

Influence of temperature on the mechanical behavior of a reinforced concrete beam

Influência da temperatura no comportamento mecânico de uma viga de concreto armado

Article Info:

Article history: Received 2023-01-03 / Accepted 2023-01-12 / Available online 2023-01-12

doi: 10.18540/jcecv19iss1pp15215-01a



Lahis Souza de Assis

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8701-1620>

Universidade Federal de Juiz de Fora, Brasil

E-mail: lahis.assis@engenharia.ufjf.br

Flávia de Souza Bastos

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9753-8996>

Universidade Federal de Juiz de Fora, Brasil

E-mail: flavia.bastos@ufjf.br

Michèle Cristina Resende Farage

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5344-0937>

Universidade Federal de Juiz de Fora, Brasil

E-mail: michele.farage@ufjf.br

Giovanna Tavares de Barros

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7118-7103>

Universidade Federal de Juiz de Fora, Brasil

E-mail: giovanna.barros@engenharia.ufjf.br

Resumo

O concreto é um material compósito amplamente utilizado na indústria da construção civil. Aliado à armadura de aço, apresenta características mecânicas favoráveis ao emprego nos mais diversos elementos estruturais tais como fundações, vigas, lajes, pilares e barragens, por exemplo. Apesar de sua ampla utilização, a resposta do material diante de situações extremas - como sob temperaturas elevadas - é bastante complexa uma vez que, nestes casos, ocorrem alterações microestruturais que impactam em suas propriedades macroscópicas. Neste contexto, o emprego de ferramentas computacionais que permitam a simulação de diferentes estruturas e situações de carregamento é uma estratégia interessante para a verificação do desempenho do material em cada cenário. Sendo assim, este trabalho pretende simular o comportamento mecânico do concreto considerando situações de solicitação usual bem como situações de solicitação térmica, com o objetivo de avaliar o impacto desta última sobre o material. Para isso, scripts Python são utilizados para a geração da geometria, um software de elementos finitos é empregado no pré e no pós-processamento e uma subrotina de usuário, desenvolvida em Fortran e que descreve o modelo de dano de Mazars, é utilizada em conjunto com o referido software na fase de processamento.

Palavras-chave: Concreto Armado. Temperaturas Elevadas. Dano. Modelagem Computacional.

Abstract

Concrete is a composite material widely used in the construction industry. Allied to steel reinforcement, it has mechanical characteristics favorable to use in the most diverse structural elements such as foundations, beams, slabs, columns and dams, for example. Despite its wide use, the material response to extreme situations - such as high temperatures - is quite complex since, in these cases, microstructural changes occur that impact its macroscopic properties. In this context,

the use of computational tools that allow the simulation of different structures and loading situations is an interesting strategy for verifying the performance of the material in each scenario. Therefore, this work intends to simulate the mechanical behavior of concrete considering situations of usual stress as well as situations of thermal stress, with the objective of evaluating the impact of the latter on the material. For this, Python scripts are used to generate the geometry, finite element software is used in pre- and post-processing and a user subroutine, developed in Fortran and which describes the Mazars damage model, is used together with said software in the processing phase.

Keywords: Reinforced Concrete. High Temperatures. Damage. Computational Modeling.

1. Introdução

A indústria da construção civil é uma das mais importantes para a economia brasileira, sendo uma forte fonte empregadora e contribuindo diretamente com o Produto Interno Bruto (PIB) do país (G1, 2017). Portanto, o setor está intimamente ligado ao 8º Objetivo de Desenvolvimento Sustentável (ODS) proposto pela Organização das Nações Unidas (ONU, 2022) no que tange à promoção de trabalho digno para todos, uma vez que oferece oportunidades de emprego formal para vários cidadãos.

Sendo o concreto - mistura heterogênea composta basicamente por cimento, agregados miúdo e graúdo e água - um dos materiais construtivos mais utilizados pelo homem (Monteiro et al., 2017), o desenvolvimento de novas tecnologias que proporcionem um melhor desempenho deste material afeta positivamente o avanço deste setor. Portanto, o uso de modelos computacionais que permitam analisar a resposta do material frente a diferentes solicitações - como carregamentos térmicos - podem corroborar com esta questão, estando inclusive alinhado ao 9º ODS (ONU, 2022) que nos fala sobre o fortalecimento da pesquisa científica nos setores industriais. Neste contexto se insere a importância deste estudo.

A exposição a altas temperaturas pode ocorrer de forma acidental - como no caso de incêndios - ou ser o ambiente comum de trabalho da estrutura - como em usinas nucleares, altos-fornos e repositórios de rejeitos radioativos. Diversos trabalhos, com viés experimental e computacional, têm sido desenvolvidos com o objetivo de estudar o concreto nestas situações.

