consiste em laminados semirrígidos unidirecionais fabricados por um processo contínuo denominado pultrusão (BEBER, 2003). Já o segundo sistema, consiste em um conjunto de fibras contínuas em estado seco ou pré-impregnado que são efetivamente impregnadas manualmente por uma resina termorrígida no local de aplicação do reforço (MEDEIROS, 2019).

O sucesso da técnica EBR depende da qualidade da ligação entre o elemento de PRF e o substrato, que deve ser resistente e bem-preparado. Para um bom desempenho do reforço, o elemento de PRF deve ser colado no sentido longitudinal, de modo que as fibras do material estejam paralelas ao sentido principal da tensão e perpendicular às fissuras. Além disso, outros fatores influenciam o desempenho do reforço, como: módulo de elasticidade, largura e comprimento do compósito; localização do centro de gravidade em relação ao eixo neutro; reforço interno; número de camadas; resistência e cobertura do concreto; danos e condições de carga (PENDHARI; KANT; DESAI, 2008). Segundo o guia ACI 440.2R (2017), a resistência mínima do concreto à tração e compressão deve ser de 1,4 MPa e 17 MPa, respectivamente.

3. Comportamento e modos de ruptura de peças reforçadas à flexão com PRFC

As estruturas de concreto armado reforçadas à flexão com PRFC pela técnica EBR apresentam três estádios durante o carregamento: estado não fissurado (estádio I), estado fissurado com comportamento elástico do aço (estádio II) e a plastificação do aço com posterior ruptura do PRFC por tração (estádio III). Após a plastificação da armadura, as fissuras são controladas pelo PRFC até a ruína, sem considerar qualquer desprendimento do reforço ou esmagamento do concreto (JUVANDES, 1999).

Estudos sobre o comportamento de peças fletidas reforçadas com PRF pela técnica EBR apontaram três modos de ruptura: escoamento do aço seguido pela ruptura do PRF; escoamento do aço seguido pelo esmagamento do concreto (sem que ocorra a ruptura do PRF) e o esmagamento do concreto (antes do escoamento do aço e da ruptura do PRF). Essa ruptura é frágil e, portanto, deve ser evitada

(TRIANAFILLOU; PLEVRIS, 1992). Além disso, pode ocorrer a ruptura por cisalhamento, quando a capacidade de cisalhamento da peça não acompanha o aumento da capacidade à flexão que a aplicação do PRF fornece, atingindo o limite de cisalhamento antes do limite de flexão. Nas falhas citadas, o concreto e o PRF atuam em conjunto até a ruptura. Há ainda falhas que decorrem da perda dessa ação conjunta, devido ao descolamento prematuro do PRF (THOMSEN et al., 2004). Teng et al. (2003) comenta que essas falhas podem ser classificadas em descolamento de extremidade ou descolamento intermediário.

4. Análise Numérica via MEF utilizando o ANSYS

A análise de estruturas pelo Método dos Elementos Finitos (MEF) pode ser realizada via simulação numérica em um *software*. Neste estudo, foi empregado o *software* ANSYS, com a interface APDL. O comportamento do concreto sob altas cargas em um curto período pode ser representado por um modelo elastoplástico. O modelo constitutivo adotado para representar esse comportamento foi o de Drucker-Prager *Concrete* (DP-*Concrete*), com a combinação de duas superfícies Drucker-Prager (DP-DP). Esse modelo define uma superfície de plastificação, cujo movimento é controlado por leis de endurecimento/amolecimento. O comportamento dessas leis dependem do modelo HSD (*Hardening, Softening e Dilatation*), sendo adotado nesse estudo o modelo HSD *Linear*, tanto para tração quanto para compressão. O modelo DP-*Concrete* não apresenta um critério explícito que represente o esmagamento do concreto, sendo esse fenômeno associado a não convergência da solução. Nesta pesquisa, são abordados os parâmetros do modelo DP-*Concrete* utilizados por Benincá (2019) e por Ceron (2021), para fins comparativos.

O aço apresenta comportamento elastoplástico, tanto sob tração quanto sob compressão, podendo ser representado por um diagrama tensão-deformação bilinear. Sendo assim, o modelo constitutivo adotado para representar o comportamento do aço foi o BISO (*Bilinear Isotropic Hardening*). As barras de aço apresentam comportamento diferente de acordo com o processo de fabricação desse material: para as barras laminadas a quente adota-se o modelo elastoplástico perfeito, enquanto para as laminadas a frio adota-se o modelo elastoplástico com endurecimento linear.

O PRFC apresenta comportamento elástico linear até alcançar a sua tensão de ruptura, a partir da qual o material perde sua capacidade resistente. Para essa pesquisa adotou-se o modelo bilinear (BISO) para representar o comportamento do PRFC.

