ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DE VIGAS METÁLICAS REFORÇADAS COM CFRP POR MEIO DE MODELAGEM NUMÉRICA

G. M. DALFRÉ
PhD, PPGECiv
UFSCar
São Carlos/SP; Brasil
glaucia.dalfre@ufscar.br

D. C. FERREIRA
Engenheiro Civil/Mestrando
PPGECiv/UFSCar
São Carlos/SP; Brasil
douglas_costaf@hotmail.com

M. C. POSTERLLI
Engenheira Civil/Doutoranda
SET/EESC/USP
São Carlos/SP; Brasil
mariana.posterlli@gmail.com

M. C. De OLIVEIRA
Engenheiro Civil/Mestrando
PPGECiv/UFSCar
São Carlos/SP; Brasil
matusalemoliveira@ufscar.br

RESUMO

Com o envelhecimento das estruturas, o número de procedimentos de recuperação ou reforço de elementos estruturais aumentou significativamente. Além disso, a utilização de materiais fora de especificação, erros de projeto ou execução, sobrecargas não previstas em projeto, falta de manutenção e alteração da utilização da estrutura existente também levam à necessidade de se reforçar os elementos estruturais. Neste contexto, o uso de CFRPs (*Carbon Fiber Reinforced Polymers*, em inglês) tem se destacado como material a se utilizar no reforço estrutural devido às suas propriedades físicas e mecânicas altamente eficientes. Neste sentido, este trabalho tem como objetivo a análise numérica do comportamento de vigas metálicas constituídas por perfis do tipo I reforçadas à flexão por mantas de CFRP aplicadas de acordo com a técnica EBR (*Externally Bonded Reinforcement*, em inglês). Para isso, um modelo numérico em elementos finitos foi construído utilizando-se o *software* Abaqus e posteriormente validado por meio de comparação com resultados experimentais.
Palavras-chave: Vigas metálicas. Modelagem numérica. Reforço. CFRP.

ABSTRACT

With the aging of structures, the number of procedures to rehabilitate or to strength structural elements has increased significantly. In addition, the use of unsuitable materials, design errors or execution errors of structures, unplanned overloads in the design, inadequate maintenance and the change of the use of existing structures also lead to the need to strength the structural elements. In this context, the use of CFRPs (Carbon Fiber Reinforced Polymers) has been highlighted as a material to be used in structural strengthening due to its highly efficient physical and mechanical properties. In this context, this work aims to analyze the behavior of steel I-beams flexural strengthened by CFRP sheets applied according to the EBR (Externally Bonded Reinforcement) technique. Thus, a numerical model in finite elements was built using the software Abaqus and validated through the comparison with experimental results.
Keywords: Steel Beams. Numerical modelling. Strengthening. CFRP.

1. INTRODUÇÃO

Nos anos de 1990, o uso de materiais compósitos para reforço estrutural começou a ganhar interesse na área acadêmica e industrial. Esse material, conhecido na literatura internacional por *Fiber Reinforced Polymer* (FRP, polímero reforçado com fibra), surgiu com o avanço da ciência dos materiais, incentivado pela demanda de materiais mais leves, duráveis e resistentes. São constituídos basicamente pela incorporação de fibras de elevada resistência em uma matriz de resina polimérica; dentre as fibras mais utilizadas destacam-se as de carbono, vidro e aramida; com relação as resinas, as mais comuns são as epoxídicas, éster vinílicas e poliéster (CARNEIRO; TEIXEIRA, 2008), (KARBHARI, 2014).

Um grande número de estruturas metálicas, tais como obras de infraestrutura rodoviária e ferroviária, edifícios, estruturas para mineração, transportes e indústrias estão envelhecendo, surgindo assim a necessidade de se reparar e reforçar essas estruturas. Os métodos convencionais de reparo e reforço de estruturas metálicas consistem em se cortar e substituir as regiões danificadas por chapas ou a fixação de chapas de aço externas. Essas chapas geralmente são volumosas, pesadas, de difícil fixação e propensas à corrosão e fadiga. Dessa forma, a utilização do FRP tem grande potencial de aplicação no reforço de estruturas metálicas como pontes, edifícios, plataformas offshore, tubulações e estruturas de guindastes (ZHAO, 2014).

Os métodos tradicionais para o reforço de vigas de mistas e metálicas envolvem a fixação de chapas ou perfis metálicos por meio de soldagem, parafusamento ou colagem. No entanto, a adição de chapas ou perfis metálicos apresentam várias desvantagens com relação à união adesiva de laminados FRP, podendo-se destacar: (1) o uso de chapas ou perfis metálicos envolve um procedimento de instalação trabalhoso e demorado; (2) quando o parafuso é utilizado, a perfuração pode provocar enfraquecimento temporário/local da estrutura; (3) quando a soldagem é utilizada, são introduzidos riscos de fissuração por fadiga, além disso, não é possível a utilização da solda em ambientes sensíveis ao fogo; e (4) o peso significativo dos componentes adicionados pode reduzir a capacidade de carga e aumentar as flechas do elemento estrutural (TENG; FERNANDO, 2014).

Dessa forma, a união adesiva de laminados de FRP leves e com elevada resistência tornou-se um método atrativo nos últimos anos para o reforço à flexão de vigas mistas e metálicas em serviço. Além da elevada relação resistência /peso dos compósitos de FRP, os laminados de FRP também possuem outras vantagens que incluem: (i) excelente resistência à corrosão; (ii) flexibilidade de forma e (iii) adequação direcional das propriedades do material (TENG; FERNANDO, 2014).

