

ANÁLISE NUMÉRICA DA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO CONSIDERANDO A SUBSTITUIÇÃO DOS ESTRIBOS DE AÇO POR BARRAS DE GFRP

Maurício Ilan Lima de Souza (Universidade Federal de Rondônia) E-mail: mauricio609ilan@gmail.com

João Vitor Freitas Zardinello (Universidade Federal de Rondônia) E-mail: jvfreitas341@gmail.com

Pedro Ignácio Lima Gadêlha Jardim (Universidade Federal de Rondônia) E-mail:

eng.pedrojardim@gmail.com

Diego Henrique de Almeida (Universidade Federal de Rondônia) E-mail: diegoalmeida@unir.br

Resumo: O uso de barras de GFRP em vigas de concreto tem sido amplamente estudado como substituto das armaduras longitudinais, devido à sua alta resistência à tração e à imunidade à corrosão. No entanto, a aplicação dessas barras em estribos (armaduras transversais) também tem ganhado atenção, pois a corrosão afeta significativamente essas armaduras, que estão mais expostas a agentes agressivos ambientais. Apesar das vantagens, o GFRP apresenta comportamento frágil e baixa ductilidade, o que contrasta com o aço, que possui maior módulo de elasticidade e ductilidade. Além disso, a baixa ductilidade do GFRP limita sua aplicação, apesar de sua elevada resistência à tração. Entretanto, há uma lacuna de estudos nacionais sobre o uso de GFRP como estribos em vigas de concreto, sendo encontrados poucos trabalhos em português sobre o tema. Neste contexto, o estudo realiza uma análise paramétrica utilizando o método dos elementos finitos, focando na resistência ao cisalhamento de vigas de concreto armado reforçadas com estribos de GFRP, usando o software Abaqus/CAE. A análise é baseada em simulações numéricas validadas, comparando vigas com estribos de aço e GFRP. Considerando o ELS de aceitabilidade sensorial, com o deslocamento-limite definido como $\ell/250$ para garantir conforto visual, as vigas em que os estribos de aço foram substituídos por estribos de GFRP apresentaram, em média, uma redução de 77,74% na capacidade de carga.

Palavras-chave: GFRP, estribos, vigas, aço, resistência à tração.

NUMERICAL ANALYSIS OF THE SHEAR STRENGTH OF REINFORCED CONCRETE BEAMS CONSIDERING THE REPLACEMENT OF STEEL STIRRUPS BY GFRP BARS

Abstract: The use of GFRP bars in concrete beams has been widely studied as a substitute for longitudinal reinforcement, due to its high tensile strength and immunity to corrosion. However, the application of these bars in stirrups (transverse reinforcement) has also gained attention, since corrosion significantly affects these reinforcements, which are more exposed to aggressive environmental agents. Despite its advantages, GFRP presents brittle behavior and low ductility, which contrasts with steel, which has a higher modulus of elasticity and ductility. In addition, the low ductility of GFRP limits its application, despite its high tensile strength. However, there is a lack of national studies on the use of GFRP as stirrups in concrete beams, with few works in Portuguese on the subject. In this context, the study performs a parametric analysis using the finite element method, focusing on the shear strength of reinforced concrete beams reinforced with GFRP stirrups, using the Abaqus/CAE software. The analysis is based on validated numerical simulations comparing beams with steel and GFRP stirrups. Considering the ELS of sensory acceptability, with the limit displacement set as $\ell/250$ to ensure visual comfort, the beams in which the steel stirrups were replaced by GFRP stirrups showed, on average, a reduction of 77.74% in load capacity.

Keywords: GFRP, stirrups, beams, steel, tensile strength.

1. Introdução

Um dos fatores que influenciam negativamente a durabilidade das estruturas de concreto armado é a corrosão das barras de aço, podendo ocorrer por oxidação ou corrosão eletroquímica, sendo indicada como o principal agente deletério do aço utilizado em estruturas de concreto armado (Ribeiro *et al.*, 2018). Desse modo, diversos estudos são realizados para reduzir a ocorrência desse fenômeno, sendo a substituição das tradicionais barras de aço-carbono por barras de polímeros reforçadas com fibra de vidro (GFRP, sigla para *glass fiber-reinforced polymer*) uma vertente promissora por se tratar de um material inerte e com bons índices de durabilidade (Ineia *et al.*, 2021; Sousa; Correia; Fonseca, 2016).

O uso de barras de GFRP em vigas de concreto tem sido mais estudado para substituir as armaduras longitudinais, com função responder aos esforços de flexão (American Concrete Institute, 2015; Bywalski *et al.*, 2020). Entretanto, conforme Bywalski *et al.* (2020), a corrosão também afeta outras armaduras, como a armadura transversal (estribos), que estão mais próximos aos agentes agressivos ambientais do que a armadura longitudinal. Bandeira, Pappalardo Junior e Prizskulnik (2006) salientam que a utilização das barras de GFRP em estruturas de concreto conferem um comportamento menos dúctil, devendo ser considerado no cálculo estrutural.

