

Alvenaria estrutural em situação de incêndio: influência da resistência à compressão de blocos cerâmicos

Load-bearing masonry in fire situation: influence of clay bricks compressive strength

Felipe Schneider de Lima 

Rafael Trevisan 

Sérgio Klippel Filho 

Julio César Vechim 

Bernardo Tutikian 

Resumo

Diversas características influenciam a resistência ao fogo de sistema de parede em alvenaria estrutural, dentre as quais pode se incluir sua resistência à compressão. O comportamento desse sistema é validado experimentalmente conforme a norma NBR 5628. Esse estudo tem como objetivo analisar comparativamente a resistência ao fogo obtida através de ensaios em escala real em alvenaria estrutural, envolvendo as características de isolamento térmico, estanqueidade a passagem de gases e fumaça e estabilidade estrutural. Foram avaliados componentes com a mesma configuração em termos de revestimento e assentamento, assumindo como variável a resistência a compressão dos blocos, tendo sido considerados neste estudo blocos de classe EST 60, 100 e 140. Os resultados obtidos apontam que a resistência à compressão da alvenaria pode influenciar, além da estabilidade estrutural do sistema, também seu isolamento térmico, critério tipicamente crítico para alvenarias de blocos cerâmicos em situação de incêndio. A amostra de maior resistência à compressão apresentou menor deslocamento horizontal, contribuindo para mitigar a geração de fissuras, aumentando a oposição da alvenaria à passagem da temperatura ao longo de sua seção transversal e assim aumentar sua resistência ao fogo.

Palavras-chave: Resistência ao fogo. Alvenaria estrutural. Blocos cerâmicos. Isolamento térmico. Resistência característica à compressão.

Abstract

There are several characteristics that influence fire resistance of load-bearing masonries, wherein stand out the bricks compressive strength. Verification of wall systems fire behavior was conducted as prescribed by NBR 5628. This research aims to comparatively analyze fire resistance in real scale load-bearing walls, considering thermal insulation, structural stability, and airtightness. The thickness of the coating and laying mortar were standardized for all specimens just varying brick geometry and septs design in blocks of EST 60, 100, and 140 class. The obtained results show that the compressive strength of the bricks can induce both the structural stability of the constructive systems and its thermal insulation, being a typically critical characteristic for clay brick walls in a building fire. The sample with the highest compressive strength obtained the shortest local displacement, contributing to mitigate the generation of fissures in the system, enhancing the thermal insulation of the clay brick wall, and, thereby, its fire resistance.

Keywords: Fire resistance. Load-bearing masonry. Clay bricks. Thermal insulation. Compressive strength.

¹Felipe Schneider de Lima

¹Universidade do Vale do Rio dos Sinos
São Leopoldo - RS - Brasil

²Rafael Trevisan

²Universidade do Vale do Rio dos Sinos
São Leopoldo - RS - Brasil

³Sérgio Klippel Filho

³Universidade do Vale do Rio dos Sinos
São Leopoldo - RS - Brasil

⁴Julio César Vechim

⁴Universidade do Vale do Rio dos Sinos
São Leopoldo - RS - Brasil

⁵Bernardo Tutikian

⁵Universidade do Vale do Rio dos Sinos
São Leopoldo - RS - Brasil

Recebido em 30/07/23
Aceito em 26/09/23

Contexto

A partir da ocorrência de grandes sinistros envolvendo estruturas em situações de incêndio surgiram regulamentações voltadas à segurança das edificações sob a ação de altas temperaturas, até as versões que vigoram atualmente (Sales *et al.*, 2019). Apoiada nesse contexto e reforçada pela entrada em vigor da norma brasileira de desempenho de edificações habitacionais, a NBR 15575-4 (ABNT, 2021a), ganhou força a necessidade de verificação do desempenho de sistemas construtivos em termos de segurança, além de habitabilidade e sustentabilidade. Segundo a normativa, os sistemas de vedação vertical internos e externos (SVVIE) têm incumbência de dificultar a ocorrência da inflamação generalizada e dificultar a propagação do incêndio, sendo o critério relacionado a este último requisito a resistência ao fogo do sistema construtivo. Ainda, são aplicáveis os requisitos de compartimentação contidos nas regulamentações estaduais dos corpos de bombeiros (Bolina *et al.*, 2020).

Amplamente utilizados como elementos construtivos para sistemas de vedação vertical, os blocos cerâmicos de alvenaria tem bom desempenho quando submetidos a elevadas temperaturas (Daware; Naser, 2021). Todavia, diversas são as variáveis que influenciam o comportamento de uma alvenaria em situação de incêndio. É comum associar a resistência ao fogo da alvenaria à sua espessura, porém devem ser levados em consideração outras variáveis, como as propriedades termofísicas dos materiais dos blocos (Keelson, 2018), a seção transversal do bloco (Al-Hadhrani; Ahmad, 2009), características da argamassa de assentamento e revestimento (Bellová, 2016; Bueno; Gonzalez; Tutikian, 2022) e a aplicação de carregamento na alvenaria, o que difere as alvenarias de vedação e estruturais.

A geometria dos blocos impacta fortemente a transmissão de calor ao longo de sua seção, afetando a capacidade de isolamento térmico da parede. A existência de vazados, sua quantidade, formato e disposição na seção transversal influenciam significativamente a resistência ao fogo de um sistema no qual o bloco está inserido. (Li *et al.*, 2008; Nguyen *et al.*, 2009). No que tange às dimensões dos blocos, Rosemann (2011) observa que, a transferência de calor por condução, se analisada isoladamente em uma parede, é influenciada pela espessura dos blocos. Segundo o autor, conforme se eleva a espessura de uma parede, eleva-se também o isolamento térmico, o que acarreta na elevação da resistência ao fogo do elemento. Hennemann *et al.* (2017), ao avaliarem a resistência ao fogo de alvenarias de 14 cm e 19 cm de espessura, concluíram que um incremento de 5 cm na espessura dos blocos incrementou o TRF de uma alvenaria em mais de 30% em uma análise experimental e em mais de 50% através do método teórico de análise.

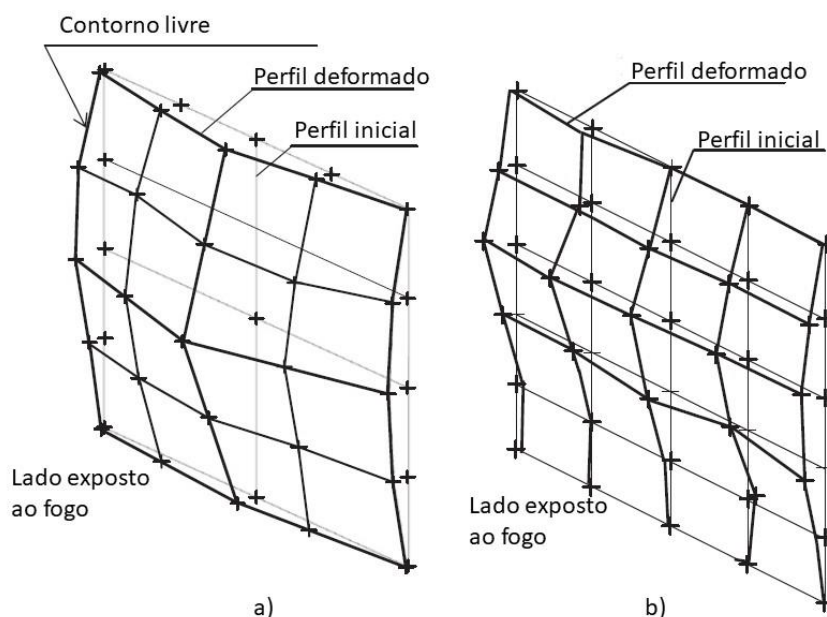
Também as propriedades termofísicas dos materiais constituintes dos blocos exercem grande influência na velocidade com que ocorre a transmissão de calor ao longo da seção da parede. Materiais que possuem menor condutividade térmica dificultam a transmissão de calor ao longo dos blocos; paralelamente, compostos com alto calor específico demandam maior quantidade de energia para que ocorra variação de temperatura ao longo da seção transversal da parede. A atuação simultânea dessas propriedades regula a maior parte da capacidade de isolamento térmico da alvenaria (Carvalho; Leal; Neto, 2021).

