

ESTUDO NUMÉRICO DE PAREDES DE ALVENARIA ESTRUTURAL DE BLOCOS DE CONCRETO EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

Rafael G. Oliveira*	João P. Rodrigues	João M. Pereira	Paulo B. Lourenço
Pesquisador	Professor	Pesquisador	Professor
UC	UC	UM	UM
Coimbra	Coimbra	Guimarães	Guimarães

Palavras-chave: Incêndio; Fogo; Alvenarias; Paredes; Análise por elementos finitos.

1. INTRODUÇÃO

As paredes de alvenaria estrutural de blocos de concreto tem sido usadas mundialmente como elementos portantes e de partição. Para garantir a segurança destas estruturas em situação de incêndio, alguns requisitos relacionados com o isolamento, a integridade e a capacidade portante devem ser atendidos. Na Europa, a norma europeia EN 1996-1-2 (2005) [1] preconiza que paredes de alvenaria estrutural devem atender aos seguintes quesitos quando expostas ao fogo: **I** para isolamento térmico, **E** para integridade (evitar a proliferação de fumos e gases através da parede), **R** para capacidade portante e **M** para impacto mecânico. Em situações de incêndio, as paredes de alvenaria são geralmente submetidas a aquecimento em uma face, o que leva a um gradiente térmico através de sua espessura. Em paredes sem restrições, o alongamento térmico diferencial resulta em curvatura térmica em direção ao fogo, um fenômeno complexo que depende das propriedades térmicas e mecânicas do material, que são variáveis com a temperatura [2]. A degradação das propriedades dos materiais causada por temperaturas elevadas associadas às tensões térmicas e mecânicas pode levar ao colapso estrutural da parede [3-6]. Portanto, a estabilidade estrutural da alvenaria durante o incêndio é necessária para evitar o colapso, prevenir a propagação do incêndio, mitigar o colapso da estrutura local e garantir a evacuação segura dos ocupantes do edifício [4-8].

O objetivo deste trabalho é apresentar um estudo numérico sobre o comportamento de alvenarias estruturais em situação de incêndio. As estruturas são submetidas à curva padrão de aquecimento. Os modelos foram calibrados com base em pesquisas experimentais realizadas anteriormente [5 e 12]. A influência das propriedades térmicas e mecânicas no comportamento das paredes de alvenaria é apresentada e discutida.

Vários estudos numéricos foram realizados em alvenaria a temperatura elevada. Nadjai et al. [3] desenvolveram um modelo de elementos finitos termoestruturais (MasSET) para o comportamento de paredes de alvenaria em condições de fogo. O modelo foi projetado especificamente para simular paredes de alvenaria em situações de incêndio e foi validado com base em pesquisas experimentais e provou ser bem sucedido. No entanto, só pode ser

* rafaelluiz_go@hotmail.com

utilizado em unidades de alvenaria sem cavidades. Nadjai et al. [4] usaram o modelo MasSET para conduzir uma investigação paramétrica sobre os efeitos do índice de esbeltez, excentricidade de carga e condições de contorno de paredes de alvenaria de compartimentos em situação de incêndio. Nguyen e Meftah [9-10] usaram os resultados experimentais para calibrar um modelo numérico e investigar teoricamente o comportamento e desempenho da alvenaria de argila. Neste estudo foram realizadas simulações numéricas tridimensionais conduzidas com especial atenção aos riscos de fragmentação de tijolos alveolares. Kumar e Kodur [11] propuseram um modelo para prever a resposta ao fogo de paredes com capacidade portante. Os resultados numéricos foram comparados a ensaios experimentais em domínios estruturais e térmicos para validar o modelo. Os autores concluíram que o modelo proposto é capaz de prever a resposta das paredes, desde o carregamento inicial até o estágio de colapso, sob efeitos combinados de cargas mecânicas e térmicas.

2. PESQUISA EXPERIMENTAL

2.1 Caracterização em temperatura ambiente

Haach [12] realizou uma série de experimentos em paredes de alvenaria estrutural em temperatura ambiente. Os resultados experimentais fornecidos pelo autor foram utilizados para a calibração mecânica à temperatura ambiente. Os blocos utilizados são apresentados na Figura 1 e na Tabela 1.

