

Analyses of reinforced concrete beams strengthened with CFRP under bending: theoretical and computational approaches

Análise de vigas de concreto armado reforçadas à flexão com fibras de carbono: abordagem teórica e computacional



A. S. C. SILVA^a

aloisiothefano@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0001-6035-6373>

A. A. BANDEIRA^a

alexbandeira@ufba.com

<https://orcid.org/0000-0001-7170-8557>

Abstract

The basic aim of this work is to compile the theoretical basis of ACI 440.2R: 2008 [1] with the NBR 6118: 2014 [2] in order to take into account the concepts of the Brazilian standard in flexural sizing of reinforced beams with CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer). The contribution of the Brazilian standard is given particularly with regard to the application of its safety coefficients and material properties (steel and concrete), including its deformation limits. For this purpose, a beam is adopted as a reference for the study, where two reinforcement designs are performed with CFRP, one from the compiled formulations and another considering only the requirements of ACI 440.2R: 2008 [1]. The results obtained are compared below. Finally, through the ANSYS software, numerical modeling of the reference beam is carried out, where tensions and deformations presented by concrete, steel and carbon fiber are observed. The results of the numerical analysis are compared with those obtained from the formulations compiled in order to validate the numerical model adopted in this study. The research concludes that in flexural sizing the areas of PRFC dimensioned from the formulations of ACI 440.2R: 2008 [1] resulted in values very close to those obtained by the formulations compiled. In addition, it was concluded that the numerical modeling performed in this work represented well the behavior of the structure, because the rupture loads were approximately equal to those expected by the analytical formulations.

Keywords: reinforcement, carbon fiber, CFRP, flexure, shear.

Resumo

Este trabalho tem como objetivo compilar o embasamento teórico do ACI 440.2R:2008 [1] com o da NBR 6118:2014 [2] a fim de levar em consideração os conceitos da norma brasileira no dimensionamento à flexão de vigas reforçadas com PRFC (Polímeros Reforçados com Fibra de Carbono). A contribuição da norma brasileira é dada particularmente no que diz respeito à aplicação dos seus coeficientes de segurança e das propriedades dos materiais (aço e concreto), incluindo os seus limites de deformação. Para tanto, é adotada uma viga como referência para o estudo, onde são realizados dois dimensionamentos do reforço com PRFC, um a partir das formulações compiladas e outro considerando apenas as prescrições do ACI 440.2R:2008 [1]. Os resultados obtidos são comparados em seguida. Por fim, através do software ANSYS, é feita a modelagem numérica da viga de referência, onde são observadas as tensões e deformações apresentadas pelo concreto, pelo aço e pela fibra de carbono. Os resultados da análise numérica são comparados com aqueles obtidos a partir das formulações compiladas a fim de validar o modelo numérico adotado nesse estudo. A pesquisa teve como conclusão que, no dimensionamento à flexão, as áreas de PRFC dimensionadas a partir das formulações da ACI 440.2R:2008 [1] resultaram em valores muito próximos àqueles obtidos pelas formulações compiladas. Além disso, concluiu-se que a modelagem numérica realizada nesse trabalho representou bem o comportamento da estrutura, pois as cargas de ruptura foram aproximadamente iguais àquelas esperadas pelas formulações analíticas.

Palavras-chave: Reforço, fibra de carbono, PRFC, flexão, cisalhamento.

^a Federal University of Bahia, Polytechnic School, Department of Construction and Structures, Salvador, BA, Brazil.

1. Introdução

Naturalmente, os métodos mais utilizados para o reforço de elementos estruturais são aqueles mais economicamente viáveis. Em contrapartida, a maioria dos métodos não atende às limitações como a manutenção das dimensões do elemento ou a velocidade de execução durante o processo de reforço.

Diversos estudos estão sendo desenvolvidos buscando o aperfeiçoamento das técnicas de reforço através da utilização de novos materiais, os quais permitam a execução de um reforço rápido, limpo e que não interfira significativamente nas dimensões do elemento, reduzindo, portanto, a interferência na arquitetura da edificação.

Há uma década, o alto custo inicial de produção dos materiais poliméricos e a falta de suficientes pesquisas ou informações técnicas, limitavam a frequência do uso destes compósitos na construção civil. Com o constante decréscimo no preço das matérias primas e da manufatura desses materiais, eles têm se tornado cada vez mais competitivos. É importante, no entanto, que exista uma norma brasileira que defina as prescrições necessárias para o dimensionamento do reforço de elementos de concreto armado utilizando estes materiais. Este trabalho visa contribuir com o avanço dessas informações, através da realização de um estudo sobre o dimensionamento do reforço à flexão de vigas de concreto armado, considerando o embasamento teórico da norma americana ACI 440.2R:2008 [1], mas tomando como base os conceitos e critérios da NBR 6118:2014 [2].

2. Dimensionamento à flexão de vigas reforçadas com PRFC

O procedimento de cálculo para o reforço com PRFC que será apresentado a seguir está embasado nas prescrições normativas da ACI 440.2R:2008 [1], entretanto, está adaptado às recomendações da NBR 6118:2014 [2] no que diz respeito às propriedades dos materiais, concreto e aço. Toda simbologia aqui utilizada está em conformidade com aquela usualmente encontrada na norma brasileira, exceto nos casos onde houver a introdução de parâmetros utilizados apenas pelas normas americanas.

O estudo completo do reforço de vigas de concreto armado com PRFC está desenvolvido em Silva[3], onde estão apresentadas, de forma minuciosa, as prescrições da norma brasileira e da norma americana para o reforço de vigas com PRFC tanto à flexão quanto ao cisalhamento. Cabe salientar que no estudo realizado por Silva [3] observou-se que, para a viga estudada, o reforço ao cisalhamento não foi necessário para aumentar a capacidade resistente da viga, pois os estribos existentes já eram suficientes para suportar o novo esforço cortante proveniente do aumento da sobrecarga. Por esse motivo, o dimensionamento ao esforço cortante não será apresentado neste artigo. Para maiores detalhes, vide Silva [3]. Outros estudos sobre o dimensionamento à flexão utilizando fibras de carbono podem ser encontrado em Ferrari et al. [4] e Machado [5].

A Figura 1 mostra esquematicamente a distribuição de deformações e forças em uma seção reforçada à flexão com PRFC.

No domínio 2, onde a deformação da armadura tracionada é dada como sendo de 10‰, as deformações da seção podem ser relacionadas por:

$$\varepsilon_c = \frac{0,01x}{d-x} \quad (1)$$

$$\varepsilon_s' = \frac{0,01(x-d')}{d-x} \quad (2)$$

$$\varepsilon_s = 0,01 \quad (3)$$

$$\varepsilon_b = \frac{\varepsilon_c(h-x)}{x} \quad (4)$$

Agora, nos domínios 3 e 4, onde a deformação do concreto é igual à deformação específica de encurtamento do concreto na ruptura (ε_{cu}), tem-se que:

$$\varepsilon_c = \varepsilon_{cu} \quad (5)$$

$$\varepsilon_s' = \frac{\varepsilon_{cu}(x-d'')}{x} \quad (6)$$

$$\varepsilon_s = \frac{\varepsilon_b(d-x)}{h-x} \quad (7)$$

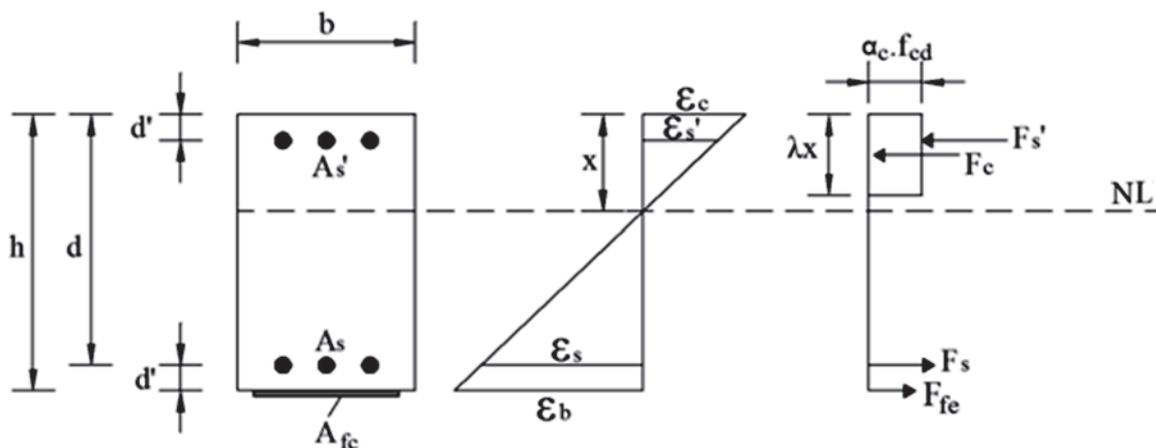


Figura 1

Distribuição de deformações e forças em uma seção reforçada à flexão com PRFC

$$\varepsilon_b = \frac{\varepsilon_{cu}(h-x)}{x} \quad (8)$$

onde: $\varepsilon_b = \varepsilon_{fe} + \varepsilon_{bi}$, sendo ε_{fe} a deformação efetiva do reforço com PRFC e ε_{bi} a deformação pré-existente neste ponto da viga, antes da aplicação do reforço.

De acordo com Machado [5], essa deformação pode ser calculada a partir de uma análise elástica considerando o carregamento existente no momento de aplicação do reforço (geralmente são consideradas apenas as cargas permanentes atuantes, como peso próprio e revestimento, por exemplo).

Agora, considerando a distribuição de tensões na seção apresentada também na Figura 1, pode-se obter as seguintes equações de equilíbrio:

$$MR_{d1} = F_c \cdot \left(h - \frac{\lambda x}{2} \right) + F_{s'} \cdot (h - d') - F_s \cdot d \quad (9)$$

$$MR_{d2} = F_s \cdot \left(d - \frac{\lambda x}{2} \right) + F_{s'} \cdot \left(\frac{\lambda x}{2} - d' \right) + F_{fe} \cdot \left(h - \frac{\lambda x}{2} \right) \quad (10)$$

Sendo que valor de MR_{d1} é obtido a partir do somatório de momentos no ponto de aplicação da fibra de carbono e o valor de MR_{d2} é obtido no ponto de aplicação da força F_c .

As forças F_c , F_s , $F_{s'}$ e F_{fe} são definidas através do produto entre as áreas e as respectivas tensões resistentes de cada elemento. Desta forma, tem-se que:

$$F_c = A_c \cdot \sigma_{cd} \quad (11)$$

$$F_s = A_s \cdot \sigma_{sd} \quad (12)$$

$$F_{s'} = A_{s'} \cdot \sigma'_{sd} \quad (13)$$

$$F_{fe} = A_f \cdot \sigma_{fe} \quad (14)$$

Machado [5] recomenda que a tensão resistente do concreto deve ser multiplicada por um fator de redução ψ para considerar o efeito da influência da fibra de carbono no elemento. Nessa pesquisa, é feita uma adaptação dessas recomendações para seguir as prescrições da NBR 6118:2014 [2], que estabelece que as tensões no concreto devem ser calculadas de acordo com o diagrama parábola-retângulo apresentado no item 8.1.10 da citada norma. Desta forma, o fator ψ é dado por:

$$\psi = 1, \text{ para } \varepsilon_c = \varepsilon_{cu} \quad (15)$$

$$\psi = 1,25 \cdot \left(1 - \frac{\varepsilon_{c2}}{3\varepsilon_c} \right), \text{ para } \varepsilon_{c2} < \varepsilon_c < \varepsilon_{cu} \quad (16)$$

$$\psi = \frac{2,5}{3} \cdot \sqrt{\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c2}}}, \text{ para } \varepsilon_c < \varepsilon_{c2} (2,5/3) \quad (17)$$

sendo ε_{c2} a deformação específica de encurtamento do concreto no início do patamar plástico.

Desta forma, dado que a área de concreto comprimida é igual a $\lambda x \cdot b$, as equações (11) a (14) passam a ser reescritas como:

$$F_c = \psi \cdot \alpha_c \cdot f_{cd} \cdot \lambda x \cdot b \quad (18)$$

$$F_s = A_s \cdot f_s \quad (19)$$

$$F_{s'} = A_{s'} \cdot f_{s'} \quad (20)$$

$$F_{fe} = \psi_f \cdot A_f \cdot f_{fe} \quad (21)$$

Sendo $\psi_f = 0,85$ um fator de redução aplicado às fibras, conforme definido no item 10.2.10 do ACI 440.2R:2018 [1], e f_{cd} a resistência de cálculo do concreto.

As tensões f_s' , f_s' , f_{fe} e $\alpha_c \cdot f_{cd}$ são, respectivamente, as tensões atuantes nas armaduras inferiores, nas armaduras superiores, no PRFC e na área de concreto comprimido.

Considerando que:

$$f_{fe} = E_f \cdot \varepsilon_{fe} \quad (22)$$

E, lembrando que $\varepsilon_{fe} = \varepsilon_b - \varepsilon_{bi}$, pode-se definir f_{fe} como sendo igual a:

$$f_{fe} = E_f \cdot \left(\varepsilon_c \cdot \frac{(h-x)}{x} - \varepsilon_{bi} \right) \quad (23)$$

Então, desenvolvendo as equações (9) e (10), tem-se que:

$$MR_{d1} = \psi \cdot \alpha_c \cdot f_{cd} \cdot \lambda x \cdot b \left(h - \frac{\lambda x}{2} \right) + A_{s'} \cdot f_{s'} \cdot (h - d') - A_s \cdot f_s \cdot d \quad (24)$$

$$MR_{d2} = A_s \cdot f_s \cdot \left(d - \frac{\lambda x}{2} \right) + A_{s'} \cdot f_{s'} \cdot \left(\frac{\lambda x}{2} - d' \right) + \psi_f \cdot A_f \cdot (E_f \cdot \varepsilon_{fe}) \cdot \left(h - \frac{\lambda x}{2} \right) \quad (25)$$

A profundidade da linha neutra (x) poderia ser obtida igualando-se a equação de MR_{d1} ao valor do momento solicitante de cálculo MS_d . No entanto, as deformações utilizadas para cálculo das tensões nas armaduras também variam em função da profundidade da linha neutra, assim como o valor de ψ , o qual depende da deformação do concreto e, além disso, pode ser definido por três equações distintas. Portanto, é necessário estimar um valor de x e, iterativamente, verificar se a diferença entre MR_{d1} e MS_d está abaixo de uma tolerância adotada.

Neste trabalho, a linha neutra foi obtida utilizando o Método de Newton, fazendo $MS_d - MR_{d1} = 0$. O Método de Newton e suas variações (Métodos Quase Newton) são utilizados para resolver problemas não lineares sem restrições, como é o caso do problema em questão.

Em uma análise numérica, o objetivo deste método é obter o valor da variável x de tal forma que a função $f(x)$ seja igual a 0, a partir de um processo iterativo. Para isso, é necessário que a equação seja diferenciável em x_n , onde n indica a n -ésima iteração do algoritmo. O processo iterativo do Método de Newton está melhor ilustrado no trabalho de Bandeira [6].

