

# MÉTODO PARA REFORÇO DE VIGA SUBMETIDA À FLEXÃO POR COLAGEM EXTERNA DE COMPÓSITOS REFORÇADOS COM FIBRAS DE CARBONO

## A method for reinforcement of bending beams though the external collage of carbon fiber reinforced composites

Yuri de Oliveira Lima <sup>1</sup>, Jonas Rafael Duarte Cavalcante <sup>2</sup>, Bruna Camerino Lira Uchôa <sup>3</sup>



### PALAVRAS CHAVE:

Agressividade Ambiental;  
Ductilidade;  
Recuperação;  
Patologias;  
Fibra de Carbono;

### KEYWORDS:

Environmental  
Aggressiveness;  
Ductility;  
Recovery;  
Pathological;  
Carbon Fiber.

**RESUMO:** As edificações de concreto armado em geral estão sujeitas ao surgimento de manifestações patológicas ao longo da sua vida útil, causadas por efeitos de agressividade ambiental, inconformidades de projeto, construção ou mudanças de função da edificação, surgindo a necessidade de reparo, recuperação ou reforço da estrutura. O presente artigo tem como objetivo apresentar um estudo teórico sobre o dimensionamento do reforço de vigas submetidas à flexão com CRFC (Compósitos Reforçados com Fibra de Carbono). O embasamento teórico foi construído a partir da ACI 440-2R (2008) e ABNT NBR 6118 (2014), onde o modelo de cálculo é baseado no Estado Limite Último (ELU) complementado com estudos realizados por meio de revisões bibliográficas de trabalhos acerca do assunto. Foi idealizada uma situação problema com o intuito de realizar as aplicações das teorias abordadas onde, após a aplicação dos cálculos foi observado grande potencial do reforço à flexão com CRFC, apresentando baixas alterações na seção transversal do elemento estrutural, alto grau de resistência dos CRFCs, com excelentes propriedades mecânicas e mostrando ser um excelente material para ser utilizado no reforço de estruturas de concreto armado. Contudo, foi observado que vigas em concreto armado originalmente dimensionadas no limite de ductilidade, quando reforçadas, fatalmente passaram desse limite, sendo de grande importância a análise da situação para o comportamento dúctil do elemento estrutural.

**ABSTRACT:** Reinforced concrete buildings in general are subject to the emergence of pathologies manifestations throughout their useful life, caused by environmental aggressiveness, design nonconformities, construction, or changes in the function of the building, thus requiring repair, recovery or reinforcement of the structure. This article presents a theoretical study on the dimensioning of the reinforcement of beams submitted to bending with CRFC (Composites Reinforced with Carbon Fiber). The theoretical basis was constructed from ACI 440-2R (2008) and ABNT NBR 6118 (2014), where the calculation model is based on the Ultimate Limit State (ELU) complemented with studies conducted through bibliographic reviews of works on the subject. A problem situation was idealized in order to perform the applications of the theories addressed, where after the application of the calculations, a great potential of bending reinforcement was observed with CRFC, presenting low changes in the cross-section of the structural element, high degree of strength of CRFCs, with excellent mechanical properties and showing to be an excellent material to be used in the reinforcement of reinforced concrete structures. However, it was observed that reinforced concrete beams originally dimensioned at the ductility limit, when strengthened, fatally crossed this limit, being of great importance analysis of the situation for the dubious behavior of the structural element.

\* Contato com os autores:

Publicado em 22 de dezembro de 2022

<sup>1</sup> e-mail: [engyuri.ol@outlook.com](mailto:engyuri.ol@outlook.com) (Y. O. Lima)

Engenheiro Civil, Graduado.

<sup>2</sup> e-mail: [jonas.rafael@souunit.com.br](mailto:jonas.rafael@souunit.com.br) (J. R. D. Cavalcante)

Engenheiro Civil, Mestre em Engenharia Civil, Professor, Centro Universitário Tiradentes - Unit.

<sup>3</sup> e-mail: [brunacamerinolira@gmail.com](mailto:brunacamerinolira@gmail.com) (B. C. L. Uchôa)

Engenheira Civil, Mestre em Engenharia Civil, Professora, Centro Universitário Tiradentes - Unit.

## 1 INTRODUÇÃO

As estruturas de concreto envelhecem naturalmente e, para que alcancem sua vida útil, se faz necessário atender aos requisitos de utilização e manutenção relatadas pelo projetista ou construtor; caso contrário, manifestações patológicas tendem a surgir diminuindo a durabilidade da estrutura. Atualmente, existe um grande número de edifícios de concreto armado, mas há uma escassez na preocupação com a durabilidade dessas edificações ao longo do tempo, ocasionando o crescimento da quantidade de estruturas degradadas, gerando problemas de segurança e funcionalidade. Dessa forma, surge a necessidade de realizar a reparação, reabilitação ou reforço da estrutura.

As atividades relacionadas ao reforço de estruturas de concreto armado aparecem como uma das mais interessantes e inexploradas áreas da engenharia civil devido à preocupação com o grande número de edificações deterioradas. Os materiais poliméricos vêm ganhando cada vez mais espaço na construção civil, com ótimas propriedades mecânicas e o avanço nas pesquisas ou informações técnicas, tornando-os materiais compósitos cada vez mais competitivos.

Diante disso, os Compósitos Reforçados com Fibras de Carbono (CRFC) estão se tornando cada vez mais presentes na engenharia civil, para o reforço de elementos estruturais, com estudos relacionados às suas propriedades ou diferentes métodos de execução. Apresentar o dimensionamento, características e as principais vantagens e desvantagens do reforço de vigas submetidas à flexão com CRFC, diante de tal realidade, se torna prioritário.

## 2 OBJETIVO

O desenvolvimento deste estudo teve como objetivo principal apresentar um estudo teórico sobre o dimensionamento do reforço de vigas submetidas a flexão com a colagem externa de CRFC, buscando um modelo de cálculo que forneça dados teóricos confiáveis sobre o comportamento do elemento reforçado.

## 3 ASPECTOS TEÓRICOS

Uma das técnicas mais estudadas e que apresenta ótimas características mecânicas para o reforço de estruturas de concreto é a colagem de CRFC. Esse sistema é constituído de um método simples, prático e de rápida execução, além de peso extremamente baixo e geometria praticamente inalterada (JOAQUIM, 2004). Os CRFC apresentam altas resistências mecânicas e a ataques químicos diversos, elevada rigidez, estabilidade térmica e reológica, bom comportamento à fadiga e à atuação de cargas cíclicas, baixo peso específico e não sofrem corrosão (material inerte) (SILVA, 2016).

### 3.1 Propriedades das fibras de carbono

Os compósitos são materiais heterogêneos em que suas propriedades dependem de diversos fatores, sendo os mais influenciáveis os que estão relacionados ao tipo da fibra e sua orientação que pode ser unidirecional, bidirecional ou aleatória (ARAÚJO, 2018). Os CRFC são constituídos por componentes que estão disponíveis no mercado como as resinas, primers, saturantes, adesivos e as fibras, apresentando ótimo desempenho quando usados para o reparo ou reforço estrutural. É um sistema de rápida e fácil aplicação, com baixo peso próprio, elevada resistência à tração e propriedades anticorrosivas (JOAQUIM, 2004).

O ACI 440-2R (ACI, 2008) indica, para os sistemas de compostos estruturais com fibras de carbono, propriedades como módulo de elasticidade que variam entre 220 e 690 GPa e resistência a tração que variam entre 1380 MPa e 6200 MPa. Como pode ser observado na Tabela 1.

**TABELA 1:** Propriedades típicas de tração das fibras de carbono utilizadas nos compósitos

Tipo de Fibra de Carbono	Módulo de elasticidade (GPa)	Resistência máxima de tração (MPa)	Deformação de ruptura mínima (%)
De uso geral	220 – 240	2050 – 3790	> 1.2
Alta resistência	220 – 240	3790 – 4820	> 1.4
Ultra resistência	220 – 240	4820 – 6200	> 1.5
Alto módulo	340 – 520	1720 – 3100	> 0.5
Ultra alto módulo	520 – 690	1380 – 2400	> 0.2

FONTE: Adaptado da ACI 440 – 2R (2008).

