

DIMENSIONAMENTO DO REFORÇO ESTRUTURAL DE FIBRA DE CARBONO EM VIGAS DE CONCRETO ARMADO: UMA ABORDAGEM COMPUTACIONAL EM PYTHON PARA ENGENHARIA CIVIL.**DESIGN OF CARBON FIBER REINFORCED POLYMER (CFRP) FOR REINFORCED CONCRETE BEAMS: A PYTHON COMPUTATIONAL APPROACH.**João Gabriel Ferreira da Silva¹Gustavo Marques Calazans Duarte²**RESUMO**

Este trabalho de conclusão de curso tem o objetivo de elaborar um software, denominado de FERREIRACFC, para o dimensionamento de reforço estrutural em fibras de carbono em vigas de concreto armado. Visto que a vida útil do concreto armado é um tema de discussão constante por causa das manifestações patológicas e cargas excessivas. Essas estruturas enfrentam os desafios relacionados à retração e ao desgaste por flexão e cisalhamento, resultantes de diversos agentes patológicos oriundos das ações físico-químicas e mecânicas. Diante disso, o desenvolvimento do software foi realizado por meio da linguagem de programação Python em conjunto com a ferramenta de designer PYQT5, e a implementação das normas da ACI 440.2R-17, NBR 6118:2023 e a “Metodologia do manual de reforço das estruturas de concreto armado com fibras de carbono”, de Ari de Paula Machado de 210. Este tem como objetivo auxiliar na busca por soluções para as retrações devido manifestações patológicas e evitar que ocorra os erros nos cálculos manuais de dimensionamento do reforço de estruturas em concreto armado. Para a validação do programa, foi necessário a utilização de método comparativo, envolvendo o dimensionamento do reforço estrutural em fibra de carbono no primeiro vão de uma viga de transição do trabalho de conclusão de curso realizado pela autora Bruna Rafaella Gonçalves de Lorenzi, em 2018, com o dimensionamento realizado pelo software. Por fim, o uso da ferramenta se mostrou importante para o desenvolvimento futuro de projetos com qualidade e eficiência no âmbito da engenharia estrutural, além de ser utilizado para o auxílio dos engenheiros patologistas.

Palavras-chave: reforço estrutural; concreto armado; fibras de carbono; Python.

ABSTRACT

This undergraduate thesis aims to develop software, named FERREIRACFC, for the structural reinforcement design using carbon fibers in reinforced concrete beams. Considering that the service life of reinforced concrete is a constant topic of discussion due to pathological manifestations and excessive loads, these structures face challenges related to shrinkage and wear due to flexural and shear forces, resulting from various pathological agents originating from physical-chemical and mechanical actions. Therefore, the software development was carried out using the Python programming language in conjunction with the PYQT5 designer tool, implementing the standards of ACI 440.2R-17, NBR 6118:2023, and the "Methodology of the manual for reinforcing reinforced concrete structures with carbon fibers" by Ari de Paula Machado, 2010. Its objective is to assist in finding solutions for shrinkage due to pathological manifestations and to prevent errors in manual calculations for the reinforcement dimensioning of reinforced concrete structures. To validate the program, a comparative method was necessary, involving the design of carbon fiber structural reinforcement in the first span of a transition beam in the undergraduate thesis conducted by the author Bruna Rafaella Gonçalves de Lorenzi in 2018, comparing

¹ Graduando em Engenharia Civil – Universidade Federal Rural do Semiárido² Mestre em Engenharia Civil – Universidade Federal Rural do Semiárido

it with the design performed by the software. Finally, the use of this tool has proven to be important for the future development of projects with quality and efficiency in the field of structural engineering, as well as for assisting pathologist engineers.

Keywords: structural reinforcement; reinforced concrete; carbon fibers; Python.

1 INTRODUÇÃO

A vida útil do concreto armado é um ponto de debate devido as manutenções preventivas realizadas ao longo dos anos. Essas estruturas enfrentam desafios relacionados à retração e ao desgaste por flexão e cisalhamento da peça, resultantes de uma variedade de manifestações patológicas causadas por ações da natureza.

Diante disso, há menos de vinte anos, pesquisas avançaram em compósitos estruturados com fibras de carbono, geralmente encontrados como mantas ou barras, caracterizados por seu baixo peso específico, cerca de 4 a 5 vezes mais leves que o aço. As suas características se variam de acordo com os fatores como tipo volume das fibras e método de fabricação. Segundo Silva (2016), os sistemas de compósitos estruturados com fibras de carbono, também conhecidos como Polímeros Reforçados com Fibra de Carbono (PRFC), são caracterizados por sua alta resistência mecânica, excelente resistência a diferentes produtos químicos, rigidez elevada, estabilidade térmica e reológica, boa resistência à fadiga e à carga cíclica, baixo peso específico e resistência à corrosão devido à sua inércia química.

Para mitigar, reparar e solucionar completamente as manifestações patológicas, tornou-se necessário o aprofundamento do conhecimento de normas técnicas, como a NBR 6118 (ABNT, 2023), e a ACI 440. 2R (American Concrete Institute, 2017), juntamente com o uso da tecnologia computacional. A combinação dessas metodologias oferece soluções para diagnosticar e tratar uma ampla variedade de manifestações patológicas, além de auxiliar na redução de erros humanos para o cálculo estrutural, os quais podem comprometer a segurança e a qualidade de uma estrutura.

Diante disso, para mitigar, reparar e solucionar completamente essas manifestações patológicas, tornou-se necessário o aprofundamento do conhecimento de normas técnicas, como a NBR 6118 (ABNT, 2023) e a ACI 440. 2R (American Concrete Institute, 2017), juntamente com o uso da tecnologia computacional. A combinação dessas metodologias oferece soluções para diagnosticar e tratar uma ampla variedade de manifestações patológicas, além de auxiliar na redução de erros humanos para o cálculo estrutural, os quais podem comprometer a segurança e a qualidade de uma estrutura.

