

Análise teórico-numérica de vigas de concreto armado com barras de aço e de polímeros reforçados com fibras de vidro, carbono e aramida

Theoretical-numerical analysis of reinforced concrete beams with steel bars and glass, carbon and aramid fiber reinforced polymers

Análisis teórico-numérico de vigas de hormigón armado con barras de acero y polímeros reforçados con fibra de vidrio, carbono y aramida

Recebido: 02/09/2022 | Revisado: 22/09/2022 | Aceitado: 26/09/2022 | Publicado: 04/10/2022

Denn's Santana Perônic

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1266-677X>
Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Brasil
E-mail: dennsantana.sb@gmail.com

Hélykan Berliet dos Santos Monteiro

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1294-3853>
Centro Universitário Santa Maria, Brasil
E-mail: hellykan@hotmail.com

Daniel Nelson Maciel

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3971-4724>
Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Brasil
E-mail: daniel.maciel@ufrn.br

Rodrigo Barros

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7218-2646>
Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Brasil
E-mail: rodrigo.barros@ufrn.br

Joel Araújo do Nascimento Neto

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4842-1587>
Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Brasil
E-mail: joelneto@ct.ufrn.br

José Neres da Silva Filho

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9138-1771>
Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Brasil
E-mail: jneres@ect.ufrn.br

Resumo

Estruturas de concreto armado estão sujeitas à diversas formas de deterioração, sendo a principal delas a corrosão da armadura metálica que causam prejuízos sociais e econômicos, especialmente em regiões com alta agressividade ambiental. Diante disso, diversos países têm estudado a viabilidade de utilização de armaduras não metálicas, como as de polímeros reforçados com fibras (PRF). Nesse âmbito, o presente trabalho realizou um estudo teórico e numérico do comportamento de vigas de concreto armadas com barras de polímeros reforçados com fibras de vidro (PRFV), carbono (PRFC) e aramida (PRFA), em comparação com uma viga de concreto armada com barras de aço. Para um mesmo carregamento foi dimensionado a viga de concreto com barras de aço conforme a ABNT NBR 6118:2014, e as vigas de concreto armado com barras de PRF segundo o ACI 440.1R:2015. Em seguida, as mesmas foram simuladas numericamente no *software* ANSYS® para analisar as tensões, deformações e deslocamentos. Por fim, verificou-se que a viga com barras de aço demandou uma menor altura útil de projeto e a viga com barras de PRFC requisitou uma menor área de armaduras de combate à flexão. Nas simulações numéricas, todas as vigas apresentaram comportamento coerente de acordo com a ABNT NBR 6118:2014 e ACI 318:2011, tendo a viga composta por concreto e aço exibido respostas numéricas superiores em relação às demais. Em geral, as vigas armadas com PRF obtiveram resultados satisfatórios em comparação com a viga armada com barras de aço, onde a viga armada com PRFC atingiu os melhores resultados entre as vigas com barras de polímeros reforçados com fibras.

Palavras-chave: Concreto armado; Viga; Aço; Corrosão; Polímero reforçado com fibra.

Abstract

Reinforced concrete structures are subject to several forms of deterioration, the main one being the corrosion of the metallic reinforcement that causes social and economic damages, especially in regions with high environmental aggressiveness. Therefore, several countries have studied the feasibility of using non-metallic reinforcement, such as fiber reinforced polymers (FRP). In this context, the present work carried out a theoretical and numerical study of the

behavior of concrete beams reinforced with glass fiber reinforced polymer bars (GFRP), carbon (CFRP) and aramid (AFRP), in comparison with a reinforced concrete beam with steel bars. For the same load, the concrete beam with steel bars was designed according to ABNT NBR 6118:2014, and the reinforced concrete beams with FRP bars according to ACI 440.1R:2015. Then, they were numerically simulated in the ANSYS® software to analyze the stresses, strains and displacements. Finally, it was found that the beam with steel bars required a lower useful design height and the beam with CFRP bars required a smaller area of flexural reinforcement. In numerical simulations, all beams showed consistent behavior according to ABNT NBR 6118:2014 and ACI 318:2011, with the beam composed of concrete and steel showing superior numerical responses in relation to the others. In general, the beams reinforced with FRP obtained satisfactory results compared to the beam reinforced with steel bars, where the beam reinforced with CFRP achieved the best results among the beams with fiber reinforced polymer bars.

Keywords: Reinforced concrete; Beam; Steel; Corrosion; Fiber reinforced polymer.

Resumen

Las estructuras de hormigón armado están sujetas a diversas formas de deterioro, siendo la principal la corrosión del refuerzo metálico que provoca perjuicios sociales y económicos, especialmente en regiones con alta agresividad ambiental. Por lo tanto, varios países han estudiado la viabilidad de utilizar refuerzos no metálicos, como los polímeros reforzados con fibra (PRF). En este contexto, el presente trabajo realizó un estudio teórico y numérico del comportamiento de vigas de hormigón armado con barras de polímero reforzado con fibra de vidrio (PRFV), carbono (PRFC) y aramida (PRFA), en comparación con una viga de hormigón armado con barras de acero. Para la misma carga, la viga de hormigón con barras de acero fue diseñada según la ABNT NBR 6118:2014, y las vigas de hormigón armado con barras de PRFV según la ACI 440.1R:2015. Luego, fueron simulados numéricamente en el software ANSYS® para analizar los esfuerzos, deformaciones y desplazamientos. Finalmente, se encontró que la viga con barras de acero requirió menor altura útil de diseño y la viga con barras de PRFC requirió menor área de refuerzo a flexión. En las simulaciones numéricas, todas las vigas mostraron comportamiento consistente según ABNT NBR 6118:2014 y ACI 318:2011, siendo la viga compuesta de hormigón y acero mostrando respuestas numéricas superiores en relación a las demás. En general, las vigas reforzadas con PRF obtuvieron resultados satisfactorios en comparación con la viga reforzada con barras de acero, donde la viga reforzada con PRFC logró los mejores resultados entre las vigas con barras de polímero reforzado con fibras.

Palabras clave: Concreto armado; Haz; Acero; Corrosión; Polímero reforzado con fibra.

1. Introdução

O concreto está presente na maioria das obras feitas pelo homem, e segundo Rocha (2015) este é o segundo material mais utilizado pela humanidade na construção civil, perdendo apenas para a água. Sua alta utilização é devido às inúmeras vantagens desse material, das quais é possível citar a versatilidade, pois é uma substância plástica que pode ser moldada de diversas formas, é de fácil produção e manuseio, além de ser um material durável e econômico (Nascimento, et al., 2015). Contudo, o concreto apresenta uma deficiência em resistir aos esforços de tração, e a solução mais adotada para essa problemática é a introdução de armações feitas com barras de aço no concreto para combater tais esforços. Essa união é conhecida como concreto armado.

De acordo com Bastos (2006), o concreto armado surgiu a partir da necessidade de unir a durabilidade do concreto com a resistência do aço, sendo uma vantagem desse material composto a possibilidade de assumir várias formas com rapidez e facilidade. O uso de barras de aço como armaduras nas estruturas de concreto armado é dominante no mercado mundial. No entanto, sob certas condições ambientais elas podem sofrer com a corrosão, causando sua deterioração ou até mesmo o colapso progressivo dos elementos estruturais, conduzindo a elevados gastos para reparo e reforço das estruturas deterioradas (Couto, 2007).

Diante disso, nos últimos anos tem-se estudado e desenvolvido materiais não metálicos de alto desempenho e elevada resistência que possam substituir o aço e evitar os problemas de corrosão e posteriores gastos adicionais com reforços estruturais, e que proporcionem uma maior durabilidade às estruturas de concreto armado. Dentre esses materiais encontram-se os compósitos a base de fibras, com ênfase aos polímeros reforçados com fibras (PRF) que apresentam resistência à corrosão e elevada resistência mecânica. Estes foram utilizados nas indústrias eletrônica, aeroespacial e automobilística durante várias décadas, mas sua aplicação na engenharia civil como armadura para o concreto armado, é relativamente recente (Uomoto, et al.,

2002).

