

# SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE VIGAS DE CONCRETO ARMADAS COM BARRAS DE AÇO E BARRAS DE GFRP

*NUMERICAL SIMULATION OF CONCRETE BEAMS REINFORCED WITH STEEL BARS AND GFRP BARS*

VAZ, Viviane Visnardi  
Doutoranda no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGECiv)  
Universidade Federal de São Carlos (UFSCar)  
[vivianevisnardi@gmail.com](mailto:vivianevisnardi@gmail.com)

ARROYO, Felipe Nascimento  
Doutorando no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGECiv)  
Universidade Federal de São Carlos  
[lipe.arroyo@gmail.com](mailto:lipe.arroyo@gmail.com)

CHRISTOFORO, André Luis  
Professor no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGECiv)  
Universidade Federal de São Carlos (UFSCar)  
[christoforoal@yahoo.com.br](mailto:christoforoal@yahoo.com.br)

## RESUMO

A utilização de barras de polímeros reforçados com fibra (FRP) têm-se mostrado uma alternativa viável para substituir as armaduras de aço nas estruturas de concreto armado onde a durabilidade é comprometida em função da agressividade do ambiente. Contudo, para o emprego do reforço com barras de GFRP em elementos estruturais de concreto com segurança e confiabilidade necessita de estudos a respeito de suas propriedades e comportamento. Neste contexto as simulações numéricas são uma poderosa ferramenta para a investigação do comportamento destes elementos e desenvolver um modelo numérico com alto nível de aproximação aos resultados experimentais. Porém, o modelo mais utilizado (CDP) é calibrado para estruturas em concreto armado, necessitando de um estudo que calibre para o GFRP. Dessa forma, este trabalho teve como objetivo verificar quais são os parâmetros do CDP ideais para aplicar no GFRP, além de analisar a diferença entre simular as armaduras (barras de aço e barras de GFRP) como elementos sólidos ou como elementos de barras (Wire). Ao final, pode-se concluir que o modelo numérico apresentou boa aproximação aos resultados experimentais, sendo observadas diferenças de cerca de 3% e 15% entre os resultados experimentais e numéricos de vigas de concreto armado com barras de aço e barras de GFRP, respectivamente.

**Palavras-chave:** Polímero reforçado com fibras de vidro. Elementos finitos. Modelo numérico. ABAQUS.CDP.

## ABSTRACT

The use of fiber-reinforced polymer (FRP) bars has proven to be a viable alternative to replace steel reinforcement in reinforced concrete structures where durability is compromised due to the aggressiveness of the environment. However, the use of GFRP bars in concrete structural elements with safety and reliability requires studies about its properties and behavior. In this context, numerical simulations are a powerful tool to investigate the behavior of these elements and develop a numerical model with a high level of approximation to experimental results. However, the most widely used model (CDP) is calibrated for reinforced concrete structures, requiring a study that calibrates for GFRP. Thus, this work aimed to verify which are the ideal CDP parameters to apply to GFRP, and to analyze the difference between simulating the reinforcement (i.e., steel bars and GFRP bars) as solid elements or as bar elements (i.e., wire). In the end, it can be concluded that the numerical model showed good approximation to the experimental results, being observed differences of about 3% and 15% between the experimental and numerical results of reinforced concrete beams with steel bars and GFRP bars, respectively.

**Keywords:** Glass fiber-reinforced polymer. Finite elements method. Numerical modeling. ABAQUS. CDP.

## 1.INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, tem sido crescente o interesse em materiais de alto desempenho, como o concreto de alta resistência e os materiais compósitos. Estes materiais podem oferecer maior resistência mecânica e maior durabilidade e, como consequência, aumento da vida útil das estruturas (RIBEIRO; DINIZ, 2013). Além do mais, tem-se buscado os materiais para superar a corrosão e outros problemas comumente associados aos reforços de aço. Neste contexto, o uso de reforços de polímero reforçado com fibra de vidro (GFRP) surgiu como alternativa para substituir o aço em estruturas de concreto armado.

A excelente resistência à corrosão do GFRP, a alta relação tensão de ruptura  $\times$  peso, material não magnético e não condutor elétrico fazem dele uma excelente solução para projetos que requerem melhor resistência à corrosão ou custos de manutenção reduzidos(ELCHALAKANI et al., 2018; RAZA; KHAN; AHMAD, 2019; XINGYU; YIQING; JIWANG, 2020). Devido às propriedades não magnéticas e não condutoras, o GFRP substituiu convenientemente o aço em estruturas próximas a instrumentos sensíveis em laboratórios e hospitais (RAZA; KHAN; AHMAD, 2019).

Além disso, para os elementos reforçados com barras de GFRP é necessária uma menor espessura do concreto de cobertura devido à elevada resistência à corrosão das barras GFRP. Nas estações de tratamento de efluentes, nas estruturas marítimas e nas estruturas expostas a saís de degelo, a corrosão do aço convencional provoca a redução da durabilidade e desempenho e serviço das estruturas. Dessa forma, a substituição do aço por GFRP pode ser útil para economizar os altos custos de reparo para manter o desempenho em de serviço a longo prazo e durabilidade das estruturas (RAZA; KHAN; AHMAD, 2019).