Deste modo, este trabalho tem como objetivo a elaboração de um software, denominado de FERREIRACFC, voltado para o dimensionamento do reforço estrutural em CFC (Compósitos de Fibra de Carbono) em vigas, esse software será desenvolvido por meio da linguagem de programação Python em conjunto com a ferramenta de design PYQT5, e considerará os princípios estabelecidos nas normas da ACI 440.2R (American Concrete Institute, 2017) e a metodologia do “Manual de reforço das estruturas de concreto armado com fibras de carbono”, em Machado (2010), adaptadas pela NBR 6118 (ABNT, 2023). Para validar a precisão do programa, será realizado um estudo comparativo entre os resultados obtidos pelo dimensionamento do reforço à flexão e ao cisalhamento do primeiro vão de uma viga de concreto armado em transição com CFC, por meio do software e por Lorenzi (2018).

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Referencial teórico

O dimensionamento de vigas em concreto armado segue as normas técnicas da ACI 440.2R (American Concrete Institute, 2017), e a metodologia do Manual de reforço das estruturas de concreto armado com fibras de carbono de Machado (2010), adaptadas pela NBR 6118 (ABNT, 2023). Essas normas fornecem diretrizes e procedimentos para o dimensionamento correto do reforço estrutural em vigas de concreto armado, considerando os diversos aspectos como flexão e do cisalhamento.

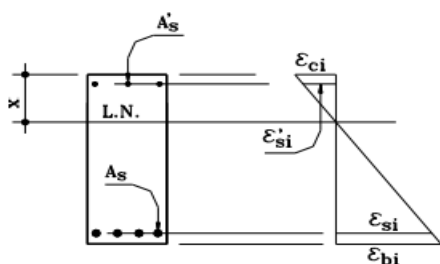
2.1.1 Dimensionamento do reforço à flexão com compósito de fibra de carbono (CFC)

O cálculo da resistência à flexão de uma estrutura de concreto armado reforçado com fibras de carbono é baseado em alguns pontos pré-estabelecidos. Segundo Machado (2010, p. 57), os estudos e cálculos deverão ser efetuados baseados nas dimensões existentes das seções e da quantidade da distribuição das armaduras de aço, assim como das propriedades e características mecânicas dos materiais constituintes do elemento de concreto a ser reforçado. De acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2023), após a ocorrência dos carregamentos, as seções transversais permanecem planas e as deformações são linearmente proporcionais à sua distância à linha neutra, desprezando a resistência à tração do concreto. Outro ponto importante é a deformação do concreto:

- segundo a NBR 6118 (ABNT, 2023), ela não pode ultrapassar 3,5‰ quando submetidas à flexão;
- segundo a ACI 440. 2R ((American Concrete Institute, 2017), ela não pode ultrapassar 3,0‰.

Para a aderência entre o sistema composto CFC e o substrato de concreto, esta deve ser perfeita e a deformação será considerada linear até a ruptura no sistema composto CFC. Diante disso, a Figura 1 mostra esquematicamente como as deformações são distribuídas em uma seção transversal:

Figura 1 – Distribuição de deformações em uma seção transversal.



Fonte: Adaptada de Machado (2010).

Segundo o ACI 440.2R ((American Concrete Institute, 2017), ϵ_{bi} é a deformação inicial na viga antes da aplicação do reforço, e deve ser subtraída da deformação final encontrada para a fibra de carbono, para que o nível de tensão em que a fibra atuará possa ser estabelecido. Essa deformação é fornecida pela seguinte equação:

$$\varepsilon_{fc} = (\varepsilon_b - \varepsilon_{bi}) \leq \varepsilon_{fu} \quad (1)$$

Em que:

ε_b é a deformação na fibra considerada no reforço para o carregamento máximo (%);

ε_{bi} é a deformação pré-existente quando da instalação do reforço de fibra de carbono (%).

As normas técnicas do ACI Committee 440 recomendam que o cálculo do reforço à flexão por meio de CFC seja elaborado no estado limite último e que no dimensionamento da capacidade resistente à flexão de um elemento deve exceder a demanda estrutural. Para entender como ocorrem as possibilidades distintas para o ocasionar a ruptura das peças de concreto armado:

- 1- A ruptura por escoamento do aço antes do esmagamento do concreto.
- 2- Ruptura por escoamento do aço antes da ruptura do sistema CFC.
- 3- Ruptura por esmagamento do concreto antes da ruptura por escoamento do aço.
- 4- Ruptura do sistema compósito CFC antes da ruptura por escoamento do aço.

Os modos de ruptura 1 e 2 caracterizam um comportamento dúctil da estrutura, o que é desejável. Os modos de ruptura 3 e 4 caracterizam um comportamento frágil da estrutura, menos desejável que o anterior (MACHADO, 2002, p. 59).

Diante disso, o uso do FERREIRACFC é destinado para o dimensionamento focado na distribuição de deformação no domínio 2 da seção. Logo após verificado essas informações anteriores, o cálculo do reforço de uma viga de concreto armado com a utilização de CFC deve ser efetuado de acordo com o passo a passo a seguir, reforçado por Cristof; Zeni; Bueno (2021, p. 5) e Machado (2010, p. 59):

- a) Determinação do momento fletor calculado solicitado máximo que será aplicado na viga, M_d (kN.m);
- b) Calcular o momento resistente à flexão da viga por meio das características geométricas da seção e das características mecânicas dos materiais constituintes, M_{Rd1} (KN*m). Essas características estão presentes na Figura 1;
- c) Comparar se momento atuante é maior do que o momento resistente de cálculo da viga, caso isso ocorra, conclui-se que a viga necessita de reforço;

Com a definição da escolha da ruptura no domínio 2 em que a deformação da peça se encontra, é calculado a profundidade da linha neutra (x) por meio da seguinte equação:

$$x = (A_s \cdot f_{yd} - A'_s \cdot f_{yd}) / (0,85 \cdot f_{cd} \cdot b_w \cdot 0,8) \quad (2)$$

Em que:

A_s é a área de aço tracionada da seção (cm²);

f_{yd} é a tensão de escoamento de cálculo do aço (kN/cm²).

f_{cd} é a resistência de cálculo à compressão do concreto (kN/cm²);

b_w é a base da seção (cm);

A'_s é área de aço comprimida da seção (cm²).