No que tange à influência da aplicação de cargas verticais na resistência ao fogo das alvenarias, Bueno (2019) aponta que paredes nas quais há aplicação de carregamento (alvenarias estruturais) tem configuração de deformações diferentes daquelas utilizadas como elementos sem função estrutural (Figura 1) observando também as condições de contorno da amostra na vinculação ao pórtico de ensaio. Tais afirmações foram validadas experimentalmente por Souza (2017).

Nguyen e Meftah (2012) destacam que paredes de alvenaria estrutural tendem a ter sua resistência ao fogo limitada pela perda da estabilidade estrutural, diferentemente do que ocorre com alvenarias de vedação, nas quais, segundo os autores, o isolamento térmico é o critério mais crítico. Bailey (2004) corrobora tal afirmação. Nadjai *et al.* (2006), ainda que não determinem como critério mais desfavorável, salientam que a curvatura em direção às altas temperaturas, aliada a degradação das propriedades dos materiais constituintes da alvenaria, pode resultar na perda de estabilidade estrutural, a depender ainda das condições de vinculação e da intensidade do carregamento aplicado.

Nesse contexto, existem lacunas a serem preenchidas no que tange a influência das características mecânicas da alvenaria em relação ao seu comportamento sob a ação de altas temperaturas. Ainda que sejam encontrados relatos na literatura, em especial a nível internacional, é latente a maior compreensão do comportamento dos materiais disponíveis no contexto brasileiro, considerando o que as características das alvenarias variam de acordo com as particularidades inerentes às matérias-primas disponíveis localmente e aos processos de fabricação adotados (Gil *et al.*, 2017; Zsembery; Lawrence, 2019).

Figura 1 - Representação de deformação de paredes de alvenaria expostas ao fogo (a) sem aplicação de carga e (b) com aplicação de carga



Fonte: Nguyen e Meftah (2012).

No Brasil, as paredes de alvenaria são consideradas como elementos de compartimentação horizontal, sendo integrantes do sistema passivo de proteção, devendo cumprir os requisitos da NBR 14432 (ABNT, 2000), podendo ser caracterizadas como paredes divisórias estruturais (com aplicação de carga), segundo a NBR 5628 (ABNT, 2022) ou paredes divisórias sem função estrutural, de acordo com a NBR 10636 (ABNT, 1989). Ainda, diferentemente das estruturas de concreto, que contam com a NBR 15200 (ABNT, 2012), apesar das exigências da NBR 15575-4 (ABNT, 2021a) relativas ao desempenho das estruturas de alvenaria em situação de incêndio, não há norma técnica específica que prescreva as condições de dimensionamento da resistência ao fogo de alvenarias estruturais; as normativas relacionadas remetem à utilização do Eurocode 6 (ECS, 2005) ou norma similar, como o ACI/TMS 216.1-14 (ACI, 2014) ou a AS 3700 (AS, 2011).

Assim sendo, objetivando contribuir com a evolução do comportamento deste sistema construtivo sob a ação de altas temperaturas e apoiar a discussão relativa à normatização nacional de dimensionamento de alvenarias estruturais em situação de incêndio, este trabalho avaliou a influência do uso de diferentes classes de resistência de blocos cerâmicos estruturais na verificação do seu desempenho frente à exposição às altas temperaturas, através da análise dos resultados experimentais de três amostras compostas por blocos cerâmicos estruturais de 14 cm espessura, sendo os blocos pertencentes às classes EST60, EST100 e ES140, segundo classificação da NBR 15270 (ABNT, 2017).

Método

As amostras foram compostas por blocos cerâmicos estruturais, assentados com juntas verticais e horizontais de argamassa cimentícia, com 1cm de espessura, precedidas de camada de chapisco rolado de 5mm. As faces das amostras foram revestidas com argamassa, com espessura de 1cm na face exposta e 2cm na face não exposta às altas temperaturas. As características dos materiais e das amostras são apresentadas nas Tabelas 1 e 2.

Diversas normas apresentam procedimentos para o dimensionamento de estruturas de alvenaria em situação de incêndio, a exemplo do Eurocode 6 (ECS, 2005), código americano ACI/TMS 216.1-14 (ACI, 2014) e o código australiano AS 3700 (AS, 2011).

Tabela 1 - Características dos blocos

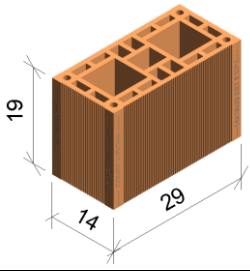
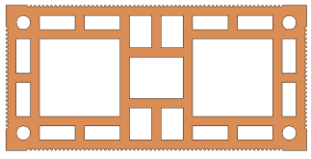
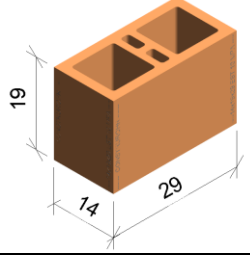
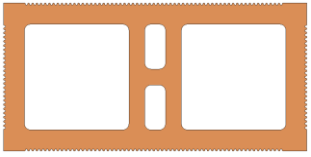
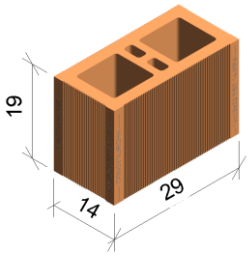
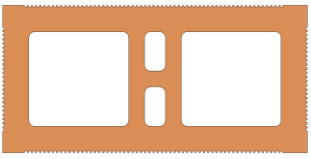
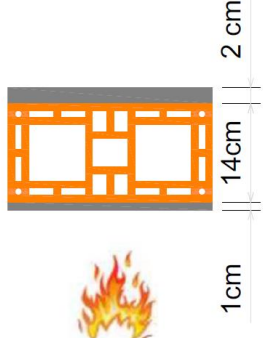
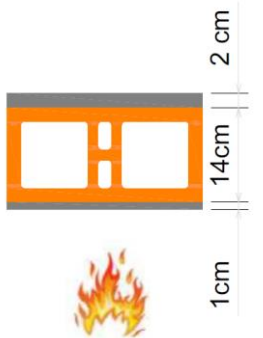
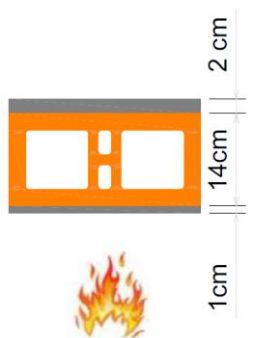
EST 60			<ul style="list-style-type: none"> - f_{bk}: 6 MPa - Área bruta: 406 cm² - Área líquida: 181,755 cm² - Volume Sólido: 5.340,74 cm³ - Percentual sólido: 44,76% - Transmitância térmica: 0,2830 W/m².K - Capacidade térmica: 72 kJ/m².K
EST 100			<ul style="list-style-type: none"> - f_{bk}: 10 MPa - Área bruta: 406 cm² - Área líquida: 190,23 cm² - Volume sólido: 3.947,49 cm³ - Percentual sólido: 46,79% - Transmitância térmica: 0,1518 W/m².K - Capacidade térmica: 87 kJ/m².K
EST 140			<ul style="list-style-type: none"> - f_{bk}: 14 MPa - Área bruta: 406 cm² - Área líquida: 221,23 cm² - Volume sólido: 4.498,49 cm³ - Percentual sólido: 54,49% - Transmitância térmica: 0,1518 W/m².K - Capacidade térmica: 87 kJ/m².K

