

## ESTUDO COMPARATIVO ESTRUTURAL DE ARMADURAS LONGITUDINAIS DE BARRAS DE POLÍMEROS REFORÇADOS COM FIBRA DE VIDRO (GFRP) E BARRAS DE AÇO CA-50

LUCAS EDUARDO ARAUJO THEISEN<sup>1</sup>  
KÊNIA ARAÚJO DE LIMA SCARIOT<sup>2</sup>  
RAFAEL GOULART DE ANDRADE SANTOS<sup>3</sup>  
ANDRÉIA ALVES BOTIN<sup>4</sup>

**RESUMO:** O avanço tecnológico traz consigo diversas novas técnicas construtivas inovadoras, como a utilização de barras reforçadas com fibra de vidro, que atualmente é utilizada para diversas funções distintas na indústria. Contudo, seu grande desafio é a implementação deste material no ramo da construção civil, o que acarreta a deficiência de normas abrangentes para o material. A presente pesquisa teve como finalidade realizar dimensionamento de 7 vigas com diferentes cargas e tamanhos totalizando 21 diferentes combinações para cada material, utilizando como material barras de aço CA-50 e barras de polímeros reforçadas com fibra de vidro (GFRP). Foi comparado os resultados obtidos e avaliados os momentos atuantes, calculados sobre cada um dos materiais, para destacar as principais equações para um melhor dimensionamento, fazer o levantamento dos materiais, gerar fatores de segurança consistentes com casos que podem ser encontrados no dia a dia em obras e adaptar as normas condizentes para o material. Foi gerado tabelas com valores reais que condizem com a realidade, demonstrando alguns aspectos importantes do dimensionamento de barras de fibra de vidro em vigas biapoiadas, onde não foi realizado os cálculos dos estribos para nenhum dos materiais em estudo. Foi realizado o cálculo do preço médio do metro para cada uma das situações estudadas, comparados em qual situação a fibra pode vir a se tornar mais benéfica que o aço levando em consideração a área efetiva de cada material tendo em vista a quantidade de barras utilizadas em cada situação. Foi possível analisar que as barras de fibra podem ser mais viáveis quando utilizado em vãos maiores, como o caso das vigas 6 e 7 onde foi trabalhado com uma área de aço mais elevada, chegando a valores de 3% a 4% mais barato que o aço, no entanto analisou-se casos, como nas vigas V1 e V2 que apresentaram valores de 106% e 114,3% respectivamente mais alto que o aço. Esses valores obtidos mostram que a utilização da fibra de vidro acaba sendo inviável em obras de pequeno porte, onde se tem vigas com pequenos vãos a vencer, na qual acaba sendo mais econômico e prático a utilização de barras de aço, porém a utilização do material acaba a ser viável quando considerado vãos com dimensões de vigas maiores que as utilizadas.

**PALAVRAS-CHAVE:** Dimensionamento Estrutural; GFRP; Vigas.

<sup>1</sup> Acadêmico de Graduação, Curso de Engenharia Civil, Centro Universitário Fasipe – UNIFASIFE. Endereço eletrônico: lucasaraujotheisen345@gmail.com

<sup>2</sup> Professora Mestre em Engenharia Civil e Ambiental, Centro Universitário Fasipe – UNIFASIFE. Endereço eletrônico: keniaaraujolima@hotmail.com

<sup>3</sup> Professor Mestre em Matemática, Curso de Engenharia Civil, Centro Universitário Fasipe – UNIFASIFE. Endereço eletrônico: rafaelgoulart12@gmail.com

<sup>4</sup> Professora Doutora, em Biotecnologia e Biodiversidade, Curso de Engenharia Civil, Centro Universitário Fasipe – UNIFASIFE. Endereço eletrônico: andreia.botin@yahoo.com.br

## STRUCTURAL COMPARATIVE STUDY OF LONGITUDINAL REINFORCEMENTS OF GLASS FIBER REINFORCED POLYMER BARS (GFRP) AND CA-50 STEEL BARS

**ABSTRACT:** Technological advancement brings with it several new innovative construction techniques, such as the use of fiberglass-reinforced bars, which is currently used for various functions in the industry. However, its great challenge is the implementation of this material in the field of civil construction, which leads to the deficiency of comprehensive standards for the material. The purpose of this research was to design 7 beams with different loads and sizes, totaling 21 different combinations for each material, using CA-50 steel bars and fiberglass reinforced polymer bars (GFRP) as material. The results obtained were compared and the actuating moments were evaluated, calculated on each of the materials, to highlight the main equations for a better dimensioning, to survey the materials, to generate safety factors consistent with cases that can be found on a daily basis in construction sites and to adapt the appropriate standards for the material. Tables were generated with real values that match the reality, demonstrating some important aspects of the design of fiberglass bars in bi-supported beams, where the stirrup calculations were not performed for any of the materials under study. The average price per meter was calculated for each of the situations studied, comparing in which situation the fiber can become more beneficial than the steel, taking into account the effective area of each material, considering the amount of bars used in each situation. It was possible to analyze that fiber bars can be more viable when used in larger spans, as in the case of beams 6 and 7 where it was worked with a higher steel area, reaching values of 3% to 4% cheaper than steel, however cases were analyzed, such as in beams V1 and V2 that presented values of 106% and 114.3% respectively higher than steel. These values show that the use of fiberglass ends up being unfeasible in small works, where there are beams with small spans to overcome, in which the use of steel bars ends up being more economical and practical, but the use of the material ends up being feasible when considering spans with larger beam dimensions than those used.

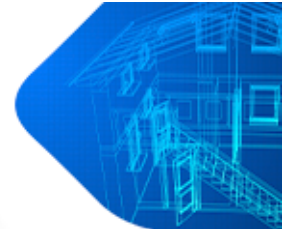
**KEYWORDS:** Structural Sizing; GFRP; Beams.

### 1. INTRODUÇÃO

Com o avanço tecnológico, ramos derivados da construção civil acabam sofrendo diversas mudanças e modernizações em seus métodos construtivos. Essas modernizações procuram garantir a melhoria de métodos construtivos antigos, como também, trazer novos meios de construções, como a utilização do *Wood frame*, *Steel frame*, estruturas pré-moldadas, impressoras 3D, *Insulated Concrete Form (ICF)*, *Drywall*, dentre muitos outros (SULMONETI, 2018).