Diversos autores observaram uma diminuição da rigidez em vigas de concreto armadas com GFRP em comparação ao modelo tradicional (Gemi; Madenci; Özkiliç, 2021; Sirimontree; Keawsawasvong; Thongchom, 2021; Tavares; Giongo; Paultre, 2008). Além disso, embora as barras de GFRP sejam atrativas por sua alta resistência à tração, apresentam uma limitação significativa em suas aplicações devido ao seu comportamento frágil, com falhas repentinas, conforme relatado nos estudos de Rocha *et al.* (2021) e Mousavi *et al.*, (2012). Em contrapartida, o aço, com seu elevado módulo de elasticidade, demonstra maior capacidade de ductilidade. Apesar disso, a baixa ductilidade do GFRP é contornada por sua elevada resistência (Sirimontree; Keawsawasvong; Thongchom, 2021).

Apesar da utilização das barras de GFRP como estribos serem estudadas por pesquisadores internacionais, é fundamental a realização de estudos nacionais para adaptação das soluções baseadas em documentos normativos estrangeiros ao documento nacional. Nesse contexto, ao consultar os termos “estribo” e “GFRP” em bases de dados de trabalhos em português (SciELO e Google Acadêmico), apenas um estudo foi localizado. O estudo consiste no trabalho de Carneiro, Silva e Teixeira (2021), onde poucas vigas com estribos puderam ser experimentadas. Com isso, destaca-se a importância em se realizar mais estudos sobre o tema.

Desse modo, o presente estudo se destinou a realizar um estudo paramétrico utilizando o método dos elementos finitos para analisar as variáveis que influenciam a resistência ao cisalhamento de vigas de concreto armado, de forma a compreender as modificações necessárias para que seja possível a consideração das barras de GFRP como um substituto ao aço tradicional.

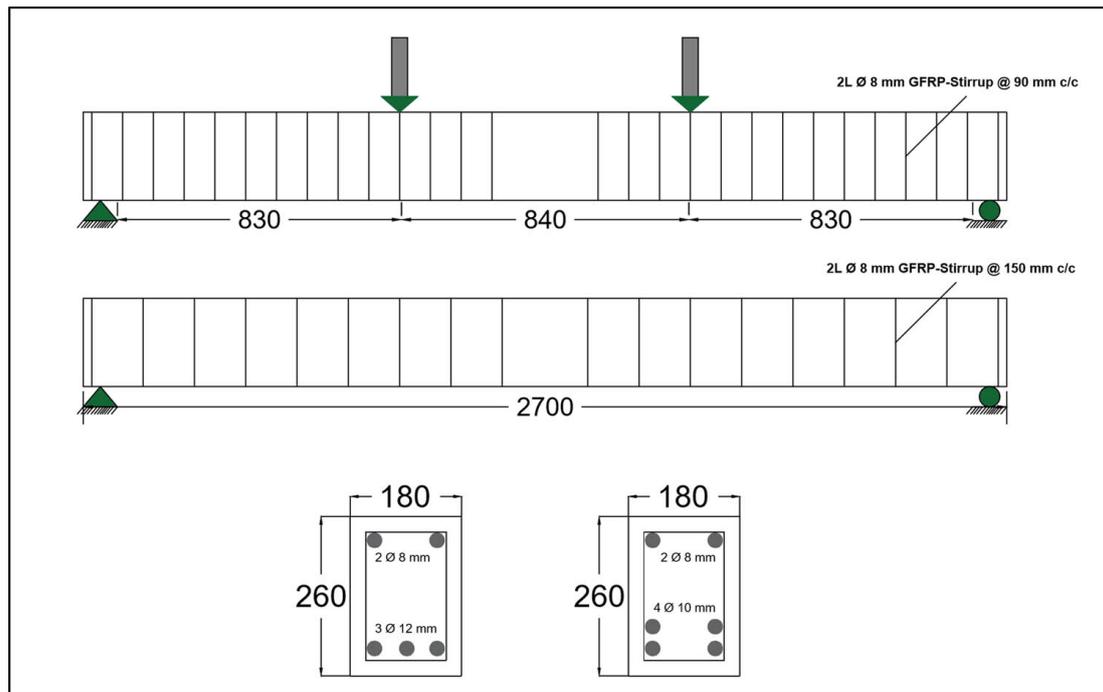
2. Materiais e métodos

A análise do comportamento da viga de concreto armado reforçado com estribos de GFRP ocorreu por meio de uma análise não linear através do software Abaqus/CAE. O estudo paramétrico se baseou nas simulações numéricas realizadas por Mohammed *et al.* (2022), que analisaram o comportamento de vigas de concreto armado com a substituição dos estribos de aço por estribos de GFRP, sendo este estudo validado

numericamente para o modelo a ser utilizado.

A viga de referência, ilustrada na Figura 1, possui um comprimento de 2700 mm, com um vão entre apoios de 2500 mm (ℓ), uma largura de 180 mm e altura de 260 mm. A viga foi reforçada longitudinalmente com três barras de aço com o diâmetro de 12,5 mm na parte inferior e duas barras de aço de 8 mm na parte superior. O cobrimento definido foi de 20mm, valor que está dentro do limite estabelecido pelo documento normativo americano ACI 440.1R (2015).

Figura 1 - Geometria da viga.