Entretanto, as barras GFRP têm baixo módulo elástico e tendência a romper sem escoar, o que significa que requerem tratamento diferente nos códigos de projeto para o reforço de aço(ELCHALAKANI et al., 2018; XINGYU; YIQING; JIWANG, 2020). À vista disso, estudos para o melhor entendimento do comportamento desse material é de extrema importância. Visando a redução de custos experimentais para este entendimento, simulações numéricas são de extrema importância. Para o concreto armado, o modelo constitutivo CDP é o mais utilizado, porém os parâmetros podem variar quando utilizado barras de GFRP (BEHNAM; KUANG; SAMALI, 2018; XINGYU; YIQING; JIWANG, 2020). Alguns autores desenvolveram trabalhos em que utilizaram o CDP em concreto armado com barras de

GFRP, porém os parâmetros utilizados não foram informados (MARKOU; ALHAMAYDEH, 2018; MOHAMMED; FANGYUAN, 2019; XINGYU; YIQING; JIWANG, 2020).

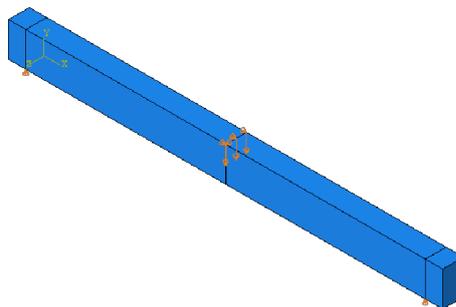
Sendo assim, esse trabalho tem como objetivo verificar a influência dos parâmetros do CDP em simulações numéricas envolvendo estruturas de concreto armado com barras de GFRP e barras de aço, verificando validar um modelo que atenda as duas situações. Além do mais, verificou-se qual o melhor elemento (sólido ou de barra) deve ser utilizado nas barras em vigas solicitadas à flexão. Para isso, variações no ângulo de dilatação e na viscosidade foram adotados, além de realizar a validação das condições de contorno e um teste de malha.

## 2.MATERIAIS E MÉTODOS

As simulações foram realizadas no Abaqus, software comercial para análise por elementos finitos da empresa Dassault Systemes S.A. Inicialmente, como em toda simulação numérica, é necessário fazer um teste de malha e das condições de contorno adotadas. Para simular as condições de contorno das vigas no ensaio de flexão foram considerados dois pontos de apoio onde foram restringidos os deslocamentos verticais (simulando apoios) e no centro do modelo aplicado um deslocamento para simular a força aplicada. Na Figura 1 estão apresentados o modelo e as condições de contorno adotadas. Já para o teste de malha, 3 tamanhos distintos foram adotados, conforme mostrado na

Tabela 1.

Figura 1: Modelo e condições de contorno da viga.



Fonte: Autor, 2021.

Tabela 1 - Estudo da malha.

<b>Elemento</b>	<b>Malha 20</b>	<b>Malha 40</b>	<b>Malha 80</b>
Concreto	20mm	40mm	80mm

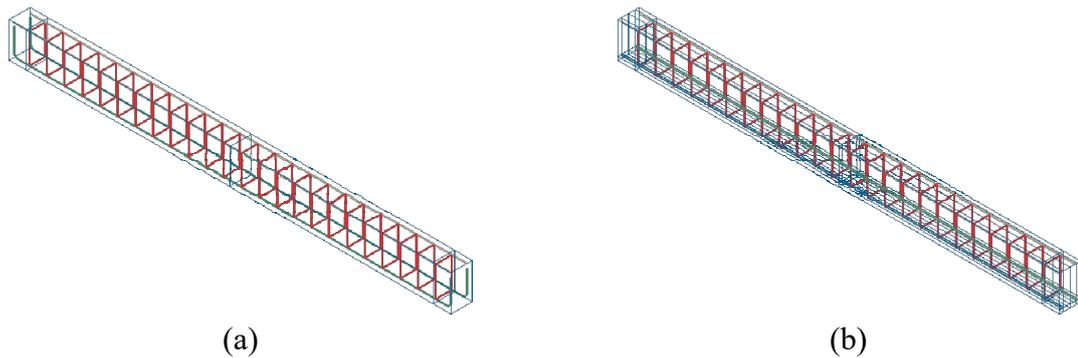
Fonte: Autor, 2021.