Essa equação é válida para concretos com f_{ck} abaixo de 50 Mpa e não é válida para seções transversais em que a largura diminui em direção à borda mais comprimida.

Após realizada a verificação dos momentos atuantes, o passo seguinte é a escolha do tipo da lâmina de carbono a ser inserida no reforço, bem como o módulo de elasticidade, deformação de ruptura, espessura e tensão última de tração. Essas informações são obtidas por meio do fabricante, entretanto, o número de fitas e as dimensões da lâmina são arbitradas sendo um processo iterativo de cálculo ou calculado pela área necessária de CFC.

Para Machado (2010, p.62), o momento resistente de uma viga de concreto armado

reforçada com sistemas compostos de fibra de carbono (item b da seção 2.1) é constituído dos seguintes esforços componentes:

F_c – força resultante da seção comprimida do concreto (kN).

F'_s - força resultante da seção comprimida da armadura (kN).

F_s - força resultante da seção tracionada da armadura (kN).

F_f - força resultante da seção tracionada de fibra de carbono (kN).

Com a implementação das diretrizes da NBR 6118 (ABNT, 2023), a equação para o cálculo do momento resistente passa a ser:

$$M_{Rd1} = F_c \cdot (d - 0,4 \cdot x) + F'_s \cdot (d - d') \quad (3)$$

Em que:

d' é a diferença entre a altura total e a altura útil da seção (cm).

O módulo de elasticidade do concreto para o valor de f_{ck} menor de 50 Mpa deve ser estabelecido de acordo com o método de ensaio presente na NBR 6118 (ABNT, 2023):

$$E_c = 5600 \cdot \sqrt{f_{ck}} \quad (4)$$

Em que:

E_c e f_{ck} são dados em MPa.

Esse modulo deve ser calculado para que seja implementado no cálculo da relação entre módulo de elasticidade do aço e o módulo de elasticidade do concreto.

De acordo com Guarda (2005), a posição da Linha Neutra no Estádio II é determinada a partir da equação de 2º grau:

$$X_{11} = \frac{-[(a_e - 1) \cdot A'_s + a_e \cdot A_s] + \sqrt{[(a_e - 1) \cdot A'_s + a_e \cdot A_s]^2 - 2 \cdot b_w \cdot [-d' \cdot (a_e - 1) \cdot A'_s - d \cdot a_e \cdot A_s]}}{b_w} \quad (5)$$

Em que:

a_e é a relação entre módulo de elasticidade do aço e o módulo de elasticidade do concreto.

Por meio da linha neutra no Estádio II, é possível calcular o Momento de Inércia a partir da seguinte expressão:

$$I_{11} = (b_w \cdot x_{11}^3) / 3 + a_e \cdot A_s \cdot (d - x_{11})^2 + a_e \cdot A'_s \cdot (x_{11} - d')^2 \quad (6)$$

Em que:

I_{11} é determinado em cm⁴.

As deformações iniciais podem ser calculadas seguindo os critérios do ACI 440.2R (American Concrete Institute, 2017) com a adaptação dos conceitos da NBR 6118 (ABNT, 2023). Essas deformações estão presentes no Quadro 1. O nível de deformação da armadura de aço comprimida (ϵ'_s) obtêm-se por meio de semelhança de triângulos o qual relaciona os níveis de deformação das armaduras de aço, com a altura em que elas se encontram, conforme equação (8) da Quadro 1.

Quadro 1 – Deformações iniciais para a verificação da linha neutra.

Deformação da armadura de aço tracionada (7)	$\varepsilon_s = \sigma_s / E_s$
Deformação máxima do concreto (8)	$\varepsilon_c = \varepsilon_s \cdot x_{11} / (d - x_{11})$
Deformação da armadura de aço comprimida (9)	$\varepsilon'_s = \varepsilon_c \cdot (x_{11} - d') / x_{11}$
Deformação efetiva (10)	$\varepsilon_0 = \varepsilon_c \cdot (h - x_{11}) / x_{11}$

Fonte: Autoria própria (2023).

Logo em seguida é determinado o reforço. Primeiro deve-se realizar o cálculo de iteração em torno do valor da profundidade da linha neutra pelas equações (11) e (12) submetidas à equilíbrio em F_s e F_c , sendo que o valor da profundidade da linha neutra calculada deve estar dentro do limite do valor da profundidade da linha neutra encontrada no início do processo do dimensionamento, quando isso ocorre, são definidos o equilíbrio interno das forças e a compatibilidade das deformações, conforme Machado (2010). Em caso da profundidade da linha neutra calculada não estiver de acordo, o processo de cálculo deve ser refeito arbitrando-se outra profundidade da linha neutra e/ou utilizando outro tipo e quantidade de camadas da lâmina de fibra de carbono.

$$\text{Equilíbrio em } F_s : F_{fc} \geq [M_{sd} - F_c \cdot (d - 0,4 \cdot x) - F'_s \cdot (d - d')] / (\psi_f \cdot (h - d)) \quad (11)$$

$$\text{Equilíbrio em } F_c : F_{fc} \geq [M_{sd} - F_s \cdot (d - 0,4 \cdot x) - F'_s \cdot (0,4 \cdot x - d')] / (\psi_f \cdot (h - 0,4 \cdot x)) \quad (12)$$

Em que:

Ψ_f é o fator de redução da tensão resistente do concreto (recomendado: 0,85).

