INVESTIGAÇÃO NUMÉRICA DA RESISTÊNCIA DE ELEMENTOS FLETIDOS DE CONCRETO REFORÇADOS COM CONCRETO DE ULTRA ALTO DESEMPENHO

Raul Pedrazzani Mostachio (PIBIC/CNPq/FA/UEM), Romel Dias Vanderlei (Orientador). E-mail: rdvanderlei@uem.br.

Universidade Estadual de Maringá, Centro de Tecnologia, Maringá, PR.

Engenharia Civil, Estruturas / Estruturas de Concreto

Palavras-chave: UHPFRC; Reforços estruturais; Método dos Elementos Finitos.

RESUMO

O concreto de ultra alto desempenho reforçado com fibras (UHPFRC) apresenta elevada resistência mecânica, capacidade de transferência de tensões após a fissuração e durabilidade, características que favorecem sua utilização no reforço de elementos estruturais de concreto. A modelagem numérica pelo Método dos Elementos Finitos constitui uma ferramenta complementar à investigação experimental, permitindo avaliar o comportamento estrutural e diferentes configurações de reforço. Neste contexto, esta pesquisa teve como objetivo desenvolver modelos numéricos tridimensionais, no software Abaqus, para simular o comportamento à flexão de elementos prismáticos de concreto reforçados com camadas de UHPFRC, tomando como referência os resultados experimentais obtidos por Silva Junior (2023). Foram analisados substratos de concreto C40 e C70, sem reforço e reforçados com camadas de UHPFRC de 20 mm e 30 mm de espessura. O comportamento não linear dos materiais foi representado pelo modelo *Concrete Damaged Plasticity* (CDP). Os resultados numéricos foram comparados aos valores experimentais de força máxima, sendo obtidas diferenças, em valor absoluto, entre 2,4% e 53,9%. As menores diferenças ocorreram nos elementos reforçados com camada de 30 mm, enquanto a maior divergência foi observada para o concreto C70 reforçado com camada de 20 mm. De maneira geral, os modelos reproduziram a tendência de aumento da capacidade resistente proporcionada pelo reforço, embora os resultados indiquem a necessidade de aprimoramento da representação constitutiva dos materiais e da interface entre substrato e UHPFRC.

INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de materiais avançados tem impulsionado a utilização de ferramentas computacionais na Engenharia Civil. Nessa perspectiva, destaca-se o estudo do Concreto de Ultra Alto Desempenho Reforçado com Fibras (UHPFRC) com alta resistência à compressão e durabilidade, com uma das possibilidades de uso sendo reforço estrutural. A análise numérica pelo Método dos Elementos Finitos, utilizando o software Abaqus, constitui uma ferramenta complementar à investigação

experimental, permitindo avaliar o comportamento dos elementos estruturais e analisar variáveis de difícil mensuração experimental. Nesse contexto, o presente trabalho propõe a utilização de modelos numéricos computacionais como ferramenta de apoio ao estudo do comportamento mecânico de elementos de concreto reforçados com UHPFRC e submetidos à flexão.

MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa teve início na coleta e análise dos resultados dos ensaios experimentais apresentados por SILVA JUNIOR (2023), que avaliou o comportamento do UHPFRC como material de reforço em estruturas de concreto sob esforços de flexão, a partir da análise experimental de prismas com substratos de concreto de diferentes resistências, e reforço de UHPFRC com espessuras de 20mm e 30mm, sendo os valores das forças máximas experimentais utilizados posteriormente na comparação com os resultados numéricos.
Para simulação numérica adotou-se os modelos experimentais de SILVA JUNIOR (2023), que consistem em prismas de concreto (100 mm x 100 mm x 380 mm) com resistências C40 e C70, e reforço com UHPFRC de espessuras de 20mm e 30mm.
A simulação foi conduzida no software de elementos finitos Abaqus/CAE. Adotou-se o modelo constitutivo *Concrete Damaged Plasticity* (CDP) para representar o comportamento não linear dos substratos de concreto e do reforço em UHPFRC, considerando tanto a fissuração por tração quanto o esmagamento por compressão.
O corpo de prova consistiu em uma viga tridimensional discretizada em elementos sólidos continuum de 8 nós com integração reduzida (C3D8R).
Os parâmetros de entrada do CDP para os materiais C40, C70 e UHPFRC estão presentes na Tabela 1.

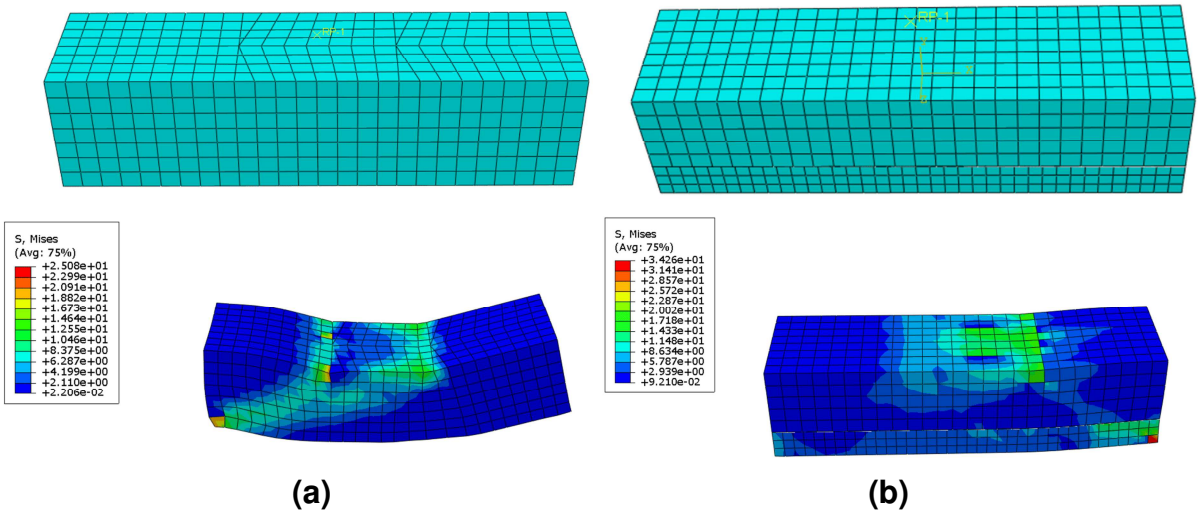
Tabela 1 – Parâmetros do modelo CDP utilizados para representar os substratos de C40 e C70, além da camada de reforço de UHPFRC

