

Estudo numérico e térmico em prismas de alvenaria estrutural com blocos de concreto e cerâmico submetidos a elevadas temperaturas

Alana P. C. Quispe¹, Rogério C. A. de Lima¹, René Q. Rodríguez^{1,2}, Guilherme A. Weber¹

¹*Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria
alanacostaquispe@gmail.com, rogerio@ufsm.br, guilherme.weber@unemat.br*

²*Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Maria
rene.rodriguez@ufsm.br*

Av. Roraima 1000, 97105-900, Santa Maria, RS, Brazil

Resumo. Nos últimos anos, a difusão da alvenaria estrutural no Brasil acarretou na evolução de pesquisas relacionadas ao comportamento do sistema em situação de incêndio, com o intuito de compreender melhor o desempenho dos materiais e, conseqüentemente, do conjunto. Este trabalho tem como objetivo principal analisar, por meio de simulações numéricas, a influência da geometria dos blocos cerâmicos quando expostos a elevadas temperaturas. Foram analisados prismas de blocos cerâmicos com diferentes configurações de revestimento de argamassa e geometria e prismas de blocos de concreto com diferentes configurações de revestimento de argamassa. A representação do ar nas cavidades dos blocos foi realizada mediante uma interação fluido-estrutura. As propriedades termofísicas necessárias para calibração dos modelos foram obtidas na literatura e de normas técnicas. A análise foi feita utilizando o Método dos Elementos Finitos (MEF), por meio do *software* comercial ABAQUS. Neste artigo foram realizadas simulações puramente térmicas, avaliando o critério de isolamento térmico na face não exposta ao incêndio, definido pela ABNT NBR 5628:2001. Os resultados obtidos mostram a importância do uso de revestimento, assim como da escolha do material, no desempenho térmico em prismas expostos a altas temperaturas.

Palavras-chave: Alvenaria estrutural; altas temperaturas; incêndio; simulação numérica; isolamento térmico.

1 Introdução

A necessidade de conhecer o desempenho das estruturas quando expostas a elevadas temperaturas tem sido um propulsor para o desenvolvimento de diversas pesquisas e, também na criação ou melhorias de normativas técnicas relacionadas ao dimensionamento de estruturas em situação de incêndio. No Brasil, pesquisas relacionadas a alvenaria estrutural em situação de incêndio têm aumentado, um dos fatores é a necessidade de maior conhecimento sobre os materiais constituintes que compõem este sistema construtivo. De acordo com Leite et al. [1], ainda se conhece pouco sobre as propriedades térmicas e mecânicas dos principais componentes da alvenaria, como: blocos cerâmicos ou de concreto, argamassa de assentamento e revestimento. Uma opção para o aumento desses dados, seria o desenvolvimento de pesquisas mútuas entre laboratórios nacionais, os quais poderiam avaliar os blocos usuais no mercado brasileiro.

Para compreender o comportamento da alvenaria estrutural em situação de incêndio, é preciso analisar cada material constituinte, atuando de forma isolada e em conjunto (prismas/paredes), quando expostos a elevadas temperaturas. A realização de ensaios experimentais em laboratórios e a oportunidade de realizar pesquisas em estruturas/edificações que já sofreram um incêndio real, são de extrema importância para o desenvolvimento da pesquisa científica nacional. Outra forma de analisar o comportamento destas estruturas, é por meio de simulações numéricas. Nas últimas décadas, diversos estudos relacionados a estruturas em situação de incêndio têm sido apresentados por modelos numéricos, os quais permitem o confronto da teoria, baseada em conceitos e modelos matemáticos, com os ensaios experimentais, atuando de forma complementar entre teoria e prática [2].

Para Nguyen et al. [3], há diversos fatores que afetam o comportamento da alvenaria estrutural quando submetidas a altas temperaturas, como os diferentes tipos de geometrias dos blocos, as dimensões, os materiais constituintes, as propriedades térmicas, a distribuição dos vazados no bloco, entre outros. Todas essas variáveis podem dificultar a obtenção de resultados apenas por ensaios experimentais, principalmente em escala real. Os ensaios de

resistência ao fogo são custosos e possuem diversas limitações para a montagem do laboratório. Como opção de complementar os ensaios experimentais e superar algumas dessas limitações, os modelos numéricos têm sido uma opção bastante efetiva e precisa, quando calibrada de forma adequada por dados obtidos experimentalmente.