Após todas as determinações anteriores e a verificação do equilíbrio das forças, é calculado novamente a deformação efetiva, porém, utilizando o novo valor da profundidade da linha neutra. Essa deformação contribuirá para a equação (13), para encontrar o valor da área necessária de CFC.

$$A_{fc} = F_{fc} / \sigma_{fc} \quad (13)$$

Em que:

σ_{fc} é a tensão no reforço adotado (MPa).

Com o valor da área necessária, é possível finalizar o dimensionamento ao calcular a quantidade de fitas utilizadas para o reforço e verificar se o reforço atende as verificações das deformações finais e do descolamento do reforço, caso essas verificações estiverem de acordo, o reforço estrutural utilizando o sistema composto CFC é verificado como eficiente e deve ser observado que a relação entre o esforço atuante e resistente do projeto não podem ser superior à 1,4 vezes o esforço resistente, essa verificação determinada pelo ACI 440.2R (American Concrete Institute, 2017), não recomenda a utilização do CFC como reforço para a viga de concreto armado.

O dimensionamento estrutural parte do pressuposto de que a armadura superior está atingindo o seu limite de escoamento, logo se ela não atingir esse ponto, o dimensionamento torna-se inválido. Para resolver esse problema, uma solução é não considerar a contribuição da armadura superior no cálculo.

2.1.2 Dimensionamento do reforço à cisalhamento com compósito de fibra de carbono (CFC)

O dimensionamento do reforço à cisalhamento com CFC inicia pela escolha do tipo de lâmina de carbono a ser utilizado e como se dá o seu envelopamento na seção da viga a ser trabalhada. Segundo a norma ACI 440.2R (American Concrete Institute, 2017), esse tipo de cobrimento pode ser completo, na região lateral ou ainda em forma de “U”, elas estão representadas na Figura 2.

Figura 2 –Tipos de envolvimento para o dimensionamento do reforço à cisalhamento com CFC.



Fonte: Adaptada de ACI 440.2R (2017).

Dando sequência ao dimensionamento, a determinação da resistência nominal do estribo necessário ao corte é elaborada por meio de um somatório que, segundo Cristof; Zeni; Bueno (2021, p. 7), “representa o somatório da resistência ao corte do concreto, dos estribos de aço e do reforço majorado por um coeficiente redutor de acordo com o tipo de aplicação da lâmina de fibra de carbono na viga”.

Com as propriedades da lâmina de carbono fornecidas pelo fabricante, é calculado a deformação da fibra, sendo calculada pelo envolvimento pré-estabelecido. Em seguida, é determinada a resistência total da viga ao cisalhamento e estabelecida a verificação dessa resistência, se for maior ou igual à cortante atuante na viga, o reforço é eficiente. Todas as expressões para o dimensionamento do reforço ao cisalhamento da viga estão apresentadas na Quadro 2.

Quadro 2 – Equações para o dimensionamento do reforço à cisalhamento com CFC.

(1) $\phi V_n = \phi(V_c + V_s + W_f \cdot V_f)$	(8) Caso 1 $E f_e = 0,004 \leq 0,75 \cdot E f_u$ Caso 2 $E f_e = K \cdot E f_u \leq 0,004$
(2) $f_{fu} = C_E \cdot f \cdot f_u$	(9) $A f_v = 2 \cdot n \cdot t f \cdot w f$
(3) $E f_u = C_E \cdot E \cdot f_u$	(10) $f_{fe} = E f_e \cdot E f$
(4) $L_e = \frac{23300}{(n f \cdot t f \cdot E f)^{0,58}}$	(11) $S_f = \frac{A f_v \cdot f_{fe} \cdot (\text{sen} \alpha + \text{cos} \alpha) \cdot d_{fv}}{V_f} \leq \frac{d}{4} + w f$
(5) $K_1 = \left(\frac{E' c}{27}\right)^{\frac{2}{3}}$	(12) $V_f = \frac{A f_v \cdot f_{fe} \cdot (\text{sen} \alpha + \text{cos} \alpha) \cdot d_{fv}}{S_f}$
(6) Caso 1 $K_2 = \frac{d_{fv} - L_e}{d_{fv}}$ Caso 2 $K_2 = \frac{d_{fv} - 2 L_e}{d_{fv}}$	(13) $\phi V_n = \phi(V_c + V_f + W_f \cdot V_f) \geq \phi V_u$ $W_f = 0,85$
(7) $K = \frac{K_1 \cdot K_2 \cdot L_e}{11900 \cdot E f_u}$	

Fonte: Adaptada de Cristof; Zeni; Bueno (2021, p.7).

Em que:

(1) é a resistência nominal do estribo necessário ao corte (kN);

- (2) é a tensão última de tração de projeto (MPa);
- (3) é a deformação de ruptura de projeto do CFC (%);
- (4) é o comprimento ativo de colagem do laminado (mm);
- (5) , (6) e (7) constantes de cálculo de envolvimento;
- (8) são as deformações efetivas (%);
- (9) é a área de reforço ao corte (mm²);
- (10) é a tensão efetiva no CFC (MPa);
- (11) é o espaçamento entre as lâminas (mm);
- (12) é a resistência do reforço CFC ao corte (kN);
- (13) é a resistência ao corte (kN).

2.2 Material e métodos

2.2.1 Linguagem de programação

O Python é uma linguagem de programação conhecida por ser de fácil aprendizado para o usuário, graças à sua interpretação lógica e capacidade de aplicação direta no código. Essa linguagem é amplamente utilizada em diversas áreas de estudo e no mercado, oferecendo um alto nível de funcionalidade para auxiliar no dimensionamento de cálculos estruturais. Isso proporciona uma maior praticidade na criação de software de cálculos destinados a resolução de uma ampla gama de problemas na engenharia civil.