Dentre os estudos com abordagem experimental, Morales et al. (2011) estudaram corpos de prova cilíndricos de argamassa submetidos à elevação de temperatura, determinaram sua resistência residual após o resfriamento e concluíram que em todas as temperaturas analisadas houve diminuição da resistência. Ehrenbring et al. (2017) realizaram a inspeção de uma laje alveolar de um prédio industrial que foi exposto a altas temperaturas devido ao fogo no subsolo do mesmo, estimando a perda de resistência do elemento estrutural e atestando a segurança da estrutura após o acidente. Teixeira (2018) avaliou a interferência da resistência inicial, do nível de temperatura atingido e do tipo de resfriamento na resistência e no módulo de elasticidade do concreto pós-incêndio e concluiu que quanto menor a resistência inicial maior é a perda de rigidez e, além disso, que resfriamentos bruscos resultam em maior redução nas propriedades mecânicas residuais. Oliveira et al. (2019) avaliaram o avanço da frente de carbonatação - característica diretamente relacionada à durabilidade do sistema estrutural - no concreto danificado pelo fogo e verificaram a influência do tipo de resfriamento neste fenômeno. Daware et al. (2022) apresentaram os resultados de ensaios experimentais realizados em blocos de alvenaria de concreto para investigar a degradação induzida pelo fogo.

Com relação aos estudos computacionais, Filho (2018) realizou uma análise do efeito de altas temperaturas em lajes de concreto armado e validou os resultados através de dados experimentais disponíveis na literatura. Padre et al. (2019) desenvolveram um algoritmo para a verificação da resistência de seções de concreto armado à flexão composta oblíqua em temperatura ambiente e em incêndio. Ferreira (2019) desenvolveu um modelo para a simulação de pilares de concreto armado em situação de incêndio, baseado no Método dos Elementos Finitos (MEF), com o objetivo de verificar o comportamento estrutural. Han et al. (2020) realizaram um estudo numérico sobre o desempenho de colunas de concreto armado pós-incêndio e concluíram que uma série de fatores, tais como duração da exposição ao fogo, área da seção transversal, esbeltez e resistência do concreto

afetam significativamente a resistência residual pós-incêndio. Dias et al. (2020) estudaram o concreto submetido a temperaturas elevadas e concluíram que nessa situação o material sofre significativa deterioração, como a redução no módulo de elasticidade e resistência à compressão, deslocamento superficial e perda de durabilidade. Ni e Gernay (2021) apresentaram uma visão geral sobre a modelagem computacional de estruturas de concreto armado em situações de incêndio e abordaram as dificuldades, necessidades e oportunidades de pesquisa nesta área do conhecimento. Assis et al. (2022) desenvolveram um modelo termomecânico para avaliação do dano mecânico no concreto sob temperaturas elevadas, utilizando a teoria de Mazars (1984) e empregando dados experimentais para a validação. Balsa et al. (2022) apresentaram um modelo computacional baseado em elementos finitos para avaliar o comportamento térmico de lajes mistas submetidas ao fogo e validaram os resultados com dados experimentais. Andrushia et al. (2022) desenvolveram uma estrutura para detecção autônoma de danos estruturais baseada em *deep learning* para estruturas de concreto em condições de incêndio.

Neste contexto, este trabalho apresenta um modelo computacional, baseado no Método dos Elementos Finitos, para análise da influência da temperatura no comportamento mecânico de uma viga de concreto armado.

2. Metodologia

Neste trabalho, desenvolveu-se um modelo computacional para verificar o comportamento mecânico de uma seção de uma viga de concreto armado, quando exposta a temperaturas elevadas. Inicialmente criou-se um modelo térmico bidimensional trifásico - argamassa, agregados e aço - com o objetivo de encontrar o campo de temperaturas quando determinado carregamento térmico era aplicado.

Paralelamente, desenvolveu-se um modelo mecânico linear elástico tridimensional bifásico - concreto e aço - no qual uma viga de concreto armado foi representada com sua solicitação mecânica típica e a deformação na seção de momento fletor máximo foi obtida. Com este dado, um modelo mecânico linear elástico bidimensional trifásico - argamassa, agregado e aço - foi criado com o objetivo de encontrar um carregamento mecânico equivalente que gerasse a mesma deformação verificada na seção de momento fletor máximo do modelo anterior.

