

Análise comparativa numérica da transferência de calor em prismas de alvenaria em situação de incêndio

Comparative numerical analysis of heat transfer in masonry prisms in a fire situation

Alana Paula da Costa Quispe 

Rene Quispe Rodríguez 

André Lübeck 

Rogério Cattelan Antochaves de Lima 

Resumo

O presente trabalho busca analisar numericamente a transferência de calor em prismas de alvenaria com blocos cerâmicos em situação de incêndio. Três tipos de abordagens foram consideradas: modelo homogeneizado com base na NBR 15220-2:2022, modelo detalhado com propriedades termofísicas constantes e modelo detalhado com propriedades térmicas variando em função da temperatura. Para o processo da homogeneização é proposto um programa denominado “THC NBR15220-2”. Esse programa foi desenvolvido em Matlab e calcula a homogeneização das propriedades segundo a NBR 15220-2:2022. Os modelos numéricos foram realizados utilizando o método dos elementos finitos (MEF) no *software* Abaqus. O incêndio foi simulado utilizando a curva padronizada ISO 834:1999. Foram coletadas as temperaturas na face não exposta ao fogo no tempo final de exposição de 4 horas. Os resultados mostraram que o prisma com maior número de vazios e menor relação área líquida e área bruta apresentou melhor desempenho térmico em situação de incêndio. O modelo detalhado com propriedades térmicas variando com a temperatura, como sugerido por normas internacionais.

Palavras-chave: Alvenaria. Blocos cerâmicos. Situação de incêndio. Comportamento térmico. Transferência de calor.

Abstract

This study aims to numerically analyse heat transfer in masonry prisms with ceramic blocks under fire conditions. Four prism configurations, designated as Prism “A”, “B”, “C” and “D”, were modelled. Three different numerical approaches were considered: a homogenized model based on the NBR 15220-2:2022 standard, a detailed model with constant thermophysical properties, and a detailed model with properties varying as a function of temperature. For the homogenization process, a programme called “THC NBR15220-2” was proposed. This programme, developed in Matlab, calculates the homogenised properties according to the NBR 15220-2:2022 standard. Numerical models were performed using the Finite Element Method (FEM) using the Abaqus software. The fire condition was simulated using the ISO 834:1999 standardised curve. Temperatures were collected on the face not exposed to fire at the final exposure time of 4 hours. The results showed that the prism with the highest number of voids and, consequently, the lowest net to gross area ratio was the one with the best thermal performance. There is a difference of 12,79% to 29,61% when compared to the reference model, which is the detailed model with thermal properties varying with temperature, as suggested in international standards.

Keywords: Masonry. Ceramic blocks. Fire situation. Thermal behaviour. Heat transfer.

¹Alana Paula da Costa Quispe
¹Universidade Federal de Santa Maria
Santa Maria - RS - Brasil

²Rene Quispe Rodríguez
²Universidade Federal de Santa Maria
Santa Maria - RS - Brasil

³André Lübeck
³Universidade Federal de Santa Maria
Santa Maria - RS - Brasil

⁴Rogério Cattelan Antochaves de Lima
⁴Universidade Federal de Santa Maria
Santa Maria - RS - Brasil

Recebido em 22/06/22
Aceito em 05/09/22

Introdução

Após a Segunda Guerra Mundial, o fogo passou a ser visto como uma ciência, a qual englobava diversos fenômenos complexos, envolvendo a física, a química, o comportamento humano, a engenharia, entre outros fatores. Atualmente, essa ciência pode ser chamada de segurança contra incêndio (SCI), sendo uma área que necessita de constantes pesquisas, desenvolvimento e ensino. É uma tendência internacional exigir que todos os sistemas construtivos e os materiais constituintes sejam testados e analisados do ponto de vista da SCI, com a finalidade de sempre obter produtos e técnicas com um desempenho cada vez melhor. No Brasil, a alvenaria estrutural é um dos sistemas construtivos que ainda carece de mais pesquisas relacionadas ao seu comportamento quando submetida a elevadas temperaturas (SEITO *et al.*, 2008). Para Russo e Sciarretta (2012) esse campo da pesquisa é bastante desafiador, pois além dos elevados custos dos ensaios de resistência ao fogo, ainda envolve a complexidade física do fenômeno.

Análises relacionadas ao comportamento térmico de componentes construtivos estruturais podem ser feitas por meio de ensaios de resistência ao fogo. No Brasil, a NBR 5628 (ABNT, 2001) prescreve métodos para que possam ser feitos esses ensaios em componentes construtivos estruturais. Essa norma recomenda que a amostra possua dimensões reais e que seja submetida a carregamentos reais. No entanto, entende-se que conduzir experimentos em escala real ainda é uma tarefa muito custosa e outras formas de análises para esses problemas são necessárias com a finalidade de atuar de forma complementar aos ensaios de resistência ao fogo, como por exemplo o uso de modelos numéricos e simulação computacional. Para problemas mais básicos, com informações simplificadas, os métodos analíticos também podem ser utilizados (NGUYEN; MEFTAH, 2012; SILVA, 2014; KREITH; MANGLIK; BOHN, 2018).

Na engenharia, o uso de métodos numéricos para solucionar problemas térmicos complexos é fortemente recomendado, os quais podem envolver geometrias e condições de contorno ou propriedades consideradas como complexas (ÇENGEL; GHAJAR, 2012). A simulação numérica possibilita a previsão de um fenômeno ou um comportamento físico; quando desenvolvida e calibrada de forma adequada pode identificar problemas antes de suas ocorrências, reduzindo os riscos na tomada de decisão. Essa técnica permite diferentes formas de análises e avaliações de um sistema físico, ocasionando diferentes propostas de soluções e decisões mais assertivas, incluindo a realização de análises relacionadas à viabilidade técnica e econômica (HARREL *et al.*, 2002).

Diversos estudos numéricos têm sido desenvolvidos abordando de diferentes formas a transferência de calor em paredes de alvenaria quando expostas a elevadas temperaturas. Tais abordagens podem levar em consideração o tipo de modelagem. Para Lourenço (1996), dependendo do nível de precisão e da complexidade desejada, é possível usar as seguintes estratégias de modelagem da alvenaria: micromodelagem detalhada, micromodelagem simplificada e macromodelagem. Cada estratégia possui sua importância e campos de aplicação diferentes, as quais devem ser escolhidas levando em consideração os objetivos e resultados a serem alcançados, nível de precisão necessário e a capacidade computacional e tempo de processamento.

Através de simulações numéricas, Rodovalho e Corrêa (2019) estudaram a capacidade de isolamento térmico de prismas de alvenaria constituídos por blocos de concreto em situação de incêndio. Para o desenvolvimento dos modelos numéricos foi adotada a micromodelagem e o *software* utilizado foi o Abaqus/CAE. Para a representação do ar no interior dos vazados dos blocos foi utilizada a interação fluido-estrutura. As propriedades térmicas do bloco e da argamassa foram validadas com resultados experimentais. Na face exposta ao incêndio, foi aplicada uma curva de elevação da temperatura, bem próxima à curva ISO 834-1 (INTERNATIONAL..., 1999). Na simulação, foi desconsiderada a transferência de calor por radiação nas cavidades internas, a compensação foi feita com ajustes na condutividade térmica do ar. Foi utilizado o mesmo valor de emissividade para as faces exposta e não exposta ao fogo, valores indicados pelo Eurocode 2 (EUROPEAN..., 2004). Observou-se uma contribuição favorável do revestimento quanto ao isolamento térmico. O prisma sem revestimento nas faces atingiu o critério de isolamento térmico por mais de 60 minutos, já o prisma com revestimento de 1,5 cm nas duas faces atingiu o mesmo critério com um tempo 59% maior. 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.

Com relação aos estudos com blocos cerâmicos, Bolina *et al.* (2020) realizaram uma análise numérico-experimental para avaliar a influência da geometria desses blocos na resistência ao fogo em paredes de alvenaria de vedação submetidas a elevadas temperaturas. Foi utilizado o *software Ansys Mechanical* para realização dos modelos computacionais em 2 dimensões. Com relação à malha de elementos, o menor elemento finito ficou com 1 mm de lado e o maior elemento com 50 mm de lado. A condutividade térmica, o

calor específico, a densidade e os coeficientes de convecção do bloco foram extraídos do modelo experimental. Após a calibração do modelo computacional, foi feita uma extrapolação computacional para outras geometrias de blocos, alterando as espessuras (largura) e a porcentagem de vazios. Foi verificado que os vazios dos blocos possuem grande influência no isolamento térmico dos blocos; a escolha de um bloco com uma maior porcentagem de vazios pode ser mais vantajosa do que a escolha de um bloco de maior espessura, quando se deseja atingir um tempo de resistência ao fogo (TRF) elevado. Em temperaturas mais baixas, os vazados possuem influência quase nula. Outra consideração está relacionada com a transferência de calor, verificando que a convecção e radiação no interior dos blocos são mais relevantes que a condução térmica atuante no material sólido, confirmando que o ar confinado é um excelente isolante térmico.