Nguyen e Meftah [4] analisaram o comportamento de paredes de alvenaria com blocos cerâmicos vazados, quando expostas ao fogo. Neste estudo, foi abordado a parte experimental, ensaiando quatro paredes de alvenaria, sendo duas estruturais (com 10 cm e 20 cm de espessura) e duas não estruturais (ambas com 20 cm de espessura), com dimensão de 3 m de largura e 3 m de altura. Registrou-se que as paredes não estruturais não apresentaram instabilidade estrutural, no entanto quando a espessura é maior que o intervalo de 12-14 cm, há chances de ocorrência de *spalling* superficial na face exposta ao fogo. Quanto as paredes estruturais, verificou-se que a parede menos carregada apresentou menor resistência ao fogo, devido ao uso de junta fina de argamassa, a qual facilitou a ocorrência de lascamento explosivo, deixando de atingir o critério de estanqueidade.

Em outra pesquisa, considerada como a segunda parte do trabalho citado anteriormente, Nguyen e Meftah [5] avaliaram as mesmas configurações de paredes com blocos cerâmicos, no entanto foi realizada uma análise termo-mecânica, com simulações numéricas em 3D, através do método dos elementos finitos (MEF). Os autores ressaltam a necessidade de considerar a ocorrência de *spalling* nas simulações numéricas. É validada a importância de uma abordagem numérica no sistema de alvenaria, pois permite um pré-conhecimento dos materiais envolvidos e do desempenho do sistema antes da realização de diversos ensaios, além de ser uma opção para validar ensaios ou análises analíticas.

Rodvalho [6], trabalhou com a simulação térmica de prismas de alvenaria estrutural com blocos de concreto em situação de incêndio, com o objetivo de analisar apenas o critério de isolamento térmico. Foram modelados prismas sem revestimento, com revestimento em argamassa na face exposta ao fogo e com revestimento em argamassa nas duas faces. Com o uso do *software* comercial ABAQUS/CAE, foram simulados os campos térmicos desenvolvidos nos prismas; as propriedades térmicas do bloco foram validadas por ensaios experimentais já realizados. A representação do ar no interior dos vazados dos blocos foi feita por interação fluido-estrutura e foi desconsiderado a transferência de calor por radiação nas cavidades internas, a compensação foi feita com ajustes na condutividade térmica do ar. Observou-se uma contribuição favorável do revestimento quanto ao isolamento térmico. Considerando a aplicação de revestimento apenas na face exposta ao incêndio, verificou-se numericamente, um aumento de cerca de 23% no tempo de isolamento térmico em relação ao prisma sem revestimento. Assim, com o revestimento nas duas faces, houve um aumento de 59%.

Bolina et al. [7] realizaram uma análise numérico-experimental, a pesquisa teve como enfoque o sistema de alvenaria de vedação composto por blocos cerâmicos. Foram realizados ensaios experimentais em uma parede em escala real, com dimensão de 3,15 x 2,80 m, determinando o tempo de resistência ao fogo (TRF) em relação ao isolamento térmico para blocos com diferentes geometrias. A partir dos dados experimentais, foi possível a calibração do modelo numérico, alimentando-o com os parâmetros de densidade, condutividade térmica, calor específico e convecção térmica. Após a calibração do modelo computacional, os autores realizaram uma extrapolação para outras geometrias de blocos, alterando as espessuras (largura) dos blocos cerâmicos (11,5, 14 e 19 cm) e a quantidade de vazados.

O uso de modelos numéricos para a simulação de prismas, miniparedes ou paredes é bastante eficaz e atua como complemento dos ensaios experimentais, desde que calibrado adequadamente. Este trabalho tem como objetivo realizar uma análise térmica em prismas de concreto e cerâmico, com mesmas dimensões, utilizando o *software* ABAQUS/CAE, com a finalidade de avaliar o isolamento térmico na face não exposta ao incêndio. Os prismas simulados possuem diferentes configurações, para cada tipo de bloco foram simulados dois prismas, um com revestimento nas duas faces e outro sem revestimento. Para a representação do ar foi utilizado a interação fluido-estrutura do *software* mencionado.