Para validar as condições de contorno consideradas e verificar a influência da malha adotada, foi inserido no modelo apenas as propriedades do material (concreto), sem considerar a armadura neste momento. A interação entre a armadura e o concreto será verificado na validação do modelo final, quando este for comparado com um resultado experimental, conforme indicado na literatura (CHEN et al., 2020; MESQUITA; GOMES; LEÃO, 2019). Para verificar se as condições de contorno foram adotadas corretamente e a malha não está influenciando nos resultados, foi aplicada uma deformação de 0,30mm no modelo. Através da obtenção da força de reação, é possível comparar com o valor da força calculada analiticamente utilizando a equação clássica da resistência dos materiais (Equação 1). Se a força for a mesma ou próxima, evidencia-se a validação das condições de contorno e malha. Desta equação, “*f*” é a flecha (0,30mm), “*P*” a força a ser comparada, “*l*” a distância entre apoios, “*E*” o módulo de elasticidade do concreto e “*I*” a inércia da seção.

$$f = \frac{1}{48} \cdot \frac{P \cdot l^3}{E \cdot I} \rightarrow P = 48 \cdot \frac{E \cdot I \cdot f}{l^3} \quad (\text{Eq. 1})$$

Com o tamanho de malha e as condições de contorno definidas, o modelo completo (com as armaduras) é modelado. O concreto foi simulado utilizando-se elementos sólidos hexaédricos de oito nós (C3D8), com oito nós e três graus de liberdade por nó. Para as armaduras transversais e estribos foram utilizados o elemento de barra *Truss* com dois nós (T3D2). Para a malha das armaduras longitudinais inferior (armadura positiva) foram utilizados dois elementos: armadura modelada como elemento de barra (T3D2) e como sólido (C3D8). Para a consideração da interação entre concreto e armaduras foi utilizado o *Embedded region* quando a armadura foi modelada como barra (T3D2) e *Tie* para os modelos que consideraram a barra de aço como elemento sólido. Na Figura 2 estão representados os modelos com elementos de barra e sólidos.

Figura 2 - Modelos das vigas armadas com barras metálicas: armadura inferior modelada como barras (a) e como sólido (b).

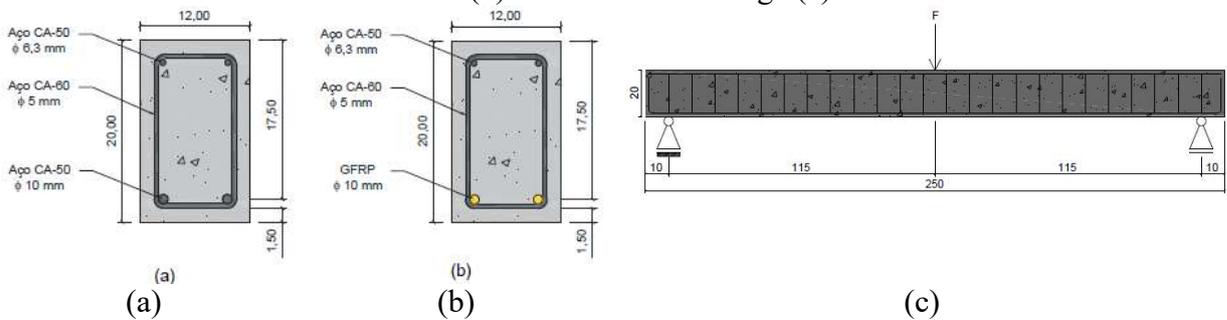


Fonte: Autor, 2021.

## 2.1 Ensaio Experimental: validação

Para comparação e validação dos resultados obtidos na simulação numérica foi considerado o estudo realizado por Mazzú (2020). No referido trabalho, a autora estudou a substituição das barras de aço por barras de GFRP em vigas de concreto armado, em que foi realizado o ensaio experimental da viga com barras de aço e com barras de GFRP, aos 28 dias. Na Figura 3 está apresentado os detalhes de geometria e armadura das vigas que foram submetidas ao ensaio de flexão em três pontos.

Figura 3 - Seções transversais das vigas de concreto armadas com barras de aço (a), barras de GFRP (b) e vista lateral da viga (c).



Fonte: Adaptado de Mazzú(2020).

As vigas do programa experimental de Mazzú (2020) possuem comprimento de 250 cm e vão livre de 230 cm, seção transversal de  $12 \times 20$  cm, armadura transversal com diâmetro de 5 mm e aço CA-60 espaçadas a cada 10 cm, armadura longitudinal superior com duas barras de diâmetro 6,3 mm e aço CA-50. Para a armadura longitudinal inferior (armadura positiva) foram utilizadas duas barras de 10 mm de diâmetro, tanto para as barras aço CA-50 tanto nas vigas de GFRP. O cobrimento das armaduras foi de 15 mm.

O concreto foi caracterizado por Mazzú (2020) através de ensaios de compressão em corpo de prova cilíndrico e apresentou resistência à compressão média ( $f_{cm}$ ) de 32,8 MPa aos

28 dias. O aço CA-50 também foi caracterizado através de ensaios de tração (Tabela 2). As barras de GFRP utilizadas foram fornecidas pelo fabricante Stratus e apresentam tensão de ruptura de 1047 MPa e módulo de elasticidade de 48 GPa, conforme ficha técnica do fabricante. No ensaio de flexão três pontos, os deslocamentos no meio do vão foram medidos através de transdutores de deslocamento (LVDTs). Os resultados obtidos nos ensaios de flexão em três pontos estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 2 - Resultados dos ensaios de tração aço CA-50

$\varnothing$ (mm)	$f_v$ (MPa)	$\epsilon_{sv}$ (‰)	$f_u$ (MPa)	$\epsilon_{su}$ (‰)	$E_s$ (GPa)
10	565,35	3,07	580,86	8,87	194,33

Fonte: Adaptado de Mazzú (2020).

