

## Reforço de vigas mistas de aço e concreto com polímeros reforçados com fibra

### RESUMO

**Flávia da Silva Cardoso**  
[fla.scardoso@hotmail.com](mailto:fla.scardoso@hotmail.com)  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, Paraná, Brasil

**Ronaldo Rigobello**  
[ronbello@gmail.com](mailto:ronbello@gmail.com)  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, Paraná, Brasil

**OBJETIVO:** Estudar o comportamento estrutural de vigas mistas de aço e concreto reforçadas com polímeros reforçados com fibra de carbono (PRFC), buscando metodologias analíticas e o desenvolvimento de modelos numéricos. **MÉTODOS:** Os modelos numéricos desenvolvidos tiveram como base referências disponíveis na literatura, para simular vigas estudadas experimental e analiticamente em outros trabalhos. Foram modeladas vigas de aço de perfil I agindo juntamente com uma laje de concreto, considerando vigas mistas não reforçada e vigas mistas reforçadas com PRFC na superfície inferior da mesa tracionada da viga. Para simular as vigas, foi utilizado o programa Ansys, que tem como base o método dos elementos finitos, para uma modelagem tridimensional e uma análise estrutural estática e não-linear física. **RESULTADOS:** Os resultados obtidos consistem de deslocamento no meio do vão das vigas versus força aplicada, bem como os resultados de carregamento último obtidos para os modelos analisados. **CONCLUSÕES:** Os resultados obtidos se mostraram satisfatórios. As comparações dos resultados obtidos com os resultados experimentais permitem a validar os modelos numéricos desenvolvidos. O desenvolvimento de modelos numéricos de vigas mistas de aço e concreto reforçadas com PRFC com a estratégia adotada se mostrou adequado. O trabalho está na fase do estudo de modelos analíticos e do desenvolvimento de mais modelos numéricos.

**PALAVRAS-CHAVE:** Reforço. Vigas Mistas de Aço e Concreto. Polímeros Reforçados com Fibra de Carbono. Modelagem Numérica.

## 1 INTRODUÇÃO

No Brasil, a utilização do sistema de estruturas mistas de aço e concreto em obras civis vem ganhando destaque nos últimos anos. Isso se deve, principalmente, por esse sistema permitir a rapidez, a versatilidade e uma melhor racionalização dos processos construtivos, diminuindo, assim, os desperdícios que tanto ocorrem em obras. Como todo sistema de estrutural, este também está sujeito a falhas de manutenção e projetos e aos fatores ambientais. Conseqüentemente, com o passar dos anos, será necessário que um reforço seja executado, afim de manter a durabilidade e o desempenho da estrutura.

Tal reforço conta, atualmente, com dois métodos: o convencional, que consiste no corte e substituição de chapas de aço ou na adição de chapas externas aos perfis de aço; e o reforço com polímeros reforçados com fibra (PRF). O PRF é um material composto por uma matriz polimérica reforçada com fibras, as quais usualmente são de vidro, carbono ou fibras de aramida e entre suas propriedades, destaca-se a elevada relação resistência-peso e uma boa resistência a corrosão e aos ataques ambientais, se tornando um material interessante para o reforço de estruturas mistas (ZHAO, 2014).

Peiris (2011) destaca que, em comparação com o método convencional, o PRF possui os custos de projeto reduzidos devido aos baixos custos de transporte, manuseio, aplicação e mão-de-obra, e é menos perturbador durante o processo de reparação. Além disso, a utilização do PRF contribui com uma carga adicional mínima a estrutura e quando usada a ligação adesiva, cria menos concentração de tensão se comparado com a fixação mecânica.

O PRF já vem sendo muito utilizado para o reforço de estruturas de concreto e o sucesso dessa técnica fez com que pesquisadores investigassem seu uso em estruturas metálicas e mistas, o qual é ainda, um tema pouco explorado no Brasil. Assim, visando contribuir com a exploração desse tema, a questão central do trabalho é estudar o comportamento estrutural de vigas mistas de aço e concreto reforçadas com polímeros reforçados com fibra de carbono (PRFC) através da busca por metodologias analíticas disponíveis na literatura e o desenvolvimento de modelos numéricos.