Esses avanços surgem com a finalidade de compensar alguns fatores negativos, como a necessidade em diminuir os atrasos na entrega das obras. Além disso, possibilita maior custo-benefício final e propicia maior facilidade na manutenção das edificações para que possa haver um ambiente de trabalho mais organizado e seguro sem prejudicar sua qualidade (SALAMONI, 2019).

A aplicação do *Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP)* na construção civil, mais especificamente como reforço interno em estruturas de concreto, surgiu na década de 60 devido



à alta corrosão de vergalhões de aço em estruturas de concreto armado expostas a ambientes agressivos (FERREIRA, 2012).

A utilização de *Fiber Reinforced Polymer* (FRP), polímeros reforçados com fibra no português, está ganhando grande destaque na área da engenharia por se tratar de um material que está chegando como um novo método, o que acarreta cada vez mais a diminuição de armaduras constituídas por barras de aço CA-50 (SILVA, 2022).

Por se tratar de um método recém-chegado ao Brasil há diversos fatores a se considerar, pois diferentemente das barras de aço comumente utilizadas em concreto armado, este método ainda não possui uma norma brasileira que abrange qual a melhor situação para sua utilização. Não há normatizado, por exemplo, o melhor meio para fazer o dimensionamento das estruturas que satisfaçam os critérios necessários para a utilização do material, como realizar seus cálculos de resistência, dentre alguns outros fatores importantes (SALAMONI, 2019).

A fim de colaborar no suprimento de algumas das lacunas existentes devido ao baixo número de normas disponíveis, o presente trabalho teve como principal objetivo chegar aos valores de cálculo que podem ser utilizados para a realização do dimensionamento das barras de fibra de vidro através do dimensionamento das armaduras longitudinais positivas das vigas de aço CA-50 e GFRP.

Portanto, foi realizado o quantitativo dos materiais utilizados e comparado os resultados obtidos entre os dois materiais para analisar se a substituição das barras de aço CA-50 por barras reforçadas com polímeros de vidro seria viável. Foi analisado também qual a melhor forma de dimensioná-las de maneira que satisfaçam aos critérios necessários para a obra ser executada garantindo a melhor qualidade e segurança em sua finalização.

## 2. REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 Concreto como material estrutural

O concreto é um material composto de cimento, água, agregados miúdos e graúdos, podendo haver aditivos em sua composição para melhorar sua resistência. Quando utilizado como material estrutural recebe a denominação de concreto estrutural, que pode ser classificado em três diferentes tipos: concreto simples, sem qualquer armadura; concreto armado, quando há uma armadura não pré-tracionada; e concreto protendido (ESTACECHEN, 2020).

A massa do concreto depende de inúmeros fatores para uma boa preparação, como os tipos dos agregados utilizados, a granulometria e o método empregado na compactação. O concreto, considerado um sólido a partir do ponto de pega, pode ser altamente suscetível a alterações impostas pelo ambiente de maneiras químicas, físicas e mecânicas, podendo ocorrer de maneira lenta e gradual (FILHO, 2020).

Segundo Maines (2022), ao falar nas propriedades do concreto endurecido é essencial que se fale de sua durabilidade e resistência mecânica. Contudo, os critérios de durabilidade devem levar em conta os processos de deterioração, pois o concreto armado pode ter sua vida útil comprometida em função de diversas causas – de origem interna ou externa ao concreto – que o conduza a uma deterioração.

A durabilidade é imediatamente ligada à porosidade do concreto, pois é dependente da estrutura de poros do concreto e do meio no qual ele está situado. A durabilidade está sujeita a uma série de fatores, iniciando pela concepção e projeto das estruturas, passando pelos materiais empregados e pela qualidade de execução (FILHO, 2020).

Segundo Camargo e Ferrari (2021), a resistência à compressão pode ser considerada como a propriedade mais importante do concreto, pois está diretamente relacionada com sua estrutura interna. Nos sólidos existe uma relação fundamental inversa entre porosidade e resistência, portanto, a porosidade de cada componente do concreto pode se tornar um fator limitante da resistência por se tratar de um material de várias fases.

No ensaio de compressão deve ser aplicada uma quantidade força de compressão sobre os corpos-de-prova para saber a resistência do concreto à compressão. Para isso, pode ser confeccionado gráficos com os valores da resistência à compressão ( $f_c$ ). Assim, encontra-se a curva estatística de Gauss ou Curva de distribuição normal para resistência do concreto (MORAIS, 2021).

Segundo Oliveira, Soares e Santos (2020), o desvio padrão representa a distância entre a abscissa de  $f_{cm}$  e a abscissa do ponto de inflexão da curva. Apenas 5% dos corpos de prova possuem  $f_c$  menor  $f_{ck}$ , ou seja, 95% dos corpos prova possuem  $f_c$  maior ou igual ao  $f_{ck}$ . Portanto, a resposta do concreto não depende apenas do tipo de tensão, mas da combinação de vários fatores que afetam a porosidade de diferentes componentes estruturais do concreto.

De acordo com Filho (2020), o concreto possui uma natureza porosa composta por conjunto de vazios de diversas formas e tamanhos e contém um grande número de microfissuras antes mesmo que sejam aplicadas qualquer tipo de esforço. Muitas vezes as fissuras que ocorrem no concreto ocorrem devido à segregação e expansão térmica da matriz cimentícia. Durante o carregamento ocorre a interligação das microfissuras existentes, as quais se propagam rapidamente através das falhas e dos vazios ocasionando o comportamento não linear dos materiais cimentícios à tração.

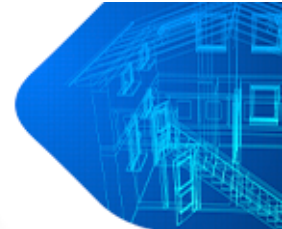
A abertura de fissuras ocorre quando as tensões de tração no concreto excedem a sua capacidade de resistência, tornam-se elementos fissurados. Essas fissuras devem ser controladas, não devem ultrapassar os valores estipulados pelas normativas. Contudo, por serem difíceis de calcular, esses valores podem sofrer influência de impedimento nas variações volumétricas (LUNGISANSILU; FELIX; MENDES, 2021).