Em busca de avaliar o critério de isolamento térmico da alvenaria estrutural, Carvalho, Leal e Munaiar Neto (2021) realizaram uma micromodelagem detalhada de pequena parede de alvenaria estrutural de blocos de concreto com largura de 79 cm e altura igual a 99 cm, considerando as juntas de argamassa de assentamento com espessura de 1 cm. Os modelos foram elaborados no software Abaqus. O elemento finito utilizado foi do tipo linear de transferência de calor DC3D8, com dimensões de aproximadamente 1 cm. O uso de elementos com essa dimensão foi suficiente para proporcionar resultados satisfatórios com esforço computacional reduzido. A análise foi do tipo transiente, com temperatura e propriedades térmicas dos materiais variando em função do tempo. As propriedades térmicas do modelo foram calibradas de acordo com os limites propostos pelo Eurocode 6 (EUROPEAN..., 2005) para estruturas de concreto e de alvenaria estrutural, porém tendo como base de comparação resultados experimentais de Dupim (2019). Com o intuito de reduzir o esforço computacional, o modelo desconsidera o uso da interação fluido-estrutura no interior dos blocos, no entanto adotou uma estratégia de simplificação, na qual a discretização dos vazios dos blocos é substituída por uma curva de elevação da temperatura no interior da parede, obtida por meio de cabos termopares. Quanto aos coeficientes de convecção e emissividade, foram consideradas paredes com 14 cm de espessura e o tempo de resistência ao fogo quanto ao critério de isolamento térmico resultou igual a 60 minutos. O modelo numérico se mostrou bastante consistente quando comparado a resultados experimentais presentes na literatura.

Para Oliveira *et al.* (2021), a falta de documentos normativos e de dados relacionados às propriedades dos materiais em altas temperaturas, para calibração e validação dos modelos numéricos, indicam a necessidade de mais pesquisas na área de alvenaria em situação de incêndio. Os autores realizaram um estudo sobre o comportamento estrutural de paredes de alvenaria quando expostas ao fogo, constituídas por blocos de concreto de três células. Foram realizados estudos de nível experimental e numérico. O programa experimental foi constituído por quatro ensaios de resistência ao fogo e dois testes de capacidade de carga após 90 minutos de exposição ao fogo, em paredes de alvenaria de meia escala. Diferentes níveis de carga foram considerados. Os corpos de prova foram submetidos a uma carga de serviço no plano durante o ensaio e foram medidos os deslocamentos, as temperaturas e cargas. Logo após, foram desenvolvidos modelos de elementos finitos e validados com o experimental. As análises numéricas foram realizadas utilizando o *software* Abaqus Explicit e foi adotada a estratégia de macromodelagem, considerando as paredes de alvenaria homogênea e isotrópica. Os resultados experimentais e numéricos também foram comparados com os fornecidos pelo Eurocode 6 (EUROPEAN..., 2005).

Com a finalidade de contribuir com o tema, este trabalho busca analisar a transferência de calor em prismas de alvenaria em situação de incêndio, utilizando diferentes estratégias de modelagem. Foram abordadas quatro configurações de prismas de alvenaria constituídos por blocos cerâmicos com diferentes geometrias. Todos os prismas possuem revestimento de argamassa de 1 cm na face exposta ao fogo e 2 cm na face não exposta. Os modelos numéricos foram desenvolvidos a partir de três diferentes tipos de abordagens: modelo homogeneizado, de acordo com a NBR 15220-2 (ABNT, 2022), modelo detalhado com propriedades termofísicas constantes e modelo detalhado com propriedades térmicas variando em função da temperatura. O presente trabalho também propõe, e disponibiliza de forma gratuita, um programa denominado “THC NBR15220-2”, onde THC se refere as palavras em inglês *Thermal Homogenization Calculator*. Esse programa foi desenvolvido em Matlab e faz os cálculos da homogeneização das propriedades segundo a NBR 15220-2 (ABNT, 2022). O *software* comercial utilizado foi o Abaqus. Para a simulação do incêndio foi utilizada a curva-padrão ISO 834 (INTERNATIONAL..., 1999). A análise é do tipo transiente e os modelos são tridimensionais. Foram coletadas as temperaturas dos prismas na face não exposta ao fogo, considerando como referência para comparação o modelo detalhado com propriedades térmicas variando em função da temperatura. Os resultados propõem uma discussão sobre transferência de calor relacionada aos diferentes tipos de abordagens numéricas.

Alvenaria estrutural em situação de incêndio

Um dos maiores benefícios da utilização da alvenaria estrutural está relacionado com a possibilidade de um único elemento construtivo atender diversas funções, capaz de ser a sustentação estrutural, ser resistente ao fogo, atuar como sistema de isolamento térmico e acústico, além de compartimentar os espaços (HENDRY, 2001). De acordo com a NBR 5628 (ABNT, 2001), para que uma parede de alvenaria seja considerada resistente ao fogo, é preciso que a mesma cumpra três principais critérios de resistência ao fogo: estanqueidade, isolamento térmico e resistência mecânica.

O comportamento de uma parede de alvenaria exposta ao fogo depende de alguns fatores principais, como:

- (a) o material e a densidade das unidades;
- (b) o tipo/geometria, podendo ser sólida ou com vazados e, nesse caso, a porcentagem de vazios e a espessura das paredes do bloco possuem grande influência;
- (c) o traço e forma de aplicação da argamassa de assentamento;
- (d) esbeltez da parede; e
- (e) a excentricidade do carregamento e o tipo e a natureza do revestimento utilizado na superfície da alvenaria (EUROPEAN..., 2005).

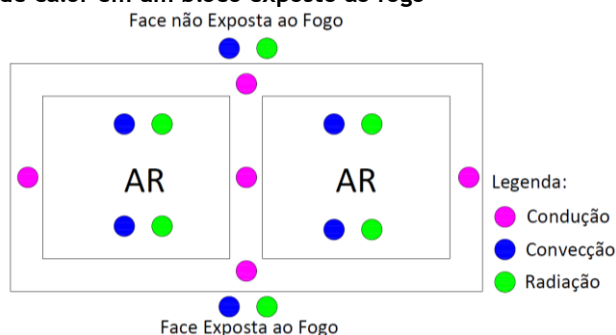
Em situação de incêndio, é indispensável o conhecimento de como os materiais e elementos estruturais se comportam frente às ações térmicas atuantes na edificação. Geralmente, as paredes de alvenaria são submetidas ao aquecimento em uma face, ocorrendo a transferência de calor através de sua espessura, resultando em um gradiente térmico. A transmissão de calor é regida por três mecanismos básicos: condução, convecção e radiação. Os três tipos de transmissão agem de forma combinada em qualquer incêndio, no entanto cada uma delas predomina conforme o estágio do aquecimento ou o local do compartimento (COSTA, 2008).

Os problemas de transferência de calor podem ser classificados conforme as variáveis influenciam a temperatura, podendo ser estacionário (permanente), quando a temperatura é independente do tempo ou transiente, caso as condições de contorno variem com o tempo. Na alvenaria estrutural, a análise de transferência de calor ocorre de maneira diferente ao longo da espessura da parede. Na região sólida do sistema, a transmissão de calor acontece por meio da condução, enquanto nos vazios da parede e também nas faces, a transmissão ocorre por convecção e radiação (AL-HADHRAMI; AHMAD, 2009). A Figura 1 mostra a vista de cima de como ocorre a transferência de calor em um bloco quando exposto ao incêndio.

A transferência energia por meio da condução resulta do contato direto das partículas de maior energia com as partículas de menor energia. A taxa de condução de calor depende de algumas características do meio em que se encontra, como: da geometria, da espessura, do tipo de material e da diferença de temperatura. Quanto maior o isolamento, menor será a perda de calor (ÇENGEL; GHAJAR, 2012). Em um meio homogêneo, a taxa de transferência de calor por condução é considerada como unidimensional e ocorre de acordo com a Lei de Fourier.

A convecção envolve os efeitos combinados de condução e de movimento de um fluido. Quanto mais rápido o movimento do fluido, maior será a taxa de transferência por convecção. Para uma edificação em situação de incêndio, o fluido a considerar é o gás aquecido presente no ambiente. Por fim, a radiação representa um fenômeno superficial e pode ser considerada como a energia emitida pela matéria, transportada por ondas eletromagnéticas, através do ar ou no vácuo. Para modelagens de estruturas de alvenaria, a radiação é representada pela emissividade, a qual depende do material da superfície e de seu acabamento.

Figura 1 - Transferência de calor em um bloco exposto ao fogo



Estratégias de modelagens aplicadas no sistema de alvenaria estrutural

No Brasil, a NBR 15220-2 (ABNT, 2022) pode direcionar estudos relacionados ao comportamento térmico de prismas de alvenaria em situação de incêndio, a norma nacional especifica o método de cálculo da transmitância e capacidade térmica de elementos e componentes de edificações. Esse método considera camadas termicamente homogêneas que podem ser definidas como camadas com espessura constante cujas propriedades térmicas podem ser consideradas uniformes. Para o caso de paredes em situação de incêndio, considera-se o cálculo da transmitância com fluxo de calor horizontal. A transmitância e a capacidade térmica são usadas nesse modelo para descrever o comportamento térmico do sistema homogêneo.