Segundo Borges (2010), a linguagem de programação Python foi desenvolvida por Guido Van Rossum em 1990, no Instituto Nacional de Pesquisa para Matemática e Ciência da Computação da Holanda (CWI). O foco inicial foi o de atender às necessidades de físicos e engenheiros. Essa linguagem de programação apresenta diversos recursos, tais como facilidade de uso para o usuário, simplicidade de aprendizado, uma sintaxe intuitiva e com diversas bibliotecas abertas que auxiliam os programadores.

Para o desenvolvimento do programa foi necessário a implementação do código auxiliado com o Visual Studio Code, que é um editor de código-fonte e do programa de designer denominado de PYQT5. Enquanto o usuário cria o código dentro do Visual Studio em Python, concomitantemente, o programa de designer produz a interface do software. Isso só é possível por causa da importação da biblioteca agregada ao PYQT5 dentro do Python.

2.2.2 Interface de início

O FERREIRCFC foi desenvolvido para ser intuitivo e de fácil manuseio, a interface da tela inicial contém o título do software, bem como a opção de mudar de janela para os seguintes tópicos:

- Descrição;
- Tabelas e infos;
- Normas e Referências;
- Sobre;

Além dessas opções, na seção de início é disponibilizado as duas opções de reforço para que o usuário possa escolher, separadas em “Reforço A” e “Reforço B”. Sendo o primeiro utilizado para o dimensionamento do reforço à flexão com CFC e o outro destinado para o cisalhamento. Tal como mostrado na Figura 3.

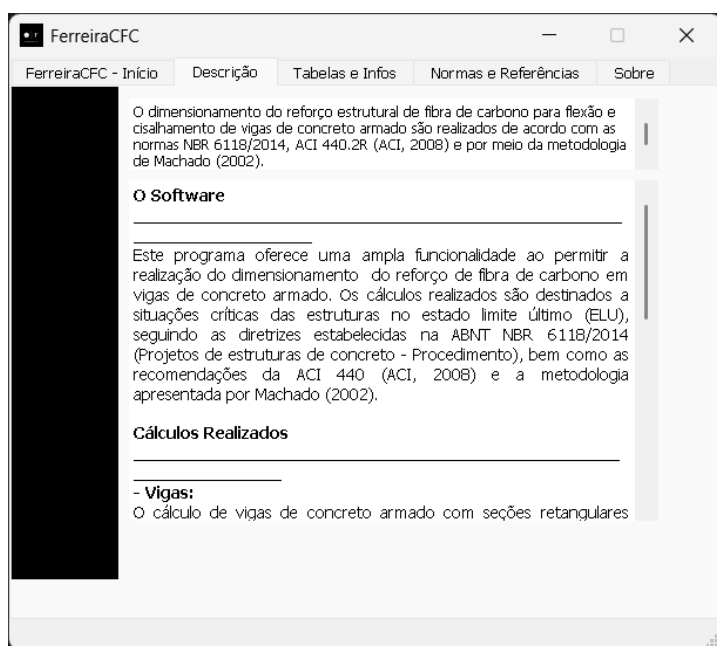
Figura 3 – Interface da tela inicial do software.



Fonte: Autoria própria (2023).

A seção “Descrição” contém as informações pertinentes sobre o software, bem como as normas utilizadas para o dimensionamento dos dois reforços, além de relatar como é realizado o passo a passo do dimensionamento de cada reforço dentro do programa. A Figura 4 mostra como é a interface da seção.

Figura 4 – Interface da tela “Descrição” do FERREIRACFC.



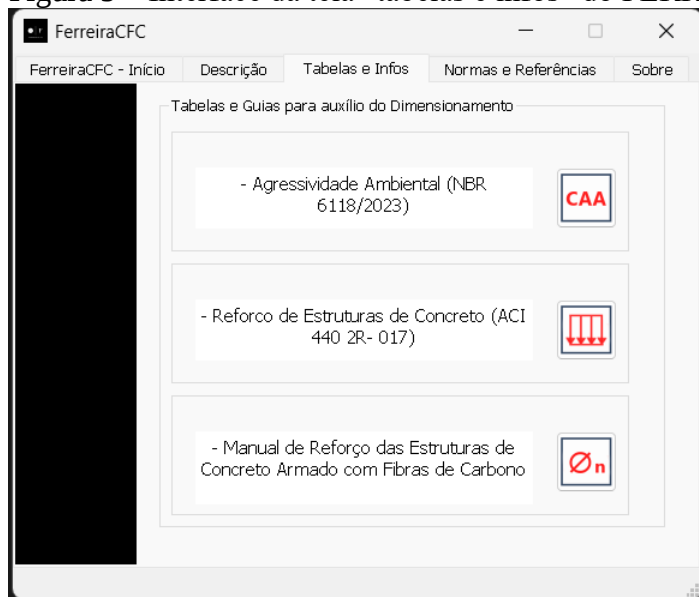
Fonte: Autoria própria (2023).

A seção “Tabelas e Infos” é composta pelas bibliografias que contribuem para o dimensionamento do software, nessa seção o usuário pode ter acesso as diretrizes da NBR6118 (ABNT, 2023) e ACI 440. 2R (American Concrete Institute, 2017). Também é possível ter

acesso ao “Manual de Reforço das Estruturas de Concreto Armado com Fibras de Carbono” (MACHADO, 2010). Esses documentos são fundamentais para auxiliar o dimensionamento dos reforços, e a interface dessa seção está ilustrada na Figura 5.