Entretanto, antes de introduzir na construção civil novos materiais, como as barras de PRF, é necessário o estudo dos procedimentos de utilização, da sua composição e do seu comportamento estrutural. Com o avanço da tecnologia, se tornou possível simular e estimar o comportamento de estruturas através de programas computacionais que realizam simulações numéricas pelo Método dos Elementos Finitos (MEF), possuindo tal método elevado grau de desenvolvimento na simulação do desempenho de estruturas.

Os principais tipos de PRF são os compósitos fabricados com fibras de vidro (PRFV), carbono (PRFC) e aramida (PRFA). Segundo Ribeiro et al. (2016) as propriedades das barras de PRF têm sido estudadas a alguns anos, principalmente no exterior, em países como Estados Unidos, Canadá e Egito. Porém, no Brasil esse estudo é limitado, pois a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) ainda não estabeleceu uma norma que defina as prescrições necessárias para o dimensionamento de estruturas em concreto armado com barras de PRF, assim como a ABNT NBR 6118:2014 define para estruturas em concreto armado com barras de aço. Embora não haja uma norma nacional, existem normas internacionais, como o conjunto de guias e textos normativos do ACI 440 estabelecido pelo *American Concrete Institute* (ACI), que orientam o dimensionamento com os materiais empregados neste estudo.

Nesse âmbito, o presente trabalho tem como finalidade realizar um estudo teórico e numérico do comportamento de vigas armadas com barras de PRFV, PRFC e PRFA, dimensionadas conforme o ACI 440.1R:2015, com uma viga armada com barras de aço CA-50, dimensionada de acordo com a ABNT NBR 6118:2014.

2. Referencial Teórico

O ACI 440.1R:2015 define barra de PRF como um material compósito com um formato estrutural longo e fino próprio para o reforço interno do concreto, e consiste principalmente em fibras unidirecionais longitudinais envolvidas por um material rígido de resina polimérica. Em relação à sua conformação superficial, as barras podem ser trançadas não areadas, revestidas com areia ou nervuradas, conforme indicado na Figura 1.

Figura 1 - Exemplos de barras de PRF.



Fonte: ACI 440.1R:2015.

De acordo com Micali (2010) as barras de PRF comercialmente disponíveis no mercado são as com fibras de aramida, carbono e vidro. Elas possuem propriedades que favorecem a sua utilização como armadura de estruturas expostas a intempéries capazes de prejudicar o desempenho de armaduras metálicas com o aparecimento de patologias como a corrosão (Tavares & Giongo, 2009). O concreto armado com PRF além de possuir essa vantagem técnica, exhibe vantagens econômicas relacionadas à redução de mão de obra e etapas do processo produtivo, garantindo velocidade ao processo construtivo (Monte, et al., 2014).

Correia (2006) relata que embora esses materiais apresentem vantagens em relação aos usados na construção civil de

forma tradicional, pode-se destacar algumas dificuldades quanto às suas aplicações e propriedades, especialmente no tocante às barras de PRF. O Quadro 1 exibe uma relação entre as vantagens e desvantagens do PRF.

Quadro 1 - Vantagens e desvantagens do PRF em relação ao aço.

Vantagens	Desvantagens
Alta resistência à tração longitudinal	Ruptura à tração frágil, sem escoamento
Resistência à corrosão e ataques químicos	Baixa resistência transversal
Não sofre influências eletromagnéticas	Menor módulo de elasticidade
Baixa densidade	Comportamento anisotrópico
Alta resistência à fadiga	Susceptíveis a danos sob ação de radiações ultravioleta
Termicamente e eletricamente não condutor	Alto coeficiente de expansão térmica
Menor cobrimento de concreto	Susceptível ao fogo

Fonte: ACI 440.1R:2015.

Gallardo (2002) menciona que as barras de PRF são anisotrópicas, pois as suas propriedades mecânicas se aplicam num sentido unidirecional, no caso, seu eixo longitudinal. Esse tipo de característica implica uma máxima resistência apenas na direção do arranjo das fibras. Um arranjo plano e bidirecional apresenta diferentes resistências em função da angulação das fibras. O arranjo tridimensional é isotrópico, mas resulta em resistências muito menores do que aquelas obtidas no arranjo unidirecional. No que diz respeito à impactos ambientais, Katz (2004) comparou pavimentos reforçados com PRF com pavimentos reforçados com aço e determinou que o reforço de PRF teve um impacto ambiental significativamente menor do que o pavimento reforçado com aço durante a vida útil do pavimento.

A densidade é uma outra propriedade física importante pois favorece o transporte e o manuseio das barras, facilitando o trabalho de instalação do PRF na obra e conseqüentemente diminuindo o tempo gasto com sua instalação, sendo uma característica interessante que deve sempre ser levada em consideração em qualquer avaliação de viabilidade para armaduras estruturais (Machado, 2002). O ACI 440.1R:2015 apresenta um comparativo dessa propriedade entre os diferentes materiais na Tabela 1, indicando que as barras de PRF possuem uma densidade de quatro a seis vezes menor que a do aço.

Tabela 1 - Densidade das barras em g/cm³.

Aço	PRFV	PRFC	PRFA
7,90	1,25 a 2,10	1,50 a 1,60	1,25 a 1,40

Fonte: ACI 440.1R:2015.

Tavares (2006) aborda que a utilização de materiais estruturais é intimamente ligada às propriedades mecânicas dos mesmos (Tabela 2). No caso das barras de PRF, os aspectos envolvidos incluem a escolha dos componentes, o processo de produção, a distribuição das fibras e a porcentagem de fibras na matriz polimérica. O controle de qualidade na produção também se constitui fator importante na determinação das propriedades das barras, sendo as mesmas sujeitas às condições de umidade, temperatura e carregamento da estrutura em questão. Os principais parâmetros de interesse para a construção de concreto armado são as propriedades de tração e adesão das barras de PRF.

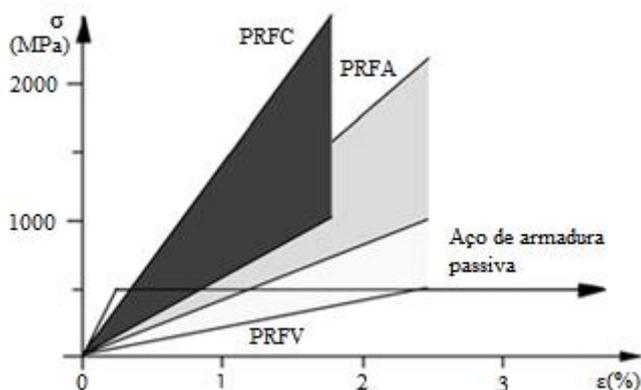
Tabela 2 - Propriedades mecânicas das barras*.

Propriedade	Aço	PRFV	PRFC	PRFA
Resistência ao escoamento (MPa)	276 a 517	-	-	-
Resistência à tração (MPa)	483 a 1600	483 a 690	600 a 3690	1720 a 2540
Módulo de elasticidade (MPa)	200,0	35,0 a 51,0	120,0 a 580,0	41,0 a 125,0
Deformação de escoamento (%)	0,14 a 0,25	-	-	-
Deformação de ruptura (%)	6,0 a 12,0	1,2 a 3,1	0,5 a 1,7	1,9 a 4,4

*Valores típicos para fração volumétrica de fibra variando de 0,5 a 0,7. Fonte: ACI 440.1R:2015.

A Figura 2 exibe o diagrama tensão vs deformação de diversos tipos de armaduras.

Figura 2 - Diagrama tensão vs deformação das armaduras.