O modelo homogêneo trata do cálculo de macropropriedades do compósito com base na discretização real dos componentes da alvenaria. Os resultados desse cálculo servem como dados de entrada para um macromodelo independente. Outra estratégia para modelar a alvenaria é por meio da micromodelagem detalhada, nesse caso cada material que compõe a alvenaria é modelado de forma individual, com suas propriedades. As unidades e juntas de argamassa são representadas através de elementos contínuos. Essa técnica é explicada por Lourenço (1996) e também é vista em Rodovalho e Côrrea (2019) e Carvalho, Leal e Munaiar Neto (2021). A micromodelagem detalhada é adequada para pequenas estruturas e detalhes estruturais, como, por exemplo, em casos em que há um interesse investigativo na interação entre as unidades e a argamassa. Para grandes estruturas, como paredes, essa estratégia torna-se inviável, devido ao tempo de processamento elevado (LOURENÇO, 1996).

Na micromodelagem detalhada, é fundamental ter conhecimento das propriedades termofísicas dos materiais que irão compor o sistema de alvenaria, como, por exemplo, as unidades, a argamassa e a massa de ar confinada no interior dos vazados dos blocos. A propriedade térmica de um material pode ser explicada como a resposta de um material à aplicação de calor, influenciando diretamente na severidade do sinistro, assim como na segurança da edificação (COSTA; ONO; SILVA, 2005).

Quando as propriedades termofísicas variam ao longo da temperatura elevada, elas representam de forma indireta as reações termoquímicas e termofísicas que acontecem durante a exposição da estrutura ao incêndio (FIRE..., 2002; EUROPEAN..., 2004). Para Buchanan (2002), a variação dessas propriedades em função da temperatura é fundamental para compensar a impossibilidade dos programas comerciais em simular a transferência de massa, como, por exemplo, a migração de vapor de água em materiais porosos. As principais propriedades termofísicas consideradas em uma micromodelagem térmica são: a condutividade térmica, o calor específico e a densidade.

Na ausência de ensaios experimentais, os valores da condutividade térmica podem ser obtidos por meio da literatura, no entanto a maior parte desses dados são medidos em temperatura ambiente. Nessas condições, a condutividade térmica depende da densidade de massa aparente do material, geralmente, observa-se que conforme a densidade do material diminui, a condutividade térmica também se reduz (ABNT, 2022). Na cerâmica, geralmente, a condutividade térmica aumenta com o aumento da temperatura (PINTO *et al.*, 2006; NGUYEN *et al.*, 2009). Em pastas de cimento e argamassa, a grandeza depende de alguns fatores principais, como: porosidade e teor de umidade do material; tipo de agregado, misturas e aditivos; proporções da mistura; tipo de cimento e temperatura da amostra (ROUSAN; ROY, 1983). Em âmbito mundial, existe uma carência de pesquisas relacionadas ao comportamento de argamassas quando expostas ao fogo (AYALA, 2010).

Com relação à condutividade térmica da massa de ar confinada entre os vazados dos blocos, também há uma variação com a temperatura. Os gases apresentam valores muito pequenos de condutividade e são conhecidos por serem maus condutores ou isolantes térmicos, o ar atmosférico é um excelente exemplo. O isolamento térmico pode ser obtido pelo aprisionamento do ar dentro de pequenas cavidades em um sólido ou através do preenchimento do espaço com pequenas partículas sólidas, reduzindo o fluxo de calor (KREITH; MANGLIK; BOHN, 2018).

Outra propriedade térmica importante é o calor específico, nos materiais cerâmicos, o calor específico pode ser considerado independente da densidade do bloco (MALHOTRA, 1962), mas ainda dependente da temperatura. O Eurocode 6 (EUROPEAN..., 2005) aborda a variação do calor específico e também da condutividade térmica para blocos cerâmicos com densidade de 900 a 1.200 kg/m³. Na argamassa, o calor específico também varia com a elevação da temperatura. Através de estudos em pastas de cimento Portland, Harmathy (1970) aborda que em temperaturas elevadas em que ocorre o processo de desidratação, de 100 °C a 850 °C, o calor latente tem grande influência no calor específico, devido à absorção de calor nas reações de desidratação.

Nos gases, geralmente, atuam dois tipos de calor específico: o calor específico a volume constante, o qual é a energia necessária para elevar a temperatura em um grau de unidade de massa de dada substância, mantendo o volume constante e o calor específico a pressão constante, que possui a mesma definição, no entanto o que permanece constante é a pressão. Para um gás ideal, o calor específico depende apenas da temperatura (ÇENGEL; GHAJAR, 2012).

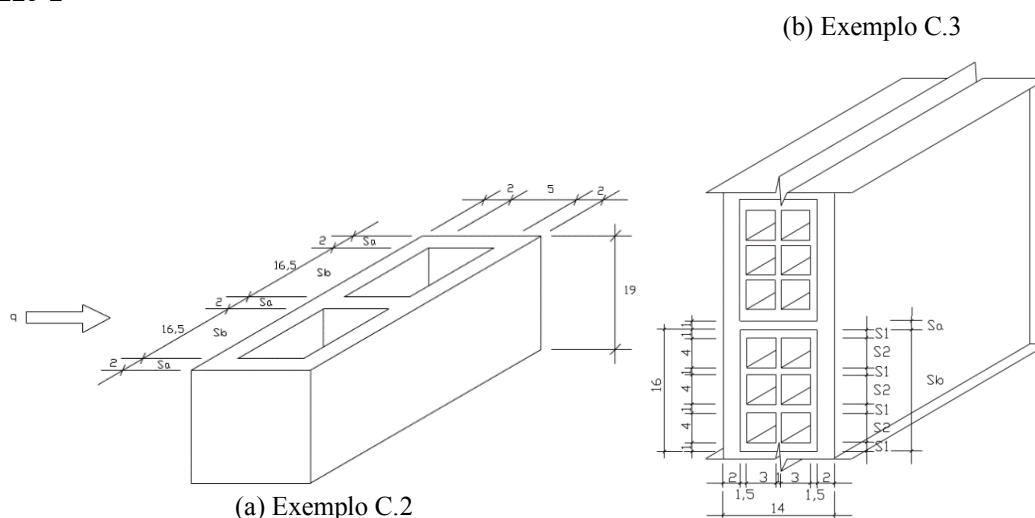
Método

Rotina computacional para o cálculo das propriedades homogêneas

Para a etapa da obtenção das propriedades homogêneas foi implementada a função em Matlab denominada “THC NBR15220-2”. Essa função realiza o cálculo da transmitância e capacidade térmica de componentes estruturais compostos por blocos e pode ser acessada via *link*¹. A função foi desenvolvida seguindo o procedimento apresentado pela norma NBR 15220-2 (ABNT, 2022). O programa considera as novas modificações apresentadas na última versão da referente norma. Os parâmetros de entrada são as propriedades termofísicas dos materiais que conformam os componentes estruturais, assim como a sua geometria. De forma a validar os resultados do programa, uma série de exemplos de aplicação foram testados e são mostrados na Figura 2. Os exemplos apresentados estão na versão 2008 da norma, pois a versão atual não apresenta exemplos de aplicação para o cálculo de transmitância e capacidade de componentes homogêneos.

No primeiro exemplo, C.2 da norma, é considerada uma parede de blocos de concreto colados e sem reboco, com dimensões 39 x 19 x 9 cm, como pode ser observado na Figura 2(a). No segundo exemplo, C.3 da norma, é considerada uma parede de tijolos cerâmicos de seis furos rebocados em ambas as faces, com dimensões 32 x 16 x 10 cm, visto na Figura 2(b). Na Tabela 1, são mostrados os valores das propriedades termofísicas para os materiais componentes das paredes. Observa-se que para o reboco e a argamassa de assentamento são consideradas as mesmas propriedades.

Figura 2 - Vista em perspectiva de paredes com blocos usados nos exemplos de aplicação da norma NBR 15220-2



Fonte: NBR 15220-2 (ABNT, 2005).

Tabela 1 - Propriedades termofísicas dos materiais

Material	Densidade (kg/m ³)	Condutividade térmica [W/(mK)]	Calor específico [kJ/(kgK)]
Cerâmica	1600	0,90	0,92
Concreto	2400	1,75	1,00
Argamassa	2000	1,15	1,00

Fonte: NBR 15220-2 (ABNT, 2005).

¹Disponível em: <https://github.com/AlanaCostaQuispe/Thermal-Homogenization-NBR15220>.

Os resultados obtidos pelo programa são mostrados na Figura 3. Cabe ressaltar que o programa calcula a transmitância térmica (UT) e a capacidade térmica (CT) para diferentes configurações: bloco, bloco com revestimento, prisma e parede. Os resultados mostram que as diversas configurações possuem valores de UT e CT diferentes, pois esses valores dependem diretamente da espessura da argamassa de assentamento e do reboco, assim como da geometria considerada nos cálculos. Para efeitos de comparação, foi considerada unicamente a configuração de parede.

