



ANÁLISE TÉRMICA DE ALVENARIA ESTRUTURAL EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO: UM ESTUDO DO GRADIENTE TÉRMICO

Francielle da Silva Rodovalho

francielle_rodvalho@usp.br

Yagho de Souza Simões

yaghosimoes@usp.br

Marcio Roberto Silva Correa

marcio.correa@usp.br

Escola de Engenharia de São Carlos - EESC/ Universidade de São Paulo

Av. Trabalhador são-carlense, 400, Parque Arnold Schmidt. CEP 13566-590 - São Carlos - SP.

Resumo. *A alvenaria estrutural é um sistema construtivo amplamente utilizado nas cidades brasileiras e um mapeamento de incêndios em edificações indica uma forte concentração no tipo residencial. Porém, o Brasil ainda não possui métodos normatizados de dimensionamento de alvenaria estrutural em situação de incêndio, indicando a necessidade de pesquisas nessa área. Geralmente, quando ocorre incêndio em uma edificação, as paredes são aquecidas em apenas uma face, dando origem a um gradiente térmico. Assim, o objetivo do presente artigo foi analisar o gradiente térmico gerado pelo aquecimento diferencial de paredes constituídas por blocos cerâmicos. Foram elaborados modelos numéricos que representassem o campo térmico desenvolvido em paredes revestida e não revestida em argamassa, por meio do software ABAQUS®. Foi constatado que incêndios com taxas de aquecimento mais elevadas geram maiores gradientes térmicos, representando maiores riscos aos elementos estruturais e que tais gradientes térmicos são maiores quando as paredes são revestidas por argamassas. Além disso, verificou-se que a adequada calibração dos modelos permitirá futuras análises paramétricas.*

Palavras-chave: *Alvenaria estrutural, Bloco cerâmico, Incêndio, Gradiente térmico.*

1 INTRODUÇÃO

Os incêndios são caracterizados como uma ação excepcional que ocorre frequentemente em edificações. O desenvolvimento do incêndio depende de diversos fatores, como o tipo e quantidade de material combustível disponível no local, grau de ventilação do ambiente e características dos materiais de compartimentação.

Conforme Costa e Silva (2006) quanto maior o fator de abertura mais elevada é a temperatura máxima atingida pelo incêndio e menor é a sua duração, pois o combustível é consumido mais rapidamente. Além disso, maior será a temperatura máxima do incêndio quando os materiais da compartimentação forem mais resistentes à ação do fogo, uma vez que a propagação do fogo faz com que ocorra a diminuição da temperatura máxima durante o incêndio.

A alvenaria estrutural é amplamente utilizada nas cidades brasileiras. Em um mapeamento de incêndios em edificações feito por Corrêa *et al.* (2015), foi constatado que edificações do tipo residencial feitas com esse sistema construtivo são as mais atingidas por incêndio. Por essa razão, para garantir a segurança de seus usuários é necessário que a ação do fogo seja considerada no dimensionamento das estruturas.

O Brasil, no entanto, ainda não possui métodos normatizados de dimensionamento de alvenaria estrutural em situação de incêndio. Rosemann (2011) e Rigão (2012) avaliaram experimentalmente o comportamento de alvenaria estrutural constituída por blocos cerâmicos em elevadas temperaturas. Porém, o meio científico necessita de mais estudos em relação ao presente tema.

De acordo com Adreini *et al.* (2014) vários aspectos influenciam o comportamento da alvenaria em situação de incêndio, como a forma, geometria e textura dos blocos, teor de umidade, dimensões dos painéis, etc. Cada país possui especificações de geometria, capacidade resistente e espessura a serem seguidas, além de diferentes tipos de agregados, o que restringe a aplicação de normas internacionais.

Em construções correntes as paredes são aquecidas em apenas uma face o que promove a formação de uma curvatura devido ao gradiente de temperatura e desigual dilatação do material. Essa é a situação mais frequente em uma circunstância real de incêndio e a mais crítica, pois eleva os efeitos de segunda ordem, favorecendo a fissuração e a ruína do elemento estrutural.

Assim, o objetivo do presente trabalho é analisar o gradiente térmico gerado pelo aquecimento diferencial de paredes constituídas por blocos cerâmicos através de modelos numéricos desenvolvidos no *software* ABAQUS®, baseado no Método dos Elementos Finitos. Os experimentos feitos por Rosemann (2011) são utilizados para validar os modelos.

São consideradas paredes sem e com revestimento em argamassa do tipo mista, composta de cimento, cal e areia média. Diante do exposto, aplicam-se diferentes curvas de incêndio, obtidas com a variação da carga de incêndio e grau de ventilação, em apenas uma face das paredes. O intuito é estabelecer a situação de incêndio que apresenta o mais elevado gradiente térmico, representando a circunstância de maior risco.