De posse destas informações, criou-se um modelo termomecânico linear elástico bidimensional trifásico - argamassa, agregados e aço - com dano. Como carregamento, considerou-se o campo de temperaturas e o carregamento mecânico equivalente obtidos previamente. Com esse modelo, foi possível avaliar de que forma a temperatura afeta o comportamento mecânico do concreto.

Todos os modelos foram desenvolvidos utilizando o *software* de elementos finitos Abaqus. A seguir apresentam-se as equações relevantes para este estudo bem como a metodologia empregada, de forma detalhada.

2.1 Formulação Matemática

Em relação à análise térmica, neste estudo considerou-se apenas a transferência de calor por condução. Dessa forma, com a resolução da Equação 1 foi possível encontrar o campo de temperaturas atuante, a partir de um campo de temperaturas inicial e de condições de contorno adequadas:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot (\kappa \nabla T) = 0, \quad (1)$$

onde ρ é a densidade, c é o calor específico, T é a temperatura, t é o tempo e κ é a condutividade térmica.

Com o campo de temperaturas obtido, o mesmo foi utilizado como carregamento térmico para a resolução de um problema mecânico, sendo a relação entre a temperatura e a deformação ε_T obtida a partir da Equação 2:

$$\varepsilon_T = \alpha(T - T_0)I, \quad (2)$$

onde α é o coeficiente de expansão térmica, T_0 é a temperatura inicial e I é a matriz identidade.

Para a resolução do problema mecânico, solucionou-se a Equação 3 conhecida como equação de equilíbrio de Cauchy, com as condições de contorno adequadas:

$$B + \nabla \cdot \sigma = 0, \quad (3)$$

onde B são as forças de corpo e σ é o tensor de tensões.

Na análise mecânica linear elástica, adotou-se como modelo constitutivo a Lei de Hooke dada pela Equação 4:

$$\sigma = 2\mu\varepsilon + \lambda(\nabla \cdot u)I - (3\lambda + 2\mu)\varepsilon_T, \quad (4)$$

sendo u o deslocamento, ε a deformação e μ e λ os módulos elásticos denominados constantes de Lamé com

$$\mu = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (5)$$

e

$$\lambda = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad (6)$$

onde E é o módulo de Young e ν é o coeficiente de Poisson.

A atuação da variável dano d ocorre diretamente na redução do módulo de Young através da relação

$$E_d = (1 - d)E \quad (7)$$

com E_d sendo o módulo de Young danificado. Por sua vez, a variável dano é obtida a partir da combinação linear das parcelas de tração d_t e de compressão d_c , com os pesos α_t e α_c , conforme a Equação 8:

$$d = \alpha_c d_c + \alpha_t d_t. \quad (8)$$

Quanto às variáveis de dano por tração e por compressão, ambas são obtidas a partir da Equação 9:

$$d_{t,c} = 1 - \frac{\varepsilon_{d0} (1 - A_{t,c})}{\tilde{\varepsilon}} - \frac{A_{t,c}}{\exp(B_{t,c}(\varepsilon_{d0} - \tilde{\varepsilon}))}, \quad (9)$$

onde os subscritos t e c referem-se à tração e à compressão, respectivamente, ε_{d0} , $A_{t,c}$ e $B_{t,c}$ são parâmetros do modelo de Mazars (1984) e $\tilde{\varepsilon}$ é a deformação equivalente dada pela Equação 10:

$$\tilde{\varepsilon} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\varepsilon_{(i)+})^2}, \quad (10)$$

sendo $\varepsilon_{(i)+}$ as deformações principais positivas. O início do processo de danificação ocorre quando a deformação equivalente supera o parâmetro do modelo, ε_{d0} .

2.2 Modelo Térmico Bidimensional Trifásico

Inicialmente, um modelo térmico bidimensional trifásico - argamassa, agregados e aço - foi desenvolvido com o objetivo de determinar o campo de temperaturas na seção transversal da viga quando um carregamento térmico era aplicado. Considerou-se uma geometria retangular com 140mm de largura por 400mm de altura na qual - a partir da curva granulométrica e do percentual de agregados, neste caso, 40% - partículas circulares eram aleatoriamente distribuídas utilizando um algoritmo desenvolvido por Bonifácio (2017), em linguagem Python. Além disso, adotou-se armadura de aço CA-50, sendo duas barras com diâmetro 5mm e duas barras com diâmetro 10mm como armadura negativa e positiva, respectivamente, e cobertura de 2,5mm.

Buscando simular uma situação de incêndio em determinado cômodo onde a face interna da viga estaria em contato com o calor, uma temperatura de 803,15K foi aplicada na lateral direita da seção durante 60min. Além disso, considerou-se fluxo nulo nas demais arestas e uma temperatura inicial de 293,15K em todo o domínio. As propriedades térmicas adotadas bem como suas referências estão mostradas na Tabela 1.

