

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**

**WESLEY SAMPAIO GÓES**

**ESTUDO DA DEFLEXÃO EM VIGAS DE CONCRETO ARMADO COM BARRAS  
NÃO METÁLICAS**

**TOLEDO**

**2021**

**WESLEY SAMPAIO GÓES**

**ESTUDO DA DEFLEXÃO EM VIGAS DE CONCRETO ARMADO COM BARRAS NÃO METÁLICAS**

**STUDY OF DEFLECTION IN REINFORCED CONCRETE BEAMS WITH NON-METALLIC BARS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito obtenção do título de Bacharel, do curso de Engenharia Civil, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Rodnny Jesus Mendoza Fakhye

**TOLEDO**

**2021**



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

**WESLEY SAMPAIO GÓES**

**ESTUDO DA DEFLEXÃO EM VIGAS DE CONCRETO ARMADO COM BARRAS NÃO METÁLICAS**

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 26/Novembro/2021

---

Rodny Jesus Mendoza Fakhye  
Doutor  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Gustavo Savaris  
Doutor  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Lucas Boabaid Ibrahim  
Doutor  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

**TOLEDO**

**2021**

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus pela tamanha bondade e por ter me capacitado a poder concluir esta graduação

Aos meus pais pelo apoio por todo o tempo sem nunca reclamarem e sempre vir ao meu auxílio.

A minha namorada que sempre me apoiou e que sem a sua motivação nas horas difíceis talvez não teria conseguido sozinho

A todos os professores de Engenharia Civil da UTFPR Câmpus Toledo que com muita dedicação contribuíram para a minha formação. Em especial ao meu orientador Dr. Rodnny Jesus Mendoza Fakhye, que sempre esteve disponível e se fez presente sempre que necessitei de auxílio.

Aos meus amigos que fizeram este tempo da faculdade um tempo muito mais fácil e divertido, sempre um dando suporte ao outro nas dificuldades.

## RESUMO

Este trabalho baseia-se na substituição de barras de aço convencional por barras de FRP (Fiber Reinforced Polymer) em vigas em concreto armado. Assim, foram dimensionadas uma viga em concreto armado com aço seguindo as recomendações da ABNT NBR 6118:2014, e vigas armadas com barras com FRP usando a ACI 440.1R (ACI,2015), para se estudar, comparando, a deflexão sofrida por estas estruturas. O primeiro dimensionamento foi a viga armada com barras de aço, sendo dimensionado para que a estrutura esteja no domínio 3, assim tendo seu modo de ruptura para o escoamento da barra de aço. As vigas armadas com material de FRP foram dimensionada para que o seu modo de ruptura se dê a partir do esmagamento do concreto. Comparando as deflexões obtidas com cada um dos modelos analisados observamos que a viga armada com barras de aço tem a menor deflexão onde já era esperado, sabendo que um dos fatores que tem grande influência é o módulo de elasticidade.

**Palavras-chaves:** Concreto armado; Deflexão; Barras de FRP.

## ABSTRACT

This work is based on the replacement of conventional steel bars by FRP (Fiber Reinforced Polymer) bars in reinforced concrete beams. A steel reinforced concrete beam was fabricated following the recommendations of ABNT NBR 6118:2014 and beams reinforced with FRP bars were fabricated using ACI 440.1R (ACI, 2015), for a comparative study of the deflection suffered by these structures. The first design was the beam reinforced with steel bars, being designed so that the structure is in domain 3, thus having its failure mode for the yielding of the steel bar. The beams reinforced with FRP material were dimensioned so that their failure mode occurs from the crushing of the concrete. Comparing the deflections obtained with each of the analyzed models we observed that the beam reinforced with steel bars has the smallest deflection where it was already expected, knowing that one of the factors that has great influence is the modulus of elasticity.

**Keywords:** Reinforced Concrete; deflection; FRP bars

## LISTA DE FIGURAS

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Figura 1 - Vigas baldrames .....</b>   | <b>12</b> |
| <b>Figura 2 - Armadura de aço .....</b>   | <b>13</b> |
| <b>Figura 3 - Barras de fibra de vidro (GFRP) .....</b>                             | <b>14</b> |
| <b>Figura 4 - Diagrama aproximado retangular para esmagamento do concreto .....</b> | <b>17</b> |
| <b>Figura 5 - Diagrama para ruptura da barra de FRP.....</b>                        | <b>19</b> |
| <b>Figura 6 - Diagrama para ruptura balanceada.....</b>                             | <b>20</b> |

## LISTA DE TABELAS

|  |           |
|--|-----------|
| <b>Tabela 1 - Propriedades das fibras usadas em barras de FRP.....</b> | <b>15</b> |
| <b>Tabela 2 - Propriedades das barras de GFRP Aslan 100 .....</b>      | <b>24</b> |
| <b>Tabela 3 - Propriedades das barras de CFRP Aslan 200.....</b>       | <b>24</b> |
| <b>Tabela 4 - Viga em concreto armado com barras de aço.....</b>       | <b>25</b> |
| <b>Tabela 5 - Comparativo entre as deflexões obtidas .....</b>         | <b>29</b> |



## Sumário

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>1</b> | <b>INTRODUÇÃO.....</b>                                    | <b>10</b> |
| 1.1      | Justificativa.....  | 10        |
| 1.2      | Objetivo geral.....                                       | 11        |
| 1.2.1    | Objetivos específicos.....                                | 11        |
| <b>2</b> | <b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>                         | <b>12</b> |
| 2.1      | Vigas.....  | 13        |
| 2.2      | Polímero reforçado com fibras (FRP).....                  | 13        |
| 2.3      | Propriedades das barras de FRP.....                       | 14        |
| 2.3.1    | Propriedades mecânicas das barras de FRP.....             | 14        |
| 2.4      | Dimensionamento de vigas armadas com barras de FRP.....   | 15        |
| 2.4.1    | Dimensionamento à flexão.....                             | 15        |
| 2.4.2    | Ruína por esmagamento do concreto.....                    | 17        |
| 2.4.3    | Ruína por ruptura da barra.....                           | 19        |
| 2.4.4    | Ruína por ruptura da barra e esmagamento do concreto..... | 20        |
| 2.5      | Deflexão.....   | 20        |
| <b>3</b> | <b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>                           | <b>23</b> |
| 3.1      | Vigas analisadas.....                                     | 23        |
| 3.2      | Barras para armadura.....                                 | 23        |
| <b>4</b> | <b>RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>                       | <b>25</b> |
| 4.1      | Viga armada com barras de aço.....                        | 25        |
| 4.2      | Dimensionamento a flexão para vigas armadas em GFRP.....  | 25        |
| 4.3      | Dimensionamento a flexão para vigas armadas em CFRP.....  | 26        |
| 4.4      | Deflexão em viga armada com barras de GFRP.....           | 27        |
| 4.5      | Deflexão em viga armada com barras de CFRP.....           | 27        |
| 4.6      | Discussões.....   | 28        |
| <b>5</b> | <b>CONCLUSÃO.....</b>                                     | <b>30</b> |
|          | <b>REFERÊNCIAS.....</b>                                   | <b>31</b> |

## **1 INTRODUÇÃO**

Algumas situações podem ser consideradas críticas para estruturas de concreto armado com barras de aço, tendo problemas com o custo de manutenção e vida útil em relação a sua durabilidade. Estruturas que se localizam em regiões litorâneas e pontes são algum desses casos críticos (TAVARES, 2006).