Como premissa para o dimensionamento, o valor de MS_d tem que ser menor ou igual à resistência de cálculo MR_{d1} , sendo que, conforme limitação apresentada na introdução do capítulo 10 da ACI 440.2R:2008 [1], o momento resistente da peça reforçada (MR_{d1}) não deve ter uma resistência superior a 40% do momento resistente inicial da peça (MR_{di}), antes do reforço, calculado considerando a armadura existente da seção transversal. Ou seja, $MR_{d1} \leq 1,4 MR_{di}$.

Sabendo que $MR_{d1} = MR_{d2}$, pode-se definir a força (F_{fe}) da fibra de carbono considerando o valor de x previamente calculado. Como $F_{fe} = \psi_f \cdot A_f \cdot f_{fe}$, calcula-se a área de fibra de carbono necessária (A_f) para o reforço por:

$$A_f = b_f \cdot t_f \cdot n \quad (26)$$

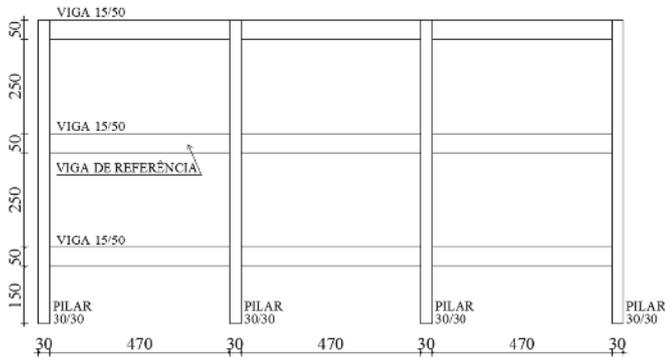


Figura 2
Pórtico indicando a viga de referência para o estudo de caso. Dimensões em centímetros

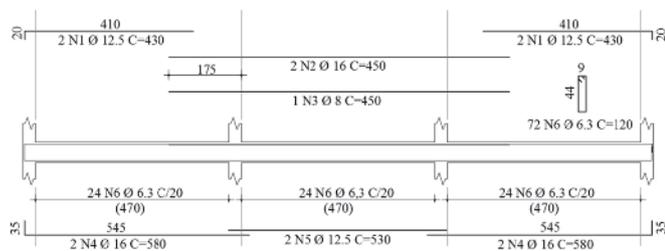


Figura 3
Detalhamento da viga de referência

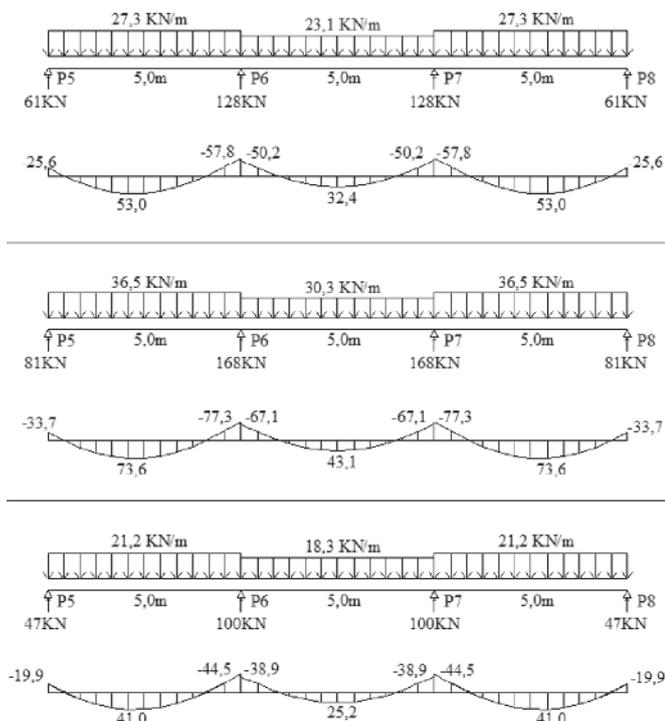


Figura 4
Carregamentos atuantes na viga de referência

Sendo b_f a largura do PRFC, t_f a espessura da camada e n o número de camadas.

É recomendado no item 10.2.10 da ACI 440.2R:2008 [1] que a deformação da fibra de carbono (ϵ_{fe}) seja limitada a deformação última da fibra (ϵ_{fud}), a qual é dada por:

$$\epsilon_{fud} = 0,41 \sqrt{\frac{f_{cd}}{nE_f t_f}} \leq 0,9\epsilon_{fu} \quad (27)$$

Se um elemento está sendo reforçado à flexão, parte-se do pressuposto de que houve um aumento do carregamento da viga em relação àquele estimado quando do dimensionamento inicial. Portanto, é fundamental que seja feita uma verificação da sua resistência ao cisalhamento para os novos esforços apresentados em função do aumento das cargas.

Para considerar a redução da ductilidade do elemento original provocada pelo uso de reforço com PRFC, conforme item 10.2.7 do ACI 440.2R:2018 [1], é definido um fator ϕ que reduz a tensão resistente do elemento estrutural. Esse fator varia em função da deformação do aço ϵ_s , conforme definido a seguir.

$$\phi = 0,65, \text{ para } \epsilon_s \leq \epsilon_{sy} \quad (28)$$

$$\phi = 0,65 + 0,25 \left(\frac{\epsilon_s - \epsilon_{sy}}{0,005 - \epsilon_{sy}} \right), \text{ para } \epsilon_{sy} < \epsilon_s < 0,005 \quad (29)$$

Sendo ϵ_{sy} a deformação de escoamento do aço definida por $\epsilon_{sy} = f_{yd}/E_s$, onde f_{yd} representa a tensão de escoamento de cálculo do aço e E_s representa o módulo de elasticidade do aço.

$$\phi = 0,9, \text{ para } \epsilon_s \geq 0,005 \quad (30)$$

3. Apresentação da viga de referência e dimensionamento do reforço com PRFC

A viga adotada como referência para estudo nesse trabalho foi obtida a partir da análise de um edifício modelo, onde os carregamentos adotados estavam em conformidade com a NBR 6120:1980 [7] para um edifício comercial. Para representar melhor o comportamento da viga, esta foi analisada em conjunto com o pórtico no qual ela estava inserida. A Figura 2 a seguir apresenta as características do pórtico e as dimensões de cada elemento que o compõe.

A viga foi detalhada de acordo com o dimensionamento inicial feito considerando os esforços previstos antes do aumento da sobrecarga, ou seja, antes da necessidade de aplicação do reforço. A Figura 3 apresenta o detalhamento da viga.

Para possibilitar a análise e o dimensionamento do reforço, foi considerado que o carregamento da viga sofreu um aumento da sobrecarga em função de uma mudança de utilização do edifício modelo. A Figura 4 a seguir apresenta os carregamentos atuantes na viga em três situações, sendo a primeira considerando os esforços previstos antes do aumento da sobrecarga, a segunda após o aumento da sobrecarga e, a terceira, considerando apenas as cargas permanentes atuantes. Em resumo, os esforços da primeira situação foram utilizados para o dimensionamento das armaduras, os esforços da segunda situação para o dimensionamento do PRFC e os da terceira situação para a definição da deformação pré-existente ϵ_{bi} , antes da aplicação do reforço.