Tabela 1 –Propriedades térmicas.

Material	κ (J/mmKmin)	α (1/K)	c (J/KgK)	ρ (Kg/mm)
Agregado	0,042 ^a	$(0,065T-15,02)10^{-6}$ ^b	800 ^a	$2,5 \cdot 10^{-6}$ ^c
Argamassa	0,069 ^a	$(0,021T-6)10^{-6}$ ^b	$1,39T+591,89$ ^b	$2,252 \cdot 10^{-6}$ ^c
Aço	3,3 ^a	$1,2 \cdot 10^{-5}$ ^d	400 ^a	$7,85 \cdot 10^{-6}$ ^d

^a NBR 15220-2 (2022), ^b Assis (2022), ^c Razafinjato (2015), ^d NBR 8800 (2008)

2.3 Modelo Mecânico Linear Elástico Tridimensional Bifásico

Um modelo mecânico linear elástico tridimensional bifásico - concreto e aço - foi desenvolvido com o objetivo de encontrar a deformação horizontal na seção de momento máximo quando a viga era submetida a um carregamento mecânico de serviço.

Considerou-se então uma viga biapoiada com a mesma seção transversal retangular descrita na Seção 2.2 e 3000mm de comprimento submetida a um carregamento distribuído de $1,61 \cdot 10^2$ N/mm², obtido segundo diretrizes da NBR 6118 (2014). A Tabela 2 mostra as propriedades mecânicas adotadas e as referências utilizadas. Por conveniência, apresenta-se também na Tabela 2 as propriedades mecânicas do agregado e da argamassa, que serão utilizadas posteriormente.

Tabela 2 –Propriedades mecânicas.

Material	E (MPa)	ν
Concreto	34000 ^c	0,2 ^e
Aço	200000 ^d	0,3 ^d
Agregado	39486 ^b	0,201 ^b
Argamassa	31000 ^c	0,129 ^d

^b Assis (2022), ^c Razafinjato (2015), ^d NBR 8800 (2008), ^e NBR 6118 (2014)

2.4 Modelo Mecânico Linear Elástico Bidimensional Trifásico

Obtida a deformação na seção de momento máximo da viga em análise, um modelo mecânico linear elástico bidimensional trifásico - agregados, argamassa e aço - foi desenvolvido com o objetivo de encontrar um carregamento mecânico equivalente que gerasse na seção a mesma deformada verificada no modelo tridimensional.

Considerou-se então a mesma geometria descrita na Seção 2.2, as propriedades mecânicas apresentadas na Tabela 2 e um carregamento horizontal bitriangular aplicado simetricamente nas arestas verticais da seção, tracionando as fibras superiores à linha neutra e comprimindo as inferiores. Quanto ao módulo do carregamento, este foi determinado empiricamente observando-se

a seção de momento máximo do modelo tridimensional e o valor encontrado foi 0,003N/mm. A aresta inferior da seção teve seu deslocamento vertical restringido.

2.5 Modelo Termomecânico Linear Elástico Bidimensional Trifásico com Dano

Obtidos o campo de temperaturas e o carregamento mecânico equivalente, um modelo termomecânico linear elástico bidimensional trifásico - agregados, argamassa e aço - com dano foi desenvolvido com o objetivo de verificar o comportamento mecânico da seção da viga considerada.

Para isso, considerou-se a mesma geometria descrita na Seção 2.2, as propriedades mecânicas apresentadas na Tabela 2 e o carregamento mecânico equivalente foi aplicado ao modelo com uma restrição de deslocamento vertical na aresta inferior. Quanto ao carregamento térmico, este foi introduzido utilizando-se uma estratégia de acoplamento fraco que permite realizar a análise termomecânica com um custo computacional relativamente baixo e um nível de refinamento da malha satisfatório. Isto porque a análise térmica foi feita preliminarmente - conforme apresentado na Seção 2.2 - e o resultado obtido foi aplicado ao modelo mecânico, que converte o campo de temperaturas em deformação a partir da Equação 2.

