

ANÁLISE NUMÉRICA DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO COM BARRAS DE GFRP: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA

***Numerical analysis of reinforced concrete beams with GFRP bars:
a systematic review of the literature***

Victória Geovana Hollanda do Amaral¹, Guilherme Francyan Teixeira Alves², Pedro Ignácio Lima Gadelha Jardim³, Diego Henrique de Almeida⁴



PALAVRAS-CHAVE:

Compósitos poliméricos;
Durabilidade;
Método dos elementos finitos;
Polímero reforçado com fibras de vidro;
Revisão sistemática.

KEYWORDS:

Polymer composites;
Durability;
Finite element method;
Glass fiber reinforced polymer;
Systematic review.

RESUMO: A utilização de barras de polímeros reforçados com fibras de vidro (GFRP - Glass Fiber Reinforced Polymer) como substitutas parciais ou totais das tradicionais barras de aço apresenta vantagens significativas para os elementos estruturais, como aumento da capacidade portante. No entanto, a escassez de pesquisas abrangentes sobre esse material e suas propriedades vem levando a desafios significativos na compreensão de seu potencial de uso e consequente disseminação na indústria da construção civil. A falta de investigações aprofundadas e a carência de métodos eficazes para simular o desempenho das barras de GFRP no concreto armado desencorajam sua adoção em construções. Nesse contexto, o presente artigo visa realizar uma revisão sistemática sobre simulações numéricas com o uso de barras de GFRP em vigas de concreto, destacando os métodos mais amplamente empregados nessas simulações. Os principais resultados mostram que as barras de GFRP aumentam significativamente a resistência à flexão das vigas de concreto, mas apresentam menor ductilidade devido ao comportamento frágil. O uso do método dos elementos finitos com diversos software se mostrou eficaz na previsão do comportamento estrutural. Observou-se também uma variação nos valores de módulo de elasticidade das barras, destacando a necessidade de padronização.

ABSTRACT: The use of Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP) bars as partial or total substitutes for traditional steel bars has significant advantages for structural elements, such as increased load-bearing capacity. However, the lack of comprehensive research on this material and its properties has led to significant challenges in understanding its potential for use and consequent dissemination in the construction industry. The lack of in-depth research and the absence of effective methods for simulating the performance of GFRP bars in reinforced concrete discourage their adoption in construction. In this context, this article aims to carry out a systematic review of numerical simulations using GFRP bars in concrete beams, highlighting the most widely used methods in these simulations. Therefore, this review not only highlights the technical and scientific advances on the subject but also provides a solid basis for future research and the wider acceptance and use of GFRP bars in civil construction. The main results show that GFRP bars significantly increase the flexural strength of concrete beams but have lower ductility due to their brittle behavior. The use of the finite element method with software proved effective in predicting structural behavior. A variation in the elastic modulus values of the bars was also observed which highlights the need for standardization.

Publicado em 17 de dezembro de 2024.

*Contato dos autores:

¹victoriahollanda17@gmail.com (Amaral, V. G. H. do)

Graduanda em Engenharia Civil, Universidade Federal de Rondônia

²guilhermefrancyan@gmail.com (Alves, G. F. T.)

Graduando em Engenharia Civil, Universidade Federal de Rondônia

³pedro@unir.br (Jardim, P. I. L. G.)

Engenheiro Civil, Mestre, Universidade Federal de Rondônia

⁴diegoalmeida@unir.br (Almeida, D. H. de)

Engenheiro Industrial Madeireiro, Doutor, Universidade Federal de Rondônia

1. INTRODUÇÃO

As barras de polímeros reforçados com fibras de vidro (GFRP - Glass Fiber Reinforced Polymer) possuem propriedades capazes de garantir resistência e durabilidade, visto que não sofrem corrosões (por ser quimicamente inerte) e possuem alta resistência a tração (Chattopadhyay; Rajkumar; Umamaheswari, 2018; Kaklauskas *et al.*, 2019). Com isso, é um dos materiais mais estudados para reforço estrutural e substituição das tradicionais barras de aço, que são naturalmente sujeitas a corrosão (Chattopadhyay; Rajkumar; Umamaheswari, 2018).

Considerando sua difícil aquisição por não ser ainda um produto difundido no mercado brasileiro e mundial, estudos experimentais desse material comumente são realizados utilizando barras fabricadas em laboratório por meio do processo de pultrusão (Kalamkarov *et al.*, 2011). Segundo You *et al.* (2015), esse processo permite a fabricação das barras de GFRP com seções transversais e comprimentos consistentes; no entanto, depende de fatores como tempo de cura e criação de nervuras para promover a aderência ao concreto. Soma-se ainda a possibilidade de erro na fabricação, considerando que esse processo tende a ter grande participação humana, podendo interferir diretamente nas propriedades do compósito polimérico. Desse modo, pesquisas que fazem uso de métodos numéricos para análise desse material devem ser encorajadas de forma a obter resultados de difícil observação experimental.

De acordo com Huang (2011), o método dos elementos finitos demonstrou capacidade de promover análises dos elementos estruturais reforçados com barras de GFRP, possibilitando a utilização desses dados como material de comparação e verificação de testes realizados em laboratório. Entretanto, a simulação numérica deve ser precedida de um conjunto rigoroso de informações sobre o comportamento do material a ser estudado, bem como a definição de todas as variáveis numéricas de forma consistente. Nota-se a falta de consenso na definição dos parâmetros para a modelagem, como por exemplo, os diferentes modelos constitutivos dos materiais (Pereira; Christoforo; Almeida, 2021).

Tendo em vista as pesquisas recentes que buscam desenvolver e aprimorar as análises sobre a substituição de barras de aço por barras de GFRP, bem como as dificuldades de obtenção de dados consistentes para a realização de estudos numéricos abrangentes, faz-se necessário um documento que sintetize as informações do atual estado de conhecimento sobre esse material visando identificar as lacunas e uniformidades das pesquisas já realizadas, os métodos mais utilizados, bem como avaliar as diferenças entre os diversos estudos com o intuito de fornecer para a comunidade acadêmica os métodos mais adotados para a simulação e previsão do comportamento do material.

Desse modo, a realização de uma revisão sistemática torna-se importante para a consolidação desse conhecimento e para a produção de um documento técnico-científico norteador que auxilie na compreensão do comportamento do material. Por conseguinte, o presente estudo realiza uma revisão sistemática sobre vigas de concreto armado com barras de GFRP com vistas a apresentar como as principais pesquisas existentes tratam do tema, destacando métodos e técnicas utilizadas para simulações numéricas dessa solução.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

As análises dos artigos foram realizadas por meio do *software StArt* (State of the Art Through Systematic Review), programa desenvolvido pelo Laboratório de Pesquisa em Engenharia de Software (LaPES) da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar). Toda a pesquisa foi realizada em dezembro de 2023, limitando a busca dos artigos aos anos de 2010 a 2023. Foram definidas três etapas para a realização da revisão: definição do protocolo de pesquisa, análise dos artigos coletados e extração dos dados. As etapas adotadas para o processo de pesquisa são contempladas na Figura 1.



FIGURA 1: Estrutura da revisão sistemática.

2.1 PROTOCOLO DA REVISÃO

A elaboração do protocolo de pesquisa teve início pela definição de perguntas norteadoras atinentes ao objetivo da revisão: Como são obtidas as propriedades dos materiais? Qual a finalidade e quais as configurações comumente adotadas para simulação de vigas de concreto armado com barras de GFRP?

Para a realização da pesquisa, foram definidos quatro termos de busca visando garantir uma amostra abrangente: "barras de polímeros reforçados com fibra de vidro", "viga", "concreto" e "elementos finitos". O primeiro termo foi definido para garantir que os estudos coletados dissertassem especificamente sobre o uso de barras de GFRP e não sobre outros elementos. O segundo e o terceiro termo foram escolhidos para limitar o tipo de elemento estrutural de interesse e seu material principal, respectivamente. Por fim, o último termo foi adotado para garantir que a amostra apresente uma abordagem que envolva a utilização do método dos elementos finitos. Definidos os termos de busca, eles foram traduzidos para o inglês e seus sinônimos e termos equivalentes são identificados no Quadro 1.