As propriedades à tração e rigidez dos CRFC dependem de vários fatores como tipo de fibra, orientação das fibras, qualidade das fibras, método e condições em que as fibras são produzidas. No entanto, levando em consideração a Tabela 1, é possível determinar, por meio das Equações 1 e 2, a resistência à tração e deformação de ruptura dos CRFC, no qual possui um fator de redução ambiental para a minoração das propriedades da fibra de carbono, indicados na Tabela 2 (ACI, 2008).

$$f_{fu} = C_e \cdot f_{fu}^* \quad \text{Eq. [1]}$$

$$\varepsilon_{fu} = C_e \cdot \varepsilon_{fu}^* \quad \text{Eq. [2]}$$

Em que:

$f_{fu}$  = resistência à tração;

$\varepsilon_{fu}$  = deformação de ruptura;

$f_{fu}^*$  = resistência à tração última;

$\varepsilon_{fu}^*$  = deformação de ruptura última;

$C_e$  = fator de redução ambiental.

A deformação de ruptura última também pode ser obtida por meio da Equação 3.

$$\varepsilon_{fu}^* = f_{fu}^* / E_f \quad \text{Eq. [3]}$$

Em que:

$f_{fu}^*$  = resistência a tração última;

$E_f$  = módulo de elasticidade da fibra de carbono.

**TABELA 2:** Fator de redução ambiental para os CRFC e condições de exposição

Condições de exposição	Fator de redução ambiental ( $C_e$ )
Exposição interior	0,95
Exposição exterior (pontes, cais, estacionamentos e etc.)	0,85
Ambientes agressivos (instalações químicas, estações de tratamentos e etc.)	0,85

FONTE: Adaptado da ACI 440-2R (2008).

Os CRFC são construídos com dois componentes distintos, a matriz polimérica e o elemento estrutural constituído pelas fibras de carbono; um proporciona a transferência das tensões, enquanto o outro absorve as tensões de tração. A matriz polimérica deve ter alongamento de ruptura maior do que o das fibras para permitir a continuidade da capacidade de carga mesmo após a tensão na fibra atingir a tensão de

ruptura. Outro fator é que os CRFC devem trabalhar com o critério de fibra com ruptura frágil e matriz polimérica com ruptura dúctil, evitando o colapso do sistema pela ruptura frágil da matriz (MACHADO, 2010).

### 3.2 Modelo de cálculo para momento fletor resistente de vigas em concreto armado

Para o dimensionamento do reforço à flexão com CRFC é necessário realizar o estudo do momento fletor resistente da viga em questão. A ACI 440-2R (ACI, 2008) relata que, para atender aos limites de ductilidade e capacidade de manutenção, a resistência da viga após o reforço deve ser, no máximo 40%, maior que a resistência da viga antes do reforço. Diante disso, usando a NBR 6118 (ABNT, 2014), é possível traçar os diagramas de deformação e esforços internos da seção transversal de vigas submetidas à flexão simples no Estado Limite Último (ELU) e os domínios de deformação para determinação do momento fletor resistente, como indicado na Figura 1.

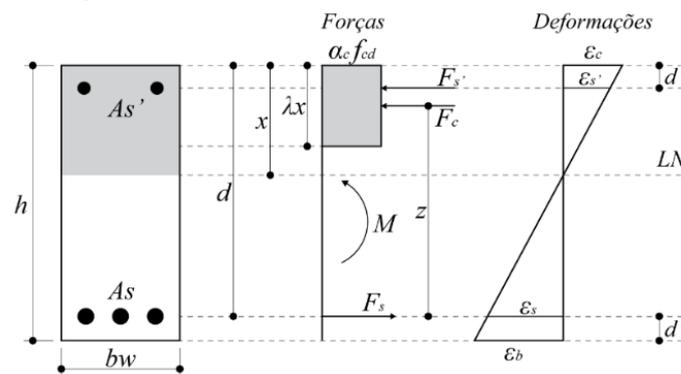


FIGURA 1: Diagrama de esforços e deformação para elementos submetidos à flexão no ELU.

FONTE: O Autor (2021).

Com a Figura 1 é possível determinar o momento fletor resistente, considerando as propriedades dos materiais apresentadas na NBR 6118 (ABNT, 2014) e com a posição das armaduras longitudinais da seção transversal, onde as deformações da seção podem ser calculadas por meio das Equações 4 a 7.

$$\varepsilon_c = \begin{cases} \frac{0,01x}{d-x} & \rightarrow \text{para o domínio 2;} \\ 0,0035 & \rightarrow \text{para o domínio 3 e 4.} \end{cases} \quad \text{Eq. [4]}$$

$$\varepsilon_s' = \begin{cases} \frac{\varepsilon_s(x-d')}{d-x} & \rightarrow \text{para o domínio 2;} \\ \frac{0,0035(x-d')}{x} & \rightarrow \text{para o domínio 3 e 4.} \end{cases} \quad \text{Eq. [5]}$$

$$\varepsilon_s = \begin{cases} 0,01 & \rightarrow \text{para o domínio 2;} \\ \frac{\varepsilon_b(d-x)}{h-x} & \rightarrow \text{para o domínio 3 e 4.} \end{cases} \quad \text{Eq. [6]}$$

$$\varepsilon_b = \begin{cases} \frac{\varepsilon_c(h-x)}{x} & \rightarrow \text{para o domínio 2;} \\ \frac{0,0035(h-x)}{x} & \rightarrow \text{para o domínio 3 e 4.} \end{cases} \quad \text{Eq. [7]}$$

Em que:

$\varepsilon_c$  = deformação do concreto comprimido;  
 $\varepsilon'_s$  = deformação do aço comprimido;  
 $\varepsilon_s$  = deformação do aço tracionado;  
 $\varepsilon_b$  = deformação do concreto tracionado;  
 $d$  = altura útil;  
 $d'$  = diferença entre a altura útil e a altura da viga;  
 $h$  = altura da viga;  
 $x$  = distância da fibra mais comprimida até a linha neutra.

Os esforços de cada elemento na seção transversal podem ser determinados também com base nas propriedades dos materiais prescritas na NBR 6118 (ABNT, 2014) e por meio de alguns conceitos apresentados pela resistência dos materiais, chegando-se nas Equações 8 a 10.

$$F_c = \alpha_c \cdot f_{cd} \cdot \lambda \cdot x \cdot b_w \quad \text{Eq. [8]}$$

$$F'_s = \begin{cases} A'_s \cdot (\varepsilon'_s \cdot E_s) \rightarrow \text{para } \varepsilon'_s < \varepsilon_{yd} = f_{yd} / E_s \\ A'_s \cdot f_{yd} \rightarrow \text{para } \varepsilon'_s \geq \varepsilon_{yd} = f_{yd} / E_s \end{cases} \quad \text{Eq. [9]}$$

$$F_s = \begin{cases} A_s \cdot (\varepsilon_s \cdot E_s) \rightarrow \text{para } \varepsilon_s < \varepsilon_{yd} = f_{yd} / E_s \\ A_s \cdot f_{yd} \rightarrow \text{para } \varepsilon_s \geq \varepsilon_{yd} = f_{yd} / E_s \end{cases} \quad \text{Eq. [10]}$$

Em que:

$F_c$  = esforço resultante no concreto a compressão;  
 $F'_s$  = esforço resultante no aço a compressão;  
 $F_s$  = esforço resultante no aço tracionado;  
 $f_{cd}$  = resistência de cálculo do concreto na compressão;  
 $\alpha_c$  = parâmetro de redução da resistência do concreto na compressão;  
 $\lambda = 0,8$  para  $f_{ck} \leq 50\text{MPa}$ ; ou  $0,8 - (f_{ck} - 50) / 400$  para  $f_{ck} > 50\text{MPa}$ ;  
 $b_w$  = largura da viga;  
 $A'_s$  = área de aço comprimida;  
 $E_s$  = módulo de elasticidade do aço;  
 $f_{yd}$  = resistência ao escoamento de cálculo do aço;  
 $A_s$  = área de aço tracionada.