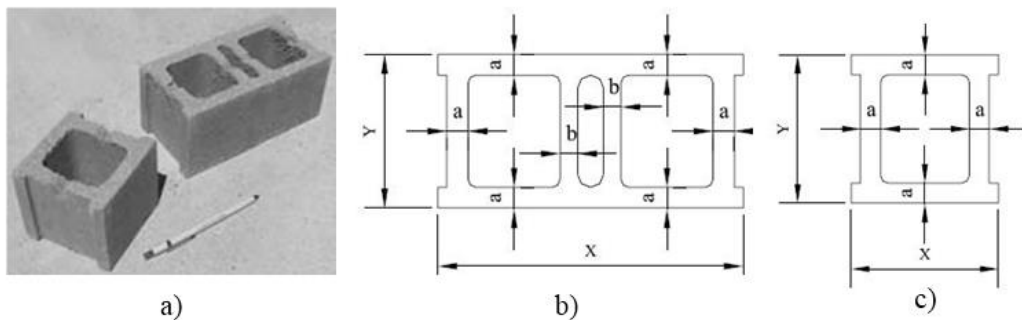


Figura 1: Blocos de concreto: a) Bloco; b) Bloco; c) Meio bloco (Haach, 2009) [12]

Tabela 1: Dimensões das unidades (Haach, 2009) [12]

	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	a (mm)	b (mm)	Área líquida (cm ²)	Área dos vazios (cm ²)	Porcentagem dos vazios (%)
Bloco	201	100	93	16	14	110,14	93,92	46
Meio bloco	101	100	93	16	-	57,20	46,10	45

2.2 Ensaio em temperatura elevada

Lopes et al. (2017) [5] realizaram uma pesquisa experimental em alvenarias de concreto em situação de incêndio. Blocos de concreto de três células, apresentados na Figura 1, foram usados para construir seis provetes. O layout experimental adotado é apresentada na figura 2. As paredes foram submetidas à carga compressiva e, em seguida, expostas ao fogo. A temperatura na face não exposta, os deslocamentos verticais e os deslocamentos horizontais para fora do plano foram medidos em todos os provetes, conforme apresentado na figura 3.

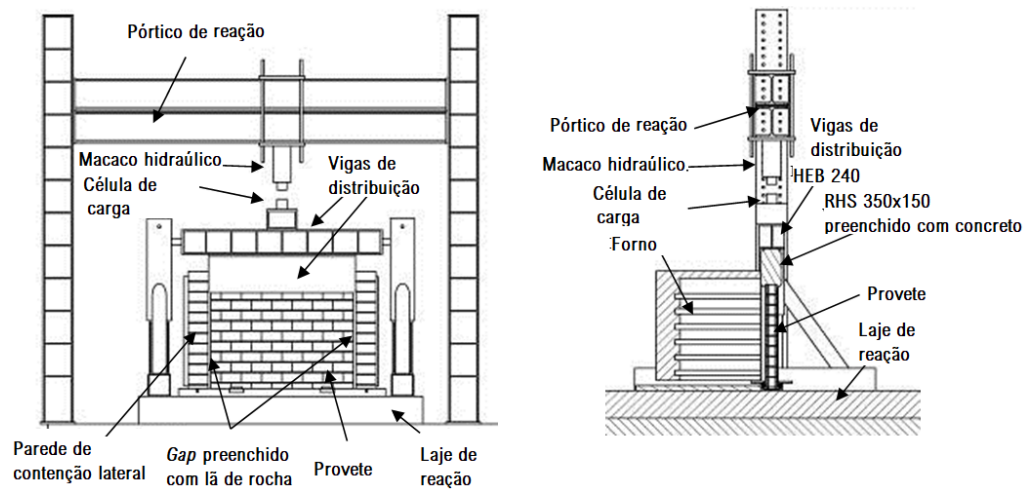


Figura 2: Sistema experimental: (a) Vista frontal; (b) Vista Longitudinal (Lopes, 2017) [5]