QUADRO 1: Termos adotados para a revisão sistemática		
Português	Inglês	Sinônimos/equivalentes
barras de polímeros reforçados com fibras de vidro	<i>GFRP rebars</i>	✓ <i>fiberglass rebar</i> ✓ <i>GFRP bars</i>
viga	<i>beam</i>	
concreto	<i>concrete</i>	
elementos finitos	<i>finite elements</i>	✓ <i>finite element method</i> ✓ <i>FEM</i> ✓ <i>FE</i>

Foram adotadas bases de dados de reconhecimento internacional (Mongeon e Paul-Hus, 2016) para pesquisas em Engenharia: Science Direct, Scopus e Web of Science. Os termos apresentados no Quadro 1 foram inseridos nas bases de dados utilizando operadores booleanos para uni-los aos seus sinônimos. Desse modo, a união desses termos (denominada *string*), foi definida como: ("gfrp rebars" OR "fiberglass rebar" OR "gfrp bars" OR "glass fiber-reinforced polymer rebars" OR "glass fiber-reinforced polymer bars") AND (beam) AND (concrete) AND ("finite element method" OR fem OR fe OR "finite element").

Os artigos obtidos foram analisados e filtrados seguindo as perguntas norteadoras adotadas. Foram incluídos os trabalhos que apresentaram métodos de simulação numérica de vigas de concreto armadas com barras de GFRP. Trabalhos fora do escopo, que não estavam integralmente disponíveis nas bases consultadas ou que não estavam escritos em inglês ou português, foram excluídos da amostra final.

2.2 SELEÇÃO DOS ARTIGOS

Após a coleta dos artigos, a coleta dos dados foi realizada por meio do software StArt. Após a exclusão dos artigos duplicados, deu-se início o uso de três filtros para selecionar os artigos da revisão, verificando a pertinência dos artigos à proposta de revisão de diferentes partes dos textos. O filtro inicial consistiu na leitura dos títulos e resumos de todos os artigos. Os artigos que não atenderam os critérios de inclusão foram descartados, e aqueles que foram incluídos seguiram para o próximo filtro. O segundo filtro, denominado de ‘elegibilidade’ consiste na leitura da introdução e conclusão dos artigos que passaram pelo filtro inicial. Análogo ao realizado na etapa de seleção, foram selecionados os artigos que atenderam os critérios de inclusão. No último filtro, chamado de ‘etapa de inclusão’, os estudos foram lidos de forma integral. Os dados considerados de interesse foram coletados para realizar a análise do tema.

2.3 EXTRAÇÃO DOS DADOS

A extração dos dados foi realizada em duas etapas. A primeira consistiu em agrupar os artigos por critério de qualidade dos dados em relação ao objetivo da pesquisa, fornecendo dados para verificar a qualidade da amostra coletada e sua capacidade de responder as perguntas norteadoras. Foram definidos sete critérios de qualidade que estão apresentados no Quadro 2. Os artigos foram agrupados pela quantidade de critérios atendidos. Por fim, os dados de interesse para discussão foram coletados dos artigos, sendo utilizados para a discussão da revisão.

QUADRO 2: Critérios de qualidade considerados na revisão sistemática	
Q1	O artigo informa as propriedades do concreto?
Q2	O artigo informa as propriedades da barra de GFRP?
Q3	O artigo informa as propriedades do aço?
Q4	O artigo apresenta detalhes sobre a configuração da simulação numérica?
Q5	O artigo apresenta detalhes sobre o tipo de elemento finito utilizado?
Q6	O artigo apresenta o processo de teste de malha?
Q7	O artigo apresenta o processo de validação do modelo?

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Através da revisão bibliográfica sistemática foi possível delimitar a amostragem de artigos a serem analisados. Foram obtidos 927 artigos nas bases de dados utilizadas, dos quais 4,2% foram selecionados para a etapa de inclusão, ou seja, 39 artigos. A Figura 2 define o fluxograma PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) obtido após as etapas de análise e filtragem dos artigos.

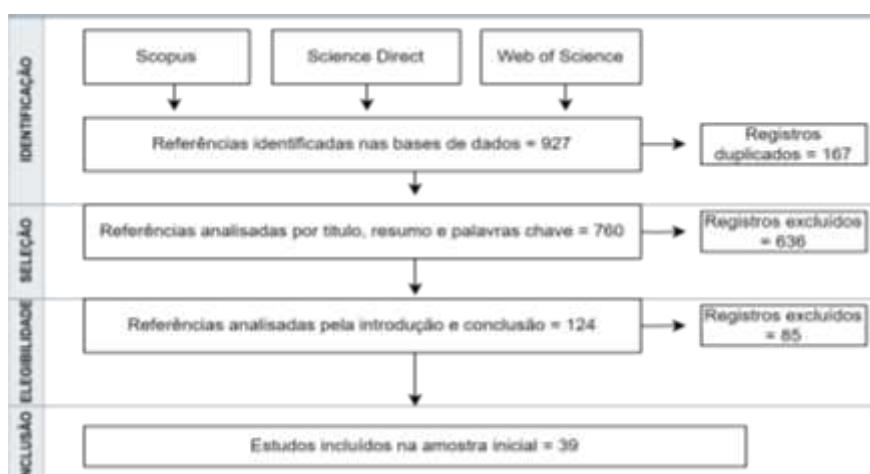


FIGURA 2: Fluxograma PRISMA.

A exclusão dos artigos deu-se, em sua maioria, por pesquisas concentradas no estudo de outros elementos de concreto. Outros apresentaram o uso de diferentes fibras no compósito polimérico. Os artigos analisados foram publicados nos últimos 13 anos, sendo a maior concentração no ano de 2021 (20,51%). Há baixa concentração de estudos por ano, permitindo apontar que o tema ainda não está difundido no meio científico. A Figura 3 apresenta a distribuição dos artigos conforme o ano da publicação. O atendimento dos artigos incluídos na amostra em relação aos critérios de qualidade (Quadro 2) é apresentado na Figura 4.

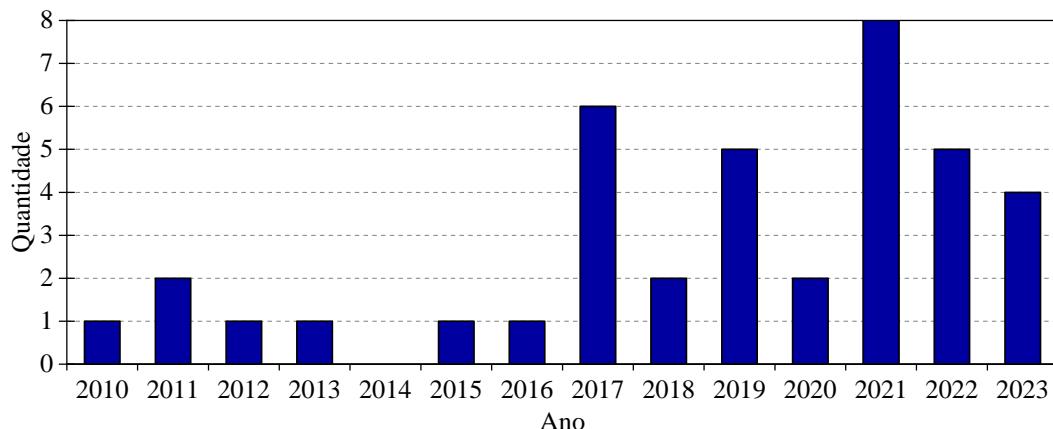


FIGURA 3: Ano de publicação dos artigos.