Então para solucionar este problema vem-se pesquisando armaduras que sejam inertes à corrosão e à formação de campos eletromagnéticos. Essas novas barras são uma composição de fibras com resina, as FRP (Fiber Reinforced Polymer) (TAVARES, 2006).

O uso da fibra de vidro já tem sua utilização em concretos e argamassas, onde a sua capacidade de deformação é aumentada e se tem um auxílio à resistência a tração e impacto. Já utilização das barras de fibra de vidro vem surgindo como uma alternativa para substituir as armaduras de aço devido à corrosão (VARES, 2019).

As barras de FRP possuem um módulo de elasticidade significativamente inferior em relação com o aço, devido a isso quando utilizada em estruturas em concreto armado restringe o dimensionamento por haver grandes deformações ou a alta intensidade de fissuração (SÁ, 2018).

Portanto se faz necessário estudos que possam comprovar a eficiência dessas barras para que as mesmas sejam uma substituta viável para a armadura de aço, onde se deve aprofundar em seu comportamento em relação as deformações estruturais, fissuração, já que o modulo de elasticidade é um fator de grande influência nestes parâmetros.

### **1.1 Justificativa**

Os estudos relacionados ao dimensionamento de vigas em concreto armado com barras não metálicas no Brasil são relativamente recentes, da mesma maneira a sua utilização criando uma demanda pelo seu estudo e caracterização.

O uso de barras não metálicas ainda não está regulamentado pela norma brasileira sendo assim necessária análises e comparação deste novo material com o concreto armado convencional

Assim será feito um comparativo de vigas em concreto armado com barras metálicas de aço CA-50 com vigas armadas com barras não metálicas, no que se refere a avaliação da deflexão.

## **1.2 Objetivo geral**

O presente trabalho tem por objetivo a análise e comparativo da deflexão e fissuração de vigas em concreto armado com barras metálicas e com barras não metálicas.

### **1.2.1 Objetivos específicos**

- Estudo das propriedades físicas e mecânicas das barras de FRP
- Verificação e comparação do desempenho quanto a deflexão de vigas em concreto armado com barras metálicas e barras não metálicas usando exemplos de verificação.
- Verificação do desempenho quanto a fissuração em vigas de concreto armado com barras metálicas e não metálicas usando exemplos de verificação.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O concreto armado depende da aderência do concreto e armadura, onde a armadura é posicionada de maneira natural, ou seja, não alongada, antes da materialização da aderência. (NBR 6118, 3.1.3).

O concreto armado é a união das qualidades do concreto com a armadura a ser utilizada, o concreto traz durabilidade e boa resistência a compressão e a armadura, comumente usada o aço traz qualidades como excelentes resistências à tração e à compressão (BASTOS, 2019).

A figura 1 mostra vigas baldrame e armaduras preposicionada para a concretagem de pilares. A figura 2 apresenta a amarração para estruturas de concreto armado.

**Figura 1 - Vigas baldrames**



Fonte: (BASTOS, 2019)

**Figura 2 - Armadura de aço**



Fonte: (MAZZÚ, 2020)

## **2.1 Vigas**

A norma brasileira define viga como “elementos lineares em que a flexão é preponderante” (NBR 6118, 14.4.1.1). Elementos lineares são aqueles em que o comprimento longitudinal é ao menos três vezes a maior dimensão da seção transversal.

O concreto por si só tem uma alta resistência a compressão em contra partida tem uma baixa resistência a tração, então em peças submetidas totalmente ou parcialmente a tração como é o caso das vigas se faz necessário o uso de aço para resistir a estes esforços. O aço é posicionado na peça de modo a resistir às tensões de tração. Sendo usado um conjunto de armaduras que é envolvida no concreto assim originando o chamado concreto armado (BASTOS, 2019).

## **2.2 Polímero reforçado com fibras (FRP)**

Segundo (MELO, TEIXEIRA, CARNEIRO, 2018) para a fabricação do FRP é utilizada uma técnica chamada pultrusão que combina dois ou mais elementos insolúveis entre si, sendo um o reforço e o outro a matriz polimérica, onde fica embebido ao primeiro. Reforço é aquele feito de fibra, as principais fibras utilizadas em FRP são as fibras de vidro, carbono, aramida e basalto. As matrizes utilizadas são de epóxi, fenólica,

poliéster, e éster vinílica. A figura 3 mostra barras de GFRP que são barras de fibra de vidro.

A rigidez e a resistência das barras de FRP é dada pela fibra utilizada na sua composição, enquanto a matriz traz proteção contra umidade e meio alcalinos e ácidos, também possibilitando a transferência de carga entre elas.

**Figura 3 - Barras de fibra de vidro (GFRP)**



**Fonte: (Antop Global)**

## **2.3 Propriedades das barras de FRP**

Como todo material utilizado de forma estrutural é relacionado com as propriedades físicas e mecânicas com as barras de FRP não é diferente. Para as barras de FRP deve ser considerada a escolha dos materiais, a proporção utilizada entre fibra e matriz, a orientação das fibras e o processo de produção (TAVARES, 2006).

### **2.3.1 Propriedades mecânicas das barras de FRP**

Os materiais constituintes, a fração entre eles, o processo de produção, distribuição, é o que determina fatores como a resistência e o módulo de elasticidade.

Além disso o diâmetro da barra e a qualidade da fabricação também alteram as propriedades da barra (TAVARES, 2006).

A resistência a compressão das barras não se comporta tão bem em comparação com a resistência a tração, pois a ruptura ocorre por meio de microfissuração das fibras assim sendo relacionada ao volume das fibras. Diferente da compressão a resistência ao cisalhamento é dada pela matriz, e normalmente tem uma baixa resistência (MAZZU, 2020).