2 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Paredes em alvenaria estrutural constituídas por blocos cerâmicos foram analisadas experimentalmente por Rosemann (2011). A resistência ao fogo das paredes foi avaliada por meio do critério de isolamento térmico, o qual é considerado atendido quando em qualquer ponto da superfície não exposta ao fogo a variação de temperatura não exceda 180°C e a variação média de temperatura nesta mesma superfície não exceda 140°C, conforme o Eurocode 6 (2005).

Rosemann (2011) ensaiou paredes com quatro diferentes composições, sendo estas: parede sem revestimento e sem preenchimento, parede com revestimento em ambos os lados, parede com preenchimento dos principais furos com areia e parede com preenchimento e revestimento em ambos os lados. Apenas um exemplar para cada arranjo foi ensaiado devido ao elevado custo dos experimentos, com dimensões de 2,70m de comprimento e 2,60m de altura.

A temperatura no interior do forno foi controlada através da curva padrão temperatura-tempo proposta pela ISO 834-1:1999. Uma face de cada parede foi exposta ao fogo enquanto a outra face estava exposta à temperatura ambiente. Foram realizadas medidas de temperatura nas faces não expostas ao fogo em intervalos de 5 minutos, até que a temperatura limite do critério de isolamento térmico fosse atingida.

A parede sem revestimento e preenchimento resistiu ao critério de isolamento durante 106 minutos. O autor observou que a utilização de revestimento aumentou em 85% a resistência ao fogo da alvenaria apesar de apresentar fissuras e arqueamento maior que no primeiro caso devido às diferentes dilatações térmicas de suas faces. A parede feita de blocos preenchidos com areia não apresentou fissuração e deformação significativa, além de exibir um aumento na resistência ao fogo de 129% em relação à primeira. O emprego de revestimento e preenchimento dos principais furos dos blocos com areia elevou em cerca de 280% a resistência ao fogo da alvenaria, apesar de apresentar fissuração e deslocamento transversal significativo.

Optou-se por analisar o gradiente térmico apenas das paredes de bloco cerâmico sem preenchimento, com e sem revestimento em ambas as faces e sem revestimento e com revestimento em ambos os lados, por estas serem as situações mais comuns de emprego da alvenaria estrutural. Além disso, o emprego de revestimento gerou um maior arqueamento, evidenciando o efeito do gradiente térmico.

3 VALIDAÇÃO DOS MODELOS

O campo térmico desenvolvido nas paredes foi representado utilizando apenas um bloco, pois o fluxo medido experimentalmente ocorreu na direção transversal às paredes. As juntas de argamassa não foram representadas. Utilizaram-se elementos tridimensionais possibilitando uma futura análise termo estrutural. As dimensões do bloco cerâmico empregado nas paredes sem revestimento e com revestimento estão ilustradas na Fig. 1. As medidas dos pequenos vazados foram estimadas com base no percentual total de vazios de 52% disponível em Rosemann (2011).