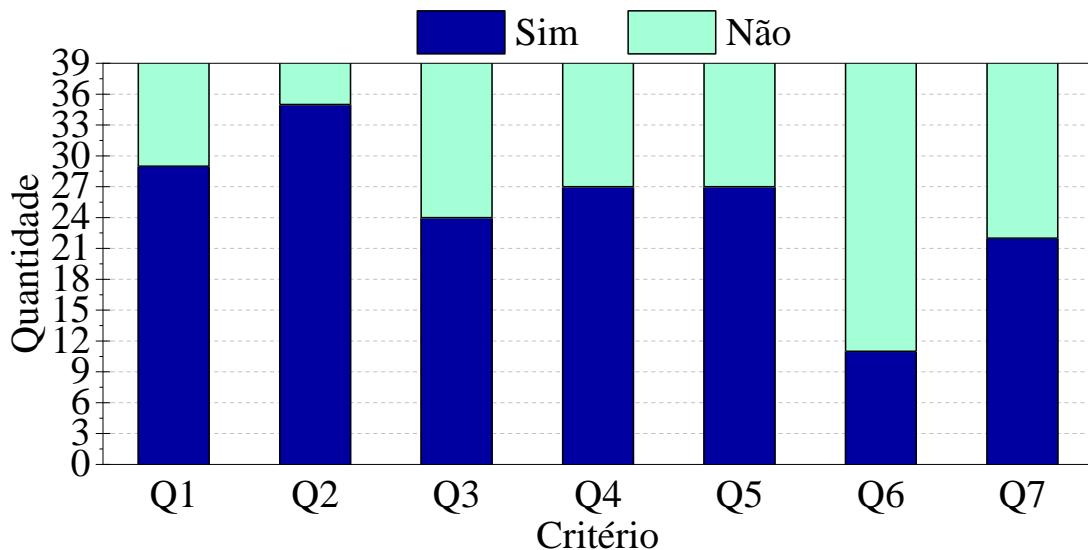


FIGURA 4: Atendimento dos critérios de qualidade.

O critério Q2 referente às propriedades das barras de GFRP foi o critério mais atendido, sendo observado em 89,74% dos artigos analisados. Esse resultado era esperado, visto que é fundamental a obtenção das propriedades dos materiais para a realização de simulações numéricas e o GFRP é o principal material em estudo na amostra. Os demais critérios, com exceção do Q6 que trata das propriedades dos demais materiais e configuração do modelo numérico, foram atendidos por mais de 50% da amostra, demonstrando a aderência da revisão com o tema de pesquisa.

O critério Q6 sobre a realização do teste de malha foi o menos abordado pelos autores com ocorrência em apenas 28,2% das amostras, seguido pelo critério Q7 (validação do modelo) com 56,41%. Esse resultado pode ser justificado pela limitação do tamanho do artigo, considerando que o interesse principal dos trabalhos é responder suas respectivas perguntas de pesquisa. Apesar dessa falta de

informação não impactar diretamente nos resultados de cada pesquisa, o leitor que deseja dados sobre essa fase do estudo teria dificuldade em selecionar os artigos com essa informação.

3.1 MÉTODO DE SIMULAÇÃO DE VIGAS DE CONCRETO ARMADAS COM BARRAS DE GFRP

O desenvolvimento da simulação numérica pelo método dos elementos finitos é comumente realizado por meio de um *software* comercial. Os mais frequentemente encontrados foram o ANSYS e o ABAQUS, correspondendo a 43,58% e 38,46% da amostra total, respectivamente. Houve ainda a incidência de outros *software*, tais como: LS-DYNA (10,25%), Vector2 (2,56%), ATHENA (5,12%), FEMIX (2,56%) e iDIANA (2,56%). Observa-se que a somatória do percentual apresentado ultrapassa 100% em virtude da utilização de dois *software* por Markou e Alhamaydeh (2018): ABAQUS e LS-DYNA.

A simulação e o comportamento não-linear dos materiais foram uma característica comum a todas as referências estudadas. Quanto ao objetivo dos estudos, majoritariamente a literatura analisada buscou propor um modelo numérico válido para avaliar a utilização das barras de GFRP em vigas de concreto. Não foram encontrados estudos paramétricos visando extrapolar resultados experimentais para se compreender a influência das diversas variáveis dos modelos no comportamento estrutural.

Markou e Alhamaydeh (2018) propuseram um modelo que fosse capaz de prever a deflexão em decorrência dos carregamentos adotando um modelo mais eficiente no processo de integração utilizado nas simulações. O modelo numérico elaborado apresentou erro médio em relação ao resultado observado experimentalmente de 7% em relação à deflexão.

El-Emam *et al.* (2020), Premalatha, Vengadeshwari e Shihari (2017) e Sagher e Abed (2017) realizaram estudos com objetivo similar ao de Markou e Alhamaydeh (2018). El-Emam *et al.* (2020) propuseram o efeito da variação do cobrimento do concreto juntamente com a proporção das barras de aço, fazendo ainda a utilização de diferentes comprimentos de barras de GFRP na simulação, obtendo um resultado positivo com a redução do cobrimento do concreto, e negativo quando aliado à redução do comprimento das barras de GFRP. Já no estudo de Premalatha, Vengadeshwari e Shihari (2017), o objetivo foi propor um modelo não-linear capaz de investigar o comportamento e a resistência das vigas de concreto reforçadas com barras de GFRP e aço, resultando, ao final, em um modelo numérico capaz de realizar a análise de forma precisa em comparação aos resultados observados no experimento. Sagher e Abed (2017) propuseram um estudo numérico utilizando elementos finitos, sendo validado com ensaios previamente realizados, investigando a influência da taxa de reforço longitudinal, altura da viga e relação da altura da seção transversal da viga e comprimento no aumento na resistência ao cisalhamento.

Outros artigos presentes na amostra não possuíam como objetivo principal a proposição de um modelo numérico, mas buscaram através do modelo uma forma de estudar um determinado comportamento ou analisar a eficiência do modelo e da simulação numérica comparando-o a resultados obtidos durante ensaios convencionais, comumente utilizados para compreender o comportamento de membros de concreto com reforços.

Resatoglu e Muhammad (2019) verificaram a eficiência das barras de GFRP no concreto em comparação a utilização das barras de aço, sendo obtido um aumento significante na resistência à tração do elemento ao usar GFRP ao invés do aço. Almusallam *et al.* (2013) compararam a eficiência das barras de GFRP e aço inseridas para restauração de estruturas de concreto pelo método Near-Surface Mounted (NSM), que consiste na fixação de barras de reforço no perímetro da viga por meio de resina epóxi, graute ou outro material adequado, avaliando a capacidade de resistência à flexão das vigas reforçadas, resultando em um uso eficiente do aço e das barras de GFRP para auxiliar na restauração de estruturas, podendo ter sua eficiência reduzida quando o compósito possuir baixo módulo de elasticidade.

A pesquisa desenvolvida por Kaklauskas, Timinskas e Sokolov (2019) analisa analiticamente o comportamento das vigas reforçadas com barras de GFRP e fibras de aço quanto à deformação e

fissuração, obtendo melhorias na rigidez à flexão, reduzindo a deflexão obtida e a largura média das fissuras. Adam, Said, Mahmoud e Shanour (2015) tiveram como objetivo principal a fabricação das barras de GFRP e o estudo experimental do comportamento de deflexão e fissuração das vigas com a utilização das barras fabricadas, assim como a avaliação de sua capacidade portante. Said, Adam, Mahmoud e Shanour (2016) utilizaram também barras de fabricação própria, analisando no estudo numérico a resistência ao cisalhamento das vigas reforçadas com barras e estribos verticais de GFRP, obtendo ainda um erro médio de 9,4% na última carga em relação aos resultados observados em laboratório.