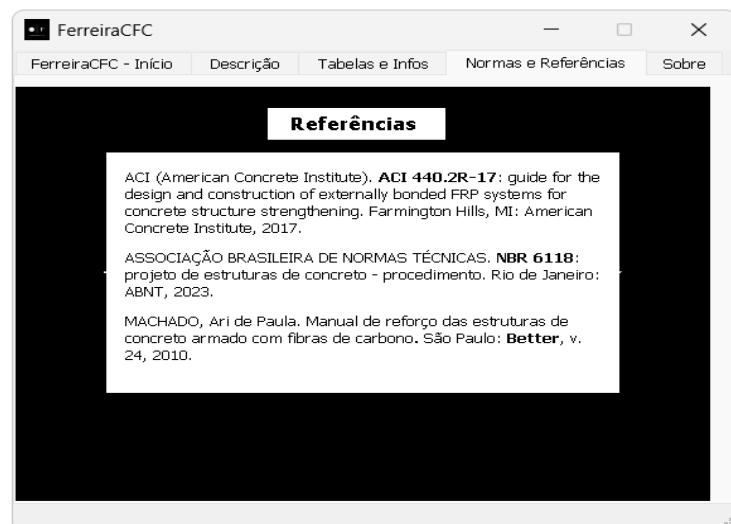
A interface de início encerra com as duas últimas seções “Normas e Referências” e “Sobre”, a primeira aponta as referências utilizadas para a realização dos cálculos dos reforços, e a última evidencia algumas informações finais sobre o software. As Figuras 6 e 7, expõe essas seções.

Figura 5 – Interface da tela “tabelas e infos” do FERREIRACFC.



Fonte: Autoria própria (2023).

Figura 6 – Interface da tela “Normas e Referências” do FERREIRACFC.



Fonte: Autoria própria (2023).

Figura 7 – Interface da tela “Normas e Referências” do FERREIRACFC.



Fonte: Autoria própria (2023).

2.2.3 Reforço A e B

Na tela de início, após a seleção do tipo de reforço a ser dimensionado, o usuário perceberá que uma nova tela abrirá para que seja fornecida a entrada de dados.

O “Reforço A” é a interface que representa o dimensionamento do reforço à flexão com CFC em vigas, nela encontra-se imagens que auxiliam o usuário na interpretação dos dados de entrada da geometria da seção da viga e dados referentes à geometria do CFC que será empregado. A primeira parte do código remete-se a criação das variáveis que estão atreladas aos dados de entrada, a entrada de dados do FERREIRACFC é feita de maneira simples e manual pelo usuário. Se estiver faltando alguma entrada de dados, o usuário recebe uma mensagem de erro. A interface e a mensagem de erro podem ser observadas nas Figuras 8 e 9. Outras mensagens também estão contidas no sistema do código e aparecem no software, como a verificação do subitem (c) da seção secundária 2.1, sobre a necessidade do reforço quando o momento resistente de cálculo é menor que o momento solicitado. As mensagens são exibidas após o usuário digitar os parâmetros de entrada e selecionar a opção de “Calcular” na interface do sistema.

Os parâmetros para a entrada de dados são os mesmos das propriedades do concreto, aço e do material escolhido pelo usuário de acordo com a norma ACI 440.2R (American Concrete Institute, 2017). A introdução dos dados é feita por meio de caixas de texto, assim que o usuário pressiona o botão de calcular, o dimensionamento do reforço à flexão do CFC é elaborado instantaneamente. Essas mensagens e a opção de calcular o dimensionamento estão presentes nas Figuras 10. Toda memória de cálculo é armazenada no próprio código Python, para que o usuário possa acompanhar o dimensionamento, ou seja, a saída de dados é fornecida tanto pelo software, como pela linguagem de programação e esses parâmetros estão

representados no lado direito do software sobre um background de cor preta em textos não editáveis. Por fim, quando o usuário sentir a necessidade de limpar algum dado, poderá limpar por meio do botão posicionado na interface com o nome “Limpar”.

Figura 8 – Interface do Reforço A do FERREIRACFC.

Fonte: Autoria própria (2023).

Figura 9 – Mensagem de erro no Reforço A do FERREIRACFC.

Fonte: Autoria própria (2023)

Figura 10 – Mensagem de verificação da necessidade do reforço do FERREIRACFC.

FerreiraCFC - Reforço à Flexão

Reforço A

Concreto e Aço

fck [MPa] 20
fyk [Mpa] 500
Es [Mpa] 210000

Momentos

Momento solicitante [kN.m] 1526
Momento inicial [kN.m] 440

Seção da viga

Base - bw [cm] 80
Altura - h [cm] 100
Altura Útil - d [cm] 96
d' [cm] 4

Áreas da seção

As existente (cm²) 20
As ` existente (cm²) 0
As necessária (cm²) 56
As ` necessária (cm²) 0

Seção

Espessura - tf [mm] 1.2
Largura - wf [mm] 500

Material

Módulo de Elasticidade - Efc [Mpa] 70000
Deformação última - εfu [%] 1.7

Coefic

ψf (re)

Alerta

A seção de concreto necessita de reforço!

RESULTADOS

Resistência sem reforço

MRd1 [kN.m]
MSd [kN.m]
Verificação:

Reforço adotado

Afc [cm²]
Nº Camadas - n
Verificação das deformações finais

Verificação:
Verificação de descolamento
Risco:

Ductilidade:
Escoamento:
Reforço:

Calcular Limpar

Fonte: Autoria própria (2023).

A tela do “Reforço B” representa o dimensionamento do reforço destinado ao cisalhamento da viga de concreto armado com CFC e se comporta do mesmo modo que a interface do reforço anterior, com imagens que ajudam o usuário no preenchimento dos dados de entrada referentes a geometria da seção e do reforço. A entrada de dados funciona manualmente e o dimensionamento atua de forma igual da subseção (2.2).

As mesmas mensagens de erro também são exibidas igualmente ao “Reforço A”. A interface do modelo B pode ser visualizado na Figura 11.

Figura 11 – Interface do “Reforço B” do FERREIRACFC.