As paredes 1 e 2 foram submetidos a uma carga inicial de 208 kN, o equivalente a 30% do valor característico da resistência à compressão na direção vertical à temperatura normal (f_{ak}) e ao expostas ao fogo. As paredes 3 e 4 foram submetidas a uma carga inicial de 319 kN, o equivalente a 46% de f_{ak} e o expostas ao fogo. Os resultados experimentais foram utilizados para a calibração do modelo numérico usado neste trabalho. Detalhes sobre o plano de ensaios são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2: Plano de ensaios (Lopes et al, 2017) [5]

Corpo de prova	Carga inicial (kN)	Taxa de aplicação de carga (kN/s)	% $f_{ak\perp}$ (EN 1052-1)	% $f_{d\perp}$ (EC6-1.1)
1	208	0.5	30	70
2	208	0.5	30	70
3	319	0.5	46	108
4	319	0.5	46	108

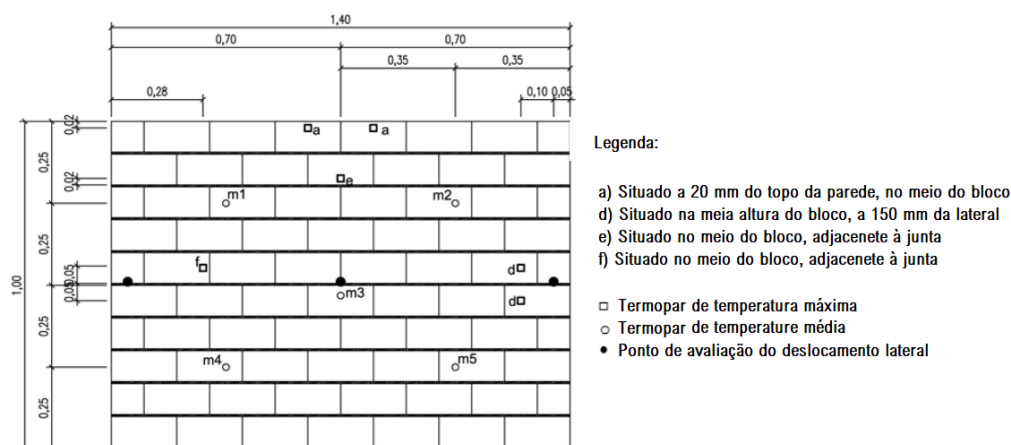


Figura 3: Dimensão dos provetes e localização dos termopares (Lopes, 2017) [5]

3. MODELO NUMÉRICO

3.1 Descrição do modelo

O software Abaqus [14] foi utilizado para realizar uma análise térmica e estrutural sequencial não acoplada. Deste modo, os resultados da análise térmica são inseridos na análise estrutural. Consequentemente, os campos térmicos influenciam na análise mecânica, entretanto as tensões e deformações decorrentes da análise mecânica não influenciam no comportamento térmico. A análise térmica sequencial é realizada em quatro etapas. Primeiro, uma análise de flambagem é feita para determinação das imperfeições iniciais do modelo. Em seguida, é realizada uma análise de transferência de calor para determinar os campos de temperatura nos elementos em função do tempo. Consequentemente, uma análise mecânica estática é realizada, neste passo as imperfeições calculadas na etapa um são inseridas e uma carga de pré-compressão é aplicada. Finalmente, os campos de temperaturas calculados na etapa dois são aplicados ao modelo em uma análise elastoplástica. A natureza frágil das unidades de alvenaria e argamassa foi contabilizada no modelo usando o modelo de *Concrete Damage Plasticity*, que pode ser usado para a análise de estruturas de concreto sob diferentes condições de carga, conforme apresentado na Figura 4. O modelo de fissuração foi adotado com recurso de fechamento e reabertura de fissuras. O ângulo de dilatação, no plano p-q, foi de 30°. A excentricidade do potencial de fluxo foi tomada como 0,10, a razão de tensão de compressão compressiva equibiaxial inicial para tensão de compressão compressiva uniaxial inicial foi tomada como 1,16. A razão entre o segundo invariante de tensão no meridiano de tração, e o meridiano de compressão foi de 2/3.