Barros, Baghi e Ventura-Gouveia (2021) avaliaram as potencialidades e limitações do modelo Multidirectional Fixed Smeared Crack (MDFSCM) quanto a falha por cisalhamento de vigas de concreto reforçadas. Concluímos que o modelo tem a capacidade de prever de forma consistente o comportamento de vigas que falham por cisalhamento, dado que os parâmetros sejam adotados apropriadamente. Alam e Hussein (2021) investigaram esse comportamento em vigas de concreto armado reforçadas com barras de GFRP sem armadura transversal. Já El-Kareim *et al.* (2022) investigaram o cisalhamento de vigas reforçadas com armadura longitudinal híbrida utilizando GFRP e aço, obtendo uma redução da deflexão ao utilizar as barras de GFRP. Também observaram que, quando a relação entre vão e profundidade é reduzida, provoca melhorias do cisalhamento, ductilidade e capacidade de carga última.

O comportamento à flexão foi abordado em diversos estudos. Nassif *et al.* (2021) investigaram o comportamento à flexão de vigas-parede de concreto de alta resistência com GFRP com diferentes taxas de reforço variando o f_{ck} , observando que, para o mesmo f_{ck} , a utilização de barras de GFRP provocou um pequeno aumento na carga última. Ji *et al.* (2021) avaliaram o comportamento à flexão de vigas reforçadas com barras de GFRP sob diferentes parâmetros, obtendo um aumento na resistência à flexão e reduzindo a deflexão ao aumentar a taxa de reforço de GFRP. Os autores obtiveram um erro máximo de 5,53% entre o modelo numérico e experimental. El-Sayed e Algash (2021) avaliaram o comportamento da flexão do concreto de alta performance com geopolímero à base de palha de trigo reforçados com barras de GFRP, resultando numa maior ductilidade quando utilizadas as barras de GFRP como reforço longitudinal. Gouda, Hassanein e Galal (2023) investigaram a mudança de material e seção transversal no comportamento à flexão e na capacidade de vigas reforçadas com GFRP, obtendo um comportamento linear até a falha ao utilizarem concreto de alta resistência; e para os concretos de resistência normal, houve uma redução na rigidez após 70%-80% da capacidade de momento.

Omrani, Dehestani e Yousefpour (2021) investigaram o uso de LWC (Lightweight Concrete) reforçados com GFRP, obtendo um aumento na rigidez após a fissuração, bem como redução nas larguras das fissuras geradas. O LWC também foi utilizado por El Zareef (2023) com diferentes taxas de reforço de GFRP e aço, resultando no aumento da capacidade de carga em 67% com a utilização de reforços de GFRP.

Kazemi *et al.* (2021) investigaram o mecanismo de falha, deflexão, capacidade de carga e fissuração do concreto comum e de alta resistência reforçados com barras de GFRP em arranjos diferentes de reforço transversal, resultando na transferência das tensões de forma eficiente para a armadura longitudinal. Moubarak *et al.* (2023) investigaram também o arranjo dos esforços transversais avaliando o espaçamento adotado, demonstrando que a utilização de estribos de GFRP como reforço ao cisalhamento é uma forma eficiente de melhorar o comportamento das vigas de concreto reforçadas com GFRP em 56% a 80% quando comparado ao modelo sem estribos.

Outras temáticas também foram abordadas. Thongchom *et al.* (2023) investigaram o comportamento de vigas reforçadas com barras de GFRP e barras de aço quando submetidas à exposição ao fogo, obtendo um melhor resultado nas vigas com utilização do aço. Tu, Zhao e Gao (2022) observaram que a armadura longitudinal, f_{ck} e arranjo da armadura tem pouca influência no estado limite de abertura de fissuras. Almeida Júnior e Parvin (2022) investigaram a substituição da armadura transversal de aço por

GFRP, bem como a substituição parcial e total do concreto por UHPFRC (Ultra High Performance Fiber-Reinforced Concrete), obtendo um aumento na capacidade de carga de 67% quando adotado o reforço alternativo de GFRP. Said *et al.* (2021) produziram barras híbridas quimicamente inertes com comportamento levemente dúctil. A rigidez como objetivo foi observada somente nos estudos de Chen *et al.* (2022), que apresentaram um novo modelo para determinação da rigidez à flexão de vigas reforçadas com diferentes taxas de reforço de GFRP com erro máximo de 1,28.

Na Figura 5, observa-se que a maior parte dos estudos incluídos na amostra (33,33%) realizou sua pesquisa utilizando vigas totalmente armadas com barras de GFRP sem comparar com modelos armados com barras de aço de forma tradicional; já 28,20% realizaram essa comparação. Aproximadamente 33,33% dos trabalhos analisados estudaram modelos com armadura mista com GFRP e aço. Um artigo comparou a armadura mista com a armadura tradicional; outro comparou a armadura mista com a de GFRP.

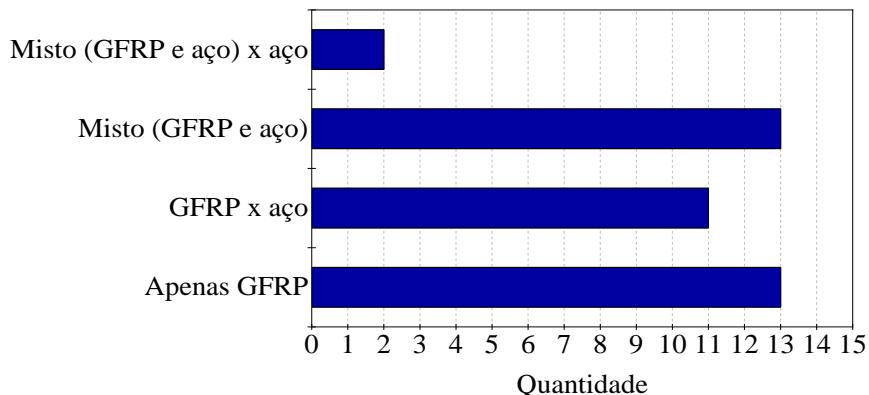


FIGURA 5: Distribuição dos artigos com base na configuração de armadura adotada.

A substituição parcial das convencionais barras de aço por barras de GFRP geraram resultados positivos. Chattopadhyay, Rajkumar e Umamaheswari (2018) recomendam a substituição parcial, dado que adotando as barras de GFRP ocorreria a redução da deterioração dos elementos por corrosão, destacando a boa rigidez das barras de aço. Matos *et al.* (2012) observaram o aumento de rigidez em conjunto com a redução da fissuração, utilizando somente as barras de GFRP, ao aumentar a taxa de armadura.

A amostra analisada permitiu observar que a substituição completa das barras de aço por GFRP promove um aumento significativo da resistência à flexão, porém a ductilidade ainda é um fator crítico ao se adotar o compósito tendo em vista o comportamento frágil da barra de GFRP. Desse modo, a utilização de ambas conciliaria uma boa rigidez, obtida através das barras de GFRP e uma boa ductilidade, obtida com a utilização das barras de aço.

3.2 PROPRIEDADES DAS BARRAS DE GFRP

As propriedades das barras de GFRP foram abordadas de formas diferentes em cada artigo. Kaklauskas *et al.* (2019), Resatoglu e Muhammad (2019), El Zareef (2023), Mohammed e Said (2022), Omrani, Dehestani e Yousefpour (2021) e El-Emam *et al.* (2020) utilizaram barras fabricadas por empresas especializadas. Portanto, os valores das propriedades mecânicas foram definidos pelo fabricante. Outros autores fabricaram as barras em laboratório ou seguiram a literatura para delimitar os parâmetros a serem utilizados para a simulação. O documento normativo ACI 440.1R-15 (2015) define as principais propriedades para as barras de GFRP para uso estrutural: módulo de elasticidade entre 35 GPa e 51 GPa e resistência à tração entre 483 MPa e 690 MPa. Já nos estudos analisados, essas propriedades apresentam

divergência dos valores normativos. A Figura 6 apresenta a distribuição dos valores utilizados para a resistência à tração e módulo de elasticidade das barras de GFRP adotados pelos autores.