Tabela 3 - Resultados dos ensaios de flexão em três pontos das vigas

Viga	F1	$\delta 1$	F2	$\delta 2$	F3	$\delta 3$	F4	$\delta 4$
V1_S	7,10	1,90	23,00	10,90	24,00	19,60	25,40	49,20
V2_S	6,90	2,60	24,70	13,30	26,00	21,20	26,70	32,90
V1_G	4,80	1,10	-	-	27,30	40,20	38,10	70,10
V2_G	3,80	0,30	-	-	25,60	41,50	33,10	61,50

F – força registrada em kN

$\delta$  – deslocamento vertical a meio vão em mm

1 – Primeira fissura

2 – Escoamento da armadura

3 – Esmagamento do concreto

4 – Força máxima

Fonte: Adaptado de Mazzú (2020).

## 2.2 Modelos constitutivos

### 2.2.1 Concreto

Para o comportamento do concreto foi utilizado o modelo baseado na Teoria da Plasticidade e na Mecânica do Dano Contínuo, chamado *Concrete Damage Plasticity* (CDP). A opção por este modelo se deve ao fato do mesmo ser amplamente adotado para o concreto e ter um desempenho satisfatório em aplicações similares (ELCHALAKANI et al., 2018; METWALLY, 2017; MOHAMMED; FANGYUAN, 2019; RAZA; KHAN; AHMAD, 2019).

O módulo de elasticidade e a resistência à tração do concreto foram determinados segundo as recomendações da ABNTNBR 6118 (2014), conforme Equação 2 e 3, respectivamente. O parâmetro  $\alpha_E$  foi assumido igual a 1,0 (considerando agregados graúdos

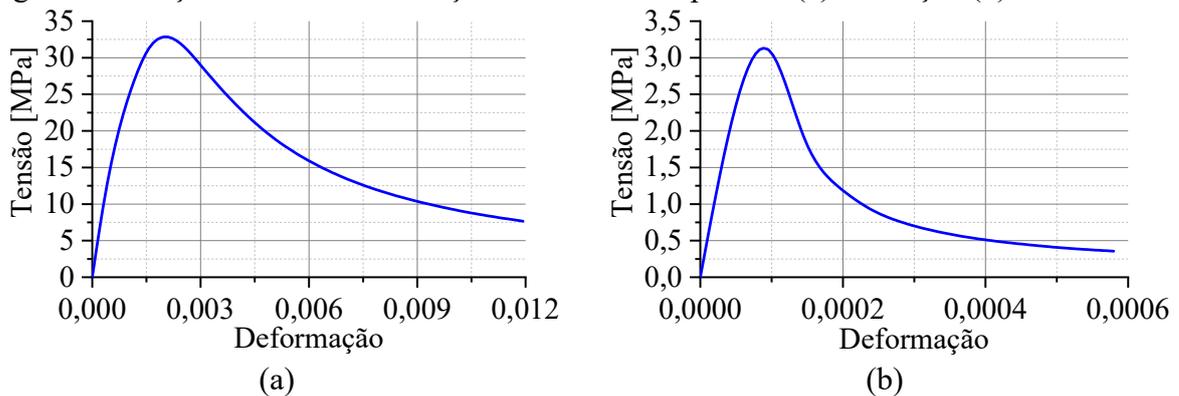
de granito e gnaiss). O coeficiente de Poisson do concreto ( $\nu$ ) foi assumido igual a 0,2, conforme as premissas desta mesma norma.

$$E_{ci} = \alpha_E \cdot 5600 \cdot \sqrt{f_{ck}} \quad (2)$$

$$f_{ct,m} = 0,30 \cdot \sqrt[3]{f_{ck}^2} \quad (3)$$

Para o comportamento à compressão e a tração do concreto foi utilizado o modelo matemático proposto por Guo (2014). Através destas equações e com os resultados apresentados por Mazzú (2020), pode-se construir as curvas tensão × deformação na tração e compressão (Figura 4) e determinar o dano do material, sendo estes os parâmetros necessários para simular com o CDP.

Figura 4- Relação tensão × deformação uniaxial à compressão (a) e à tração (b) do concreto.



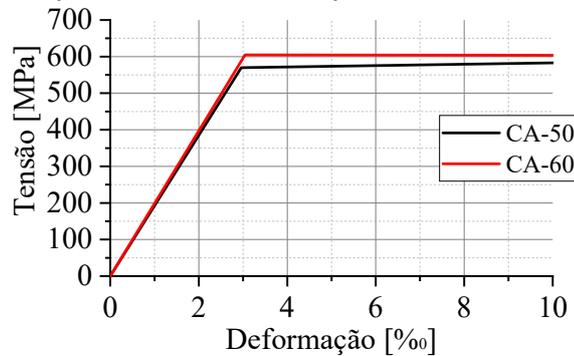
Fonte: Autor, 2021.