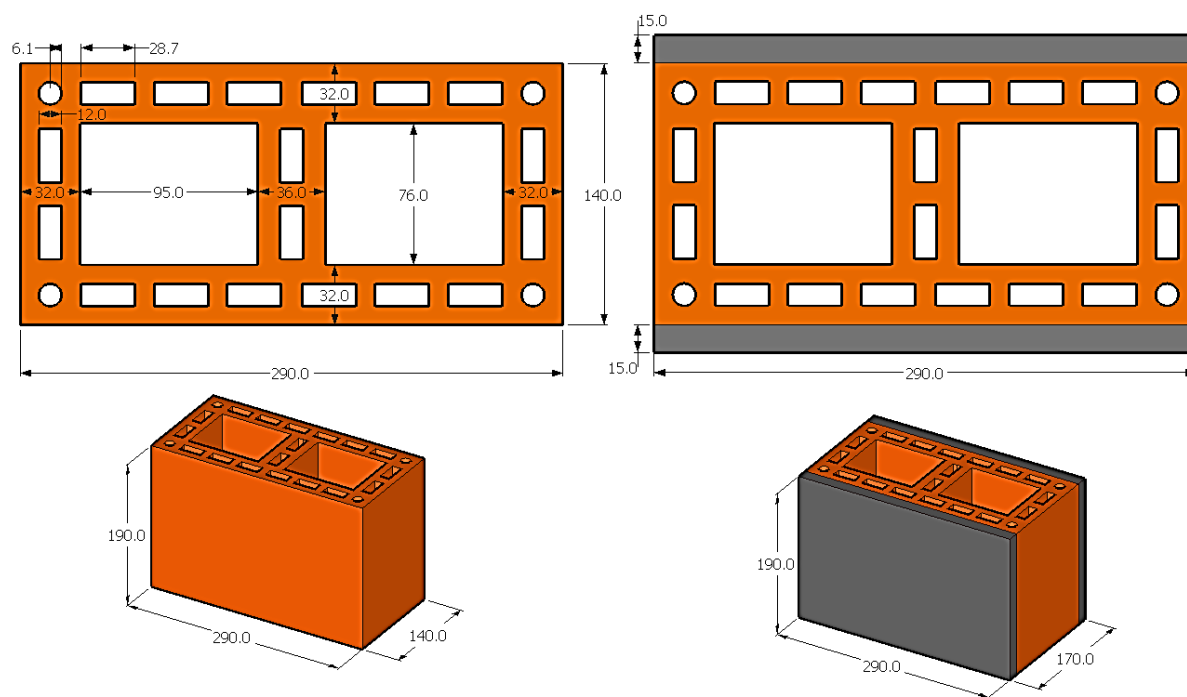


Figura 1. Dimensões do bloco cerâmico e do revestimento (mm)

Os elementos utilizados foram do tipo DC3D8 hexagonal linear da família “transferência de calor”, sendo 15750 para o bloco cerâmico e 5820 para os revestimentos em argamassa. As malhas utilizadas nos modelos estão dispostas na Fig. 2.

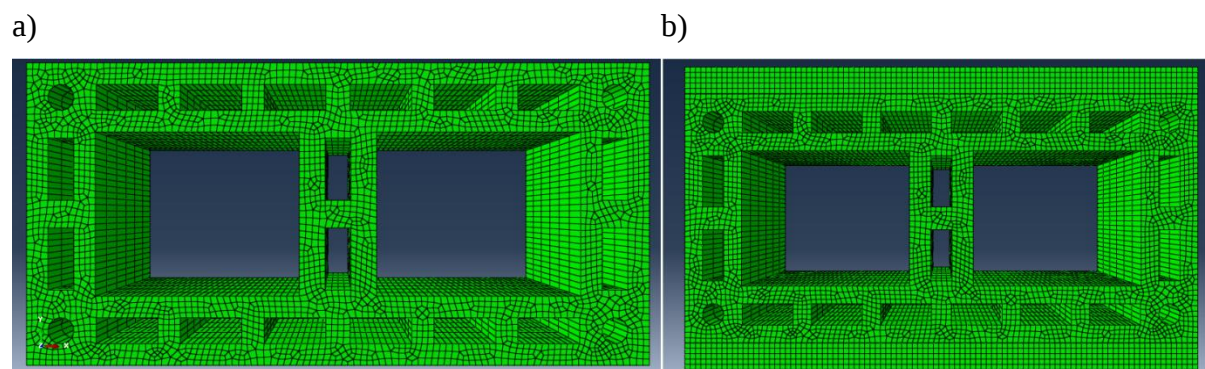


Figura 2. Malhas utilizadas nos modelos. a) Modelo da parede sem revestimento b) Modelo da parede com revestimento

Inicialmente foram ajustadas as propriedades térmicas do bloco cerâmico para que em seguida fosse adicionado o revestimento em argamassa. No experimento realizado por Rosemann (2011) a temperatura ambiente no início do ensaio era de 21,2°C para a parede sem revestimento e preenchimento e 22°C para a parede com revestimento. Esses valores foram

aplicados por meio de um passo inicial nos modelos e considerou-se que no decorrer do tempo as faces não expostas ao fogo perdiam calor para o ambiente através da convecção com coeficiente de $4 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$ e radiação com emissividade de 0,95.

Nas faces expostas ao fogo aplicou-se a elevação de temperatura conforme a ISO 834-1:1999. A transferência de calor das chamas para a superfície dos modelos foi considerada através da convecção com coeficiente de $25 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$ e radiação com emissividade de 0,95. Para o bloco cerâmico, os valores de massa específica e calor específico utilizados na simulação foram os propostos por Rosemann (2011). A condutividade térmica foi variada até que se obtivesse o melhor ajuste entre as curvas experimental e numérica de elevação de temperatura na face não exposta ao fogo. Para os revestimentos em argamassa foi adotado o mesmo procedimento. Na Tabela 1 estão presentes as propriedades térmicas do bloco cerâmico e revestimento em argamassa dependentes da temperatura utilizadas nas simulações.

Tabela 1. Propriedades térmicas dos materiais

Temp. °C	Bloco cerâmico			Argamassa		
	Massa específica kg/m ³	Calor específico J/(kg.K)	Condutividade W/(m.K)	Massa específica kg/m ³	Calor específico J/(kg.K)	Condutividade W/(m.K)
0	1750	700	1,5	2100	800	2,1
20	1750	700	1,5	2100	800	2,1
50	1750	700	1,5	2100	800	2
70	1750	700	1,5	2100	800	2
85	1750	700	1,5	2100	800	1
99	1750	1400	1,5	2100	2400	0,9
101	1750	700	1,5	2100	1200	0,9
200	1750	700	1,5	2100	800	0,9
300	1750	700	1,5	2100	800	0,9
400	1750	700	1,5	2100	800	0,9
500	1750	700	2,3	2100	800	0,9
1000	1750	700	2,3	2100	800	0,9
1500	1750	700	2,3	2100	800	0,9

Observa-se que em temperaturas próximas a 100°C o calor específico sofreu um aumento, compensando o calor latente de vaporização da água. Conforme Chichierchio (1990), a condutividade térmica de blocos cerâmicos brasileiros é $1 \text{ W}/(\text{m.K})$. Nos modelos não foram representadas a radiação e a convecção nas cavidades dos blocos e para corrigir este fato a condutividade térmica foi ligeiramente aumentada.