Tabela 2 - Características das amostras ensaiadas

EST 60	EST 100	EST 140
		
<ul style="list-style-type: none"> - f_{bk}: 6 MPa - f_k: 2,10 MPa Revestimento: - 1 cm (face interna, exposta ao fogo) - 2 cm (face externa, não exposta) - Aderência: A3 – NBR 15258 (ABNT, 2021b) - Argamassa de assentamento vertical e horizontal: 1 cm - Transmitância térmica: 2,09 W/m².K - Capacidade térmica: 132 kJ/m².K 	<ul style="list-style-type: none"> - f_{bk}: 10 MPa - f_k: 4,20 MPa Revestimento: - 1 cm (face interna, exposta ao fogo) - 2 cm (face externa, não exposta) - Aderência: A3 – NBR 15258 (ABNT, 2021b) - Argamassa de assentamento vertical e horizontal: 1 cm - Transmitância térmica: 2,87 W/m².K - Capacidade térmica: 147 kJ/m².K 	<ul style="list-style-type: none"> - f_{bk}: 15 MPa - f_k: 5,88 MPa Revestimento: - 1 cm (face interna, exposta ao fogo) - 2 cm (face externa, não exposta) - Aderência: A3 – NBR 15258 (ABNT, 2021b) - Argamassa de assentamento vertical e horizontal: 1 cm - Transmitância térmica: 2,52 W/m².K - Capacidade térmica: 177 kJ/m².K

A determinação da resistência ao fogo da alvenaria através do Eurocode 6 (ECS, 2005) é realizada a partir do tipo de bloco utilizado, dos materiais que compõe o bloco e do revestimento aplicado nas alvenarias. A normativa possibilita a avaliação de uma determinada alvenaria por meio de ensaio experimental, métodos tabulares (especificados na norma) ou modelos numéricos elaborados com auxílio de softwares de MEF. Considerando as características das amostras (Tabela 2), e considerando a relação entre solicitações de cálculo em temperatura ambiente e em situação de incêndio (α) igual a 1,0, a partir do emprego do método tabular as três amostras podem ser classificadas como capazes de atender ao critério REI (resistência, estanqueidade e isolamento térmico) por 240 min.

O código americano ACI/TMS 216.1-14 (ACI, 2014) prevê a verificação de alvenarias estruturais em situação de incêndio através da determinação da espessura equivalente necessária para garantir o desempenho desejado, sendo a espessura equivalente determinada a partir do tipo de bloco e camadas de revestimento do sistema. Considerando as características das amostras, são obtidos os valores de espessura equivalente correspondentes a 7,65, 6,04 e 6,67 (amostras EST 60, EST 100 e EST 140, respectivamente), que, aliadas ao revestimento aplicado na face exposta ao fogo, indicam um TRF de 80 min, considerando a característica corta fogo (atendimento aos critérios de estabilidade estrutural, isolamento térmico e estanqueidade).

O código australiano AS 3700 (AS, 2011), por sua vez, permite a especificação das alvenarias em projeto a partir dos critérios tabelados na norma, com base na esbeltez da alvenaria, tipo de bloco e espessura, e também através de ensaios experimentais. Considerando os dados tabelados, as amostras do presente trabalho proporcionam o atendimento ao critério de estabilidade estrutural e estanqueidade por 240 min, e do isolamento térmico por 180 min, definindo o TRF dos sistemas no valor de 180 min. A Tabela 3 reúne os TRF's atribuídos para as amostras analisadas neste trabalho com base nos códigos europeu, americano e australiano.

De modo a verificar a capacidade de resistência ao fogo dos sistemas frente aos requisitos normativos, amostras em escala real foram executadas dentro de estruturas metálicas móveis, proporcionando a movimentação das amostras dentro das dependências do laboratório. Tais estruturas possuem uma viga posicionada na parte inferior da amostra, para o posicionamento de três pistões hidráulicos para aplicação da carga. Ainda, as amostras foram executadas com superfície exposta a altas temperaturas de 2,50x2,50 metros e posicionadas, individualmente, em um forno vertical calibrado e com uma modulação dos blocos conforme ilustra a Figura 2.

As amostras foram ensaiadas com 28 dias de tempo de cura e foram executadas no interior das dependências do referido laboratório, por mão de obra especializada e com acompanhamento técnico. As etapas de execução estão ilustradas pela Figura 3.

Tabela 3 - TRF das amostras segundo as normas europeia, americana e australiana

Amostra	Tempo de resistência ao fogo (min)		
	Eurocode 6 (ECS, 2005)	ACI/TMS 216.1-14 (ACI, 2014)	AS 3700 (AS, 2011)
EST 60	240	80	180
EST 100	240	80	180
EST 140	240	80	180

Figura 2 - Composição da modulação das amostras

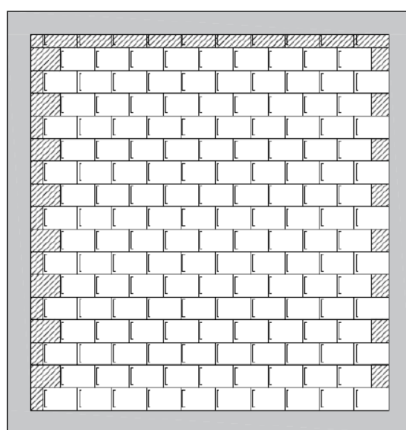


Figura 3 - Execução de uma das amostras ensaiadas



Os ensaios foram feitos de acordo com as recomendações das normas NBR 5628 (ABNT, 2022), AS 1530 (AS, 2005) e E 119 (ASTM, 2016), com objetivo da determinação do tempo de resistência ao fogo do sistema construtivo quando exposto às temperaturas, em função do tempo. Durante os ensaios, foi verificada a resistência mecânica, estanqueidade à passagem de gases quentes e fumaça e o isolamento térmico das amostras.

O forno vertical normatizado, utilizado para verificar o desempenho das amostras frente a altas temperaturas, possui sistema de carregamento vertical, quatro queimadores alimentados com gás liquefeito de petróleo (GLP), e termopares para coleta de dados de temperatura e automação do funcionamento do forno para realizar o aquecimento de acordo com as prescrições.

A amostra em análise foi acoplada no forno vertical e, desde o início do ensaio, foi monitorada por meio de termopares na sua face exposta e não exposta às altas temperaturas, utilizando cinco termopares do tipo K, com diâmetro de 1,5 mm, na face exposta ao fogo, e cinco termopares do tipo T, de diâmetro 0,7 mm, na face não exposta ao fogo. A posição e número de cada um dos termopares, tanto na face exposta quanto na não exposta às altas temperaturas, está presente na Figura 4, na qual a posição dos termopares internos (n° 1 a 5) e externos (n° 6 a 10) coincide e cumpre com os preceitos de posicionamento da norma de ensaio.

Resistência mecânica

Com a finalidade de representar a carga incidente nas paredes de edificações com sistemas em alvenaria estrutural, a amostra foi submetida a um carregamento. Foram avaliados, no decorrer do ensaio, deslocamentos (no ponto central de cada amostra), deformações ou sinais de instabilidade da amostra, que indiquem a perda de resistência mecânica do sistema.