## 2 MÉTODOS

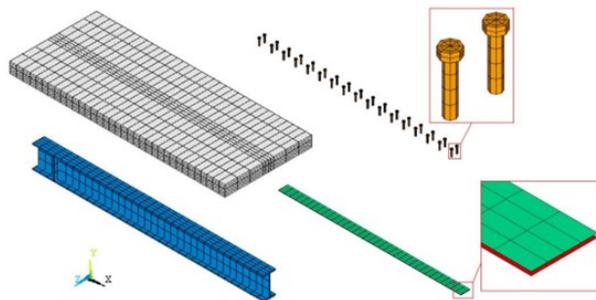
Para o desenvolvimento do trabalho, primeiramente foram escolhidas referências que apresentam estudos experimentais e/ou analíticos de vigas mistas reforçadas com PRFC. A principal referência encontrada foi a de Afefy, Sennah e Akhlagh-Nejat (2016). Nesse trabalho estão descritos os estudos experimentais de vigas mistas reforçadas com PRFC e um modelo analítico para o cálculo do momento resistente da viga mista. O modelo analítico desenvolvido também foi testado com os resultados obtidos no estudo de Fam, MacDougall e Shaat (2009).

No presente trabalho, os modelos numéricos foram desenvolvidos com base na estratégia apresentada no trabalho de Kotinda (2006) e adaptados para simular as vigas estudadas na referência principal. Dessa forma, foram simuladas vigas de aço com perfil I agindo juntamente com a laje de concreto, sendo uma delas não reforçada, servindo como referência, e as demais, reforçadas com

quantidades diferentes de camada de PRFC. Tal reforço foi adicionado na superfície inferior da mesa tracionada do perfil de aço.

Para a simulação, foi utilizado o *software* Ansys, o qual permite realizar análise por elementos finitos pré-definidos, sendo feita uma modelagem tridimensional e uma análise estrutural estática e não-linear física. Em todos os modelos, a escolha dos elementos para discretizar os componentes da viga mista levou em consideração o número de graus de liberdade, o esforço computacional e a representatividade diante do comportamento destes componentes. Dessa forma, para discretizar a laje de concreto foi utilizado o elemento Solid65; para a viga de aço e o PRFC, o Shell181; para a modelagem dos conectores, o Beam189 e; para representar o contato entre a laje e a viga, os elementos Conta173 e Targe170 (Figura 1).

Figura 1 – Elementos utilizados para discretizar os componentes da viga mista



Fonte: Kotinda (2006).

Na definição da malha de elementos finitos, levou-se em consideração a necessidade da coincidência dos nós na interface de cada dos componentes da viga mista, possibilitando o acoplamento entre tais conjuntos. A discretização longitudinal da viga resultou em elementos da ordem de 60 mm de comprimento e a discretização da seção transversal foi realizada conforme ilustrado na Figura 1.

As propriedades dos materiais, concreto, aço e PRFC, utilizados na simulação numérica estão descritos nas Tabelas 1, 2 e 3, respectivamente, extraídos de Afefy, Sennah e Akhlagh-Nejat (2016).

Tabela 1 – Propriedades do material concreto

Densidade (kN/cm <sup>3</sup> )	Módulo de elasticidade (MPa)	Coefficiente de Poisson	Resistência à compressão (MPa)
2,4e <sup>-5</sup>	28688	0,2	40

Fonte: Afefy, Sennah e Akhlagh-Nejat (2016).

Tabela 2 – Propriedades do material aço

Aço	Densidade (kN/cm <sup>3</sup> )	Módulo de elasticidade (MPa)	Coefficiente de Poisson	Tensão de escoamento (MPa)	Tensão última (MPa)
Viga	7,7e <sup>-5</sup>	200000	0,3	350	450
Conector	7,7e <sup>-5</sup>	200000	0,3	340	420
Armadura	7,7e <sup>-5</sup>	200000	0,3	400	-

Fonte: Afefy, Sennah e Akhlagh-Nejat (2016).