A tabela 2.1 mostra como os fatores citados acima alteram nas características das barras de FRP, apresentando diferentes barras com diferentes características.

**Tabela 1 - Propriedades das fibras usadas em barras de FRP**

| FIBRA                       | Resistencia a tração (Mpa) | Modulo de deformação (Gpa) | Alongamento (%) | Massa específica (g/cm <sup>3</sup> ) | Diâmetro (mm) |
|-----------------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------|---------------------------------------|---------------|
| <b>Carbono</b>              |                            |                            |                 |                                       |               |
| <b>Poliacrílico Nitril</b>  |                            |                            |                 |                                       |               |
| Alta resistência            | 3430                       | 196-235                    | 1,3-1,8         | 1,7 – 1,8                             | 5 a 8         |
| Alto módulo de elasticidade | 2450-3920                  | 343-637                    | 0,4 – 0,8       | 1,8 – 2,0                             | 5 a 8         |
| <b>Carbono Pitch</b>        |                            |                            |                 |                                       |               |
| Comum                       | 764-980                    | 37-39                      | 2,1 – 2,5       | 1,6 – 1,7                             | 9 a 18        |
| Alto módulo de elasticidade | 2940-3430                  | 392-784                    | 0,4 – 1,5       | 1,9 – 2,1                             | 9 a 18        |
| <b>Aramida</b>              |                            |                            |                 |                                       |               |
| Kevlas 49 Twaron            | 2744                       | 127                        | 2,3             | 1,45                                  | 12            |
| Technora                    | 3430                       | 72,5                       | 4,6             | 1,39                                  | 12            |
| <b>Vidro</b>                |                            |                            |                 |                                       |               |
| Vidro-E                     | 3430-3528                  | 72,5-73,5                  | 4,8             | 2,6                                   | 8 a 12        |
| Vidro álcali resistente     | 1764--3430                 | 68,6-70                    | 4 – 5 2 –3      | 2,27                                  | 8 a 12        |

*Fonte: (Adaptado de COUTO, 2007)*

## 2.4 Dimensionamento de vigas armadas com barras de FRP

As barras de FRP possuem a característica de ruptura brusca, além de não apresentarem patamar de escoamento, um comportamento elástico linear onde a sua resistência é dada apenas na direção longitudinal. Desta forma entram em colapso sem aviso de ruptura por serem materiais de comportamento frágil (MAZZÚ, DALFRÉ, FERREIRA, 2020).

### 2.4.1 Dimensionamento à flexão

De acordo com (MAZZÚ, DALFRÉ, 2018) o dimensionamento à flexão para barras de FRP, diferentemente das barras de aço onde se dimensiona a estrutura para o escoamento da barra de aço, assim se garantindo o escoamento e ductibilidade da estrutura, para as barras de FRP é dimensionado para o esmagamento do concreto na fibra mais comprimida, pois, as barras de FRP não apresentam escoamento assim não podendo ser levado em conta.

Para saber como se dará a ruína da estrutura tem-se alguns parâmetros que devem ser considerados, um deles é a taxa de armadura de FRP ( $\rho_f$ ) e a taxa de armadura balanceada é dada por  $\rho_{fb}$  sendo está a taxa de armadura que ocasiona a ruptura do FRP e esmagamento do concreto juntas. Sendo  $\rho_f$  a taxa de armadura definida na Equação 1, onde  $A_f$  é a área das barras de FRP em mm,  $b$  é a largura da viga em mm e  $d$  é a altura útil da viga em mm.

$$\rho_f = \frac{A_f}{b \cdot d} \quad (1)$$

Sendo a Equação 2 a taxa de armadura balanceada, donde  $\beta_1$  é um fator de redução (valor de 0,85 para concretos com  $f_{ck}$  menor ou igual a 27,6 MPa e a cada 6,9 MPa acima deste valor tem se uma redução de 0,05 no fator de redução),  $f_{ck}$  é a resistência característica do concreto, em MPa,  $E_f$  é o módulo de elasticidade da barra de FRP onde esse valor é fornecido pelo fabricante ou o utilizando o valor médio obtido por meio de experimentos por meio de amostras ( $f_{fu}^*$ ), e  $\epsilon_{cu}$  é a deformação última do concreto.

$$\rho_{fb} = 0,85 * \beta_1 * \left( \frac{f_c}{f_{fu}} \right) * \frac{E_f * \epsilon_{cu}}{E_f * + f_{fu}} \quad (2)$$

Para  $f_{fu}$ , temos a Equação 3, sendo  $f_{fu}^* = f_{u,ave} - 3 * \sigma$ , com  $f_{u,ave}$  a resistência média à tração das amostras,  $\sigma$  o desvio padrão e  $C_E$  o fator ambiental de redução.

$$f_{fu} = C_E * f_{fu}^* \quad (3)$$

Nas Equações 4 e 5, temos  $\epsilon_{fu}$  que é a deformação de ruptura de projeto da barra de FRP,  $\epsilon_{u,ave}$  sendo a deformação média à tração das amostras teste,  $\sigma$  o desvio padrão e  $C_E$  o fator ambiental de redução, havendo a possibilidade do fornecimento do  $\epsilon_{fu}^*$  pelo fabricante das barras de FRP.

$$\epsilon_{fu} = C_E * \epsilon_{fu}^* \quad (4)$$

$$\epsilon_{fu}^* = \epsilon_{u,ave} - 3 * \sigma \quad (5)$$



Na Equação 6 é apresentado o fator de redução de resistência,  $\phi$ , que depende da razão da taxa de armadura de FRP ( $\rho_f$ ) e a taxa de armadura balanceada ( $\rho_{fb}$ ).

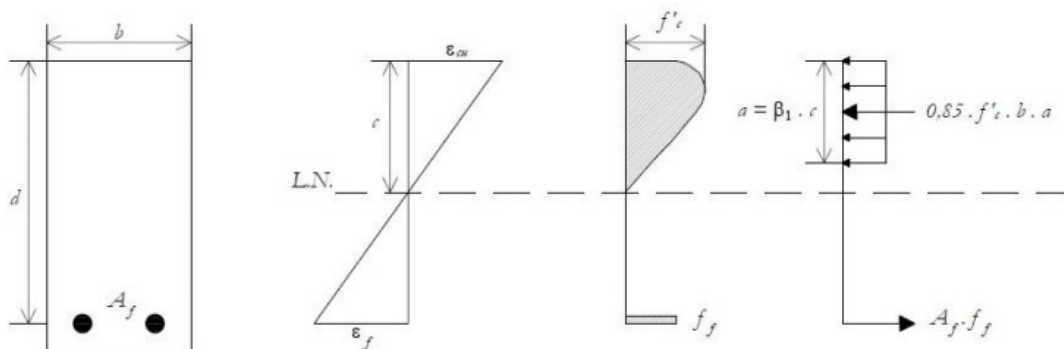
$$\phi = \begin{cases} 0,55 \text{ se } \rho_f \leq \rho_{fb} \\ 0,3 + 0,25 * \left(\frac{\rho_f}{\rho_{fb}}\right) \text{ se } \rho_{fb} < \rho_f < 1,4 * \rho_{fb} \text{ (6)} \\ 0,65 \text{ se } \rho_f \geq 1,4 * \rho_{fb} \end{cases}$$

Sendo possível três tipos de ruína para a estrutura: ruína por esmagamento do concreto, está sendo considerada a melhor opção para barras de FRP, mas por questão de enriquecimento do trabalho será apresentado também a ruína por ruptura da barra e ruína por ruptura das barras e esmagamento do concreto.