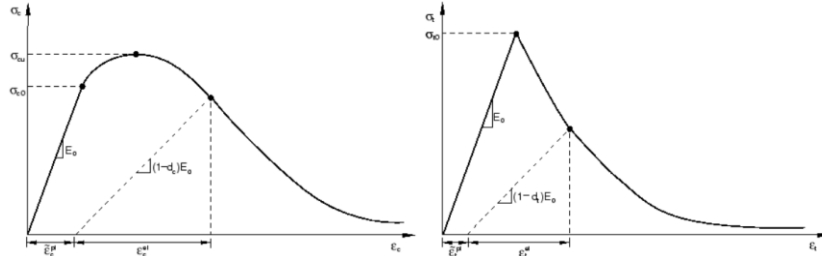


Figura 4. Resposta do concreto em carregamentos uniaxiais: (a) compressão e (b) tração [14]

As propriedades térmicas e a degradação das propriedades mecânicas dos materiais devido ao aumento da temperatura foram incorporadas ao modelo. Estes parâmetros foram definidos com base nas normas EN 1996-1-2: 2005 [1] e na EN 1992-1-2: 2004 [13]. Adotou-se um modelo homogeneizado da alvenaria, de modo que o material adotado considera o comportamento dos blocos e juntas argamassadas.

3.2 Calibração do modelo mecânico em temperatura ambiente

A validação do modelo em temperatura ambiente foi realizada comparando os resultados experimentais e numéricos, para os casos de compressão uniaxial e flexão. Os provetes e respectivos modelos numéricos são apresentados na Figura 5.

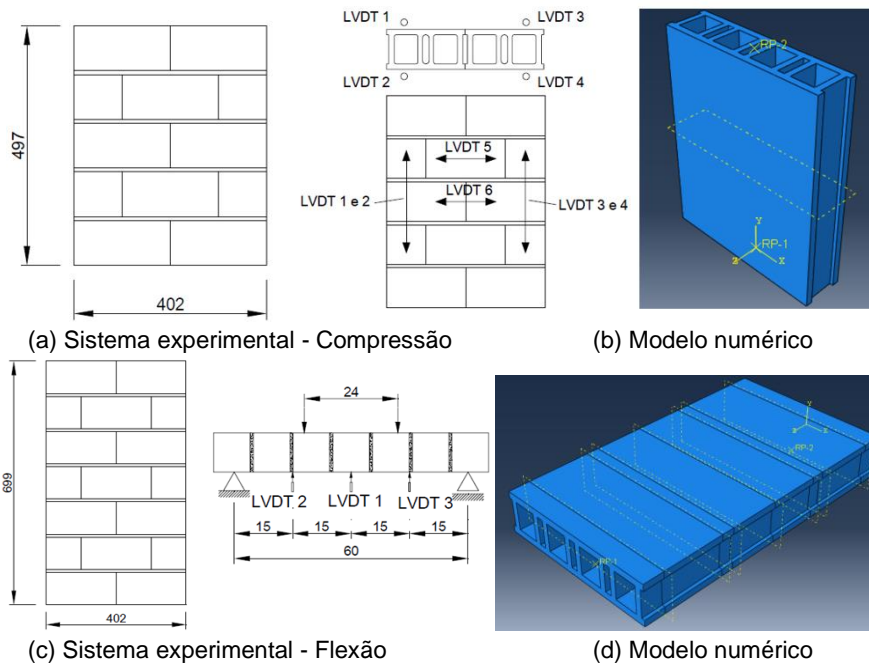


Figura 5: Dimensões do provete (Haach, 2017) [12] e modelos numéricos desenvolvidos

A Figura 6 (a) apresenta a comparação da relação tensão-deformação obtida numericamente e experimentalmente. A relação vertical tensão-deformação está alinhada com os resultados

experimentais. A Figura 6 (b) apresenta a comparação entre a curvatura e o momento aplicado à parede. Segundo Haach [12], observa-se que os provetes apresentaram curvaturas negativas no início dos testes, este comportamento é explicado pela deformação assimétrica dos suportes do layout experimental, durante acomodação da estrutura. Apesar deste deslizamento, os resultados numéricos estão alinhados com os resultados experimentais.