## 2.2 Barras de aço

Na construção civil as barras de aço são utilizadas em lajes, pilares e vigas, dentre outros importantes elementos. Por se tratar de um material que possui resistência elevada, sua utilização se torna indispensável em uma obra, desde pequenas construções residenciais a grandes arranha-céus. Contudo, quando as barras de aço não são tratadas e armazenadas de maneira correta pode haver diversos problemas, como a corrosão, que diminuem sua vida útil (MONTEIRO, 2021).

Classifica-se como barras os produtos com diâmetro nominal 6,3 mm ou superior obtidos por meio de laminação por calor. Como também, classifica-se como fios os produtos com diâmetro nominal 10,0 mm ou inferior obtidos a partir de fio máquina por trefilação ou laminação a frio. São classificadas por de seu valor característico de resistência de escoamento como categorias CA-25, CA-50 e os fios de aço CA-60, que apresentam nervuras em toda sua extensão para evitar a movimentação da barra dentro do concreto ABNT (2007) NBR 7480.

A resistência de escoamento das barras pode ser caracterizada no diagrama de tensão deformada ou calculada através do valor da tensão sob a carga correspondente à deformação permanente de 0,2%. A resistência das barras e fios também pode ser calculada através do valor de tensão sob carga correspondente de 0,5%, mas em casos de divergência o valor que permanece é de 0,2%. ABNT (2007) NBR 7480.



### 2.3 Barras de Polímeros Reforçados com Fibra de Vidro (GFRP)

As barras de fibra de vidro são fabricadas através de um processo chamado pultrusão. O processo consiste no banho dos filamentos da fibra com resina, catalisadores e aditivos a uma velocidade média de 0,9 m/min, produzindo barras com seções transversal constante com comprimento limitado ao seu transporte e armazenamento (MELO; TEIXEIRA; CARNEIRO, 2018). O processo de pultrusão é automatizado, o que proporciona boa uniformidade em toda a espessura do perfil, levando ao mais alto nível de eficiência dos materiais (HENNEMANN; DA SILVA; SCHNEIDER, 2019).

Segundo Moura (2022), a escolha do material requer muito estudo, pois o tipo de resina utilizado é de grande importância, tendo em vista que cada tipo de resina tem uma aplicação na qual se sai melhor dependendo do tipo de ambiente e reagentes ao qual o material vai ser empregado. As resinas de poliéster ou isoasfálica, por exemplo, são as mais indicadas para ambientes menos agressivos, sendo aditivadas com componentes específicos para proteção de raios UV, possuem excelentes propriedades de isolamento térmico e elétrico.

As resinas de éster-vinílica possuem alta resistência à corrosão, logo, são propícias a serem aplicadas em ambientes mais agressivos. Resinas à base de fenólica são mais indicadas para rotas de fuga, para ambientes confinados e com temperaturas elevadas. Já a resina acrílica é indicada para ambientes agressivos e confinados. Com exceção das resinas do tipo fenólica, todos os outros materiais pultrados e aplicados nas fibras de resina são pigmentados durante o processo de fabricação, portanto, não necessitam de pintura superficial (MOURA, 2022).

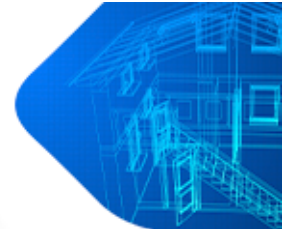
As fibras possuem uma superfície extremamente reagente à água e podem ser danificadas facilmente durante seu manuseio. Para que não sejam danificadas, um filme protetor é aplicado para aumentar o poder de adesividade da fibra à matriz polimérica. A suscetibilidade ao meio ambiente deve ser considerada mesmo depois das fibras serem envolvidas no polímero, pois qualquer falha que ocorra durante o processo de produção pode ocasionar danos irreversíveis ao material (MAZZÚ, 2020).

### 2.4 Dimensionamento de vigas de concreto com Polímeros Reforçados com Fibra (FRP)

Quando se trata da utilização de FRPs para o dimensionamento do elemento armado, a melhor situação a se considerar no dimensionamento é a ruína do elemento através do esmagamento do concreto na fibra para que fique mais comprimida. Essa é a forma mais econômica a se considerar quando o elemento consegue atingir a ruína balanceada, chegando ao ponto da ruptura tanto da armadura quanto ao esmagamento do próprio concreto. Quando isso acontece, a linha neutra fica localizada na parte superior da altura útil da seção, próxima à superfície comprimida (MAZZU; DALFRÉ, 2020).

Para Cunha (2019), o mais recomendável é que a ruína seja dada pelo esmagamento do concreto, pois, diferente das barras de aço, as barras de GFRPs não apresentam escoamento. Uma vez que seu comportamento é elástico, linear e frágil, quando atinge toda sua capacidade resistente, há ainda a existência da ductilidade dada através o desenvolvimento do comportamento plástico do concreto antes da ruína.

Segundo Dalfré e Ferreira (2020), para a simplificação dos fenômenos ocasionados nos elementos armados com barras de FRP, em que as seções planas permanecem planas após a ocorrência da deformação do elemento, a deformação do concreto antes da ruína é dada por 3%. A capacidade resistente do concreto à tração não é considerada, o comportamento das barras continua linear até que se tenha a ruptura do elemento, ocorrendo, assim, a aderência perfeita entre as barras e o concreto.