Fonte: Adaptado de Mohammed *et al.* (2022)

A simulação da viga ocorreu como no estudo de referência, por meio de um ensaio de flexão de quatro pontos. Para fins do estudo, a análise de deslocamento da viga seguiu os parâmetros da ABNT NBR 6118 (2023), quanto ao Estado Limite de Serviço (ELS) de aceitabilidade sensorial, onde considera o deslocamento-limite como $\ell/250$ para razões de conforto visual.

Com o objetivo de otimizar o processo de simulação numérica, foi considerada a simetria longitudinal da viga como uma condição de contorno. Ao considerar apenas metade da seção transversal através de um plano de simetria, obteve-se uma redução substancial no número de elementos finitos e, conseqüentemente, no tempo de processamento. Essa estratégia, frequentemente utilizada em análises de estruturas simétricas (Assis *et al.*, 2024; Alves, Guilherme Francyan Teixeira *et al.*, 2024; Alves, Larissa Fé *et al.*, 2024), já demonstrada sua eficácia em termos de economia computacional. As propriedades mecânicas das barras mencionadas no estudo de referência estão detalhadas na Tabela 1, conforme especificações fornecidas pelo fabricante do estudo de referência.

Tabela 1- Propriedades das barras.

| Tipo de barra | Resistência à tração (MPa) | Módulo de elasticidade (GPa) |
|---------------|----------------------------|------------------------------|
| Aço | 420 | 200 |
| GFRP | 850 | 50 |

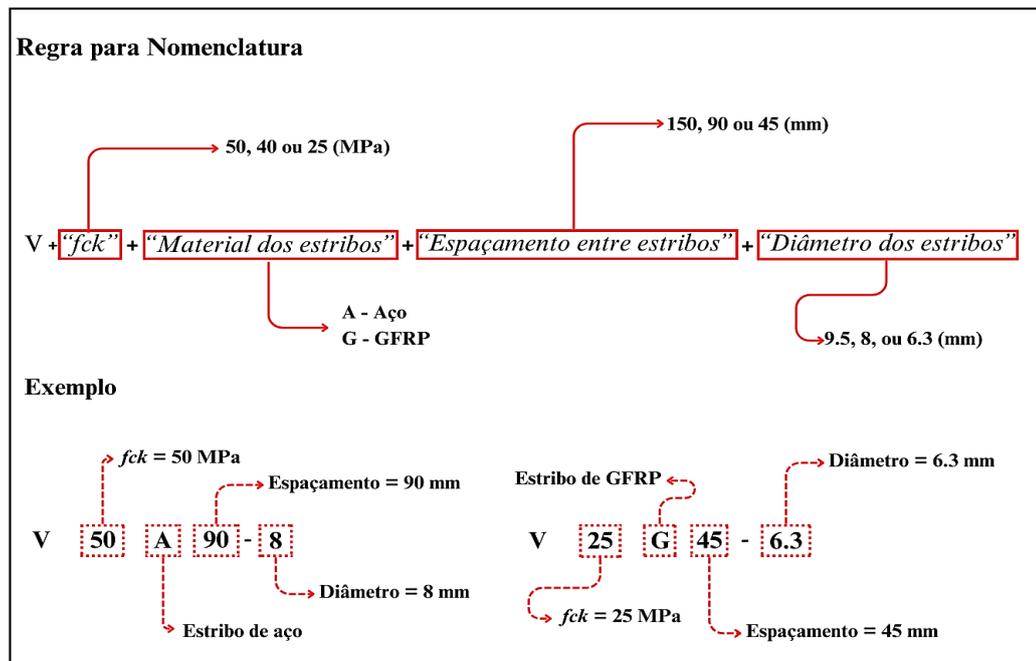
O comportamento plástico e o dano no concreto foram previstos por meio do método *concrete damage plasticity* (CDP), proposto por Lubliner *et al.* (1989), com o ângulo de dilatação (ψ) do concreto distinto entre as vigas com barras de GFRP e aço. Os demais parâmetros de plasticidade definidos foram: excentricidade (e), relação entre as tensões de escoamento de compressão biaxial e uniaxial (f_{b0}/f_{c0}), fator de forma (K_c) e viscosidade (μ). Foi adotado o modelo constitutivo de Guo (2014), comumente encontrado em outros estudos (Amaral *et al.*, 2023; Alves, Guilherme Francyan Teixeira *et al.*, 2024), para previsão do comportamento do concreto junto ao CDP.

Tabela 2 – Propriedades de plasticidade adotadas para o CDP.

| Modelo | ψ | e | f_{b0}/f_{c0} | K_c | μ |
|--------|--------|-----|-----------------|-------|--------|
| GFRP | 37 | 0.1 | 1.16 | 0.67 | 0.0005 |
| Aço | 40 | 0.1 | 1.16 | 0.667 | 0.0005 |

Por fim, para facilitar a identificação dos modelos simulados no estudo paramétrico, foi estabelecido um código alfanumérico, representando cada variável do estudo paramétrico, as regras aplicadas para o código podem ser vistas na Figura 2.

Figura 2 - Nomenclatura adotada para os modelos.



3. Resultados e Discussões

Com base no artigo de referência, os modelos para validação foram simulados e validados, dando início ao estudo paramétrico. Nesta seção foram discutidos os resultados de validação do modelo numérico e do estudo paramétrico realizado.