FerreiraCFC - Reforço à Cisalhamento

Reforço B

Materiais

fck [MPa] 20
fywk [Mpa] 250

Solicitação

Vk [kN]

Seção da viga

Base - bw [cm]
Altura Útil - d [cm]

Estritos

Øsw [mm]
Ramos
Espaçamento [cm]

Reforço

Envolvimento Completo

Completo Em U Lateral

Material

Módulo de Elasticidade - Efu [Mpa]
Deformação última - εfu [%]
Espessura - tf [mm]
Largura - wf [mm]
Espaçamento - sf [mm]
Altura útil da fibra - dfv [mm]
Nº de camadas - n
Inclinação horizontal - α
ψf (recomendado 0,95 - U e Lat. 0,95 - Completo.)

Reforço

α
Wf
Sf

RESULTADOS

Resistência sem reforço

Parcela do concreto - Vcd [kN]
Parcela do estribo - Vwd [kN]
Resistência sem reforço - VRd3 [kN]
Solicitação de projeto - Vsd [kN]
Biela comprimida
Necessidade

Resistência com reforço

Resistência de projeto - VRd [kN]
% utilizada
Verificação

Calcular Limpar

Fonte: Autoria própria (2023).

Entretanto, o que difere esse reforço do anterior, além do tipo de dimensionamento, são os tipos de parâmetros a serem preenchidos nas caixas de texto e a escolha do envolvimento da fibra de carbono na peça a ser trabalhada. Os tipos de envolvimento são os mesmos da norma ACI 440.2R (American Concrete Institute, 2017). A escolha do tipo pode ser observada na Figura 12.

Figura 12 – Escolha do tipo de envolvimento para determinação do reforço à cisalhamento com CFC do FERREIRACFC.

Fonte: Autoria própria (2023).

Ao pressionar a opção de “Calcular” na interface do sistema, a saída de dados é exibida de forma semelhante ao “Reforço A”, para que o usuário possa ter uma melhor familiarização com o software e os parâmetros de dados. O botão de “Limpar” possui a mesma função para os dois Reforços.

2.3 Resultados e discussão

2.3.1 Validação do código

Em Lorenzi (2018), a autora realiza o dimensionamento do reforço à flexão e cisalhamento de uma viga de transição com fissuras profundas, utilizando os métodos do ACI 440.2R (American Concrete Institute, 2008), sendo a viga localizada no térreo de um edifício de 15 pavimentos. Diante disso, para validar o FERREIRACFC, foi realizado um estudo comparativo entre os resultados obtidos pelo dimensionamento do reforço à flexão e cisalhamento do primeiro vão da viga de concreto armado com CFC, por meio do software e por Lorenzi (2018). A seguir, os dados para a realização do cálculo dos reforços foram convertidos para os Quadros 3 e 4.

Quadro 3 – Dados da viga de transição a ser analisada.

Dados da viga		
Bw	80	cm
H	100	cm
D	96	cm

d'	4	cm
Fck	20	MPa
Fyk	500	MPa
Esd	210	GPa
Md,0	152,6	kN.m

Fonte: Lorenzi (2018).

Quadro 4 – Dados do Compósito de Fibras de Carbono.

Dados do Compósito de Fibras de Carbono			
Lâmina SikaCarbodur S-512	Efc	170	GPa
	ξ_{fc,u}	1,7	%
	σ_{fc,u}	3100	MPa
	espessura	1,2	mm
	largura	5	cm
Tecido SikaWrap 300	Efc	230	GPa
	ξ_{fc,u}	1,7	%
	σ_{fc,u}	3200	MPa
	espessura	0,17	mm
	largura	50	cm
	espaçamento	8	cm

Fonte: Adaptada de Lorenzi (2018).

2.3.2 Resultados obtidos

O Quadro 5 mostra os resultados obtidos do dimensionamento à flexão com CFC do primeiro vão da viga de transição obtidos por Lorenzi (2018). Foi utilizada a Lâmina de SikaCarbodur 512 (Sika, 2016).

Quadro 5 – Dimensionamento à flexão com CFC do primeiro vão da viga de transição realizado por Lorenzi (2018).

Vão 1	Momentos fletores em cada trecho da viga.			
	As existente (cm²)	Momento inicial - cargas permanentes (kN.m)	Momento resistente (kN.m)	Momento solicitante (kN.m)
	20	440	795,86	1526
	Determinação da linha neutra e força solicitante no CFC			
	Linha Neutra - momento resistente (cm)	Linha Neutra - momento solicitante (cm)	Força solicitante do CFC (kN)	
	11,19	22	878,23	
	Determinação da área necessária de CFC para o reforço			
	CFC utilizado	Deformação real do CFC (%)	Área necessária	Quantidade de Fitas

	Deformação inicial do CFC (%)		de CFC (cm ²)	
	0,117	0,937	5,51	10

Fonte: Adaptada de Lorenzi (2018).

Inserindo os mesmos dados do enunciado no FERREIRACFC, são retornados os resultados mostrados na Figura 13, juntamente com todas as verificações da norma do ACI 440.2R (American Concrete Institute, 2017).

Figura 13 – Dimensionamento à flexão com CFC do primeiro vão da viga de transição por meio do FERREIRACFC.

The screenshot shows the 'FerreiraCFC - Reforço à Flexão' window. It is divided into several sections:

- Reforço A:** Includes material properties (fck, ftk, Es) and section properties (Espessura, Largura).
- Momentos:** Input for Momento solicitante (1526) and Momento inicial (440).
- Seção da viga:** Input for Base, Altura, and Altura Útil.
- Áreas da seção:** Input for As existente, As' existente, As necessária, and As' necessária.
- Seção E Reforço:** A diagram showing the cross-section of the beam with reinforcement details.
- RESULTADOS:** A table showing calculated values: MRd1 (795.86), MSd (1526.0), Verificação (DIMENSIONAR REFORÇO), and Reforço adotado (x=22, FC=1711.42, Fs=869.6, F's=0.0, Ffc=878.23, % < 1.4=1.02, Verificação: OK!, Ductilidade: OK!, Escoramento: OK!, Risco: OK!, Reforço: OK!).

Fonte: Autoria própria (2023).