O dimensionamento de um elemento consiste na sua capacidade de majoração. Nesse caso, consiste na majoração das ações solicitantes nas quais ele estará submetido e a minoração da capacidade resistente, garantindo que a capacidade de resistência não seja menor que as solicitações.  $M_n$  é o momento resistente do elemento (sendo calculado através das equações de equilíbrio e compatibilidade de deformação),  $M_u$  é o momento calculado através das ações cujo elemento está submetido e  $\phi$  é o coeficiente de redução dos esforços resistentes à flexão. Como armaduras de FRP não apresentam comportamento dúctil, um fator conservador de redução da força deve ser adotado para fornecer maior segurança, conforme demonstrado na equação 1 (MAZZÚ, 2020).

$$\phi \cdot M_n \geq M_u \quad (1)$$

A definição do tipo de ruína é dada por parâmetros como a percentagem de armadura FRP e o percentual de armadura balanceada que são utilizadas. A taxa de armadura de FRP é dada através da fórmula 3, em que a área do FRP é dada em mm e a taxa de armadura balanceada é dada pela equação 4 (GÓES, 2021).

$$f_{fu} = C_E * f_{fu}^* \quad (2)$$

$$\rho_f = \frac{A_f}{b \cdot d} \quad (3)$$

$$\rho_{fb} = 0.85 \cdot \beta_1 \cdot \frac{f'_c}{f_{fu}} \cdot \frac{E_f \cdot \varepsilon_{cu}}{E_f \cdot \varepsilon_{cu} + f_{fu}} \quad (4)$$

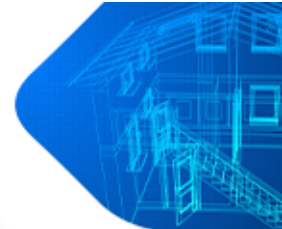
A área das barras de FRP é dada em mm<sup>2</sup> é representada pela sigla  $A_f$ ,  $b$  corresponde à largura da viga em mm e  $d$  representa a altura útil da viga de concreto em mm.  $\beta_1$  se correlaciona ao fator de redução de 0,85 para concretos com resistência característica abaixo ou igual a 26,7 Mpa.  $f'_c$  representa a resistência característica a compressão definida em Mpa e  $f_{fu}$  é a resistência a tração de projeto da barra FRP em Mpa. A deformação última é representada em mm/mm por  $\varepsilon_{cu}$  e o módulo de elasticidade  $E_f$  fornecido pelo fabricante da fibra utilizará o valor de 48 GPa.

Com relação ao  $f_{fu}$ , é dado através da equação 2, onde  $f_{fu}^*$  é a resistência à tração da barra de FRP, valor disponibilizado pelo fabricante ou o valor médio alcançado através de corpos de prova ( $f_{fu}^* = f_{fu,ave} - 3 \cdot \sigma$ ), sendo  $f_{fu,ave}$  a resistência média a tração das amostras, dadas em MPa e  $\sigma$  o desvio padrão. Por fim, a sigla  $C_E$  representa o fator de exposição ambiental, utilizando os valores de 0,8 quando o concreto não é exposto a água e intempéries e 0,7 quando exposto.

Logo, se tem a equação 5.

$$\varepsilon_{fu} = C_E \cdot \varepsilon_{fu}^* \quad (5)$$

Onde:  $\varepsilon_{fu}^*$  deformação de ruptura da barra de FRP fornecida pelo fabricante, que será utilizado 3 0/00, sendo a deformação de ruptura de projeto da barra de reforço apresentada em 0/00,  $\varepsilon_{u,ave}$  a deformação média a tração das amostras teste e  $\sigma$  o desvio padrão.



A menos que um projetista determine um fabricante de FRP, as barras nem sempre seguirão um padrão quando se diz respeito a toda fabricação do material na indústria. Sem um determinado tipo de especificações de barras podem ter diferentes propriedades das que estão consideradas em projeto (DALFRÉ, MAZZÚ, 2020).

Sendo levado em consideração o fator de redução da resistência dada a fórmula na equação 6.

$$\phi = \begin{cases} 0,55 \rightarrow \rho_f \leq \rho_{fb} \\ 0,3 + 0,25 \cdot \frac{\rho_f}{\rho_{fb}} \rightarrow \rho_{fb} < \rho_f < 1,4 \cdot \rho_{fb} \\ 0,65 \rightarrow \rho_f \geq 1,4 \cdot \rho_{fb} \end{cases} \quad (6)$$

Onde:  $\phi$  representa fator de redução,  $\rho_f$  depende da razão entre a taxa de armadura de FRP e  $\rho_{fb}$  a taxa de armadura balanceada. A figura 3, a seguir, representa o gráfico do fator de redução da resistência em função a taxa de armadura de FRP. Se  $\rho_f < 1,4 * \rho_{fb}$ , a ruína é causada pelo esmagamento do concreto, mas se  $\rho_f < \rho_{fb}$ , a ruína é causada pela ruptura da barra.

Em situações típicas é recomendado que o projetista especifique uma resistência à compressão do concreto de 28 dias, mas, na maior parte dos casos, a resistência do concreto ultrapassa a resistência especificada. Em elementos armados com a utilização de barras de GFRP ou FRP, uma resistência maior do que a especificada poderia proceder em mudanças no modo de falha e, portanto, na mudança do fator de redução da resistência (GÓES, 2021).

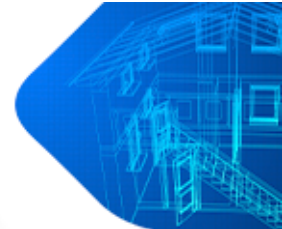
## 2.5 Armadura mínima

De acordo com Dalfré (2020), o limite mínimo da armadura é calculado caso venha acontecer ruína do elemento governada pela ruptura da barra de FRP. Para evitar a fissuração do concreto é utilizada a norma ACI318 (2019), no caso da utilização de armaduras de FRP o limite mínimo de armadura é baseado neste mesmo conceito, podendo ser aplicado com algumas modificações.

Essas modificações são baseadas na diferença dos coeficientes de redução da resistência dadas pela ACI318 (2019) e pela ACI440. 1R (2015) sendo iguais a 0,9 e 0,55 para cada norma, respectivamente com  $\phi = 0,55$  e a equação do ACI318 (2019) para a armadura de aço por 1,64(0,9/0,55 = 1,64) assim como na equação 7.

$$A_{f,min} = \frac{0,41 * \sqrt{f'_c}}{f_{fu}} \quad (7)$$

Onde:  $f'_c$  é a resistência característica à compressão do concreto, em MPa,  $E_f$  é o módulo de elasticidade de projeto da barra de FRP dado pelo fabricante e o  $b$  e  $d$  são as dimensões da altura e base que são fornecidos em cm.  $A_{f,min}$  é a área de fibra mínima obtido em mm.