O momento fletor resistente pode ser determinado pelo somatório dos momentos em relação a qualquer ponto da seção transversal. Ou seja, calculando o somatório dos momentos na posição das armaduras tracionadas, o momento em relação à resultante de tensões no concreto comprimido, com base na Figura 1, é possível determinar as Equações 11 e 12, para a determinação do momento fletor resistente da peça (SILVA, 2016).

$$\sum M_{Rd1} = F_c \left( d - \frac{\lambda x}{2} \right) + F'_s (d - d') = M_{Rd} \quad \text{Eq. [11]}$$

$$\sum M_{Rd2} = F'_s \left( \frac{\lambda x}{2} - d' \right) + F_s \left( d - \frac{\lambda x}{2} \right) = M_{Rd} \quad \text{Eq. [12]}$$

Em que:

$M_{Rd}$  = momento fletor resistente da peça;

$\sum M_{Rd1}$  = somatório dos momentos fletores na posição das armaduras tracionadas;

$\sum M_{Rd2}$  = somatório dos momentos fletores na posição do esforço resultante do concreto comprimido.

Igualando as equações 11 e 12, encontra-se a Equação 13, apresentada a seguir:

$$F_s' \left( \frac{\lambda x}{2} - d' \right) + F_s' \left( d - \frac{\lambda x}{2} \right) - F_c \left( d - \frac{\lambda x}{2} \right) - F_s' (d - d') = 0 \quad \text{Eq. [13]}$$

Entretanto, para a determinação de alguns dos valores da Equação 13 é necessário que antes seja determinada a posição da linha neutra ( $x$ ). Com isso, por meio de um processo iterativo, estimam-se valores de  $x$  até que a equação seja verdadeira e assim o valor real de  $x$  terá sido encontrado.

### 3.3 Condição inicial da viga existente

A presença de algum tipo de carregamento sobre a estrutura ou apenas a ação do peso próprio causa a deformação do substrato onde será aplicado o reforço (BEBER, 2003). O nível inicial da deformação pode ser feito por meio da análise elástica do elemento estrutural, considerando as cargas atuantes no instante da aplicação do reforço. A ACI 440-2R (ACI, 2008) recomenda que a análise seja feita com base nas propriedades da seção transversal fissurada, estágio II, e com base nos conceitos dos fundamentos da elasticidade, a deformação pré-existente no substrato do concreto pode ser determinada por meio da Equação 14.

$$\varepsilon_{bi} = \frac{M_i \cdot (h - x_{II})}{I_{II} \cdot E_{cs}} \quad \text{Eq. [14]}$$

Em que:

$\varepsilon_{bi}$  = deformação inicial do concreto tracionado;

$M_i$  = momento fletor atuante no instante da aplicação do reforço;

$x_{II}$  = altura da linha neutra no estágio II;

$I_{II}$  = momento de inércia da seção homogeneizada de concreto;

$E_{cs}$  = módulo de elasticidade secante do concreto.

O momento de inércia homogeneizado e a altura da linha neutra podem ser determinados por meio das Equações 15 e 16 (BEBER, 2003).

$$\frac{b_w \cdot x_{II}^2}{2} + (\alpha_e - 1) \cdot A_s' \cdot (x_{II} - d') - \alpha_e \cdot A_s \cdot (d - x_{II}) = 0 \quad \text{Eq. [15]}$$

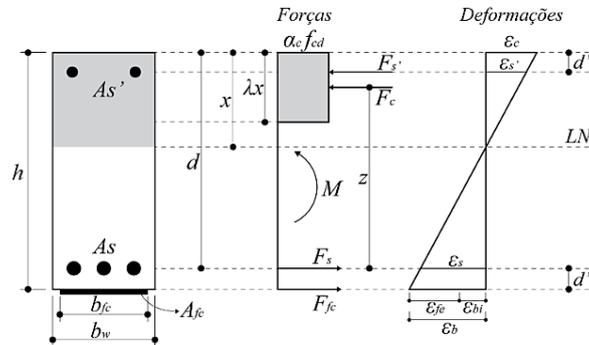
$$I_{II} = \frac{b_w \cdot x_{II}^3}{3} + (\alpha_e - 1) \cdot A_s' \cdot (x_{II} - d')^2 + \alpha_e \cdot A_s \cdot (d - x_{II})^2 \quad \text{Eq. [16]}$$

Em que:

$\alpha_e$  = Relação entre o módulo de elasticidade do aço e do concreto:  $\alpha_e = E_s / E_{cs}$ .

### 3.4 Modelo de cálculo do reforço de vigas à flexão com CRFC no Estado Limite Último (ELU)

O método de cálculo para o reforço com CRFC apresentado é embasado nos procedimentos prescritos na ACI 440-2R (ACI, 2008), adaptada para as propriedades dos materiais recomendadas pela NBR 6118 (ABNT, 2014). Na Figura 2, pode ser observado o diagrama de esforços e deformações da seção reforçada com fibra de carbono, base para as formulações do dimensionamento do reforço levando em consideração o ELU.



**FIGURA 2:** Diagrama de esforços e deformação para elementos submetidos a flexão no ELU.

**FONTE:** Adaptado do ACI 440-2R (2008).

Por meio da Figura 2, é possível determinar o momento fletor resistente da viga reforçada com fibra de carbono, é possível determinar as deformações de cada elemento ao longo da seção, sendo idênticas nas Equações 4, 5, 6 e 7, com uma diferença, a ACI 440-2R (ACI, 2008) relata que a deformação efetiva da fibra de carbono é encontrada por meio da diferença entre a deformação no nível do reforço com CRFC e a deformação pré-existente quando aplicado o reforço, devido a atuação das cargas permanentes após o descarregamento da estrutura, como pode ser observada na Equação 17, onde a deformação efetiva da fibra de carbono é limitada à deformação máxima de ruptura limitada por um fator de redução.

$$\varepsilon_{fe} = (\varepsilon_b - \varepsilon_{bi}) \leq k_m \cdot \varepsilon_{fu} \quad \text{Eq. [17]}$$

Em que:

$\varepsilon_{fe}$  = deformação efetiva da fibra de carbono;

$\varepsilon_b$  = deformação no nível do reforço com CRFC;

$k_m$  = fator limitador da deformação atuante no sistema CRFC;

$\varepsilon_{bi}$  = deformação pré-existente.

Segundo Machado (2010), para evitar que aconteça o descolamento das lâminas de fibra de carbono da superfície do concreto quando o substrato não resiste às forças atuantes no sistema CRFC, é utilizado um fator limitador da deformação, este fator é regido pela Equação 18.

$$k_m \begin{cases} \frac{1}{60 \cdot \varepsilon_{fu}} \left( 1 - \frac{n \cdot E_f \cdot t_f}{360000} \right) \leq 0,90 \rightarrow \text{para } n \cdot E_f \cdot t_f \leq 180000 \\ \frac{1}{60 \cdot \varepsilon_{fu}} \left( \frac{90000}{n \cdot E_f \cdot t_f} \right) \leq 0,90 \rightarrow \text{para } n \cdot E_f \cdot t_f > 180000 \end{cases} \quad \text{Eq. [18]}$$

Em que:

n = número de camadas de CRFC;

$t_f$  = espessura da camada de fibra de carbono;

$k_m$  = fator limitador da deformação atuante no sistema CRFC.