Parâmetro	Valor	Descrição
ψ (°)	36	Ângulo de dilatação
ϵ	0,1	Excentricidade
$\frac{\sigma_{b0}}{\sigma_{c0}}$	1,16	Relação entre as tensões de escoamento iniciais de compressão biaxial e uniaxial
K_c	0,6667	Relação entre o segundo invariante de tensão no meridiano de tração e no meridiano de compressão
μ	0,000001	Parâmetro de viscosidade

Fonte: Adaptado de TOLENTINO (2021).

As condições de contorno reproduziram os apoios do ensaio e a aplicação progressiva de deslocamento vertical no topo da viga. As relações constitutivas dos concretos C40 e C70 e do UHPFRC foram definidas no modelo CDP a partir das propriedades mecânicas dos materiais e de parâmetros disponíveis na literatura. A

interface entre o substrato de concreto e a camada de UHPFRC foi representada pela restrição *Tie*, admitindo-se aderência perfeita, sem escorregamento ou separação entre os materiais. A Figura 1(a) apresenta a simulação numérica da viga sem e a Figura 1(b) com reforço.



(a) **(b)**

Figura 1 – Modelos numéricos e campos de tensão obtidos no Abaqus/CAE para os elementos: (a) sem reforço e (b) reforçado com UHPFRC.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As simulações numéricas permitiram determinar a evolução da reação vertical no ponto de referência e, a partir dela, identificar a força máxima alcançada em cada configuração analisada. Para avaliar a capacidade do modelo em representar a resposta dos elementos ensaiados, as forças máximas numéricas foram comparadas aos resultados experimentais de SILVA JUNIOR (2023).
Comparando os valores de força máxima obtidos numericamente com os resultados experimentais, observou-se que três das quatro configurações reforçadas apresentaram diferenças absolutas inferiores a 10%, mas uma delas apresentou erro significativamente superior, conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 – Forças máximas obtidas nos modelos numéricos e experimentais

Grupo	Força Numérica (kN)	Força Experimental (kN)	Diferença (%)
C40 sem reforço	12,42	9,94	+24,9
C70 sem reforço	16,89	14,70	+14,9
C40 + reforço 30mm	35,48	34,65	+2,4
C70 + reforço 30mm	30,98	32,34	–4,2
C40 + reforço 20mm	29,98	28,00	+7,1
C70 + reforço 20mm	27,24	17,70	+53,9

Fonte dos resultados experimentais: SILVA JUNIOR (2023)

O grupo C40 + reforço 30mm apresentou a melhor aderência ao ensaio experimental (erro de 2,4%), seguido pelo C70 + reforço 30mm e C40 + reforço 20mm, que apresentaram diferenças de 4,2% e 7,1%, respectivamente.
Nas configurações sem reforço, o modelo numérico superestimou a força máxima experimental em 24,9% para o C40 e 14,9% para o C70. Essas diferenças evidenciam limitações da representação constitutiva adotada e indicam a necessidade de aprimoramento da calibração do modelo para a representação do concreto sem reforço.
Para a configuração C70 com reforço de 20 mm, foi observada diferença de 53,9%, significativamente superior às verificadas nas demais configurações reforçadas. A origem dessa discrepância não pôde ser determinada a partir dos resultados disponíveis, podendo estar relacionada às simplificações da representação constitutiva dos materiais, à discretização da malha, à hipótese de aderência perfeita adotada para a interface e às próprias variabilidades inerentes aos resultados experimentais. Esse resultado evidencia a necessidade de estudos adicionais antes da utilização do modelo em análises paramétricas.

CONCLUSÕES

Os resultados mostraram que os modelos numéricos apresentaram boa aproximação das forças máximas experimentais em determinadas configurações, especialmente para os elementos reforçados com camadas de 30 mm de UHPFRC. Entretanto, as diferenças observadas nos elementos sem reforço e, principalmente, no C70 reforçado com camada de 20 mm evidenciam limitações do modelo. Dessa forma, os modelos desenvolvidos constituem uma abordagem inicial para a representação numérica de elementos de concreto reforçados com UHPFRC, sendo necessários aprimoramentos na calibração das relações constitutivas e na representação da interface antes de sua aplicação em estudos paramétricos mais abrangentes.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos a bolsa de iniciação científica concedida pela CNPq para o primeiro autor.

REFERÊNCIAS

SILVA JUNIOR, A. M. **Análise experimental de elementos fletidos de Concreto reforçados com concreto de ultra alto desempenho com fibras.** 2023. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2023.

TOLENTINO, L. D. **Investigação numérica da resistência à compressão do núcleo de concreto e da espessura da camada de reforço na capacidade resistente de pilares encamisados com concreto de ultra alto desempenho.** 2021. Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2021.