Segundo Drysdale (1998) em temperaturas acima de 400°C a radiação se torna o principal mecanismo de transferência de calor, justificando os elevados valores de condutividade térmica para o bloco cerâmico nessas temperaturas, se comparado com Chichierchio (1990). De acordo com Stancato (2000) a condutividade térmica da argamassa varia entre 0,179 e 2,023 W/(m.K).

A validação dos modelos foi feita comparando-se a elevação de temperatura nas faces não expostas ao fogo, experimental e numérica. As temperaturas limites de isolamento térmico foram de 161,2°C para a parede sem revestimento e 162°C para a parede revestida, sendo atingidas experimentalmente em 106 e 196 minutos, respectivamente. Nas simulações numéricas obtiveram-se tempos de 105 e 198 minutos, correspondendo a erros de 0,94% e 1,02%. As elevações de temperatura nas faces não expostas ao fogo são apresentadas na Fig. 3.

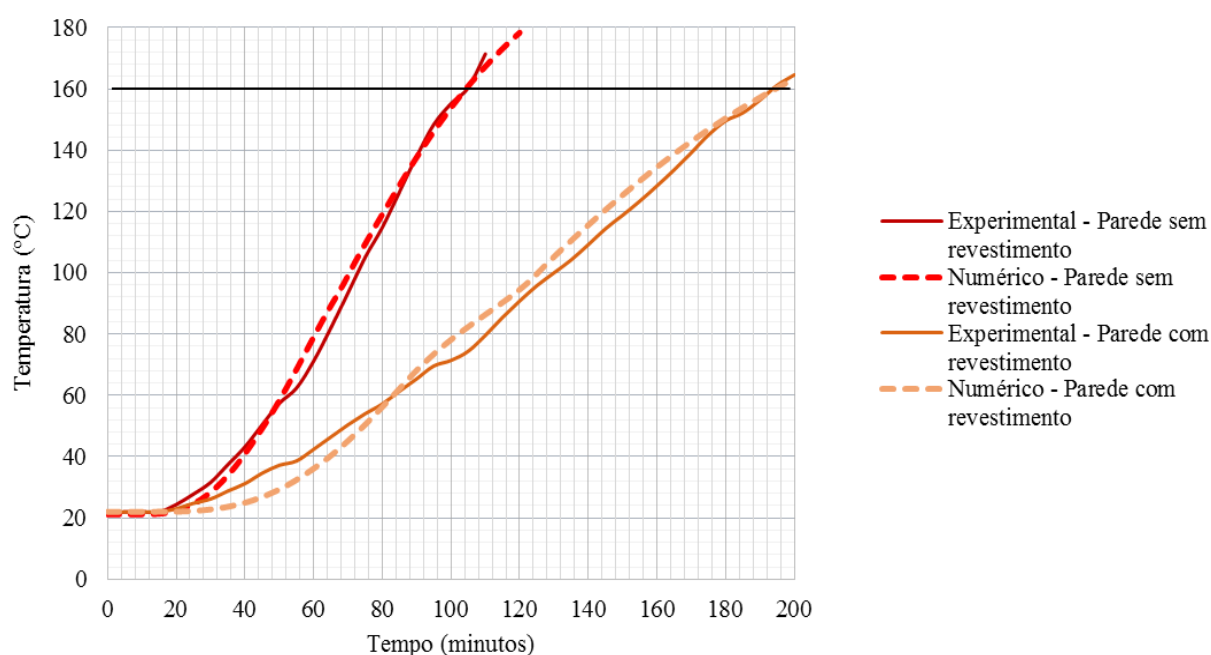


Figura 3. Elevação de temperatura nas faces das paredes não expostas ao fogo

Na Tabela 2 estão presentes os resultados de elevação de temperatura nas faces não expostas ao fogo em intervalos de 25 minutos.