Além do comportamento à tração e compressão também são necessários outros cinco parâmetros para determinar a relação constitutiva do concreto no CDP: ângulo de dilatação ( $\psi$ ), excentricidade ( $\epsilon$ ), relação entre resistência biaxial e uniaxial ( $f_b/f_c$ ), relação entre os segundos invariantes dos meridianos de tensão e compressão ( $K_c$ ) e a viscosidade plástica ( $\mu$ ). Raza et. al (2019) verificaram em seu trabalho a influência destes parâmetros na simulação numérica de pilares reforçados com barras de GFRP e verificaram que a variação da excentricidade, relação entre resistência biaxial e uniaxial e a relação entre os segundos invariantes dos meridianos de tensão e compressão não tem influência significativa na simulação. Por outro lado, a variação do o ângulo de dilatação e viscosidade plástica tem influência significativa na simulação. Assim neste trabalho foram adotados os valores de 0,1, 1,16 e 0,667, respectivamente para  $\epsilon$ ,  $f_b/f_c$  e  $K_c$ , conforme utilizado pelos autores e recomendado no manual do ABAQUS. Para o ângulo de dilatação foram analisados valores (30°, 35° e 40°) e para a viscosidade plástica valores no intervalo entre 0,05 e 0,0001.

## 2.2.2 Aço e GFRP

As barras de aço foram simuladas como material elasto-plástico bilinear. Para o aço CA-50 foram considerados os resultados de tensões e deformações obtidas experimentalmente por Mazzú (2020). Para o aço CA-60 foram considerados as tensões e deformações conforme recomendações da ABNT NBR 6118 (2014). Os diagramas de tensão  $\times$  deformação utilizados para as barras de aço estão apresentados na Figura 5.

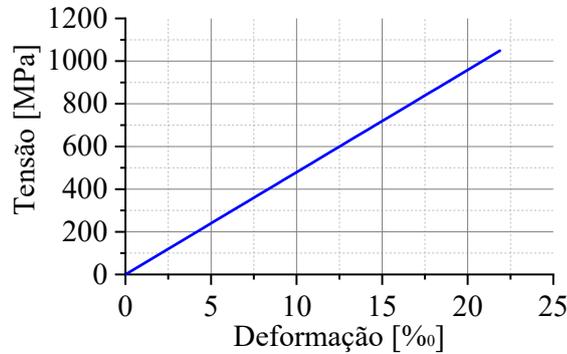
Figura 5- Relação tensão  $\times$  deformação uniaxial das barras de aço.



Fonte: Autor, 2021.

Para as barras de GFRP foi assumido um comportamento elástico linear isotrópico, conforme Raza et al. (2019). Esse comportamento foi assumido em função das barras de GFRP apresentarem rupturas frágeis, sem fases plásticas. Na Figura 6 está representado o diagrama tensão  $\times$  deformação adotado para as barras de GFRP.

Figura 6 - Relação tensão  $\times$  deformação uniaxial das barras de GFRP.



Fonte: Autor, 2021.

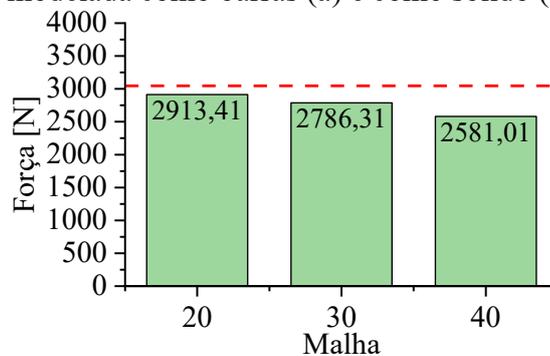
O coeficiente de Poisson foi adotado igual a 0,3 para as barras de aço e 0,25 para as barras de GFRP, conforme Raza et al. (2019).

### 3.RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 3.1 Teste de malha e condições de contorno

Observa-se na Figura 7 que os resultados obtidos nos modelos são muito próximos do resultado obtido analiticamente (3046 N), indicando que as condições de contorno adotadas são adequadas para representar a viga. Verificou-se também que na viga com malha de 20mm foi a que obteve melhor aproximação, sendo este valor o adotado para o estudo final.

Figura 7 - Validação das condições de contorno e malha das vigas - armadura inferior modelada como barras (a) e como sólido (b)



Fonte: Autor, 2021.