3.1 Validação do modelo e estudo de sensibilidade de malha

Inicialmente, foi realizada a reprodução do modelo estudado por Mohammed *et al.*, (2022), considerando diferentes modelagens para as vigas com os estribos de GFRP e aço, testando ainda alterações no CDP até se aproximarem do modelo de referência. As figuras 3 e 4 mostram o resultado obtido para as vigas com estribos de aço e GFRP, respectivamente.

Figura 3 - Comportamento força-deslocamento dos modelos de aço simulados comparado ao de referência.

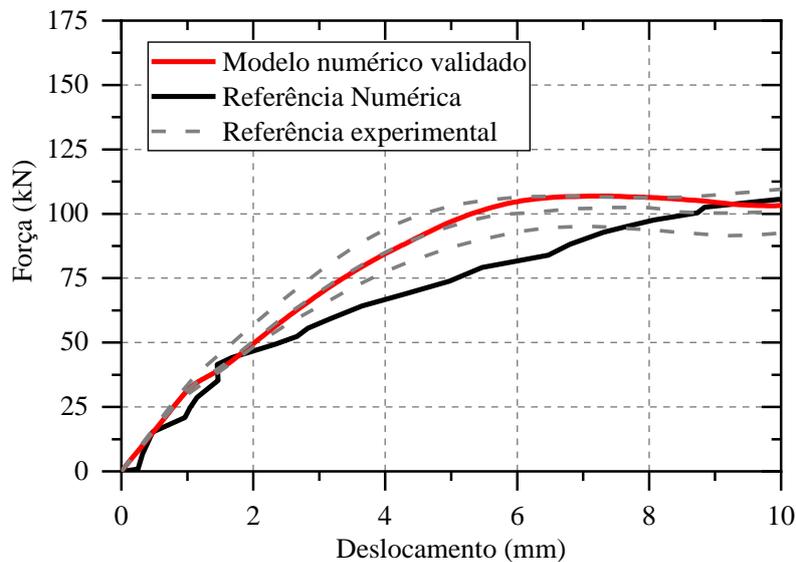
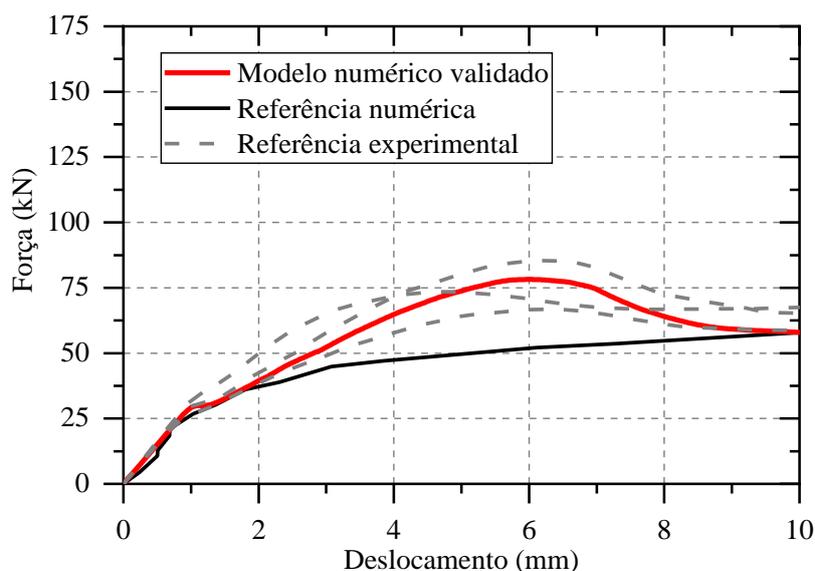


Figura 4 - Comportamento força-deslocamento dos modelos de GFRP simulados comparado ao de referência.



Das figuras 3 e 4, destaca-se a precisão do modelo numérico em reproduzir o comportamento da curva da campanha experimental, possibilitando um ajuste melhor

do que o obtido pelo estudo de referência. Isso atesta a capacidade de previsão do comportamento das vigas simuladas e permite que o estudo paramétrico seja conduzido.

Antes da execução do estudo paramétrico, foi realizado um estudo de sensibilidade de malhas, a fim de encontrar uma malha que confira ao modelo fidelidade a referência e eficiência a simulação (economia computacional), além de serem testados os modelos sem a integração reduzida (C3D8) para análise de comportamento.

Com base nesta proposta, foram testadas 5 variações de malhas, sendo elas: 20 mm, 25 mm, 30 mm, 35 mm e 40 mm; com as malhas de 20 mm apresentando maiores detalhes visto sua maior quantidade no modelo da viga, porém observou que seu desempenho em relação a eficiência da simulação caiu drasticamente por conta também de suas grandes quantidades de interações, as outras malhas seguiram esta mesma linha, seus resultados podem ser vistos nas figuras 5 e 6.

Figura 5 - Teste de sensibilidade de malhas do modelo com GFRP.