Tabela 2. Elevação de temperatura nas faces não expostas ao fogo

Tempo (min.)	Temperatura			
	Parede sem revestimento		Parede com revestimento	
	Experimental	Numérico	Experimental	Numérico
25	27,8	24,6	24,8	22,3
50	57,4	58,3	37,2	29,3
75	105,0	109,4	54,0	50,5
100	155,2	153,8	71,4	78,2
125	-	-	95,8	99,6
150	-	-	118,8	125,4
175	-	-	145,0	146,8
200	-	-	164,6	163,2

Observa-se que para os intervalos analisados a maior diferença de temperaturas entre a análise experimental e a numérica ocorreu aos 100 minutos com o valor de 6,8°C para a parede revestida, correspondente a um erro de 7,05%. Assim, foi possível obter bons ajustes entre as curvas experimentais e numéricas por meio do *software* ABAQUS®.

4 ESTUDO DO GRADIENTE TÉRMICO

Conforme indicado anteriormente, as paredes foram aquecidas em apenas uma face. Por essa razão, um gradiente térmico foi desenvolvido ao longo de suas seções transversais. Este subitem buscou avaliar como os elementos estão sendo aquecidos, de modo a compreender como ocorre o aumento da temperatura nas seções nos mais diferentes cenários de incêndio, procurando atender ao máximo de situações nas quais a alvenaria estrutural pode estar submetida.

A metodologia empregada consiste no desenvolvimento de gráficos apresentando os resultados da evolução da diferença de temperatura entre pontos expostos e não expostos das paredes em função do tempo. Na primeira etapa foi feita uma comparação entre o desempenho da parede sem revestimento e outra revestida com argamassa. Posteriormente, o foco do artigo se volta ao comportamento do gradiente térmico frente a diferentes curvas de aquecimento dos gases.

4.1 A influência da argamassa no comportamento térmico do bloco

Inicialmente, mediu-se a diferença de temperatura de um ponto exposto e não exposto ao fogo das paredes e plotou-se o gráfico indicado na Fig. 4.

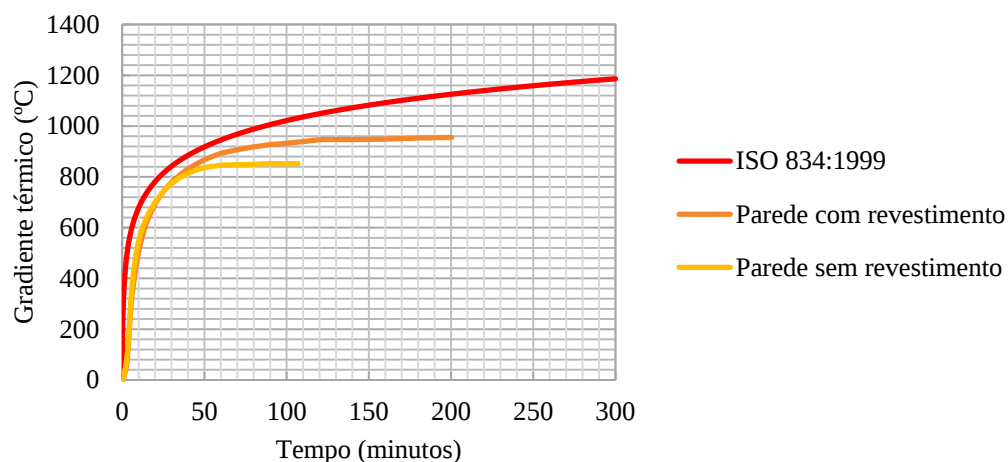


Figura 4. Gradiente térmico das paredes estudadas

A análise gráfica permite inferir que o uso de bloco cerâmico nas paredes conduz a um elevado gradiente térmico na seção transversal, alcançando valores superiores a 800°C, o que tenderá a formação do fenômeno de encurvamento térmico. Isso é justificado pela sua baixíssima condutividade térmica e calor específico, como mostrado na Tabela 1, o que dificulta o processo de condução do calor para o lado não exposto.

Comparando-se o comportamento térmico da parede revestida com a que não possui revestimento, observa-se que até, aproximadamente 50 minutos de aquecimento, a diferença de temperatura entre os pontos aquecidos e não aquecidos é praticamente a mesma. A partir desse instante, a parede revestida apresenta um gradiente superior. Para entender esse fenômeno, duas abordagens foram realizadas.

A primeira consistiu em analisar a evolução de temperatura nas faces expostas e não expostas ao fogo de modo a verificar como elas estão sendo aquecidas. A Fig. 5 traz o comportamento em questão.