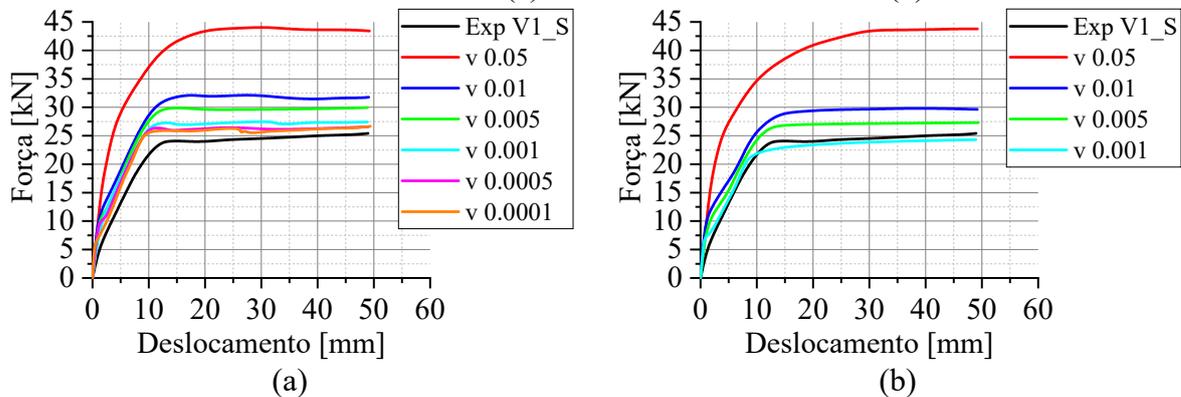
#### 3.2 Influência dos parâmetros variados

Para a convergência do modelo de elementos finitos e para verificação da influência de parâmetros para alcançar resultados mais precisos, o efeito da variação do tipo de elemento utilizado para a armadura inferior (barra e sólido), ângulo de dilatação e parâmetro de viscosidade foram analisados. Este processo de calibração foi feito com base nos resultados da viga V1\_S e o modelo calibrado foi então utilizado para conduzir a análise numérica das vigas armadas com barras de GFRP.

A influência do parâmetro de viscosidade na curva força  $\times$  deslocamento das vigas está apresentada na Figura 8. O valor do parâmetro de viscosidade é influenciado pelo tamanho do incremento temporal. Segundo Raza et al. (2019) para se alcançar melhores resultados, devem ser usados pequenos valores do parâmetro de viscosidade em comparação com o pseudotempo da análise de elementos finitos e este deve ser considerado perto de 15% da etapa de incremento de tempo para obter os resultados melhorados (RAZA; KHAN; AHMAD, 2019). A etapa de incremento de tempo foi mantida automática, e a etapa inicial e

os tamanhos máximos de incremento foram mantidos como 0,01 durante a análise. Conforme observado na Figura 8 a melhor aproximação dos resultados da simulação numérica com os resultados experimentais foi alcançada usando um valor para o parâmetro de viscosidade de 0,0001 para a viga com a armadura inferior modelada com elementos de barra e 0,001 para a viga com a armadura inferior modelada com elementos sólidos, mantendo o ângulo de dilatação de 35°. Vale destacar que uma viscosidade de 0,0001 e 0,0005 não convergiu para o modelo com as barras modeladas como elementos sólidos, e por isso não foi apresentada no estudo.

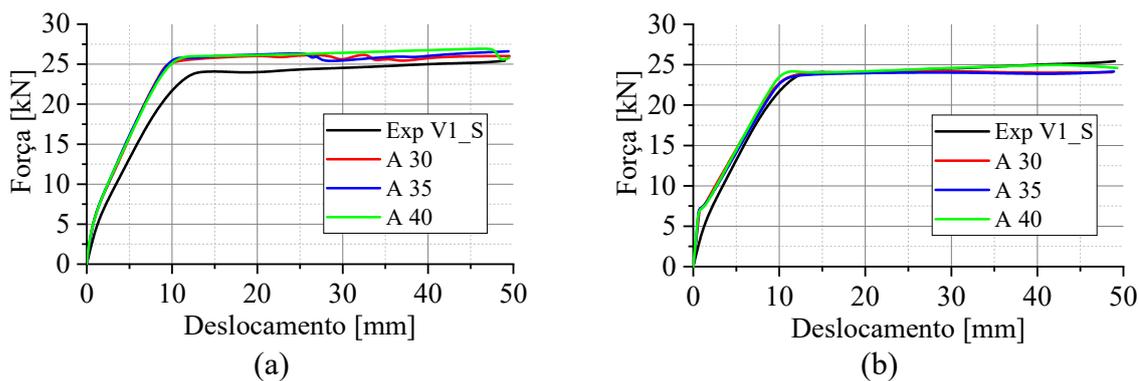
Figura 8 - Comparação entre resultados experimental e numéricos para as vigas armadas com barras de aço com variação do parâmetro de viscosidade: armadura inferior modelada como elementos de barra (a) e como elementos sólidos (b).



Fonte: Autor, 2021.

O ângulo de dilatação é um parâmetro material e físico do concreto, sendo interpretado com o ângulo interno de atrito. Foi realizado uma análise para verificar a sensibilidade do modelo e verificar a influência deste parâmetro na curva força  $\times$  deslocamento. Na literatura há indicações de que o ângulo de dilatação varia entre 31 e 42° (RAZA; KHAN; AHMAD, 2019). Neste estudo foram analisados ângulos de dilatação de 30°, 35° e 40° (com o parâmetro de viscosidade igual a 0,0001 para as vigas com armadura inferior modeladas como elementos de barras e 0,001 para as vigas com armadura inferior modeladas como elementos sólidos). Os resultados obtidos estão apresentados na Figura 9, sendo possível observar que a influência da variação deste parâmetro foi pequena nos dois modelos.