#### 2.4.2 Ruína por esmagamento do concreto

O diagrama de tensões no concreto apresentado em formato retangular se dá quando  $\rho_f > 1,4 * \rho_{fb}$ .

**Figura 4 - Diagrama aproximado retangular para esmagamento do concreto**



**Fonte: (Adaptado de MAZZÚ; DALFRÉ, 2018)**

Assim sendo calculada a capacidade resistente da estrutura, sendo apresentada na Equação 7 temos a força resultante ( $R_f$ ) onde a área de armadura é ( $A_f$ ) e a tensão aplicada na armadura sendo ( $f_f$ ), e na Equação 8 temos o braço de alavanca sendo apresentado como ( $z$ ).

$$R_f = A_f * f_f \quad (7)$$

$$z = \left(d - \frac{a}{2}\right) \text{ ou } z = \left(d - \frac{\beta_1 * c}{2}\right) \quad (8)$$

Para se obter a resistência nominal a flexão basta multiplicar a força resultante na armadura e o braço de alavanca definida pelo binário de força, como apresentada a seguir da Equação 9 a Equação 15.

$$M_n = A_f * f_f * (d - \frac{a}{2}) \quad (9)$$

Pelo equilíbrio de forças temos:

$$R_f = R_c \quad (10)$$

Assim:

$$A_f \cdot f_f = 0,85 * f'_c * b * a \quad (11)$$

Igualando as forças obtemos a altura do diagrama retangular sendo igual a Equação 12:

$$a = \frac{A_f * f_f}{0,85 * f'_c * b} \quad (12)$$

Como as barras de FRP tem um diagrama tensão x deformação elástico linear, temos:

$$f_f = E_f * \varepsilon_f \quad (13)$$

Compatibilizando as deformações:

$$\frac{\varepsilon_f}{d-c} = \frac{\varepsilon_c}{c} \quad (14)$$

Sendo  $a = \beta_1 \cdot c$  se isola a deformação na armadura:

$$\varepsilon_f = \varepsilon_{cu} * \frac{\beta_1 * d - a}{a} \quad (15)$$

A Equação 16 apresenta o valor da tensão na armadura em função do diagrama equivalente de tensões e da deformação do FRP.

$$f_f = E_f * \varepsilon_{cu} * \frac{\beta_1 * d - a}{a} \quad (16)$$

Na Equação 17 é apresentada a substituição da altura e isolando a tensão na barra da Equação 16.

$$f_f = \left( \sqrt{\frac{E_f * \varepsilon_{cu}}{4} + \frac{0,85 * \beta_1 * f'_c}{\rho_f} * E_f * \varepsilon_{cu} - 0,5 * E_f * \varepsilon_{cu}} \right) \leq f_{fu} \quad (17)$$

Com isso podemos definir o momento resistente nominal (Equação 18)

$$M_n = \rho_f * f_f * \left(1 - 0,59 * \frac{\rho_f * f_f}{f'_c}\right) * b * d^2 \quad (18)$$

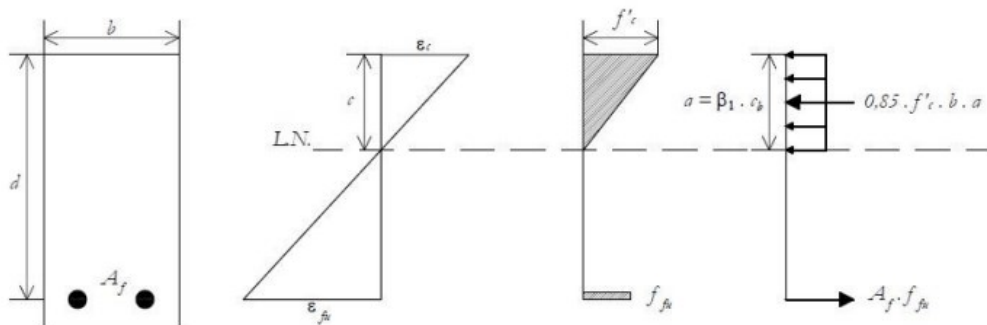
### 2.4.3 Ruína por ruptura da barra

Quando  $\rho_f < \rho_{fb}$ , como a deformação máxima do concreto não chega ao seu ponto máximo, o diagrama de tensões do concreto não pode ser apresentado na forma retangular. Portanto se deve calcular o diagrama como apresentado na figura 5. Sendo a deformação final do concreto quando o FRP rompe e a distância da fibra mais comprimida à linha neutra duas incógnitas no diagrama. Nas Equações 19 e 20 temos dois fatores desconhecidos que definem o diagrama retangular ( $\alpha_1$  e  $\beta_1$ ).

$$\alpha_1 = \frac{f_{cm}}{f'_c} \quad (19)$$

$$\beta_1 = \frac{a}{c} \quad (20)$$

**Figura 5 - Diagrama para ruptura da barra de FRP**



**Fonte: (Adaptado de MAZZÚ; DALFRÉ, 2018)**

Com a grande complexidade que envolve o diagrama e todas as suas variáveis, é feita uma simplificação e a resistência nominal a flexão é dada pela Equação 21:

$$M_n = A_f * f_{fu} * \left(d - \frac{\beta_1 * c}{2}\right) \quad (21)$$

Sendo uma seção do Estado Limite de Ruptura do FRP o valor tem que ser o máximo para a multiplicação de  $\beta_1 c_b$  que este valor máximo é obtido quando a deformação do concreto é 0,003, assim apresentado nas Equações 22 e 23.

$$M_n = A_f * f_{fu} * \left(d - \frac{\beta_1 * c_b}{2}\right) \quad (22)$$

$$c_b = \left(\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_{fu}}\right) * d \quad (23)$$