Nesta análise, optou-se por adotar para a argamassa o modelo de dano de Mazars (1984), o qual modifica o módulo de elasticidade do material a partir de critérios baseados nas deformações e nos parâmetros do modelo, como descrito na Seção 2.1. No entanto, este modelo não está disponível na biblioteca do *software* utilizado, sendo necessário a implementação de uma subrotina denominada UMAT - *user material*. Este algoritmo, desenvolvido na linguagem Fortran, permite ao usuário incorporar ao programa modelos constitutivos não disponíveis ou modificar aqueles já oferecidos. Assim, o Abaqus realiza o pré e o pós-processamento e, para a fase de processamento, trabalha em conjunto com o código implementado. A Figura 1 traz a representação esquemática da UMAT utilizada neste estudo. Quanto aos parâmetros do modelo, por razões que serão esclarecidas quando da apresentação dos resultados, adotaram-se os mesmos valores utilizados em Assis (2022): $A_t=0,669$, $B_t=254,111$ e $\varepsilon_{do}=3,44\cdot 10^{-4}$. Para os agregados e o aço considerou-se o comportamento linear elástico.

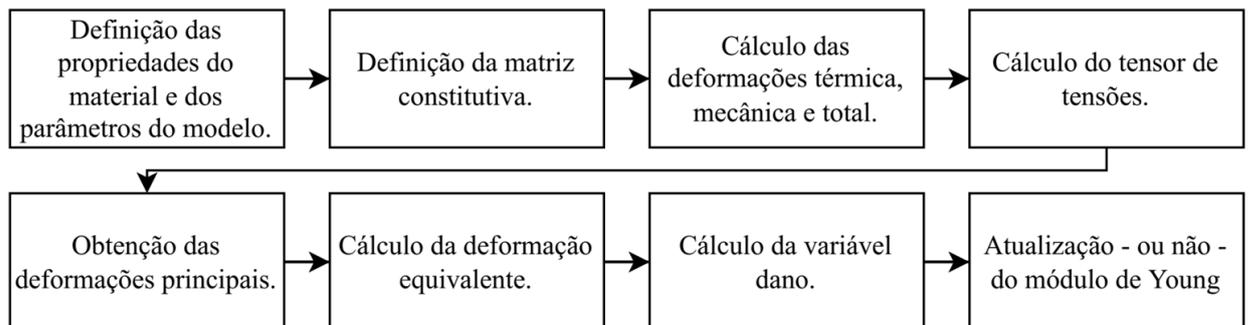


Figura 1 - UMAT implementada.

3. Resultados

A Figura 2 mostra o modelo térmico proposto e o campo de temperaturas obtido para a seção da viga considerada. Como esperado, há uma distribuição crescente na direção da face esquerda para a face direita, na qual a temperatura de 803,15K foi aplicada como condição de contorno de Dirichlet.

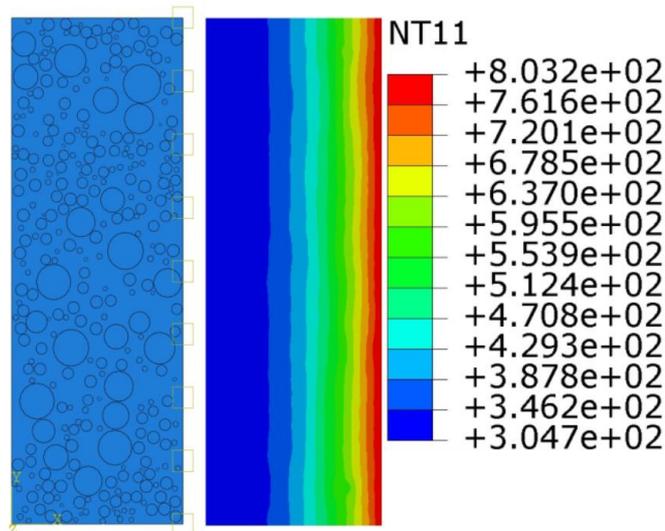


Figura 2 – Modelo térmico bidimensional trifásico e campo de temperaturas obtido.

A Figura 3 mostra o modelo termomecânico proposto no qual, além do carregamento horizontal bitriangular simétrico observado, foi também aplicada a solicitação térmica através da estratégia de acoplamento fraco. A Figura 3 traz ainda a distribuição do módulo de Young (SDV10) e da variável dano (SDV13) obtidas na seção transversal considerada. Com relação ao mapa de módulo de Young, por questões de visualização optou-se por excluir os agregados e o aço uma vez que, como para estes materiais adotou-se o comportamento linear elástico sem dano, o valor desta propriedade permanece constante durante a análise, assumindo os valores apresentados na Tabela 2.