2 Metodologia

Para o desenvolvimento e análise do modelo computacional, foi utilizado o *software* comercial Abaqus/CAE na sua versão 6.14. Para a modelagem do bloco, foi utilizado o elemento sólido linear de transferência de calor do tipo DC3D8, este elemento isoparamétrico de 8 nós é utilizado para modelar a transferência de calor no bloco. Para a modelagem da massa de ar foi utilizado o elemento linear FC3D8, o qual é um elemento hexaédrico de 8 nós utilizado para modelar fluidos. As análises térmicas foram feitas em regime transiente, no qual as propriedades térmicas dos materiais e a distribuição da temperatura variam com o tempo.

Foram modeladas e analisadas quatro configurações de prismas, sendo duas configurações para o material cerâmico e duas configurações para o material de concreto. Cada prisma foi constituído por dois blocos. Os blocos tem largura de 29 cm e espessura de 14 cm, a geometria é idêntica à mostrada na Figura 2. Para os prismas com revestimento nas duas faces, considerou-se a espessura do revestimento de argamassa de 1,5 cm; para a junta horizontal entre os blocos considerou-se a espessura de 1 cm. A análise numérica foi feita de forma a aproveitar

a simetria apresentada pela geometria dos blocos. A simetria permite obter modelos mais refinados, sem perder a precisão dos resultados.

2.1 Propriedades dos materiais

Para a modelagem numérica foram utilizadas as seguintes propriedades termofísicas dos materiais: condutividade térmica, massa específica e calor específico; tais informações não foram determinadas experimentalmente nesta pesquisa, logo foi necessário obtê-las na literatura. As propriedades do concreto e do ar foram obtidas do trabalho apresentado por Rodovalho e Corrêa [6]; enquanto as propriedades do material cerâmico e da argamassa, foram coletadas do trabalho apresentado por Nguyen e Meftah [5].

A condutividade térmica e o calor específico variam com a temperatura, como pode ser observado na Figura 1 (a) e na Figura 1 (b), respectivamente. O calor específico dos materiais que compõem o prisma apresentam variações repentinas e elevadas para as temperaturas próximas a 100 °C para o concreto e próximas a 200 °C para a argamassa e o cerâmico. Tal fato é correlacionado à evaporação da umidade presente nos materiais, que influencia no aumento do calor específico.

Nos modelos, a massa de ar foi considerada como um elemento fluido, com massa específica de 1,22 kg/m³ e viscosidade de 1,82 x 10⁻⁵ kg/(m.s). A condutividade térmica e o calor específico, também variam conforme ocorre a variação da temperatura, como mostrado também na Figura 1.

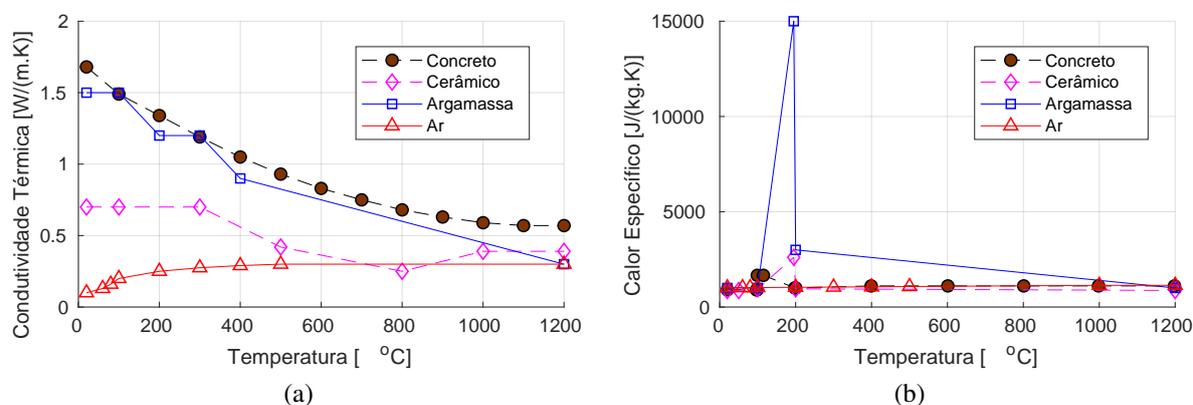


Figura 1. Propriedades térmicas variando com a temperatura; (a) condutividade térmica; (b) calor específico.

