

Simulação numérica de vigas T em concreto armado reforçadas ao cisalhamento com compósito de fibra de carbono (CFRP) utilizando o modelo *Concrete Damaged Plasticity (CDP)*.

**Raquel Dantas Batista¹, José Neres da Silva Filho², Leandro M. Trautwein³,
Leonardo H. B. de Oliveira⁴**

^{1,2} Universidade Federal do Rio Grande do Norte /Departamento de Engenharia Civil /
raquel_dbatista@hotmail.com; jneres@ect.ufrn.br

^{3,4} Universidade Estadual de Campinas / FEC - UNICAMP /
leandromt@gmail.com; leonardo.oliveira@ufersa.edu.br

Resumo

O uso de compósito de fibra de carbono denominado CFRP (*Carbon Fiber Reinforced Polymer*), tem sido uma boa alternativa aos procedimentos convencionais de reforço e/ou recuperação estrutural tendo como principais vantagens sua elevada resistência e a facilidade de execução. Neste sentido, este artigo apresenta um estudo analítico e numérico, utilizando Método dos Elementos Finitos (MEF) por meio do software ABAQUS, de vigas T em concreto armado reforçadas ao cisalhamento com o CFRP com intuito de avaliar a capacidade de carga dos elementos reforçados. Para tanto, foram analisadas quatro vigas sendo três delas reforçadas com CFRP. Os valores analíticos foram obtidos pelas normas ACI 440-2R (2011) e CEB-FIP *fib Bulletin* 14 (2001). Já os valores numéricos foram obtidos utilizando o *software* ABAQUS considerando a não linearidade física do material através do modelo do *Concrete Damaged Plasticity (CDP)*. Por fim, os resultados analíticos e numéricos foram comparados com os experimentos de Silva Filho (2001) com intuito de validar para os casos estudados os resultados normativos e a modelagem numérica utilizada na pesquisa.

Palavras-chave

Reforço; CFRP; *Concrete Damaged Plasticity (CDP)*.

Introdução

As estruturas de concreto armado se deterioram com o tempo apresentando patologias, necessitando assim de recuperação estrutural. Além disto, existem situações de posterior aumento de carga devido a mudanças de uso da edificação, nestes casos é preciso reforço estrutural. Para estes processos de reforço e/ou recuperação os sistemas compostos com fibras vêm sendo utilizados na engenharia civil para melhorar o desempenho de elementos aumentando a ductilidade e combatendo esforços.

Desta forma, serão analisadas analiticamente quatro vigas de concreto armado sendo três reforçadas ao cisalhamento com faixas unidirecionais de CFRP e uma de referência, sem reforço. O estudo numérico será feito com uma viga reforçada.

CFRP – *Carbon Fiber Reinforced Polymer*

O CFRP (*Carbon Fiber Reinforced Polymer*) assim como outros materiais compósitos, é formado pela associação de duas fases: as fibras com a função estrutural, e a matriz polimérica na qual as fibras se inserem, cuja função é proteger as fibras e transmitir esforços entre reforço e substrato.

Ao comparar os materiais comumente utilizados no reforço de estrutura, como por exemplo, os compostos reforçados com fibra e vidro (GFRP – *Glass Fiber Reinforced Polymer*), aramida (AFRP – *Aramid Fiber Reinforced Polymer*) e o aço utilizado na construção civil, nota-se o melhor desempenho do CFRP, suportando maiores tensões com menores deformações, como pode ser observado na Figura 1.

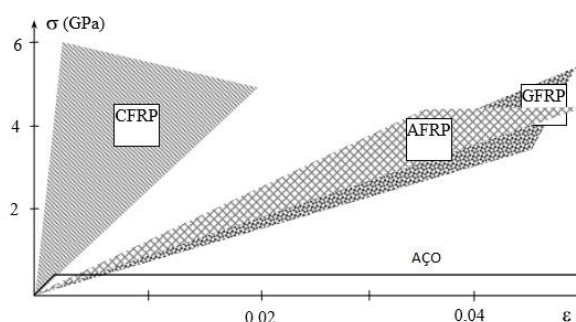


Figura 1 - Diagrama comparativo de Tensão x Deformação de compostos FRP e Aço. (Adaptado de CEB *fib-Bulletin* 14, 2001)

Dentre as principais características dos sistemas compostos FRP segundo CEB *fib-Bulletin* 14 (2001), tem-se: resistência a corrosão, leveza, fácil aplicação, elevada resistência, elevada rigidez, elevada capacidade de deformação, disponibilidade de diversas geometrias e dimensões. Machado A. e Machado B. (2015) complementam com as seguintes características: heterogêneos, anisotrópicos, comportamento elástico-linear até a ruptura.