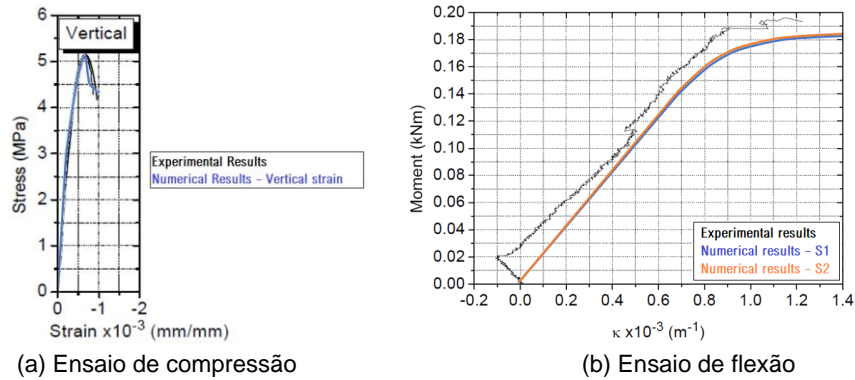


Figura 6: Comparação dos resultados experimentais [12] e numéricos

3.3 Calibração do modelo de transferência de calor

Os resultados experimentais fornecidos por Lopes [12] foram utilizados para a calibração do modelo de transferência de calor. As temperaturas medidas no forno e em cinco pontos da parede na face não exposta são apresentadas na Figura 7, assim como a temperatura calculada pelo modelo numérico para a face exposta (Num.HF) e não exposta (Num.CF).

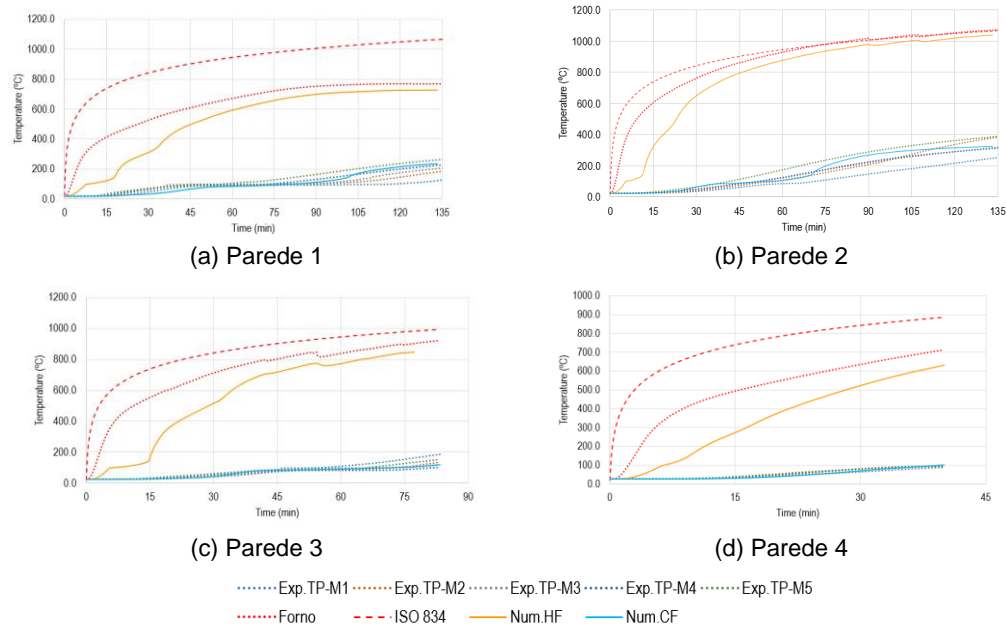


Figura 7: Comparação dos resultados experimentais [5] e numéricos: Temperaturas

Os resultados numéricos e experimentais apresentam um platô de temperaturas para temperaturas em torno de 100°C. No modelo numérico, o calor necessário para evaporar a água é representado por um aumento no calor específico do material, para temperaturas variando de 100°C a 115°C, este pico depende do teor de umidade da alvenaria, que variou de 6% a 8% neste estudo. Os resultados experimentais de temperaturas indicaram temperaturas mais baixas medidas por termopares localizados no topo da parede e temperaturas mais altas medidas por termopares localizados na parte inferior. Isto levou à conclusão de que pode haver um fluxo de vapor através dos orifícios verticais, que foi responsável pelo resfriamento da parte superior da parede. O modelo numérico não pode representar o fluxo de vapor. Conforme concluiu Lopes [5], após a evaporação da água livre, isto é, após as temperaturas de 100 °C, há um aumento no gradiente térmico através da espessura da parede. As temperaturas na face exposta foram medidas somente pelo modelo numérico, uma vez que não havia termopar nesta face. O modelo numérico não foi capaz de representar a dispersão dos valores medidos de temperatura pelos termopares instalados na parede.