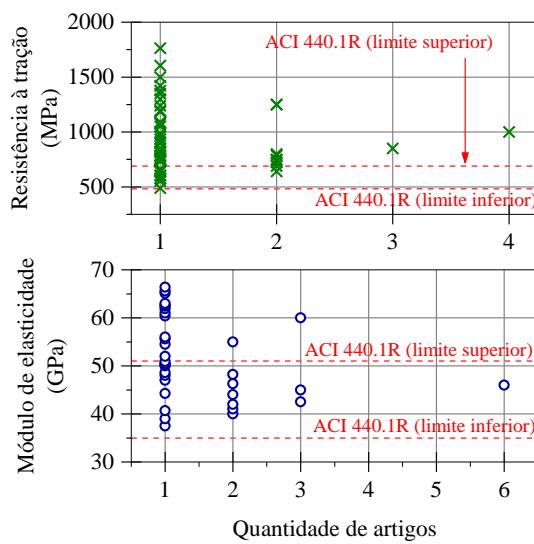


FIGURA 6: Distribuição dos valores de resistência à tração e módulo de elasticidade das barras de GFRP.

A consideração do módulo de elasticidade informado na literatura foi feita por Chattopadhyay, Rajkumar e Umamaheswari (2018), Alam e Hussein (2020), Hosseini, Mehdipour e Beiranvand (2017), Sagher e Abed (2017), Markou e Alhamaydeh (2018), Mohamed, Khattab e Al Hawat (2017), Mohamed e Khattab (2017), Kazemi *et al.* (2021), Premalatha, Shanti Vengadeshwari e Shihari (2017), Saleh *et al.* (2019a), Chen *et al.* (2022), Almeida Júnior e Parvin (2022) e Yang, Zhang e Tu (2010). Em contrapartida, Resatoglu e Muhammad (2019) utilizaram barras de GFRP comerciais, com parâmetros previamente definidos pelo fabricante. Nesses estudos, os autores utilizaram o valor de 55 GPa nas simulações. Destaca-se que esse valor é aproximadamente 8% superior ao valor máximo previsto no documento normativo americano. Kaklauskas *et al.* (2019) e El-Emam *et al.* (2020) utilizaram 54,8 GPa e 56 GPa, respectivamente, ambos utilizando barras de GFRP comercializadas, sendo próximo ao valor adotado por Resatoglu e Muhammad (2019). Omrani, Dehestani e Yousefpour (2021) utilizaram os valores de 65,1 GPa para barra de 6 mm, 65,6 GPa para a barra de 12 mm e 62,6 GPa para a barra de 14 mm. Por sua vez, Mohammed e Said (2022) utilizaram barras comercializadas com módulo de elasticidade de 50 GPa. Observa-se que as barras de GFRP utilizadas nos estudos que foram obtidas de fabricantes especializados apresentavam valores de módulo de elasticidade ligeiramente superiores ao previsto no ACI 440.1R (2015). A alternância do módulo de elasticidade em conjunto com o diâmetro das barras proporciona resultados mais variados aos estudos.

Premalatha, Vengadeshwari e Shihari (2017) utilizaram os valores de 45 GPa e 41 GPa nas simulações, parâmetros adotados seguindo a literatura. Sun *et al.* (2019) adotaram em suas simulações os módulos de elasticidade de 47 GPa e 44 GPa. Alam e Hussein (2020; 2021), por sua vez, utilizaram os valores de 46,3 GPa para o módulo de elasticidade nas barras de 12,7 mm de diâmetro e 48,2 GPa para as barras de 15,9 mm. Mohamed, Khattab e Al Hawat (2017) utilizaram os valores de módulo de elasticidade de 46 GPa para as barras de 16 mm e 19 mm de diâmetro e 48 GPa para as barras de 13 mm de diâmetro. Em outro estudo, Mohamed e Khattab (2017) utilizaram apenas os valores de 46 GPa para os diâmetros de 16 mm e 19 mm. Gouda, Hassanein e Galal (2023) adotaram valores de módulo de elasticidade variados, de acordo com o diâmetro, utilizando o valor de 60,4 GPa para 15 mm, 61 GPa para 20 mm e 61,9 GPa para o diâmetro de 25 mm. Os valores de 20 a 80 GPa foram adotados para a simulação numérica realizada por Saleh *et al.* (2019a) buscando entender a influência do módulo de elasticidade nas vigas reforçadas com barras de GFRP. A alteração de diâmetro das barras foi adotada e explicada por Saleh *et al.* (2019b): a

variação da proporção de reforço consistiu em um dos parâmetros estudados, concluindo que o aumento da proporção de reforço de 0,5% para 1% gerou um aumento de 67% na capacidade de carga última e reduziu em 27% a deflexão no meio do vão.

Barros, Baghi e Ventura-Gouveia (2021), Said *et al.* (2021), Nassif *et al.* (2021), El-Sayed *et al.* (2021), Thongchom *et al.* (2023) realizaram os testes necessários para definição da propriedade das barras. Para o módulo de elasticidade, Barros, Baghi e Ventura-Gouveia (2021) apresentaram o valor de 50,2 GPa para barras de 12 mm, 50,5 GPa nas barras de 16 mm e 50,9 GPa para as barras de 18 mm; já El-Sayed e Algash (2021), Said *et al.* (2021) e Nassif *et al.* (2021) apresentam o valor de 42,5 GPa, próximo do valor apresentado por Thongchom *et al.* (2023), que obtiveram em seus estudos 45 GPa.

Observa-se que há uma dificuldade de padronizar os módulos de elasticidade adotados, visto que os valores são adotados considerando diferentes parâmetros. A variação do diâmetro das barras influencia diretamente na proporção de reforço, no entanto, esse parâmetro não foi utilizado como fundamento para todas as análises da amostra.

O maior valor encontrado para o módulo de elasticidade das barras foi no estudo de Saleh *et al.* (2019b), correspondendo ao valor de 80 GPa, aproximadamente 30% acima do valor máximo encontrado no documento normativo americano. Yang, Zhang e Tu (2010) e Matos *et al.* (2012) também destacam em suas pesquisas valores elevados do módulo de elasticidade, 63 GPa e 60 GPa, respectivamente. Ao todo 34,62% dos artigos analisados utilizaram barras que superaram os limites normativos quanto ao módulo de elasticidade. Não foram encontrados valores abaixo do mínimo recomendado pelo documento.

A utilização de valores iguais ou acima de 60 GPa foi observada em 19,65% dos artigos avaliados que apresentaram esse parâmetro no texto. Já o módulo de elasticidade utilizando valores entre 50 e 60 GPa correspondem a 19,44% da amostra total. Aqueles onde foram observados valores entre 50 e 40 GPa correspondem a 53,62% dos valores encontrados, e por fim, valores entre 40 GPa e 30 GPa foram observados em 4,69% dos estudos.

Diferentemente do módulo de elasticidade, no caso da resistência à tração, a quantidade de artigos que superaram o valor previsto pelo documento normativo ACI 440.1R-15 (2015) foi de 79,97%, porém também não foram encontrados valores abaixo do mínimo. O maior valor encontrado no estudo de Saleh *et al.* (2019a) ultrapassou em 155,65% a resistência máxima disposta no documento normativo ACI 440.1R-15 (2015).

A variação das propriedades físico-mecânicas observadas na amostra pode divergir em função das propriedades das fibras, volume e matriz adotada na fabricação (Wu, 1990). O documento normativo ACI 440.1R (2015) define os valores para a variação de 0,5 a 0,7 do teor de fibras das barras de GFRP. No entanto, na amostra analisada essa variação não foi mencionada, não podendo ser feita uma comparação precisa a respeito desses parâmetros.

Alguns parâmetros foram igualmente utilizados por diferentes autores. Chattopadhyay, Rajkumar e Umamaheswari (2018) e Resatoglu e Muhammad (2019) utilizaram os mesmos módulos de elasticidade e resistência a tração, 55 GPa e 1250 MPa, respectivamente. Nas barras de GFRP, os parâmetros foram obtidos de diferentes formas. Chattopadhyay, Rajkumar e Umamaheswari (2018) seguiram o estudo realizado por Kumar e Rajkumar (2016) para adotar os parâmetros utilizados.