A determinação dos esforços resultantes na seção transversal é feita por meio de alguns conceitos da resistência dos materiais. Entretanto, Machado (2002) recomenda a utilização de um fator de redução da tensão resistente do concreto, Equação 19, o qual varia de acordo com a deformação do concreto.

$$\psi = \begin{cases} \psi = 1 \rightarrow \text{para, } \varepsilon_c = \varepsilon_{cu} \\ \psi = 1,25 \times \left( 1 - \frac{\varepsilon_{c2}}{3\varepsilon_c} \right) \rightarrow \text{para, } \varepsilon_{c2} < \varepsilon_c < \varepsilon_{cu} \\ \psi = \frac{2,5}{3} \times \sqrt{\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c3}}} \rightarrow \text{para, } \varepsilon_c < \varepsilon_{c2} \end{cases} \quad \text{Eq. [19]}$$

Em que:

$\psi$  = fator de redução da tensão resistente do concreto;

$\varepsilon_{c2}$  = deformação específica de encurtamento do concreto no início do patamar plástico;

$\varepsilon_{cu}$  = deformação específica de encurtamento do concreto na ruptura.

Logo, determinam-se os esforços na seção transversal por meio das Equações 20 a 23.

$$F_c = \psi \cdot \alpha_c \cdot f_{cd} \cdot \lambda \cdot x \cdot b_w \quad \text{Eq. [20]}$$

$$F'_s = \begin{cases} A'_s \cdot (\varepsilon'_s \cdot E_s) \rightarrow \text{para } \varepsilon'_s < \varepsilon_{yd} = f_{yd}/E_s \\ A'_s \cdot f_{yd} \rightarrow \text{para } \varepsilon'_s \geq \varepsilon_{yd} = f_{yd}/E_s \end{cases} \quad \text{Eq. [21]}$$

$$F_s = \begin{cases} A_s \cdot (\varepsilon_s \cdot E_s) \rightarrow \text{para } \varepsilon_s < \varepsilon_{yd} = f_{yd}/E_s \\ A_s \cdot f_{yd} \rightarrow \text{para } \varepsilon_s \geq \varepsilon_{yd} = f_{yd}/E_s \end{cases} \quad \text{Eq. [22]}$$

$$F_{fe} = \psi_f \cdot A_{fc} \cdot f_{fe}, \text{ onde } f_{fe} = E_{fc} \cdot \varepsilon_{fe} \quad \text{Eq. [23]}$$

Em que:

$F_{fe}$  = esforço resultante na fibra de carbono;

$A_{fc}$  = área de fibra de carbono;

$\psi_f$  = fator de redução da resistência da fibra de carbono.

A ACI 440-2R (ACI, 2008) relata que o uso dos CRFC para o reforço à flexão provoca uma redução na ductilidade do elemento estrutural, recomendando o uso do fator de redução da resistência, que varia em função da deformação do aço, conforme a Equação 24.

$$\phi = \begin{cases} \phi = 0,65, \text{ para } \varepsilon_s \leq \varepsilon_{yd} \\ \phi = 0,65 + 0,25 \cdot \left( \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_{yd}}{0,005 - \varepsilon_{yd}} \right), \text{ para } \varepsilon_{yd} < \varepsilon_s < 0,005 \\ \phi = 0,9, \text{ para } \varepsilon_s \geq 0,005 \end{cases} \quad \text{Eq. [24]}$$

Em que:

$\phi$  = fator de redução da resistência devido a redução da ductilidade do elemento estrutural.

Com o princípio do somatório dos momentos em relação a qualquer ponto da seção transversal ser igual ao momento fletor resistente (SILVA, 2016), adapta-se esse conceito para a determinação do momento fletor resistente da viga reforçada com CRFC, ou seja, com o somatório dos momentos na posição das armaduras tracionadas, o somatório dos momentos em relação ao ponto da resultante de tensões no concreto comprimido e, com base na Figura 2, determinam-se as Equações 25 e 26.

$$\phi \left[ \sum M_{Rd,fc1} \right] = \phi \left[ M_{Rd,fc} \right] \rightarrow \phi \left[ M_{Rd,fc} \right] = \phi \left[ F_c \cdot \left( h - \frac{\lambda x}{2} \right) + F_s' \cdot (h - d') - F_s \cdot d'' \right] \quad \text{Eq. [25]}$$

$$\phi \left[ \sum M_{Rd,fc2} \right] = \phi \left[ M_{Rd,fc} \right] \rightarrow \phi \left[ M_{Rd,fc} \right] = \phi \left[ F_s' \cdot \left( \frac{\lambda x}{2} - d' \right) + F_s \cdot \left( d - \frac{\lambda x}{2} \right) + F_{fe} \cdot \left( h - \frac{\lambda x}{2} \right) \right] \quad \text{Eq. [26]}$$

**Em que:**

$M_{Rd,fc}$  = momento fletor resistente da viga reforçada com CRFC;

$\sum M_{Rd,fc1}$  = somatório dos momentos fletor na posição das armaduras tracionada;

$\sum M_{Rd,fc2}$  = somatório dos momentos fletor em relação ao ponto de aplicação do esforço resultante do concreto comprimido.

Igualando as Equações 25 e 26, encontra-se a Equação 27.

$$\phi \left[ F_s' \cdot \left( \frac{\lambda x}{2} - d' \right) + F_s \cdot \left( d - \frac{\lambda x}{2} \right) + F_{fe} \cdot \left( h - \frac{\lambda x}{2} \right) \right] - \phi \left[ F_c \cdot \left( h - \frac{\lambda x}{2} \right) + F_s' \cdot (h - d') - F_s \cdot d'' \right] = 0 \quad \text{Eq. [27]}$$

Entretanto, para a determinação de alguns dos valores deve-se antes adotar uma área de fibra de carbono e uma posição para linha neutra onde, por meio de um processo iterativo, estimam-se valores para ambos até que a Equação 27 seja verdadeira encontrando, assim, os valores reais da área de fibra de carbono e linha neutra. A área de fibra de carbono pode ser determinada por meio da Equação 28.

$$A_f = n \cdot t_f \cdot b_f \quad \text{Eq. [28]}$$

**Em que:**

$n$  = número de camadas de fibra de carbono;

$t_f$  = espessura de uma camada de fibra de carbono;

$b_f$  = largura da camada de fibra de carbono;

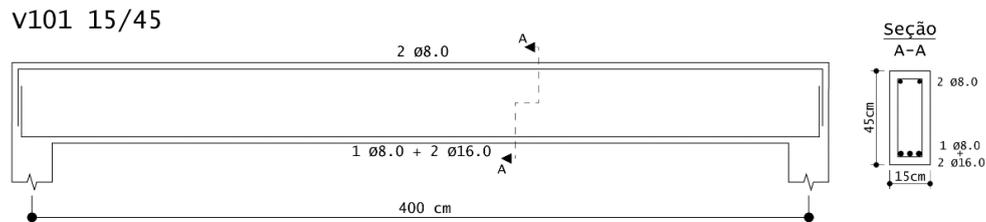
Ao encontrar o momento fletor resistente da viga reforçada com CRFC é necessário compará-lo com o momento fletor solicitante; caso o momento fletor resistente seja menor que o solicitante, será necessário realizar um novo processo iterativo, adotando uma nova área de fibra de carbono.

**4 METODOLOGIA**

Os estudos relacionados ao reforço de estruturas de concreto armado são amplos em todo o mundo; entretanto, o Brasil ainda carece de normas relacionadas ao tema. Diante disso, foi realizada uma revisão bibliográfica, definindo critério para a seleção de trabalhos relacionados. O artigo foi embasado na ACI 440-2R (ACI, 2008) e adotando-se as propriedades dos materiais recomendadas pela NBR 6118 (ABNT, 2014). O levantamento bibliográfico para o complemento do estudo foi realizado por meio de base de dados bibliográficas – SciELO e Google Acadêmicos, sendo selecionados, inicialmente, trabalhos com títulos relevantes e outras normas a respeito do assunto no intervalo dos anos de 2000 a 2020. Além disso, foi elaborada uma situação problema com o intuito de realizar a aplicação das teorias relacionadas para a análise do comportamento do reforço à flexão com os CRFC.