3.4 Calibração do modelo mecânico em altas temperaturas

Os campos de temperatura obtidos na análise de transferência de calor foram introduzidos na análise elastoplástica para simular o comportamento das paredes de concreto em situação de incêndio. A Figura 8 e a Figura 9 apresentam a comparação dos deslocamentos verticais e horizontais para fora do plano obtidos pela análise experimental e numérica, respectivamente.

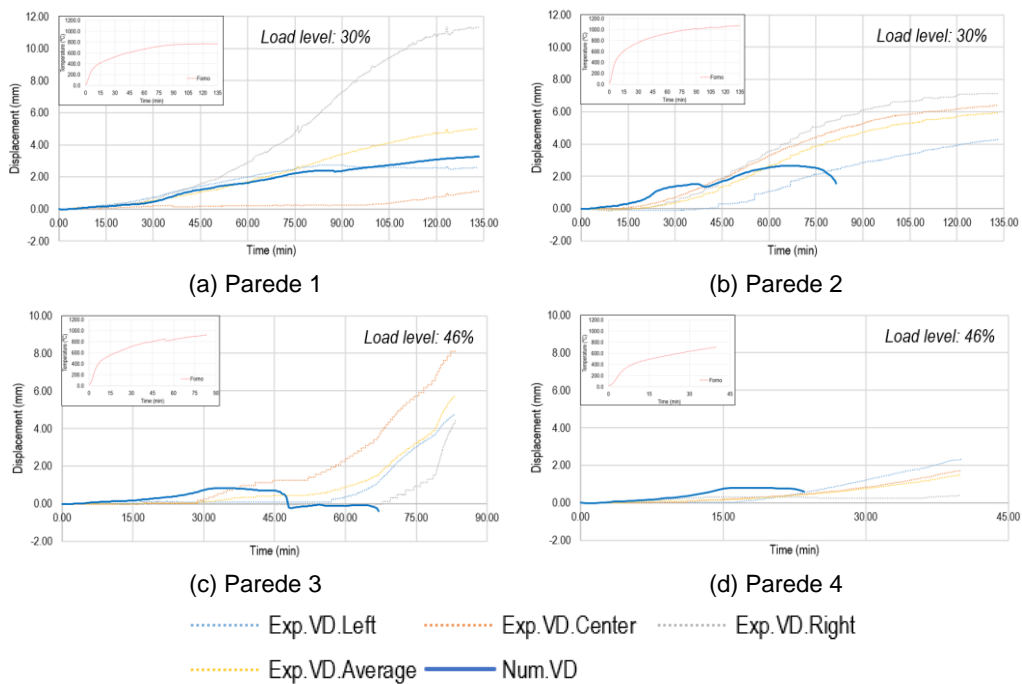


Figura 8: Comparação dos resultados experimentais [5] e numéricos: Deslocamentos verticais