2.2 Modelagem numérica

Na modelagem numérica foram considerados prismas com uma face exposta ao fogo por 210 minutos, durante este tempo foram coletadas temperaturas em diferentes pontos, a cada 30 minutos. A taxa de aquecimento na face exposta ao incêndio seguiu a curva padrão ISO 834-1:1999 [8]. Os tipos de transferência nos blocos que conformam o prisma, são representados graficamente, mediante a Figura 2.

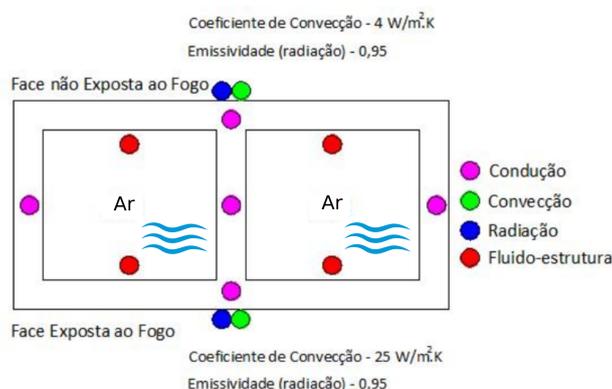


Figura 2. Tipos de transferência de calor no bloco e parâmetros considerados na análise.

Inicialmente, foi aplicado ao prisma a temperatura ambiente de 20 °C; quanto ao fluido, também uma den-

idade constante inicial de 1,22 kg/m³. A convecção e radiação foram introduzidas no modelo como interações. A interação entre o bloco e o ar foi realizada mediante uma análise fluido-estrutura, na qual os dois modelos, o estrutural e o fluido, são realizados de forma simultânea. Este tipo de análise é complexa, pois precisa que os dois sistemas convirjam de forma simultânea, involucrando passos de tempo pequenos; portanto, aumentando o tempo de processamento.

3 Resultados

De acordo com a NBR 5628 [9], o critério de isolamento térmico é satisfeito quando qualquer ponto da superfície não exposta ao fogo, não exceda a temperatura de 180 °C e a média dos pontos não seja maior que 140 °C, acima da temperatura inicial. Para uma melhor visualização dos resultados foram escolhidos uma série de pontos internos e externos para poder comparar graficamente a evolução da temperatura ao longo do prisma. Os pontos escolhidos para os prismas sem revestimento são mostrados na Figura 3 (a), enquanto os pontos para os prismas com revestimento nas duas faces são mostrados na Figura 3 (b).

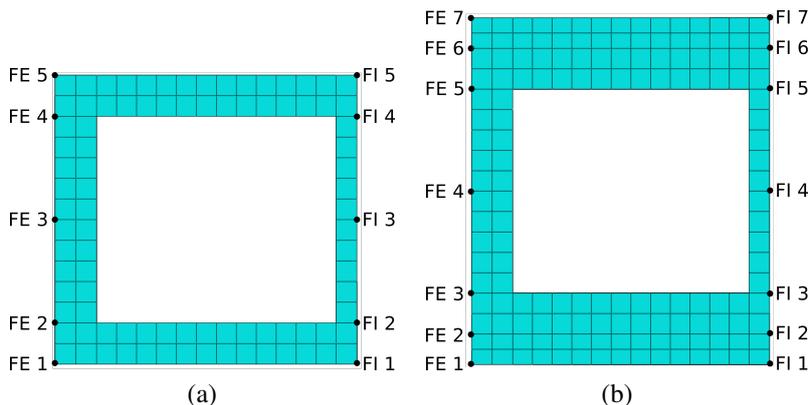


Figura 3. Pontos escolhidos para a comparação das curvas de temperatura: (a) prismas sem revestimento; e (b) prismas com revestimento nas duas faces. FI: face interna, FE: face externa; onde a face exposta ao fogo é a face composta pelos pontos FE1 e FI1.