Os elementos SOLID186 e SOLID185 foram empregados para a modelagem do concreto e das placas de apoio, respectivamente. O SOLID186 é um elemento sólido tridimensional de 20 nós, com três graus de liberdade em cada nó, correspondentes às translações nas direções x, y e z (ANSYS, 2024a). Neste trabalho foi utilizado o SOLID186 em formato hexaédrico e integração reduzida. A escolha desse elemento se deve aos bons resultados que ele fornece, sem a necessidade de uma grande discretização da malha. Além disso, ele é compatível com o elemento REINF264, utilizado para representar as armaduras de forma incorporada e, também, suporta o modelo DP-*Concrete*.

O elemento REINF264 foi empregado para a modelagem das armaduras longitudinais e transversais pelo modelo incorporado. As coordenadas nodais, graus de liberdade e conectividade do REINF264 são análogas às do elemento base (ANSYS, 2024a).

O elemento SHELL281 foi utilizado para a modelagem dos laminados de PRFC. Esse é um elemento de casca com oito nós, cada um com seis graus de liberdade, correspondentes às translações e rotações dos eixos x, y e z (ANSYS, 2024a). Nesta pesquisa foi adotada somente a rigidez de membrana, dado que o PRFC resiste essencialmente a esforços de tração. A escolha desse elemento se deve à sua capacidade de reproduzir de forma precisa a espessura extremamente fina dos laminados de PRFC.

Para a interface entre o concreto e o laminado de PRFC, assumiu-se a aderência perfeita entre esses materiais. Desse modo, o elemento SHELL281 está em contato direto com o elemento SOLID186.

5 Modelo numérico proposto

O modelo numérico desenvolvido nesta pesquisa foi validado pela comparação de seus resultados com os de ensaios experimentais disponíveis na literatura, incluindo duas vigas ensaiadas por Garcez (2007) no laboratório EMPA, na Suíça. Foram modeladas numericamente uma viga testemunho (VT) e uma viga reforçada com laminados de PRFC (VR), ensaiadas à flexão sob carregamento estático. As vigas possuem seção transversal de 100x22 cm, comprimento de 650 cm e o mesmo detalhamento das armaduras (Figura 2). As armaduras longitudinais inferiores e superiores são compostas, respectivamente, por sete barras de 12 mm e por sete barras de 8 mm de diâmetro. A armadura transversal foi detalhada com estribos de quatro ramos com 8 mm de diâmetro a cada 9 cm, com cobrimento de 1,5 cm. A viga VR foi reforçada com dois laminados de seção transversal 50x1,2mm, distribuídas ao longo da largura, conforme é ilustrado na Figura 2.

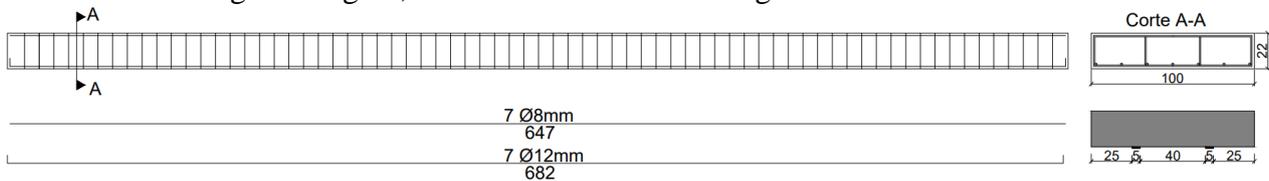


Figura 2 – Detalhamento das vigas VT e VR (GARCEZ, 2007)

Garcez (2007) realizou ensaios de caracterização do concreto e do aço, cujos resultados são apresentados na Tabela 1. O sistema de reforço empregado na viga VR foi o Sika-Carbodur, composto pelo laminado pré-fabricado Carbodur-S512 e pelo adesivo Sikadur-30. As características desse laminado foram fornecidas pelo fabricante e são exibidas na Tabela 1.

Tabela 1 – Caracterização dos materiais

Concreto (MPa)	Barra de Ø8mm (MPa)	Barra de Ø12mm (MPa)	Laminado Carbodur S512
$f_{cm} = 44$	$f_y = 554$	$f_y = 554$	$f_{fu} = 2.800$
$E_c = 36.049,96$	$E_s = 220.000$	$E_s = 220.000$	$E_f = 165.000$

As vigas foram instrumentadas com dois transdutores LVDT na face superior da estrutura para medir os deslocamentos verticais no centro do vão. Na viga VR, as deformações específicas dos laminados foram monitoradas por extensômetros elétricos unidirecionais simples (*strain gauges*) posicionados no centro de cada laminado. Na viga VT, as deformações específicas do concreto foram monitoradas por *strain gauges* posicionados no centro do vão e da seção transversal na face superior da viga.