Fonte: Adaptado de Pilakoutas, et al. (2002).

O diâmetro das barras também influencia na sua resistência à tração. Quanto maior o diâmetro, menor será a resistência. Isso ocorre devido a existência de um funcionamento irregular ao cisalhamento, pois quanto mais próximas ao centro da seção transversal, menos solicitadas são as fibras às tensões de tração, o que já não acontece com o aço, por exemplo (Silva, 2016).

De acordo com Castro (1997), embora as barras de PRF apresentem boas propriedades físicas e mecânicas, a sua utilização na engenharia civil enfrenta dificuldades devido à tradição conservadora da indústria da construção e também por causa das seguintes questões técnicas:

a) o comportamento da curva tensão vs deformação à tração é de um material frágil e elástico-linear, o que faz com que as atuais equações de projeto sejam inaplicáveis. Como resultado disso, novos métodos de projeto são necessários para garantir segurança e vida útil para os elementos estruturais armados com barras de PRF.

b) a natureza frágil das barras de PRF dificulta o dobramento no campo, logo as barras deverão ser dobradas nas indústrias de sua produção. Contudo, nas grandes cidades há inúmeras prestadoras de serviços que entregam as barras de aço já dobradas. Indicando que a obtenção de um canteiro de obra desobstruído é conveniente às barras de PRF.

c) nos elementos sujeitos à flexão é ocasionado maiores flechas e aberturas de fissuras devido ao seu menor módulo de elasticidade em relação ao aço.

d) a ausência de normas e métodos de ensaio criam obstáculos para a especificação de barras de PRF pelos engenheiros em seus projetos.

3. Metodologia

O estudo foi realizado a partir do dimensionamento de uma viga biapoiada de concreto com armadura passiva, com comprimento efetivo de 3,0 m e largura de 15,0 cm. A área de utilização do cômodo no qual a viga pertence é um depósito de

um edifício residencial com dimensões de 3,0 m x 3,5 m, localizado em uma orla marítima, que é uma região que possui uma classe de agressividade ambiental III de acordo com a ABNT NBR 6118:2014, ambiente no qual o emprego de armaduras não metálicas apresenta vantagens em relação às armaduras metálicas.

O dimensionamento da viga de referência e das armaduras de combate à flexão no Estado Limite Último (ELU) foi realizado com base nas recomendações gerais de projeto de elementos lineares sujeitos à flexão simples da ABNT NBR 6118:2014 e nas recomendações gerais de projeto dos textos normativos e guias do ACI 440.

O ACI 440.1R:2015 é o principal guia para dimensionamento das barras de PRF e foi utilizado para tal. Algumas disposições como fatores de carga e propriedades do concreto não são abordadas diretamente no mencionado guia, sendo indicado que tais disposições devem ser consideradas conforme o ACI 318:2011 que apresenta os requisitos do código de construção para estruturas de concreto armado com aço.

É importante ressaltar que o presente trabalho não trata sobre o dimensionamento das armaduras transversais (estribos) de combate ao cisalhamento, tanto das vigas armadas com barras de aço como de PRF, configurando-se como uma sugestão para pesquisas futuras o estudo teórico e numérico considerando também tais particularidades.

3.1 Ações e carregamentos

Para determinar as cargas consideradas no dimensionamento das vigas foi utilizada a ABNT NBR 6120:2019 que prescreve as ações para o cálculo de estruturas de edificações. Para isso, foram feitas as seguintes considerações: viga com altura pré-dimensionada de 30,0 cm, que corresponde à um décimo do vão efetivo (ABNT NBR 6118:2014); laje maciça retangular com espessura de 10,0 cm; alvenaria de blocos cerâmicos maciços de 14,0 cm com revestimento de 2,0 cm por face e pé direito de 3,0 m; revestimento de piso (contra piso e cerâmica) com 7,0 cm de espessura.

O cálculo das ações atuantes nas lajes que são transferidas para a viga de apoio foi realizado pelo método do Processo das Áreas descrito na ABNT NBR 6118:2014 que se baseia no comportamento em regime plástico a partir da posição aproximada das linhas de plastificação, também denominadas charneiras plásticas. Foi considerado no estudo a laje apoiada em seus quatro lados. Os carregamentos distribuídos das parcelas consideradas foram os mesmos aplicados para o dimensionamento das vigas armadas tanto com barras de aço como com barras de PRF, ou seja, não foram consideradas as normas americanas para o cálculo desses carregamentos. E mesmo o PRF possuindo densidade inferior à do aço foi considerado o peso específico aparente do concreto armado com aço ($25,0 \text{ kN/m}^3$) para ambos dimensionamentos. Essas considerações foram tomadas a fim de que os resultados comparativos fossem mais representativos. Com os carregamentos distribuídos das ações atuantes calculou-se os momentos fletores máximos característicos para uma viga biapoiada, encontrados pelas equações indicadas em Beer et al. (2011).

A combinação das ações foi efetuada de acordo com a norma brasileira de Ações e Segurança nas Estruturas - Procedimento (ABNT NBR 8681:2003) para a viga armada com aço. Enquanto que a norma ACI 440.1R:2015 aponta que a combinação das cargas atuantes nas estruturas deve ser realizada conforme o ACI 318:2011 para as vigas armadas com PRF. Como os fatores de ponderação da ABNT NBR 8681:2003 e do ACI 318:2011 são diferentes, as solicitações de cálculo atingirão valores diferentes. Devido a isso, para ambos os dimensionamentos será considerado a situação mais desfavorável para que os resultados sejam mais representativos.

3.2 Características do concreto

Com base na ABNT NBR 6118:2014, a classe de concreto mínima para uma agressividade ambiental de categoria III utilizando armaduras passivas é de 30,0 MPa, portanto, classe de resistência C30. Para efeito de comparação e representatividade dos resultados, a resistência característica à compressão do concreto adotada foi a mesma para ambos dimensionamentos.

O cobrimento nominal mínimo da armadura de aço foi determinado consoante a ABNT NBR 6118:2014 em função da

classe de agressividade ambiental e do tipo de elemento a ser dimensionado. Como o elemento em questão é uma viga biapoiada de concreto armado com uma classe III de agressividade ambiental, o cobrimento nominal empregado foi de 4,0 cm. Enquanto que o cobrimento nominal das armaduras de PRF foi estabelecido de acordo com o ACI 440.05M:2008 em função da exposição e contato com a terra. Como a viga de referência do trabalho não está em contato com a terra, adotou-se o cobrimento mínimo para armaduras de PRF de 1" (2,50 cm), valor esse adotado também por Micali (2010).

Os valores diferentes entre os cobrimentos das armaduras afetam diretamente o tamanho da altura útil da viga, onde quanto maior o cobrimento, menor será a altura útil. Mesmo havendo diferenças, tais valores foram adotados conforme indicados pela NBR 6118:2014 para a armadura de aço e pelo ACI 440.05M:2008 para as armaduras de PRF, configurando-se como uma vantagem para estas últimas.

3.3 Considerações para o dimensionamento

No dimensionamento foram encontradas as alturas úteis de projeto das seções e foi realizada uma comparação desses valores entre as vigas compostas com diferentes materiais. Após o cálculo das alturas necessárias para as vigas, foi adotado uma altura final com valor inteiro superior múltiplo de cinco.

A viga armada com aço foi dimensionada considerando a linha neutra adimensional no limite imposto pela norma ($\beta_x = 0,45$), garantindo assim que sua ruína seja governada pelo domínio III recomendado pela norma, e que a mesma necessite apenas de armadura simples.