Tabela 3 – Propriedades do material PRFC

Densidade (kN/cm <sup>3</sup> )	Módulo de elasticidade (MPa)	Coefficiente de Poisson	Tensão última (Mpa)	Deformação última
1,7e <sup>-5</sup>	72400	0,31	876	0,012

Fonte: Afefy, Sennah e Akhlagh-Nejat (2016).

As relações tensão x deformação dos materiais fornecidas ao programa seguiram o padrão adotado em Kotinda (2006). Quanto ao carregamento, todas as vigas foram submetidas a um sistema de carregamento de quatro pontos, de acordo com o programa experimental de Afefy, Sennah e Akhlagh-Nejat (2016).

Por conta da consideração da não-linearidade de material, o carregamento foi aplicado de forma incremental, sendo utilizado o recurso '*Automatic Load Stepping*' com incrementos máximos de 10 kN e mínimo de  $5 \times 10^{-5}$  kN e controle de convergência por forças e momentos.

Para resolução do sistema não-linear foi utilizado o método '*Newton Raphson Pleno*', definido pela atualização da matriz de rigidez tangente a cada iteração.

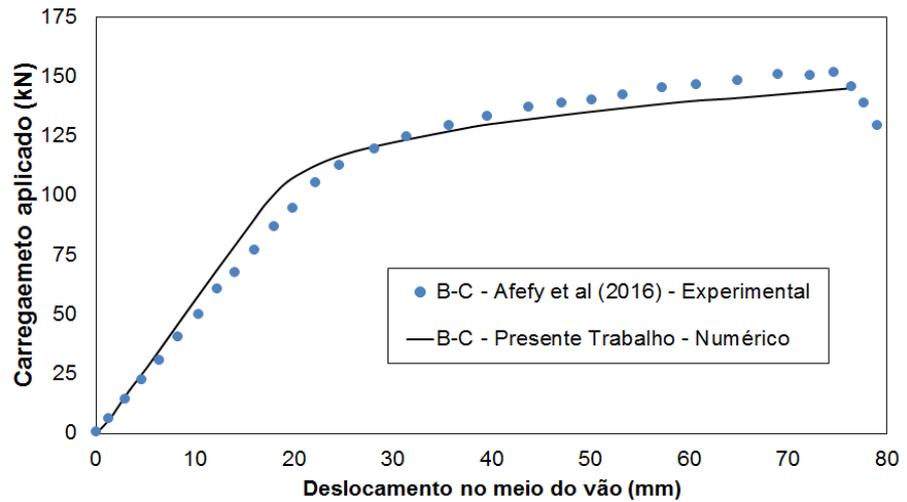
Ao final, os resultados obtidos foram comparados com os experimentais da referência principal. Dessa forma, os modelos numéricos foram validados.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para validação dos modelos numéricos, foi utilizado o parâmetro deslocamento vertical no meio do vão em função da aplicação de carregamento. Os gráficos a seguir (Figuras 2, 3 e 4) retratam os resultados obtidos experimentalmente por Afefy, Sennah e Akhlagh-Nejat (2016) e aqueles obtidos numericamente no presente trabalho.

Para o caso representado na Figura 2, viga sem reforço, o carregamento último obtido experimentalmente foi de 151,8 kN, enquanto que o carregamento último obtido numericamente foi de 145 kN, uma diferença de 4,5%.