As vigas foram submetidas a um ensaio de flexão em seis pontos, no qual a viga é posicionada sobre apoios de primeira e de segunda ordem, formando uma situação estática bem definida. A carga foi aplicada através de dois cilindros de carga e transmitida à viga por dois perfis metálicos, que descarregavam a carga em dois pontos, conforme exibe a Figura 3-a. A Figura 3-b mostra como essa carga está distribuída em quatro pontos, sendo essa a distribuição adotada na modelagem numérica. A Tabela 2 apresenta a carga e modo de ruptura das vigas ensaiadas por Garcez (2007).

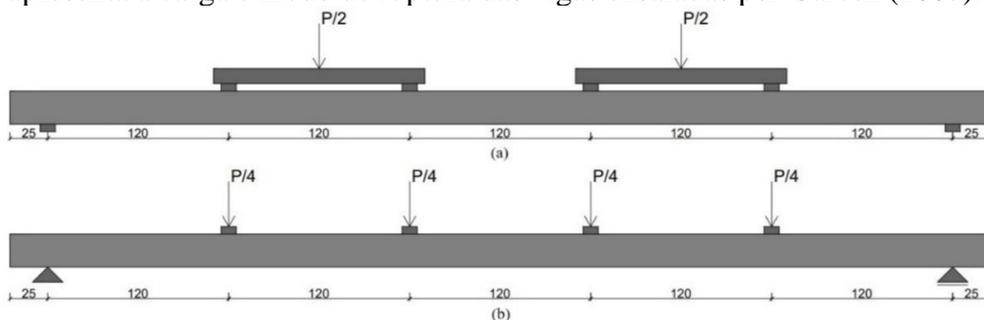


Figura 3 – Esquema da distribuição de cargas (cm): a) no ensaio; b) no modelo numérico (elaborada pela autora)

Tabela 2 – Carga e modos de ruptura das vigas

Protótipo	Carga de ruptura experimental (kN)	Modo de ruptura
VT	100,14	Escoamento do aço seguido do esmagamento do concreto
VR	127,25	Descolamento do laminado

As vigas ensaiadas por Garcez (2007) apresentam simetria de geometria e de carregamento, tanto longitudinalmente, quanto transversalmente. Isso permitiu a modelagem de apenas um quarto da viga, reduzindo consideravelmente o esforço computacional da análise. Além disso, o carregamento da estrutura foi realizado em duas etapas: a primeira incluiu a ação do peso próprio da estrutura, equivalente a 35,75 kN, e a segunda incluiu o incremento de carga. Como a carga de ruptura da viga testemunho foi de 100,14 kN (incluindo o peso próprio), o incremento de carga adotado foi de 70 kN, distribuído em 4 pontos de carga. Dessa forma, uma carga pontual de 17,5 kN foi aplicada no nó central de cada placa, a 120 cm e a 240 cm do eixo central da placa de apoio.

Um estudo preliminar foi conduzido nas vigas VT e VR variando o tamanho da malha de 5 cm e 2,5 cm, sendo esse tamanho igual para todos os elementos finitos. Adicionalmente, foram comparados os parâmetros do modelo DP-*Concrete* propostos por Benincá (2019) e por Ceron (2021). As respostas carga-deslocamento se mostram muito próximas em ambas as vigas, tanto a respeito da malha, quanto dos parâmetros do concreto. Ainda assim, observou-se um processamento mais eficiente e resultados ligeiramente superiores ao utilizar os parâmetros de Benincá (2019) com uma malha de 5 cm; portanto, esses foram os parâmetros adotados. A quantidade de incrementos na segunda etapa de carga também foi estudada, variando entre 100 e 200 incrementos, sendo adotado 100 incrementos devido aos bons resultados e menor tempo de análise.

5 Análise dos resultados

As curvas carga-deslocamento do ensaio experimental e da simulação numérica da viga sem reforço (VT) são apresentadas na Figura 4-a. Nota-se que a curva da simulação numérica acompanhou de forma precisa a curva experimental, com concordância entre as curvas na fase elástica (estádio I), início da fissuração (estádio II) e na plastificação (estádio III). Além disso, a modelagem computacional conseguiu reproduzir precisamente o valor da carga de ruptura, que foi apenas 1,59% superior ao experimental. As curvas carga-deformação do concreto obtidas no ensaio experimental e na simulação numérica da viga VT são exibidas na Figura 4-b. Nota-se que a curva obtida pela simulação numérica acompanha a curva experimental até uma deformação de 1,20%.