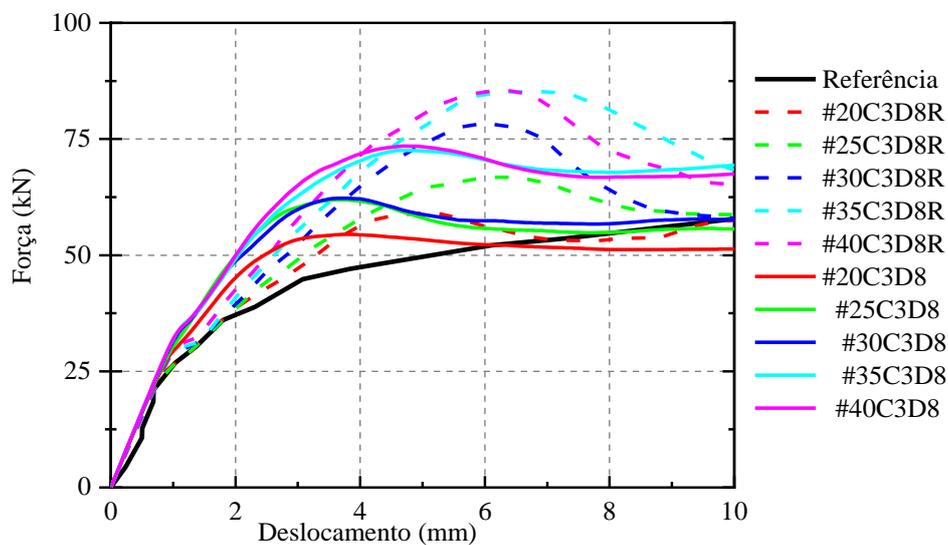
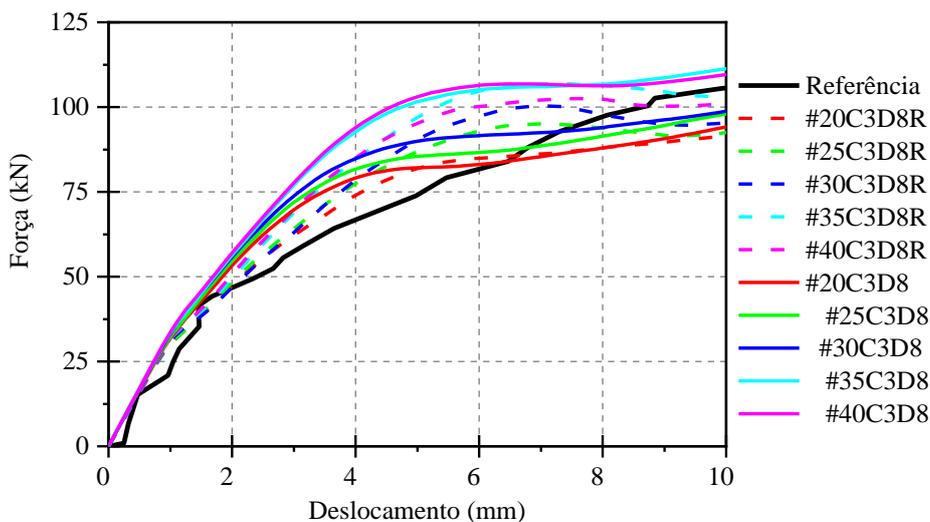


Figura 6- Teste de sensibilidade de malhas do modelo com aço.



Após a validação com estribos de GFRP e o estudo de sensibilidade da malha, o modelo apresentou uma força máxima de 57,94 kN, enquanto a referência foi de 57,93 kN,

resultando em um erro percentual de 0,014%. Esse erro está dentro do limite encontrado em outros estudos da literatura (Ji *et al.*, 2021; Assis *et al.*, 2024). Devido ao tempo de processamento não ser um fator limitante na pesquisa, a malha de 30 mm com integração reduzida (C3D8R) foi escolhida para a validação do modelo com estribos de GFRP.

Para o modelo com estribos de aço foi encontrada uma força máxima (F_{max}) de 103,21 kN, enquanto a referência teve 105,60 kN com um erro percentual de 2,26% quando o elemento foi simulado com a malha de 35 mm e integração reduzida (#35 - C3D8R).

Os resultados do teste, incluindo o tempo de processamento para cada configuração e o erro percentual do modelo em relação ao estudo de referência, são detalhados na Tabela 3.

Tabela 3 - Resultado dos testes de sensibilidade.

| Elemento | Tamanho do elemento Finito (mm) | F_{max} (kN) | Erro (%) | Tempo de Processamento (s) |
|--------------|---------------------------------|----------------|----------|----------------------------|
| C3D8 - GFRP | 20 | 51,31 | 11,43 | 1305 |
| | 25 | 55,64 | 3,955 | 550 |
| | 30 | 57,57 | 0,631 | 337 |
| | 35 | 69,39 | 19,77 | 196 |
| | 40 | 67,50 | 16,51 | 203 |
| C3D8R - GFRP | 20 | 57,54 | 0,68 | 3366 |
| | 25 | 58,69 | 1,3 | 1592 |
| | 30 | 57,94 | 0,014 | 1153 |
| | 35 | 68,32 | 17,92 | 956 |
| | 40 | 65,34 | 12,77 | 877 |
| C3D8 - Aço | 20 | 91,60 | 13,26 | 1167 |
| | 25 | 92,60 | 12,31 | 437 |
| | 30 | 95,31 | 9,74 | 233 |
| | 35 | 103,21 | 2,26 | 119 |
| | 40 | 101,56 | 3,83 | 141 |
| C3D8R - Aço | 20 | 94,20 | 10,80 | 2830 |
| | 25 | 98,23 | 6,98 | 1287 |
| | 30 | 99,13 | 6,13 | 895 |
| | 35 | 111,26 | 5,36 | 601 |
| | 40 | 109,62 | 3,81 | 498 |