A primeira pesquisa no campo da engenharia civil tratando do reforço de estruturas metálicas pela aplicação de FRP foi realizada por Sen e Liby (1994). Já as primeiras aplicações em campo do FRP para reforço de estruturas metálicas foram as Ponte Tickford (Lane e Ward, 2000) no Reino Unido e a Ponte Christina Creek, nos Estados Unidos (MILLER *et al*., 2001).

Com o passar dos anos, diversos estudos foram realizados acerca de vigas mistas ou metálicas reforçadas à flexão por laminados de CFRP (colagem do laminado de CFRP na mesa tracionada de uma viga simplesmente apoiada) (por exemplo, Miller *et al*., 2001, Tavakkolizadeh e Saadatmanesh 2003, Al -Saidy *et al*. 2004, Nozaka *et al*., 2005, Colombi e Poggi 2006, Lenwari *et al*., 2006, Sallam *et al*., 2006, Schnerch e Rizkalla 2008, Shaat e Fam 2008, Fam *et al*. 2009, Linghoff *et al*. 2009). Esses estudos mostraram que ganhos significativos de incremento de capacidade de carga e, em alguns casos, ganhos significativos de rigidez nos elementos reforçados por FRP (TENG; FERNANDO, 2014).

Teng e Fernando (2014) apresentam os seguintes modos de falha associados a vigas metálicas reforçadas com FRP: (a) falha por flexão no plano devido à ruptura por tração do FRP; (b) descolamento das extremidades do laminado de FRP; e (c) fissuração ou descolamento das duas extremidades do laminado de FRP (descolamento intermediário). Além disso, as vigas de aço de seção I reforçadas com FRP sem suporte lateral adequado podem sofrer falhas por flambagem lateral (modo de falha d).

Dentre os diversos estudos realizados sobre o reforço e reabilitação de estruturas, poucos englobaram a análise de vigas metálicas reforçadas. Deste modo, com base no trabalho experimental de González *et al*. (2017), apresenta-se aqui um modelo numérico em elementos finitos de vigas metálicas com perfil I reforçadas à flexão por mantas de CFRP, construído com auxílio do *software* Abaqus.

2. METODOLOGIA

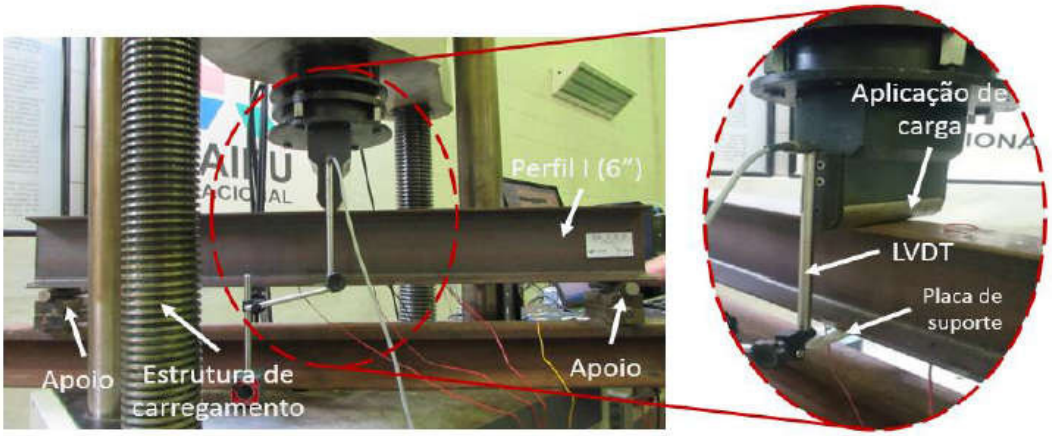
Como já foi discutido anteriormente, o presente trabalho tem por objetivo o desenvolvimento de um modelo numérico de vigas metálicas reforçadas à flexão por mantas de CFRP com base nos resultados obtidos experimentalmente por González et al. (2017).

2.1. Modelo experimental de González et al. (2017)

A campanha experimental foi composta por cinco vigas metálicas com perfil I e 120 cm de comprimento . Uma das vigas foi ensaiada sem reforço, caracterizando-se como a viga de referência (SB 0 0 0), e as demais foram reforçadas com diferentes soluções de reforço: (a) viga reforçada à flexão com 1 camada de reforço em CFRP com 100 cm de comprimento (SB 1 0 0); (b) viga reforçada à flexão com 2 camadas de reforço em CFRP com 100 cm de comprimento (SB 2 0 0), (c) viga reforçada à flexão com 1 camada de reforço em CFRP e ancoragem em suas extremidades (SB 1 1 0) e (d) viga reforçada à flexão com 1 camada de reforço em CFRP e enrijecedores aplicados na região central da viga (SB 1 0 1). A Tabela 2 apresenta um resumo com as diferentes soluções de reforço ensaiadas.

Essas vigas foram submetidas a ensaios de flexão em três pontos até a sua ruptura utilizando-se uma máquina universal de ensaios com capacidade de 1000 kN. A carga aplicada foi registrada por meio de uma célula de carga e os deslocamentos verticais foram medidos por meio de dois transdutores de deslocamento (LVDTs) posicionados no meio da viga. A Figura 1 apresenta um esquema do ensaio e da instrumentação.

Figura 1 – Configuração do ensaio



Fonte: González *et al.*, 2017.