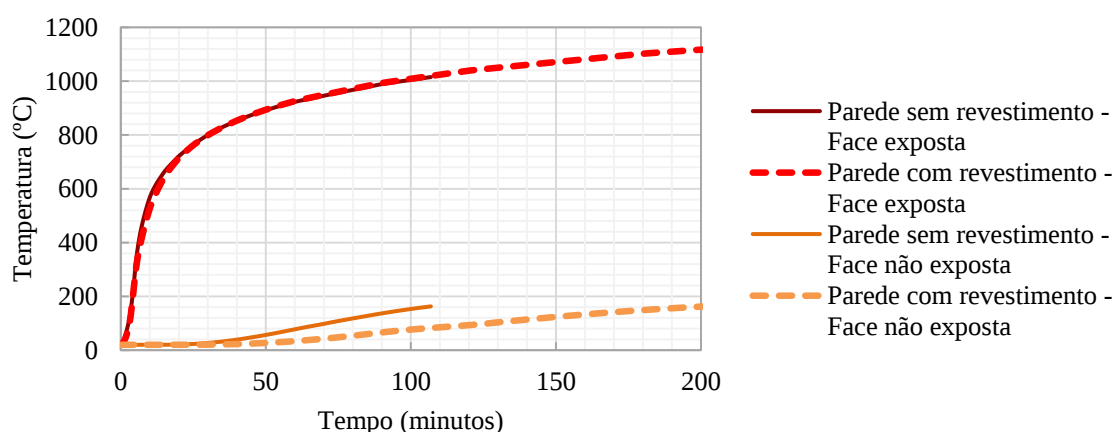


Figura 5. Evolução de temperatura para as faces expostas e não expostas das paredes

Observa-se que a evolução da temperatura na face exposta ao fogo é praticamente coincidente nos dois casos, porém há uma diferença no aquecimento da face não exposta que se inicia a partir de 50 minutos, o que justifica o gradiente térmico se tornar diferente nos dois casos.

A segunda abordagem se refere às propriedades térmicas dos materiais envolvidos, porque elas justificam os resultados encontrados. Tanto o calor específico quanto a condutividade térmica da argamassa dificultam a condução de calor do lado exposto para o lado não exposto em comparação à parede sem revestimento, de modo a propiciar um maior gradiente térmico. Ao comparar a intensidade dessas grandezas (Tabela 1), observa-se que o calor específico da argamassa é maior que o da cerâmica, o que exige mais calor para elevar a temperatura da primeira. Além disso, a condutividade térmica daquele material é menor, o que diminui a condução de calor.

4.2 A influência da curva de aquecimento dos gases

Neste artigo, seis curvas com diferentes intensidades de aquecimento foram objeto de estudo, incluindo aquela utilizada no ensaio experimental, a curva ISO 834:1999. Além desta, empregou-se outra curva padronizada, a ASTM E119:2000, e as demais foram curvas paramétricas que representam o incêndio natural. Os parâmetros necessários para a construção das curvas de incêndio natural estão descritos na Tabela 3.

Tabela 3 – Parâmetros para construção das curvas de incêndio natural

Curva	Carga de incêndio (MJ/m ²)	Grau de ventilação (m ^{1/2})	Referência
1	720	0,07	SCI (2012)
2	200	0,06	KAEFER E SILVA (2003)
3	115	0,032	KAEFER E SILVA (2003)
4	200	0,02	KAEFER E SILVA (2003)

A Fig. 6 traz a representação das seis curvas de aquecimento citadas anteriormente. Ressalta-se que, para aquelas que representam o incêndio natural, foi considerado apenas o trecho do aquecimento, pois ele representa o crescimento do gradiente térmico na seção transversal dos elementos. Para a curva ASTM E119:2000, por ser sempre crescente, foi limitada ao tempo de execução do ensaio experimental. A legenda dos gráficos foi organizada de acordo com o grau de intensidade do aquecimento. Portanto, a curva 1, que possui carga de incêndio igual a 720 MJ/m² e grau de ventilação 0,07 m^{1/2}, se aquece de forma mais rápida,

enquanto que a curva 4, que possui carga de incêndio igual a 200 MJ/m^2 e grau de ventilação $0,02 \text{ m}^{1/2}$, se aquece de forma mais lenta.

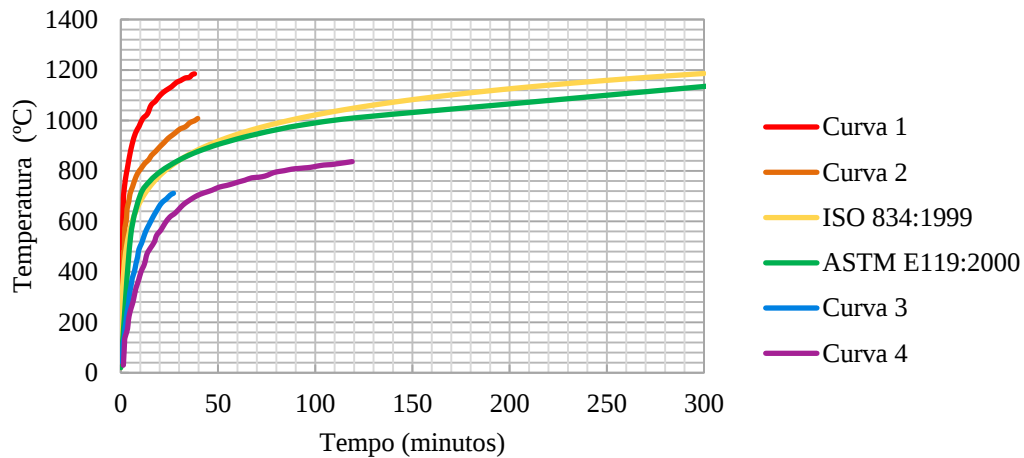


Figura 6. Evolução de temperatura dos gases em função do tempo para diversos cenários de incêndio

Diante disso, foi calculado o gradiente térmico em função do tempo para as paredes cerâmicas revestidas e não revestidas, utilizando-se as curvas anteriormente citadas e, em seguida, foram plotados os gráficos representados na Fig. 7.