Reforço ao cisalhamento com CFRP

Dois aspectos principais devem ser estudados: **(a)** a configuração de envolvimento do adesivo e **(b)** a direção das fibras. No primeiro, o envolvimento pode ser total ou parcial, sendo comuns os seguintes formatos: envolvimento da mesa e alma por meio de furos na mesa, em forma de U envolvendo toda a alma, e somente nas laterais da alma. Quanto ao segundo aspecto, diversas configurações podem ser utilizadas, desde fibras paralelas a seção transversal até inclinadas em diversos ângulos com o intuito de interceptar fissuras (Figura 2).

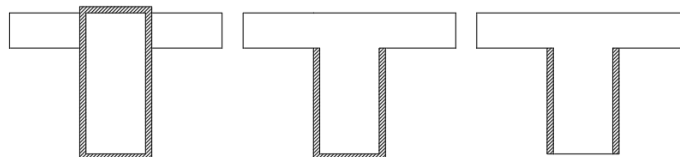


Figura 2 - Configurações de reforço ao cisalhamento: envolvimento de alma e mesa, formato U e somente laterais da alma. (BATISTA, 2017).

Prescrições normativas para cisalhamento

Serão abordadas as prescrições normativas da ABNT NBR 6118 (2014) e ACI 318 (2011). Na norma nacional, o cálculo é dividido em dois modelos: Modelo de cálculo I e Modelo de Cálculo II que diferem entre si pela consideração de ângulo de inclinação das bielas (θ) constante em 45° pelo modelo I e variável entre 30° e 45° pelo modelo II e pela parcela de contribuição do concreto (V_c) admitida constante no primeiro método e variável no segundo. Os Quadros 1 e 2 ilustram os comentários supracitados.

Quadro 1 - Prescrições normativas para cisalhamento NBR 6118 (2014).

ABNT NBR 6118 (2014)	Modelo de Cálculo I	Modelo de Cálculo II
Condição de segurança	$V_{Sd} \leq V_{Rd2}$	
	$V_{Sd} \leq V_{Rd3} = V_C + V_{SW}$	
Verificação de biela comprimida	$V_{Rd2} = 0,27 \cdot \alpha_{V2} \cdot f_{cd} \cdot b_w \cdot d$	$V_{Rd2} = 0,54 \cdot \alpha_{V2} \cdot f_{cd} \cdot b_w \cdot d \cdot \sin^2 \theta \cdot (\cotg \alpha + \cotg \theta)$
Armadura transversal	$V_{SW} = A_{SW} / s \cdot 0,9 \cdot d \cdot f_{ywd} \cdot (\sin \alpha + \cos \alpha)$	$V_{SW} = A_{SW} / s \cdot 0,9 \cdot d \cdot f_{ywd} \cdot (\cotg \alpha + \cotg \theta) \cdot \sin \alpha$

Onde:

V_{Sd} : força cortante solicitante de cálculo;

V_{Rd2} : força cortante resistente de cálculo, relativa à ruína das diagonais comprimidas de concreto;

V_{Rd3} : força cortante resistente de cálculo, relativa à ruína por tração diagonal;

V_C : parcela de força cortante absorvida por mecanismos de resistência complementares;

V_{SW} : parcela de força cortante absorvida pela armadura transversal.

Quadro 2 - Prescrições normativas para cisalhamento ACI 318 (2011).

Condição de segurança	$\Phi V_n \geq V_u$
	$V_n = V_C + V_S$
Armadura transversal	$V_S = (A_{sw} \cdot f_{yt} \cdot d) / s$

Onde:

V_u : esforço cortante de cálculo;

V_n : esforço cortante resistente;

Φ : fator redutor da capacidade resistente.

V_C : parcela de esforço cortante resistida pelo concreto;

V_S : parcela de esforço cortante resistida pela armadura transversal.

Prescrições normativas para reforço ao cisalhamento com CFRP

No referente ao reforço estrutural com CFRP não existe normatização nacional. Portanto, é necessário recorrer a normas internacionais como o ACI 440-2R (2017) e o CEB *fib-Bulletin 14* (2001).