#### 2.4.4 Ruína por ruptura da barra e esmagamento do concreto

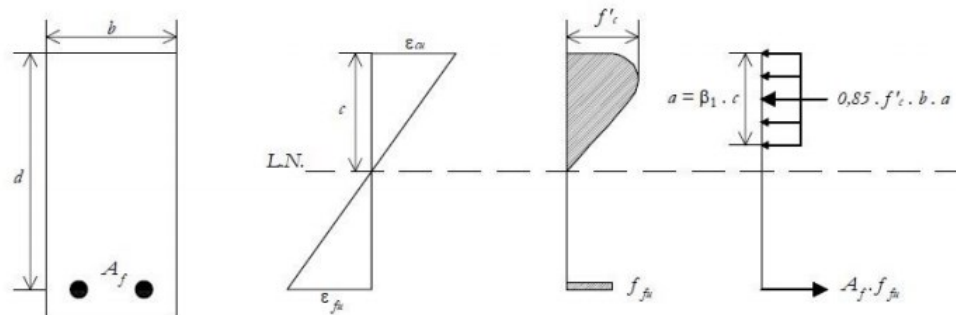
Ocorre se  $\rho_f < \rho_{fb} < 1,4\rho_{fb}$ , sendo um dimensionamento harmonioso a ruína da estrutura ocorrerá por meio da ruptura da barra e esmagamento do concreto ao mesmo tempo, diagrama de tensões apresentado na figura 6.

Sabe-se que  $c = \frac{a}{\beta_1}$ , temos as Equações 24 e 25:

$$\frac{\varepsilon_{fu}}{d-c} = \frac{\varepsilon_{cu}}{c} \quad (24)$$

$$c = \left( \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_{fu}} \right) * d \quad (25)$$

**Figura 6 - Diagrama para ruptura balanceada**



**Fonte: (Adaptado de MAZZÚ; DALFRÉ, 2018)**

A Equação 26 mostra o momento resistente, que é obtido escolhendo o menor valor entre o momento do bloco de tração e o momento de bloco de compressão, assim apresenta na mesma.

$$M_n \leq \begin{cases} A_f * f_f * \left( d - \frac{a}{2} \right) \\ 0,85 * f'_c * b * \beta_1 * c * \left( d - \frac{a}{2} \right) \end{cases} \quad (26)$$

#### 2.5 Deflexão

De acordo com (MAZZÚ, 2018) a variabilidade de rigidez, a natureza elástica flexível e algumas características particulares de reforços de FRP, são pontos que fazem que estruturas armadas com FRP sejam mais suscetíveis às variáveis que afetam a deflexão em comparação a estruturas armadas com barras de aço em condições iguais de tamanho e disposição.

Uma variável a ser considerada é a fissuração, pois, quando não ocorre a mesma temos um momento de inércia igual ao momento de inércia bruto  $I_g$ . A fissuração acontece a partir do momento em que o momento máximo de serviço ( $M_a$ ) ultrapassa o momento de fissuração ( $M_{cr}$ ) desta forma fazendo com que o elemento perca rigidez. A equação 27 representa o momento bruto de inércia ( $I_g$ )

$$I_g = \frac{b \cdot h^3}{12} \quad (27)$$

O momento de inércia da seção fissurada ( $I_{cr}$ ), para uma viga retangular se faz uma análise elástica entre as equações 28 e 29, onde  $n_f$  é a razão entre o módulo de elasticidade das barras de FRP e o módulo de elasticidade do concreto.

$$I_{cr} = \frac{b \cdot d^3}{3} * k^3 + n_f * A_f * d^2 * (1 - k)^2 \quad (28)$$

$$k = \sqrt{2 * \rho_f * n_f + (\rho_f * n_f)^2 - \rho_f * n_f} \quad (29)$$

Utilizando-se da equação proposta por Bischoff (2005) para a inércia efetiva ( $I_e$ ), que é funcional tanto para vigas de concreto armado com barras de FRP tanto para barras de aço sem o uso de correções. O fator adicional ( $\gamma$ ) definido por Bischoff e Gross (2011) como  $\gamma = 1,72 - 0,72(M_{cr}/M_a)$ .

$$I_e = \frac{I_{cr}}{1 - \gamma * \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^2 * \left[1 - \frac{I_{cr}}{I_g}\right]} \leq I_g \quad \text{onde } M_a \geq M_{cr} \quad (30)$$

A Equação 31 representa o momento de fissuração, onde  $y_t$  é a distância do eixo do centroide da seção bruta à face tracionada em mm e  $\lambda$  é o fator de modificação da redução das propriedades mecânicas do concreto.

$$M_{cr} = \frac{0,62 * \lambda * \sqrt{f_c' * I_g}}{y_t} \quad (31)$$

A deflexão à curto prazo é representada pela Equação 32.

$$(\Delta_i)_{sus} = \frac{K * (5) * M_{sus} * l^2}{48 * E_c * (I_e)_{D+L}} \quad (32)$$

Havendo a necessidade de calcular a deflexão em longo prazo, pois, a mesma pode ser superior a deflexão de curto prazo. Este aumento se dá pelos seguintes fatores: Geometria sendo a área de armadura e tamanho do elemento; Características de carga sendo elas a duração e a força da carga e a idade do concreto; característica do material como o módulo de elasticidade do concreto e FRP, o encolhimento e fluência do concreto, e as fissuras.

A deflexão de longo prazo devida à fluência dos elementos reforçados com barras de FRP é dada pela Equação 33.

$$\Delta_{(cp+sh)} = 0,6 * \xi * (\Delta_i)_{sus} \quad (33)$$

### **3 MATERIAIS E MÉTODOS**

Foram comparadas duas situações na flexão, onde tivemos uma viga em concreto armado com barras de aço executada com cálculo analítico segundo a ABNT NBR 6118:2014. A segunda situação foi executada os cálculos de vigas em concreto armado conforme o Instituto Americano de Concreto (ACI 440.R1 – 15) utilizando barras de GFRP e barras de CFRP. Ambas as situações são referentes a um mesmo carregamento, mesma seção transversal de concreto.

Para a estrutura armada em barras de aço com uma análise a um estado de tensões e deformações no domínio 3, com um momento característico  $M_k=44,53\text{kN.m}$  e um momento de cálculo de  $M_d= 62,342\text{kN.m}$ .

Para momento e uma mesma seção transversal de concreto, foi calculado a armadura principal tracionada em GFRP e CFRP, para uma condição de ruína por esmagamento do concreto.