3.1 Prismas com blocos de concreto

A Figura 4 mostra graficamente a evolução da temperatura no prisma de concreto sem revestimento. A Figura 5 mostra a evolução da temperatura no prisma de concreto com revestimento nas duas faces.

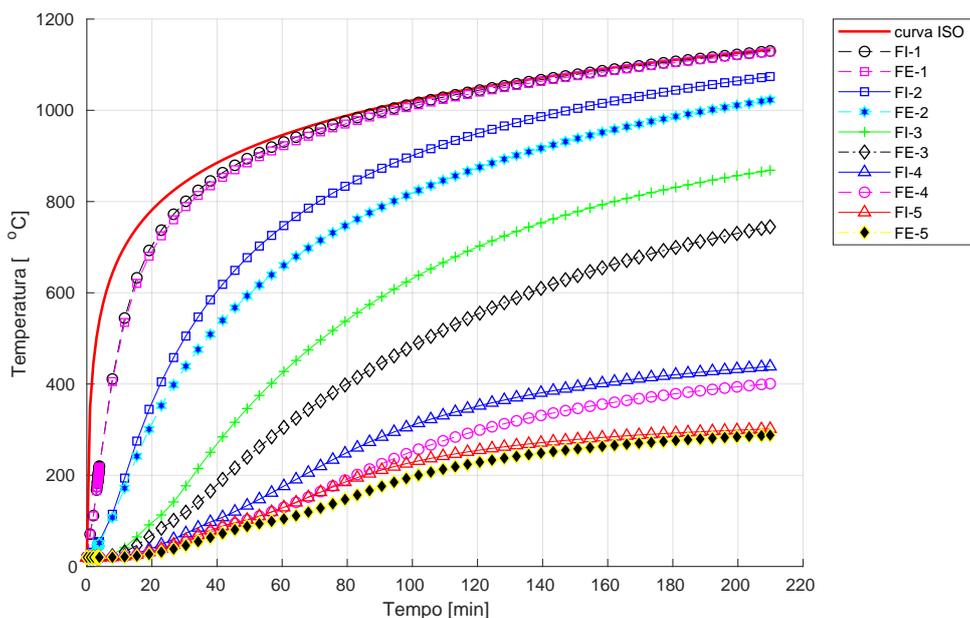


Figura 4. Evolução da temperatura no prisma de concreto sem revestimento.

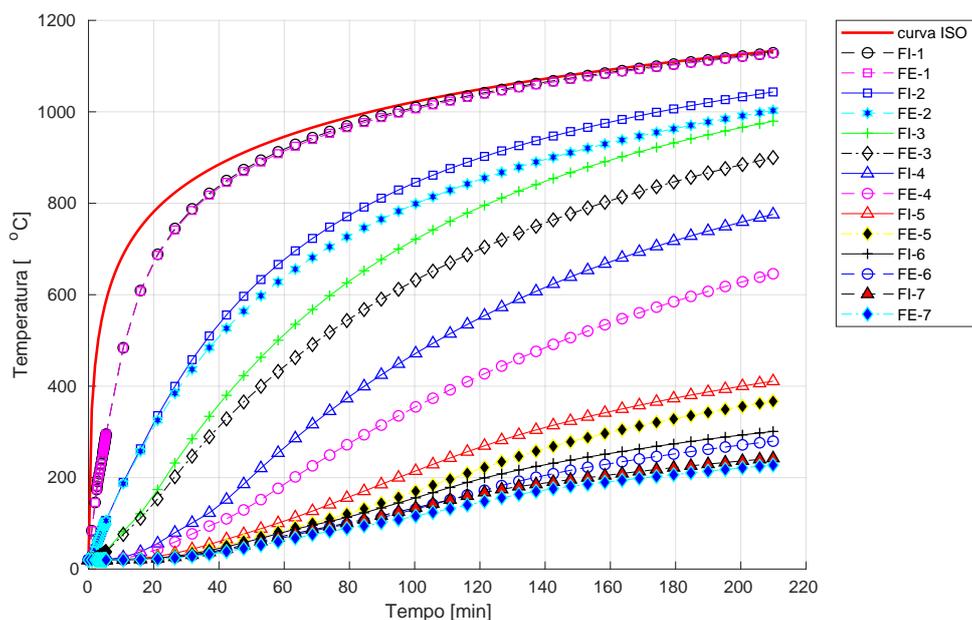


Figura 5. Evolução da temperatura no prisma de concreto com revestimento de argamassa nas duas faces.