#### 4.1 Problema proposto

A viga adotada como referência para o presente estudo foi obtida por meio de um modelo de edificação teórica. Na Figura 3, é apresentado o detalhamento da viga estudada, onde esta é bi apoiada, com seção de 15x45cm, vão equivalente de 4m, concreto C25 e aço CA-50, com uma área de aço comprimida de 1,0053 cm<sup>2</sup> (2x Ø 8.0) e área de aço tracionada de 4,525 cm<sup>2</sup> (2xØ16.0 e 1xØ8.0), com estribos de Ø6.3 e classe de agressividade ambiental II e cobrimento de 3cm para vigas. Foi criada a hipótese de mudança de função da estrutura, onde foi adicionada uma carga de 2,5 kN/m de carga permanente e a acidental mudou de 3,375 kN/m para 8 kN/m, sendo necessária a verificação da necessidade do reforço.



**FIGURA 3:** Viga adotada como referência para o dimensionamento do reforço a flexão com fibra de carbono.

**FONTE:** O Autor (2021).

As propriedades para a fibra de carbono adotadas para o problema foram as de “De uso geral” presentes na Tabela 1, com módulo de elasticidades de 240 GPa, resistência à tração última de 3790 MPa, deformação de ruptura última de 1,58‰ e coeficiente de redução ambiental de 0,95.

#### 4.2 Cálculo do momento fletor resistente da viga

Inicialmente, é necessário determinar o momento fletor resistente da seção transversal antes do reforço com CRFC, pois o ACI 440-2R (ACI, 2008) recomenda que não seja utilizado o reforço com CRFC em casos em que o novo esforço atuante exceda 40% da capacidade resistente da peça de concreto armado. Para determinar o momento fletor resistente da peça é necessário, antes, determinar as deformações e os esforços de cada elemento da seção. Sendo assim, foram realizadas iterações com o valor da posição da linha neutra até que a Equação 13 seja satisfatória, com critério de  $-0,05 \leq 0 \leq 0,05$  para o resultado. Com as iterações, foi determinado que a posição da linha neutra é 0,0902m e com base nas prescrições da norma NBR 6118 (ABNT, 2014), o limite do domínio 2 é 0,10585 m (0,259d) e o limite do domínio 3 é 0,2568 m (0,6283d), o que indica a seção trabalhando no domínio 2, encontrando os seguintes valores para as deformações:

$$\begin{aligned}\varepsilon_c &= \frac{0,01x}{d-x} = \frac{0,01 \cdot 0,0902}{0,4087 - 0,0902} \approx \mathbf{0,002832} \\ \varepsilon_s' &= \frac{\varepsilon_s(x-d')}{d-x} = \frac{0,01 \cdot (0,0902 - 0,0413)}{0,4087 - 0,0902} \approx \mathbf{0,001535} \\ \varepsilon_s &= \varepsilon_{s,u} = \mathbf{0,01} \\ \varepsilon_b &= \frac{\varepsilon_c(h-x)}{x} = \frac{0,002832 \cdot (0,45 - 0,0902)}{0,0902} \approx \mathbf{0,01130}\end{aligned}$$

Com os valores das deformações encontrados, determinaram-se os esforços resultantes para cada elemento da seção por meio das Equações 8, 9 e 10, chegando-se aos seguintes valores:

$$\begin{aligned}F_c &= \alpha_c \cdot f_{cd} \cdot \lambda \cdot x \cdot b_w \approx \mathbf{164,29kN} \\ F_s' &= A_s' \cdot (\varepsilon_s' \cdot E_s) \approx \mathbf{32,406kN} \\ F_s &= A_s \cdot f_{yd} \approx \mathbf{196,74kN}\end{aligned}$$

Ao originar os esforços de cada elemento na seção transversal da peça é possível determinar, por meio da Equação 13, se a linha neutra adotada está correta. A equação foi encontrada por meio da igualdade do somatório dos momentos em relação à resultante de tensões no aço tracionado e o somatório dos momentos em relação à resultante de tensões no concreto comprimido; caso o resultado se encontre no critério  $-0,05 \leq 0 \leq 0,05$ , a linha neutra adotada para a iteração será satisfatória. Com isso, o momento fletor resistente pode ser determinado pela Equação 11 ou pela Equação 12.

$$F_s' \left( \frac{\lambda x}{2} - d' \right) + F_s \left( d - \frac{\lambda x}{2} \right) - F_c \left( d - \frac{\lambda x}{2} \right) - F_s' (d - d') \rightarrow -0,05 \leq 0 \leq 0,05$$

$$-0,16916 + 73,309 - 61,22 - 11,906 \approx \mathbf{0,0164} \rightarrow \mathbf{Ok!}$$

$$\sum M_{Rd2} = F_s' \left( \frac{\lambda x}{2} - d' \right) + F_s \left( d - \frac{\lambda x}{2} \right) = M_{Rd}$$

$$M_{Rd} = 32,406 \cdot (-0,00522) + 196,74 \cdot (0,37262) \approx \mathbf{73,139kN.m}$$

Logo, o momento fletor resistente de cálculo é 73,140 kNm, dividindo pelo coeficiente de majoração 1,4 (ABNT, 2014), encontra-se o momento fletor resistente característico de 52,243 kNm. Com o momento fletor resistente característico determina-se a carga distribuída, chegando a 26,1215kN/m, sabendo que desse valor, 3,375 kN/m é respectivo a sobrecarga de uso e 22,7465 kN/m a cargas permanentes. Com as novas cargas atuantes na estrutura, tem-se 25,2465 kN/m, respectivo a cargas permanentes e 8 kN/m, respectivo a sobrecarga de uso, totalizando 33,2465 kN/m e momento fletor de 66,493 kNm, que ao se multiplicar pelo coeficiente de majoração de 1,4, encontra-se o momento fletor de cálculo atuante de 93,09 kNm. Sendo possível determinar a necessidade ou não da realização do reforço por meio da razão entre momento fletor de cálculo atuante e momento fletor resistente de cálculo chegando à diferença de 27,3%, não excedendo os 40%.

### 4.3 Condições iniciais da viga a ser reforçada

Antes de iniciar o dimensionamento do reforço propriamente dito é necessário realizar cálculo de algumas características pré-existentes na viga, pois mesmo com o descarregamento da estrutura, a mesma sofre deformações devido ao seu peso próprio ou cargas permanentes atuantes na estrutura. Para a determinação da deformação pré-existente, é necessário encontrar a linha neutra e o momento de inércia no estágio II. Os mesmos podem ser determinados por meio das Equações 15 e 16.

$$\frac{b_w \cdot x_{II}^2}{2} + (\alpha_e - 1) \cdot A_s' \cdot (x_{II} - d') - \alpha_e \cdot A_s \cdot (d - x_{II}) = 0$$

$$x_{II} = \mathbf{0,12m}$$

$$I_{II} = \frac{b_w \cdot x_{II}^3}{3} + (\alpha_e - 1) \cdot A_s' \cdot (x_{II} - d')^2 + \alpha_e \cdot A_s \cdot (d - x_{II})^2$$

$$I_{II} = \mathbf{0,0004193m^4}$$

Com os resultados obtidos para a linha neutra e o momento de inércia se torna viável a determinação da deformação pré-existente, onde o momento fletor atuante no instante da aplicação do reforço será o momento fletor devido às cargas permanentes (22,7465 kN/m) antes do reforço, encontrando 45,493 kNm, gerando o seguinte resultado para a deformação pré-existente com base na Equação 14:

$$\varepsilon_{bi} = \frac{M_i \cdot (h - x_{ii})}{I_{ii} \cdot E_{cs}} \approx 0,0014826 \approx \mathbf{0,14826\%}$$

#### 4.4 Dimensionamento do reforço à flexão

Com propriedades apresentadas, a posição das armaduras e com a área de fibra de carbono é possível determinar o momento fletor resistente da peça reforçada; entretanto, a determinação da área de fibra de carbono segue um processo iterativo com diferentes valores até que a condição do momento fletor de cálculo seja menor ou igual ao momento fletor resistente da viga reforçada seja satisfeita. Sendo assim, inicialmente foi adotada uma lâmina de fibra de carbono com 0,05cm de espessura e largura de 12 cm.