3.2 Estudo Paramétrico

Com a validação do modelo numérico, foi realizada a simulação dos modelos conforme o estudo paramétrico apresentado na Figura 2. Os resultados encontrados estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Resultados dos modelos paramétricos.

| Modelo | F _{ELS} (kN) | Rigidez à Flexão (kN.m ²) | Tensão de Cisalhamento (MPa) | Momento Fletor (kN.m) | Resistência à Flexão (MPa) |
|------------|-----------------------|---------------------------------------|------------------------------|-----------------------|----------------------------|
| V50A90-8 | 103,21 | 5709,11 | 13,23 | 85,67 | 29,24 |
| V50A90-8* | 85,02 | 4703,01 | 10,90 | 70,57 | 24,09 |
| V25A90-8 | 77,16 | 4268,22 | 9,89 | 64,05 | 21,86 |
| V40A90-8 | 92,60 | 5122,19 | 11,87 | 76,86 | 26,24 |
| V50A150-8 | 98,75 | 5462,49 | 12,66 | 81,97 | 27,98 |
| V50A45-8 | 102,88 | 5690,92 | 13,19 | 85,39 | 29,15 |
| V50A90-6,3 | 102,04 | 5644,33 | 13,08 | 84,69 | 28,91 |
| V50A90-9,5 | 104,50 | 5780,53 | 13,40 | 86,74 | 29,61 |
| V50G90-8 | 57,95 | 3205,20 | 7,43 | 48,09 | 16,42 |
| V50G90-8* | 103,97 | 5751,20 | 13,33 | 86,30 | 29,46 |
| V25G90-8 | 40,56 | 2243,79 | 5,20 | 33,67 | 11,49 |
| V40G90-8 | 73,51 | 4065,99 | 9,42 | 61,01 | 20,83 |
| V50G150-8 | 57,22 | 3165,27 | 7,34 | 47,50 | 16,21 |
| V50G45-8 | 57,95 | 3205,20 | 7,43 | 48,09 | 16,42 |
| V50G90-6,3 | 57,35 | 3172,33 | 7,35 | 47,60 | 16,25 |
| V50G90-9,5 | 57,33 | 3171,18 | 7,35 | 47,58 | 16,24 |

Nota: Os modelos com * ao final de seus códigos representam a troca de armadura transversal. Ex: o modelo “V50A90-8*” tem a armadura transversal de aço, porém com o CDP do modelo de GFRP.

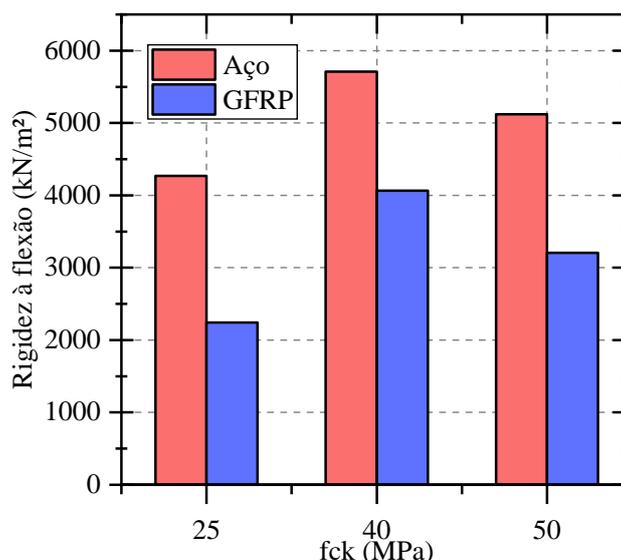
Observa-se na Tabela 4 que as cargas suportadas pelas vigas com estribos de aço, foi superior na maioria dos casos a carga das vigas com estribos de GFRP, com uma média de 77,74% de diferença nas cargas, dentro do ELS proposto pelo trabalho.

A maior disparidade em relação às cargas suportadas pelas vigas, foi encontrada no parâmetro que analisa a resistência característica do concreto com 25 fck, apresentando 90,22% de diferença entre as vigas (“V25G90-8” e “V25A90-8”), o que se verifica na pesquisa de Mohammed *et al.* (2022).

Dentro dos modelos paramétricos com os estribos de aço, com exceção dos modelos onde o fck foi alterado, os modelos demonstraram pouca variabilidade em suas cargas, com o modelo V50A90-9,5 apresentando a maior resistência a cargas dentro do ELS, com 1,25% de aumento de capacidade de carga em relação ao modelo padrão do aço (“V50A90-8”).

O modelo com estribos de GFRP que apresentou o maior suporte a carga, foi o “V50G90-8*”, modelo que substitui os estribos de GFRP por aço, mas com o dos modelos de estribos de aço, apresentando um aumento na capacidade de carga de 79,43%.

Figura 7- Variação da rigidez à flexão em função do fck.