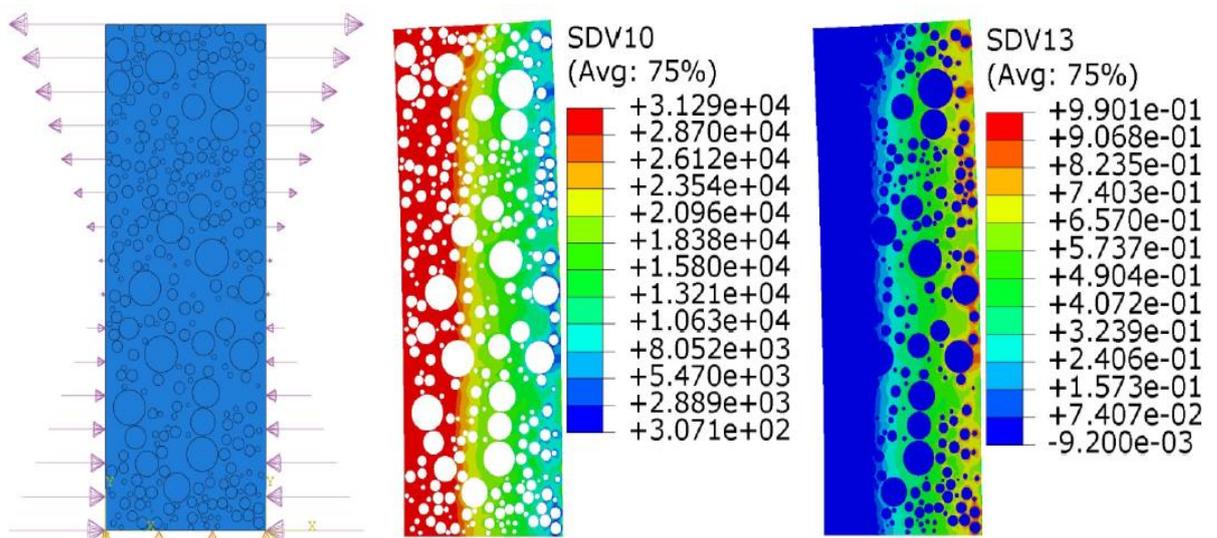


Figura 3 – Modelo termomecânico bidimensional trifásico, distribuição do módulo de Young (SDV10) e do dano (SDV13). Para o módulo de Young é apresentada apenas a matriz de argamassa para melhor visualização.

Conforme o esperado, nas regiões mais próximas à face lateral esquerda - na qual a condição de Dirichlet $T = 803,15K$ foi aplicada - houve uma maior danificação e, conseqüentemente, uma maior redução no módulo de Young. Além disso, percebe-se que o espalhamento do dano segue a mesma direção do campo de temperaturas mostrado na Figura 2, comprovando ser esta solicitação determinante na degradação da estrutura.

A Figura 3 nos mostra ainda uma tendência de concentração de maiores valores de dano no entorno dos agregados graúdos. Este fato é relevante uma vez que, nas adjacências destas partículas existe uma região, denominada zona de transição da interface, potencialmente favorável ao surgimento de fissuras por suas características físico-químicas particulares. Tal região não foi considerada no modelo proposto neste trabalho, mas os resultados observados apontam a necessidade de incluí-la em estudos posteriores.

A fim de verificar a influência da temperatura no comportamento mecânico da seção da viga considerada, realizou-se uma simulação considerando-se apenas o carregamento horizontal bitriangular simétrico mostrado na Figura 3. Neste caso, não houve ocorrência de dano em nenhum ponto da seção. Por este motivo, pode-se concluir que o dano foi gerado somente pela solicitação térmica e, uma vez que esta foi do tipo monotônica crescente, o nível de compressão observado foi baixo e, por isso, foram considerados somente os parâmetros do modelo relativos à tração.

As Figuras 4 e 5 mostram a distribuição da tensão de Von Mises e do deslocamento para os modelos sem e com a solicitação térmica. Como pode ser observado, a temperatura altera consideravelmente o módulo e a distribuição destas variáveis ao longo da seção, indicando a importância de estudos abordando esta temática bem como a necessidade de verificações cautelosas da segurança estrutural de edificações após a ocorrência de incêndios.