O dimensionamento do reforço da viga de referência foi realizado

Tabela 1

Propriedades dos materiais adotadas no estudo de caso

Concreto	f_{ck}	= 30MPa = 3 KN/cm ²
	E_{ci}	= 5.600 $\sqrt{f_{ck}}$ = 30.672 MPa = 3.067 KN/cm ²
	α_1	= 0,8 + 0,2 $\times f_{ck}$ = 0.875
	E_{cs}	= $\alpha_1 E_{ci}$ = 0.875 \times 26.838 MPa = 2.684 KN/cm ²
Aço	f_{yk}	= 500 MPa = 50 KN/cm ²
	E_s	= 210.000 MPa = 21.000 KN/cm ²
	$\epsilon_{s,u}$	= 10‰
	$\epsilon'_{s,u}$	= 10‰
Fibra (CF-30 do sistema MbraceTM)	$\epsilon_{fu,k,FABRICANTE}$	= 17‰
	$f_{fu,k,FABRICANTE}$	= 3.790 MPa = 379 KN/cm ²
	E_f	= 228.000 MPa = 22.800 KN/cm ²
	t_f	= 0.165 mm
	CE	= 0,95 (coeficiente de redução em função do ambiente)
	$\epsilon_{fu,k}$	= $\epsilon_{fu,FABRICANTE} \times CE$ = 16,15‰
	$f_{fu,d}$	= $f_{fu,FABRICANTE} \times CE$ = 3.600 MPa = 360 KN/cm

de duas formas. A primeira, considerando apenas as prescrições da ACI 440.2R:2014 [1] e a segunda considerando as formulações compiladas apresentadas neste trabalho. Na Tabela 1 estão apresentadas as características dos materiais adotadas durante a realização do estudo.

Inicialmente, é necessário determinar a capacidade resistente da seção transversal antes da aplicação do reforço com o PRFC,

pois, conforme orientação da ACI 440.2R:2008 [1], não é recomendada a utilização desse tipo de reforço nos casos onde o novo esforço atuante for superior a 40% da capacidade resistente da peça de concreto armado (peça sem a utilização do PRFC). Para isso, é verificada a seção da viga próxima ao apoio, onde o momento tende a ser maior. Nesta situação, após o reforço, a viga apresenta a configuração da seção transversal apresentada na Figura 5. Observa-se que, neste caso, as armaduras tracionadas são as armaduras superiores e, portanto, é nessa região que se faz necessária a aplicação do reforço quando do aumento dos esforços atuantes.

No momento de aplicação do reforço, a viga já está submetida a um determinado carregamento, que nesse caso foi dado pelo carregamento proveniente das cargas permanentes. Assim, a viga já apresenta um quadro de deformações iniciais na seção transversal em análise antes da aplicação do reforço. Na face mais tracionada, ou melhor, no ponto onde o PRFC é aplicado, a deformação ϵ_b pode ser chamada, nesse caso, de ϵ_{bi} . Essa deformação deve ser calculada considerando que a peça esteja trabalhando no Estádio 2 de dimensionamento, que ocorre antes da peça atingir o seu estado de plastificação.

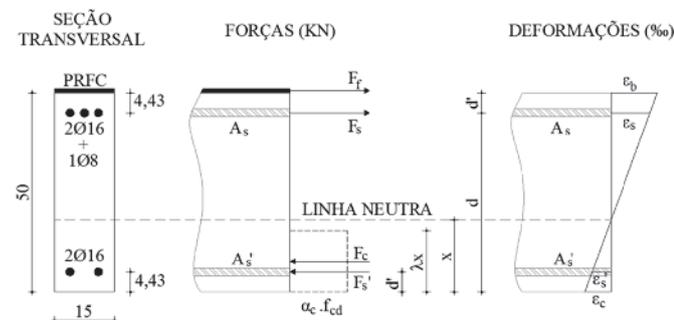


Figura 5

Seção transversal de máximo momento fletor

Tabela 2

Parâmetros envolvidos no cálculo do momento resistente inicial da viga

Parâmetro	Resultados pelo(as):		Diferença percentual (%)	Diferença absoluta
	ACI 440.2R:2014	Formulações compiladas		
x (cm)	6,22	6,70	-8%	-0,49
ϵ_c (‰)	1,58	1,72	-9%	-0,14
ϵ_s (‰)	10,00	10,00	0%	0,00
ϵ'_s (‰)	0,45	0,58	-29%	-0,13
ϵ_b (‰)	11,13	11,14	0%	-0,01
F_{cd} (KN)	170	147	14%	23
F_{sd} (KN)	203	196	3%	7
F'_{sd} (KN)	33	49	-50%	-16
M_{Rd} (KN,cm)	8.634	8.305	4%	329

Tabela 3

Parâmetros envolvidos no cálculo da área de PRFC necessária ao reforço

Parâmetro	Resultados pelo (as):		Diferença percentual (%)	Diferença absoluta
	ACI 440.2R:2014	Formulações compiladas		
x (cm)	7,26	8,42	-16%	-1,17
ϵ_c (‰)	1,89	2,27	-20%	-0,37
ϵ_{cs} (‰)	10,00	10,00	0%	0,00
ϵ'_s (‰)	0,74	1,08	-46%	-0,34
ϵ_b (‰)	11,16	11,19	0%	-0,04
ϵ_{bi} (‰)	1,34	1,28	5%	0,07
ϵ_{fe} (‰)	9,81	9,92	-1%	-0,10
F_{cd} (KN)	198	162	18%	36
F_{sd} (KN)	203	196	3%	7
F'_{sd} (KN)	53	90	-70%	-37
F_{fe} (KN)	64	67	-5%	-3
A_{tc} (cm ²)	0,32	0,33	-4%	-0,01

É importante que seja verificado se a deformação da fibra de carbono é inferior à admissível, ou seja, se $\epsilon_{fe} < \epsilon_{fu,d}$. Em seguida, é

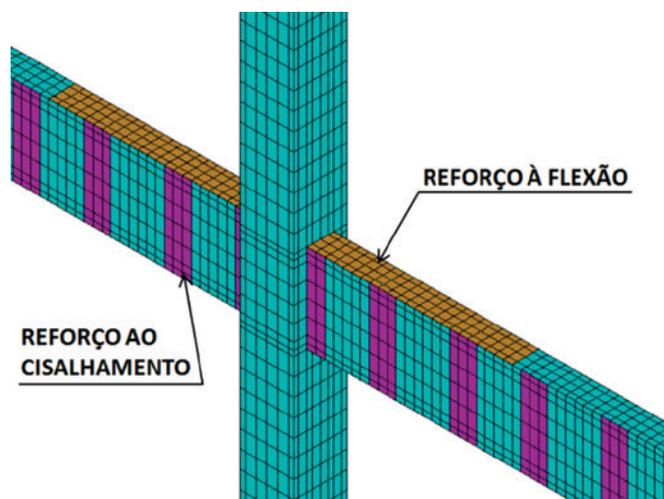


Figura 6
Posicionamento do reforço com PRFC –
vista superior

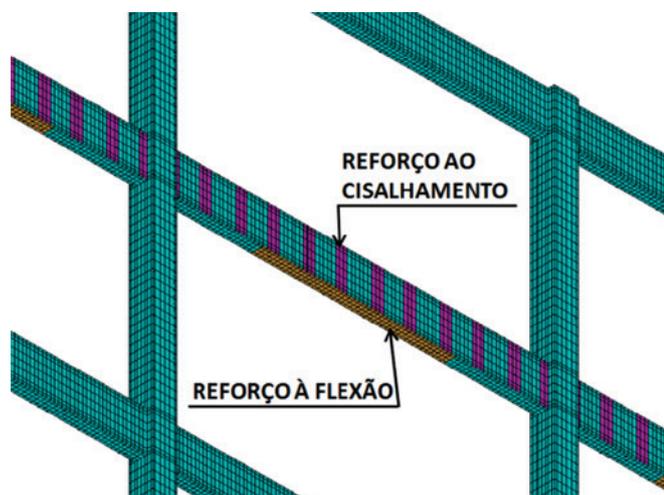


Figura 7
Posicionamento do reforço com PRFC – vista inferior

necessário verificar se a tensão atuante na fibra carbono é inferior à admissível, ou seja, se $f_{fe} < f_{fu,d}$.