Seguindo a recomendação do guia ACI 440.1R:2015, foi adotado no trabalho o dimensionamento das vigas armadas com PRF governado pelo modo de ruína por esmagamento do concreto, com relação entre a taxa de armadura longitudinal e balanceada $\rho_f/\rho_{fb} = 2$ para agregar maior segurança às mesmas. Os valores de espaçamentos mínimos entre as barras longitudinais estabelecidos pela ABNT NBR 6118:2014 foram atribuídos para ambos os dimensionamentos, considerando a dimensão máxima do agregado graúdo da brita nº 1 (1,90 cm).

3.4 Propriedades físicas e mecânicas das barras

As propriedades físicas e mecânicas das barras de aço CA-50 utilizadas para o dimensionamento foram baseadas nas normas brasileiras. Os diâmetros e áreas nominais foram considerados de acordo com a Tabela B.1 da ABNT NBR 7480:2007. A resistência característica ao escoamento f_{yk} foi considerado 500,0 MPa (CA-50), em conformidade com a ABNT NBR 6118:2014.

Enquanto que as propriedades físicas e mecânicas das barras de PRF foram baseadas em catálogos comerciais da empresa italiana *Sireg Geotech*¹, fabricante de barras do tipo *Glasspree*², *Arapree*³ e *Carbopree*⁴. O módulo de elasticidade E_f e a resistência à tração garantida das barras f_{fu}^* são apresentadas na Tabela 3, sendo esta última propriedade dada em função do diâmetro da barra.

¹ <https://sireggeotech.it/>

² <https://sireggeotech.it/en/civil-engineering/building-restoration/glasspree-gfrp-rebars/>

³ <https://sireggeotech.it/en/civil-engineering/building-restoration/barre-in-fibra-aramidica-arapree/>

⁴ <https://sireggeotech.it/en/civil-engineering/building-restoration/barre-in-fibra-di-carbonio-carbopree/>

Tabela 3 - Propriedades físicas e mecânicas das barras de PRF.

Diâmetro nominal (cm)	Área nominal (cm ²)	Resistência à tração garantida f_{fu}^* (MPa)		
		PRFV	PRFA	PRFC
0,55	0,24	-	1346,90	2300,00
0,60	0,32	900,00	-	-
0,75	0,44	-	1471,30	2300,00
1,00	0,71	900,00	1400,60	2300,00
1,20	1,29	850,00	1162,80	2300,00
1,60	1,99	800,00	-	-
2,00	2,84	780,00	-	-
2,20	3,87	750,00	-	-
2,50	5,10	750,00	-	-
Módulo de Elasticidade (MPa)		46.000,00	60.000,00	130.000,00

Fonte: *Sireg Geotech*, (2022).

O guia ACI 440.1R:2015 e também Silva (2016) relatam que há uma relação inversamente proporcional entre a resistência à tração das barras e o seu respectivo diâmetro, entretanto isso não foi observado nos catálogos das barras de PRFA e PRFC fornecidos pelo fabricante, sendo verificado que a resistência à tração da barra de PRFA com diâmetro de 0,55 cm foi inferior à da barra com 0,75 cm de diâmetro. E as barras de PRFC apresentam a mesma resistência à tração. Apesar dessas incoerências, os dimensionamentos foram realizados com base nos dados fornecidos pelo fabricante. A seleção de bitolas para as armaduras longitudinais foi realizada de forma iterativa, buscando o melhor arranjo possível.

3.5 Simulação numérica no ANSYS

Para realização do trabalho foi utilizado o ANSYS 19.1 versão acadêmica⁵. A simulação numérica pelo MEF foi realizada considerando um comportamento linear das vigas de concreto armado, aplicando-se a carga distribuída resultante e combinada das ações. No ANSYS foi efetuado uma análise do tipo estrutura estática com unidades de comprimento, força e tensão em mm, N e MPa, respectivamente. O elemento SOLID65 correspondente a um elemento tridimensional com oito nós foi utilizado para a modelagem do concreto, enquanto o elemento LINK180 que corresponde a um elemento linear com dois nós foi utilizado para a modelagem das armaduras. Esses elementos também foram usados por outros pesquisadores (Ayash, et al., 2020; Dantas, et al., 2022).

As propriedades dos materiais necessárias para entrada no ANSYS são o módulo de elasticidade e resistência à tração das barras fornecidas pelo fabricante, resistências características do concreto e seu módulo de elasticidade. Embora haja uma pequena diferença nas formulações da ABNT NBR 6118:2014 e do ACI 318:2011 para o cálculo do módulo de elasticidade do concreto, foi utilizado o valor mais desfavorável para todas as quatro simulações. Outra propriedade de entrada essencial é o coeficiente de Poisson dos materiais, no entanto o fabricante das barras de PRF não fornece tal propriedade, então foram adotados os coeficientes descritos por Rasheed (2015). Os dados de entrada estão indicados na Tabela 4.

⁵ <https://www.ansys.com/academic>

Tabela 4 - Propriedades de entrada para o ANSYS.

Módulo de Elasticidade (MPa)		Fonte
Aço	210.000,00	ABNT NBR 6118:2014
PRFV	46.000,00	<i>Sireg Geotech</i>
PRFA	60.000,00	
PRFC	130.000,00	
Coeficiente de Poisson		
Concreto	0,20	ABNT NBR 6118:2014
Aço	0,30	Rasheed (2015)
PRFV	0,28	
PRFA	0,34	
PRFC	0,25	
f_{ck} (MPa)*	30,00	Item 3.2
f_{yk} (MPa)	500,00	ABNT NBR 6118:2014 (CA-50)
f_{fu}^* (MPa)	Em função do diâmetro adotado	Tabela 3

* Resistência característica à tração do concreto corresponde a 10% da resistência à compressão. Fonte: Autores.

Todas as dimensões e detalhamentos das vigas e armaduras longitudinais estiveram em conformidade com o determinado nos dimensionamentos. Foram realizadas quatro simulações numéricas, uma para cada tipo de viga, e foi considerada uma perfeita ligação entre os materiais constituintes, com o intuito de evitar problemas de convergência e também porque não é foco deste estudo analisar a aderência entre o concreto e as armaduras.

Para a geração da malha de elementos geométricos das vigas foi adotado um tamanho de 50,0 mm dos elementos. As cargas distribuídas foram aplicadas sobre todo o comprimento da viga. Os apoios empregados foram do tipo *Remote Displacement* (deslocamento remoto) nas faces dos cantos, deixando livre a rotação em torno do eixo X em ambos apoios, e deixando livre o movimento no eixo Z (eixo longitudinal) em uma das extremidades, que são características de uma viga biapoiada (ver Figura 4.c para melhor compreensão).

É importante salientar que o intuito desse trabalho não é apresentar as formulações constitutivas empregadas no programa ANSYS, mas sim utilizar esse método para simular o comportamento das vigas submetidas à flexão e obter os resultados de deslocamento direcional no eixo Y, tensão e deformação específica das mesmas. Os valores máximos de deslocamento encontrados foram comparados com os valores limites impostos pelas normas. Pela ABNT NBR 6118:2014, a deflexão máxima permitida é de $L/250$, e pelo ACI 318:2011 é $L/240$.

4. Resultados e Discussões

O momento solicitante de cálculo M_{sd} calculado pelas combinações últimas normais seguindo os procedimentos de cálculos das normas ABNT NBR 8681:2003 e ACI 318:2011 para estruturas armadas com aço e PRF, respectivamente, são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Solicitações de cálculo.

Norma	M_{sd} (kN.m)
ABNT NBR 8681:2003	25,693
ACI 318:2011	23,175

Fonte: Autores.

Foi adotado o resultado mais desfavorável para todos os dimensionamentos, que foi o momento fletor das combinações de ações conforme a norma brasileira, que atingiram momentos solicitantes superiores ao do guia americano.

4.1 Dimensionamento à flexão da viga de referência

Os resultados do dimensionamento das vigas armadas com barras de PRFV, PRFA, PRFC e aço submetidas à flexão, conforme as formulações e prescrições de cálculo do guia ACI 440.1R:2015 e da ABNT NBR 6118:2014, são indicados na Tabela 6.