Para o caso do exemplo C.2, a norma mostra um resultado de $UT = 3,320 \text{ W/(m K)}$ e $CT = 105 \text{ kJ/(m K)}$; enquanto o programa obteve um resultado de $UT = 3,319 \text{ W/(m K)}$ e $CT = 104,972 \text{ kJ/(m K)}$, valores praticamente idênticos. No exemplo C.3, a norma mostra um resultado de $UT = 2,430 \text{ W/(m K)}$ e $CT = 160 \text{ kJ/(m K)}$; enquanto o programa mostra um resultado de $UT = 2,429 \text{ W/(m K)}$ e $CT = 155,617 \text{ kJ/(m K)}$, com uma divergência de 0% e 2,5%, respectivamente.

Cálculo das propriedades dos blocos cerâmicos

Foram escolhidos quatro tipos de blocos comerciais comumente utilizados no Brasil, com diferentes geometrias, os quais foram nomeados de Bloco “A”, Bloco “B”, Bloco “C” e Bloco “D”. O Bloco “A” possui valor aproximado da relação área líquida e área bruta de 0,41. Os blocos “B”, “C” e “D” possuem geometrias semelhantes, no entanto a relação área líquida e área bruta varia, sendo os valores, respectivamente, 0,48; 0,56 e 0,58. Cada prisma é composto por dois blocos, com junta de assentamento de 1 cm e revestimento de argamassa com 1 cm na face exposta ao fogo e 2 cm na face não exposta. A Figura 4 mostra os blocos modelados no programa e os valores da transmitância térmica e capacidade térmica calculadas.

A partir dos valores da transmitância UT e capacidade térmica CT dos prismas é possível calcular a condutividade λ e calor específico c do conjunto homogêneo, como mostrado nas Equações 1 e 2:

$$UT = \frac{\lambda}{d} \tag{Eq. 1}$$

$$CT = c \times d \times \rho \tag{Eq. 2}$$

Onde:

d é a espessura do componente analisado; e

ρ é a densidade do material homogeneizado.

Figura 3 - Resultados mostrados pela rotina implementada

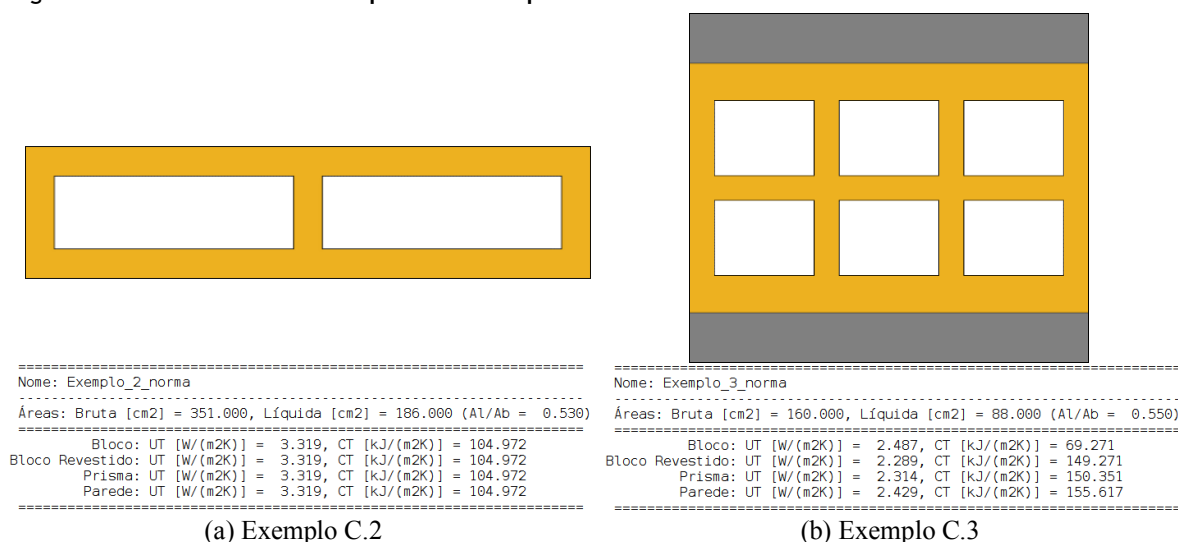
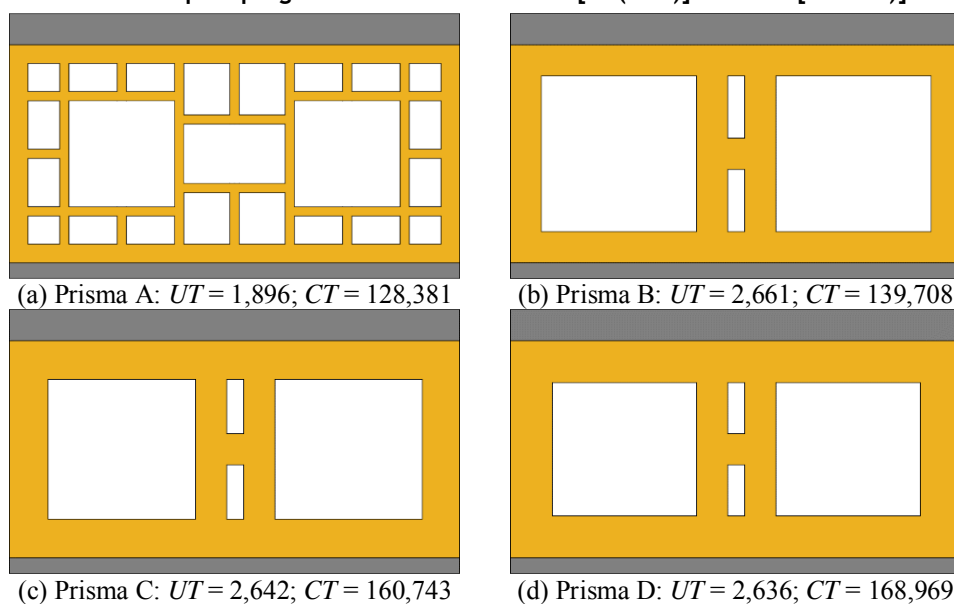


Figura 4 - Blocos obtidos pelo programa e valores da UT em [W/(m²K)] e CT em [kJ/m²K]

Modelagem por elementos finitos e recursos computacionais

A modelagem numérica foi realizada utilizando o método dos elementos finitos (MEF), com auxílio do *software* Abaqus. Em todos os modelos numéricos, utilizou-se o elemento finito linear de transferência de calor DC3D8, com 8 nós, um por vértice. Nesse caso, cada nó possui um grau de liberdade (GDL) que corresponde ao valor da temperatura nodal. Inicialmente, uma análise de sensibilidade foi realizada para determinar o tamanho ótimo dos elementos, resultando no tamanho padrão de 1 cm. Valores menores de tamanho do elemento não produziram uma variação significativa dos resultados. Cabe ressaltar que para a obtenção das malhas, uma série de partições geométricas foi realizada, forçando a obtenção de malhas totalmente homogêneas, como pode ser visto na Figura 5, por exemplo. Nessa figura, mostra-se a malha por elementos finitos para o prisma A.

Todas as análises numéricas foram realizadas em um computador com um processador AMD *Ryzen* 7 2.700x com 16 GB de RAM. As análises foram paralelizadas, usando a funcionalidade avançada disponível no Abaqus, com isso foram utilizados simultaneamente 8 processadores (16 *threads*). A Tabela 2 apresenta os dados dos modelos, como o número de elementos, os graus de liberdade (GLDs) e tempos de processamento para os 4 modelos numéricos, que correspondem aos diferentes tipos de prismas. Três análises foram realizadas para cada tipo de prisma:

- modelo homogeneizado;
- modelo utilizando propriedades constantes; e
- modelo com as propriedades variando em função da temperatura, totalizando assim 12 modelos testados.

Resultados e discussões

Nesta seção são apresentados os resultados dos modelos numéricos realizados. Primeiramente, são mostrados os resultados utilizando o modelo homogeneizado proposto na NBR 15220-2 (ABNT, 2022). Logo após, mostra-se os resultados utilizando o modelo detalhado com propriedades constantes e, por fim, os resultados utilizando a análise detalhada com propriedades variando com relação à temperatura.

Modelo homogeneizado

Os modelos numéricos foram realizados mediante a homogeneização de seus componentes. A homogeneização foi realizada usando as recomendações da NBR 15220-2 (ABNT, 2022). A função *fun_UC_NBR15220* foi utilizada para este fim, como mencionado anteriormente. A Tabela 3 mostra as propriedades térmicas homogeneizadas para todos os prismas considerados.