$$A_f = n \cdot t_f \cdot b_f = \mathbf{0,60\text{cm}^2}$$

Foram realizadas iterações com o valor da posição da linha neutra até que a Equação 27 fosse satisfatória para determinação do momento fletor resistente da viga reforçada, adotando o critério de  $-0,05 \leq \rho \leq 0,05$  para o resultado. Com a realização das iterações foi determinado que a posição da linha neutra é cerca de 0,1312 m e com base nas prescrições da norma NBR 6118 (ABNT, 2014), o limite do domínio 2 é 0,10585m (0,259d) e o limite do domínio 3 é 0,2568 m (0,6283d), o que indica a seção quando reforçada trabalhará no domínio 3, encontrando os seguintes valores para as deformações:

$$\begin{aligned} \varepsilon_c &= \varepsilon_{cu} = \mathbf{0,0035} \\ \varepsilon'_s &= \frac{0,0035(x - d')}{x} = \frac{0,0035(0,1275 - 0,0413)}{0,1275} \approx \mathbf{0,002398} \\ \varepsilon_s &= \frac{\varepsilon_b(d - x)}{h - x} \approx \mathbf{0,007403} \\ \varepsilon_b &= \frac{0,0035(h - x)}{x} = \frac{0,0035(0,45 - 0,1275)}{0,1275} \approx \mathbf{0,008505} \end{aligned}$$

Com o valor obtido para a deformação pré-existente, item 4.3, é possível determinar a deformação efetiva na fibra de carbono por meio da Equação 17, como relatado a seguir.

$$\begin{aligned} \varepsilon_{fe} &= (\varepsilon_b - \varepsilon_{bi}) \leq k_m \cdot \varepsilon_{fu} \\ \varepsilon_{fe} &= (0,008505 - 0,0014826) = \mathbf{0,007021} \leq k_m \cdot \varepsilon_{fu} = \mathbf{0,0111} \rightarrow \mathbf{Ok!} \end{aligned}$$

Com os valores das deformações encontradas, é possível determinar as forças de cada elemento da seção reforçada por meio das Equações 20 a 23, chegando aos seguintes valores:

$$\begin{aligned} F_c &= \psi_c \cdot \alpha_c \cdot f_{cd} \cdot \lambda \cdot x \cdot b_w = \mathbf{238,971\text{kN}} \\ F'_s &= A'_s \cdot f_{yd} = \mathbf{43,704\text{kN}} \\ F_s &= A_s \cdot f_{yd} = \mathbf{196,739\text{kN}} \\ F_{fe} &= \psi_f \cdot A_{fc} \cdot f_{fe} = \mathbf{85,941\text{kN}} \end{aligned}$$

Ao determinar as forças de cada elemento na seção transversal da peça reforçada por meio da Equação 27, é possível determinar se a linha neutra adotada está correta; a equação foi encontrada por meio da igualdade do somatório dos momentos fletores em relação ao ponto de aplicação do esforço resultante

na fibra de carbono e o somatório dos momentos fletores em relação ao ponto de aplicação do esforço resultante no concreto comprimido. Caso o resultado se encontre no critério  $-0,05 \leq 0 \leq 0,05$ , a linha neutra adotada para a iteração realizada estará correta. Com isso, o momento fletor resistente da viga reforçada pode ser determinado pela Equação 25 ou 26 que parte do princípio de que o somatório dos momentos fletores em relação a qualquer ponto da seção transversal deve ser igual ao momento fletor resistente.

$$\phi \left[ F_s' \left( \frac{\lambda x}{2} - d' \right) + F_s \left( d - \frac{\lambda x}{2} \right) + F_{fe} \left( h - \frac{\lambda x}{2} \right) \right] - \phi \left[ F_c \left( h - \frac{\lambda x}{2} \right) + F_s' (h - d') - F_s d'' \right] \rightarrow -0,05 \leq 0 \leq 0,05$$

$$0,9 \cdot [0,4886 + 70,0824 + 34,1634] - 0,9 \cdot [94,9959 + 17,8619 - 8,1253] \approx 0,002 \rightarrow \text{Ok!}$$

$$\sum M_{Rd,fc2} = F_s' \left( \frac{\lambda x}{2} - d' \right) + \phi \left[ F_s \left( d - \frac{\lambda x}{2} \right) + F_{fe} \left( h - \frac{\lambda x}{2} \right) \right] = M_{Rd,fc}$$

$$M_{Rd,fc} = 94,261 \text{ kN.m} \geq M_{Rd} = 93,09 \text{ kN.m} \rightarrow \text{Ok!}$$

## 5 RESULTADOS E DISCURSÕES

Inicialmente, foram feitos os cálculos referentes a capacidade portante da viga, ou seja, seu momento fletor resistente antes do reforço com CRFC de modo a observar a necessidade ou não do reforço. Os cálculos foram realizados por meio da iteração da posição da linha neutra até que a Equação 13 se encontre no critério de  $-0,05 \leq 0 \leq 0,05$ . Sendo assim, pode ser observado no Quadro 1 as iterações realizadas para a obtenção do momento fletor resistente, chegando a um resultado satisfatório na terceira iteração.

QUADRO 1: Iterações realizadas para a determinação do momento fletor resistente da viga estudada.											
Iter.	x	Dom.	$F_c$ (kN)	$\epsilon_c$ (%)	$F_s'$ (kN)	$\epsilon_s'$ (%)	$F_s$ (kN)	$\epsilon_s$ (%)	$\epsilon_b$ (%)	$\sum M_{Rd,1} - \sum M_{Rd,2}$	$M_{Rd}$ (kNm)
1	0,05000	2	91,071	0,1394	5,120	0,0243	196,7391	1,0	1,1151	39,083	x
2	0,09000	2	163,929	0,2824	32,257	0,1528	196,7391	1,0	1,1296	0,206	x
3	0,09021	2	164,311	0,2832	32,417	0,1536	196,7391	1,0	1,1297	0,004	73,139

FONTE: O Autor (2020).

Diante dos resultados obtidos na terceira iteração, é possível construir os diagramas de esforços e deformações internas da seção em questão, chegando na Figura 4, onde pode ser observado que a seção se encontra no domínio 2 e com momento fletor resistente de 73,139 kNm. Ao comparar com o novo momento fletor atuante de 93,09 kNm, encontra-se uma diferença de cerca de 27,3%, sendo menor que 40%, indicando a possibilidade da realização do reforço, conforme a ACI 440-2R (ACI, 2008).

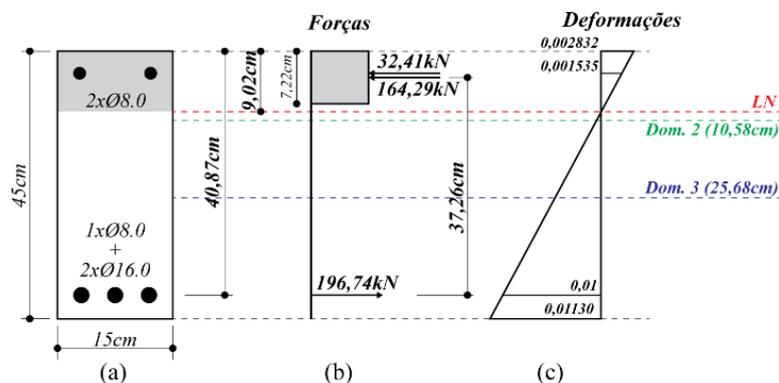


FIGURA 4: Seção transversal, diagramas de esforços e deformações internas antes do reforço. (a) Seção transversal, (b) diagrama de esforços internos e (c) diagrama de deformações internas.

FONTE: O Autor (2020).