Tabela 6 - Resultados do dimensionamento à flexão.

Dados	Tipo de armadura			
	PRFV	PRFA	PRFC	AÇO
Diâmetro armadura transversal ϕ_t (cm)	0,60	0,55	0,55	0,50
Diâmetro armadura longitudinal ϕ_l (cm)	2,00	1,20	1,00	1,60
Resistência característica garantida pelo fabricante f_{fu}^* (MPa)	780,00	1162,80	2300,00	-
Fator de redução ambiental C_E	0,8	0,9	1,0	-
Resistência à tração de projeto f_{ju} (MPa)	624,00	1046,50	2300,00	-
Taxa de armadura balanceada ρ_b	0,0062	0,0030	0,0013	-
Taxa de armadura longitudinal ρ_f	0,0124	0,0060	0,0027	-
Tensão de tração na barra f_f (MPa)	423,40	716,20	1574,60	-
Altura útil calculada d_{cal} (cm)	23,68	25,93	26,07	17,85
Área de armadura longitudinal necessária A_f (cm ²)	4,39	2,32	1,05	3,66
Número de barras	2	2	2	2
Espaçamento entre as barras longitudinais e_h (cm) ($e_{min}=2,28$ cm)	4,80	6,50	6,90	2,80
Cobrimento d' (cm)	4,10	3,65	3,55	5,30
Altura total calculada h_{cal} (cm)	27,78	29,58	29,62	23,15
Altura total adotada h_{adt} (cm)	30,00	30,00	30,00	25,00
Altura útil adotada d_{adt} (cm)	25,90	26,35	26,45	19,70
Taxa de armadura longitudinal adotada ρ_{fadt}	0,0146	0,0065	0,0036	-
Momento resistente de cálculo M_{Rd} (kN.m)	32,7225	27,4929	29,6538	31,3006

Fonte: Autores.

Todas as vigas demandaram apenas duas barras longitudinais, sendo estas dispostas em uma única camada, logo não houve preocupação com a deficiência de redistribuição dos momentos fletores das vigas armadas com PRF conforme indicado pelo ACI 440.1R:2015, e os espaçamentos entre elas foram todas superiores ao espaçamento mínimo exigido. Embora a altura útil de projeto calculada tenha sido diferente para as três vigas armadas com PRF, por fim foram adotadas as mesmas alturas, e todas elas atingiram a altura mínima recomendada pelo ACI 440.1R:2015.

Foi observado também que as taxas de armaduras se deram de forma inversamente proporcional à resistência das barras e ao módulo de elasticidade, conforme apontado por Tavares (2006) que afirmou que baixos módulos de elasticidade resultam em taxas de armaduras necessárias maiores para que uma viga simplesmente armada obedeça aos critérios do ELU e ELS definidos no guia internacional.

4.2 Comparação entre os dimensionamentos

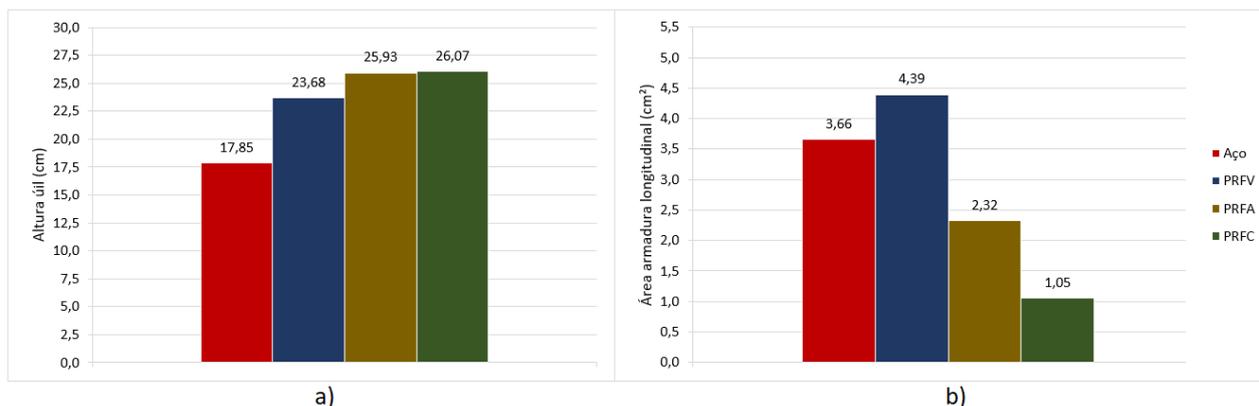
Os dimensionamentos efetuados com base nas formulações da ABNT NBR 6118:2014 apresentaram resultados diferentes dos alcançados a partir das disposições do ACI 440.1R:2015. Uma diferença notável entre os métodos de dimensionamento das duas normas é que a norma brasileira considera uma deformação última do concreto de 3,5%, enquanto que a norma americana considera 3,0%, e segundo Silva (2016) isso faz com que a capacidade resistente do concreto seja maior pela norma brasileira, em razão de que a tensão no concreto é uma função da sua deformação.

Uma desvantagem do método de dimensionamento à flexão do ACI 440.1R:2015 foi a impossibilidade de utilização de barras de diferentes diâmetros na mesma viga, em virtude de que as capacidades resistentes das barras são diferentes para cada

diâmetro, fato que não ocorre para as barras de aço. Logo, isso dificultou o processo de seleção das barras de PRF adequadas ao problema.

Um comparativo entre as alturas úteis de projeto calculadas e as áreas das armaduras longitudinais necessárias de cada viga está indicado na Figura 3.

Figura 3 - a) Altura útil de projeto calculada das vigas; b) Áreas das armaduras longitudinais.



Fonte: Autores.

É possível observar que a viga armada com barras de aço demandou uma altura útil de projeto cerca de 30% menor que a média das demais vigas armadas com PRF, e dentre essas a viga armada com PRFV obteve melhor resultado. Este índice é uma característica importante para as vigas, pois condiciona a sua altura total. E mesmo a viga armada com aço possuir maior cobertura de concreto em comparação com as vigas armadas com compósitos, a sua altura final adotada continuou sendo menor quando comparado às demais.

Esse comportamento crescente das alturas úteis pode estar relacionado à resistência à tração das barras que também são crescentes, sendo diretamente proporcionais. Um destaque às alturas úteis das vigas armadas com PRFC e PRFA que atingiram valores bem próximos.