3.3 CARACTERÍSTICAS DA SIMULAÇÃO

3.3.1 Definição dos tipos de elementos finitos adotados na simulação

No processo de simulação de elementos estruturais via método dos elementos finitos, a definição do tipo, tamanho e quantidade de nós de cada elemento possui impacto significativo no resultado da simulação. Resumidamente, existem elementos unidirecionais, como elementos de barras, vigas e pórticos, elementos bidimensionais, como elementos triangulares e quadrangulares e elementos tridimensionais,

sendo esses os hexaedros e tetraedros (Soriano, 2009). Dentro da amostra observada, a escolha do tipo de elemento foi uniforme, sendo adotado elementos hexaédricos para a viga em concreto e elementos de barra para a armadura de aço e GFRP.

As vigas de concreto foram modeladas como elemento sólido (tridimensional) em 95,45% das simulações analisadas. Apenas um estudo, o proposto por Mohamed *et al.* (2017), adotou um *software* de análise inelástica contínua 2D. Quanto aos tipos de elementos utilizados, pode-se concluir através da Figura 7 que se trata de um modelo quadrangular, assim como em Barros, Baghi e Ventura-Gouveia (2021), que também utilizaram um modelo 2D com elementos quadrangulares.

Markou e Alhamaydeh (2018) utilizaram em suas simulações os modelos hexaédricos com 20 nós, buscando obter uma maior precisão e eficiência numérica. Segundo os autores, a escolha do elemento de 20 nós teve como base a sua capacidade de processar deformações complexas, superando o desempenho do modelo hexaédrico de 8 nós, comumente utilizado em simulações semelhantes. No entanto, essa escolha implica em uma demanda computacional mais elevada.

Almusallam *et al.* (2013) analisaram a simulação das vigas utilizando o modelo sólido hexaédrico com 8 nós, observando ainda que a utilização de modelos sólidos com redução de integração gera menos tempo de processamento computacional, dado que há apenas um ponto de integração no centroide do elemento. Premalatha, Shanti Vengadeshwari e Shihari (2017), Alam e Hussein (2020), Saleh *et al.* (2019b), Mohamed e Khattab (2017), Tu, Zhao e Gao (2022) e Chen *et al.* (2022) também utilizaram em suas simulações o modelo sólido hexaédrico de 8 nós com 3 graus de liberdade. Esse modelo é majoritariamente utilizado pelos autores em virtude da possibilidade de obtenção de resultados precisos com baixo tempo de integração. Esse método de redução de integração demonstrou boa capacidade de modelagem.

Em virtude de o procedimento de cálculo ser custoso quanto ao tempo de processamento, Sun *et al.* (2019) também adotaram a redução dos elementos de integração para a simulação. No entanto, como a utilização desta técnica implica em apenas um ponto de integral, ou seja, integração reduzida que pode gerar erros de distorção no elemento; portanto, faz-se necessário inserir mais elementos para que o modelo numérico seja preciso (Sun *et al.*, 2019).

Comparando os modelos de 20 nós adotados por Markou e Alhamaydeh (2018) e o modelo de 8 nós adotado por Sun *et al.* (2019), o erro médio obtido no primeiro estudo foi de 7% e no segundo de 9,5%, demonstrando um erro relativamente baixo entre os modelos.

3.3.2 Comportamento dos materiais na simulação numérica

O modo que as propriedades físico-mecânicas dos materiais é considerado possui impacto no resultado da simulação numérica. O comportamento real do material (não-linear) consiste na associação de grandezas físicas associadas à relação constitutiva não-linear do material, e geométrica (grandes deslocamentos). Existem diferentes técnicas para prever o comportamento não-linear de cada material, sendo importante a identificação dos métodos mais usualmente adotados para a reprodução do comportamento dos elementos estruturais em um processo de simulação numérica. Com a presente revisão, foi possível identificar como a literatura atual tem tratado cada material.

Na simulação através do *software* ABAQUS, o modelo adotado para previsão do comportamento do concreto comumente utilizado pelos autores foi o Concrete Damaged Plastic (CDP), sendo uma opção nativa do *software*. Esse método entende que os dois principais mecanismos de falha do concreto são as falhas de compressão e por tração (Sun *et al.*, 2019).

Alam e Hussein (2020) adotaram o CDP para concreto sem degradação de rigidez, no entanto, os autores incorporaram modificações no modelo para que ele se adequasse à evolução da resistência na tração e compressão. Sagher e Abed (2017), Omrani, Dehestani e Yousefpour (2021), Kazemi *et al.* (2021),

Mohammed e Said (2021) e Chen *et al.* (2022) utilizaram o CPD para descrever o comportamento inelástico característico do concreto.

Mesmo o CDP sendo o modelo comumente adotado pelos autores, houve ainda a utilização de outros dois métodos para determinar o comportamento plástico do concreto, são eles: o modelo Winfrith, proposto por Broadhouse e Neilson (1987), utilizado por Saleh *et al.* (2019a), que consiste em um modelo que avalia a resposta do concreto quando submetido a cargas monotônicas, conseguindo compreender esse comportamento complexo de forma satisfatória, podendo ser observado detalhadamente nos estudos de Broadhouse e Neilson (1987) e Broadhouse (1995). Já no estudo de Mohamed *et al.* (2017) foi adotado o modelo de campo de estresse com perturbações (Disturbed Stress Field Model - DSFM) presente no software VecTor2 (utilizado previamente por Wong e Vecchio, 2002), sendo adotado para a simulação 2D.

O documento normativo americano ACI 440.1R-15 (2015) descreve as barras de FRP como materiais anisotrópicos, com suas características físico-mecânicas influenciadas diretamente pelo volume de fibras, tipo de fibras, tipo de matriz polimérica, orientação das fibras, efeitos dimensionais e controle de qualidade durante a fabricação. Por sua alta resistência e comportamento frágil, alguns autores, como Matos *et al.* (2012) e Mohamed e Khattab (2017), realizaram a simulação com apenas as propriedades elásticas das barras de GFRP. Isso ocorre devido à falha ocorrer no concreto de forma prematura à barra, não se aproximando do limite de resistência da barra.

Para a relação tensão-deformação das barras de GFRP, é assumido o comportamento linear até a falha. Esse modelo é majoritariamente utilizado e justificado na literatura. Consequentemente, é o modelo mais adotado para descrever o comportamento das barras, sendo observado em 43,58% dos estudos. Dentre os poucos trabalhos que apresentaram variações na consideração do comportamento do compósito, Sun *et al.* (2019) realizaram seu estudo considerando as barras de GFRP com um comportamento bilinear, que inclui de forma simplificada o comportamento plástico da barra.

Uma variação dessa adoção foi realizada por Saleh *et al.* (2019b) e Almusallam *et al.* (2013), utilizando o modelo Piecewise Linear Plasticity proposto por Hallquist (2006). Esse modelo requer um valor mínimo para a entrada de dados da densidade, módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson, tensão de escoamento, módulo tangente e da falha por deformação plástica. Em virtude das barras de GFRP não escoarem, o modelo permite criar um comportamento elasto-plástico perfeito e em seguida uma pseudo-deformação plástica, de modo que a barra de GFRP falhe assim que entrar na fase plástica. Outro modelo observado foi o Multidirectional Fixed Smeared Crack Model (MDFSCM), modelo numérico com capacidade de avaliar a transferência de cisalhamento através de uma fissura (adotado por Barros, Baghi e Ventura-Gouveia, 2021).

O CDP foi observado no estudo de Hosseini, Mehdi Pour e Galak (2017) para demonstração do comportamento das barras, porém não apresentou maiores detalhes sobre essa adaptação, sendo necessários maiores estudos sobre essa consideração.