Figura 5 - Malha por elementos finitos utilizada no prisma A

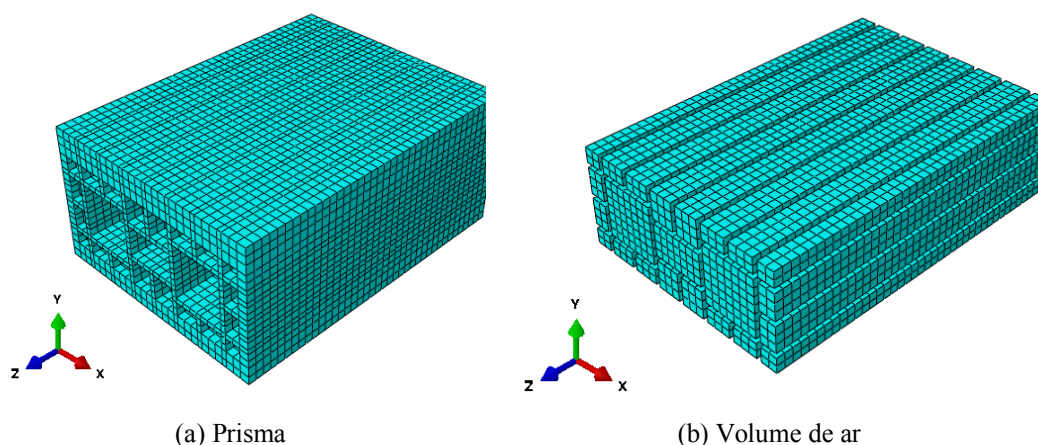


Tabela 2 - Informação sobre o número de elementos, número de graus de liberdade (GLDs) e tempos computacionais requeridos para a análise de cada modelo numérico

Tipos de prismas	Número de elementos			Tempo (s)		
	Prisma	Ar	GLDs	Homogêneo est. (par.)	Micro constante est. (par.)	Micro variando est. (par.)
Prisma A	12.285	9.750	36.320	467 (50)	588 (65)	3046 (327)
Prisma B	11.115	8.112	25.600	466 (51)	467 (52)	2113 (225)
Prisma C	12.597	7.293	26.080	451 (49)	483 (53)	2009 (211)
Prisma D	13.377	6.552	25.760	460 (50)	484 (54)	1909 (198)

Nota: *est.: estimado, par.: paralelizado. Esses tempos se referem ao tempo estimado pelo ABAQUS em uma análise sem a funcionalidade de paralelização e ao tempo efetivo usando a paralelização, respectivamente.

Tabela 3 - Propriedades térmicas homogeneizadas para os prismas

Propriedades termofísicas	Prisma A	Prisma B	Prisma C	Prisma D
Condutividade térmica [W/(mK)]	0,3224	0,4524	0,4492	0,4482
Calor específico [J/(kgK)]	419,5	456,6	525,3	552,2
Densidade (kg/m)	732,43	874,88	1008,2	1059,1

A Figura 6 mostra a evolução da temperatura média da face não exposta ao fogo em termos do tempo de exposição. As temperaturas no tempo final de exposição de 4 horas (14.400s) correspondem a 416,09 K, 445,73 K, 436,18 K e 431,49 K, para os prismas A, B, C e D, respectivamente.

A maior variação de temperatura foi observada no prisma A, o qual apresenta uma diminuição de 6,65% quando comparado com o prisma B (temperatura mais crítica). O prisma A possui menor relação área líquida/área bruta dos prismas testados e uma distribuição de vazios mais uniforme, indicando que o ar tem efeito significativo como isolante térmico sobre o comportamento do conjunto.

Modelo detalhado com propriedades termofísicas constantes

Nesses modelos foram considerados os diferentes materiais que compõem um prisma de alvenaria: blocos cerâmicos, argamassa e massa de ar interna dos blocos. Nesse caso, as propriedades dos materiais são consideradas invariantes em termos da mudança da temperatura. Os valores dessas propriedades em temperatura ambiente são mostrados na Tabela 4.

A Figura 7 mostra uma vista de cima da distribuição do fluxo e da temperatura no plano normal ao fluxo de calor (plano X-Y) para todos os prismas. A base das figuras representa a face exposta ao fogo, enquanto a outra face representa a face não exposta.

Figura 6 - Evolução da temperatura média da face não exposta ao fogo em termos do tempo de exposição para o modelo homogeneizado

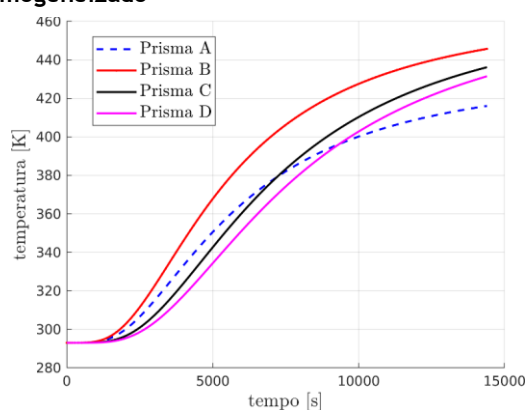
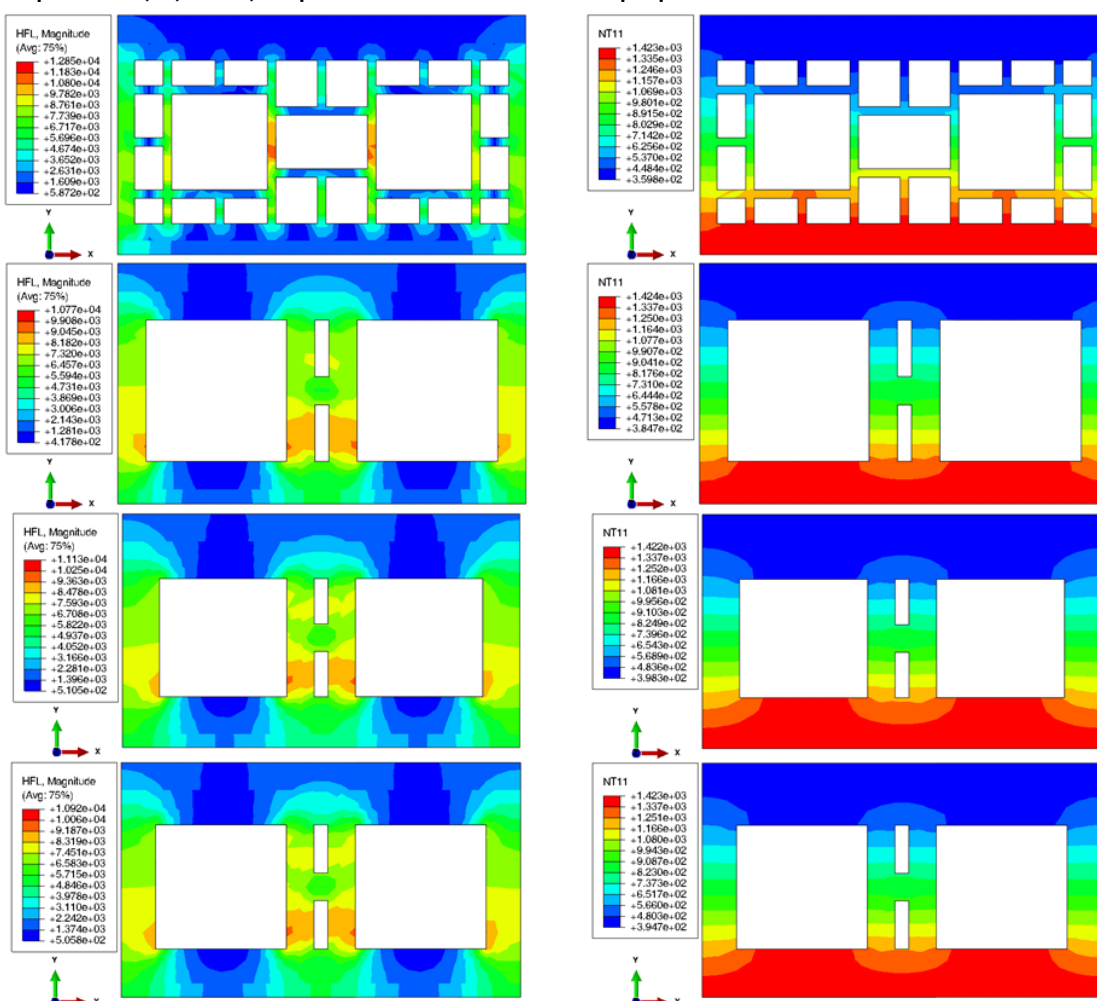


Tabela 4 - Propriedades termofísicas dos materiais constituintes da alvenaria para o modelo detalhado

Material	Densidade (kg/m ³)	Condutividade térmica [W/(mK)]	Calor específico [J/(kgK)]
Bloco cerâmico ¹	1800	1	920
Argamassa ¹	1800	1,15	1000
Ar ²	1,164	0,0237	1011

Fonte: ¹Santos *et al.* (2015) e ²Kreith, Manglik e Bohn (2018).

Figura 7 - Distribuição dos valores de fluxo e temperatura no plano normal ao fluxo de calor (plano X-Y) dos prismas A, B, C e D, respectivamente - modelo com propriedades constantes



A Figura 8 mostra a distribuição de temperaturas para os prismas A e D, isso no tempo final de exposição de 4 horas (14.400 s). Para uma comparação mais precisa, os limites de temperatura foram padronizados no intervalo entre $T_{\min} = 355$ K e $T_{\max} = 450$ K. Portanto, unicamente a temperatura nessas regiões são mostradas na figura. As outras regiões são mostradas em uma cor acinzentada.

Finalmente, a Figura 9 mostra a evolução da temperatura média da face não exposta ao fogo em termos do tempo de exposição. Nessa figura também são mostradas as distribuições de temperatura dessas faces para o tempo final. Cabe ressaltar que aqui também foi considerado o intervalo entre $T_{\min} = 355$ K e $T_{\max} = 450$ K para a visualização dos resultados nos diagramas. As temperaturas finais correspondem a 375,73 K, 404,57 K, 412,42 K e 415,84 K, para os prismas A, B, C e D, respectivamente.