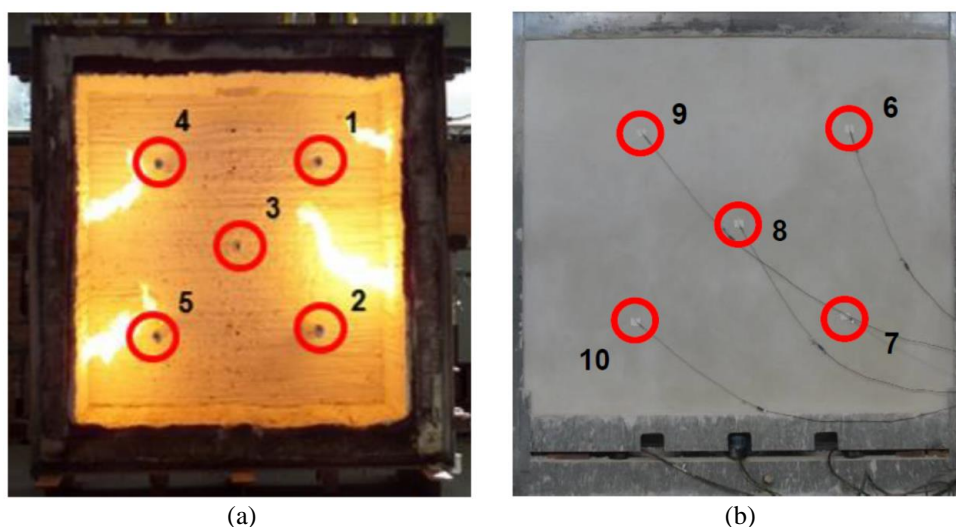
A carga que foi aplicada, para a avaliação de cada um dos sistemas, foi definida com base no estudo de Prager *et al.* (2020), sendo de 100 kN/m, correspondendo, para a amostra de menor resistência mecânica (EST 60), a menos de 10% da carga admissível, considerando a ponderação de resistência, de acordo com a NBR 16868-1 (ABNT, 2020).

O carregamento consiste em uma pré-carga, realizada antes do início de aplicação das altas temperaturas, por 15 minutos de duração, e foi mantida durante todo período de ensaio e replicada após 24 horas do término do ensaio. Nas situações nas quais a amostra não resistiu ao carregamento, ou na impossibilidade de aplicá-lo, o tempo de resistência ao fogo da amostra equivale a 80% do tempo total em que esta atendeu aos requisitos definidos.

Estanqueidade

A passagem de gases quentes e fumaça foram verificadas na superfície externa da amostra, com a finalidade de avaliação da estanqueidade do sistema ao longo do ensaio, por meio da tentativa de inflamação de um chumaço de algodão, previamente seco em estufa, posicionado a uma distância de 1 a 3 cm das fissuras presentes na amostra, quando exposto por dez segundos.

Figura 4 - Numeração dos termopares (a) internos, no interior do forno, e (b) externos, na face da amostra não exposta ao fogo



Isolamento térmico

A face não exposta ao fogo teve as temperaturas avaliadas para verificação do isolamento térmico frente às altas temperaturas. A temperatura limite, de acordo com a norma de ensaio, é a temperatura média (média aritmética dos cinco termopares da face externa/não exposta) menor do que 140 °C, e não ultrapassar 180 °C em algum dos termopares, sendo considerados estes limites acrescidos da temperatura ambiente.

Resultados e discussões

As amostras foram submetidas 28 dias após sua execução ao ensaio de resistência ao fogo, segundo os procedimentos estabelecidos nas normas NBR 5628 (ABNT, 2022), AS 1530 (AS, 2005) e E119 (ASTM, 2016), sendo a curva de aquecimento prevista na ISO 834-8 (ISO, 2015).

Os ensaios tiveram durações distintas para cada modelo de bloco cerâmico utilizado, sendo que as durações estão presentes na Tabela 4, na qual fica evidente um tempo de ensaio reduzido, em comparação às demais, na amostra EST 100, e também na EST 60, decorrente da perda de capacidade resistente desta amostra. A determinação do TRF de cada amostra é composta pela verificação da resistência mecânica, estanqueidade e isolamento térmico, sendo que, para as amostras analisadas, o fator determinante para classificação foi o isolamento térmico.

As paredes com os blocos EST 60 e EST 100 excederam os limites de temperatura considerados para caracterizar a amostra como capaz de fornecer o isolamento térmico adequado, implicando na necessidade de término do ensaio antes do período esperado, tendo em vista que não haveria justificativa de seguir o ensaio após a amostra ter sido desclassificada em termos da temperatura média da face não exposta ao fogo.

Resistência mecânica

As amostras foram submetidas a carregamento vertical de 100 kN/m ao longo dos ensaios. Todas as amostras mantiveram-se íntegras ao longo do período, não apresentando alterações que caracterizassem a perda da integridade estrutural dos sistemas. As deformações horizontais ao longo da execução dos ensaios foram monitoradas, conforme apresentam a Figura 5 e a Tabela 5.

As amostras EST 60 e EST 100 apresentam deformação acentuada em direção às chamas no interior do forno vertical nos primeiros 20 min de ensaio. Este comportamento é atribuído ao aumento abrupto de temperatura ao qual a face exposta ao fogo é submetida no início do ensaio (Nguyen; Meftah, 2012). A amostra EST 140 também apresenta deformação em direção às chamas após o início do aquecimento, porém de forma consideravelmente mais suave, alcançando aos 20 min o equivalente a 35% da deformação total observada. Cabe ainda destacar a diferença entre o tempo transcorrido para que a deformação máxima apresentada pelas amostras fosse atingida, conforme os dados expostos na Tabela 5.

Tabela 4 - Tempo de ensaio de cada uma das três amostras

Sistema	EST 60	EST 100	EST 140
Tempo de ensaio (minutos)	225	185	240
TRF obtido em ensaio	187	139	240

Figura 5 - Deformação horizontal das amostras durante o ensaio

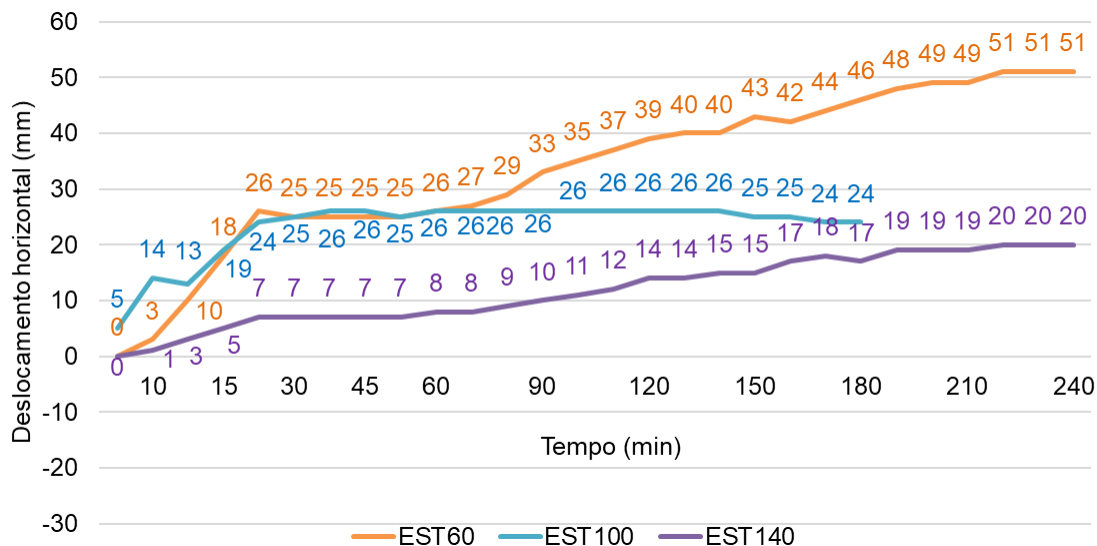


Tabela 5 - Deslocamento horizontal máximo de cada uma das amostras

Sistema	EST 60	EST 100	EST 140
Deslocamento horizontal máximo (mm)	51 (215 minutos)	26 (40 minutos)	20 (220 minutos)