A Tabela 1 apresenta os principais resultados obtidos do programa experimental, ou seja, a força máxima resistida pelo elemento (Fmáx) com o seu respectivo deslocamento vertical no centro da viga (Flecha). Além disso, para as vigas reforçadas com o CFRP, são apresentadas as variações destes parâmetros com relação à viga de referência sem reforço (Δ,Fmáx e Δ,Flecha).

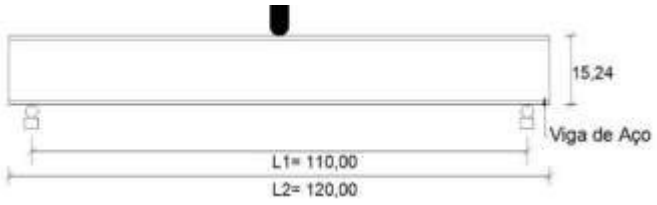
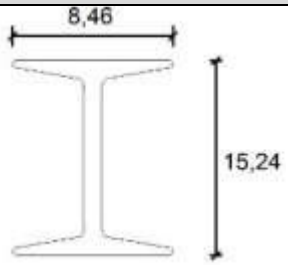
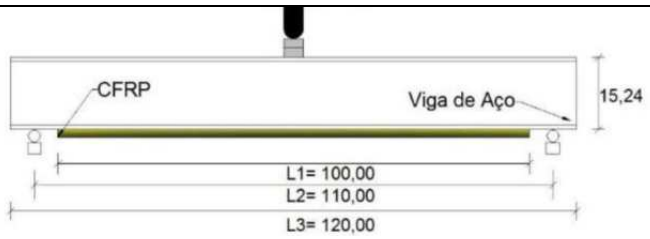
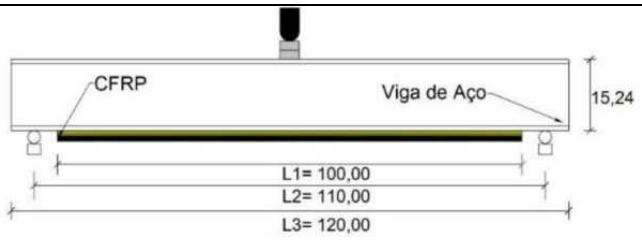
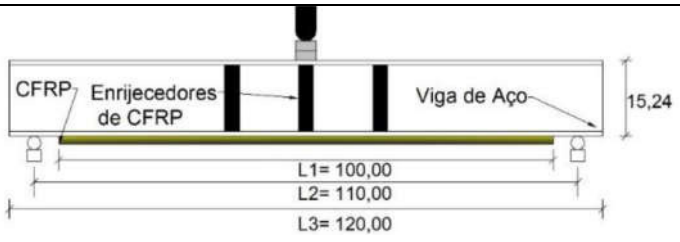
Tabela 1 - Principais resultados obtidos no programa experimental

	Força e deslocamentos máximos			
	Fmáx (kN)	Flecha (mm)	Δ,Fmáx (%)	Δ,Flecha (%)
SB 0 0 0	184,01	13,83	-	-
SB 1 0 0	194,24	11,00	5,56	-20,46
SB 2 0 0	209,38	11,40	13,79	-17,57
SB 1 1 0	192,85	10,50	4,80	-24,07
SB 1 0 1	195,67	7,60	6,34	-45,05

Fonte: Gonzáles *et al.*, 2017.

Os resultados indicaram um aumento de até 13,83% da capacidade portante das vigas reforçadas com CFRP e uma redução da sua ductilidade quando comparada à viga de referência sem reforço. O modo de ruptura das vigas reforçadas se deu pela ruptura do elemento de reforço (CFRP).

Tabela 2 – Configurações do sistema de reforço (medidas em cm)

Identificação das vigas	Posicionamento do Reforço	Seção transversal
SB 0 0 0 (Referência)		
SB 1 0 0		
SB 2 0 0		
SB 1 1 0		
SB 1 0 1		

Fonte: Gonzáles *et al.*, 2017.

2.2. Modelo numérico

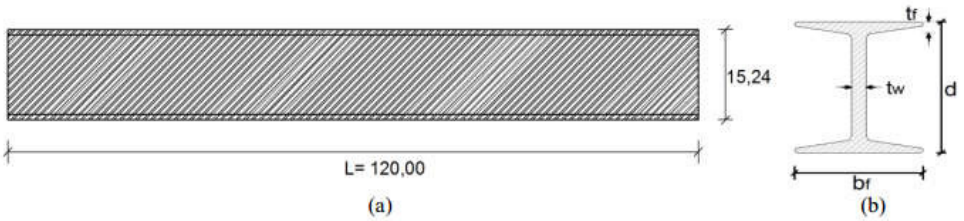
Com o auxílio do *software* em elementos finitos Abaqus foi definido o modelo numérico das vigas metálicas reforçadas com CFRP.

Neste caso, optou-se pela análise do comportamento da solução de reforço (a) viga reforçada à flexão com 1 camada de reforço em CFRP com 110 cm de comprimento entre apoios (SB 1 0 0). Os itens a seguir indicam os parâmetros e condições adotadas para as simulações numéricas.

2.2.1. Propriedades geométricas e condições de contorno

A viga metálica em perfil I comercial apresenta comprimento total de 120 cm, com as demais características e dimensões da seção apresentadas na Figura 2 e Tabela 3.

Figura 2 – Dimensões (em cm): (a) Perfil longitudinal; (b) Perfil transversal



Fonte: Gonzáles *et al*. (2017).