### 3. MATERIAL E MÉTODOS

O presente trabalho teve como principal objetivo realizar o levantamento quantitativo e comparativo de armaduras longitudinais positivas de vigas com a utilização de barras de aço CA-50 e barras de fibra de vidro. Buscou-se obter valores reais que condizem com a realidade de uma obra para sanar lacunas existentes devido à falta de normas disponíveis no Brasil por se tratar de um material considerado novo no país.

Foram adotadas combinações de vãos com cargas sendo considerado vigas biapoiadas, tendo como materiais de construção concreto C-25 com o aço CA-50 e GFRP com a mesma geometria, considerando largura de 15 cm e altura equivalente a 10% do vão. Foram adotados vãos de 3 metros a 6 metros com variações de 50 centímetros e adotadas cargas distribuídas para estes vãos de 5, 6 e 7 kN/m, totalizando 21 combinações de cargas para cada tipo de material. A escolha das cargas aplicadas nas vigas levou em consideração as cargas mais comumente encontradas para estruturas com dimensões equivalentes as das vigas em estudo.

Para cada viga foi dada a nomenclatura V seguida de sua numeração e das letras A, B e C, sendo respectivas a cada carga na qual será realizado os cálculos e as siglas CA-50 e GFRP para o material de estudo.

Além das interpretações de cálculo dadas pelas bibliografias já citadas no trabalho, para efetuar o cálculo, foi levado em conta somente o dimensionamento da armadura longitudinal por meio do momento fletor, não sendo considerados os cálculos de estribos por meio da força cortante.

#### 3.1 Considerações de deformações e ruína dos elementos

Para o dimensionamento das vigas de GFRP foi considerada a ruína governada pela ruptura da barra e esmagamento do concreto. Esse é o recomendado por ser a maneira mais conservadora em que a linha neutra é levada para um ponto que ocorra a ruína pelos dois fatores em conjunto. Para as barras de aço foi considerada a ruína por escoamento da barra de aço contida nos domínios de deformação 2 e 3; e com a limitação de  $x/d < 0,45$ , conforme recomendado pela norma NBR 6118:2023.

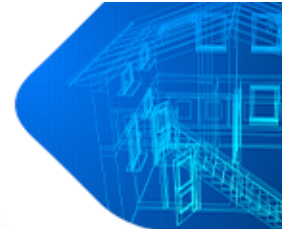
No cálculo da área de aço foram utilizados valores de minoração de 1,4 para o concreto disponibilizados na ABNT NBR 6118/2023 e para o GFRP os valores atribuídos na norma americana ACI.440.1R-2015. Para o cálculo das áreas mínimas de fibra de vidro foram utilizadas barras de 10mm, com fator de redução ambiental já definido anteriormente de 0,8 e a resistência de projeto de 1747 MPa.

#### 3.2 Quantitativo e levantamento de custos

Para o levantamento do custo das barras de aço foi realizado o levantamento do preço com auxílio do Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil (SINAPI) referente ao mês de abril de 2023. O levantamento do preço médio do GFRP foi realizado por fornecedores de outras localidades. Salienta-se que foi efetuada somente uma estimativa de preços comercializados entre as barras de fibra de vidro e barras de aço.

A análise comparativa dos materiais foi realizada em relação ao metro dos vergalhões de aço e de GFRP, sendo então elaborada a estimativa da quantidade total de barras utilizadas para cada uma das combinações realizadas.





#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Inicialmente foi calculado os momentos fletores característicos, momentos fletores atuantes e momentos máximos que atuam sobre as vigas de aço. Esse cálculo foi realizado considerando três combinações de cargas distribuídas para cada viga, sendo essas cargas respectivamente 5 kN/m, 6 kN/m e 7 kN/m. A tabela 1 apresenta os valores já majorados dos momentos calculados.

**Tabela 1:** Momentos calculados para vigas de aço

Vigas	A(q1) kN.m	B(q2) kN.m	C(q3) kN.m
V1	7,88	9,45	11,03
V2	10,72	12,86	15,01
V3	14,00	16,80	19,60
V4	17,72	21,26	24,81
V5	21,88	26,25	30,63
V6	26,47	31,76	37,06
V7	31,50	37,80	44,10

Fonte: Própria (2023).

Logo em seguida, com os resultados apresentados na tabela anterior, foi realizado um cálculo para determinar a quantidade de aço necessária para a execução de cada viga. Nesse momento foi possível analisar a diferença existente na área de aço de vigas que possuem mesmas dimensões com carregamentos diferentes.

A tabela 2 apresenta a área de aço calculada para as vigas com barras de aço. As letras A, B e C representam, respectivamente, a área de aço obtido para cada carga utilizada. Como as áreas de aço calculadas foram inferiores aos valores mínimos optou-se em utilizar os valores defetivos para cada caso.

**Tabela 2:** Area de aço calculada

Vigas	A (q1) cm <sup>2</sup>	B (q2) cm <sup>2</sup>	C (q3) cm <sup>2</sup>
V1	0,735	0,893	1,054
V2	0,837	1,016	1,199
V3	0,940	1,140	1,345
V4	1,043	1,265	1,492
V5	1,147	1,390	1,639
V6	1,251	1,516	1,787
V7	1,355	1,642	1,935

Fonte: Própria (2023)

A tabela 3 apresenta a área efetiva e a quantidade de barras utilizadas para cada viga a partir da quantidade mínima de barras econômicas utilizadas.

**Tabela 3:** Área efetiva do aço (cm<sup>2</sup>), quantidade e diâmetro das barras utilizadas (mm)

Vigas	A (q1)	B (q2)	C (q3)
V1	2 $\phi$ 8 (As, 1,00)	2 $\phi$ 8 (As, 1,00)	2 $\phi$ 8 (As, 1,00)
V2	2 $\phi$ 8 (As, 1,00)	2 $\phi$ 10 (As, 1,571)	2 $\phi$ 10 (As, 1,571)

V3	2 $\phi$ 8 (As,1,00)	2 $\phi$ 10(As,1,571)	2 $\phi$ 10 (As,1,571)
V4	2 $\phi$ 10 (As,1,571)	2 $\phi$ 10 (As,1,571)	2 $\phi$ 10 (As,1,571)
V5	2 $\phi$ 10 (As,1,571)	2 $\phi$ 10 (As,1,571)	3 $\phi$ 10 (As,2,356)
V6	2 $\phi$ 10 (As,1,571)	2 $\phi$ 10 (As,1,571)	3 $\phi$ 10 (As, 2,356)
V7	2 $\phi$ 10 (As,1,571)	3 $\phi$ 10 (As,2,356)	3 $\phi$ 10 (As,2,356)

Fonte: Própria (2023).