Figura 9 - Comparação entre resultados experimental e numéricos para as vigas armadas com barras de aço com variação do ângulo de dilatação: armadura inferior modelada como elementos de barra (a) e como elementos sólidos (b).



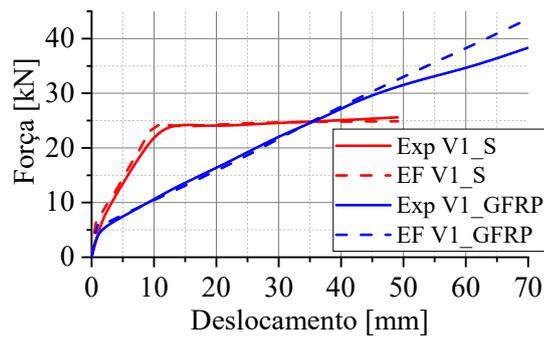
Fonte: Autor, 2021.

A partir da análise dos resultados apresentados na Figura 8 e Figura 9 é possível verificar que a viga de concreto armada com barras de aço, com armadura inferior modelada com elementos sólidos, com o parâmetro de viscosidade igual a 0,001 e ângulo de dilatação igual a 40° é o modelo que tem uma melhor aproximação com os resultados experimentais. Este modelo foi adotado para a simulação da viga V1\_G, sendo esta viga de concreto armada com barras de GFRP.

### 3.3 Comparações entre resultados experimentais e numéricos

A simulação das barras de aço como elementos sólidos levou a melhores resultados em comparação com as simulações nas quais as barras foram tratadas como elementos de barra, portanto, somente o primeiro será comparado com os resultados experimentais. Na Figura 10 estão apresentados os resultados da curva força × deslocamento das vigas de concreto armadas com barras de aço e com barras de GFRP, em comparação com os resultados obtidos experimentalmente por Mazzú (2020), após a calibração dos parâmetros do CDP. É possível verificar que os resultados experimentais de força × deslocamento foram precisamente traçados pelo modelo numérico em elementos finitos para ambas as vigas.

Figura 10 - Comparação entre os resultados experimentais e numéricos para as vigas armadas com barras metálicas e barras de GFRP.



Fonte: Autor, 2021.

Na Tabela 4 estão apresentados os resultados experimentais e numéricos para a primeira fissura, escoamento do aço, esmagamento do concreto e deslocamento máximo para a viga armada com barras metálicas e barras de GFRP. É possível observar, para a viga de concreto armado com barras de aço, diferenças de 2,8%, 9,1%, 0,8% e 2,0% entre os resultados experimentais e numéricos para as forças de primeira fissura, escoamento do aço, esmagamento do concreto e deslocamento máximo foram obtidos, respectivamente. Para a viga de concreto armada com barras de GFRP foram observadas diferenças de 41,7%, 6,2% e 14,7% entre os resultados experimentais e numéricos para as forças de primeira fissura, esmagamento do concreto e deslocamento máximo, respectivamente.

Tabela 4 - Comparação entre resultados experimentais e numéricos.

Vigas	F1	$\delta_1$	F2	$\delta_2$	F3	$\delta_3$	F4	$\delta_4$
EXP V1_S	7,1	1,9	23,0	10,9	24,0	19,6	25,4	49,2
MEF V1_S	7,3	1,2	20,9	8,2	24,2	11,5	24,7	49,4
EXP V1_G	4,8	1,1	-	-	27,3	40,2	38,1	70,1
MEF V1_G	6,8	0,9	-	-	29,0	42,7	43,7	70,6

F – força em kN

$\delta$  – deslocamento vertical a meio vão em mm

1 – Primeira fissura

2 – Escoamento da armadura

3 – Esmagamento do concreto

4 – Força máxima

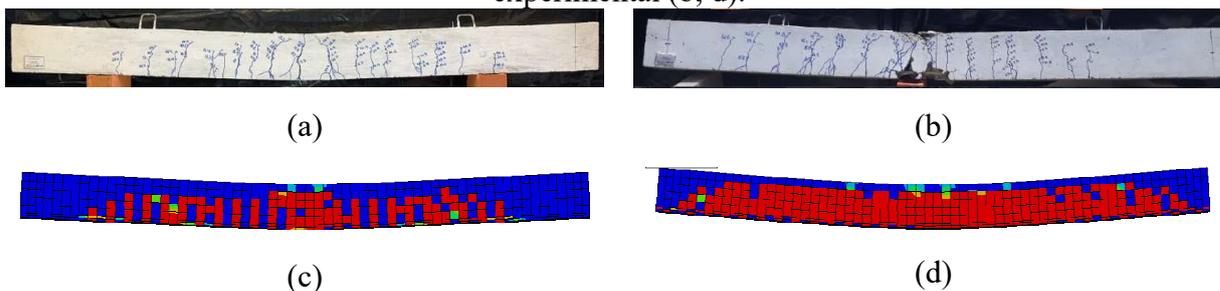
Fonte: Autor, 2021.