Tabela 3 - Dimensões do perfil de aço

Dimensões (mm)	
Altura total (d)	152,4
Largura da mesa (b_f)	84,6
Espessura da mesa (t_f)	9,1
Altura da alma (h)	143,3
Espessura da Alma (t_w)	5,9

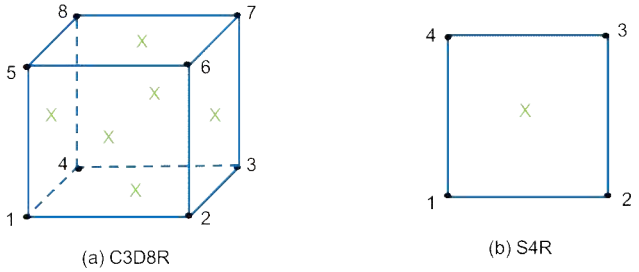
Fonte: Gonzáles *et al*., 2017.

O perfil foi modelado como um elemento 3D conforme a geometria apresentada na Figura 2, sendo discretizado em elementos do tipo C3D8R, elementos quadráticos com 8 nós, ordem de aproximação linear e número reduzido de pontos de integração.

O perfil metálico foi modelado com elementos lineares com integração reduzida a fim de evitar a ocorrência de *shear-locking*, um fenômeno numérico recorrente na aplicação de elementos lineares com integração completa para análises de flexão. No entanto, a utilização de elementos com integração reduzida ocasiona outro problema chamado de *hourglassing* que seria a flexibilização, perda de rigidez, do modelo. De acordo com Sun (2006) para contornar esse problema deve ser adotada uma malha suficientemente discreta com no mínimo 4 camadas de elementos.

O elemento de reforço à flexão em CFRP com 100 cm de comprimentofoi modelado como elemento de casca 2D do tipo S4R, elementos com 4 nós, ordem de aproximação linear e número de pontos de integração reduzido. A Figura 3 ilustra os tipos de elementos empregados para a discretização tanto da viga metálica quanto do reforço em CFRP.

Figura 3 – Tipos de elementos finitos utilizados (a) Para o perfil metálico; (b) Para o reforço em CFRP

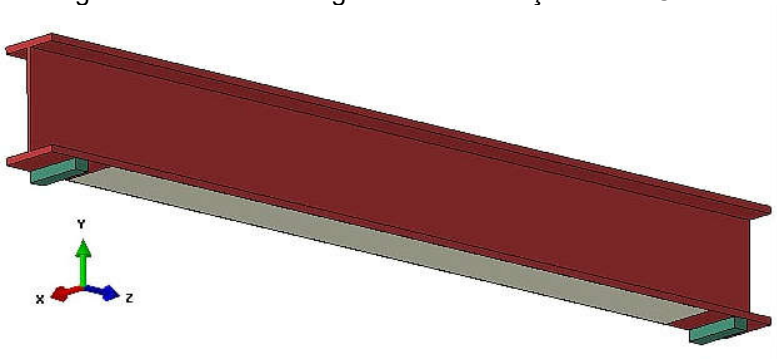


O acoplamento do reforço em CFRP à superfície metálica é feita por meio da opção *tie* do *software* Abaqus. Desta forma, os materiais em igualdade de deformações apresentam transmissão total dos esforços entre si, sem a possibilidade de ocorrência de escorregamentos ou rupturas na ligação entre os dois materiais.

Além disso, foram definidos dois aparelhos de apoio rígidos de 2 cm de largura, impedindo o deslocamento vertical do perfil metálico nessas regiões. O carregamento é aplicado em uma região central do vão da viga com espessura de 2 cm de largura por meio de deslocamentos impostos crescentes.

A Figura 4 apresenta um esquema do modelo numérico simulado contendo o reforço à flexão em CFRP e os dois aparelhor de apoio.

Figura 4 – Modelo da viga metálica reforçada com CFRP



2.2.2. Propriedades mecânicas dos materiais

Para o perfil metálico constituído de aço ASTM A588, foi adotado um comportamento elastoplástico com as propriedades indicadas na Tabela 4.

Tabela 4 – Propriedades do aço

Especificação aço ASTM A588	
Módulo de Elasticidade (GPa)	200
Coef. Poisson	0,3
Tensão de escoamento (MPa)	350
Deformação de escoamento	0,0018
Tensão de ruptura (MPa)	590
Deformação de ruptura	0,17

A manta de fibra de carbono utilizada na campanha experimental foi do tipo S&P C-Sheet 240 (300g/m²) com espessura de 0,176 mm. A resina epoxídica foi do tipo S&P Resin 55. O material compósito, resultante da impregnação das fibras de carbono com a resina epoxídica, foi caracterizado conforme a ISO 527-1 (2012) e ISO 527-5 (2012). Por se tratar de um material ortotrópico, foram atribuídas diferentes propriedades para cada uma das direções do compósito, conforme apresenta a Tabela 5, neste caso, a direção 2 seria a direção paralela às fibras do CFRP.

Tabela 5 – Propriedades mecânicas do CFRP

Elasticidade					
E1 (GPa)	E2 (GPa)	Nu12	G12 (GPa)	G13 (GPa)	G23 (GPa)
85,46	170,92	0,1	42,73	42,73	42,73

As tensões de ruptura foram consideradas em cada direção (paralela e transversal às fibras) como mostrado na Tabela 6.