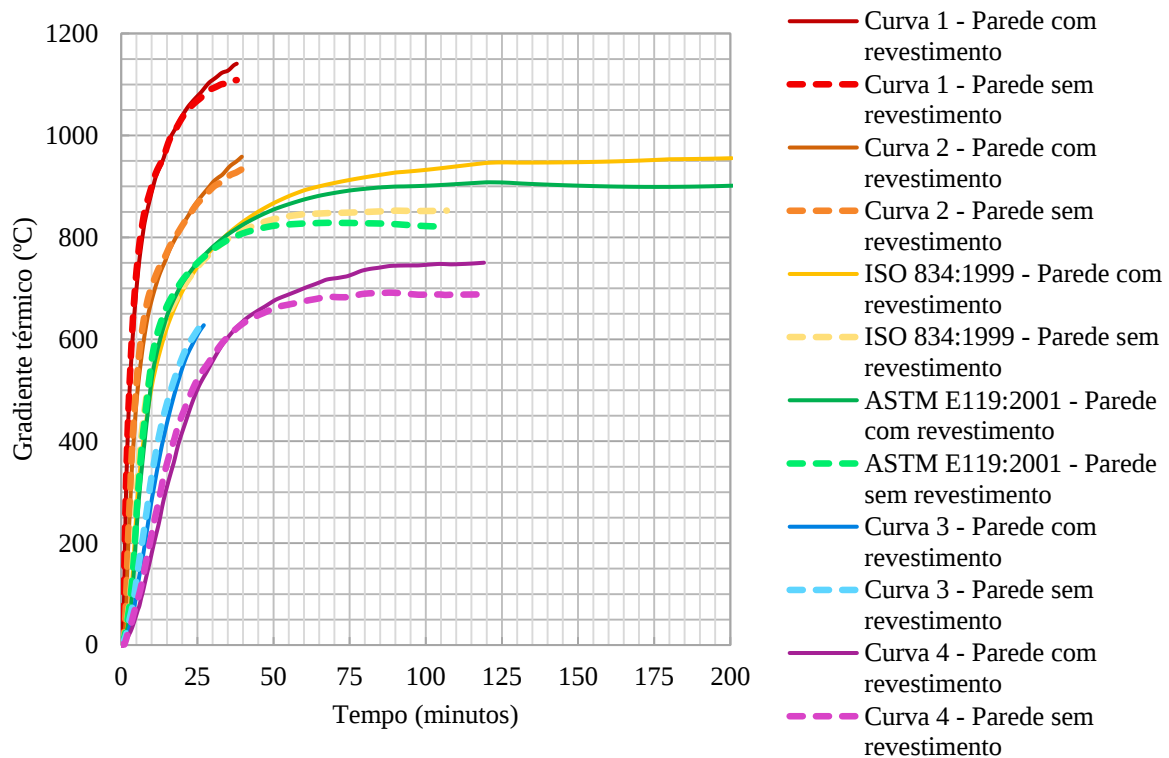


Figura 7. Gradiente térmico (°C) versus Tempo (minutos) para diversos cenários de incêndio

De modo complementar, foi adotado o tempo de 25 minutos, comum às seis curvas, e identificou-se o gradiente térmico nesse instante, a partir da Tabela 3, com o intuito de reafirmar os resultados gráficos.

Tabela 3 - Gradiente térmico (°C) das paredes para 25 min

Curva de aquecimento	Parede sem revestimento	Parede com revestimento
Curva 1	1067,96	1076,99
Curva 2	864,18	872,00
ISO 834:1999	740,98	745,66
ASTM E119:2001	748,23	748,18
Curva 3	618,72	607,50
Curva 4	527,40	499,14

Observa-se que, quanto mais rápido for o aquecimento, maior será o gradiente térmico formado na seção transversal, o que possivelmente, irá intensificar o fenômeno do encurvamento térmico devido ao momento resultante do aquecimento diferencial ser mais elevado. Em contrapartida, em aquecimentos mais lentos, o gradiente térmico é reduzido.