Logo após a finalização dos cálculos dos momentos e área de aço, foram calculados os momentos e a área mínima de fibra de vidro para as barras de GFRP.

A tabela 4 apresenta os valores que foram obtidos para os momentos das vigas de GFRP.

**Tabela 4:** Momentos calculados para vigas GFRP

Vigas	Md kN.m	Mn kN.m	Vigas	Md kN.m	Mn kN.m
V1 A	7,88	20,91	V4 C	24,80	50,59
V1 B	9,45	20,91	V5 A	21,87	63,36
V1 C	11,02	20,91	V5 B	26,25	63,36
V2 A	10,71	29,37	V5 C	30,62	63,36
V2 B	12,86	29,37	V6 A	26,47	77,56
V2 C	15,00	29,37	V6 B	31,76	77,56
V3 A	14,00	39,26	V6 C	37,05	77,56
V3 B	16,80	39,26	V7 A	31,5	93,19
V3 C	19,60	39,26	V7 B	37,80	93,19
V4 A	17,72	50,59	V7 C	44,10	93,19
V4 B	21,26	50,59	-----	-----	-----

Fonte: Própria (2023).

Após definidos os momentos do GFRP, foi realizado os cálculos para definir a área mínima de fibra de vidro utilizado, e a área total da fibra para cada viga, onde foi considerado para as barras de fibra somente diâmetro de 10mm, devido à falta de tabelas com todas as características necessárias para ser realizado os cálculos, apresentados na tabela 5.

**Tabela 5:** Area de GFRP calculada

Vigas	Area min. Calculada cm <sup>2</sup>	Area total calculada cm <sup>2</sup>
V1 A	0,666	1,333
V1 B	0,666	1,333
V1 C	0,666	1,333
V2 A	0,790	1,759
V2 B	0,790	1,759
V2 C	0,790	1,759
V3 C	0,913	1,826
V3 C	0,913	1,826
V3 C	0,913	1,826
V4 A	1,037	2,073
V4 B	1,037	2,073
V4 C	1,037	2,073
V5 A	1,160	2,320

V5 B	1,160	2,320
V5 C	1,160	2,320
V6 A	1,284	2,567
V6 B	1,284	2,567
V6 C	1,284	2,567
V7 A	1,407	2,814
V7 B	1,407	2,814
V7 C	1,407	2,814

Fonte: Própria (2023)

Foi realizado o levantamento e o custo das barras por metro para os vergalhões de aço e vergalhões de fibra de vidro levando em consideração o preço médio do kg do aço na SINAPI e o custo da fibra através de fornecedor de outra localidade. Para as barras de aço de 8mm foi obtido o valor médio de R \$4,16 por metro, para as barras de 10mm foi obtido o valor de R\$ 6,15 por metro e para barras de 10mm de GFRP o valor médio do metro obtido foi de R\$ 8,93, sem ser levado em consideração o preço do frete.

Através dos cálculos que foi realizado nas tabelas anteriores, foi realizado o cálculo para definir os preços médios apresentados nas tabelas 6 e 7 apresentam o custo médio das armaduras de aço e fibra de vidro para cada viga, tendo calculado para o GFRP somente vigas com diâmetro de 10 mm.

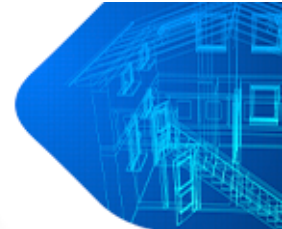
**Tabela 6:** Análise do Custo dos Materiais

Vigas	Aço R\$	GFRP R\$	Percentual %
V1 A	26,07	53,58	+106
V1 B	26,07	53,58	+106
V1 C	26,07	53,58	+106
V2 A	29,17	62,51	+114,3
V2 B	29,17	62,51	+114,3
V2 C	42,93	62,51	+45,61
V3A	33,34	71,44	+114,3
V3 B	49,63	71,44	+43,95
V3 C	49,63	71,44	+45,60

Fonte: Própria (2023).

Através da análise realizada na tabela 9 é possível inferir que, em algumas das situações mostradas, o valor do GFRP chega a atingir o dobro do valor das barras de aço analisadas. Porém, são situações isoladas, conforme os outros testes foram sendo realizados foi possível perceber que esse percentual vai diminuindo.

A partir do momento em que há necessidade de armaduras mais longas, o percentual médio calculado acaba se tornando menor. Um exemplo é caso da viga V2 C em que o percentual indica que o valor da fibra acaba sendo 45% mais caro que o aço. Contudo, ainda é mais barato do que as vigas V1 calculadas que acabam por ser superior a 100% mais caras que barras de aço. Esses valores vão diminuindo ao longo dos estudos conforme as cargas e vão são aumentados. Nos casos das vigas V7 B e C esse percentual já muda o cenário, pois é possível analisar que o GFRP se torna mais barato que o aço, porém é um valor muito baixo de somente 3% e para a viga V6 C 4% mais barato.