Tabela 6 – Tensões de ruptura do CFRP

Tensões de falha				
Paralela às fibras		Transversal às fibras		Cortante (MPa)
Tração (MPa)	Compressão (MPa)	Tração (MPa)	Compressão (MPa)	
3273,9	0,1	3273,9	0,1	0,1

3. RESULTADOS

A seguir são apresentados os resultados do modelo numérico por meio da comparação dos resultados do modelo com os resultados obtidos experimentalmente por Gonzáles et al (2017).

3.1. Estudo da malha

Inicialmente, considerando o modelo de referência sem reforço, foi realizado um estudo de convergência de malhas. Foram feitos 4 modelos nomeados de A a D, variando-se as dimensões da malha e o número de elementos finitos do modelo conforme apresentado na Figura 5 e Tabela 7.

Figura 5 – Modelos de A a D para a análise da malha.

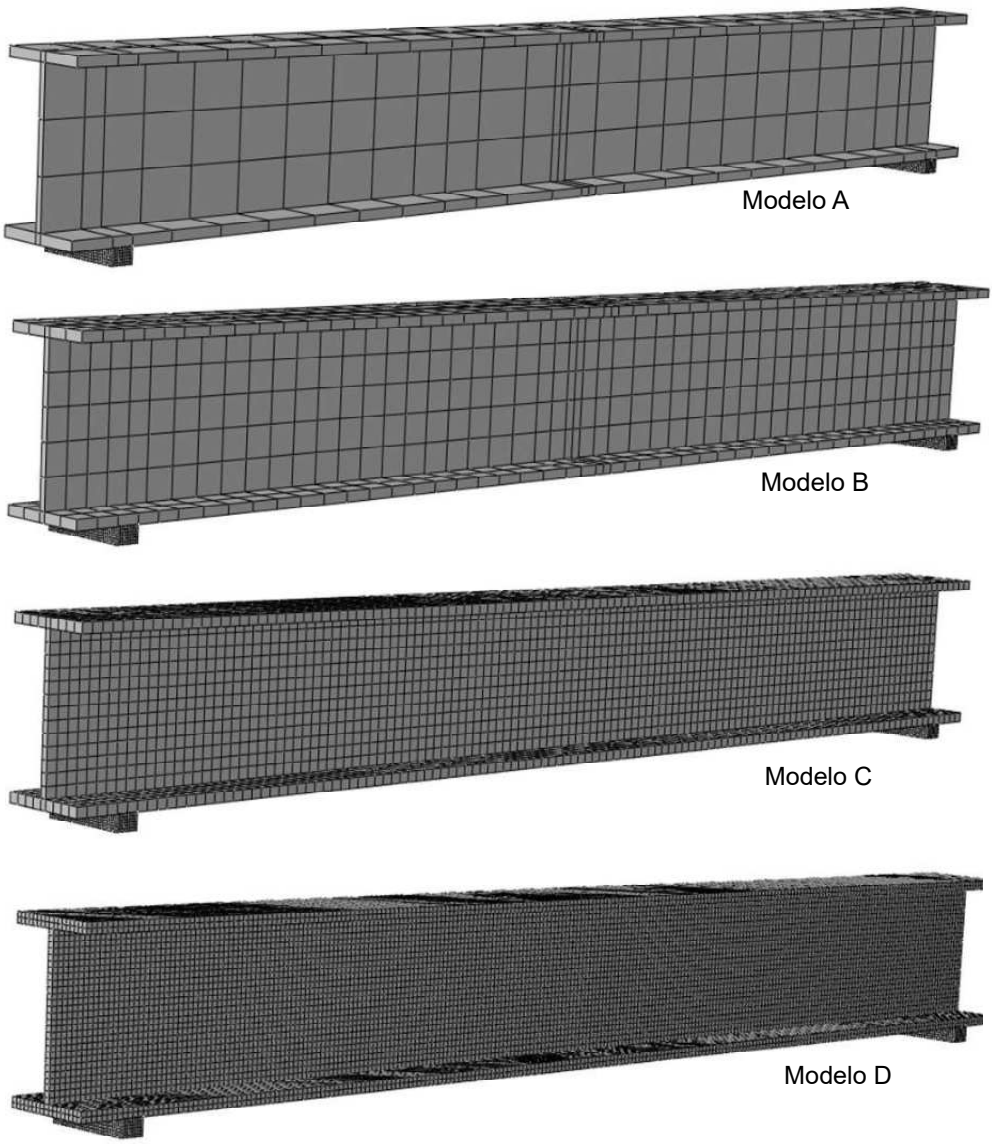
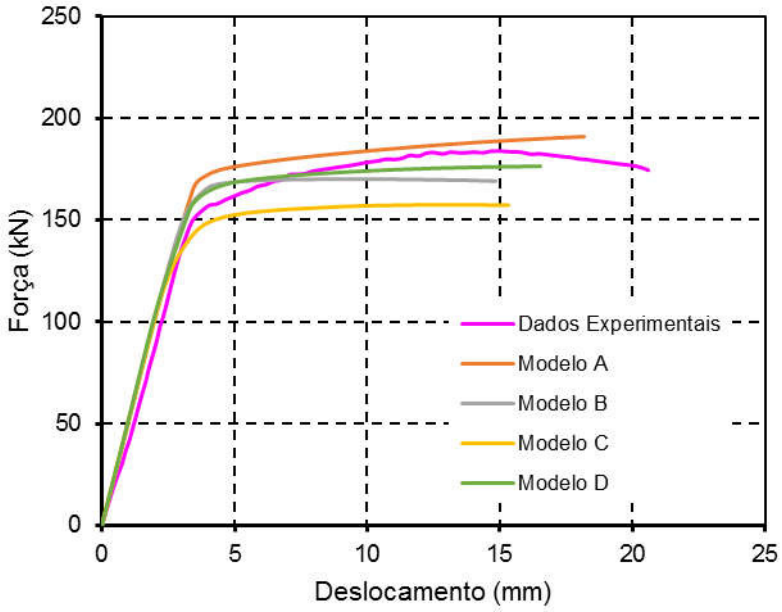