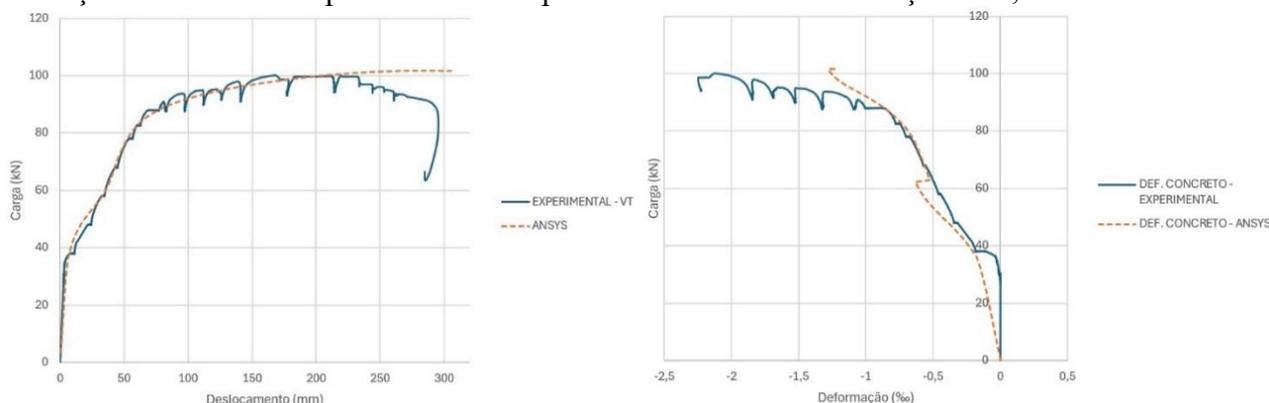


Figura 4 – Diagramas da viga VT: a) Carga-deslocamento; b) Carga-deformação (elaborada pela autora)

A distribuição de tensões normais na direção x (σ_x) no concreto da viga sem reforço (VT) em diferentes cargas ao longo do carregamento da estrutura é apresentada na Figura 5. A Figura 5-a refere-se às tensões σ_x no concreto ao final da primeira etapa de carga, correspondente ao peso próprio da estrutura, quando o concreto já havia atingido a resistência média à tração uniaxial (f_{ctm}). A Figura

5-b refere-se às tensões σ_x no concreto no incremento de carga no qual as armaduras longitudinais inferiores iniciam o processo de escoamento. Nesse caso, as tensões de compressão encontram-se mais elevadas, mas ainda abaixo da resistência média à compressão uniaxial (f_{cm}). A Figura 5-c mostra as tensões σ_x no concreto no incremento de carga em que ele atinge a tensão f_{cm} , sendo essa tensão atingida no meio do vão na face superior da peça. Por fim, a Figura 5-d exibe as tensões σ_x no concreto no incremento final de carga.

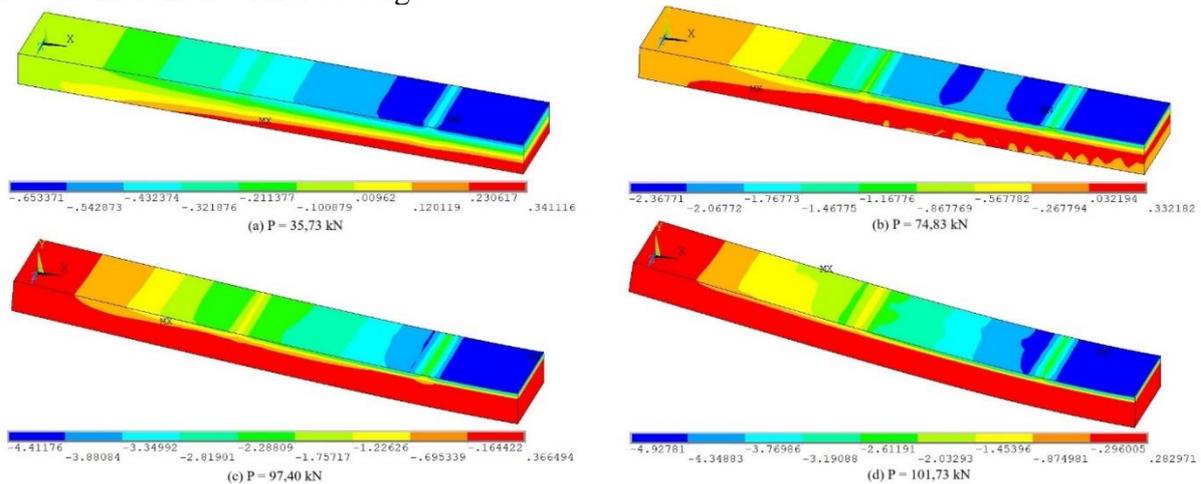


Figura 5 – Distribuição das tensões σ_x no concreto da VT (kN/cm²) (elaborada pela autora)