Assim, é possível concluir que o modelo numérico foi capaz de prever o comportamento das vigas armadas com barras de aço e com barras de GFRP. O modelo numérico forneceu uma melhor aproximação para vigas de concreto armado com barras de aço do que para a viga de concreto armada com barras de GFRP.

A Figura 11 apresenta uma comparação entre as aberturas de fissuras obtidas nos ensaios experimentais e nos modelos numéricos. As imagens dos modelos numéricos foram

geradas no ABAQUS para o dano à tração (DAMAGET). Analisando as imagens é possível notar uma aproximação significativa entre os padrões de fissuração para a viga de concreto armada com barras de aço. Para a viga de concreto armada com barras de GFRP não ficou claro na imagem o padrão de fissuração do modelo numérico.

Figura 11 - Comparação entre abertura de fissuras para viga V1\_S (a, c) e para viga V1\_G experimental (b, d).



Fonte: Autor, 2021.

#### 4. CONCLUSÕES

Este trabalho realizou uma análise numérica em vigas de concreto armadas com barras de aço e com barras de GFRP e a partir dos resultados foi possível concluir que:

- i. A escolha dos elementos para simular as barras de armadura de flexão (armadura inferior) tem influência nos resultados, sendo que o modelo que utilizou elementos sólidos (C3D8) obteve resultados mais próximos do resultado experimental;
- ii. Verificou-se que o parâmetro de viscosidade tem grande influência nos resultados da simulação numérica, enquanto que o ângulo de dilatação não tem influência significativa. Para o parâmetro de viscosidade e ângulo de dilatação, os valores ideais foram de 0,001 e 40°, respectivamente; e
- iii. Após a calibração dos parâmetros do CDP, o modelo resultou em boa aproximação dos resultados numéricos em comparação aos resultados experimentais, tanto para viga armada com barras de aço quanto para a viga armada com barras de GFRP. Observou-se diferenças de 2% da força relativa ao deslocamento máximo para as vigas armadas com barras de aço e 14,7% para as vigas armadas com barras de GFRP.

#### AGRADECIMENTOS

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

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

ELCHALAKANI, M. et al. Experiments and Finite Element Analysis of GFRP Reinforced Geopolymer Concrete Rectangular Columns Subjected to Concentric and Eccentric Axial Loading. **Structures**, v. 14, n. April, p. 273–289, 2018.

GUO, Z. **Principles of reinforced concrete**. Oxford: Elsevier 2014.

MARKOU, G.; ALHAMAYDEH, M. 3D Finite Element Modeling of GFRP-Reinforced Concrete Deep Beams without Shear Reinforcement. **International Journal of Computational Methods**, v. 15, n. 2, p. 1–35, 2018.

MAZZÚ, A. D. E. **Estudo sobre a substituição de armadura metálica por barras de GFRP em vigas de concreto armadas à flexão quando submetidas ao ataque acelerado de ions cloreto**. 2020. 190p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2020.

METWALLY, I. M. Three-dimensional nonlinear finite element analysis of concrete deep beam reinforced with GFRP bars. **HBRC Journal**, v. 13, n. 1, p. 25–38, 2017.

MICALI, R. M. **Análise teórica de vigas pré-moldadas de concreto com armadura de aço e de polímero reforçado com fibra de vidro em meio altamente agressivo**. 2010. 134p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2010.

MOHAMMED, R. S.; FANGYUAN, Z. Numerical Investigation of the Behavior of Reinforced Concrete Beam Reinforced with FRP Bars. **Civil Engineering Journal**, v. 5, n. 11, p. 2296–2308, 2019.

MUSTAFA, S. A. A.; HASSAN, H. A. Behavior of concrete beams reinforced with hybrid steel and FRP composites. **HBRC Journal**, v. 14, n. 3, p. 300–308, 2018.

RAZA, A.; KHAN, Q. U. Z.; AHMAD, A. Numerical investigation of load-carrying capacity of GFRP-reinforced rectangular concrete members using CDP model in abaqus. **Advances in Civil Engineering**, v. 2019, 2019.

RIBEIRO, S. E. C. **Análise da confiabilidade de vigas de concreto armado com plástico reforçado por fibras**. 2009. 139 f. Tese (Doutorado), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte – MG, 2009.

RIBEIRO, S. E. C.; DINIZ, S. M. C. Reliability-based design recommendations for FRP-reinforced concrete beams. **Engineering Structures**, v. 52, p. 273–283, 2013.

STONER, J. G. **Finite element modelling of GFRP reinforced concrete beams**. 2015.

216p.Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade de Waterloo, Ontario, 2015.

XINGYU, G.; YIQING, D.; JIWANG, J. Flexural behavior investigation of steel-GFRP hybrid-reinforced concrete beams based on experimental and numerical methods. **Engineering Structures**, v. 206, n. January, p. 110117, 2020.