Tabela 7 – Diferentes malhas para o modelo da viga de referência

Modelos	Dimesão global da malha (cm)	Número de Elementos
A	5	252
B	2,5	750
C	1	3720
D	0,5	22800

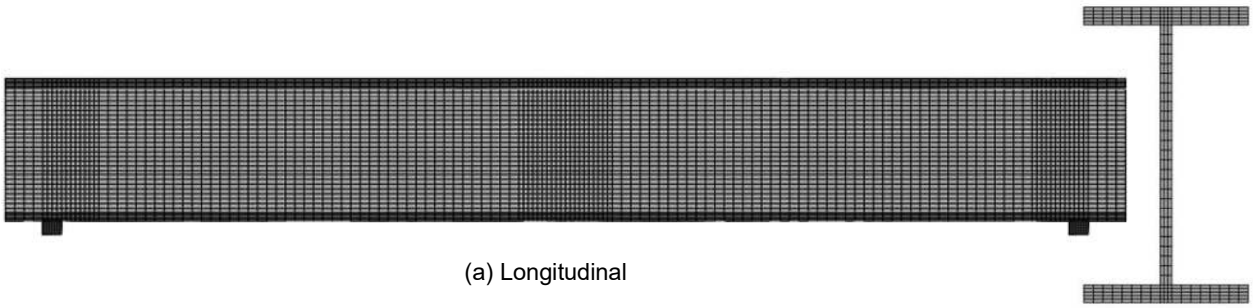
Os resultados da curva força-deslocamento para os diferentes modelos avaliados são apresentados na Figura 6. Observa-se que o modelo D é o que apresenta melhores resultados quando comparado com o resultado experimental.

Figura 6 - Gráfico força-deslocamento para os modelos com diferentes malhas



Entretanto, para melhorar a solução, foi empregada uma malha intermediária (Figura 7) em função do elevado custo computacional, com dimensão de 1 cm e refinamentos locais nos pontos de concentração de tensão (apoios e região de aplicação do carregamento), totalizando 38482 elementos. As áreas de refinamento consistiam em elementos com 0,5 cm de comprimento no sentido do eixo longitudinal, como os adotados na modelo D.

Figura 7 – Vista longitudinal e transversal da malha final adotada

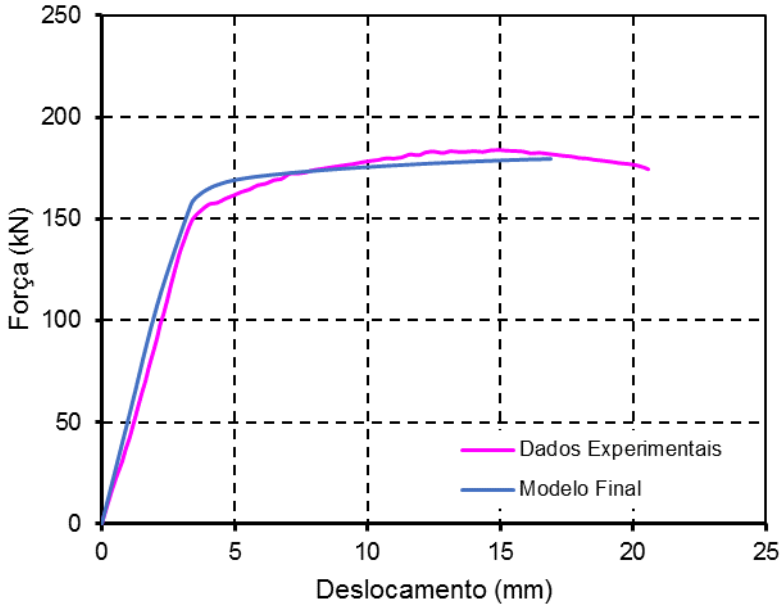


(a) Longitudinal

(b) Transversal

A curva força-deslocamento para o modelo final adotado é comparada com a curva da viga ensaiada na Figura 8.

Figura 8 - Gráfico força-deslocamento para a viga metálica de referência



Observa-se que o modelo final adotado é capaz de descrever o comportamento da viga metálica; tanto a rigidez inicial do modelo quanto o início da plastificação apresentam comportamento semelhante ao do perfil ensaiado. Na Tabela 8 são apresentadas as diferenças obtidas entre o modelo numérico e os resultados experimentais, podendo-se verificar diferença de apenas 2,23% entre as força máximas resistidas pelo modelo numérico e pelo perfil ensaiado.

Tabela 8 – Comparação da força máxima e flecha para o modelo de referência

	Força e deslocamento máximos			
	Fmáx (kN)	Flecha (mm)	Δ,Fmáx (%)	Δ,Flecha (%)
Experimental	184,01	13,83	-	-
Numérico	179,90	17,67	-2,23	27,77

3.2. Viga reforçada com CFRP

Utilizando-se a malha definida anteriormente, é inserido o CFRP na face inferior da viga, dessa forma, a curva força-deslocamento para a viga reforçada é comparada com o seu resultado experimental na Figura 9. Para o modelo numérico reforçado, o critério de parada para o modelo é a ruptura à tração do CFRP ao atingir os critérios definidos na Tabela 6.