**Tabela 7:** Análise do Custo dos Materiais

Vigas	Aço R\$	GFRP R\$	Percentual %
V4 A	55,20	80,37	+46
V4 B	55,20	80,37	+46
V4 C	55,20	80,37	+46
V5 A	61,33	89,30	+46
V5 B	61,33	89,30	+46
V5 C	91,99	89,30	-3
V6 A	67,46	98,23	+46
V6 B	67,46	98,23	+46
V6 C	101,94	98,23	-4
V7 A	73,60	107,16	+46
V7 B	110,40	107,16	-3
V7 C	110,40	107,16	-3

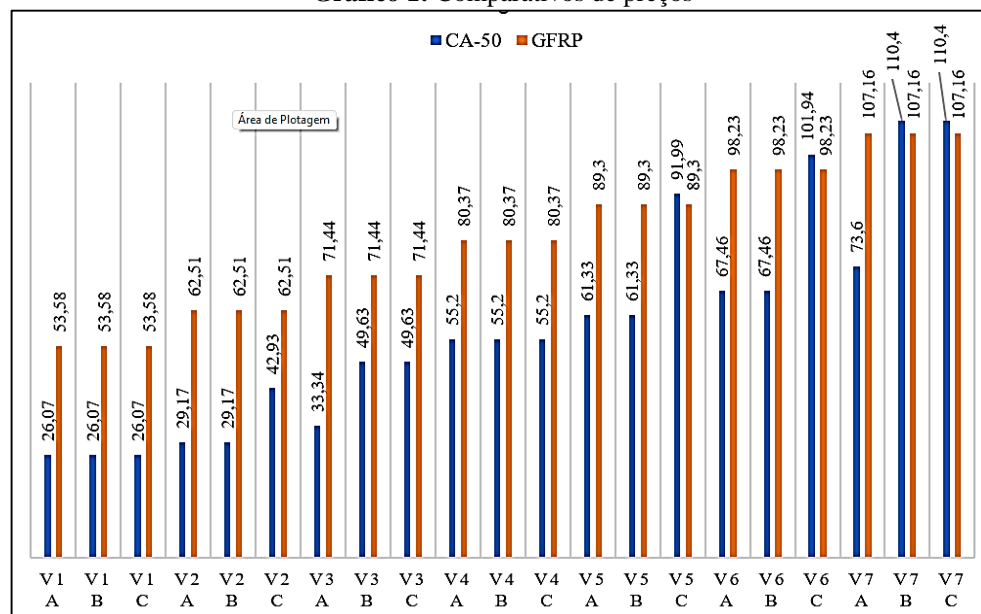
Fonte: Própria (2023).

Através da análise dos cálculos dos preços médios calculados apresentados anteriormente nas tabelas é possível verificar que os vergalhões de GFRP podem ser mais econômicos quando utilizados para vigas com vãos efetivos maiores. O que pode ser notado nos casos das vigas V6, em que a diferença dos valores começa a ser menor.

Os valores do GFRP começam a ser mais baixos nas vigas V6 C, pois houve uma diferença de preço calculado de R\$ 3,71 e nas vigas V7 B e V7 C, com uma diferença de custo de R\$ 3,24. Vale ressaltar que o dimensionamento da armadura longitudinal da viga de GFRP teve diferença de um vergalhão a menos do que nas vigas que foram utilizados vergalhões de aço, somente o caso das vigas V6 e V7.

Para melhor esclarecimento dos dados informados, o gráfico 1 apresenta as diferenças encontradas no preço calculado dos materiais. Assim, é possível fazer uma análise mais detalhada da diferença dos preços encontrados para as vigas.

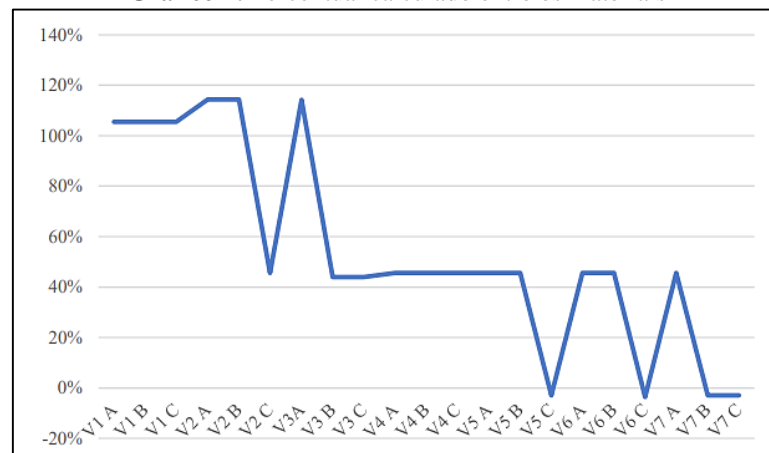
**Gráfico 1:** Comparativos de preços



Fonte: Própria (2023).

O gráfico 2 apresenta o percentual entre os preços abordados para os materiais utilizados para este estudo.

**Gráfico 2:** Percentual calculado entre os materiais



Fonte: Própria (2023).

Através da análise de percentual dos preços calculados para as vigas de aço e de fibra de vidro é possível constatar que a porcentagem calculada nas vigas V1, V2, V3 ultrapassam o dobro do valor encontrado para as vigas de aço. Essa diferença se torna menor quando o tamanho e quantidade de barras de aço se torna maior que as barras de fibra, o que pode ser verificado nas vigas V6 C, V7 B e V7 C.

Isso mostra que, por mais que possa haver diferença de valores, essa porcentagem é muito pequena, ainda que a utilização da quantidade de barras de aço seja maior o preço médio calculado não é significativo. A utilização da fibra de vidro pode ser mais significativa para outras estruturas, tendo em vista analisar o seu desempenho, resistência e durabilidade.

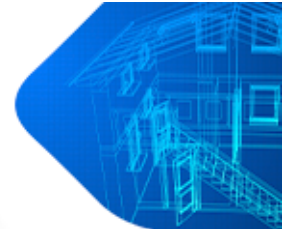
## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A ampla necessidade de técnicas que visam a durabilidade, resistência e rapidez no campo da construção civil, faz com que novos materiais sejam desenvolvidos para fins estruturais. A utilização do GFRP é um desses materiais que visa a substituição de barras de aço para algumas finalidades.

Diferente das barras de aço, a fibra de vidro destaca-se por ser um material mais leve e que não sofre corrosão para o ambiente. No entanto, diferente do aço que tem sua ruína por meio do escoamento do aço, a fibra tem sua ruína por meio da ruptura da barra e esmagamento do concreto, o que significa que ela rompe sem aviso prévio.

As pesquisas realizadas previamente englobaram somente os momentos máximos, não tendo sido realizado o estudo dos momentos fletores negativos e esforços cortantes. É necessário que sejam realizados mais estudos acerca do material para fins construtivos, pois esse trabalho engloba somente um comparativo dos materiais em estudo.