A Tabela 2 apresenta uma comparação entre parâmetros envolvidos no cálculo do momento resistente inicial da viga, tanto pela ACI 440.2R:2014 [1] quanto através das formulações compiladas apresentadas neste trabalho.

A Tabela 3 a seguir apresenta uma comparação entre parâmetros envolvidos no cálculo da área de PRFC necessária ao reforço.

4. Apresentação da viga de referência e dimensionamento do reforço

Foi utilizada a versão 16 do software ANSYS para a avaliação da viga de referência do estudo de caso. Na modelagem, foram definidos três tipos de elementos discretos: para representar o concreto, adotou-se o elemento SOLID 65; para representar as armaduras, o elemento BEAM 188; e, para representar o PRFC, o elemento SHELL 181, tudo conforme apresentado em [8]. Em síntese, o BEAM 188 é um elemento unidimensional que se baseia na teoria de vigas de Timoshenko, a qual leva em consideração as deformações da seção transversal provocadas pelos esforços cisalhantes do elemento. Esse elemento é linear, possuindo 2 nós com 6 graus

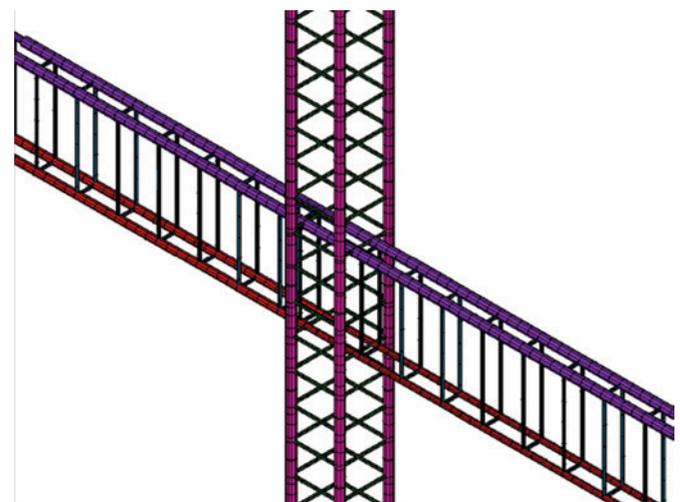


Figura 8
Vista das armaduras dos elementos modelados
na ligação viga-pilar

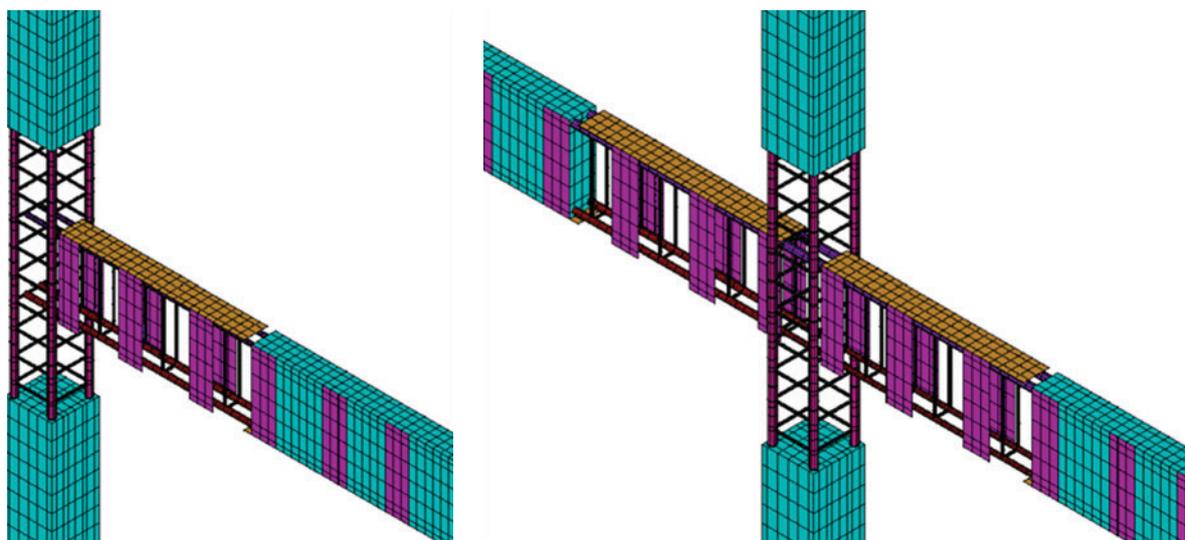


Figura 9
Vista dos elementos modelados na ligação viga-pilar

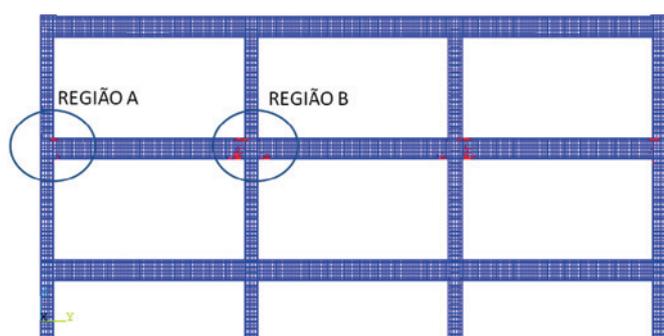


Figura 10
Pontos de fissura e esmagamento do concreto no instante da ruptura (1º Modelo) e no instante do incremento final de carregamento (2º Modelo)

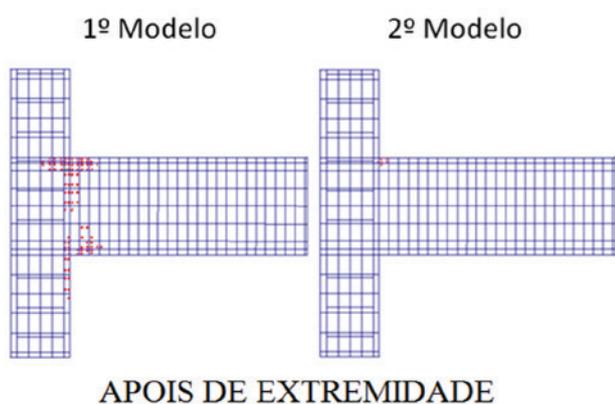
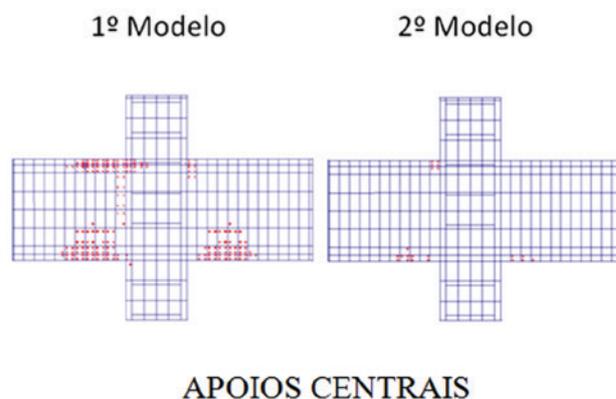


Figura 11
Vista detalhada das regiões A e B

de liberdade cada (três translações em x, y e z, e três rotações em x, y e z). O SOLID 65 é um elemento utilizado para modelagem tridimensional de sólidos com ou sem barras de reforço. O elemento é composto por 8 nós com três graus de liberdade cada (translações em x, y e z). O SHELL 181 tem capacidade de representar a flexão e o comportamento de membrana de um determinado material. É permitido o lançamento de cargas normais e no plano deste elemento. Este elemento possui 4 nós onde em cada nó existem 6 graus de liberdade cada (três translações e três rotações). Estudos similares foram realizados por Bandeira [9]. No entanto, no trabalho desse autor só foram modeladas as armaduras longitudinais da viga. Uma grande contribuição desse artigo é a consideração mais aproximada da situação real da viga, ou seja, considerando os estribos e a ligação da viga com os pilares. Foi considerada uma perfeita integração entre os materiais (concreto-aço ou concreto-fibra), não sendo introduzida na modelagem nenhuma zona de transição na região de ligação, como, por exemplo, a resina existente na ligação entre o concreto e o PRFC. Dessa



forma, foi imposto na modelagem que não há a ruptura por descolagem do PRFC ou por deslocamento do cobrimento de concreto. Vale ressaltar que o objetivo deste trabalho não é apresentar as formulações utilizadas no software ANSYS, assim como a metodologia aplicada através do Método dos Elementos Finitos. A Figura 6 ilustra o posicionamento do reforço com PRFC utilizado para a flexão na face superior da viga e para o cisalhamento nas faces laterais da viga.