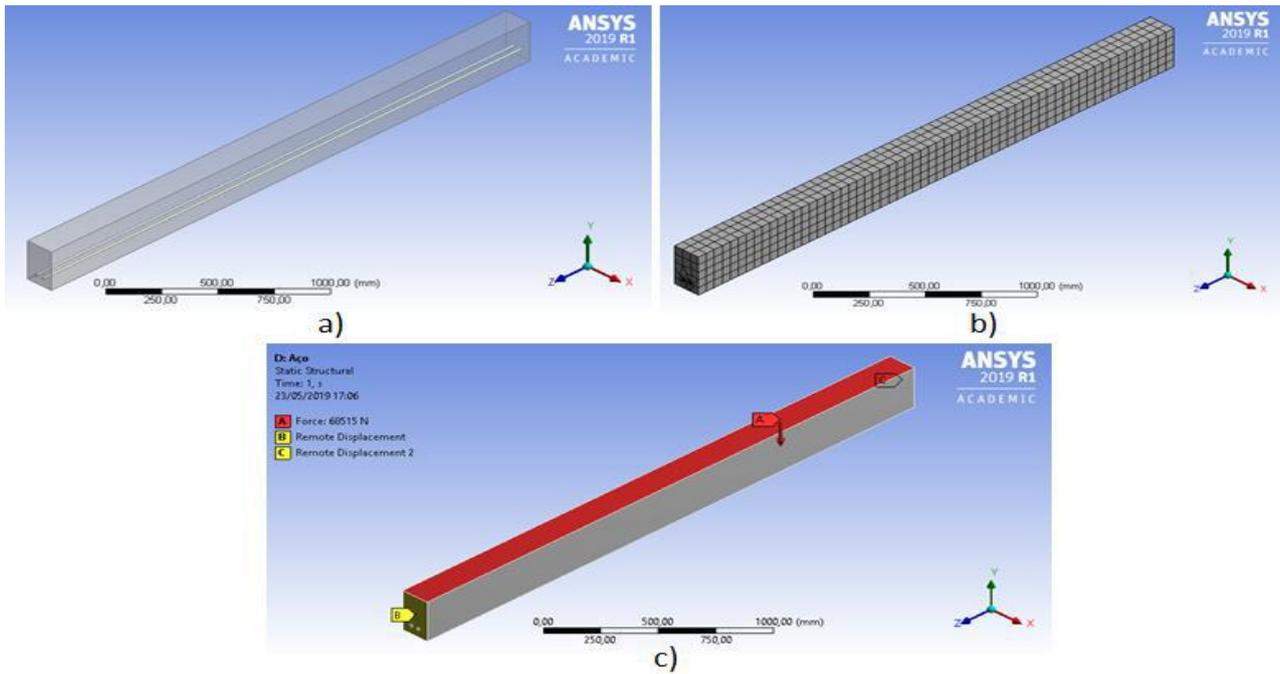
Conforme indicado na Figura 3.b, a viga armada com PRFC requisitou uma menor área longitudinal, em contrapartida, a viga armada com PRFV demandou a maior área em comparação com as demais. A viga armada com aço apresentou melhor resultado apenas em comparação com a viga armada com PRFV, estando em conformidade com Ribeiro et al. (2016) que também verificou uma demanda menor de área de aço.

As vigas armadas com PRF apresentaram um comportamento decrescente à medida que a resistência à tração da barra foi aumentando, sendo o inverso do que ocorreu com a altura útil de projeto. Dessa forma, pode-se notar que a área longitudinal requerida é inversamente proporcional à essa propriedade mecânica das barras de PRF, e isso pôde ser constatado no processo iterativo de escolha da bitola adequada, onde quanto maior fosse a resistência à tração da barra de PRF, menor era a área longitudinal necessária.

4.3 Simulação numérica

A combinação última normal das cargas distribuídas resultou em uma carga distribuída resultante de 22,84 kN/m que foi aplicado sobre as vigas nas simulações. A malha de elementos geométricos da viga armada com aço foi modelada com um total de 19.373 nós e 3.720 elementos. A modelagem, malha e carregamento da viga armada com aço estão apresentados na Figura 4.

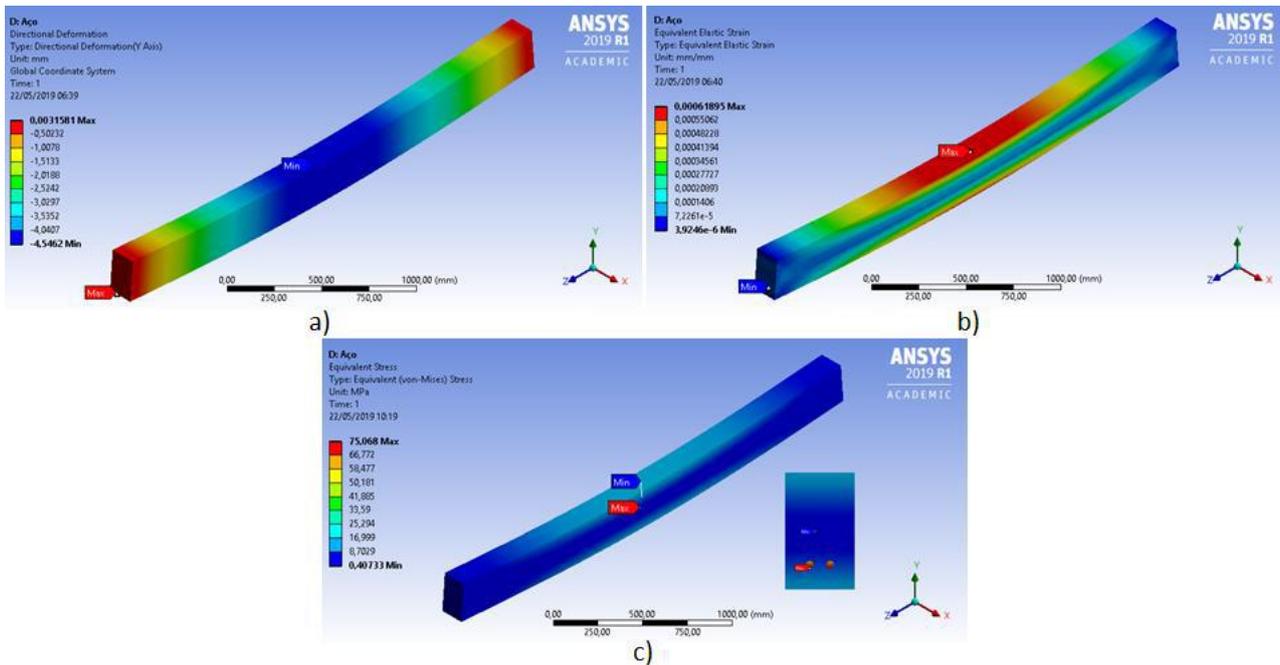
Figura 4 - a) Viga modelada; b) Malha da viga; c) Aplicação da carga e pontos de apoio.



Fonte: Autores.

Com a aplicação do carregamento distribuído ao longo da viga, o *software* gerou as soluções numéricas desejadas. A Figura 5 exibe os deslocamentos, deformações específicas e tensões da viga armada com aço fornecidas pelo programa computacional.

Figura 5 - a) Deslocamentos; b) Deformações específicas; c) Tensões.



Fonte: Autores.

Na Figura 5.a é possível observar que o deslocamento máximo foi de 4,55 mm, e que tal valor se deu no centro da viga. Verificou-se que a deflexão máxima foi inferior à permitida pela norma brasileira ($4,55 \text{ mm} < 12,00 \text{ mm}$), o que indica que a

viga armada com aço passa na verificação do ELS quanto ao deslocamento limite. De acordo com a Figura 5.b, a deformação específica máxima foi de 0,000619 mm/mm e ocorreu na parte superior do centro do vão, ou seja, na face comprimida do elemento, corresponde então à uma deformação compressiva. A deformação mínima se deu na região dos apoios.

Nas barras de aço a deformação específica máxima foi de 0,000357 mm/mm na parte inferior central das mesmas, porém, a deformação específica de tração máxima foi de 0,000573 mm/mm na região inferior da viga.

A tensão máxima atingiu um valor de 75,068 MPa, que corresponde a uma tensão de tração na parte inferior central das barras como indicado no plano da seção transversal da Figura 5.c. Isso ocorreu de forma coerente, pois a resistência quase nula à tração do concreto faz com que os esforços de tração sejam absorvidos pelas armaduras. A máxima tensão de compressão foi de 15,933 MPa na região central superior da viga.

Todas as vigas apresentaram comportamentos semelhantes quanto a distribuição de tensões, deformações e deslocamentos, no entanto com magnitudes diferentes. As respostas numéricas máximas sucederam-se no centro do vão, o que está coerente por se tratar de vigas simplesmente apoiadas em suas extremidades. A quantidade de nós e elementos, bem como os valores máximos de tensão, deformação e deslocamento das vigas estão dispostos na Tabela 7.

Tabela 7 - Resultados das simulações numéricas.