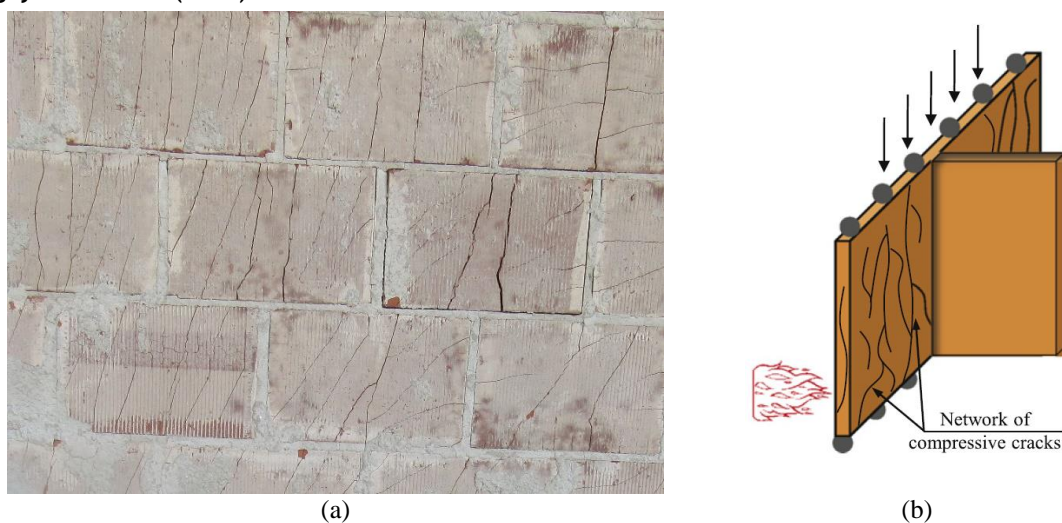
A amostra EST 60 atingiu o deslocamento máximo em 110 minutos, tempo similar ao observado por Souza (2017) em amostras compostas pelo mesmo tipo de bloco, que foi em 90 min. A amostra EST 140, de forma antagônica, apresentou deformação de caráter estável e crescimento gradativo, alcançando a deformação máxima no período final de ensaio. Este comportamento pode estar relacionado a maior resistência à compressão da amostra, sendo seu f_k (5,88 MPa) 40% superior ao f_k da amostra EST 100 e 110% superior ao da amostra EST 60.

A amostra EST 100, por sua vez, alcançou a deformação máxima aos 40 min, tempo consideravelmente inferior às amostras EST 60 e 140. Tal comportamento pode estar relacionado com a ocorrência de esmagamento da face exposta ao fogo dos blocos, seguida de *spalling* com desprendimento de pequenos fragmentos, conforme é possível observar na Figura 8a, que apresenta o aspecto pós ensaio da face exposta ao fogo da amostra EST 100, sendo este comportamento observado anteriormente por Nguyen e Meftah (2012) (Figura 8b).

Para Nguyen e Meftah (2012), o surgimento de *spalling* localizado tende a ser decisivo para a perda de estabilidade estrutural da parede, o que não ocorreu com a amostra EST 100, em função do *spalling* ter ficado restrito a face do bloco voltada às altas temperaturas, não se propagando para o restante da seção transversal da parede. Ainda segundo os autores, esta fragmentação localizada ocasiona o surgimento de momentos fletores devido à excentricidade causada pela fragmentação, o que pode ter ocorrido logo na fase inicial do ensaio.

O carregamento aplicado, transcorridas 24 horas após o término do ensaio, ocorreu sem que as amostras apresentassem alterações em seu comportamento mecânico, preservando sua condição de estabilidade estrutural.

Figura 8 - Face exposta às chamas após o ensaio (a) e esmagamento das paredes do bloco relatados por Nguyen e Meftah (2012)



Fonte: (a) elaborada pelos autores e (b) adaptado de Nguyen e Meftah (2012).

Estanqueidade

No decorrer do ensaio, para as três amostras analisadas, foram realizados os testes de estanqueidade. As amostras não apresentaram fissuras ou pontos nos quais fosse possível identificar visualmente a passagem de gases quentes, fazendo com que os testes de estanqueidade fossem realizados nos pontos de maior temperatura das faces não expostas ao fogo, identificados com auxílio da câmera termográfica. Em todas as verificações não foi constatada perda de estanqueidade em nenhuma das amostras. A Figura 9 ilustra, por exemplo, um teste de estanqueidade na amostra EST 140 aos 220 minutos de ensaio.

Isolamento térmico

Nas três amostras ensaiadas, a temperatura média dos cinco termopares internos se encontrou dentro dos limites definidos, atestando a validade dos ensaios frente aos requisitos. A Figura 10 ilustra, por exemplo, os limites estabelecidos em norma e o valor médio de temperatura registrado por termopares no interior do forno durante o ensaio da amostra EST 140.

Com exceção da amostra EST 140, que manteve o atendimento aos critérios de resistência ao fogo ao longo dos 240 minutos de ensaio, as demais amostras deixaram de atender aos limites normativos relativos à temperatura na face não exposta ao fogo, definindo seus TRF's, sendo eles iguais a 187 min (EST 60) e 139 min (EST 100), a partir do limite de temperatura médio entre os termopares da face não exposta ao fogo, conforme indica a norma de ensaio. A Figura 11 apresenta o gráfico das temperaturas observadas nos cinco termopares posicionados na face não exposta ao fogo da amostra EST 60, ao longo da execução do ensaio.

Neste caso, para a amostra EST 60, a temperatura ambiente era de 31 °C e a presente amostra apresentou resultado da média das temperaturas e temperaturas individuais de cada termopar, abaixo dos limites até o período de 180 minutos de ensaio. Concluindo-se que a amostra EST 60 obteve um tempo de resistência ao fogo (TRF) de 180 minutos. A amostra ultrapassou o limite máximo permitido para a temperatura média dos termopares na face não exposta ao fogo ao atingir 171,5 °C, aos 187 min de ensaio.

O gráfico das temperaturas da amostra EST 60 apresentou um crescimento das temperaturas até o valor de 80 °C, por volta dos 65 min de ensaio, seguido de evolução lenta pelos próximos 80 min, até que as temperaturas atingissem o patamar de 100 °C, instante a partir do qual as temperaturas voltaram a subir rapidamente. Tal comportamento está relacionado com a umidade presente na amostra, que consome energia decorrente do aquecimento até que o processo de evaporação expulse a maior parte da água, corroborando as observações de Nguyen *et al.* (2009), Nguyen e Meftah (2012, 2014), Buson *et al.* (2012), Hennemann *et al.* (2017) e Zhang *et al.* (2018). A evaporação tornou-se visível a partir dos 4 min de ensaio.

Já no ensaio da amostra EST 100, a temperatura ambiente foi de 18 °C e, por meio das temperaturas externas (face não exposta ao fogo), a amostra teve a média de temperatura dos cinco termopares excedendo o limite da norma de ensaio a partir dos 139 minutos de ensaio até sua finalização. Ainda, a temperatura do termopar

de nº 10 excedeu o limite (198 °C neste caso) aos 149 minutos de ensaio, o que também seria uma condição para que o ensaio fosse interrompido, caso a amostra ainda não teria sido desclassificada pela média das temperaturas, de acordo com a norma. Desta forma, o referido sistema obteve um tempo de resistência ao fogo (TRF) de 139 minutos, cumprindo, neste período, os requisitos impostos. A Figura 12 mostra a evolução das temperaturas médias na face não exposta ao fogo da amostra EST 100.