O comportamento utilizado para as barras de GFRP não foi discutido em 46,15% dos estudos, dificultando a parametrização e comparação dos resultados. Dentre os artigos que informaram os critérios de comportamento das barras, a simulação com adoção do comportamento elástico linear foi a mais difundida.

4. CONCLUSÃO

A presente revisão sistemática teve como interesse compreender como a literatura científica tem tratado a utilização de barras de GFRP em vigas de concreto, em estudos com aplicações numéricas. A quantidade de estudos encontrados indica um grande potencial de pesquisa. O percentual incluído na amostra foi considerado adequado quando comparado com outros estudos de revisão, indicando o

interesse dos pesquisadores na utilização do GFRP em vigas de concreto em aplicações numéricas, bem como um delineamento adequado do protocolo de revisão.

O amplo emprego de *software* comerciais para a simulação das vigas armadas com GFRP indica a boa possibilidade de elaboração de estudos numéricos sobre o tema, com a biblioteca padrão desses *software* possibilitando a simulação desses elementos. Nas análises numéricas observadas, o emprego do CDP para previsão do dano no concreto e uma relação bilinear para o compósito foram as mais encontradas, sendo um indicativo de modelos a serem considerados em estudos sobre o tema.

Foi observado que a maior parte dos trabalhos não se destina a comparar as barras de GFRP com o aço tradicionalmente adotado como elemento de reforço, sendo de interesse atual a compreensão do comportamento do concreto com as barras de GFRP em diferentes configurações. Verificou-se que a resistência à flexão das vigas é melhorada com o emprego do compósito, porém sua ductilidade é prejudicada.

Um parâmetro de grande dispersão na amostra foi a consideração das propriedades físico-mecânicas do compósito. Destaca-se que uma parcela significativa encontrou valores de módulo de elasticidade e resistência à tração em desacordo com o documento normativo ACI 440.1R-15 (2015). Essa variação, apesar de ser a favor da segurança, traz incertezas quanto à escolha do material por parte de profissionais e pesquisadores, sendo relatada uma dificuldade no controle e padronização da fabricação.

Com a presente revisão, foi possível observar as seguintes lacunas de pesquisa: influência da variação das propriedades físico-mecânicas do GFRP na rigidez e resistência da viga; e influência da variação das propriedades do concreto no comportamento da viga.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Committee 440. **Guide for the design and construction of structural concrete reinforced with fiber-reinforced polymer FRP bars**. Detroit, 2015.

ADAM, M. A.; SAID, M., MAHMOUD, A. A.; SHANOUR, A. S. Analytical and experimental flexural behavior of concrete beams reinforced with glass fiber reinforced polymers bars. **Construction and Building Materials**, v. 84, p 354-366, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.057>.

ALAM, M. S.; HUSSEIN, A. Finite element modelling of shear critical glass fibre-reinforced polymer (GFRP) reinforced concrete beams. **International Journal of Modelling and Simulation**, v. 41, n. 1, p. 11-23, 2021. <https://doi.org/10.1080/02286203.2019.1655702>.

_____. Idealized tension stiffening model for finite element analysis of glass fibre reinforced polymer (GFRP) reinforced concrete members. **Structures**, v. 24, p. 351-356, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.01.033>.

ALMUSALLAM, T. H.; ELSANADEDY, H. M.; AL-SALLOUM, Y. A.; ALSAYED, S. H. Experimental and numerical investigation for the flexural strengthening of RC beams using near-surface mounted steel or GFRP bars. **Construction and Building Materials**, v. 40, p. 145-161, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.09.107>.

ALMEIDA JÚNIOR, S. A.; PARVIN, A. Reinforcement of new and existing reinforced concrete beams with fiber-reinforced polymer bars and sheets – A numerical analysis. **Structures**, v. 40, p. 513-523, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.04.046>.

BARROS, J. A. O.; BAGHI, H.; VENTURA-GOUVEIA, A. Assessing the applicability of a smeared crack approach for simulating the behaviour of concrete beams flexurally reinforced with GFRP bars and failing in shear. **Engineering Structures**, v. 227, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111391>.

BROADHOUSE, B. **The Winfrith Concrete Model in LS-DYNA3D**. Report: SPD/D (95), v. 363, 1995. Disponível em: https://ftp.lstc.com/anonymous/outgoing/jday/concrete/Winfrith_Paper_Feb1995.pdf. Acesso em: 14 ago. 2023.

BROADHOUSE, B.; NEILSON, A. **Modelling Reinforced Concrete Structures in Dyna3d.** In: DYNA3D USER GROUP CONFERENCE, n. 1, 1987, Londres. **Anais [...].** Londres: United Kingdom Atomic Energy Establishment, 1987. Disponível em: https://ftp.lstc.com/anonymous/outgoing/support/FAQ_kw/concrete/Winfrith_Paper_Oct1987.pdf. Acesso em: 14 ago. 2023.

CHATTOPADHYAY, S.; RAJKUMAR, R.; UMAMAHESWARI, N. Analytical investigation on flexural behavior of concrete beams reinforced with gfrp rebars. **International Journal of Civil Engineering and Technology**, v. 9, p. 1-8, 2018.

CHEN, G.; AN, R.; XU, J.; FU, S. Finite element analysis of the reinforcement ratio effect on tension stiffening in FRP reinforced concrete beams. **Composite Structures**, v. 298, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.01.033>.

EL ZAREEF, M. A. An Experimental and Numerical Analysis of the Flexural Performance of Lightweight Concrete Beams reinforced with GFRP Bars. **Engineering, Technology & Applied Science Research**, v. 13, n. 3, p. 10776-10780, 2023. <https://doi.org/10.48084/etasr.5871>.

EL-EMAM, H.; EL-SISI, A.; REDA, R.; SELEEM, M.; BNENI, M. Effect of concrete cover thickness and main reinforcement ratio on flexural behavior of RC beams strengthened by NSM-GFRP bars. **Frattura Ed Integrità Strutturale**, v. 14, p. 197-210, 2020. <https://doi.org/10.3221/IGF-ESIS.52.16>.

EL-KAREIM SHOEIB, A.; EL-HASHMY, A. M.; ARADA, A. N.; SEDAWY, A. S. Analysis of the shear strength of hybrid materials bars in reinforced concrete beams without stirrups. **Materials Today: Proceedings**, v. 61, p. 966-976, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.10.273>.

EL-SAYED, T. A.; ALGASH, Y. A. Flexural behavior of ultra-high performance geopolymer RC beams reinforced with GFRP bars. **Case Studies in Construction Materials**, v. 15, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00604>.

GOUDA, O.; HASSANEIN, A.; GALAL, K. Experimental and numerical study on the crack width and deflection performance of GFRP reinforced concrete beams. **Engineering Structures**, v. 283, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.115721>.

HALLQUIST, J.O. **LS-DYNA Theory Manual.** Livermore Software Technology Corporation (LSTC), Livermore, 2006.

HOSSEINI, M.; MEHDIPOUR, S.; BEIRANVAND, P. The effect of transverse steel rebars on the behavior of concrete beam reinforced with glass polymer rebars. **Engineering Solid Mechanics**, v. 5, p. 205-212, 2017. <https://doi.org/10.5267/j.esm.2017.7.001>.

HUANG, J. Finite element modeling (FEM) of GFRP bar reinforced concrete beam: Flexural behavior. **Advanced Materials Research**, v. 255-260, p. 3114-3118, 2011. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.255-260.3114>.

JI, J.; ZHANG, R.; YU, C.; HE, L.; REN, H.; JIANG, L. Flexural Behavior of Simply Supported Beams Consisting of Gradient Concrete and GFRP Bars. **Frontiers in Materials**, v. 8, 2021. <https://doi.org/10.3389/fmats.2021.693905>.

KAKLAUSKAS, G.; TIMINSKAS, E.; NG, P. L.; SOKOLOV, A. **Deformation and cracking behaviour of concrete beams reinforced with glass fibre-reinforced polymer bars.** IABSE Symposium, Guimarães 2019: Towards a Resilient Built Environment Risk and Asset Management - Report, p. 500-506, 2019. <https://doi.org/10.2749/guimaraes.2019.0500>.