A maior variação de temperatura foi observada no prisma A, o qual apresenta uma diminuição de 9,65% quando comparado com o prisma D (temperatura mais crítica). Nesse caso, o prisma D é o maior de relação área líquida/área bruta. Nesse modelo, percebe-se a diferença de comportamento dos prismas do tipo A, de blocos de paredes vazadas, em relação aos demais prismas, de blocos de paredes maciças.

Modelo detalhado com propriedades variando com a temperatura

De forma similar aos modelos anteriores, aqui também foram considerados os diferentes materiais que compõem uma parede de alvenaria estrutural convencional: bloco cerâmico, argamassa e massa de ar interna aos blocos. Nesse caso, a condutividade térmica e o calor específico foram considerados dependentes da temperatura, para a cerâmica e a argamassa o comportamento adotado foi o apresentado no Eurocode 6 (EUROPEAN..., 2005) e Nguyen e Meftah (2014), respectivamente. Quanto à massa de ar, a variação considerada é mostrada em Kreith, Manglik e Bohn (2018). A Figura 10 mostra a dependência dessas propriedades em função da temperatura. A densidade foi considerada constante para todos os materiais, sendo equivalente a 1800 kg/m³ para o material cerâmico e a argamassa, e 1,164 kg/m³ para o ar.

Figura 8 - Distribuição de temperatura na face não exposta ao fogo para o prisma A (a) e prisma D (b) - modelo com propriedades constantes

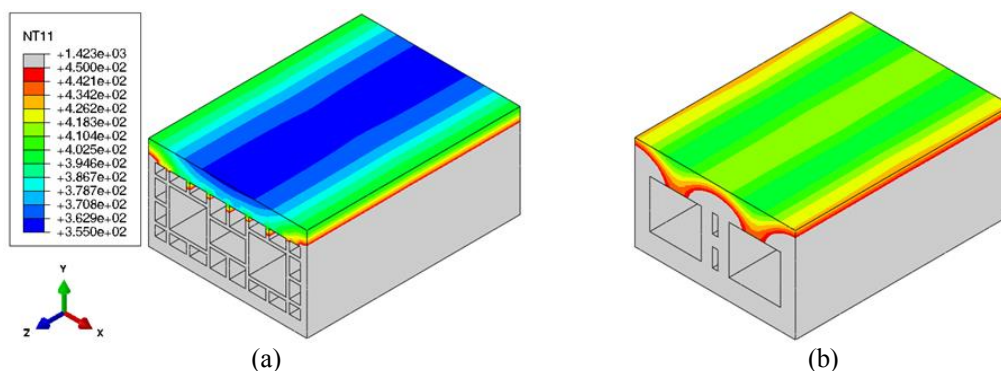


Figura 9 - Evolução da temperatura média da face não exposta ao fogo com relação ao tempo de exposição e distribuição de temperatura no tempo final de exposição - modelo com propriedades constantes

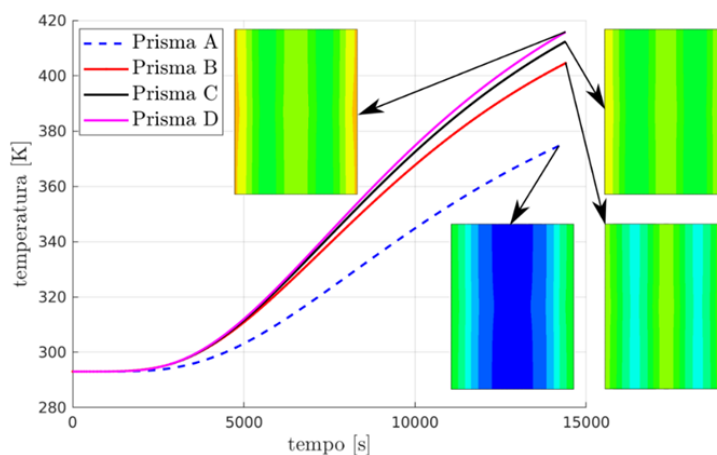
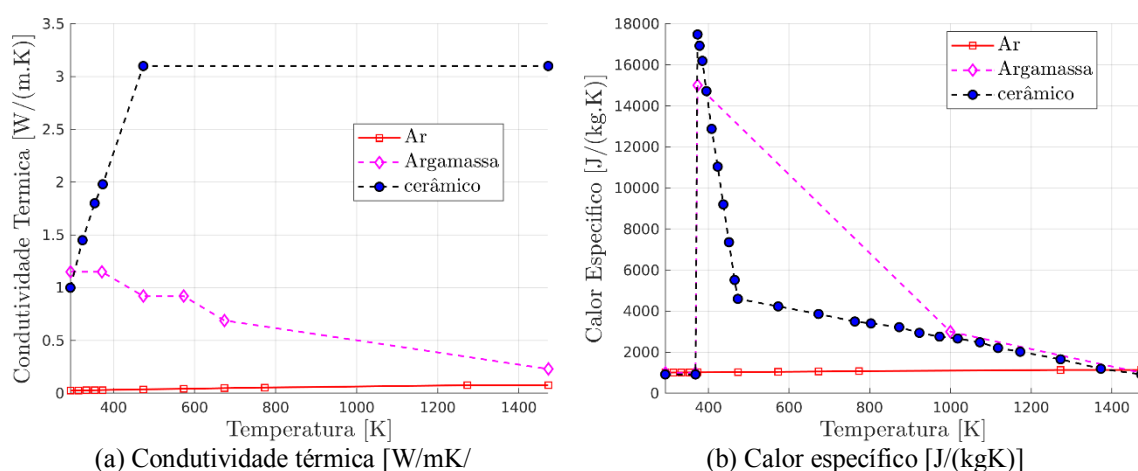


Figura 10 - Propriedades térmicas variando com a temperatura



Na Figura 11, mostra-se a distribuição do fluxo e da temperatura no plano normal ao fluxo de calor (plano X-Y), para todos os prismas. A base das figuras representa a face exposta ao fogo, enquanto a outra face representa a face não exposta.

A Figura 12 mostra a distribuição de temperaturas para os prismas A e D no tempo final de exposição de 4 horas (14400 s). Para uma comparação mais precisa, os limites de temperatura foram padronizados no intervalo máximo e mínimo entre $T_{\min} = 327$ K e $T_{\max} = 350$ K. Portanto, unicamente a temperatura nessas regiões são mostradas na figura. As outras regiões são mostradas pela cor cinza.

Finalmente, a Figura 13 mostra a evolução da temperatura média da face não exposta ao fogo em termos do tempo de exposição. Nessa figura também são mostradas as distribuições de temperatura dessas faces para o tempo final de exposição. Também foi adotado um intervalo máximo e mínimo de temperaturas de $T_{\min} = 327$ K e $T_{\max} = 350$ K para a visualização dos resultados nos diagramas. As temperaturas finais correspondem a 333,13 K, 343,91 K, 345,16 K e 346,10 K; para os prismas A, B, C e D, respectivamente.

A maior variação de temperatura foi observada no prisma A, o qual apresenta uma diminuição de 3,75% quando comparado com o prisma D (temperatura mais crítica). Confirmando a diferença de comportamento entre os prismas com blocos de paredes maciças e o de paredes vazadas.

Comparação entre os modelos

A Tabela 5 mostra a comparação da temperatura média no tempo final de exposição para os diferentes modelos considerados: modelo homogeneizado, modelo com propriedades termofísicas constantes e modelo com as propriedades térmicas variando com a temperatura, sendo este último o modelo considerado como referência, pois neste considerou-se a influência da temperatura na mudança das propriedades térmicas, como sugerido no Eurocode 6 (EUROPEAN..., 2005).

Dos resultados mostrados, observam-se diferenças de 12,79% a 29,61% dos modelos quando comparados com o de referência. Cabe ressaltar que existe uma compatibilidade de resultados entre o modelo homogeneizado e o modelo com propriedades constantes, com uma diferença máxima de 12,11% entre eles (prisma A). A homogeneização representa de forma conservadora as temperaturas na face não exposta ao fogo. No entanto, essa aproximação não é precisa em casos com grandes mudanças de temperatura, como em casos de incêndio.

No Brasil, existem diversos estudos experimentais e numéricos relacionados ao comportamento térmico da alvenaria estrutural expostos a elevadas temperaturas, mas a grande maioria aborda configurações de pequenas paredes ou paredes com dimensões reais. A Tabela 6 mostra um compilado de algumas das principais pesquisas relacionadas a esse sistema construtivo.