Nesta amostra, nota-se que o patamar de estabilidade atribuído a energia consumida pelo processo de evaporação da umidade da amostra foi consideravelmente mais curto do que o observado nas amostras EST 60 e EST 140, com duração aproximada de 40 min. Considerando as afirmações de Nguyen *et al.* (2009), Nguyen e Meftah (2012, 2014), este comportamento pode estar relacionado ao menor volume de parcela sólida apresentado pelo bloco EST 100. Com volume sólido inferior, conseqüentemente, a amostra contém menor volume de umidade retida, demandando menos energia para sua evaporação e, por conseqüência, apresentando menor duração do platô de temperatura constante entre 80 °C e 100 °C.

Figura 9 - Amostra EST 140: Realização de teste de estanqueidade aos 220 minutos



Figura 10 - Amostra EST 140: Limites e valor médio de temperatura registrada na parte interna do forno

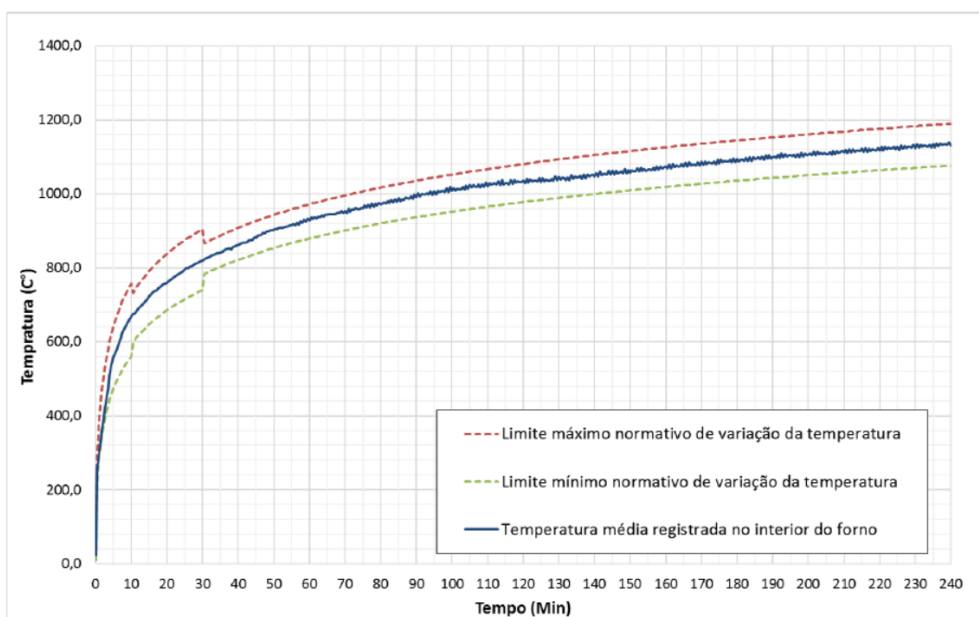


Figura 11 - Amostra EST 60: Temperatura média registrada na face não exposta às chamas

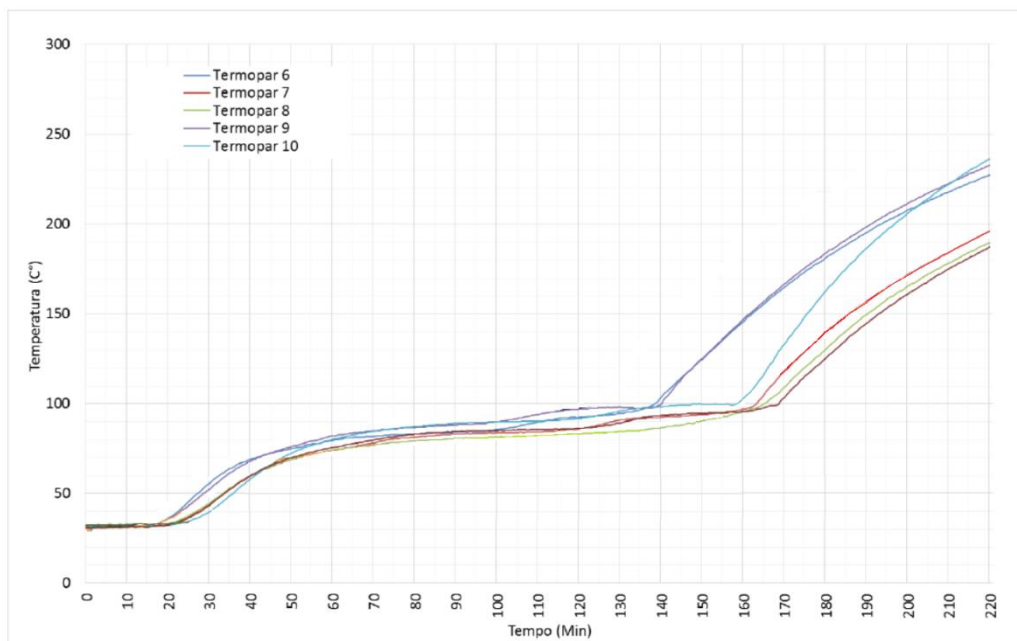


Figura 12 - Amostra EST 100: Valor médio de temperatura registrado na face não exposta às altas temperaturas

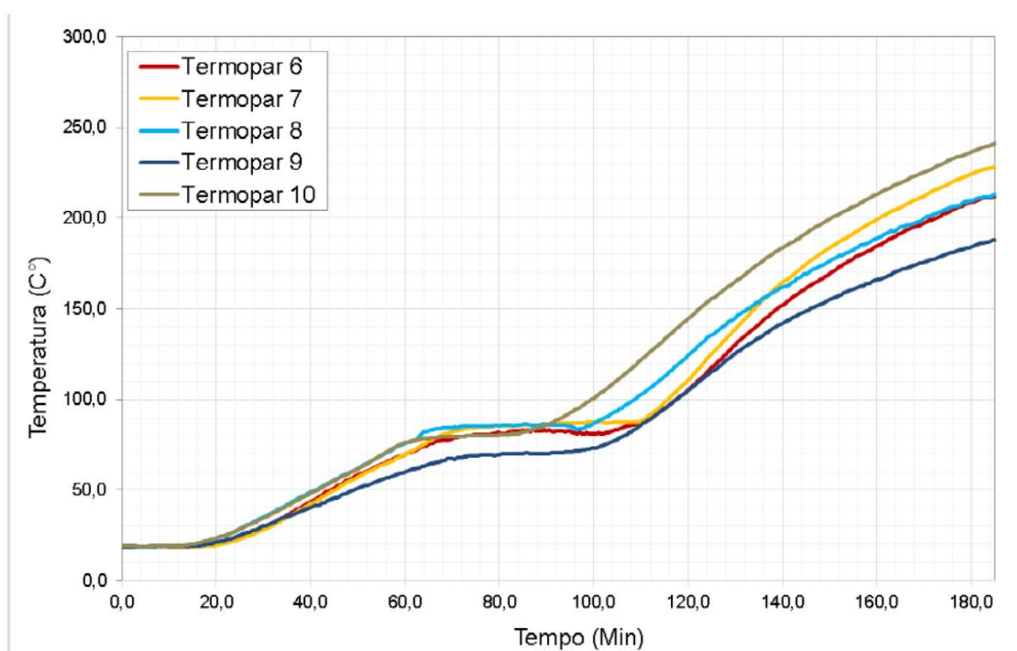
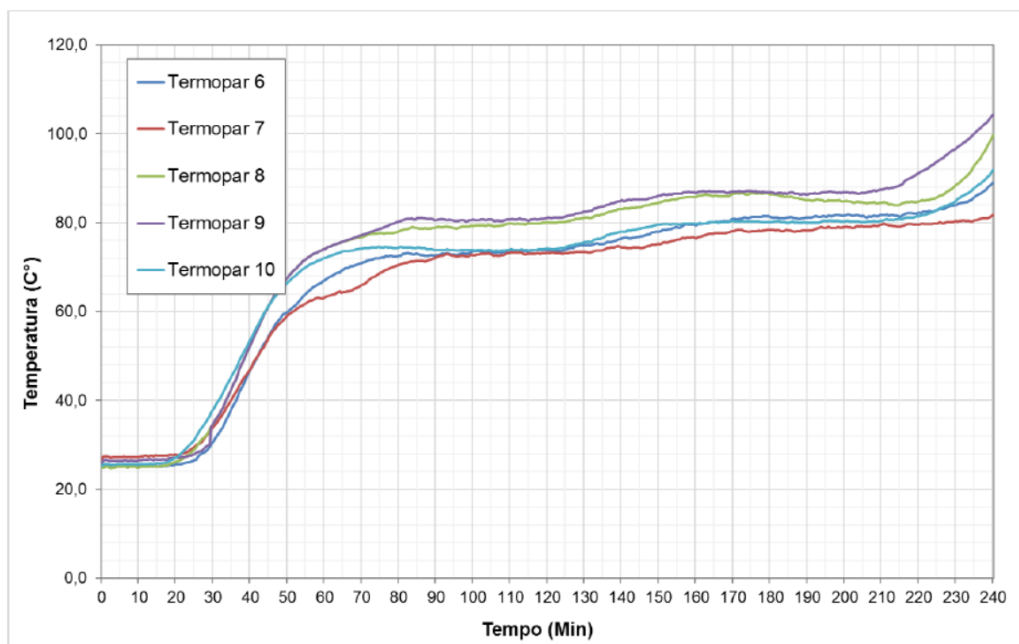