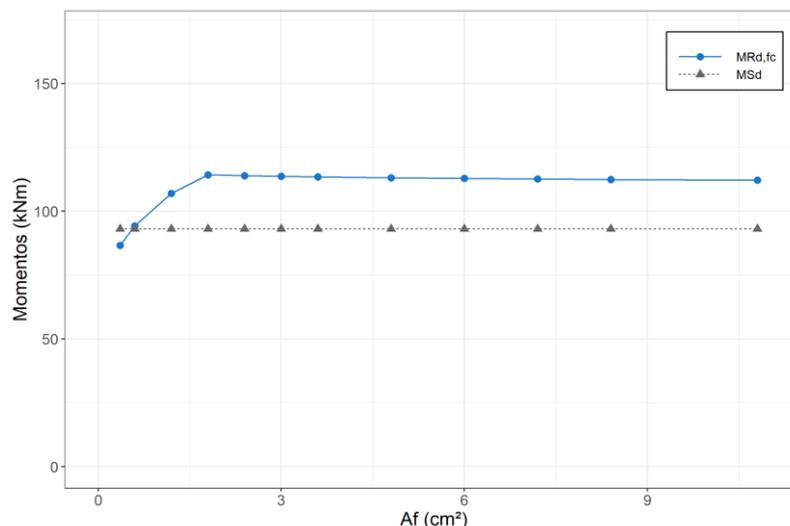
Com a verificação da necessidade do reforço, foram realizados os cálculos referentes a utilização do CRFC para a readequação da viga. Diante disso, foram feitas iterações escolhendo um valor para a área de fibra de carbono e depois realizando a iteração com valores para posição da linha neutra, até que a Equação 27 se encontrasse no critério de  $-0,05 \leq \rho \leq 0,05$ . Com isso, encontra-se o momento fletor resistente da peça reforçada com fibra de carbono e posteriormente compara-se com o novo momento fletor atuante. Caso o momento fletor resistente seja menor que o momento fletor atuante é necessário realizar novas iterações.

Assim, pode ser observado nos Quadros 2 e 3 todas as iterações realizadas; contudo, a fim de realizar uma melhor análise do comportamento da seção reforçada, foram feitas mais iterações, aumentando progressivamente a área de fibra de carbono, sendo removidas todas que apresentaram status de “Erro!”. No Quadro 2, é possível ver o comportamento dos esforços internos com o aumento da área de fibra de carbono e ao observar a partir da 20ª iteração o momento resistente começa a decrescer, como também ilustrado na Figura 5, onde a viga apresenta um ganho de resistência alto com pouca área de fibra de carbono, cerca de 64% a mais de resistência com a adição de  $1,8 \text{ cm}^2$  de fibra de carbono; após esse pico, a resistência da viga começa a cair mesmo com a valores maiores para área de fibra de carbono. Isso acontece, pois a viga começa a sair do comportamento dúctil e entrar no comportamento frágil, com aço tracionado e fibra de carbono trabalhando abaixo das capacidades recomendadas pela NBR 6118 (ABNT, 2014) e ACI 440-2R (ACI, 2008).

**QUADRO 2:** Iterações realizadas para a determinação do momento fletor resistente da viga reforçada e estudo dos esforços resultantes na seção estudada.

Iter.	x	Dom.	$A_f$ ( $\text{cm}^2$ )	$F_c$ (kN)	$F_s$ (kN)	$F_s$ (kN)	$\psi_f F_{fe}$ (kN)	$\sum M_{Rd,fc1} - \sum M_{Rd,fc2}$	$M_{Rd,fc}$ (kNm)	$M_{Sd}$ (kNm)	Status
5	0,117820	3	0,36	214,601	43,704	196,739	61,577	0,0043	86,578	93,089	Não ok!
8	0,131200	3	0,60	238,971	43,704	196,739	85,941	0,0019	94,261	93,089	Ok!
13	0,154260	3	1,20	280,974	43,704	196,739	127,952	0,0053	106,959	93,089	Ok!
16	0,170160	3	1,80	309,934	43,704	196,739	156,896	-0,0012	114,277	93,089	Ok!
20	0,182300	3	2,40	332,046	43,704	196,739	179,017	0,0019	113,929	93,089	Ok!
24	0,192085	3	3,00	349,869	43,704	196,739	196,836	0,0006	113,661	93,089	Ok!
27	0,200235	3	3,60	364,714	43,704	196,739	211,694	0,0054	113,449	93,089	Ok!
30	0,213225	3	4,80	388,374	43,704	196,739	235,335	-0,0015	113,103	93,089	Ok!
35	0,223240	3	6,00	406,616	43,704	196,739	253,609	0,0100	112,849	93,089	Ok!
38	0,231292	3	7,20	421,282	43,704	196,739	268,255	0,0027	112,630	93,089	Ok!
44	0,237940	3	8,40	433,391	43,704	196,739	280,361	0,0019	112,449	93,089	Ok!
51	0,248352	3	10,80	452,355	43,704	196,739	299,323	0,0009	112,160	93,089	Ok!

FONTE: O Autor (2020).



**FIGURA 5:** Comportamento do momento fletor resistente com o aumento da área de fibra de carbono.

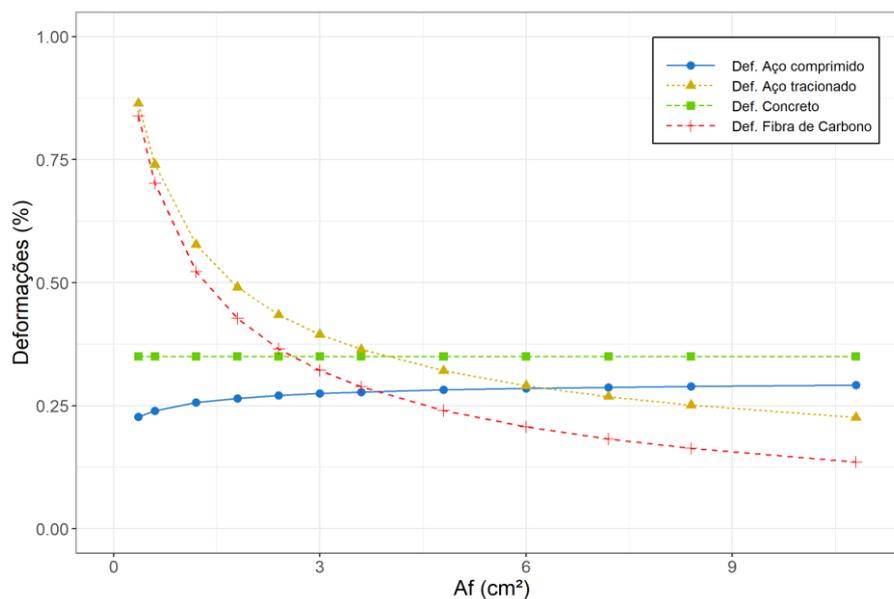
FONTE: O Autor (2020).

No Quadro 3, pode ser observado o comportamento das deformações internas da viga reforçada, aumentando progressivamente a área de CRFC. Expondo assim, que as deformações tendem a diminuir com o crescimento da área de fibra de carbono. A linha neutra deve ser reposicionada para que ocorra o equilíbrio de esforços internos, fazendo com que a viga saia do domínio 2 e passe para o domínio 3. Deste modo, apresentando um comportamento dúctil até a 20ª iteração, visto que NBR 6118 (ABNT, 2014) limita o valor da distância da linha neutra em 45% da altura útil da viga. Após esse limite, a viga começa a apresentar um comportamento frágil e antieconômico. Na Figura 6 pode ser observada uma melhor representação dessa variação.

**QUADRO 3:** Iterações realizadas para a determinação do momento fletor resistente da viga reforçada e estudo das deformações atuantes na seção estudada.