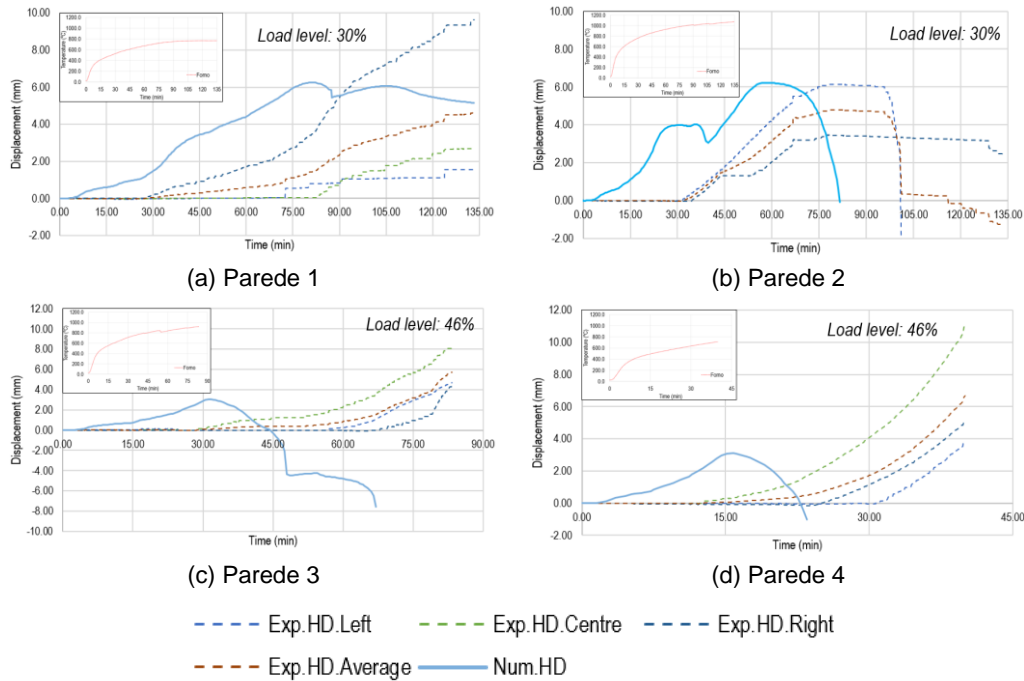


Figura 9: Comparação dos resultados experimentais [5] e numéricos: Deslocamentos horizontais para fora do plano

Considerando a falta de disponibilidade das propriedades térmicas e das curvas de tensão deformação deste tipo de alvenaria para a condição de incêndio, os resultados experimentais e numéricos estão em um acordo satisfatório para as paredes 1 e 2. As paredes 3 e 4, foram submetidas a maior nível de carregamento (46%) e apresentam menor correlação com os resultados experimentais para os deslocamentos horizontais. O modelo adotado deverá ser melhorado, de modo a representar as alvenarias em ambas as condições.

4. ANÁLISES E DISCUSSÕES

4.1 Análise Térmica

A Figura 7 mostra a evolução da temperatura dos provetes com o tempo. Conforme apresentado, o modelo numérico utilizado não pode representar o fluxo de vapor através dos orifícios verticais da parede. Os resultados experimentais mostraram uma maior dispersão nos valores de temperatura na face não exposta, este fenômeno não é representado pelo modelo numérico. No entanto, as temperaturas fornecidas pelo modelo numérico estão de acordo com as temperaturas medidas no estudo experimental. A propagação do calor foi modelada por três modos (condução, convecção e radiação). Observou-se que a radiação da cavidade nos orifícios internos dos tijolos desempenha uma importante regra na análise da transferência de calor. Além disso, observou-se que a umidade da alvenaria tem grande influência no seu calor específico para temperaturas entre os 100°C e os 115°C, e um grande impacto na duração do platô de temperaturas apresentado.

4.2 Análise estrutural em temperatura ambiente

Os resultados experimentais fornecidos por Haach [12] foram utilizados para a calibração do modelo homogeneizado em temperatura ambiente. Os resultados fornecidos pelo modelo estão em bom acordo com os resultados experimentais.

4.3 Análise estrutural em temperatura elevada

A relação tensão-tensão em compressão apresentada pela norma EN 1992-1-2 foi usada para representar a plasticidade danificada do material e o diagrama de alongamento térmico apresentado na EN 1996-1-2 para unidades de silicato de cálcio foi usado para calcular o coeficiente de expansão térmica. Apesar desses valores não serem definidos para blocos de concreto e da falta de resultados experimentais para entrada no modelo numérico, os resultados fornecidos pelo modelo estão de acordo com os resultados experimentais para as paredes 1 e 2. As paredes 3 e 4 apresentam boa correlação dos deslocamentos verticais, mas uma pobre correlação dos deslocamentos horizontais para fora do plano.

Recomenda-se ensaios de compressão em temperatura elevada em provetes de alvenaria de concreto, com o objetivo de gerar resultados experimentais para este material em temperatura elevada. A avaliação da expansão térmica, calor específico e condutividade térmica também são recomendadas. Deste modo, será possível gerar resultados experimentais que poderão ser utilizados para melhoras nos modelos numéricos.