Para a avaliação do gradiente de temperatura na face não exposta ao fogo, foi registrada a temperatura em dois pontos. Um na face externa lateral (FE) e outro na face interna (FI), este último ponto está dentro do eixo de simetria do modelo numérico. Os valores das temperaturas nesses pontos são mostrados em função do tempo para as duas geometrias, como pode ser observado na Tabela 1.

Tabela 1. Temperatura nodal na face não exposta ao fogo para o concreto.

Tempo	Sem revestimento		Com revestimento	
	FE5 (°C)	FI5 (°C)	FE7 (°C)	FI7 (°C)
30 min	45,12	57,24	26,46	29,25
60 min	103,49	128,09	62,61	72,49
90 min	174,43	210,36	101,31	117,14
120 min	227,86	254,43	145,87	165,64
150 min	257,29	278,18	182,90	197,57
180 min	275,64	292,34	206,59	222,30
210 min	287,92	301,67	227,44	242,29

A Tabela 1 mostra que em 90 minutos, os valores de temperatura não são aceitáveis, o ponto FI5 ultrapassa o limite de temperatura nodal e a média entre os pontos é de 192,4 °C. No prisma com revestimento, em 150 minutos, os valores nodais, assim como a média estão acima do recomendável pela norma NBR 5628 [9]. Conforme abordado na norma, o prisma de concreto sem revestimento resistiu ao critério de isolamento térmico durante 77 minutos. No entanto, quando analisado com revestimento, o mesmo resistiu durante 122 minutos, representando um aumento de 58,44% no tempo de isolamento térmico. Nos dois casos, foi a média que atingiu a temperatura crítica de 160 °C.

3.2 Prismas com blocos cerâmicos

A Figura 6 mostra graficamente a evolução da temperatura no prisma cerâmico sem revestimento. A Figura 7 mostra a evolução da temperatura no prisma cerâmico com revestimento nos dois lados.

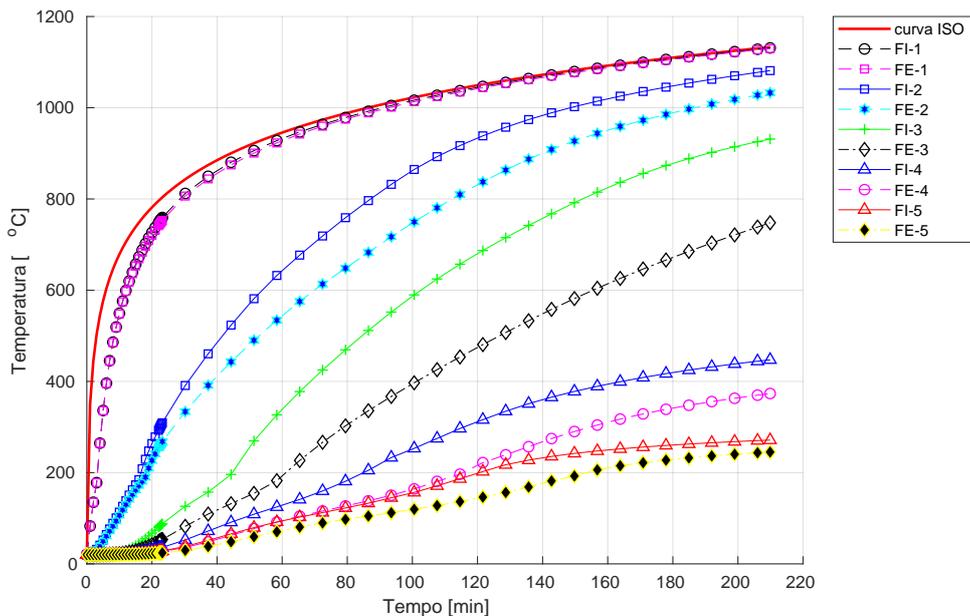


Figura 6. Evolução da temperatura no prisma cerâmico sem revestimento.