A Figura 7 apresenta a rigidez à flexão em função do fck para vigas de concreto armado com diferentes tipos de armadura: aço e GFRP. Os resultados corroboram com estudos anteriores (Sirimontree *et al.*, 2021; Tavares *et al.*, 2008), onde as vigas com armadura de GFRP apresentam menor rigidez em comparação às vigas com armadura de aço.

A análise paramétrica indicou um aumento de até 35% na rigidez dos modelos aço. Para os modelos com armadura de GFRP, esse aumento foi ainda mais expressivo, alcançando 81%. Comparando os materiais, observou-se uma diferença de 42% na rigidez, com o aço apresentando maior valor. No modelo "V50A90-8*", a combinação de armadura transversal de GFRP e longitudinal de aço resultou em um aumento de 48% na rigidez em relação à média dos modelos com armadura total de GFRP. Essa diferença pode ser atribuída às propriedades mecânicas dos materiais, como o módulo de elasticidade, que no GFRP é relativamente menor.

4. Conclusões

A presente pesquisa analisou, por meio do método dos elementos finitos, a substituição da armadura transversal em aço por GFRP em vigas de concreto armado. A partir das simulações e dos modelos paramétricos realizados, obteve-se informações importantes sobre capacidade de suporte de cargas e sobre a resistência à flexão, dentro do ELS.

Dentro do ELS de aceitabilidade sensorial, considerando o deslocamento-limite como $\ell/250$ para razões de conforto visual, a capacidade de carga das vigas que tiveram a substituição de estribos de aço por estribos de GFRP apresentaram uma redução dessa capacidade em 77,74% na média.

O modelo "V40G90-8", com um concreto de resistência de 40 MPa, apresentou o melhor resultado de capacidade de carga. O diâmetro dos estribos de aço e de GFRP foram de pequena influência para a capacidade de carga dentro do ELS.

Os resultados da análise paramétrica evidenciaram a influência da resistência do concreto e do tipo de armadura na capacidade de rigidez das vigas. As vigas com estribos de aço apresentaram, em geral, maior rigidez em comparação às vigas com estribos de GFRP, corroborando com estudos da literatura internacional.

O modelo "V50A90-8*" mostrou-se promissor em relação aos modelos que possuem armadura apenas de GFRP, a combinação de armadura transversal de GFRP e longitudinal de aço, se mostrou eficaz para o aumento da rigidez deste modelo.

Este estudo tem como uma de suas principais finalidades contribuir para o avanço do conhecimento das fibras reforçadas com polímeros, principalmente com a fibra de vidro reforçada com polímeros (GFRP). Recomenda-se que novas pesquisas sobre o tema sejam realizadas, com outras variações paramétricas e em outros estados limites.

Referências

ALVES, GUILHERME FRANCIAN TEIXEIRA et al. *Análise numérica da influência do módulo de elasticidade do concreto na rigidez de vigas de concreto armado com barras de GFRP*. Revista de Engenharia e Tecnologia, [s. l.], v. 16, n. 1, p. 1–9, 2024.

ALVES, LARISSA FÉ et al. *Numerical Evaluation of the Influence of Using Carbon-Fiber-Reinforced Polymer Rebars as Shear Connectors for Cross-Laminated Timber–Concrete Panels*. Buildings, [s. l.], v. 14, n. 7, p. 2178, 2024.

AMARAL, VICTÓRIA GEOVANA HOLLANDA DO et al. *Análise de viga de concreto armada com barras de GFRP utilizando o método dos elementos finitos*. In: , 2023, Evento online. Anais do IV Congresso Brasileiro Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia. Evento online: CoBICET, 2023.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 318: *Building code requirements for structural concrete*. Farmington Hills: American Concrete Institute, 2019.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 440.1R: *Guide for the design and construction of structural concrete reinforced with fiber-reinforced polymer (FRP) bars*. Farmington Hills: American Concrete Institute, 2015.

ASSIS, LETÍCIA FREITAS et al. *Análise de vigas de madeira reforçadas com barras de FRP pela técnica NSM*. Matéria (Rio de Janeiro), [s. l.], v. 29, n. 2, 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15575: *Edificações habitacionais — Desempenho Parte 1: Requisitos gerais*. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: *Projeto de estruturas de concreto - procedimento*. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

BADAWI, A. K.; YAHIA, Y. I. O.; ABDULLA, A. I. *Structural Behavior of Hollow Beam Reinforced with Different Types of GFRP Stirrups*. Tikrit Journal of Engineering Sciences, vol. 30, no. 1, p. 72–83, 2023.

BANDEIRA, A. A.; PAPPALARDO JUNIOR, A.; PRISZKULNIK, S. *Comportamento à flexão de vigas de concreto armadas com barras de fibra de vidro (GFRP)*. 2006. VI Simpósio EPUSP sobre Estruturas de Concreto. Anais [...]. São Paulo: EPUSP, 2006. p. 801–817.

BENTZ, E. C.; MASSAM, L.; COLLINS, M. P. *Shear Strength of Large Concrete Members with FRP Reinforcement*. Journal of Composites for Construction, vol. 14, no. 6, p. 637–646, 2010.

BYWALSKI, C.; DRZAZGA, M.; KAŻMIEROWSKI, M.; KAMIŃSKI, M. *Shear behavior of concrete beams reinforced with a new type of glass fiber reinforced polymer reinforcement: Experimental study*. Materials, vol. 13, no. 5, p. 8–10, 2020.