Observa-se que o reforço à flexão na face superior da viga foi disposto apenas na parte do trecho onde a viga está submetida à tração. Neste exemplo, adotou-se o comprimento da faixa de reforço superior como 1/4 do vão entre pilares.

Para que houvesse uma representação real do comportamento da estrutura, foi posicionado o reforço também na face inferior da viga, no trecho onde as seções transversais encontram-se tracionadas. A disposição do PRFC foi feita entre 1/4 e 3/4 do vão, conforme apresentado na Figura 7.

As armaduras, representadas no ANSYS pelo BEAM 188, estão ilustradas na Figura 8.

A Figura 9 ilustra a modelagem de todos os elementos na ligação viga-pilar. Nessa figura foi ocultada uma parte do concreto para possibilitar a visualização das armaduras.

Para evitar a instabilidade lateral do pórtico, foi restringido o deslocamento na direção ortogonal ao eixo da viga em todos os elementos dos pilares. Definiu-se também que os pilares estão totalmente engastados em sua base, de forma que foram impedidas

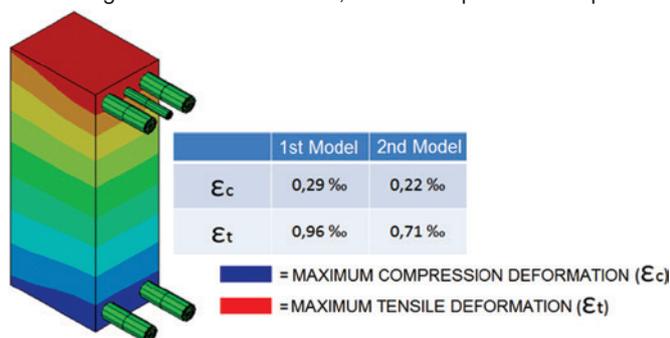


Figura 12

Deformações no concreto na seção de momento máximo

quaisquer translações ou rotações nestes pontos.

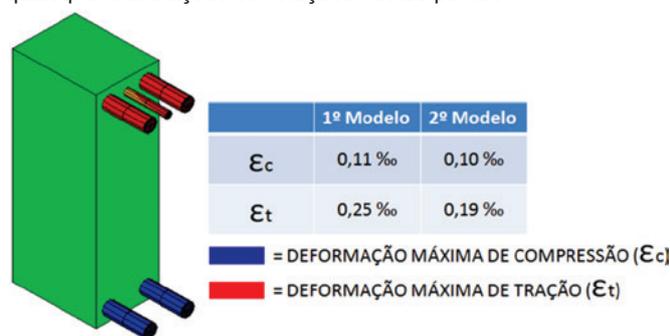


Figura 13

Deformações no aço na seção de momento máximo

Foram simulados dois modelos, conforme descritos a seguir:

- 1º Modelo: Viga sem reforço com PRFC;
- 2º Modelo: Viga reforçada com PRFC.

Nos dois modelos, a geometria dos elementos, o detalhe das armaduras e as propriedades dos materiais foram mantidas. O carregamento empregado nos dois modelos já contempla o aumento da sobrecarga.

No *software* ANSYS, o carregamento é aplicado gradativamente à estrutura até que seja atingido o limite de ruptura de algum dos elementos finitos. Buscou-se, desta forma, verificar, para cada modelo analisado, as tensões e a deformações de cada material na seção de momento máximo. O objetivo é comparar estes valores obtidos numericamente com aqueles obtidos a partir das formulações analíticas.

Observou-se que o 1º Modelo (viga sem reforço com PRFC) não suportou o carregamento total imposto, rompendo com aproximadamente 67% da carga total, o que corresponde aproximadamente à carga inicial utilizada para o dimensionamento das armaduras da estrutura concebida inicialmente. O 2º Modelo suportou o carregamento total imposto, não entrando em ruptura em virtude do reforço à flexão.