5. CONCLUSÕES

As seguintes conclusões podem ser tiradas da investigação:

- Como mostrado pelos resultados experimentais, a alvenaria é um material muito heterogêneo com grande dispersão nos resultados, incluindo deslocamentos verticais, deslocamentos para fora do plano e temperaturas na face não exposta ao incêndio.
- A análise de transferência de calor resultou em uma boa concordância com os valores experimentais de temperatura na face não exposta. A propagação do calor foi modelada por três modos (condução, convecção e radiação). O teor de umidade da alvenaria tem uma influência importante no calor específico para temperaturas entre os 100°C e os 115°C, o que tem um grande impacto na duração do platô em torno de 100°C, devido à evaporação da água.
- A análise sequencial não acoplada utilizada levou a uma redução no tempo de cálculo, quando comparada com a análise termomecânica acoplada.
- O modelo de plasticidade danificada pelo concreto pode ser usado para representar o comportamento do fogo. Entretanto, resultados experimentais da relação tensão-deformação compressiva para paredes de alvenaria em escala reduzida poderiam ter levado a melhores acordos entre os deslocamentos experimentais e numéricos.
- A caracterização experimental dos coeficientes de expansão térmica de paredes de alvenaria composta por três tijolos de células pode levar a melhores concordâncias entre os resultados experimentais e numéricos, uma vez que as deformações térmicas têm impacto significativo sobre os efeitos geométricos não lineares da parede.

REFERÊNCIAS

- [1] EN 1996-1-1 (2005) (English): Eurocode 6: Design of masonry structures - Part 1-1: General rules for reinforced and unreinforced masonry structures
- [2] M. Dhanasekar, V. Chandrasekaran and S.J. Grubits, "A numerical model for the thermal bowing of masonry walls," 10th IB2MaC, Calgary, Canada, July 5th-7th, 1994.
- [3] A. Nadjai, M. O'Garra, F. A. Ali, and D. Lavery, "A numerical model for the behaviour of masonry under elevated temperatures," *Fire Mater.*, vol. 27, no. 4, pp. 163–182, 2003.
- [4] A. Nadjai, M. O'Garra, and F. Ali, "Finite element modelling of compartment masonry walls in fire," *Comput. Struct.*, vol. 81, no. 18–19, pp. 1923–1930, 2003.
- [5] Lopes, R.; Rodrigues, J.P.; Pereira, J.M.; Lourenço, P. B. – "Experimental Research on Structural Concrete Masonry Walls Subjected to Fire", *IFireSS 2017 – 2nd International Fire Safety Symposium*
- [6] A. J. O'Meagher and I. D. Bennetts, "Modelling of concrete walls in fire," *Fire Saf. J.*, vol. 17, no. 4, pp. 315–335, 1991.
- [7] T. J. Shields, D. J. O. Connor, G. W. H. Silcock, and H. A. Donegan, "Thermal Bowing of a Model Brickwork Panel," *Int. BRICK/BLOCK Mason. Conf. 8.*, 1988. Dublin, pp. 846–856, 1988.
- [8] A. Nadjai, M. O'Garra, F. A. Ali, and D. Lavery, "A numerical model for the behaviour of masonry under elevated temperatures," *Fire Mater.*, vol. 27, no. 4, pp. 163–182, 2003.
- [9] T. D. Nguyen and F. Meftah , "Behavior of clay hollow-brick masonry walls during fire. Part 2: 3D finite element modeling and spalling assessment". *Fire Safety Journal*, vol. 66, pp. 35-45, 2014
- [10] T. D. Nguyen and F. Meftah, "Behavior of clay hollow-brick masonry walls during fire. Part 1: Experimental analysis," *Fire Safety J.*, vol. 52, pp. 55–64, 2012.
- [11] P. Kumar and V. K. R. Kodur, "Modeling the behavior of load bearing concrete walls under fire exposure," *Constr. Build. Mater.*, vol. 154, pp. 993–1003, 2017.
- [12] V. G. Haach, "Development of a design method for reinforced masonry subjected to in-plane loading based on experimental and numerical analysis," 2009.
- [13] EN 1992-1-2 (2004) (English): Eurocode 2. Design of concrete structures. General rules. Structural fire design
- [14] Smith, M. (2009). *ABAQUS/Standard User's Manual, Version 6.9*. Providence, RI: Simulia.