A Figura 6 apresenta a distribuição das tensões σ_x nas armaduras longitudinais inferiores da viga sem reforço (VT) para as mesmas cargas analisadas anteriormente. De modo geral, as armaduras são mais solicitadas à medida que a carga aumenta, especialmente no meio do vão. A Figura 6-b ilustra as tensões σ_x nas armaduras longitudinais inferiores no incremento de carga em que elas iniciam o processo de escoamento. Nesse caso, somente as duas armaduras próximas ao meio da seção transversal atingem a tensão de escoamento no centro do vão. Já na Figura 6-c, correspondente ao incremento de carga em que o concreto atinge a tensão f_{cm} , todas as armaduras passam a atingir a tensão de escoamento.

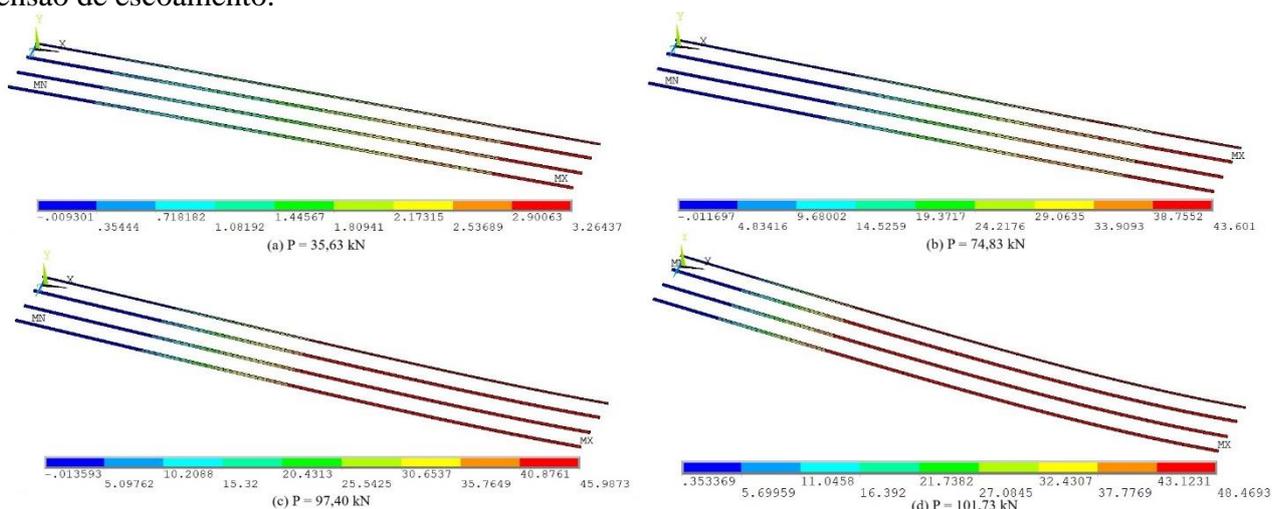


Figura 6 – Distribuição das tensões σ_x nas arm. long. inf. da VT (kN/cm²) (elaborada pela autora)

Na Figura 7-a são apresentadas as curvas carga-deslocamento do ensaio experimental e da simulação numérica da viga reforçada (VR). Nota-se que a curva da simulação numérica acompanha satisfatoriamente a curva experimental na fase elástica e no início da fissuração; contudo, divergem na fase plástica. Na figura 7-b são apresentadas as curvas carga-deformação dos laminados do ensaio experimental e da simulação numérica para a mesma viga. É possível notar a concordância entre as

curvas até uma carga de aproximadamente 87 kN, correspondente a uma deformação de 3%. A partir desse valor, a curva da simulação numérica deixa de acompanhar a curva experimental e alcança deformações superiores. Ressalta-se que a curva experimental não atingiu maiores deformações devido ao descolamento dos laminados antes de alcançar a tensão máxima desse material. Já o modelo numérico, por considerar a aderência perfeita entre o concreto e o laminado não identifica o deslizamento prematuro do laminado e segue deformando.