Figura 11 - Distribuição dos valores de fluxo e temperatura no plano normal ao fluxo de calor (plano X-Y) dos prismas A, B, C e D, respectivamente - modelo com propriedades variando

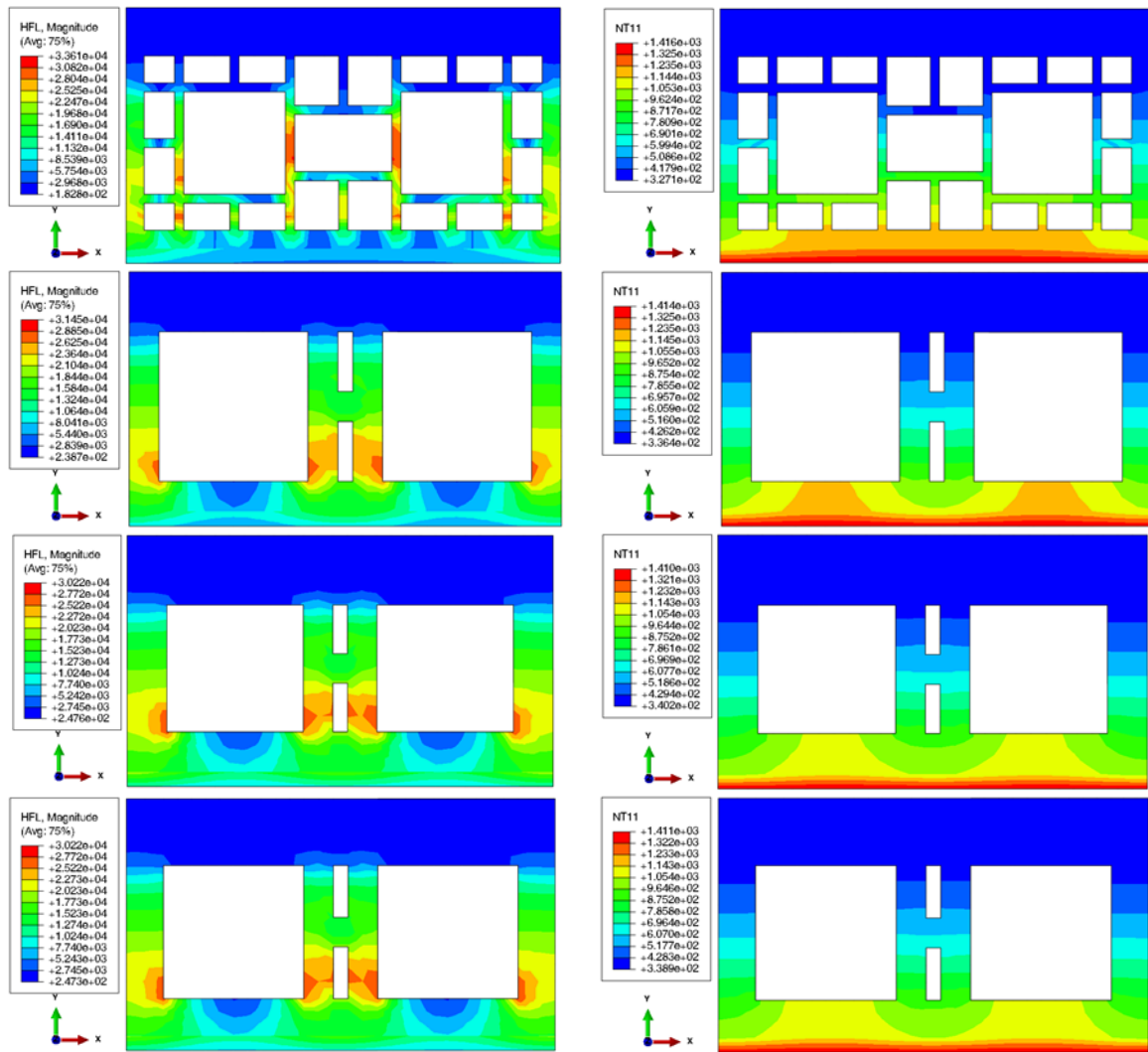


Figura 12 - Distribuição de temperatura na face não exposta ao fogo para o prisma A (a) e prisma D (b) - modelo com propriedades variando

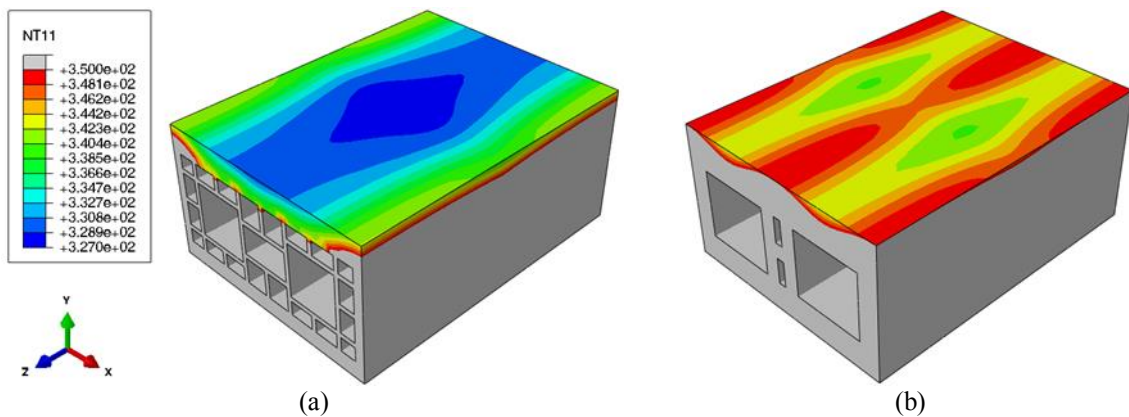


Figura 13 - Evolução da temperatura média da face não exposta ao fogo com relação ao tempo de exposição e distribuição de temperatura no tempo final de exposição - modelo com propriedades variando

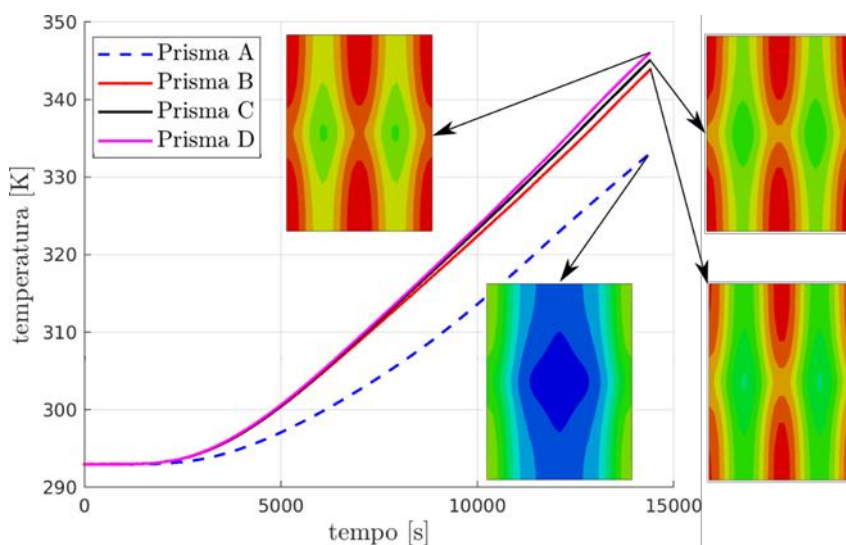


Tabela 5 - Comparação da temperatura média no tempo final de exposição para os diferentes modelos numéricos e para os diferentes prismas analisados

Modelo	Temperatura média (K) em 4 horas			
	Prisma A	Prisma B	Prisma C	Prisma D
Homogeneizado	416,09 (24,90%)	445,73 (29,61%)	436,18 (26,37%)	431,49 (24,67%)
Prop. constantes	375,73 (12,79%)	404,57 (17,64%)	412,42 (16,31%)	415,84 (20,15%)
Prop. variáveis	333,13 (ref.)	343,91 (ref.)	345,16 (ref.)	346,10 (ref.)

Nota: *ref.: referência.

Tabela 6 - Pesquisas nacionais relacionadas a alvenaria estrutural exposta a elevadas temperaturas

Autor	Material/dimensão	Configuração	Resultados
Rosemann (2011) – numérico e experimental	Cerâmico 14x 19 x 29cm	Parede de 2,70 x 2,60 m	(1) Sem revestimento: 140 °C em 106 min
			(2) Revestimento nas duas faces: 140 °C em 196 min
Lima <i>et al.</i> (2018) - experimental	Cerâmico 14x 19 x 29 cm	Minipare de 75x 80 cm	Revestimento nas duas faces: Bloco A – 140 °C em 196 min Bloco B – 150,6 °C em 150 min Bloco C – 157,3 °C em 210 min Bloco D – 159,9 °C em 240 min
Rodvalho e Corrêa (2019) - numérico	Concreto 14 x 19 x 39 cm	Prisma com dois blocos	(1) Sem revestimento: 180 °C em 86 min
			(2) Revestimento nas duas faces: 180 °C em 137 min
			(3) Revestimento na face não exposta: 140 °C em 104 min
Carvalho, Leal e Munaiar Neto (2021) - numérico	Concreto 14 x 19 x 39 cm	Minipare de 79 x 99 cm	(1) Exposição ao fogo em uma face: 284,9 °C em 70 min
			(2) Exposição ao fogo em ambas as faces: 775 °C em 70 min

Considerações finais

O presente trabalho buscou avaliar o comportamento térmico de prismas de alvenaria com blocos cerâmicos utilizando diferentes abordagens para o desenvolvimento dos modelos numéricos: modelo homogeneizado, modelo detalhado com propriedades termofísicas constantes e modelo detalhado com propriedades térmicas

variando em função da temperatura. Para o modelo homogeneizado, foi proposto um programa para calcular a transmitância e capacidade térmica de blocos, prismas e paredes de diferentes geometrias seguindo a NBR 15220-2 (ABNT, 2022). O programa está disponível para seu uso mediante o *link*². Os arquivos dos modelos numéricos usados também podem ser disponibilizados por e-mail.