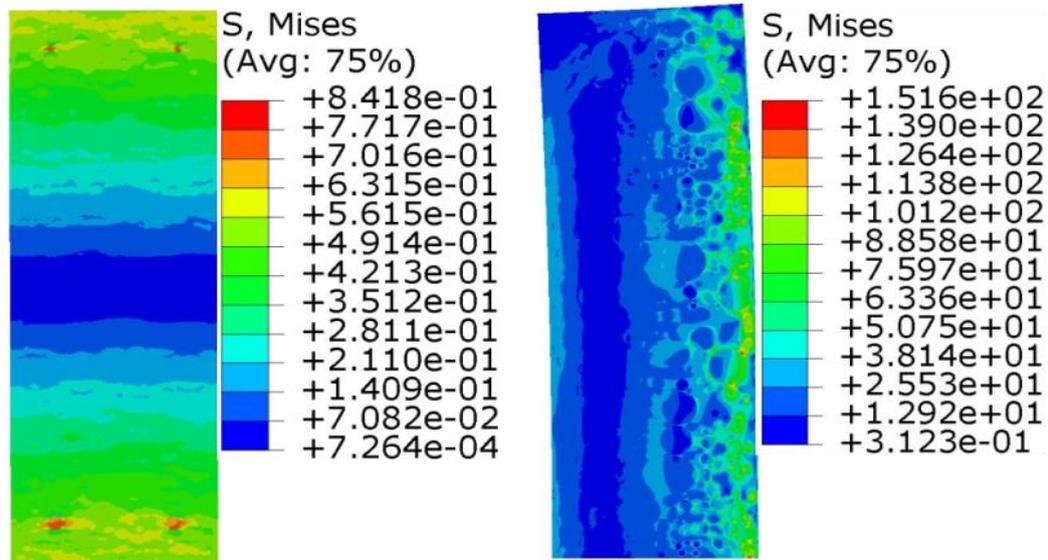


Figura 4 – Distribuição da tensão de Von Mises nos modelos sem e com solicitação térmica.

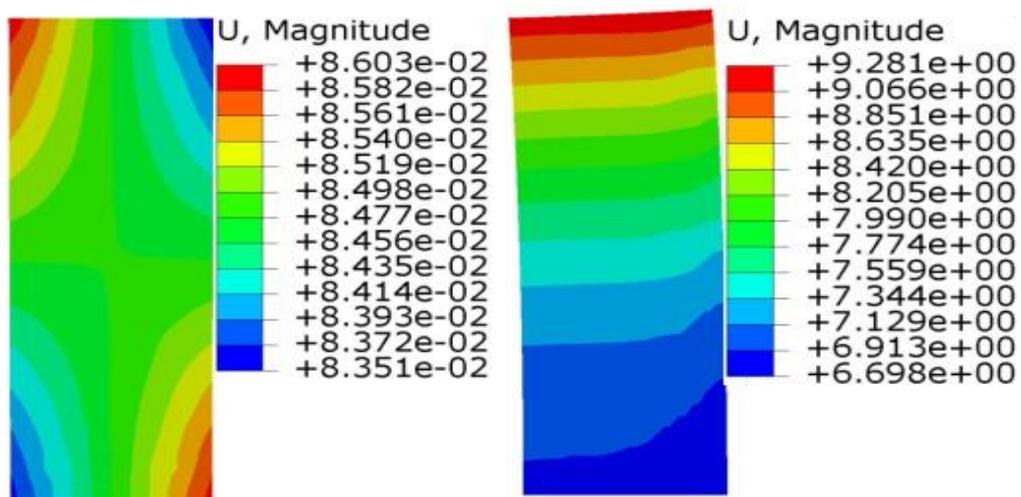


Figura 5 – Distribuição do deslocamento nos modelos sem e com solicitação térmica.

4. Conclusões

Este estudo apresenta uma análise da influência da temperatura no comportamento mecânico de uma seção de uma viga de concreto armado utilizando uma estratégia de acoplamento fraco, que permite a realização da análise com um custo computacional relativamente baixo. Os modelos desenvolvidos foram capazes de capturar a influência da solicitação térmica bem como de determinar a distribuição do dano na região considerada, sendo uma abordagem preliminar que pode ser utilizada para verificar a segurança estrutural de edificações após a ocorrência de incêndios, possibilitando intervenções corretivas eficientes. Além disso, neste estudo foi possível observar a concentração de maiores níveis de dano nas regiões adjacentes aos agregados graúdos, indicando a necessidade da consideração da zona de transição da interface para a obtenção de resultados mais realistas.

Agradecimentos

Às agências de financiamento - CAPES, FAPEMIG, e CNPq - e à Universidade Federal de Juiz de Fora.