Em comparação com as barras de aço, as fibras podem suportar cargas um pouco mais elevadas. Foi realizado um estudo com vigas utilizando vãos e cargas iguais, havendo diferença nos momentos resistentes do GFRP em que os cálculos se diferenciaram somente na utilização de alguns fatores ambientais e resistências do material em estudo.



Além disso, foi possível perceber que, em comparação as barras de 8 mm, existe uma elevada diferença em relação ao preço do metro do GFRP que foi utilizado somente barras de 10 mm devido à falta de tabelas com todas as características necessárias para ser realizado os cálculos. Para barras de 8mm há uma diferença de R\$ 4,77 por metro e para barras de 10mm em torno de R\$ 2,78 por metro mais barato que a fibra.

A diferença relativa dos preços pode alterar dependendo da quantidade de material a ser utilizado em uma viga com vergalhão de aço. Com uma bitola de aço de 10 mm, por exemplo, os valores podem ser mais aproximados considerando o tamanho do vão efetivo a ser estudado e a quantidade necessária de vergalhões para a execução de uma viga.

O caso das vigas 6 e 7 deixa mais visível essa diferença, pois foi trabalhado com vãos maiores, necessitando de maior área de aço para cada caso. Assim, nota-se que o valor total do GFRP acabou sendo um pouco mais barato devido a quantidade de vergalhões utilizados, o que pode ser mais vantajoso pelo fato de as vigas com aço possuírem 3 vergalhões enquanto o GFRP possui somente 2 vergalhões.

Por mais que a fibra seja um pouco mais barata do que as barras de aço se tratando de vigas com vãos maiores, essa diferença é mínima. Isso não a torna muito vantajosa levando em consideração a falta de mão de obra adequada para sua execução e tipo de obra em estudo. Para obras residenciais de pequeno porte, cujo tamanho das vigas seja pequeno, a utilização da fibra de vidro é inviável.

Seu cálculo é parecido com os cálculos para estruturas com aço, se diferenciando somente em alguns fatores ambientais e fatores de cálculo. Este trabalho teve como finalidade trazer somente uma prévia das barras de GFRP, não foram realizados os cálculos dos estribos. Por se tratar de um material que foi recentemente adicionado ao mercado brasileiro ainda existem muitas lacunas a serem exploradas.

## REFERÊNCIAS

ACI 319: **Building code requirements for structural concrete**, 2019.

CAMARGO, M. V. D; FERRARI, V. J. **Resistência à compressão e módulo de elasticidade do concreto por meio de ensaios não destrutivos (END)**. Matéria (Rio de Janeiro), 2021.

CUNHA, D. R. D. **Estudo da aderência de barras poliméricas reforçadas com fibras de vidro (GFRP) ao concreto**, 2019.

DALFRÉ–PROFESSORA, G. M.; FERREIRA–PROFESSORA, F. G. D. S. **Dimensionamento de vigas de concreto armadas à flexão com barras não metálicas**, 2020.

DALFRÉ, G. M.; MAZZÚ, A. D. E. ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE VIGAS DE CONCRETO ARMADAS A FLEXÃO COM ARMADURAS NÃO-METÁLICAS DE GFRP. **Revista Tecnológica**. 2020.

ESTACECHEN, T. A. C. Comparativo da resistência à compressão do concreto através de ensaios destrutivos e não destrutivos. **Construindo**, 2020.

FERREIRA, D. C. **Avaliação da degradação de vigas reforçadas com FRP quando expostas ao intemperismo**, 2019.

FILHO, C. A. **Influência da granulometria nas propriedades do concreto** (Bachelor's thesis), 2020.

GÓES, W. S. **Estudo da deflexão em vigas de concreto armado com barras não metálicas** (Bachelor's thesis, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2020).

HENNEMANN, M. B., DA SILVA, C. R., SCHNEIDER, E. L. Processo de fabricação por pultrusão e as aplicações no design de produto. **Revista Tecnologia e Tendências**, 2019.

LUNGISANSILU, R. T.; FELIX, R. M.; MENDES, L. C. Análise de fissuras em vigas de concreto armado. **Brazilian Journal of Development**, 2021.

MAINES, A.; RIFFEL, E.; SENS, G. L., SILVA, D. A., MARTINS, L. (2022). ESTUDO DE AUTOCICATRIZAÇÃO DE FISSURAS EM CONCRETO COM FIBRAS METÁLICAS UTILIZANDO ADITIVO CRISTALIZANTE. **Revista da UNIFEBE**, 2022.

MAZZÚ, A. D. E. **Estudo sobre a substituição de armadura metálica por barras de GFRP em vigas de concreto armadas à flexão quando submetidas ao ataque acelerado de íons cloreto**, 2020.

MELO, R. H; TEIXEIRA, A. M. A. J; CARNEIRO, L. A. V. Vigas de concreto armado reforçadas à flexão com barras de aço e FRP no cobrimento do concreto. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, 2018.

MORAIS, V. C. **Análise da influência da cura na resistência à compressão axial do concreto**, 2021.

MOURA, N. A. A. **Durabilidade de compósitos produzidos por pultrusão** (Doctoral dissertation), 2022.

NBR 7480: **Aço destinado às armaduras para estruturas de concreto armado – Requisitos**. ASSOCIAÇÃO DE NORMAS TÉCNICAS, 2007.

OLIVEIRA, D. H; SOARES, R. A. B; SANTOS, V. H. D. Comparação entre as vantagens da utilização de estrutura metálica e estrutura de concreto armado. /Comparação entre as vantagens da utilização de estrutura metálica e estrutura de concreto armado. **Revista Brasileira de Desenvolvimento**, 6 (4), 2020.

SANTOS, D. B. F; ALMEIDA, I. G. D. S. **Estudo Comparativo Entre os Vergalhões de Aço e Polímero Reforçado com Fibra de Vidro**, 2022.

SILVA, A. F. D. **Análise numérica de vigas de concreto armadas com barras de fibra de vidro (GFRP)**, 2022.

SULMONETI, R. D. C. **Estudo De Métodos Construtivos Industrializados**, 2022.