Figura 2 - Gráfico 'Força x Deslocamento' correspondente a viga mista sem reforço

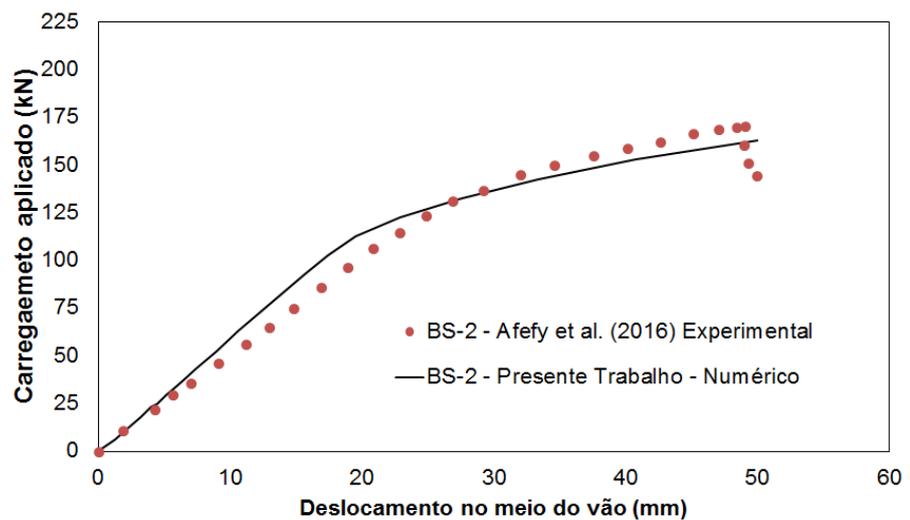


Fonte: Autoria Própria (2017).

Para o caso representado na Figura 3, viga com reforço de duas camadas de PRFC, o carregamento último obtido experimentalmente foi de 170,1 kN, enquanto que o carregamento obtido numericamente foi de 162,7 kN, uma diferença de 4,35%.

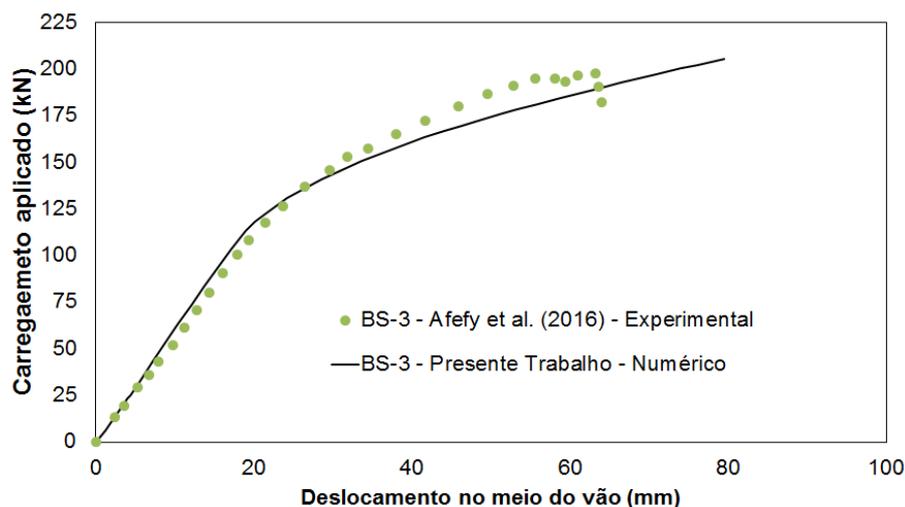
Já para o caso da Figura 4, viga com reforço de três camadas de PRFC, o carregamento último obtido experimentalmente foi de 197,7 kN, enquanto que o carregamento de colapso obtido numericamente foi de 205,3 kN, uma diferença de 3,8%.

Figura 3 - Gráfico 'Força x Deslocamento' correspondente a viga mista reforçada com duas camadas de PRFC



Fonte: Autoria Própria (2017).

Figura 4 - Gráfico 'Força x Deslocamento' correspondente a viga mista reforçada com três camadas de PRFC



Fonte: Autoria Própria (2017).

Através da análise dos gráficos, nota-se que o comportamento das vigas mistas, considerando o deslocamento no meio do vão, foi recuperado de forma satisfatória pelas curvas obtidas numericamente, apresentando uma diferença aceitável no trecho inicial e no trecho com comportamento não-linear.