Referências

- Andrushia, A. D., Anand, N., Neebha, T. M., Naser, M. Z., & Lubloy, E. (2022). Autonomous detection of concrete damage under fire conditions. *Automation in Construction*, 140, 104364. doi: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104364>
- Assis, L. S., Dal Sasso, M. F., Farage, M. C. R., Bastos, F. D. S., & Beaucour, A. L. (2021). Numerical analysis of mechanical damage on concrete under high temperatures. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, 15(1), 1-14. doi: <https://doi.org/10.1590/S1983-41952022000100011>
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2014). NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2008). NBR 8800: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2022). NBR 15220-2: Desempenho térmico de edificações - Parte 2 - Componentes e elementos construtivos das edificações - Resistência e transmitância térmica - Métodos de cálculo.
- Balsa, C., Silveira, M., Mange, V., & Piloto, P. A. (2022). Modeling the Thermal Effects on Structural Components of Composite Slabs under Fire Conditions. *Computation*, 10(6), 94. doi: <https://doi.org/10.3390/computation10060094>
- Bonifácio, A. L. (2017). *Estratégia computacional para avaliação de propriedades mecânicas de concreto de agregado leve*. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, MG, Brasil.
- Daware, A., Peerzada, A. B., Naser, M. Z., Rangaraju, P., & Butman, B. (2022). Examining the behavior of concrete masonry units under fire and post-fire conditions. *Fire and Materials*. doi: <https://doi.org/10.1002/fam.3085>
- Dias, A. R. D. O., Amancio, F. A., Rafael, M. F. D. C., & Cabral, A. E. B. (2020). Comportamento do concreto submetido a elevadas temperaturas. *Matéria (Rio de Janeiro)*, 25(2), 1-14. doi: <https://doi.org/10.1590/S1517-707620200002.1029>
- Ehrenbring, H. Z., Ortolan, V., Bolina, F., Pacheco, F., Gil, A. M., & Tutikian, B. F. (2017). Avaliação da resistência residual de lajes alveolares em concreto armado em uma edificação industrial após incêndio. *Matéria (Rio de Janeiro)*, 22(3), 1-10. doi: <https://doi.org/10.1590/S1517-707620170003.0208>
- Ferreira, M. W. (2019). *Estudo numérico dos efeitos estruturais da exposição de pilares em concreto armado a altas temperaturas*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil.
- Filho, H. A. S. (2018). *Estudo do comportamento de lajes de concreto armado em situação de incêndio*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE, Brasil.

- G1 (2017). Por que o Brasil precisa da construção civil para voltar a crescer. Acesso em 28 de Junho de 2022. <https://g1.globo.com/especial-publicitario/em-movimento/noticia/por-que-o-brasil-precisa-da-construcao-civil-para-voltar-a-crescer.ghtml>
- Han, L. H., Zhou, K., Tan, Q. H., & Song, T. Y. (2020). Performance of steel reinforced concrete columns after exposure to fire: Numerical analysis and application. *Engineering Structures*, 211, 110421. doi: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110421>
- Mazars, J. (1984). *Application de la mécanique de l'endommagement au comportement non linéaire et à la rupture du béton de structure*. Tese de Doutorado, Université Pierre et Marie Curie, Paris, França.
- Monteiro, P. J., Miller, S. A., & Horvath, A. (2017). Towards sustainable concrete. *Nature Materials*, 16(7), 698-699. doi: <https://doi.org/10.1038/nmat4930>
- Morales, G., Campos, A., & Faganello, A. P. (2011). A ação do fogo sobre os componentes do concreto. *Semina. Ciências Exatas e Tecnológicas*, 32(1), 47-55. doi: <https://doi.org/10.5433/1679-0375.2011v32n1p47>
- Ni, S., & Gernay, T. (2021). Considerations on computational modeling of concrete structures in fire. *Fire Safety Journal*, 120, 103065. doi: <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2020.103065>
- Oliveira, J. D. A., Ribeiro, J. C. L., Pedroti, L. G., Faria, C. S. D., Nalon, G. H., & Oliveira, A. L. D. (2019). Durability of concrete after fire through accelerated carbonation tests. *Materials Research*, 22, 1-7. doi: <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2019-0049>
- Organização das Nações Unidas (2022). Objetivos de Desenvolvimento Sustentável. Acesso em 28 de Junho de 2022. <https://brasil.un.org/pt-br>
- Padre, E. P. G., Ribeiro, J. C. L., Alvarenga, R. C. S. S., & Silva, R. C. (2019). Algoritmo computacional para verificação de seções de concreto armado em situação de incêndio. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, 12(04), 932-955. doi: <https://doi.org/10.1590/S1983-41952019000400012>
- Razafinjato, R. N. (2015). *Comportement des bétons à haute température: influence de la nature du granulats*. Tese de Doutorado, Université de Cergy-Pontoise, Paris, França.
- Teixeira, G. P. (2018). *Análise experimental da resistência e do módulo de elasticidade pós incêndio de concretos com agregados da região de Viçosa-MG*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, Brasil.