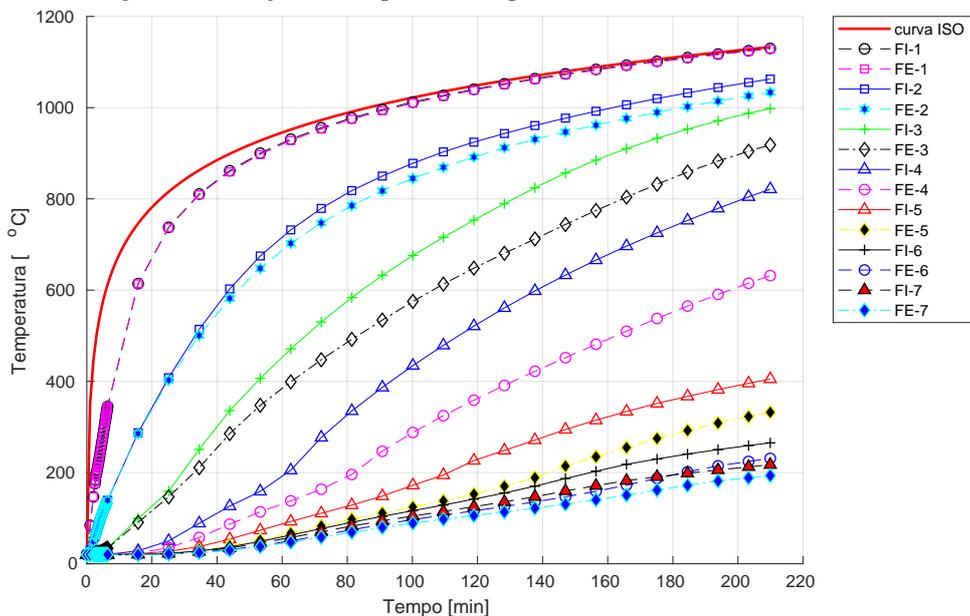


Figura 7. Evolução da temperatura no prisma cerâmico com revestimento de argamassa nos dois lados.

Os valores das temperaturas na face não exposta ao fogo para o cerâmico são mostrados em função do tempo para as duas geometrias, como pode ser observado na Tabela 2.

Tabela 2. Temperatura na face não exposta ao fogo para o cerâmico.

Tempo	Sem revestimento		Com revestimento	
	FI3 (°C)	FE3 (°C)	FI5 (°C)	FE5 (°C)
30 min	29,62	37,85	22,73	24,31
60 min	72,87	94,34	44,37	54,08
90 min	108,54	138,82	78,59	93,32
120 min	143,99	196,97	106,60	126,50
150 min	192,99	242,37	133,60	163,35
180 min	229,00	260,61	166,97	194,98
210 min	245,24	271,45	193,37	217,15

A Tabela 2 mostra que em 120 minutos, os valores de temperatura não são aceitáveis, o ponto FE3 ultrapassa o limite de temperatura nodal e a média entre os pontos é de 170,48 °C. No prisma com revestimento, em 180 minutos, FE5 e a média dos pontos estão acima do recomendável pela norma NBR 5628 [9]. O prisma cerâmico

sem revestimento resistiu ao critério de isolamento térmico durante 111 minutos. Neste caso a temperatura máxima de 180 °C foi atingida na face interna do prisma. No entanto, quando analisado com revestimento o mesmo resistiu por 160 minutos, representando um aumento de 44,14 % no tempo de isolamento térmico. Para este caso a média atingiu o valor máximo de 160 °C.

Finalmente, a Figura 8 mostra a evolução da temperatura em função do tempo para a temperatura média na face não exposta ao fogo para os modelos analisados no presente trabalho.