Iter.	x	Dom.	$A_f$ (cm <sup>2</sup> )	$\epsilon_c$ (%)	$\epsilon'_s$ (%)	$\epsilon_s$ (%)	$\epsilon_{sj}$ (%)	$\epsilon_{fe}$ (%)	$\sum M_{Rd,fc1}$ $-\sum M_{Rd,fc2}$	$M_{Rd,fc}$ (kNm)	$M_{Sd}$ (kNm)	Status
5	0,117820	3	0,36	0,35000	0,22731	0,86410	0,14832	0,83846	0,0043	86,578	93,089	Não ok!
8	0,131200	3	0,60	0,35000	0,23982	0,74028	0,14832	0,70214	0,0019	94,261	93,089	Ok!
13	0,154260	3	1,20	0,35000	0,25629	0,57730	0,14832	0,52268	0,0053	106,959	93,089	Ok!
16	0,170160	3	1,80	0,35000	0,26505	0,49065	0,14832	0,42728	-0,0012	114,277	93,089	Ok!
20	0,182300	3	2,40	0,35000	0,27071	0,43467	0,14832	0,36564	0,0019	113,929	93,089	Ok!
24	0,192085	3	3,00	0,35000	0,27475	0,39470	0,14832	0,32163	0,0006	113,661	93,089	Ok!
27	0,200235	3	3,60	0,35000	0,27781	0,36439	0,14832	0,28825	0,0054	113,449	93,089	Ok!
30	0,213225	3	4,80	0,35000	0,28221	0,32086	0,14832	0,24033	-0,0015	113,103	93,089	Ok!
35	0,223240	3	6,00	0,35000	0,28525	0,29077	0,14832	0,20720	0,0100	112,849	93,089	Ok!
38	0,231292	3	7,20	0,35000	0,28750	0,26846	0,14832	0,18264	0,0027	112,630	93,089	Ok!
44	0,237940	3	8,40	0,35000	0,28925	0,25118	0,14832	0,16361	0,0019	112,449	93,089	Ok!
51	0,248352	3	10,80	0,35000	0,29180	0,22598	0,14832	0,13586	0,0009	112,160	93,089	Ok!

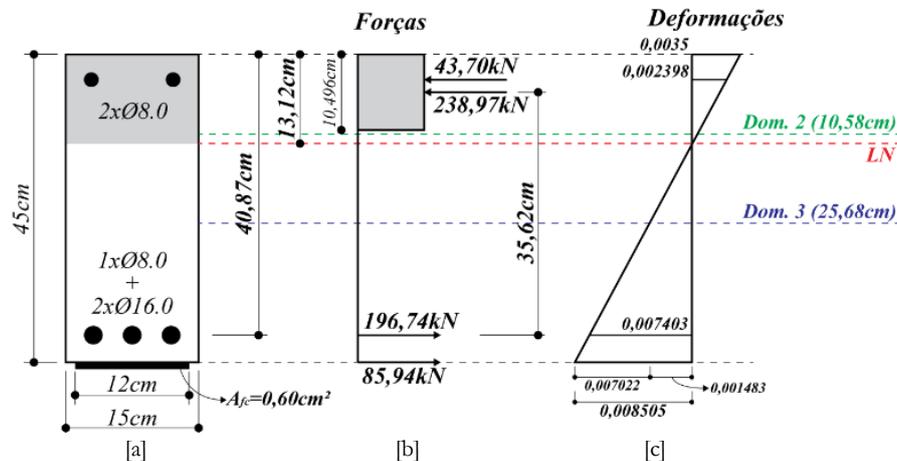
FONTE: O Autor (2020).



**FIGURA 6:** Comportamento das deformações com o aumento da área de fibra de carbono.

FONTE: O Autor (2020).

Ao analisar a Figura 6, observa-se que o melhor resultado acontece na 8ª iteração com valor igual a  $0,60 \text{ cm}^2$  e uma linha neutra de  $0,1312 \text{ m}$ , trabalhando entre o limite do domínio 2 e o limite de ductilidade ( $0,45d$ ), garantindo o comportamento dúctil da peça. Diante disso, é possível construir os diagramas de esforços e deformações internas da seção reforçada, chegando na Figura 7, com o momento fletor resistente da viga reforçada maior que o momento fletor atuante,  $94,261 \text{ kNm}$  e  $93,089 \text{ kNm}$ , respectivamente.



**FIGURA 7:** Seção transversal reforçada com CRFC. [a] Seção transversal reforçada, [b] diagrama de esforços internos e [c] diagrama deformações internas com CRFC.

Fonte: O Autor (2020).

É importante ressaltar a necessidade de verificação dos estados limites de serviço do (ELS) devido sua imprescindível importância para análise da segurança e conforto dos usuários. Quando a estrutura estiver em utilização, é indispensável a checagem dos principais critérios e limites de deformação, vibrações, abertura e formação de fissuras, visto que tais verificações não foram realizadas no presente artigo.

## 6 CONCLUSÃO

Após o desenvolvimento do presente estudo, observam-se as principais vantagens e desvantagens do método de reforço de viga à flexão com CRFC. Diversos fatores como, agressividade ambiental, alteração da seção transversal do elemento, mão de obra, situações de incêndio, urgência da obra e custo, devem ser analisados para viabilidade do uso dos CRFC. As principais vantagens a serem destacadas no uso da fibra de carbono é seu baixo impacto na geometria do elemento estrutural, com um impacto visual praticamente insignificante para a arquitetura, alta resistência a corrosão, tornando-se ideal em situações de elevado grau de agressividade, além de apresentar um tempo de execução baixo. Entretanto, as principais desvantagens ficam por conta das situações de incêndio, visto que a resina utilizada para a colagem da fibra de carbono no elemento estrutural, não apresenta comportamento satisfatório nessas situações, podendo ocasionar o descolamento da fibra de carbono e, por consequência, o colapso brusco do elemento estrutural. Outras desvantagens ficam por conta da necessidade de mão de obra especializada e alto custo final.

É imprescindível observar que, em casos em que vigas originalmente dimensionadas no limite de ductilidade, quando reforçadas, fatalmente irão ultrapassar esse limite. Sendo assim, é de suma importância a análise da seção para a garantia do comportamento dúctil da viga. Em geral, o reforço de vigas submetidas à flexão com CRFC, apresentam um grande potencial devido suas excelentes propriedades mecânicas e seu uso no reforço de estruturas de concreto armado deve ser precedida de uma análise rigorosa do projetista.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE-ACI. **Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures (440.2R-08)**. Farmington Hills, MI, 2008, 76 p. ISBN: 978-0-87031-285-4.

ARAÚJO, R. Y. A. **Reforço à Flexão de Vigas de Concreto Armado com Fibras de Carbono Utilizando o ACI 440. 2R e a NBR 6118 Adaptada**. 2018. 81p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Civil) - Departamento de Engenharia Civil - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal – RN, 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/40732>

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT. **NBR 6118 - Projeto de estruturas de concreto - Procedimento**. Brasil, 2014. p. 256.

BEBER, A. J. **Comportamento Estrutural de Vigas de Concreto Armado Reforçadas com Compósitos de Fibra de Carbono**. 2003. 317p. Tese (Doutorado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Rio Grande do Sul, Porto Alegre - RS, 2003. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/2974>

JOAQUIM, M. C.; EINSFELD, R. A.; VELASCO, M. de S. L. **Modelo Analítico para Dimensionamento de Reforço à Flexão de Vigas em Concreto Armado Utilizando Compósitos de Fibras de Carbono**. 2004. 97p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2004. Disponível em: [https://www2.dbd.puc-rio.br/pergamum/biblioteca/php/mostrateses.php?open=1&arqtese=0124951\\_04\\_Indice.html](https://www2.dbd.puc-rio.br/pergamum/biblioteca/php/mostrateses.php?open=1&arqtese=0124951_04_Indice.html)

MACHADO, A. de P. **Reforço de estruturas de concreto armado com fibras de carbono: características, dimensionamento e aplicação**. São Paulo: Pini, 2002.

MACHADO, A. de P. **Manual de reforço das estruturas de concreto armado com fibras de carbono**. São Paulo: Better, 2010.

SILVA, A. S. C. **Análise de vigas de concreto armado reforçadas à flexão e ao cisalhamento com fibras de carbono: abordagem teórica e computacional**. 2016. 220p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas, Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, 2016. Disponível em: <https://repositorio.ufba.br/handle/ri/21389>