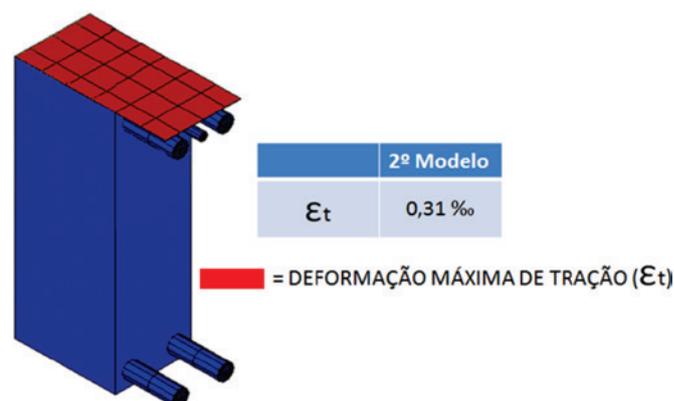


Figura 14

Deformações no PRFC na seção de momento máximo

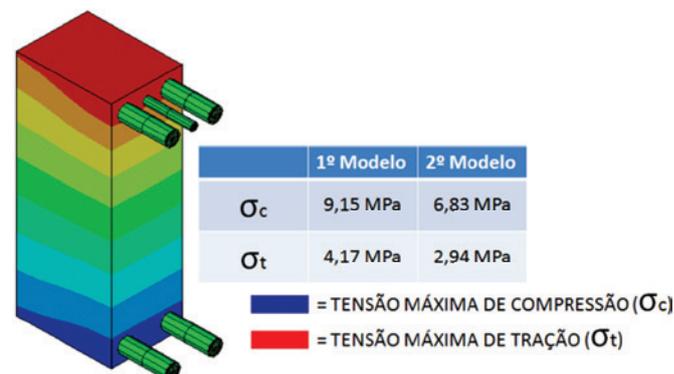


Figura 15

Tensões no concreto na seção de momento máximo

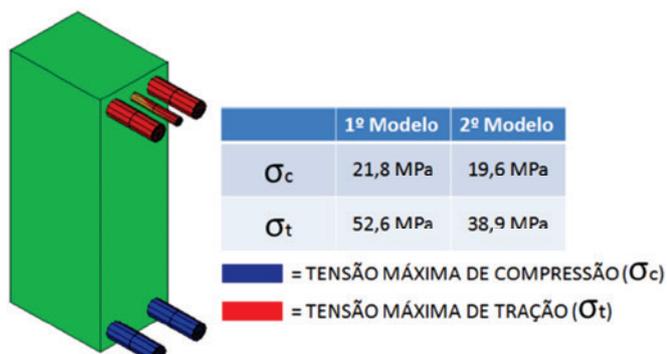


Figura 16
Tensões no aço na seção de momento máximo

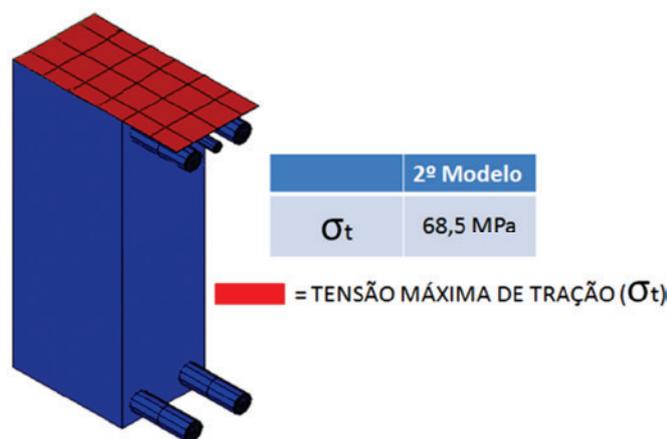


Figura 17
Tensões no PRFC na seção de momento máximo

A ruptura do Modelo 1 se deu em função do esmagamento do concreto nas regiões próximas ao apoio, conforme ilustrado na Figura 10.

As regiões em vermelho representam os pontos de fissuras (“cracks”) na região tracionada e esmagamento do concreto (“crushing”) na região comprimida. As regiões A e B identificadas na Figura 10 está detalhada, para cada modelo, na Figura 11.

Para o Modelo 1, onde não houve reforço à flexão, observa-se que na região tracionada existem aberturas de fissuras que comprovam que a resistência à tração na flexão do concreto foi atingida. Ainda para este modelo, observa-se que o esmagamento do concreto na zona comprimida está excessivamente alto.

No entanto, para o Modelo 2, onde houve reforço à flexão, as aberturas de fissuras existentes são significativamente menores e totalmente aceitáveis em uma estrutura de concreto armado. Observa-se, nesse caso, que o concreto esmagado se limita aproximadamente à região de cobertura das armaduras.

Para a seção de momento máximo, a viga apresenta as deformações no concreto ilustradas na Figura 12, as deformações no aço ilustradas na Figura 13, as deformações no PRFC ilustradas na Figura 14, as tensões no concreto ilustradas na Figura 15, as tensões no aço ilustradas na Figura 16 e as tensões no PRFC ilustradas na Figura 17.

Era esperado que o 1º Modelo rompesse antes de atingir o carregamento máximo. Portanto, para verificar se a modelagem numérica está em conformidade com as formulações analíticas, este mesmo modelo foi rodado novamente, no entanto, com o carregamento previsto inicialmente para o dimensionamento da estrutura de concreto armado. Observou-se que a estrutura suportou o carregamento máximo, implicando que a carga de ruptura das formulações numéricas estão em conformidade com o previsto pelas prescrições analíticas.

5. Discussão dos resultados

Nesta seção são apresentadas as discussões sobre os dimensionamentos e a modelagem computacional apresentadas anteriormente.

Os valores das forças obtidas através das formulações embasadas na NBR 6118:2014 [2] já são valores de cálculo. Contudo, os correspondentes valores calculados pela ACI 440.2R:2008 [1] são valores característicos. Desse modo, para possibilitar a comparação, as forças características provenientes da formulação americana foram multiplicadas pelo coeficiente de redução ϕ .

Observa-se que, apesar de existir uma grande variação entre as forças e deformações calculadas, a capacidade resistente inicial da peça é bem próxima para ambas as normas (diferença de aproximadamente 4%), conforme mostrado na Tabela 2.

Obviamente, pelo fato das duas normas empregarem diferentes fatores de minoração para a resistência dos materiais, pode-se esperar que diferentes resultados sejam encontrados para as forças e deformações calculadas. Tal diferença foi mais evidenciada para o aço localizado na zona comprimida, onde a diferença foi de 29% para a deformação e de 50% para a força resistente. Contudo, observa-se que a diferença absoluta não é tão considerável (0,13% para deformações e 16kN para a força). O que se vê é que a profundidade da linha neutra é maior quando consideradas as prescrições da NBR 6118:2014 [2]. Isso se deve ao fato de que os coeficientes de segurança utilizados pela norma brasileira para minorar as resistências (1,4 para o concreto e 1,15 para o aço) são inferiores aos apresentados pela ACI 318:2014 [10]. Numericamente, se os coeficientes da NBR 6118:2014 [2] obedecessem aos padrões americanos (onde deve-se multiplicar o coeficiente de segurança pela resistência e não dividir), eles seriam $1 / 1.4 = 0.71$ para o concreto e $1 / 1.15 = 0.87$ para o aço. Observa-se que ambos os valores são inferiores ao coeficiente $\phi = 0.9$ definido pela norma americana tanto para o aço quanto para o concreto. Como a NBR 6118:2014 [2] minorar a resistência do concreto mais do que a resistência do aço, certamente, para que haja equilíbrio na seção, a área de concreto comprimida deverá ser maior no dimensionamento feito através dessa norma do que quando feito pela norma americana. Consequentemente, há uma tendência de aumento na altura da linha neutra para a norma brasileira em relação à norma americana. A posição da linha neutra é quem define as deformações dos materiais e, consequentemente, a sua força resistente.

Observa-se também, na Tabela 3, que existe uma grande variação entre os valores de forças e deformações calculadas para os parâmetros envolvidos no cálculo da área de PRFC necessária ao reforço. No entanto, as áreas de PRFC determinadas por ambas as normas são bem próximas (diferença de apenas 0,01cm²).

No dimensionamento do reforço, a profundidade da linha neutra

calculada seguindo as recomendações da NBR 6118:2014 [2] continua maior do que a calculada seguindo as prescrições da ACI 440.2R:2008 [1]. Isso se justifica da mesma forma, pois se os coeficientes de segurança da norma brasileira são mais conservadores, é esperado que no dimensionamento realizado através desta norma seja necessária uma maior área de concreto comprimido para equilibrar a seção.

Durante a modelagem numérica no software ANSYS, foram observados alguns conceitos que levaram a questionamentos sobre as hipóteses de dimensionamento definidas a partir das formulações analíticas.

É importante mencionar que a modelagem no ANSYS é feita de forma não linear, física e geométrica. O material do concreto é representado pelo elemento SOLID 65, associado com a equação constitutiva definida em WILLAM e WARNKE [10], p.174. Esta lei de material tem o objetivo de representar o comportamento físico do concreto, estabelecendo um critério de resistência para o mesmo. Este critério leva em consideração a máxima tensão de tração estabelecida nas normas, neste caso pela NBR6118:2014 [2], que é definida por $0,3 \cdot \sqrt[3]{f_{ck}^2}$. Além disso, leva em consideração a máxima tensão de compressão, definida por $0,85 \cdot f_{cd}$. Isso implica que, quando a tensão de tração ou compressão do concreto atingir o limite máximo, haverá a ruptura do material.

É importante mencionar que o programa ANSYS é baseado na formulação do Método dos Elementos Finitos, e portanto, não consegue obter convergência em suas análises quando a matriz de rigidez não é suficiente para suportar os esforços. Nesse caso, a perda da resistência da matriz de rigidez está associada à fissuração (tração) e ao esmagamento do concreto (compressão). Esta é uma das limitações do modelo numérico proposto neste trabalho. No dimensionamento das armaduras no Estado Limite Último (ELU) previsto pela NBR6118:2014 [2], subentende-se que a armadura esteja em escoamento, atingindo as suas tensões máximas com toda a sua capacidade resistente, desprezando-se completamente a resistência do concreto na zona tracionada. No entanto, pela formulação numérica, parte da tensão de tração é absorvida pelo concreto, de forma que a tensão resistente nas armaduras é aliviada.