#### **3.1 Vigas analisadas**

Para a realização do estudo foi feita a análise da deflexão em vigas bi apoiadas, tendo um vão livre de 5m e seção transversal de 20x40 centímetros. Tendo o concreto uma resistência de 25MPa e cobrimento de 2,5cm.

Assim utilizando o mesmo momento para uma viga armada com barras de aço foi feito o dimensionamento para as vigas de GFRP e CFRP para a ruína por esmagamento do concreto. Desta maneira teremos as deflexões nas vigas armadas com aço, GFRP e CFRP assim podendo comparar e analisar os resultados obtidos.

#### **3.2 Barras para armadura**

As barras analisadas serão as de Aço, GFRP e CFRP que são barras de fibra de vidro e fibra de carbono respectivamente. Para as barras de GFRP serão utilizadas barras tipo Aslan 100 e para as barras de CFRP a tipo Aslan 200 e o aço CA50. Nas tabelas 2 e 3 são apresentadas as propriedades das barras de acordo com o fabricante Hughes Brothers.

**Tabela 2 - Propriedades das barras de GFRP Aslan 100**

| Diâmetro nominal | Área |                 | $f_{fu}^*$ | $E_f$ | $\epsilon_u$ |
|------------------|------|-----------------|------------|-------|--------------|
| Tamanho          | mm   | mm <sup>2</sup> | MPa        | Gpa   | %            |
| 2                | 6    | 31,67           | 896        | 46    | 1,94         |
| 3                | 10   | 71,26           | 827        | 46    | 1,79         |
| 4                | 13   | 126,70          | 758        | 46    | 1,64         |
| 5                | 16   | 197,90          | 724        | 46    | 1,57         |
| 6                | 19   | 285,00          | 690        | 46    | 1,49         |
| 7                | 22   | 387,90          | 655        | 46    | 1,42         |
| 8                | 25   | 506,70          | 620        | 46    | 1,34         |
| 9                | 29   | 641,30          | 586        | 46    | 1,27         |
| 10               | 32   | 791,70          | 551        | 46    | 1,19         |
| 11               | 35   | 958,10          | 482        | 46    | 1,04         |
| 12               | 38   | 1160,00         | 448        | 46    | 0,97         |
| 13               | 41   | 1338,00         | 413        | 46    | 0,90         |

Fonte: (Adaptado de Hughes Brothers)

**Tabela 3 - Propriedades das barras de CFRP Aslan 200**

| Diâmetro nominal | Área |                 | $f_{fu}^*$ | $E_f$ | $\epsilon_u$ |
|------------------|------|-----------------|------------|-------|--------------|
| Tamanho          | mm   | mm <sup>2</sup> | MPa        | Gpa   | %            |
| 2                | 6    | 31,67           | 2241       | 124   | 1,81         |
| 3                | 10   | 71,26           | 2172       | 124   | 1,75         |
| 4                | 13   | 126,70          | 2068       | 124   | 1,67         |

Fonte: (Adaptado de Hughes Brothers)

O dimensionamento para vigas armadas em barras de FRP seguiu-se as orientações da ACI 440. 1R (2015), e para o dimensionamento da viga armada com barras de aço tendo como base a NBR 6118 (ABNT, 2014).



## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Viga armada com barras de aço

A viga foi dimensionada para suportar um momento  $M_d$  e  $M_k$  apresentados os valores na tabela 4 e a figura 8 demonstra a viga armada com aço.

**Tabela 4 - Viga em concreto armado com barras de aço**

| Barra | bw<br>(mm) | d<br>(mm) | $M_d$<br>(kN.m) | $M_k$<br>(kN.m) | As<br>(mm <sup>2</sup> ) |
|-------|------------|-----------|-----------------|-----------------|--------------------------|
| Aço   | 200        | 418,75    | 62,342          | 44,53           | 652                      |

Fonte: Próprio autor

Encontrando uma deflexão no tempo infinito de 1,71cm que de acordo com a norma ABNT NBR 6118:2014 satisfaz o limite imposto de  $L/250$  sendo  $a_{lim}=2,00$ cm.

### 4.2 Dimensionamento a flexão para vigas armadas em GFRP

Para o cálculo de viga armada com barras de GFRP foi escolhido o tamanho da barra 4 cujo a mesma possui o diâmetro de 13mm, uma tensão de ruptura de 758 e uma deformação de ruptura de 1,64.

$$f_{fu} = 0,8 * 758 = 606,4MPa \quad (3)$$

$$\varepsilon_{fu} = 0,8 * 1,64 = 1 \quad (4)$$

Então foi encontrado a taxa de armadura que ocasionara a ruptura do FRP.

$$\rho_{fb} = 0,85 * 0,85 * \left(\frac{25}{606,4}\right) * \frac{138}{138+606,4} = 0,005522 \quad (2)$$

Para a estrutura ruir por esmagamento do concreto a taxa de armadura ( $\rho_f$ ) deve ser pelo menos 1,4 vezes maior que a taxa de armadura que leva a ruptura da barra ( $\rho_{fb}$ ). Dessa forma encontramos um  $\rho_f$  de valor 0,007731.

Deste modo a partir da equação 1 e isolando  $A_f$  foi possível encontrar a armadura necessária,

$$1,4 * 0,005522 = \frac{A_f}{200 * 418,5} \quad (1)$$

$$A_f = 647,06mm^2$$

Com o valor da armadura pode-se calcular a tensão na barra que deve ser menor ou igual tensão de ruptura.

$$f_f = \left( \sqrt{\frac{138}{4} + \frac{0,85 \cdot 0,85 \cdot 25}{0,007731} * 138 - 0,5 * 138} \right) \leq 606,4 \quad (17)$$

$$f_f = 503 \leq 606,4$$

Assim foi possível definir o momento resistente nominal.

$$M_n = 0,007731 * 503 * \left( 1 - 0,59 * \frac{0,007731 * 503}{25} \right) * 200 * 418,5^2 = 123,71 \text{ kN.m} \quad (18)$$

### 4.3 Dimensionamento a flexão para vigas armadas em CFRP

Para o cálculo de viga armada com barras de CFRP foi escolhido o tamanho da barra 2 cujo a mesma possui o diâmetro de 6mm, uma tensão de ruptura de 2241 e uma deformação de ruptura de 1,81.

$$f_{fu} = 1 * 2241 = 2241 \text{ MPa} \quad (3)$$

$$\varepsilon_{fu} = 1 * 1,81 = 1,81 \quad (4)$$

Então foi encontrado a taxa de armadura que ocasionara a ruptura do FRP.