Os valores de ambos os resultados coincidiram, porém existem diferenças a serem apontadas, como a presença das verificações de descolamento, ductilidade, escoamento e ruptura do reforço presente no software. Essas verificações são importantes para que o reforço adotado não apresente problemas futuros e comprometam a seção.

Para o dimensionamento do reforço do cisalhamento com CFC do primeiro vão da viga de transição obtido por Lorenzi (2018), foi utilizado o tecido SikaWrap 300 (SIKA, 2016) e o envolvimento em "U". O Quadro 6 ilustra os resultados fornecidos por esse dimensionamento.

Quadro 6 – Dimensionamento do reforço à cisalhamento com CFC do primeiro vão da viga de transição realizado por Lorenzi (2018).

Determinação dos esforços cortantes na viga de transição		
As existente (cm ²)	Esforço cortante resistente (KN)	Esforço cortante solicitante (KN)

Vão 1	20	802,23	1756
	Determinação do reforço à força cortante		
	Força cortante do CFC (KN)		
	1112,08		

Fonte: Adaptada de Lorenzi (2018).

Quando inserido os mesmos dados no FERREIRACFC, os resultados apresentados na Figura 14, demonstram valores aproximados, visto que a precisão das casas decimais se diferencia devido a elaboração das equações. O software conta com a verificação da biela comprimida e a porcentagem de quanto de tecido será utilizado nesse processo. O valor da porcentagem varia de acordo com a relação existente entre a solicitação resistente e a solicitada do projeto.

Figura 14 – Dimensionamento do reforço destinado ao cisalhamento com CFC do primeiro vão da viga de transição por meio do FERREIRACFC.

FerreiraCFC - Reforço à Cisalhamento

Reforço B

Materiais

fdk [MPa] 20

fywk [Mpa] 500

Solicitação

Vk [kN] 1756

Seção da viga

Base - bw [cm] 80

Altura Útil - d [cm] 96

Estribo

Øsw [mm] 10

Ramos 2

Espaçamento [cm] 20

Seção

Reforço

Envolvimento Em U

Completo Em U Lateral

Material

Módulo de Elasticidade - Efu [Mpa] 30000

Deformação Útima - efu [%] 1.7

Espessura - tf [mm] 0.167

Largura - wf [mm] 500

Espaçamento - sf [mm] 800

Altura útil da fibra - dfv [mm] 400

Nº de camadas - n 7

Inclinação horizontal - α 90

ψf (recomendado 0.85 - U e Lat. 0.95 - Completo.) 0.85

Reforço

RESULTADOS

Resistência sem reforço

Parcela do concreto - Vcd [kN] 509.2805

Parcela do estribo - Vwd [kN] 295.0365

Resistência sem reforço - VRd3 [kN] 804.317

Solicitação de projeto - VSd [kN] 1756.0

Biela comprimida OK!

Necessidade Dimensionar reforço!

Resistência com reforço

Resistência de projeto - VRd [kN] 1119.62

% utilizada 64

Verificação

OK!

Calcular Limpar

Fonte: Autoria própria (2023).

3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho foi desenvolvido um software capaz de dimensionar o reforço estrutural de fibra de carbono em vigas de concreto armado, o dimensionamento foi dividido entre reforço destinado a flexão e para cisalhamento da seção. A linguagem de programação é fator importante na convergência entre o tempo gasto da escrita do código e as funções que o procedimento apresenta. A linguagem Python se mostrou de fácil entendimento e manuseio

para o trabalho desenvolvido. O FERREIRACFC se mostra uma ferramenta importante para um futuro desenvolvimento de projetos com qualidade e eficiência no âmbito da engenharia estrutural e, ou ainda destinada para engenheiros patologistas. Pode-se ainda implementar outras funções como a variação do modelo do dimensionamento da biela quanto ao reforço para o cisalhamento da estrutura e melhorias de outras funções já existentes. A comparação dos resultados de um detalhamento tridimensional e do FERREIRACFC pode ser mais uma forma de comprovação da eficiência do dimensionamento. A implementação de cálculos para os outros estádios de deformação pode dar a possibilidade ao usuário, uma nova visão de dimensionamento do reforço com CFC e como ele pode se comportar com a seção e questão.

REFERÊNCIAS

ACI (American Concrete Institute). **ACI 440.2R**: guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for concrete structure strengthening. Farmington Hills, MI: American Concrete Institute, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6023**: informação e documentação: elaboração: referências. Rio de Janeiro, 2018

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: projeto de estruturas de concreto - procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2023.

BORGES, L. E. **Python para desenvolvedores**. 2. ed. Rio de Janeiro: Edição do Autor, 2010.

CRISTOF, A.; ZENI, E. Z.; BUENO, L. A. M. Reforço estrutural com fibra de carbono em vigas de concreto armado. **ED. Cruzeiro do Sul**, 2021. Disponível em: <https://repositorio.cruzeirodosul.edu.br/jspui/handle/123456789/3382>, Acesso em 20 ago. 2023.

GUARDA, M. C. C. **Cálculo de deslocamentos em pavimentos de edifícios de concreto armado**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, 2005.

LORENZI, B. R. G. **Dimensionamento do reforço de uma viga de transição em concreto armado com fibras de carbono**. Orientador: Daniel de Lima Araújo. 2018. 26 f. Trabalho de Conclusão de Curso 2 (Graduação). Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2018.

MACHADO, A. P. Manual de reforço das estruturas de concreto armado com fibras de carbono. São Paulo: **Better**, v. 24, 2010.

SIKA S.A; **Ficha técnica de produto sika carbodur S**: lâminas de fibras de carbono para reforço estrutural. São Paulo, Osasco, 2016.

SIKA S.A; **ficha técnica de produto sika wrap 300C**: tecido de carbono unidirecional para reforço estrutural. São Paulo, Osasco, 2016.

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. 220 f. Tese de Doutorado. Dissertação (Mestrado)-Curso de Engenharia de Estruturas, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2016.