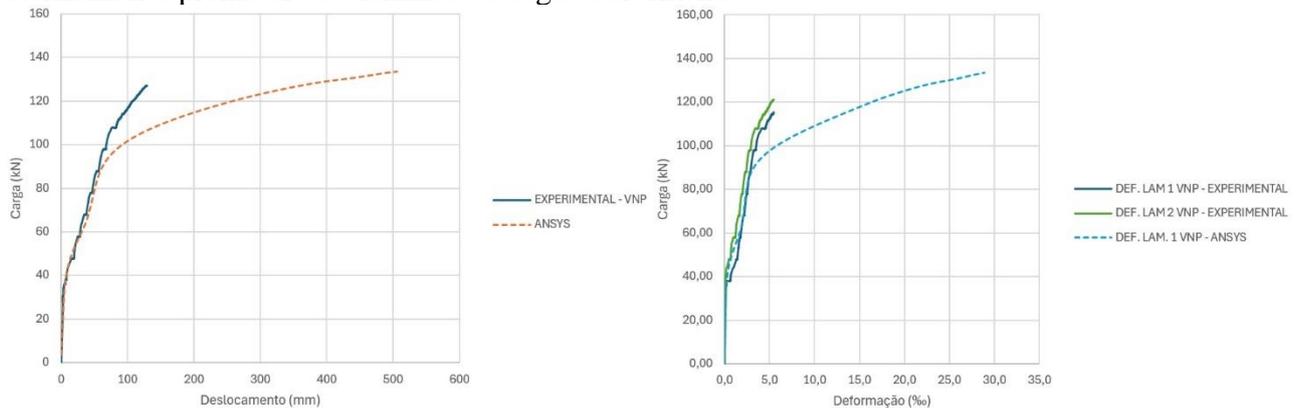


Figura 7 – Diagramas da viga VR: a) Carga-deslocamento; b) Carga-deformação (elaborada pela autora)

A distribuição de tensões σ_x no concreto da viga reforçada (VR) em diferentes cargas ao longo do carregamento da estrutura é apresentada na Figura 8. A Figura 8-a e a Figura 8-b referem-se às tensões σ_x no concreto ao final da primeira etapa de carga e no incremento de carga no qual as armaduras longitudinais inferiores iniciam o processo de escoamento, respectivamente. Nota-se um comportamento semelhante ao da viga VT para essas mesmas situações, porém com cargas superiores. A Figura 8-c mostra as tensões no concreto no incremento de carga em que ele atinge a tensão (f_{cm}). Assim como na viga VT, o concreto atinge essa tensão no centro do vão na face superior da peça; porém, com uma carga 13,30% superior. Por fim, a Figura 8-d exibe as tensões σ_x no concreto no incremento final de carga, também superior ao da viga VT.

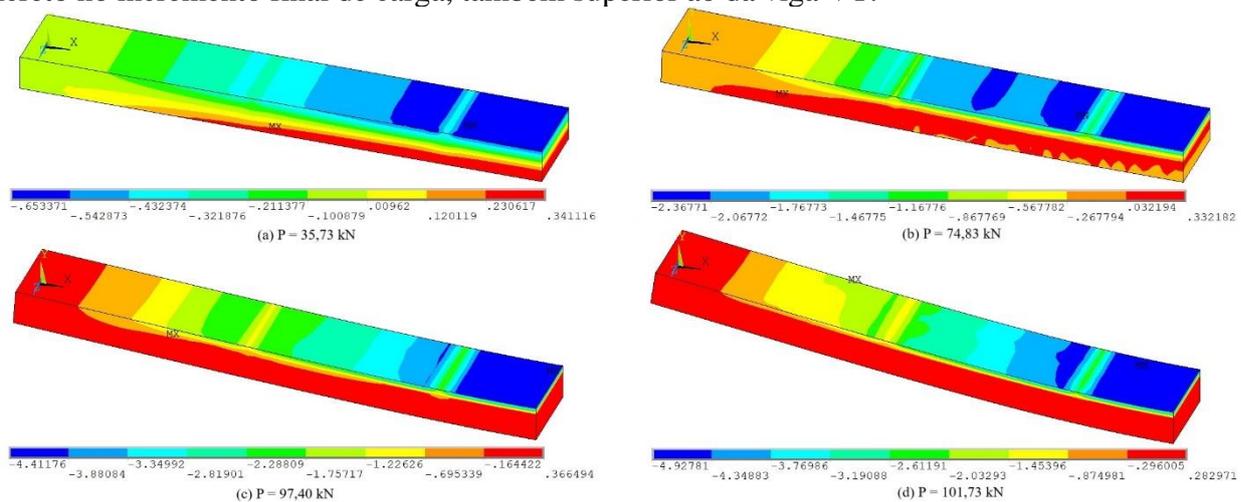


Figura 8 – Distribuição das tensões σ_x no concreto da VR (kN/cm²) (elaborada pela autora)

A Figura 9 apresenta a distribuição de tensões σ_x nas armaduras longitudinais inferiores da viga VR para os mesmos incrementos de carga anteriores. A Figura 9-b ilustra as tensões σ_x nas armaduras no incremento de carga em que elas iniciam o processo de escoamento. Assim como na viga VT, isso ocorre com as duas armaduras próximas ao meio da seção transversal no centro do vão; porém, com uma carga 7,75% maior que na viga VT. Nos incrementos de carga subsequentes todas as armaduras passam a atingir a tensão de escoamento.