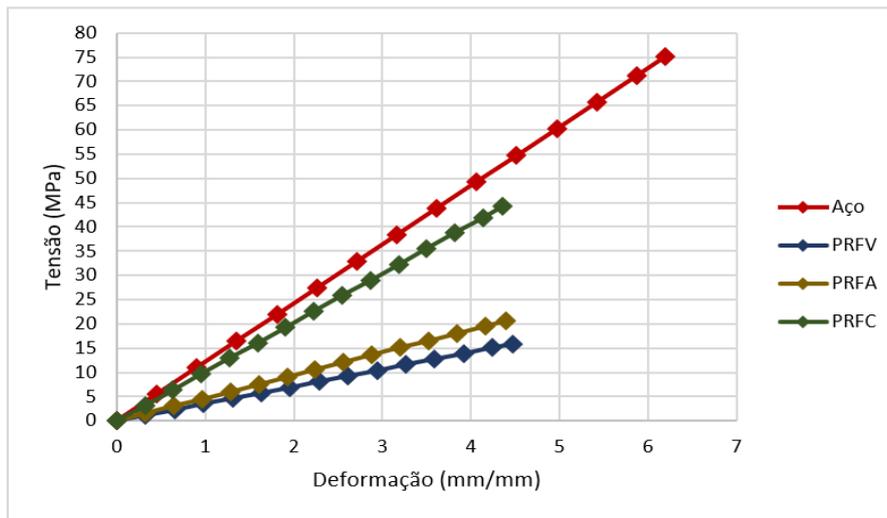
Resultados		Tipo de armadura			
		AÇO	PRFV	PRFA	PRFC
Malhas	Nós	19.373	22.289	21.378	22.413
	Elementos	3.720	4.440	4.260	4.920
Tensão (MPa)	Tração	75,068	15,865	20,643	44,183
	Compressão	15,933	11,267	11,299	11,321
Deformação específica (mm/mm)	Tração	0,00057337	0,00044012	0,00043830	0,00042973
	Compressão	0,00061895	0,00044719	0,00043892	0,00043587
Deslocamento (mm)	-	4,55	2,85	2,80	2,71

Fonte: Autores.

As tensões de tração máximas foram superiores às de compressão, pois à medida que o esforço aumenta a linha neutra da seção se desloca para a parte comprimida, resultando em uma maior área de tração, e consequentemente maiores tensões na parte tracionada devido às maiores distâncias até a linha neutra. Assim, é possível observar que a linha neutra da seção armada com aço atingiu uma altura superior às demais, e atingiu menor altura na seção armada com PRFV.

É verificável que todos os deslocamentos máximos atingidos pelas vigas no centro do vão foram inferiores aos valores máximos permitidos pelas normas, tanto pela brasileira (12,0 mm) quanto pela americana (12,5 mm), passando na verificação do ELS nesse quesito. A partir das simulações numéricas foi possível traçar os diagramas tensão vs deformação das vigas armadas com diferentes armaduras (Figura 6).

Figura 6 - Diagramas tensão vs deformação das vigas.



Fonte: Autores.

Na Figura 6 é possível notar que a viga armada com aço apresentou uma resistência às tensões superior em relação às demais vigas para uma mesma deformação. Dentre as vigas armadas com compósitos, a viga armada com PRFC obteve melhor resultado nesse ponto, e a viga armada com PRFV o resultado mais desfavorável devido ao seu menor módulo de elasticidade. Os diagramas tensão vs deformação das vigas obtiveram comportamento semelhante aos diagramas das armaduras apresentadas por Pilakoutas et al. (2002) na Figura 2.

Em geral, de acordo com a Tabela 7 e a Figura 6, observou-se que a viga armada com barras de aço obteve resultados numéricos superiores em relação as vigas armadas com barras de PRF. Contudo, conforme Castro (1997) a utilização de armaduras de PRF com menor rigidez em elementos sujeitos à flexão resultaria em maiores flechas e abertura de fissuras (deformação) em comparação com a utilização de armaduras de aço, o que não ocorreu no trabalho em questão. Tal fenômeno ocorreu devido às diferentes alturas e cobrimentos das armaduras que resultaram em uma altura útil menor na viga armada com aço. Consequentemente a viga armada com esse material possui uma inércia total inferior às vigas armadas com barras de PRF, o que explica sua menor rigidez total e suas maiores deformações e deslocamentos.

Além disso, pôde-se verificar que as vigas armadas com barras de PRFV, PRFA e PRFC apresentaram comportamentos crescentes no que diz respeito a resistência às tensões, que pode estar relacionado aos também crescentes módulos de elasticidade e resistência à tração das barras adotadas, porém ocorreu o inverso quanto às deformações e deslocamentos, apresentando um comportamento decrescente à medida que essas propriedades aumentaram. Mesmo decrescentes, os resultados de deslocamentos e deformações se deram muito próximos entre si.

No contexto geral, os resultados das simulações numéricas apresentaram coerência em relação à magnitude e localização das respostas numéricas máximas. Entretanto, as tensões, deformações e deslocamentos apresentados no modelo numérico se constituem uma estimativa devido às dificuldades e incertezas que se teve em atribuir com rigor as leis constitutivas no modelo de comportamento dos materiais constituintes, que segundo Souza (2006) é um fator essencial para aproximação dos resultados, e também em virtude da não realização de ensaios experimentais para comparação dos mesmos.

5. Conclusão

Após a realização e comparação do dimensionamento de vigas de concreto armadas com armaduras de aço e de PRF submetidas à um mesmo carregamento distribuído e da análise numérica das mesmas por elementos finitos foi possível realizar algumas constatações.

A viga armada com barras de aço demandou uma altura útil de projeto de 17,85 cm, cerca de 30% menor que a média das vigas armadas com barras de PRFV, PRFA e PRFC, que requisitaram uma altura útil de 23,68 cm, 25,93 cm e 26,07 cm, respectivamente.

Quanto às armaduras longitudinais, a viga armada com PRFC obteve melhor resultado, requisitando uma área de 1,05 cm². A viga armada com aço solicitou uma área (3,66 cm²) menor apenas em relação a viga armada com PRFV (4,39 cm²), já a viga armada com PRFA requisitou uma área de 2,32 cm².

Nas análises de tensão, deformação e deslocamento, a viga armada com barras de aço apresentou respostas numéricas superiores em comparação com as demais devido a menor altura da seção que proporcionou uma menor rigidez total à viga. Os resultados numéricos máximos de todas as vigas ocorreram no centro do vão, se dando de forma coerente por se tratar de vigas biapoiadas. Todos os deslocamentos máximos estiveram dentro dos limites impostos pela ABNT NBR 6118:2014 e pelo ACI 318:2011.

As vigas compostas por concreto e aço e por concreto e PRF apresentaram comportamentos semelhantes e condizentes com as propriedades dos materiais em estudo, não apresentando resultados discrepantes entre si. A viga composta por concreto e aço exibiu melhor resistência às tensões, no entanto apontou maiores deformações e deslocamentos comparando-se com as demais. A viga armada com PRFC exibiu melhor comportamento entre as vigas armadas com PRF.

O uso de barras de PRF ainda é bastante limitado, especialmente no Brasil por não existir uma norma que estabeleça as recomendações de projeto, regulamenta seu procedimento de utilização e padronize suas propriedades, sendo de grande importância o desenvolvimento da mesma para possibilitar estudos mais avançados no país sobre componentes estruturais com armaduras de PRF.