A Tabela 9 apresenta os valores de força e deslocamento máximos para o modelo numérico e para a viga ensaiada.

Nota-se que o modelo numérico representa bem o comportamento da viga reforçada; tanto a rigidez inicial do modelo, quanto a força máxima resistida e sua respectiva flecha apresentaram pequenas diferenças (inferiores a 6%) quando comparadas com os resultados experimentais.

Figura 9 - Gráfico força-deslocamento para a viga metálica reforçada com 1 camada de CFRP

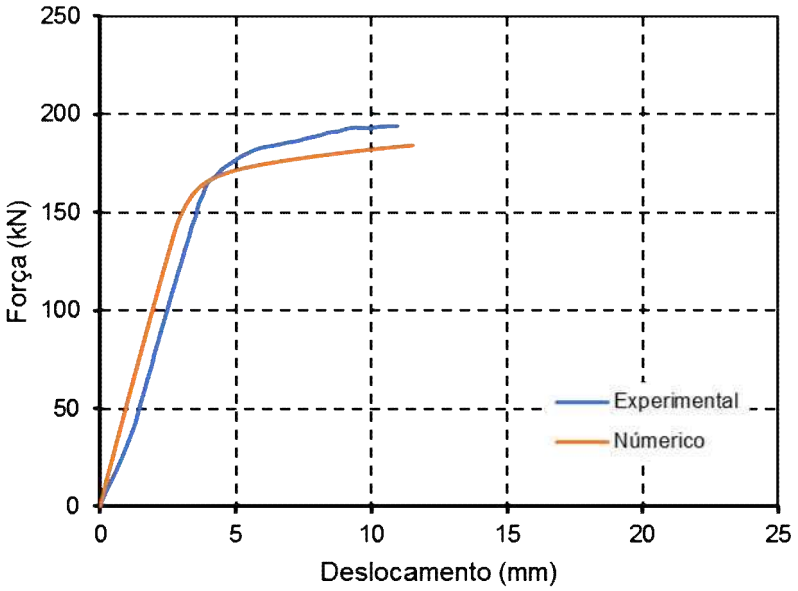


Tabela 9 - Comparação das forças máxima e flecha para o modelo reforçado com CFRP

	Força e deslocamento máximos			
	Fmáx (kN)	Flecha (mm)	Δ,Fmáx (%)	Δ,Flecha (%)
Experimental	194,24	11	-	-
Numérico	184,31	11,52	-5,11	4,72

As Figuras 10 e 11 apresentam as tensões normais longitudinais atuantes na viga reforçada e no CFRP, respectivamente, no instante anterior à ruptura do sistema de reforço.

Figura 10 – Tensões longitudinais atuando na viga (em kN/cm²)

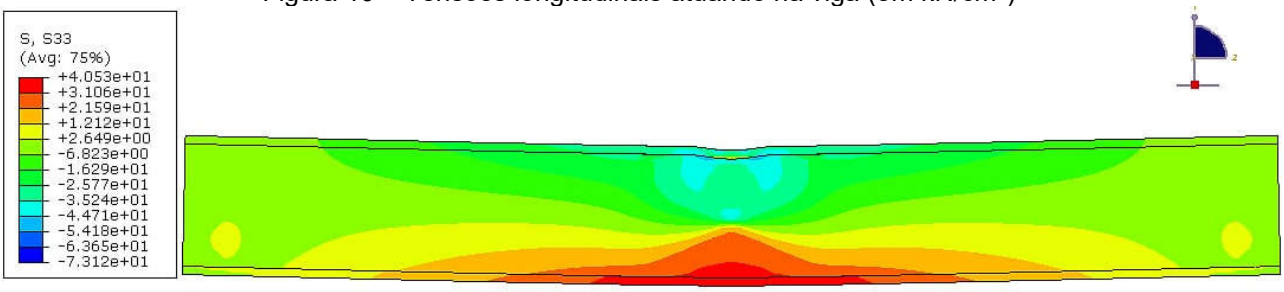
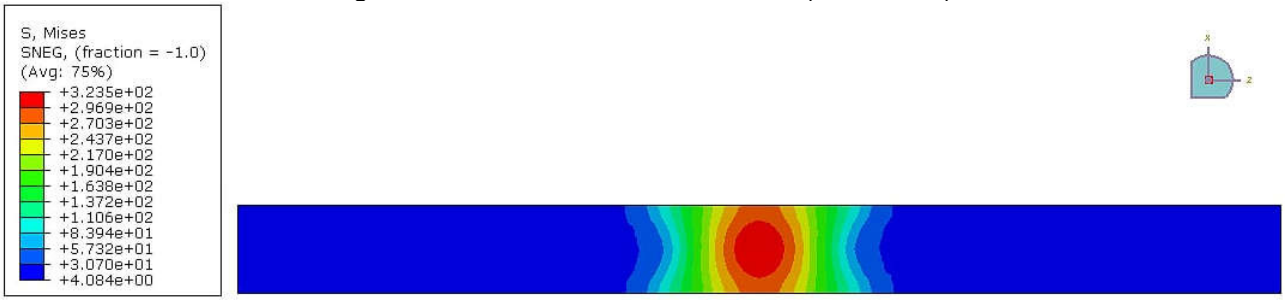


Figura 11 – Tensões atuando no CFRP (em kN/cm²)



4. CONCLUSÕES

O presente trabalho teve por objetivo apresentar uma análise numérica do comportamento de vigas metálicas reforçadas à flexão por CFRP. O modelo numérico desenvolvido apresentou comportamento satisfatório quando comparado com os resultados experimentais de González *et al*. (2017), validando o modelo numérico desenvolvido.