Figura 13 - Amostra EST 140: Valor médio de temperatura registrado na face não exposta às altas temperaturas



Outro fator que pode ter contribuído para o menor TRF em relação às outras amostras, foi o *spalling* observado na face não exposta ao fogo. Este fenômeno também pode ter sido responsável pelo deslocamento do revestimento argamassado, também na face exposta ao fogo.

Por fim, os resultados de temperatura na face não exposta às altas temperaturas da amostra EST 140 estão presentes na Figura 13, considerando uma temperatura ambiente, no momento de ensaio, de 28,8 °C.

Assim como as demais amostras, as temperaturas na face não exposta ao fogo apresentaram crescimento acentuado na fase inicial do ensaio, seguido de comportamento estável (platô) de temperaturas entre 80 °C e 100 °C, para posteriormente apresentarem novo crescimento abrupto. Contudo, o patamar de estabilidade se assemelhou ao comportamento observado na amostra EST 60, também mantendo-se por um intervalo de tempo maior que a amostra EST 100.

A amostra manteve o atendimento a todos os requisitos durante todos os 240 min de ensaio, o que caracteriza um TRF de 240 min, sendo o maior dentre as três composições testadas.

Conclusão

Esse estudo avaliou três diferentes alvenarias estruturais com variação da resistência característica à compressão dos blocos utilizados. Pode-se citar que em nenhum dos sistemas houve falhas no que tange a estabilidade estrutural e a estanqueidade à passagem de gases e fumaça. Em termos de deslocamento horizontal sofrido pelas paredes, os menores valores foram inferiores na amostra de maior resistência, havendo um comportamento fora do esperado apenas na amostra EST 100, a qual teve um deslocamento máximo precoce frente ao tempo de ensaio.

Pode-se concluir:

- o maior TRF foi observado na amostra EST 140, ou seja, a maior na hierarquia de resistências; contudo, o TRF da amostra EST100 foi inferior ao apresentado na amostra EST60;
- a condição de reprovação das amostras EST 60 e EST 100 foi o isolamento térmico, ratificando as observações de Beall (1994) e os resultados de Rosemann (2011), Souza (2017) e Hennemann *et al.* (2017), que observaram a perda do isolamento térmico como critério crítico relativo à resistência ao fogo de alvenarias de blocos cerâmicos, o que, para Nguyen e Mefteh (2012), tratava-se de uma hipótese válida para alvenarias de vedação, ou seja, sem aplicação de carga. A amostra EST 140 atendeu a todos os requisitos durante os 240 min de ensaio;

- (c) a amostra EST 60 apresentou TRF inferior ao previsto no Eurocode 6 (ECS, 2005), superior ao previsto no ACI/TMS 216.1-14 (ACI, 2014) e igual ao previsto na norma AS 3700 (AS, 2011); a amostra EST 100 apresentou TRF inferior ao previsto pelas normas Eurocode 6 (ECS, 2005) e AS 3700 (AS, 2011), e valor superior ao previsto no ACI/TMS 216.1-14 (ACI, 2014); a amostra EST 140 apresentou TRF igual ao previsto no Eurocode 6 (ECS, 2005) (superior aos valores das normas ACI/TMS 216.1-14 (ACI, 2014) e AS 3700 (AS, 2011));
- (d) mesmo alvenarias estruturais, a despeito da observação de Nguyen e Meftah (2012), a ocorrência de *spalling* pode não se propagar ao longo de toda a parede, conforme observado na amostra EST 100, em que apenas a face voltada ao fogo dos blocos apresentou fissuras e lascamentos, preservando dessa forma a estabilidade estrutural do sistema e mantendo o isolamento térmico como o critério crítico. Contudo, a ocorrência do *spalling* localizado parece ter induzido maior deformação horizontal e a presença massiva de fissuras que podem ter contribuído para facilitar a passagem de calor ao longo da seção transversal da amostra, contribuindo para diminuição do seu isolamento térmico, explicando o menor TRF apresentado entre as amostras analisadas;
- (e) além de maior isolamento térmico, a amostra composta pelo bloco de maior resistência à compressão também apresentou o menor deslocamento horizontal entre as amostras ensaiadas;
- (f) o maior isolamento térmico foi observado na amostra de maior capacidade térmica e de maior condutividade térmica (EST 140);
- (g) o menor deslocamento apresentado pela amostra de maior resistência à compressão (EST 140), bem como a evolução de comportamento estável da deformação, pode ter contribuído para o não surgimento de fissuras decorrentes da deformação e de *spalling* localizado (observados na amostra EST100, cujo bloco possui seção transversal similar), contribuindo para a manutenção do isolamento térmico da parede e assim atuado favoravelmente para sua resistência ao fogo; e
- (h) a geometria dos blocos aparenta ter exercido influência nos resultados, tendo em vista que a amostra EST 60 apresentou maior TRF que a amostra EST 100, mesmo sendo composta por blocos estruturais de menor resistência à compressão, possuindo, porém, maior volume sólido, além de dispor de vazados ao longo de sua seção transversal, o que é favorável para desacelerar a transmissão de calor ao longo da parede por meio de sua parcela sólida, pelo mecanismo de condução.