Para o ACI 440-2R (2017) tem-se:

$$\Phi V_n \geq V_u \quad (1)$$

$$\Phi V_n = \Phi \cdot (V_C + V_S + \psi_f V_f) \quad (2)$$

$$V_f = \frac{A_{fv} \cdot f_{fe} \cdot (\sin\alpha + \cos\alpha) \cdot d_{fv}}{s_f} \quad (3)$$

Onde:

V_C : parcela de cortante resistida pelo concreto, dado pelo ACI 318 (2011);

V_S : parcela de cortante resistida pela armadura transversal, dado pelo ACI 318 (2011);

V_f : parcela de cortante resistida pelo compósito;

ψ_f : fator de redução de acordo com o envolvimento do compósito.

$$\psi_f = \begin{cases} 0,95 & \text{para completamente envolvido;} \\ 0,85 & \text{para parcialmente envolvido;} \end{cases}$$

A_{fv} : área da seção transversal da fibra;

f_{fe} : tensão na fibra;

α : ângulo de inclinação das fibras;

O CEB *fib-Bulletin 14* (2001) determina a capacidade resistente por:

$$V_{Rd} = \min(V_{cd} + V_{wd} + V_{fd}, V_{Rd2}) \quad (4)$$

$$V_{fd} = 0,9 \cdot \varepsilon_{fd,e} \cdot E_{fu} \cdot \rho_f \cdot b_w \cdot d \cdot (\cot\theta + \cot\alpha) \cdot \sin\alpha \quad (5)$$

$$\rho_f = \left(\frac{2t_f}{b_w}\right) \cdot \left(\frac{b_f}{s_f}\right); \text{ para reforço em tiras externas} \quad (6)$$

Onde:

V_{Rd} : resistência ao cisalhamento;

V_{cd} : parcela resistente de esforço cortante proveniente do concreto;

V_{wd} : parcela resistente de esforço cortante proveniente da armadura;

V_{fd} : parcela resistência de esforço cortante proveniente da fibra;

V_{Rd2} : componente de ruína por esmagamento de biela;

$\varepsilon_{fd,e}$: deformação de projeto da fibra;

ρ_f : taxa de compósito;

E_{fu} : módulo de elasticidade;

α : inclinação entre a direção das fibras e o eixo longitudinal do elemento.

t_f : espessura da fibra;

b_f : largura da seção;

s_f : espaçamento das fibras.

Concrete Damaged Plasticity (CDP)

O concreto armado, quando submetido a carregamentos, apresenta comportamento não linear, ou seja, não obedece a Lei de Hooke na qual a proporção entre tensão e deformação é linear. O aparecimento de fissuras ocasiona redução de rigidez e é desta forma que se manifesta a não linearidade física, com a perda de rigidez causada pelo dano. As formulações para consideração desta variação de rigidez são complexas. Neste trabalho foi utilizado o modelo *Concrete Damaged Plasticity* (CDP) disponível no software ABAQUS.

O *Concrete Damaged Plasticity* (CDP) foi um modelo idealizado por Lubliner *et al.* (1989) e posteriormente modificado por Lee e Fenves (1998) baseado na plasticidade e na mecânica do dano para computar a perda de rigidez do material. No CDP, o dano é

computado por variáveis escalares denominadas *Damaged Parameter*, sendo o parâmetro dc para compressão e dt para tração.

Além das curvas tensão versus deformação, existem parâmetros de plasticidade requeridos no modelo, sendo estes: ângulo de dilatação (ψ), excentricidade (m), relação entre a resistência à compressão do concreto biaxial e uniaxial (f_{b0}/f_{c0}), fator de forma (K) e viscosidade (ν).

Modelagem numérica

Os parâmetros necessários na simulação numérica neste trabalho destacados são: os elementos finitos, a geometria do modelo e os contatos. A viga de concreto foi modelada como *Solid* e elemento C3D8; as barras de aço foram idealizadas como *Wire-Truss* e elemento T3D2; o CFRP foi admitido como *Shell-Membrane* e elemento finito M3D4. Todos os elementos finitos utilizados estão disponíveis na biblioteca ABAQUS. A geometria dos modelos permitiu a modelagem de metade de viga devido a presença de simetria aplicando-se as devidas condições de contorno, o que possibilitou economia computacional e redução do tempo na simulação (Figura 3).