Através dos resultados apresentados por Gonzáles *et al*. (2017) e os obtidos pelos modelos numéricos, fica evidente que o reforço de vigas metálicas com polímeros reforçados com fibras de carbono pela técnica EBR é uma alternativa viável quando se deseja ganho de rigídez e de força última de ruptura.

Com um modelo numérico devidamente validado é possível a extrapolação dos resultados experimentais, possibilitando a avaliação de seções e vãos diferentes, bem como tipos e quantidades diferentes de reforço em compósitos.

5. REFERÊNCIAS

AL-SAIDY, A.H.; KLAIBER, F.W.; WIPF, T.J. Repair of steel composite beams with carbon fiber-reinforced polymer plates. **Journal of Composites for Construction**, 8(2), 163–172, 2004.

CARNEIRO, L.A.V.; TEIXEIRA, A.M.A.J. Propriedades e características dos materiais compósitos poliméricos aplicados na Engenharia de Construção. **Revista Militar e Ciência e Tecnologia**, v. XXV, p. 54–66, 2008.

COLOMBI, P.; POGGI, C. An experimental, analytical and numerical study of the static behavior of steel beams reinforced by pultruded CFRP strips. **Composites Part B: Engineering**, 37(1), 64–73, 2006.

FAM, A.; MACDOUGALL, C.; SHAAT, A. Upgrading steel–concrete composite girders and repair of damaged steel beams using bonded CFRP laminates. **Thin-Walled Structures**, 47(10), 1122–1135, 2009.

GONZÁLEZ, E.; LAMEIRAS, R.M.; DALFRÉ, G.M. **Análise experimental de vigas metálicas reforçadas com mantas aplicadas segundo a técnica EBR**. In: Congresso Latinoamericano de Patologia das Construções (Conpat), Assunción., 2017.

ISO 527-1. Plastics - Determination of tensile properties - Part 1: General principles. **International Organization for Standardization (ISO)**, Genèva, Switzerland, 2012.

ISO 527-5. Plastics - Determination of tensile properties - Part 5: Test conditions for unidirectional fibre-reinforced plastic composites**. International Organization for Standardization (ISO)**, Genèva, Switzerland, 2012.

KARBHARI, V.M. **Rehabilitation of Metallic Civil Infrastructure Using Fiber Reinforced Polymer (FRP) Composites**. UK: Elsevier, 2014.

LANE, I.R.,; WARD, J.A. Restoring Britain's bridge heritage. **Institution of Civil Engineers (South Wales Association) Transport Engineering Group Award**, 2000.

LENWARI, A.; THEPCHATRI, T.; ALBRECHT, P. Debonding strength of steel beams strengthened with CFRP plates. **Journal of Composites for Construction**, 10(1), 69–78, 2006.

LINGHOFF, D.; HAGHANI, R.; AL-EMRANI, M. Carbon-fiber composites for strengthening steel structures. **Thin-Walled Structures**, 47(10), 1048–1058, 2009.

MILLER, T.C.; CHAJES, M.J.; MERTZ, D.R.; HASTINGS, J.N. Strengthening of a steel bridge girder using CFRP plates. **Journal of Bridge Engineering**, 6(6), 514–522, 2001.

NOZAKA, K.; SHIELD, C.K.; HAJJAR, J.F. Effective bond length of carbon-fiber reinforced polymer strips bonded to fatigued steel bridge I-girders. **Journal of Bridge Engineering**, 10(2), 195–205, 2005.

SALLAM, H.E.M.; AHMAD, S.S.E.; BADAWY, A.A.M.; MAMDOUH, W. Evaluation of steel I-beams strengthened by various plating methods. **Advances in Structural Engineering**, 9(4), 535–544, 2006.

SCHNERCH, D.; RIZKALLA, S. Flexural strengthening of steel bridges with high modulus CFRP strips. **Journal of Bridge Engineering**, ASCE, 13(2), 192–201, 2008.

SEN, R.; LIBY, L. **Repair of steel composite bridge sections using CFRP laminates**. Final report Florida and U.S. Department of Transportation. Springfield, VA: National Technical Information Service, 1994.

SHAAT, A.; FAM, A. Repair of cracked steel girders connected to concrete slabs using carbon-fiber-reinforced polymer sheets. **Journal of Composites for Construction**, 12(6), 650–659, 2008.

SUN, E.Q. **Shear locking and hourglassing in MSC Nastran, ABAQUS, and ANSYS**. Msc software users meeting. 2006.

TAVAKKOLIZADEH, M.; SAADATMANESH, H. Strengthening of steel–concrete composite girders using carbon fiber reinforced polymers sheets. **Journal of Structural Engineering**, 129(1), 30–40, 2003.

TENG, J.G.; FERNANDO, D. Flexural strengthening of steel and steel-concrete composite beams with CFRP laminates. In: ZHAO, X. **FRP-Strengthened Metallic Structures**. CRC Press, 291 p., 2014.

ZHAO, X. **FRP-Strengthened Metallic Structures**. CRC Press, 291 p., 2014.