As evidências apontadas acima indicam que a capacidade resistente às cargas axiais da alvenaria pode influenciar a resistência ao fogo do sistema construtivo, não apenas em termos do critério da estabilidade estrutural como também em relação ao critério do isolamento térmico da parede, haja vista que essa foi a condição de reprovação observada nas duas amostras analisadas que não superaram o TRF de 240 min. A análise conjunta dos gráficos de evolução das temperaturas nas faces não expostas às chamas e das deformações horizontais observadas, pode indicar que a maior capacidade resistente, por possibilitar menores deslocamentos horizontais, pode moderar a formação de fissuras na face exposta ao fogo e assim contribuir para reduzir a transmissão de calor ao longo de sua seção transversal. Os resultados reforçam também a forte influência das características termofísicas do sistema construtivo, haja vista que a amostra EST100, apesar de ocupar o lugar intermediário na hierarquia de resistências avaliadas neste estudo, apresentou o menor TRF entre as amostras, o que pode estar ligado ao fato desta amostra possuir a maior transmitância térmica entre as três paredes analisadas.

Pode-se destacar como possibilidades de trabalhos futuros para prosseguimento da discussão do tema:

- (a) avaliação experimental de amostras com a presença de grautes e armaduras, responsáveis por incrementar a resistência mecânica do sistema construtivo;
- (b) avaliar por via experimental amostras cuja variável consista na resistência à compressão da argamassa de assentamento, que impacta a resistência da alvenaria às cargas axiais; e
- (c) desenvolvimento e calibração de modelos numéricos capazes de expressar o comportamento do sistema construtivo mediante a ação conjunta de ações térmicas e mecânicas.

Referências

- AL-HADHRAMI, L. M.; AHMAD, A. Thermal performance and economic assessment of masonry bricks. **Thermal Science**, v. 13, n. 4, p. 221–232, 2009
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI/TMS 216.1**: code requirements for determining fire resistance of concrete and masonry construction assemblies. Michigan, 2014.

- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **E119-16a**: standard test methods for fire tests of building construction and materials. West Conshohocken, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10636**: paredes divisórias sem função estrutural: determinação de resistência ao fogo: método de ensaio. Rio de Janeiro, 1989.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14432**: exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações: procedimento. Rio de Janeiro, 2000.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15200**: projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio. Rio de Janeiro, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15258**: argamassa para revestimento de paredes e tetos: determinação da resistência potencial de aderência à tração. Rio de Janeiro, 2021b.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15270**: componentes cerâmicos: blocos e tijolos para alvenaria. Rio de Janeiro, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575-4**: edificações habitacionais: desempenho: parte 4: requisitos para os sistemas de vedações verticais internas e externas: SVVIE. Rio de Janeiro, 2021a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16868-1**: alvenaria estrutural: parte 1: projeto. Rio de Janeiro, 2020.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5628**: componentes construtivos estruturais: determinação da resistência ao fogo. Rio de Janeiro, 2022.
- AUSTRALIAN STANDARD. **AS 1530**: methods for fire tests on building materials, componentes and structures. Sidney, 2005.
- AUSTRALIAN STANDARD. **AS 3700**: masonry structures. Sydney, 2011.
- BAILEY, C. Structural fire design: core or specialist subject? **The Structural Engineer**, v. 82, n. 9, p. 32–38, 2004.
- BEALL, C. **Calculating masonry's fire resistance**. Masonry Construction Magazine, 1994. Technical Report.
- BELLOVÁ, M. Fire walls made from concrete and masonry: barriers against a fire spreading. **Key Engineering Materials**, v. 691, p. 408–419, 2016.
- 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.
- BUENO, G. M. **Avaliação da resistência ao fogo de paredes de alvenaria de blocos cerâmicos com instalações prediais**. São Leopoldo, 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2019.
- BUENO, G. M.; GONZALEZ, M. A. S.; TUTIKIAN, B. F. Verificação da influência da exposição às altas temperaturas na aderência do revestimento de argamassa de paredes de alvenaria de blocos cerâmicos. **Matéria**, Rio de Janeiro, v. 27, n. 1, p. e13152, 2022.
- BUSON, M. *et al.* Fire resistance of walls made of soil-cement and Kraftterra compressed earth blocks. **Fire and Materials**, v. 37, n. 7, p. 547-562, 2012.
- 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.
- DAWARE, A.; NASER, M. Z. Fire performance of masonry under various testing methods. **Construction and Building Materials**, v. 289, p. 123183, 2021.
- EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **Eurocode 6**: design of masonry structures: part 1-2: general rules: structural fire design. Bruxelas, 2005.
- GIL, A. *et al.* Comparative study of concrete panels' fire resistance. **Aci Materials Journal**., v. 114, p. 755–762, 2017.

HENNEMANN, G. G. *et al.* Avaliação teórico-experimental da influência da espessura de alvenaria na resistência ao fogo de sistemas verticais de vedação. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 17, n. 4, p. 183–195, out./dez. 2017.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 834-1**: fireresistance tests: elements of building construction: part 1: general requirements. Geneva, 2015.

KEELSON, H. **Fire resistance quantification of non-loadbearing masonry walls**: numerical study. Ottawa, 2018. 192 f. Thesis (Master of Applied Science in Civil Engineering) – Department of Civil and Environmental Engineering, Carleton University, Ottawa, 2018.

LI, J. *et al.* Effect of the insulation materials filling on the thermal performance of sintered hollow bricks. **Casies Studies in Thermal Engineering**, v. 11, p. 62-70, 2018.

NADJAI, A. *et al.* Compartment masonry walls in fire situations. **Fire Technology**, v. 42, n. 3, p. 211–231, 2006.

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. D.; MEFTAH, F. Behavior of hollow clay brick masonry walls during fire: part 2: 3D finite element modelling and spalling assessment. **Fire Safety Journal**, v. 66, p. 35-45, 2014.

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

PRAGER, G. *et al.* Experimental analysis of fire resistance of mortar coatings on structural masonry walls. **Revista de la Construcción**, v. 19, n. 3, 2020.

ROSEMANN, F. **Resistência ao fogo de paredes de alvenaria estrutural de blocos cerâmicos pelo critério de isolamento térmico**. Florianópolis, 2011. 138 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011.

SALES, C. A. S. *et al.* Análise da resistência ao fogo de blocos de alvenaria cerâmica de vedação utilizando proteção de tinta intumescente. **Revista ALCONPAT**, v. 10, n. 1, p. 15, 2019.

SOUZA, R. P. de. **Avaliação da Influência da espessura do revestimento argamassado e do carregamento no comportamento da alvenaria frente a altas temperaturas**. São Leopoldo, 2017. 133 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2017.

ZHANG, J. *et al.* Experimental and numerical study on compressive performance of perforated brick masonry after fire exposure. **Fire and Materials**, v. 43, n. 2, p. 200-218, 2018.

ZSEMBERY, S.; LAWRENCE, S. **Manual 2**: the properties of clay masonry units. 4. ed. St. Leonards: Think Brick, 2019.

Felipe Schneider de Lima

Conceitualização, Curadoria de dados, Metodologia, Pesquisa, Validação de dados e experimentos.

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil | Universidade do Vale do Rio dos Sinos | Av. Unisinos, 950, Cristo Rei | São Leopoldo - RS - Brasil | CEP 93022-750 | E-mail: felipe.lima@construohr.com.br

Rafael Trevisan

Redação do manuscrito original, Redação - revisão e edição, Pesquisa.

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil | Universidade do Vale do Rio dos Sinos | E-mail: rafael.trevisan94@gmail.com

Sérgio Klippel Filho

Redação do manuscrito original, Redação - revisão e edição, Pesquisa.

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil | Universidade do Vale do Rio dos Sinos | E-mail: engsergio@klippelengenharia.com

Julio César Vechim

Redação - revisão e edição.

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil | Universidade do Vale do Rio dos Sinos | E-mail: juliovechim@gmail.com

Bernardo Tutikian

Redação - revisão e edição, Supervisão.

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil | Universidade do Vale do Rio dos Sinos | E-mail: bftutikian@unisinos.br

Editor: **Marcelo Henrique Farias de Medeiros**

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.