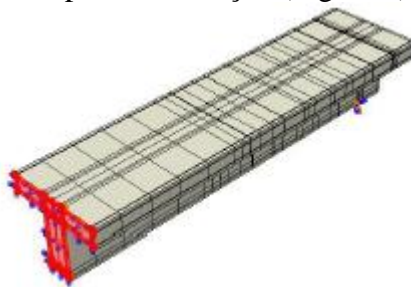


Figura 3 - Modelo simétrico da viga. (BATISTA, 2017).

As interações entre as partes constituintes da viga foram definidas da seguinte forma: para o contato entre as barras e o concreto, utilizou-se o tipo *Embedded Region* que admite que uma região envolva um componente; para a interação entre CFRP e concreto, o contato tipo *Tie* foi admitido, neste o usuário define uma superfície escrava que possui mesmos deslocamentos nodais de uma superfície mestre (Figura 4).

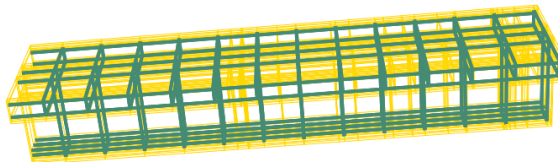


Figura 4 - Armadura envolvida pelo concreto. (BATISTA, 2017).

Modelos propostos

Os modelos analisados neste trabalho são baseados nos ensaios de Silva Filho (2001), que submeteu a carregamentos de zero até a ruptura, em vigas reforçadas com faixas de CFRP (Figuras 5 e 6). Para tanto, serão estudadas quatro vigas, sendo três reforçadas ao cisalhamento, duas com envolvimento total (V2 e V3) e uma parcial (V7), além da viga de referência sem reforço (V1 ou VREF). As características gerais das vigas em análise estão apresentadas no Quadro 3.

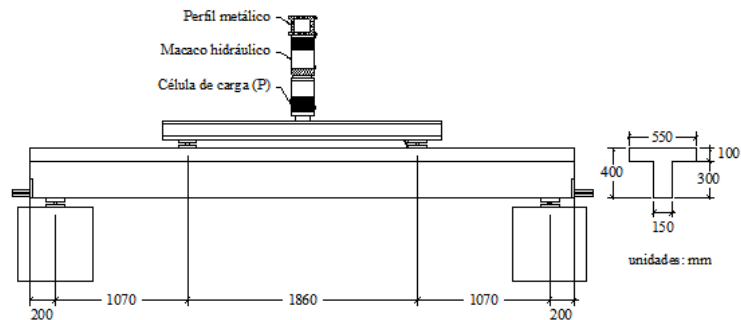


Figura 5 - Esquema de carregamento das vigas. (SILVA FILHO, 2001)

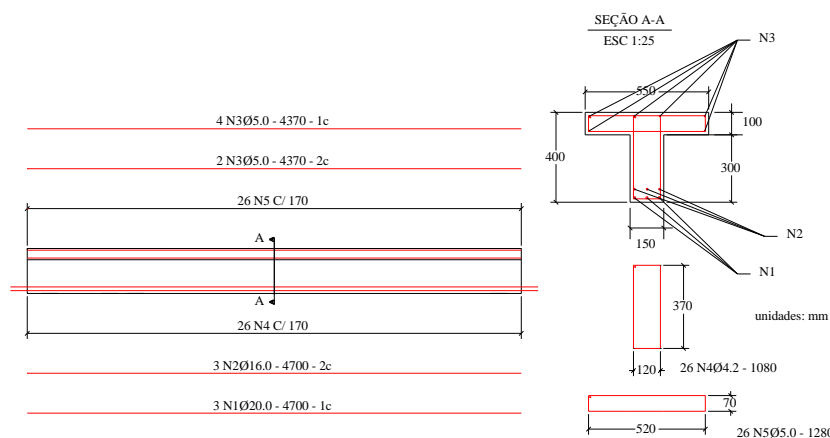


Figura 6 - Detalhamento das armaduras. (SILVA FILHO, 2001).

Quadro 3 - Características gerais das vigas estudadas. (BATISTA, 2017).