$$\rho_{fb} = 0,85 * 0,85 * \left( \frac{25}{2241} \right) * \frac{372}{372 + 2241} = 0,001147 \quad (2)$$

Para a estrutura ruir por esmagamento do concreto a taxa de armadura ( $\rho_f$ ) deve ser pelo menos 1,4 vezes maior que a taxa de armadura que leva a ruptura da barra ( $\rho_{fb}$ ). Dessa forma encontramos um  $\rho_f$  de valor 0,001606451

Deste modo a partir da equação 1 e isolando  $A_f$  foi possível encontrar a armadura necessária,

$$1,4 * 0,001606451 = \frac{A_f}{200 * 422}$$

$$A_f = 135,58 \text{ mm}^2 \quad (1)$$

Com o valor da armadura pode-se calcular a tensão na barra que deve ser menor ou igual tensão de ruptura.

$$f_f = \left( \sqrt{\frac{372}{4} + \frac{0,85 \cdot 0,85 \cdot 25}{0,001606451} * 372 - 0,5 * 372} \right) \leq 2241 \quad (17)$$

$$f_f = 1867,59 \leq 2241$$

Assim foi possível definir o momento resistente nominal.

$$M_n = 0,001606451 * 1867,59 * \left(1 - 0,59 * \frac{0,001606451 * 1867,59}{25}\right) * 100 * 422^2 = 97,65 \text{ kN.m}$$

(18)

#### 4.4 Deflexão em viga armada com barras de GFRP

Primeiro foi encontrado o momento de inercia bruto da seção.

$$I_g = \frac{200 * 450^3}{12} = 1,52 * 10^9 \text{ mm}^4 \quad (27)$$

Então foi obtido o resultado do momento de inercia da seção fissurada a partir das equações 28 e 29.

$$k = \sqrt{2 * 0,007731 * 2,14 + (0,007731 * 2,14)^2} - 0,007731 * 2,14 = 0,166 \quad (29)$$

$$I_{cr} = \frac{200 * 418,5^3}{3} * 0,127^3 + 2,14 * 647,06 * 418,5^2 * (1 - 0,127)^2 = 1,91 * 10^8 \text{ mm}^4 \quad (28)$$

Para o cálculo da inercia efetiva ( $I_e$ ) devesse primeiro calcular o momento de fissuração ( $M_{cr}$ ), assim podendo calcular a inercia efetiva e a deflexão imediata.

$$M_{cr} = \frac{0,62 * 1 * \sqrt{25} * 1,52 * 10^9}{\left(\frac{1}{2}\right) * 450 * 10^6} = 20,925 \text{ kN.m} \quad (31)$$

$$I_e = \frac{1,91 * 10^8}{1 - 1,61 \left(\frac{20925}{62342}\right)^2 * \left(1 - \left(\frac{1,91 * 10^8}{1,52 * 10^9}\right)\right)} = 2,2 * 10^8 \leq 1,52 * 10^9 \text{ onde } 62342 \geq 20925 \quad (30)$$

$$(\Delta_i)_{sus} = \frac{1 * (5) * 62,3 * 10^6 * 5^2 * 10^6}{48 * 21500 * 2,2 * 10^8} = 33,78 \text{ mm} \quad (32)$$

Com o valor da deflexão imediata é possível calcular a deflexão a longo prazo, onde foi calculado para uma deflexão de 3 meses e uma deflexão com 5 anos. Os valores para de ( $\xi$ ) para 3 meses e 5 anos são 1 e 2 respectivamente.

Deflexão em 3 meses.

$$\Delta_{(cp+sh)} = 0,6 * 1 * 33,78 = 20,26 \text{ mm}$$

Deflexão em 5 anos.

$$\Delta_{(cp+sh)} = 0,6 * 2 * 33,78 = 40,53 \text{ mm}$$

#### 4.5 Deflexão em viga armada com barras de CFRP

Primeiro foi encontrado o momento de inercia bruto da seção.

$$I_g = \frac{200 \cdot 450^3}{12} = 1,52 * 10^9 mm^4 \quad (27)$$

Então foi obtido o resultado do momento de inercia da seção fissurada a partir das equações 28 e 29.

$$k = \sqrt{2 * 0,001606 * 5,767 + (0,001606 * 5,767)^2} - 0,001606 * 5,767 = 0,127 \quad (29)$$

$$I_{cr} = \frac{200 \cdot 422^3}{3} 0,127^3 + 5,767 * 135,58 * 422^2 (1 - 0,127)^2 = 1,16 * 10^8 mm^4 \quad (28)$$

Para o cálculo da inercia efetiva ( $I_e$ ) devesse primeiro calcular o momento de fissuração ( $M_{cr}$ ), assim podendo calcular a inercia efetiva e a deflexão imediata.

$$M_{cr} = \frac{0,62 * 1 * \sqrt{25} * 1,52 * 10^9}{(\frac{1}{2}) 450 \cdot 10^6} = 20,925 kN.m \quad (31)$$

$$I_e = \frac{1,16 * 10^8}{1 - 1,62 * (\frac{20925}{62342})^2 * [1 - \frac{1,16 * 10^8}{1,52 * 10^9}]} = 1,4 * 10^8 \leq 1,52 * 10^9 \text{ onde } 62342 \geq 20925 \quad (30)$$

$$(\Delta_i)_{sus} = \frac{1 * (5) * 62,3 * 5^2 \cdot 10^{12}}{48 * 21500 * 1,4 * 10^8} = 54,89 mm \quad (32)$$

Com o valor da deflexão imediata é possível calcular a deflexão a longo prazo, onde foi calculado para uma deflexão de 3 meses e uma deflexão com 5 anos. Os valores para de ( $\xi$ ) para 3 meses e 5 anos são 1 e 2.

3 meses.

$$\Delta_{(cp+sh)} = 0,6 * 1 * 54,89 = 32,93 mm$$

5 anos.

$$\Delta_{(cp+sh)} = 0,6 * 2 * 53,89 = 65,87 mm$$

#### 4.6 Discussões

As vigas foram dimensionadas de maneira que foram utilizadas as armaduras mínimas para estarem nos seus respectivos modos de ruptura, sendo no domínio 3 para a viga armada com barras de aço, e esmagamento do concreto para as vigas armadas com as barras de GFRP e CFRP.

A tabela 5 mostra o comparativo entre as deflexões obtidas para o mesmo momento.