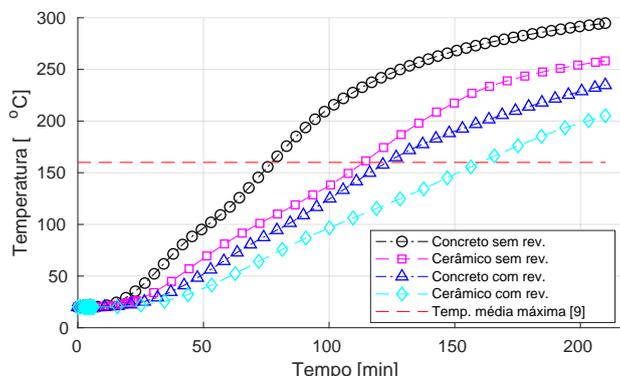


Figura 8. Evolução da temperatura média na face não exposta para os modelos analisados.

4 Conclusões

A análise numérica foi realizada com a ajuda do *software* comercial ABAQUS/CAE. A interação da massa de ar no interior dos blocos foi representada mediante uma interação fluido-estrutura. Este tipo de interação possui certa complexidade numérica, pois está atrelada à convergência de dois modelos de forma simultânea, o modelo do fluido e o modelo estrutural. Este tipo de modelagem tenta se aproximar fielmente ao fenômeno real.

Foram analisados prismas de blocos de concreto e blocos cerâmicos, com e sem revestimento nas duas faces. No prisma formado por blocos de concreto observou-se uma redução de 58,44% no tempo de isolamento térmico na face não exposta ao fogo, quando o revestimento nas duas faces foi aplicado. Para o caso de blocos cerâmicos, a redução foi de 44,14%. Este fato mostra a importância do revestimento no desempenho térmico em prismas expostos a altas temperaturas. Quando comparados os dois materiais, o cerâmico teve um melhor desempenho térmico, resistindo 160 minutos o critério estabelecido por norma. Já o concreto resistiu 122 minutos, isto para o caso com revestimento nas duas faces. A redução do tempo de isolamento térmico neste caso foi de 23,75%. Os resultados obtidos mostraram-se compatíveis com os observados na literatura.

Termo de Autoria. Os autores confirmam que são os únicos responsáveis pela autoria deste trabalho.

Referências

- [1] Leite, H. A. L., Moreno, A. L., & Torres, D. L., 2016. Dimensionamento da alvenaria estrutural em situação de incêndio: contribuição à futura normatização nacional. *Ambiente Construído*, vol. 16, n. 2, pp. 89–107.
- [2] Carleto, N. A., 2006. A importância da simulação computacional em projetos de sistemas na Área de engenharia elétrica. In *Second Brazilian System Conference*, Ribeirão Preto, SP.
- [3] Nguyen, T. D., Meftah, F., Chammas, R., & Mebarki, A., 2009. The behaviour of masonry walls subjected to fire: Modelling and parametrical studies in the case of hollow burnt-clay bricks. *Fire Safety Journal*, vol. 44, pp. 629–641.
- [4] Nguyen, T. D. & Meftah, F., 2012. Behavior of clay hollow-brick masonry walls during fire. part 1: Experimental analysis. *Fire Safety Journal*, vol. 52, pp. 55–64.
- [5] Nguyen, T. D. & Meftah, F., 2014. Behavior of hollow clay brick masonry walls during fire. part 2: 3d finite element modelling and spalling assessment. *Fire Safety Journal*, vol. 66, pp. 35–45.
- [6] Rodvalho, F. S. & Corrêa, M. R. S., 2019. Thermal simulation of prisms with concrete blocks in a fire situation. *Ibracon Structures and Materials Journal*, vol. 12, n. 3, pp. 638–657.
- [7] Bolina, F., Tutikian, B., Gonçalves, J., Souza, T., & Manica, G., 2020. Análise numérico-experimental de paredes de alvenaria de bloco cerâmico com diferentes espessuras em altas temperaturas. *Revista ALCONPAT*, vol. 10, n. 01.
- [8] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, I., 1999. ISO 834: Fire resistance tests – elements of building construction: Part 1. general requirements. Gêneve.
- [9] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, A., 2001. NBR 5628: Componentes construtivos estruturais – determinação da resistência ao fogo. Rio de Janeiro, Brazil.