As análises computacionais mostraram que o prisma A teve o melhor desempenho térmico, quando comparado com os outros prismas, isso devido à sua baixa relação área líquida/área bruta (aproximadamente 0,41). A massa de ar no interior dos blocos possui grande influência na transferência de calor entre as faces dos prismas, devido à baixa condutividade do ar. O aumento do número de vazios dentro de um bloco indica ganho de isolamento térmico, logo a face não exposta ao incêndio apresentará uma temperatura menor quando comparada aos prismas com blocos de paredes externas maciças.

É de suma importância considerar a mudança das propriedades térmicas em função da temperatura, como abordado no Eurocode 6 Parte 1-2: 2005. Existe uma diferença de 12,79% a 29,61% dos modelos quando comparados com o de referência, reforçando a importância dessa consideração. No entanto, o modelo homogeneizado proposto pela norma pode servir como um resultado inicial de projeto, visto que o tempo computacional requerido para essa análise é mínimo quando comparado com o requerido pelos modelos mais completos.

Referências

- AL-HADHRAMI, L. M.; AHMAD, A. Assessment of thermal performance of different types of masonry bricks used in saudi arabia. **Applied Thermal Engineering**, v. 29, p. 1123–1130, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220-2**: Desempenho térmico de edificações – Parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações. Rio de Janeiro, 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220-2**: desempenho térmico de edificações: parte 2: componentes e elementos construtivos das edificações: resistência e transmitância térmica: métodos de cálculo. Rio de Janeiro, 2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5628**: componentes construtivos estruturais: determinação da resistência ao fogo. Rio de Janeiro, 2001.
- AYALA, F. R. R. **Mechanical properties and structural behaviour of masonry at elevated temperatures**. Thesis – The University of Manchester, School of Mechanical, Aerospace and Civil Engineering, Manchester, 2010.
- BOLINA, F. *et al.* Análise numérico-experimental de paredes de alvenaria de bloco cerâmico com diferentes espessuras em altas temperaturas. **Revista ALCONPAT**, v. 10, n. 1, p. 22-35, 2020.
- BUCHANAN, A. H. **Structural design for fire safety**. Canterbury: John Wiley & Sons, 2002.
- CARVALHO, P. R. de O.; LEAL, D. F.; MUNAIAR NETO, J. Análise numérica térmica da alvenaria estrutural em situação de incêndio: isolamento térmico entre ambientes. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 21, n.4, p. 65-87, out./dez. 2021.
- ÇENGEL, Y. A.; GHAJAR, A. J. **Transferência de calor e massa**: uma abordagem prática. 4. ed. Porto Alegre: McGraw Hill, 2012.
- COSTA, C. N. **Dimensionamento de elementos de concreto armado em situação de incêndio**. São Paulo, 2008. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas e Geotécnica) — Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.
- COSTA, C. N.; ONO, R.; SILVA, V. P. A importância da compartimentação e suas implicações no dimensionamento das estruturas de concreto para situação de incêndio. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO, Olinda, 2005. **Anais [...]** Olinda, 2005.
- DUPIM, R. H. **Resistência residual de compressão de blocos, prismas e pequenas paredes de alvenaria estrutural de blocos de concreto submetidos à situação de incêndio**. São Carlos, 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2019.

²Disponível em: <https://github.com/AlanaCostaQuispe/Thermal-Homogenization-NBR15220>.

- EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **Eurocode 2**: design of concrete structures: part 1-2: general rules: structural fire design. Brussels, 2004.
- EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **Eurocode 6**: EN 1996-1.2: design of masonry structures: part 1-2: general rules: structural fire design. Brussels, 2005.
- FIRE SAFETY DESIGN. **TCD 5.0 user's manual**. Lund: Fire Safety Design AB, 2002.
- HARMATHY, T. Z. Thermal properties of concrete at elevated temperature. **ASTM Journal of Materials**, v. 5, n. 1, p. 47–74, 1970.
- HARREL, C. R. *et al.* **Simulação**: otimizando os sistemas. 2. ed. São Paulo: Editora IMAM, 2002.
- HENDRY, E. A. W. Masonry walls: materials and construction. **Construction and Building Materials**, v. 15, n. 8, p. 323–330, 2001.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 834**: fire resistance tests: elements of building construction: part 1.1: general requirements. Geneve, 1999.
- KREITH, F.; MANGLIK, R. M.; BOHN, M. S. **Princípios de transferência de calor**. 7. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2018.
- LIMA, R. C. A. *et al.* Assess of hollow clay block masonry wallets under high temperature. **Revista Matéria**, v. 23, n. 03, p. 1–12, 2018.
- LOURENÇO, P. B. **Computational strategies for masonry structures**. Delft, 1996. 210 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Geociências) - Delft University of Technology, Delft, 1996.
- MALHOTRA, H. L. **Fire resistance of concrete block walls**. Boreham Wood: Department of Scientific and Industrial Research and Fire Offices Committee Joint Fire Research Organization, 1962.
- NGUYEN, T. D. *et al.* The behaviour of masonry walls subjected to fire: modelling and parametrical studies in the case of hollow burnt-clay bricks. **Fire Safety Journal**, v. 44, p. 629–641, 2009.
- NGUYEN, T. D.; MEFTAH, F. Behavior of clay hollow-brick masonry walls during fire: part 1: experimental analysis. **Fire Safety Journal**, v. 52, p. 55–64, 2012.
- NGUYEN, T.; MEFTAH, F. Behavior of hollow clay brick masonry walls during fire: part 2: 3D finite elemento modeling and spalling assessment. **Fire Safety Journal**, v. 66, p. 35-45, 2014.
- OLIVEIRA, R. *et al.* Experimental, and numerical analysis on the structural fire behaviour of three-cell hollowed concrete masonry walls. **Engineering Structures**, v. 228, 2021.
- PINTO, C. S. C. *et al.* Measurement of thermophysical properties of ceramics by the flash method. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v. 49, p. 31–39, 2006.
- RODOVALHO, F. S.; CORRÊA, M. R. S. Thermal simulation of prisms with concrete blocks in a fire situation. **Ibracon Structures and Materials Journal**, v. 12, n. 3, p. 638–657, 2019.
- ROSEMANN, F. **Resistência ao fogo de paredes de alvenaria estrutural de blocos cerâmicos pelo critério de isolamento térmico**. Florianópolis, 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011.
- ROUSAN, A. A.; ROY, D. M. A thermal comparator method for measuring thermal conductivity of cementitious materials. **Industrial & Engineering Chemistry Product Research and Development**, v. 22, p. 349–351, 1983.
- RUSSO, S.; SCIARRETTA, F. Experimental and theoretical investigation on masonry after high temperature exposure. **Experimental Mechanics**, v. 52, n. 4, p. 341–359, 2012.
- SANTOS, J. C. P. dos *et al.* Comportamento térmico de fechamentos em alvenaria estrutural para a Zona Bioclimática 2 brasileira. **Revista Matéria**, v. 20, n. 4, p. 1030-1047, 2015.
- SEITO, A. I. *et al.* **Segurança contra Incêndio no Brasil**. São Paulo: Projeto Editora, 2008.
- SILVA, P. **Segurança contra incêndios em edifícios**: considerações para o projeto de arquitetura. São Paulo: Blucher, 2014.

Alana Paula da Costa Quispe

Análise de dados, Pesquisa, Metodologia, Validação de dados e experimentos, Redação do manuscrito original.

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil | Universidade Federal de Santa Maria | Av. Roraima, 1000 | Santa Maria - RS - Brasil | CEP 97105-900 | Tel.: (55) 3220-8837 | E-mail: alana.quispe@acad.ufsm.br

Rene Quispe Rodríguez

Conceitualização; Desenvolvimento, implementação e teste de software; Supervisão; Redação - revisão e edição.

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil | Universidade Federal de Santa Maria | E-mail: rene.rodriguez@ufsm.br

André Lübeck

Supervisão, Metodologia, Redação - revisão e edição.

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil | Universidade Federal de Santa Maria | E-mail: andrelubeck@gmail.com

Rogério Cattelan Antochaves de Lima

Administração do projeto, Supervisão, Metodologia, Redação - revisão e edição.

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil | Universidade Federal de Santa Maria | E-mail: rogerio@ufsm.br

Ambiente Construído

Revista da Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído

Av. Osvaldo Aranha, 99 - 3º andar, Centro

Porto Alegre - RS - Brasil

CEP 90035-190

Telefone: +55 (51) 3308-4084

www.seer.ufrgs.br/ambienteconstruido

www.scielo.br/ac

E-mail: ambienteconstruido@ufrgs.br



This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License.