A Figura 10 apresenta a distribuição de tensões σ_x no laminado da viga VR para as mesmas cargas anteriores. Nota-se que ele é mais solicitado à tração na região central do vão e atinge a resistência à tração do material (280 kN/cm²) nessa região em uma carga intermediária a Figura 10-c e a Figura 10-d. Isto é, o laminado rompe após o concreto ser esmagado e antes do final do carregamento, com uma carga de 121,30 kN.

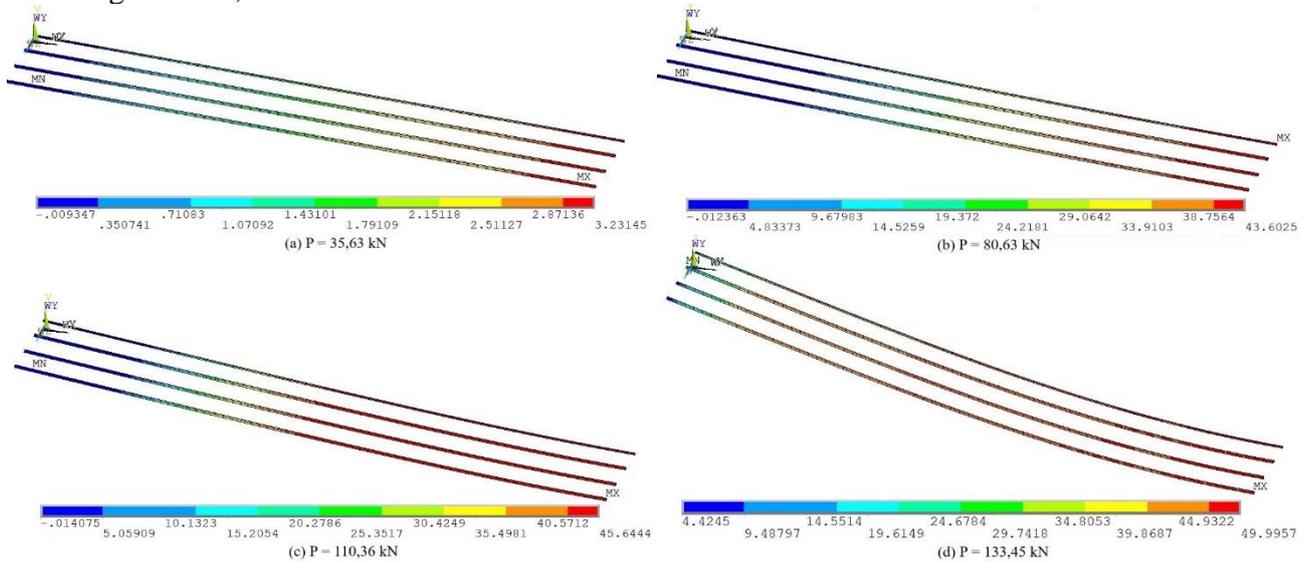


Figura 9 – Distribuição das tensões σ_x nas arm. long. inf. da VR (kN/cm²) (elaborada pela autora)

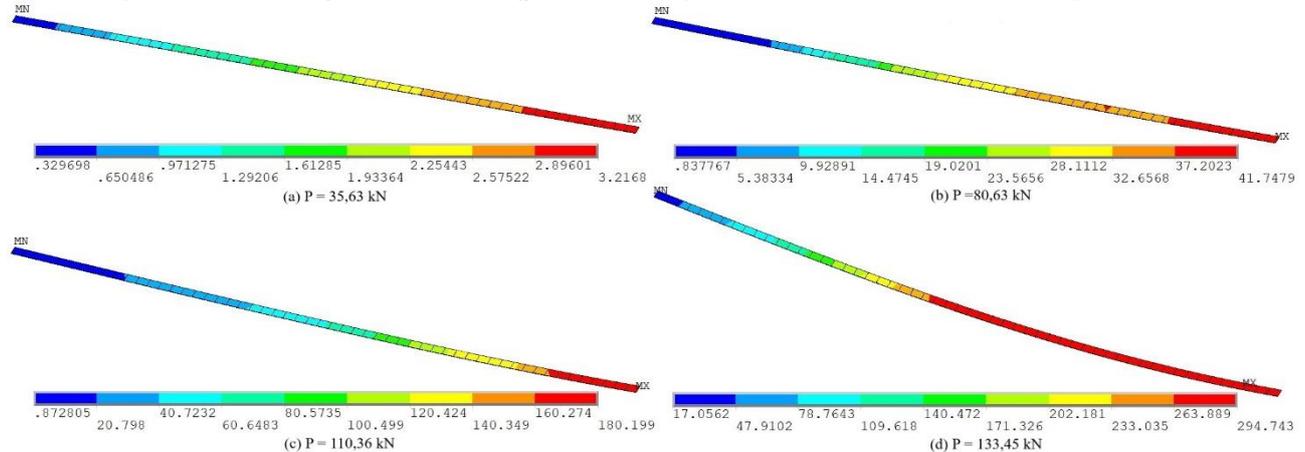


Figura 10 – Distribuição das tensões σ_x no laminado da VR (kN/cm²) (elaborada pela autora)