**Tabela 5 - Comparativo entre as deflexões obtidas**

| ID   | Material | $(\Delta_i)_{sus}$<br>(mm) | $\Delta_{(cp+sh)}$<br>3<br>meses(mm) | $\Delta_{(cp+sh)}$ 5<br>anos(mm) |
|------|----------|----------------------------|--------------------------------------|----------------------------------|
| Aço  | Aço      | 6,00                       | 6,00                                 | 12,3                             |
| GFRP | GFRP     | 33,77                      | 20,26                                | 40,53                            |
| CFRP | CFRP     | 54,89                      | 32,93                                | 65,87                            |

Fonte: Próprio autor

Era esperado uma deflexão maior na estrutura armada em GFRP isso devido a mesma ter o menor módulo de elasticidade, mas não foi o ocorrido isso devido à alta resistência do material de CFRP fazendo com que a estrutura armada com este material necessite de bem menos armadura para suprir o momento exigido.

Como esperado o aço teve a menor deflexão em relação ao GFRP e CFRP, de acordo com o limite utilizado de L/250 apenas a viga armada com barras de aço está dentro do limite que a norma brasileira. Um ponto a ser considerado é a capacidade dos materiais de FRP de mudarem suas características a partir da sua fabricação, então podendo se pedir por exemplo para um módulo de elasticidade maior que o comercializado.

O uso para as barras de FRP ainda se demanda mais estudos, pois hoje se limita a situações específicas, sendo necessário também mais estudos de como o material irá reagir nestas situações, um exemplo destas situações é um ambiente com uma classe ambiental bastante agressiva, onde se deve ter cuidados especiais para o uso do aço e como as barras de FRP são inertes podendo assim ter vantagens do uso nessas situações.

O modo de ruptura das barras de FRP deve ser um fator para ser levado em consideração em qualquer análise, pois temos o uso do concreto que possui o mesmo modo de ruptura, no caso a ruptura frágil. Quando o concreto usados em conjunto do aço e dimensionado no domínio 3 temos uma interação interessante que seria um aviso prévio que a estrutura irá colapsar, enquanto está interação com as barras de FRP seria apenas do colapso imediato.

## 5 CONCLUSÃO

O presente trabalho estudou a substituição das barras de aço por barras de FRP em vigas em concreto armado, suas vantagens e desvantagens com ênfase na deflexão que cada uma das vigas sofreria. Foram dimensionadas vigas em concreto armadas com barras de aço, GFRP e CFRP.

Apresentam-se, a seguir, as conclusões deste trabalho.

Visando apenas a armadura foi possível notar que o aço e o GFRP para suportar um mesmo momento resistente tendo valores similares, já para as barras de CFRP devido a sua alta resistência a tração, com uma armadura consideravelmente menor conseguimos igualar o momento suportado.

Com relação a deflexão os valores para as barras de GFRP e CFRP se diferenciaram devido a diferença na tensão de ruptura da barra, onde a viga armada com barra de CFRP necessita de menos armadura para chegar na ruína por esmagamento do concreto, com o a área menor de armadura fez com que a deflexão tivesse uma valor maior. Quando comparado a uma estrutura armada com barras de aço os valores são significativamente maiores. Isto provavelmente se deve a diferença notável entre os módulos de elasticidade.

Partindo do ponto que o aço é um material que sofre com ambientes de classe ambiental mais graves, seria necessário um estudo sobre a deflexão em ambientes altamente agressivos e comparar e analisar novamente.

Sugestões para trabalhos futuros.

Estudo comparativo e análise da fissuração em vigas em concreto armado com barras de FRP em ambientes altamente agressivos.

Estudo sobre a deflexão em vigas em concreto armadas com barras de FRP em diferentes tipos de ruínas e momentos resistentes.

Estudo sobre o colapso de uma estrutura armada com um material de ruptura frágil.

## REFERÊNCIAS

- \_\_\_\_\_. ACI COMMITTEE 440.1R. Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Bars. 2015.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 318. Building code requirements for reinforced concrete**. Detroit, USA. 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT. **NBR 6118 - Projeto de Estruturas de Concreto – Procedimento**. Rio de Janeiro, 2014.
- Antop Global. Glass Fiber Reinforced Polymer Reinforcement. Disponível em <http://m.antopgrfp.com/fibre-polymer-rebar/glass-fibre-polymer-rebar/glass-fiber-compositopolymer-composite.html>, acesso em: 14 de maio de 2020.
- BASTOS, Paulo Sérgio dos Santos. Fundamentos do concreto armado. **Bauru: Unesp**, 2006.
- BISCHOFF, P. H.; GROSS, S. P. **Equivalent Moment of Inertia Based on Integration of Curvature**. *Journal of Composites for Construction*. v. 15, n. 3, p. 263-273, 2011.
- BISCHOFF, P. **Reevaluation of Deflection Prediction for Concrete Beams Reinforced with Steel and Fiber-Reinforced Polymer Bars**. *Journal of Structural Engineering*, v. 131, n. 5, Maio/2005, p. 752-767
- COUTO, I. A. **Análise teórica e experimental do comportamento da aderência entre o concreto e barras de fibra de vidro impregnada por polímero**. 2007. 153 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia de Estruturas, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.
- DE MELO, Renan Henrique; TEIXEIRA, Ana Maria Abreu Jorge; CARNEIRO, Luiz Antonio Vieira. Vigas de concreto armado reforçadas à flexão com barras de aço e FRP no cobrimento do concreto. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v. 9, n. 3, p. 234-250, 2018.
- HUGHES BROTHERS. **Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) Bar – Aslan 200 series**. Seward, NE. Novembro/2011.
- HUGHES BROTHERS. **Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP) Rebar – Aslan 100 series**. Seward, NE. Novembro/2011.
- MAZZÚ, A. D. E.; DALFRÉ, G. M.; FERREIRA, F. G. S. Protocolo acelerado de degradação aplicado em vigas de concreto armado com barras de aço convencionais e de GFRP. In: **62º Congresso Brasileiro de concreto**, IBRACON, Anais do 62º IBRACON, Florianópolis, 2020.
- MAZZÚ, A. D. E.; DALFRÉ, G. M. Sobre a substituição de armadura metálica por barras de FRP em vigas de concreto submetidas à flexão. In: **60º Congresso Brasileiro de concreto**, IBRACON, Anais do 60º IBRACON, Foz do Iguaçu, 2018.
- 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. 190 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2020.

SÁ, F. R. G. **Influência da adição de fibras de polipropileno no comportamento de elementos estruturais de concreto armado com barras de GFRP**. 2018. 100 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.

TAVARES, D. H. **Análise teórica e experimental de vigas de concreto armadas com barras não metálicas de GFRP**. 2019. 128 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Estruturas, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

VARES, R. S. **Estudo do reforço à flexão de vigas biapoiadas em concreto armado com barras de fibra de vidro**. 2019. 172 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.