#### 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Como o término do trabalho de iniciação científica está previsto para novembro de 2017, o presente trabalho ainda se encontra em fase de desenvolvimento, sendo que no momento estão sendo estudados os modelos analíticos e desenvolvidos mais modelos numéricos.

O potencial do reforço de vigas mistas de aço e concreto com PRFC é destacado em diversos trabalhos presentes na literatura, especialmente na comparação com o método convencional.

Os modelos numéricos desenvolvidos de vigas mistas de aço e concreto reforçadas com PRFC mostraram que a estratégia adotada para o presente caso é adequada e promissora. Os resultados obtidos pela modelagem numérica quando comparados com os resultados experimentais foram satisfatórios.

# Strengthening of steel-concrete composite beams with fiber reinforced polymers

## ABSTRACT

**OBJECTIVE:** To study the structural behavior of steel-concrete composite beams strengthened with carbon fiber reinforced polymers (CFRP), searching for available analytical methodologies and developing numerical models. **METHODS:** The numerical models developed were based on references available in the literature about composite beams studied experimentally and analytically in other works. Steel I-sections beams were modeled together with a concrete slab considering situations unstrengthened and strengthened with CFRP on the lower surface of the tension flange of the beam. To simulate the beams, the Ansys software was used, which is based on the finite element method, for three-dimensional modelling and static and non-linear physical structural analysis. **RESULTS:** The obtained results consist of displacement in the middle of the beams spans versus applied force, as well as the ultimate vertical load results obtained for the models analyzed. **CONCLUSIONS:** The obtained results were satisfactory. The comparison of obtained results with the experimental ones allows the validation of the numerical models developed. The development of numerical models of steel- concrete composite beam strengthened with CFRP with the strategy adopted was adequate. The work is in the phase study of analytical models and development of more numerical models.

**KEYWORDS:** Strengthening. Steel-Concrete Composite Beams. Carbon Fiber Reinforced Polymers. Numerical Modelling.

---

## AGRADECIMENTOS

À Fundação Araucária, através do Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica - PIBIC, pela concessão de bolsa e financiamento do projeto.

## REFERÊNCIAS

AFEFY, H. M.; SENNAH, K.; AKHLAGH-NEJAT, H. Experimental and analytical investigations on the flexural behavior of CFRP-strengthened composite girders. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 120, p. 94-105, 2016.

CHAPMAN, J. C.; BALAKRISHNAN, S. Experiments on composite beams. **The Structural Engineer**, v.42, n.11, p. 369-383, 1964.

FAM, A.; MACDOUGALL, C.; SHAAT, A. Upgrading steel-concrete composite girders and repair of damaged steel beams using bonded CFRP laminates. **Thin-walled Structures**, v. 47, p.1122-1135, 2009.

KOTINDA, T. I. **Modelagem numérica de vigas mistas de aço e concreto simplesmente apoiadas: ênfase ao estudo da interface laje-viga**. 2006. 116 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Estruturas, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

PEIRIS, N. A. **Steel beams strengthened with ultra-high modulus CFRP laminates**. 2011. 307 f. Dissertation (Doctorate of philosophy) – University of Kentucky, Kentucky, 2011.

ZHAO, X-L. **FRP-strengthened metallic structures**. 1.ed. New York: CRC Press, 2014.

**Recebido:** 31 ago. 2017.

**Aprovado:** 02 out. 2017.

**Como citar:**

CARDOSO, F.S.; RIGOBELLO, R. Reforço de vigas mistas de aço e concreto com polímeros reforçados com fibra. In: SEMINÁRIO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA DA UTFPR, 22, 2017, Londrina. **Anais eletrônicos...** Londrina: UTFPR, 2017. Disponível em: <<https://eventos.utfpr.edu.br/sicite/sicite2017/index>>. Acesso em: XXX.

**Correspondência:**

Flavia da Silva Cardoso

R. Rosalina Maria Ferreira - Vila Carola, Campo Mourão – PR, Brasil.

**Direito autoral:**

Este resumo expandido está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição-Não Comercial 4.0 Internacional.