Viga	Tipo de ancoragem	Tipo de reforço ao cisalhamento (cada lado da viga)
VIREF	-	Sem reforço.
V2	Envolvimento	Cinco faixas verticais com uma camada de fibra de carbono por faixa.
V3	Envolvimento	Cinco faixas verticais com duas camadas de fibra de carbono por faixa.
V7	Ancoragem na alma com barras de aço	Cinco faixas verticais com uma camada de fibra de carbono por faixa.

Modelos Constitutivos

O modelo constitutivo admitido para o aço foi de material elasto-plástico perfeito com tensão de escoamento (f_y) de 500 MPa e deformação ϵ_y de 2,0%. A massa específica utilizada foi $8,00477 \times 10^{-6}$ kg/mm³; $E = 210000$ N/mm² e coeficiente de Poisson igual a 0,3. O concreto utilizado por Silva Filho (2001) foi C30, a massa específica utilizada na simulação computacional foi $2,549 \times 10^{-6}$ kg/mm³; $E = 26838,406$ N/mm² e coeficiente de Poisson de 0,2.

O comportamento do concreto à compressão foi simulado baseado em três modelos constitutivos: NBR 6118 (2014); *Model Code 2010* (CEB *fib-Bulletin* 65, 2012) e

Petrauski (2016), ilustrados na Figura 7. Todos os modelos assumem comportamento inicial linear seguido do comportamento não linear.

Os parâmetros de plasticidade do CDP adotados foram: ângulo de dilatação igual a 36° ; excentricidade 0,1; f_{b0}/f_{c0} com valor de 1,16; K igual a 0,667 e viscosidade zero.

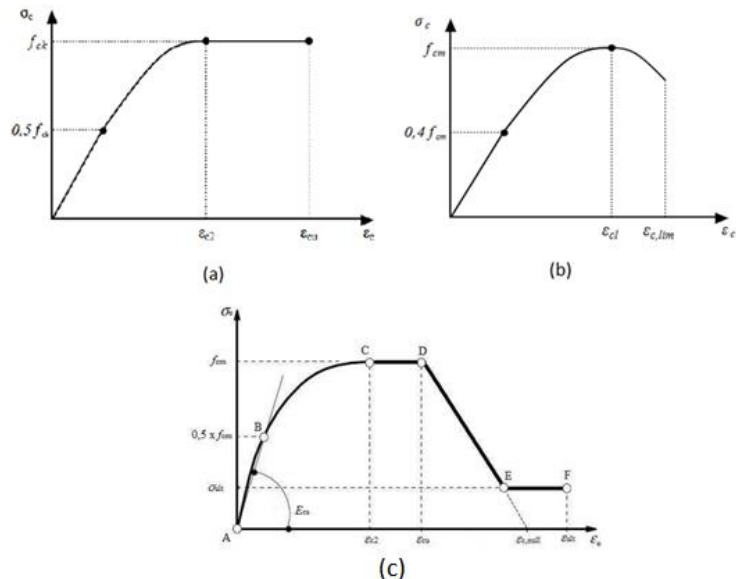


Figura 7 - Curva teórica Tensão x Deformação do concreto comprimido pelo modelo (a) NBR 6118(2014); (b) Model Code 2010 fib-Bulletin 65 (2012), Petrauski (2016). (BATISTA, 2017).

O comportamento à tração foi baseado na equação de Hordijk (1991) que admite um comportamento curvo relacionando tensão com a abertura de fissuras.

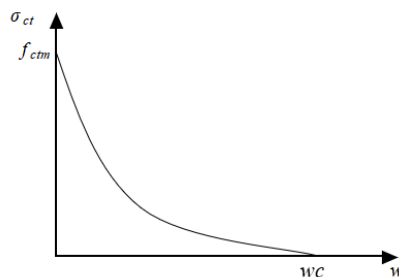


Figura 8 - Comportamento à tração do concreto idealizado por Hordijk (1991). (BATISTA, 2017).

Resultados e conclusões

Para viga de referência, os cálculos de dimensionamento ao cisalhamento foram realizados segundo a NBR 6118 (2014) pelo Modelo de cálculo I e Modelo de cálculo II, com inclinação das bielas (θ) de 45° , e pelo ACI 318 (2011). Desta forma, para a carga de ruptura experimental obtida por Silva Filho (2001) de 360 kN para a viga sem reforço, foram comparados valores na Tabela 1 de parcelas resistidas pelo concreto e estribo e armadura necessária.