CARNEIRO, L. A. V.; SILVA, R. C. B.; TEIXEIRA, A. M. A. J. *Comportamento de vigas de concreto armadas com barras de GFRP*. Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais, v. 12, n. 3, p. 207–223, 2021.

CARREIRA, D. J.; CHU, K. H. *Stress-Strain Relationship for Reinforced Concrete in Tension*. Journal of the American Concrete Institute, vol. 83, no. 1, p. 21–28, 1986.

CARREIRA, D. J.; CHU, K.-H. *Stress-Strain Relationship for Reinforced Concrete in Compression*. ACI Structural Journal, no. November-December, p. 797–804, 1985.

DALFRÉ, G. M.; MAZZÚ, A. D. E.; FERREIRA, F. G. da S. *Discussões sobre o dimensionamento de vigas de concreto armadas à flexão com barras de GFRP*. CONCRETO & Construções, vol. XLVIII, no. 101, p. 79–86, 2021.

GEMI, L.; MADENCI, E.; ÖZKILIÇ, Y. O. *Experimental, analytical and numerical investigation of pultruded GFRP composite beams infilled with hybrid FRP reinforced concrete*. Engineering Structures, vol. 244, 2021.

- GUO, Z. *Principles of reinforced concrete construction*. 1 ed. Kidlington: Elsevier, 2014.
- INEIA, A.; POL, W. D. O.; BRAUN, J. C. A.; LOPES JUNIOR, L. da S. *Barras de fibra de vidro, uma alternativa inovadora e suas potencialidades: revisão bibliográfica*. Tecno-Lógica, vol. 25, no. 2, 2021.
- JI, JING; ZHANG, RUNBAO; YU, CHENYU; HE, LINGJIE; REN, HONGGUO; JIANG, LIANGQIN. *Flexural behavior of simply supported beams consisting of gradient concrete and GFRP bars*. *Frontiers in Materials*, v. 8, 2021.
- LI, WENLONG; HUANG, WEI; FANG, YUAN; ZHANG, KE; LIU, ZONGZHI; KONG, ZHENGYI. *Experimental and theoretical analysis on shear behavior of RC beams reinforced with GFRP stirrups*. *Structures*, v. 46, p. 1753-1763, 2022.
- LUBLINER, J *et al.* *A plastic-damage model for concrete*. *International Journal of Solids and Structures*, [s. l.], v. 25, n. 3, p. 299–326, 1989.
- MADANAYAKE, U. H.; EGBU, C. *Critical analysis for big data studies in construction: significant gaps in knowledge*. *Built Environment Project and Asset Management*, vol. 9, no. 4, p. 530–547, 2019.
- MONGEON, P.; PAUL-HUS, A. *The journal coverage of Web of Science and Scopus: a comparative analysis*. *Scientometrics*, vol. 106, no. 1, p. 213–228, 2016.
- MOHAMMED, SHAYSH AZIZ; SAID, ABDULMUTTAILB I. *Analysis of concrete beams reinforced by GFRP bars with varying parameters*. *Journal of the Mechanical Behavior of Materials*, v. 31, n. 1, p. 767-774, 2022.
- PENG, FEI; CAI, YUHANG; YI, WEIJIAN; XUE, WEICHEN. *Shear behavior of two-span continuous concrete deep beams reinforced with GFRP bars*. *Engineering Structures*, v. 290, 2023.
- RIBEIRO, D. V.; SALES, A.; TUTIKIAN, B. F.; SOUZA, C. A. C. DE; ALMEIDA, F. DO C. R.; CUNHA, M. P. T.; LOURENÇO, M. Z.; CASCUDO, O.; HELENE, P. *Corrosão e degradação em estruturas de concreto: teoria controle e técnicas de análise e intervenção*. 2 ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2018.
- SIRIMONTREE, S.; KEAWSAWASVONG, S.; THONGCHOM, C. *Flexural behavior of concrete beam reinforced with GFRP bars compared to concrete beam reinforced with conventional steel reinforcements*. *Journal of Applied Science and Engineering (Taiwan)*, vol. 24, no. 6, p. 883–890, 2021.
- SOUSA, J. P. G. M. DE; CORREIA, J. P. R. R.; FONSECA, S. B. C. DA. *Durabilidade de perfis pultrudidos de GFRP em aplicações estruturais: caso de estudo SATU-Oeiras*. 2016. 2º Encontro Nacional sobre Qualidade e Inovação na Construção. Anais [...]. Lisboa: [s. n.], 2016.
- TAVARES, D. H.; GIONGO, J. S.; PAULTRE, P. *Behavior of reinforced concrete beams reinforced with GFRP bars*. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, vol. 1, no. 3, p. 285–295, 2008.
- TIMOSHENKO, S.; GOODIER, J. N. *Theory of elasticity*. New York: McGraw-Hill Book Company, 1951.
- XU, J.; CHEN, K.; ZETKULIC, A. E.; XUE, F.; LU, W.; NIU, Y. *Pervasive sensing technologies for facility management: a critical review*. *Facilities*, vol. 38, no. 1–2, p. 161–180, 2020.