A partir desse estudo foi possível concluir que a utilização de armaduras não metálicas de PRF em substituição das armaduras de aço é possível e válida em vigas de concreto armado, contanto que seja considerado as características peculiares deste material, como o seu comportamento frágil na ruptura por exemplo, e se tenha os cuidados adicionais relativos a ele, conforme apontado pelo ACI 440.1R:2015. Contudo, é necessário a realização de estudos mais aprofundados sobre esse material relativamente novo na construção civil.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Referências

- American Concrete Institute. (2008). ACI 440.05M: *Specification for construction with fiber-reinforced polymer reinforcing bars*. Farmington Hills, Michigan. <https://cecollection2.files.wordpress.com/2020/05/440.5-08-specification-for-construction-with-fiber-reinforced-polymer-reinforcing-bars.pdf>
- American Concrete Institute. (2011). ACI 318: *Building code requirements for reinforced concrete and commentary*. Farmington Hills, Michigan. https://www.pecivilexam.com/Study_Documents/Struc-Materials-Online/ACI_318-Building-Code-2011.pdf
- American Concrete Institute. (2015). ACI 440.1R: *Guide for the design and construction of structural concrete reinforced with fiber-reinforced Polymer (FRP) bars*. Farmington Hills, Michigan. https://basalt-fibers.com/wp-content/uploads/2021/05/Standart_ACI-4401R15.pdf
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2003). NBR 8681: *Ações e segurança nas estruturas – Procedimento*. Rio de Janeiro. https://disciplinas.usp.br/pluginfile.php/4955169/mod_resource/content/1/10%20NBR%208681.pdf

- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2007). NBR 7480: *Aço destinado a armaduras para estruturas de concreto armado – Especificação*. Rio de Janeiro. <http://ferramar.com.br/wp-content/uploads/2016/10/NBR7480.pdf>
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2014). NBR 6118: *Projeto de estruturas de concreto – Procedimento*. Rio de Janeiro. https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/5591979/mod_resource/content/1/10%20NBR%206118.pdf
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2019). NBR 6120: *Cargas para o cálculo de estruturas de edificações*. Rio de Janeiro. <https://www.studocu.com/pt-br/document/universidade-federal-de-pernambuco/concreto/nbr-6120-2019-aco-es-para-o-calculo-de-estruturas-de-edificacoespdf-pdf/20880110>
- AYASH, N. M., ABD-ELRAHMAN, A. M., & SOLIMAN, A.-E. (2020). Repairing and strengthening of reinforced concrete cantilever slabs using Glass Fiber-Reinforced Polymer (GFRP) wraps. *Structures*, 28, 2488–2506. <http://dx.doi.org/10.1016/j.istruc.2020.10.053>
- Bastos, P. S. S. (2006). *Histórico e principais elementos estruturais de concreto armado*. Notas de aula, disciplina - Sistemas Estruturais I. Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista. <https://docplayer.com.br/8656671-Historico-e-principais-elementos-estruturais-de-concreto-armado.html>
- Beer, F. P., Johnston Jr, E. R., Dewolf, J. T., & Mazurek, D. F. (2011). *Mecânica dos materiais*, (5a ed.): AMGH. <https://pt.scribd.com/document/428261902/Mecanica-dos-Materiais-5-Ed-Beer-Johnston-DeWolf-Mazurek>
- Castro, P. F. (1997). Barras de FRP: avaliando o módulo de elasticidade não destrutivamente. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, 7(2), 58-65. <http://dx.doi.org/10.1590/S0104-14281997000200008>
- Correia, J. R. (2006). *Utilização de perfis pultrudidos de fibra de vidro (GFRP) na construção*. Folhas de apoio às disciplinas de Construção com Novos Materiais e Reabilitação e Reforço de Estruturas. Instituto Superior Técnico, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. <https://docplayer.com.br/29527940-Utilizacao-de-perfis-pultrudidos-de-fibra-de-vidro-gfrp-na-construcao.html>
- Couto, I. A. (2007). *Análise teórica e experimental do comportamento da aderência entre o concreto e barras de fibra de vidro impregnada por polímero*. 153p. Dissertação (Mestrado Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. <https://doi.org/10.11606/D.18.2007.tde-01102007-085339>
- Dantas, D. L., Maciel, D. N., Nascimento Neto, J. A. do, Araújo, K. Y. M., & Barros, R. (2022). Non-linear analysis of reinforced concrete pile caps as a foundation of onshore wind turbines considering the lateral friction between piles and the soil. *Research, Society and Development*, 11(2). <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v11i2.23146>
- Gallardo, S. M. A. G. (2002). *Reforço à flexão em vigas de concreto utilizando polímeros reforçados com fibras de carbono*. 229p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual de Campinas. <http://repositorioslatinoamericanos.uchile.cl/handle/2250/1315134>
- Katz, A. (2004). Environmental impact of steel and fiber-reinforced polymer reinforced pavements. *Journal of Composites for Construction*, 8(6), 481–488. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0268\(2004\)8:6\(481\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0268(2004)8:6(481))
- Machado, A. P. (2002). *Reforço de estruturas de concreto armado com fibras de carbono: características, dimensionamento e aplicação*. São Paulo: PINI.
- Micali, R. M. (2010). *Análise teórica de vigas pré-moldadas de concreto com armadura de aço e de polímero reforçado com fibra de vidro em meio altamente agressivo*. 150p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. <https://doi.org/10.11606/D.18.2010.tde-12072010-155426>
- Monte, R., Toaldo, G. S., & Figueiredo, A. D. de. (2014). Avaliação da tenacidade de concretos reforçados com fibras através de ensaios com sistema aberto. *Revista Matéria*, 19(2), 132–149. <https://doi.org/10.1590/S1517-70762014000200008>
- Nascimento, F. B. C., Soares, A. P. F., & Vasconcelos, L. T. (2015). Corrosão em armaduras de concreto. *Caderno de Graduação - Ciências Exatas e Tecnológicas*, 3(1), 177-188. <https://periodicos.set.edu.br/fitsexatas/article/view/2651/1540>
- Pilakoutas, K., Neocleous, K., & Guadagnini, M. (2002). Design philosophy issues of fiber reinforced polymer reinforced concrete structures. *Journal of Composites for Construction*, 6(3), 154–161. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0268\(2002\)6:3\(154\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0268(2002)6:3(154))
- Rasheed, H. A. (2015). *Strengthening Design of Reinforced Concrete with FRP*. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group. <https://www.technopol.ir/wp-content/uploads/2019/07/Strengthening-Design-of-Reinforced-Concrete-with-FRP-technopol.pdf>
- Ribeiro, B. C., Lopes, R. M., Riccio, V. A., Oliveira, D. M. de, & Ribeiro, S. E. C. (2016). Análise teórica de vigas de concreto armadas com barras de plástico reforçado com fibras. *Construindo*, 8(2). <http://revista.fumec.br/index.php/construindo/article/view/4812>
- Rocha, I. (2015). Corrosão em estruturas de concreto armado. *Revista Especialize On-line IPOG*, 1(10). <https://doceru.com/doc/xns08xc>
- Silva, A. S. C. (2016). *Análise de vigas de concreto armado reforçadas à flexão e ao cisalhamento com fibras de carbono: abordagem teórica e computacional*. 220p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia. <http://repositorio.ufba.br/ri/handle/ri/21389>
- Souza, M. B. S. (2006). *Modelagem numérica de vigas de concreto reforçado com fibras de aço*. 183p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás. <http://repositorio.bc.ufg.br/tede/handle/tede/664>
- Tavares, D. H. (2006). *Análise teórica e experimental de vigas de concreto armadas com barras não-metálicas de GFRP*. 128p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. <https://doi.org/10.11606/D.18.2006.tde-22062006-105650>
- Tavares, D. H., & Giongo, J. S. (2009). Análise teórica e experimental de vigas de concreto armadas com barras não metálicas de GFRP. *Cadernos de Engenharia de Estruturas*, São Carlos, 11(52), 143–156. <https://repositorio.usp.br/item/001814819>
- Uomoto, T., Mutsuyoshi, H., Katsuki, F., & Misra, S. (2002). Use of fiber reinforced polymer composites as reinforcing material for concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 14(3), 191–209. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2002\)14:3\(191\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2002)14:3(191))