Tabela 1 - Comparação de contribuição do concreto e armadura. (BATISTA, 2017).

Norma	V_{CONCRETO} (KN)	V_{ESTRIBO} (KN)	A_{sw} (cm ² /m)
NBR 6118 (2014) Modelo I	46,30	137,00	9,86
NBR 6118 (2014) Modelo II	18,10	165,20	11,89
ACI 318 (2011)	49,61	194,79	10,97

Analisando os resultados da Tabela 1 observa-se a discrepância entre valores de resistência devido ao concreto entre os Modelos de Cálculo I da NBR 6118 (2014) e ACI 318 (2011) nos quais o valor desta parcela é fixo, quando comparados ao Modelo de Cálculo II da NBR 6118 (2014), onde o valor de V_c é variável sofrendo redução com o aumento da parcela resistida pelos estribos. Quanto aos valores de parcelas resistida pela armadura e a armadura necessária não há muita diferença.

A Tabela 2 refere-se à capacidade de carga estimada (P_{est}) para a armadura adotada por Silva Filho (2001) de 4,02 cm²/m, e a carga de ruptura obtida experimentalmente (P_{exp}).

Tabela 2 - Estimativas de carga de ruptura para VREF. (BATISTA, 2017)

Norma	Carga última estimada (KN)	P_{exp}/P_{est}
NBR 6118 (2014) Modelo I	211,31	1,70
NBR 6118 (2014) Modelo II	185,24	1,94
ACI 318 (2011)	304,80	1,18

A partir destes valores, conclui-se que todos os resultados teóricos obtidos pelas normas supracitadas estão a favor da segurança não atingindo a carga de ruptura experimental de 360 kN, evitando assim a ruptura frágil do elemento. Os resultados não foram próximos à carga de ruptura, provavelmente devido à dificuldade de mensuração dos mecanismos complementares de resistência ao cisalhamento, dentre eles o engrenamento dos agregados e efeito pino.

Os resultados analíticos das vigas reforçadas estão descritos na Tabela 3 e na Figura 9, na qual são comparadas cargas estimadas pelas normas ACI 440-2R (2017) e CEB *fib-Bulletin* (2001) e as cargas de ruptura experimentais de Silva Filho (2001).

Tabela 3 - Comparação de cargas de ruptura estimadas pelo ACI 440-2R (2017) e CEB *fib-Bulletin* 14 (2001) das vigas reforçadas. (Adaptado por BATISTA, 2017).

Viga	Carga última experimental (KN)	Carga última estimada ACI440-2R (2017) (KN)	P_{exp}/P_{ACI}	Carga última estimada CEB <i>fib-Bulletin</i> 14 (2001) (KN)	P_{exp}/P_{CEB}
V2	590,00	461,82	1,28	466,29	1,27
V3	570,00	665,95	0,86	594,10	0,96
V7	480,00	418,39	1,15	445,16	1,08

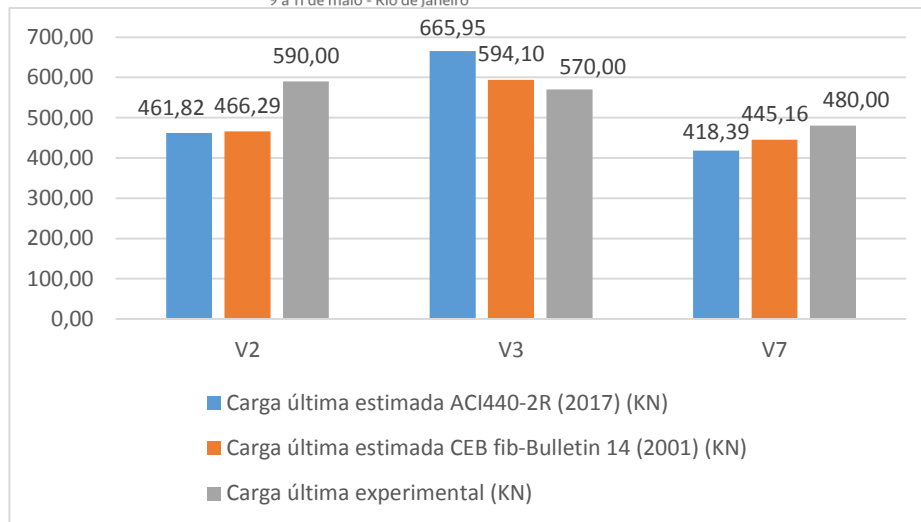


Figura 9 - Gráfico comparativo de cargas de ruptura. (Adaptado BATISTA, 2017)