Chama-se a atenção para as curvas de aquecimento ISO 834:199 e ASTM E119:2001. Elas apresentam um aquecimento similar até aproximadamente 50 minutos, o que justifica o valor próximo do gradiente térmico encontrado na Tabela 3 para ambas as situações.

5 CONCLUSÃO

O presente estudo consistiu em uma análise do gradiente térmico originado em paredes de alvenaria estrutural com aquecimento em apenas uma face. Para isso, foi desenvolvido um modelo numérico que conseguiu representar bem o comportamento térmico desses elementos estruturais. Inicialmente foi comparada a elevação da temperatura na parede revestida e naquela sem revestimento em argamassa, onde assim como em Rosemann (2011), foi observada uma grande contribuição desse revestimento na resistência ao fogo pelo critério do isolamento térmico. Consequentemente, foi notado que esse material aumenta a diferença de temperaturas entre o lado exposto e não exposto devido às suas propriedades térmicas que diminuem a condução do calor.

Além disso, foi possível identificar que o tipo da curva de aquecimento dos gases influencia diretamente a intensidade do gradiente térmico formado na seção transversal. Curvas que apresentam aquecimento mais rápido produzem maiores gradientes térmicos, pois possuem uma elevada taxa de aquecimento da face exposta enquanto o fluxo de calor se mantém constante, o que acarreta a intensificação do encurvamento térmico. Por outro lado, em aquecimentos mais brandos, que geram menores diferenças de temperaturas entre a face exposta e a não exposta ao fogo, o comportamento termo estrutural da parede passa a ter influência maior da sua dilatação térmica axial.

Assim, locais que possuem maior carga de incêndio, como bibliotecas, indústrias de espumas e outros materiais inflamáveis, conforme a ABNT NBR 14432:2001, e maior fator de abertura, apresentam maior risco estrutural em situação de incêndio, devido às elevadas taxas de aquecimento. Os materiais da compartimentação não foram analisados para a composição das curvas de aquecimento dos gases, então não foi possível tirar conclusões a respeito desse fator.

Diante do modelo numérico calibrado, recomenda-se que em trabalhos futuros, sejam realizadas análises paramétricas a partir da variação da geometria do bloco, por exemplo, a fim de agregar ainda mais para a temática em questão.

AGRADECIMENTOS

Os autores deste trabalho agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ), pelo apoio fornecido para realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- Andreini, M., Caciolai, M., Mendola, S. La, Mazziotti, L., & Sassu, M., 2014. Mechanical behavior of masonry materials at high temperatures. *Fire and Materials*. John Wiley & Sons, LTD.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2001. *Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações – Procedimento – NBR 14432*, Rio de Janeiro.
- ASTM. American Society Testing and Materials. *ASTM E119*: Standard test methods for fire tests of building construction and materials. West Conshohocken, 2000.
- Chichierchio L. C., 1990. Conforto ambiental: desempenho térmico e acústico e proteção contra o fogo. In: Associação Brasileira da Construção Industrializada – ABCI. *Manual Técnico de Alvenaria*. São Paulo, p. 119-141.
- Corrêa, C., Silva, J. J. R., Oliveira, T. A. C., & Braga, G. C., 2015. Mapeamento de incêndios em edificações: um estudo de caso na cidade do Recife. *Revista de Engenharia Civil IMED*. v. 2 n. 3 p. 15-34.
- Costa, S. N., & Silva, V. P., 2006. *Revisão histórica das curvas padronizadas de incêndio*. Núcleo de Pesquisa em Tecnologia da Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo. Ed. Paula Souza. 13 p.
- Drysdale, D., 1998. *An Introduction to Fire Dynamics*. University of Edinburgh, UK. John Wiley & Sons, LTD. 2. ed. 451 p.
- European Committee for Standardization. *Eurocode 6: EN 2005-1.2*: design of masonry structures: part 1-2: general rules: structural fire design. Brussels, 2005.
- International Organization for Standardization. *ISO 834*: Fire resistance tests - elements of building construction: Part 1. General requirements. Genève, 1999.
- Kaefer, E.C., & Silva, V. P., 2003. Análise paramétrica de um incêndio conforme o novo Eurocode 1. In: *Iberian latin-american congress on computational methods in engineering–CILAMCE*, 24. Ouro Preto, 2003. Anais...
- Rigão, A. O. *Comportamento de Pequenas Paredes de Alvenaria Estrutural Frente a Altas Temperaturas*. 2012. Santa Maria, 142 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Santa Maria, São Maria, 2012.
- Rosemann, F., 2011. *Resistência ao fogo de paredes de alvenaria estrutural de blocos cerâmicos pelo critério de isolamento térmico*. 2011. 160 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- SCI. The Steel Construction Institute. *Fire resistance design of steel framed buildings*. United Kingdom, SCI, 2012.
- Stancato, A. C., 2000. *Determinação da condutividade térmica e da resistência mecânica em argamassa leve*. Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas. 155p. Dissertação de Mestrado.