Considerações finais

Este trabalho teve como objetivo avaliar o comportamento de vigas em concreto armado sem reforço e reforçada à flexão com laminados de PRFC, utilizando o Método dos Elementos Finitos (MEF) por meio do *software* ANSYS. Os resultados numéricos da viga sem reforço mostraram boa correlação com os experimentais, tanto na resposta carga-deslocamento, quanto na resposta carga-deformação do concreto. Além disso, o modelo numérico foi capaz de prever a carga e o modo de ruptura observado no ensaio experimental, sendo esse o escoamento do aço seguido do esmagamento do concreto. No entanto, a viga com reforço ainda necessita de ajustes para que os resultados numéricos se aproximem mais dos experimentais, especialmente na fase de plastificação. Ainda assim, é possível notar que a estrutura se tornou mais rígida com a implementação dos laminados, o que se mostra coerente com a literatura. Ressalta-se que essa pesquisa trata dos resultados parciais da dissertação de mestrado da autora, a qual encontra-se em andamento.

Agradecimentos

Os autores agradecem a CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoas de Nível Superior – e ao CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – pelo apoio na realização desse estudo.

Referências

- ACI COMMITTEE. Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures. ACI 440.2R-17. ed. Farmington Hills, USA: American Concrete Institute, 2017. 117 p.
- ANSYS. ANSYS Mechanical APDL - Element Reference. Canonsburg, PA, 2024. Release 2024 R2.
- BEBER, A. J. Comportamento estrutural de vigas de concreto armado reforçadas com compósitos de fibra de carbono. 2003. 317 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.
- BENINCÁ, M. E. Simulação numérica de vigas alveolares mistas de aço e concreto: modelo parametrizado de elementos finitos. 2019. 206 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.
- CALLISTER, W.; RETHWISCH, D. Materials Science and Engineering: An Introduction, 8th Edition. Wiley, 2009.
- CERON, M. V. Desenvolvimento de um script para análise em elementos finitos de vigas de concreto através do software ANSYS. 2021. 136 f. Trabalho de diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021.
- FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON (FIB). fib Model Code for Concrete Structures 2010. Lausanne, Switzerland, 2013.
- 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, 10 2008.
- GARCEZ, M. R. Alternativas para melhoria no desempenho de estruturas de concreto armado reforçadas pela colagem de polímeros reforçados com fibras. 2007. 267 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.
- HOLLAWAY, L. Polymer Composites for Civil and Structural Engineering. Springer Netherlands, 1993.
- HOLLAWAY, L.; LEEMING, M. Strengthening of Reinforced Concrete Structures: Using Externally-Bonded FRP Composites in Structural and Civil Engineering. Taylor & Francis, 1999.
- JUVANDES, L. F. P. Reforço e reabilitação de estruturas de betão usando materiais compósitos de "CFRP". 1999. 396 f. Tese (Doutorado) - Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 1999.
- MACHADO, A. d. P. Manual de reforço das estruturas de concreto armado com fibras de carbono. São Paulo: Better, v. 24, 2010.
- MEDEIROS, M. V. d. Simulação numérica do comportamento de peças fletidas reforçadas com PRFC. 2019. 194 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.
- PENDHARI, S. S.; KANT, T.; DESAI, Y. M. Application of polymer composites in civil construction: A general review. *Composite Structures*, v. 84, n. 2, p. 114–124, 2008.
- TENG, J.; SMITH, S.; YAO, J.; CHEN, J. Intermediate crack-induced debonding in rc beams and slabs. *Construction and Building Materials*, v. 17, n. 6, p. 447–462, 2003. ISSN 0950-0618. Fibre-reinforced polymer composites in construction.
- THOMSEN, H.; SPACONE, E.; LIMKATANYU, S.; CAMATA, G. Failure mode analyses of reinforced concrete beams strengthened in flexure with externally bonded fiber-reinforced polymers. *Journal of composites for construction*, American Society of Civil Engineers, v. 8, n. 2, p. 123–131, 2004.
- TRIANTAFILLOU, T. C.; PLEVRIS, N. Strengthening of rc beams with epoxy-bonded fibre-composite materials. *Materials and Structures*, v. 25, p. 201–211, 1992.
- 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.