Ao analisar os resultados, destacam-se os valores obtidos para a V3, visto que esta viga possuía mais camadas de CFRP e menor espaçamento entre as faixas. Sendo assim, V3 deveria apresentar a maior carga de ruptura conforme foi estimado analiticamente. Entretanto, os experimentais de Silva Filho (2001) atingiram resultados inesperados. A V3 atingiu menor valor de carga última do que estimada, ou seja, contrário a segurança em 15% para o ACI 440-2R (2017) e 4% para o CEB *fib-Bulletin* 14 (2001). Esse fato de diferenças entre os valores obtidos nas normas e no experimento pode ser explicado pela alta complexidade na análise dos mecanismos de descolamento entre substrato de concreto. Aqui vale ressaltar que o descolamento do sistema de reforço pode acontecer de três formas: **(a)** descolamento no adesivo, **(b)** descolamento no concreto e **(c)** descolamento entre o concreto e o adesivo. A grande dificuldade é quantificar cada uma dessas parcelas, prever quem acontecerá primeiro e como pode ser melhorada a aderência concreto-PRFC. Recentemente vários pesquisadores têm se debruçado sobre esse tema utilizando Modelos Numéricos de Danos e Mecânica da Fratura para prever a carga de ruptura dos elementos reforçados, mas ainda há muito que se estudar.

Para as vigas V2 e V7 os resultados foram a favor da segurança onde pôde ser destacada a eficiência da ancoragem por envolvimento total do CFRP, uma vez que a V2 atingiu carga de ruptura superior à viga V7. Contudo, ao observar os resultados analíticos fornecido pelas normas ACI 440-2R (2017) e CEB *fib-Bulletin* 14 (2001), percebeu-se que esta eficiência não foi bem representada visto que, as cargas estimadas para a viga V2 tiveram valores próximos às cargas de V7 com diferença em média menor do que 7%. Vale salientar que era de se esperar uma diferença maior nos resultados analíticos normatizados visto que, o envolvimento por completo da fibra de carbono na peça de concreto melhora a eficiência do sistema, conforme pôde ser comprovado experimentalmente em que a diferença das cargas de ruptura em V2 e V7 foi superior a 18%. Os resultados estão resumidos na Figura 9.

A viga V7 com envolvimento em U foi estudada numericamente por meio do Método dos Elementos Finitos (MEF) no software ABAQUS. A Figura 11 apresenta o diagrama carga versus deslocamento no meio livre e a Com base nestes resultados, conclui-se que os modelos constitutivos analisados pelo *Concrete Damaged Plasticity*

(CDP) obtiveram resultados de deslocamentos verticais no meio do vão similares ao experimental, sendo, portanto, adequados a esse tipo de análise conforme se observa na Tabela 4.

Tabela 4 traz uma comparação entre os resultados numéricos e experimentais. As análises dos resultados foram feitas de duas formas: **(a)** sem consideração de não linearidade física do material, e **(b)** com a consideração desta não linearidade baseado nos modelos constitutivos da NBR 6118 (2014), Model Code 2010 *fib-Bulletin 65* (2012) e Petruski (2016).

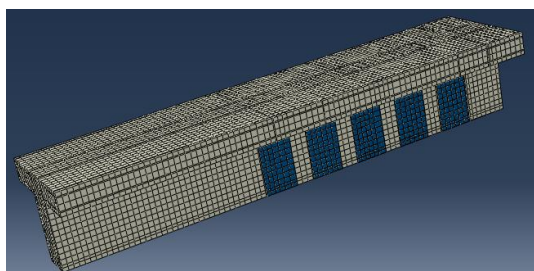


Figura 10 - Modelagem V7. (BATISTA, 2017).

Com base nestes resultados, conclui-se que os modelos constitutivos analisados pelo *Concrete Damaged Plasticity* (CDP) obtiveram resultados de deslocamentos verticais no meio do vão similares ao experimental, sendo, portanto, adequados a esse tipo de análise conforme se observa na Tabela 4.

Tabela 4 - Comparação entre os resultados numéricos e experimentais para V7. (BATISTA, 2017).