A norma brasileira não avalia a peça de uma forma global, avaliando apenas a capacidade resistente das seções mais solicitadas. Quando as armaduras atingem a tensão de cálculo de 435MPa (no caso do aço CA50), ou seja, quando estiverem em regime de escoamento, a região tracionada da peça já apresenta uma abertura excessiva de fissuras. Isso não consegue ser representado no modelo físico utilizado no ANSYS, já que o programa entende que a peça entrou em ruptura, pois com a fissuração excessiva do material, não há convergência para se obter uma solução numérica.

As formulações analíticas levam a resultados de falhas semelhantes àqueles esperados pela modelagem numérica, uma vez que o carregamento suportado por esta modelagem é bem semelhante àquele utilizado no dimensionamento. Isso é comprovado quando analisado o 1º Modelo, onde a estrutura rompeu com aproximadamente 67% da carga na situação onde não havia reforço. Quando rodado o mesmo modelo para o carregamento inicial (carregamento utilizado quando do dimensionamento), este já suportou a carga total.

O elemento SHELL 181 representou bem o comportamento do PRFC. É importante mencionar que o material foi definido como ortotrópico, pois as suas propriedades físicas na direção longitudinal (no sentido das fibras) são diferentes daquelas definidas para a direção transversal.

Os valores de tensões e deformações na seção de momento máximo são diferentes quando comparada a teoria analítica com a modelagem numérica. Considerando que as formulações analíticas são feitas para a fase última de ruptura do elemento, pode-se dizer que o modelo numérico representa melhor a situação da estrutura em utilização, respeitando as máximas aberturas de fissuras e tensões admissíveis de tração e compressão, já que a peça é avaliada de uma forma global, considerando-se a perda gradativa da capacidade resistente de cada elemento em função do incremento de cargas.

O Modelo 1 analisado rompe quando é atingida a tensão de tração do concreto e a abertura de fissuras está excessiva. Como consequência, há uma redução da linha neutra e o esmagamento da região comprimida. Nessa situação, o ANSYS considera que a estrutura entra em colapso. Diferentemente, a NBR6118:2014 [2] apresenta na formulação analítica a imposição de que a resistência à tração do concreto deve ser desprezada. Sabe-se, no entanto, que o concreto desta região trabalha até que seja atingido o seu limite de resistência à tração, momento no qual a peça começa a fissurar. O que a NBR6118:2014 [2] faz é controlar o limite da abertura destas fissuras a partir de uma análise em Estado Limite de Serviço.

6. Conclusões

De acordo com os dimensionamentos realizados, com a análise computacional e com as discussões sobre os resultados, pode-se chegar a algumas conclusões com relação ao dimensionamento do reforço de vigas de concreto armado com PRFC, conforme apresentado a seguir.

Como esperado, os dimensionamentos realizados a partir das prescrições do ACI 440.2R:2008 [1] fornecem resultados diferentes daqueles obtidos a partir das formulações adaptadas considerando os conceitos da NBR 6118:2014 [2]. No dimensionamento do reforço à flexão, a diferença entre as áreas de PRFC obtidas se deram, em grande parte, devido à variação entre os coeficientes empregados por ambas as normas. O ACI 440.2R:2008 [1] utiliza fatores de minoração das resistências diferentes do que os aplicados pela NBR 6118:2014 [2], de forma que, pela norma americana, os materiais resistem mais do que o permitido pela norma brasileira. Com isso, o dimensionamento realizado pela norma brasileira fornece resultados mais conservadores, gerando áreas de reforço necessárias ligeiramente superiores àquelas obtidas através do dimensionamento pelo ACI 440.2R:2018 [1].

Para a NBR 6118:2014 [2], a deformação última do concreto (particularmente para os concretos de classe C20 a C50) tem um valor de 3,5‰ enquanto que pelo ACI 440.2R:2008 [1] essa deformação tem um valor de 3‰. Isso faz com que a capacidade resistente do concreto seja maior pela norma brasileira, uma vez que a tensão no concreto é uma função da sua deformação. Assim, a profundidade da linha neutra poderia ser menor pela norma brasileira. No entanto, isto não acontece, pois, a influência provocada

pelos fatores de segurança utilizados por ambas as normas é mais significativa. Sendo os fatores de segurança da NBR 6118:2014 [2] mais conservadores, a tensão resistente do concreto acaba sendo menor por esta norma. Por esta razão, a área de concreto comprimida precisa ser maior, fazendo com que a linha neutra, conseqüentemente, tenha uma profundidade maior.

Contudo, apesar das discrepâncias abordadas anteriormente, observa-se que as formulações embasadas nos princípios da NBR 6118:2014 [2] apresentaram resultados satisfatórios em virtude da proximidade dos resultados encontrados em ambas as normas, tanto para o momento resistente inicial da peça de concreto armado quanto para a área de PRFC necessária para o reforço. Portanto, conclui-se que as formulações geradas a partir da compilação entre as prescrições do ACI 440.2R:2008 [1] com a prescrições da NBR 6118:2014 [2] geraram resultados satisfatórios no que diz respeito ao dimensionamento do reforço à flexão.

O programa ANSYS é baseado na formulação do Método dos Elementos Finitos, e portanto, não consegue obter convergência em suas análises quando a matriz de rigidez não é suficiente para suportar os esforços. Desta forma, quando a tensão de tração ou compressão do concreto atinge o limite máximo determinado, haverá a ruptura do material. Com a fissuração excessiva do material, não há convergência para se obter uma solução numérica. Nesta situação, o ANSYS considera que a estrutura entra em colapso.

Assim, pode-se concluir ainda que a modelagem numérica realizada nesse trabalho representou bem o comportamento da estrutura, pois as cargas de ruptura foram aproximadamente iguais àquelas esperadas pelas formulações analíticas. No entanto, avaliando apenas a seção de momento máximo, observou-se que as forças e deformações apresentadas pelo modelo numérico são significativamente diferentes daquelas apresentadas pelo modelo analítico.

7. Referências bibliográficas

- [1] AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 440.2R - Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures. - Farmington Hills, 2008.
- [2] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118 - Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. - Rio de Janeiro, 2014.
- [3] SILVA, A. S. C. – Análise de vigas de concreto armado reforçadas à flexão e ao cisalhamento com fibras de carbono: Análise teórica e computacional. – Dissertação (Mestrado Acadêmico) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas, Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, 2016.
- [4] FERRARI, V. J.; PADARATZ, I. J.; LORIGGIO, D. D. - Reforço à flexão em vigas de concreto armado com manta e fibras de carbono: mecanismos e sistemas de ancoragem - XXX Jornadas Sul-Americanas de Engenharia Estrutural, Brasília, 2002.
- [5] MACHADO, A. P., Reforço de Estruturas de Concreto Armado com Fibra de Carbono - Ed. PINI, São Paulo, 2002.
- [6] BANDEIRA, A. A. - Análise de problemas de contato com atrito em 3D. - Tese (Doutorado) - Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2001.
- [7] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6120 - Cargas para o cálculo de estruturas de edificações - Rio de Janeiro, 1980.
- [8] ANSYS, Mechanical APDL Theory Reference, Canonsburg, 2013.
- [9] BANDEIRA, A. A. - Theoretical, computational and experimental analysis of concrete structures reinforced with carbon fiber. -Fourth International Conference on FRP Composites in Civil Engineering (CICE2008), Zurich, Switzerland, 2008.
- [10] AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 318 - Building code requirements for reinforced concrete. - Farmington Hills, 2014.
- [11] WILLAM, K.J.; WARNKE, E. D. - Constitutive Model for the Triaxial Behavior of Concrete - Proceedings, International Association for Bridge and Structural En