KALAMKAROV, A. L., FITZGERALD, S. B., MACDONALD, D. O., GEORGIADES, A. V. Pultruded fibre reinforced polymer reinforcements with embedded fibre optic sensors. **Canadian Journal of Civil Engineering**. v. 27, p. 972-984, 2011. <https://doi.org/10.1139/l00-034>.

KAZEMI, M; MADANDOUST, R.; CHASTRE, C.; ESFAHANI, M. R.; COURARD, L. Numerical study on the flexural behaviour of normal- and high-strength concrete beams reinforced with GFRP bar, using different amounts of transverse reinforcement. **Structures**, v. 34, p. 3113-3124, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.09.077>.

KUMAR, D. S.; RAJKUMAR, R. Experimental Investigation on Flexural Behavior of Concrete Beam with Glass Fibre Reinforced Polymer Rebar as internal reinforcement. **International Journal of Chemical Sciences**, v. 14, p. 319-29, 2016.

MARKOU, G.; ALHAMAYDEH, M. 3D Finite Element Modeling of GFRP-Reinforced Concrete Deep Beams without Shear Reinforcement. **International Journal of Computational Methods**, v. 15, 2018. <https://doi.org/10.1142/S0219876218500019>.

MATOS, B.; CORREIA, J. R.; CASTRO, L. M. S.; FRANÇA, P. Structural response of hyperstatic concrete beams reinforced with GFRP bars: Effect of increasing concrete confinement. **Composite Structures**, v. 94, p. 1200-1210, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2011.10.021>.

MOHAMED, K.; FARGHALY, A. S.; BENMOKRANE, B.; NEALE, K. W. Nonlinear finite-element analysis for the behavior prediction and strut efficiency factor of GFRP-reinforced concrete deep beams. **Engineering Structures**, v. 137, p. 145-161, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.01.045>.

MOHAMED, O. A., KHATTAB, R.; AL HAWAT, W. Numerical Study on Deflection Behaviour of Concrete Beams Reinforced with GFRP Bars. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 245, 2017. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/245/3/032065>.

MOHAMED, O. A.; KHATTAB, R. Numerical analysis of concrete beam reinforced with glass fiber reinforced polymer bars. **Proceedings of International Structural Engineering and Construction**, v. 4, 2017. <https://doi.org/10.14455/ISEC.res.2017.141>.

MOHAMMED, S. A.; SAID, A. M. 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. <https://doi.org/10.1515/jmbm-2022-0068>.

MONGEON, P.; PAUL-HUS, A. The journal coverage of Web of Science and Scopus: a comparative analysis. **Scientometrics**, v. 106, n. 1, p. 213-228, 2016. <https://doi.org/10.1007/s11192-015-1765-5>.

MOUBARAK, A. M. R.; IBRAHIM, A.; FAROUK, M. A.; ELWARDANY, H. Shear performance of glass fiber reinforced concrete beams with diverse embedded GFRP trusses. **Case Studies in Construction Materials**, v. 18, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02195>.

NASSIF, M. K; ERFAN, A. M.; FADEL, O. T.; EL-SAYED, T. A. Flexural behavior of high strength concrete deep beams reinforced with GFRP bars. **Case Studies in Construction Materials**, v. 15, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00613>.

OMRANI, M. H.; DEHESTANI, M.; YOUSEFPOUR, H. Flexural behavior of lightweight concrete beams reinforced with GFRP bars and prestressed with steel strands. **Structural Concrete**, v. 22, n. 1, p. 69-80, 2021. <https://doi.org/10.1002/suco.201900342>.

PEREIRA, M. F.; CHRISTOFORO, A. L.; ALMEIDA, J. P. B. Influência de parâmetros na modelagem de vigas de concreto armado. **Hilos**, v. 37(1), p. 1-23, 2021. <https://doi.org/10.15628/hilos.2021.10875>.

PREMALATHA, J.; SHANHI VENGADESHWARI, R.; SHIHARI, P. Finite Element Modeling and Analysis of RC Beams with Gfrp and Steel Bars. **International Journal of Civil Engineering and Technology**, v. 8, p. 671-679, 2017.

RESATOGLU, R.; MUHAMMAD, M. S. Comparative study of steel and glass fibre reinforced polymer (GFRP) bars in RC members. **ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences**, v. 14, n. 16, 2019.

SAGHER, A.; ABED, F. Finite element parametric study of the shear behavior of GFRP-RC short beams. **7th International Conference on Modeling, Simulation, and Applied Optimization (ICMSAO)**, Sharjah, United Arab Emirates, p. 1-5, 2017. <https://doi.org/10.1109/ICMSAO.2017.7934912>.

SAID, M.; SHANOUR, A. S.; MUSTAFA, T. S.; ABDEL-KAREEM, A. H.; KHALIL, M. M. Experimental flexural performance of concrete beams reinforced with innovative hybrid bars. **Engineering Structures**, v. 226, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111348>.

SAID, M.; ADAM, M. A.; MAHMOUD, A. A.; SHANOUR, A. S. Experimental and analytical shear evaluation of concrete beams reinforced with glass fiber reinforced polymers bars. **Construction and Building Materials**, v. 102, p. 574-591, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.185>.

SALEH, Z.; SHEIKH, M. N.; REMENNIKOV, A. M.; BASU, A. Numerical investigations on the flexural behavior of GFRP-RC beams under monotonic loads. **Structures**, v. 20, p. 255-267, 2019a. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2019.04.004>.

_____. Numerical analysis of behavior of glass fiber-reinforced polymer bar-reinforced concrete beams under impact loads. **ACI Structural Journal**, v. 116, p. 151-160, 2019b. <https://doi.org/10.14359/51715658>.

SORIANO, H. L. **Elementos finitos: formulação e aplicação na estática e dinâmica das estruturas**. 1. ed. Rio de Janeiro: Editora Ciência Moderna, 2009.

SUN, Y.; LIU, Y.; WU, T.; LIU, X.; LU, H. Numerical analysis on flexural behavior of steel fiber-reinforced LWAC beams reinforced with GFRP bars. **Applied Sciences**, v. 9, 2019, <https://doi.org/10.3390/app9235128>.

THONGCHOM, C.; BUI, L. V. H.; POONPAN, N.; PHUDTISARIGORN, N.; NGUYEN, P. T.; KEAWSAWASVONG, S.; MOUSA, S. Experimental and Numerical Investigation of Steel and GFRP-Reinforced Concrete Beams Subject to Fire Exposure. **Buildings**, v. 13, n. 3, 2023. <https://doi.org/10.3390/buildings13030609>.

TU, J.; ZHAO, Q.; GAO, K. The Design of Concrete Beams Reinforced with GFRP Bars Based on Crack Width. **Materials**, v. 15, n. 18, 2022. <https://doi.org/10.3390/ma15186467>.

WONG, P. S.; VECCHIO, F. J. **VecTor2 & formworks user's manuals**. Toronto, Department of Civil Engineering, University of Toronto, 2002.

WU, W. P. **Thermomechanical properties of fiber-reinforced plastic (FRP) bars**. 1990. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – West Virginia University, Morgantown, West Virginia, 1990. Disponível em: <https://researchrepository.wvu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=11049&context=etd>. Acesso em: 10 ago. 2023.

YANG, Q.; ZHANG, Y.; TU, Z. The study about flexural performance of GFRP bar reinforced concrete beams based on numerical calculation method. **Applied Mechanics and Materials**, v. 29-32, p. 1350-1356, 2010. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.29-32.1350>.

YOU, Y. J.; KIM, J. H. J.; KIM, S. J.; PARK, Y. H. Methods to enhance the guaranteed tensile strength of GFRP rebar to 900 MPa with general fiber volume fraction. **Construction and Building Materials**, v. 75, p. 54-62, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.10.047>.