Modelo	Flecha máxima (mm)	Flecha Experimental (mm)	Diferença (mm)	Diferença (%)
Linear	10,18	23,75	13,57	57,14%
Petruski (2016)	25,50	23,75	-1,75	7,38%
NBR 6118 (2014)	26,42	23,75	-2,67	11,26%
Model Code (2010)	27,26	23,75	-3,51	14,78%

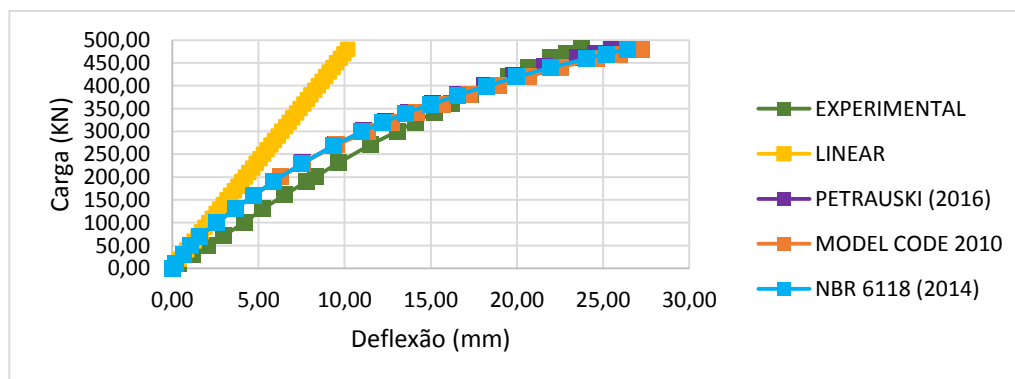


Figura 11 - Deslocamento no meio do vão para a viga V7 (BATISTA, 2017)

As curvas numéricas apresentadas na Figura 11 possuem formato similar à curva experimental, sendo mais rígidas inicialmente e mais flexíveis em maiores carregamentos. Até a proximidade de 100 kN os resultados não lineares numéricos são iguais ao numérico linear devido a consideração dos modelos constitutivos de linearidade a baixos carregamentos. Em torno de 400 kN as curvas simuladas computacionalmente interceptam a curva experimental e a partir desta carga tornam-se mais flexíveis. A curva de Petrauski (2016) mostrou-se a mais rígida ao passo que a do Model Code 2010 *fib-Bulletin 65 (2012)* foi a curva mais flexível.

Referências

- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (ACI). Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318M-2011) and Commentary. Detroit, 2011.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (ACI). Building Code Requirements for Structural Concrete. ACI 440-2R: Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures. Detroit, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. 3 ed. Rio de Janeiro, 2014.
- BATISTA, Raquel Dantas. Simulação numérica de vigas T em concreto armado reforçadas ao cisalhamento com compósito de fibra de carbono (CFRP) utilizando o modelo *Concrete Damaged Plasticity (CDP)*. Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, Brasil, 2017.
- CEB – FIB. Externally Bonded FRP Reinforcement for RC Structures. Bulletin 14. Technical Report. Julho, 2001.
- CEB – FIB. Model Code 2010: Final draft. Bulletin 65. Technical Report. 2012.
- HORDIJK, D. A. Local Approach to Fatigue of Concrete. Doctor Dissertation, Delft University of Technology, Netherlands, 1991.
- LEE, Jeeho. FENVES, Gregory L. Plastic-damaged model for cyclic loading of concrete structures. *Journal of Engineering Mechanics*. 1998.
- LUBLINER, J. OLIVER, J. OLLER, S. OÑATE, E. A plastic-damaged model for concrete. *International Journal of Solids and Structures*. Great Britain, v. 25, n. 3, p. 299-326, 1989.
- MACHADO, Ari de Paula; MACHADO, Bruno Alberto. Reforço de estruturas de concreto armado com sistemas compostos FRP: Teoria & Prática. São Paulo: Pini, 2015. 517 p.
- PETRAUSKI. Mateus Couri. Simulação numérica do comportamento de vigas mistas de aço e concreto com conectores Crestbond. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Brasil, 2016.
- SILVA FILHO, José Neres. Vigas “T” em concreto armado Reforçadas ao Cisalhamento com Compósito de Fibra de Carbono. Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, 2001.