

5º CILASCI – Congresso Ibero-Latino-Americano em Segurança contra Incêndio  
Porto, Portugal, 15 a 17 de julho de 2019

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

<b>Rafael G. Oliveira*</b>	<b>João P. Rodrigues</b>	<b>João M. Pereira</b>	<b>Paulo B. Lourenço</b>
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](mailto: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.

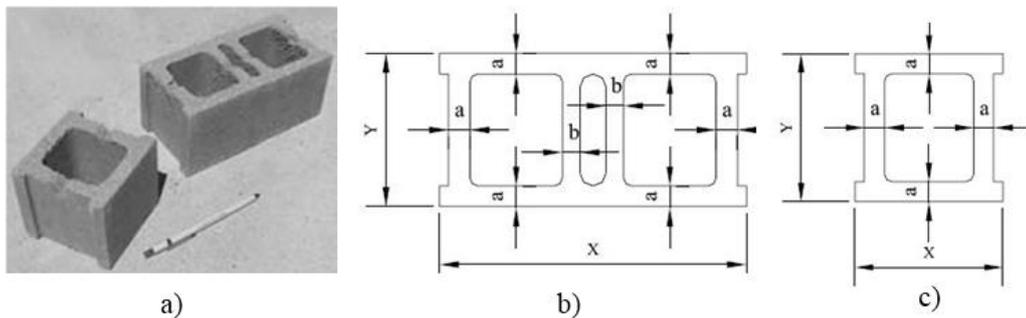


Figura 1: Blocos de concreto: a) Bloco; b) Bloco; c) Meio bloco (Haach, 2009) [12]

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

	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	a (mm)	b (mm)	Área líquida (cm <sup>2</sup> )	Área dos vazios (cm <sup>2</sup> )	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.

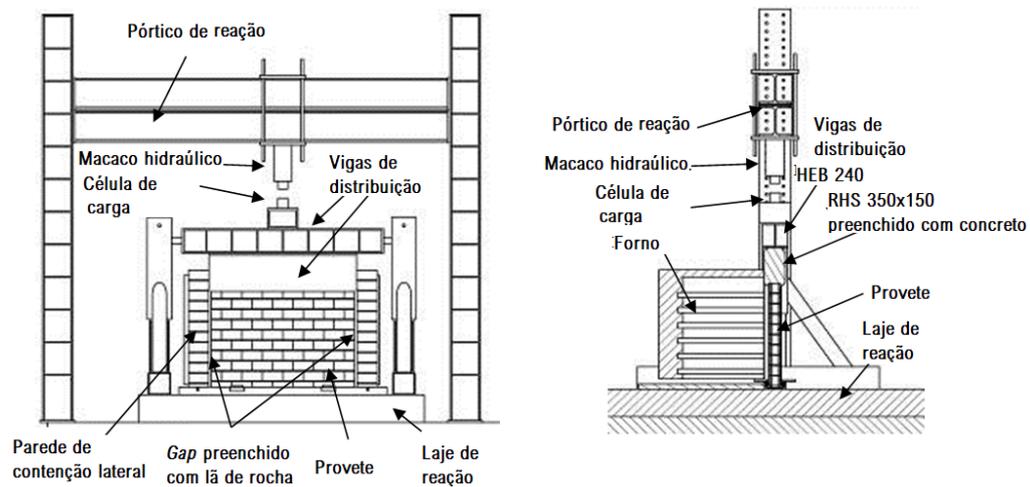


Figura 2: Sistema experimental: (a) Vista frontal; (b) Vista Longitudinal (Lopes, 2017) [5]

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

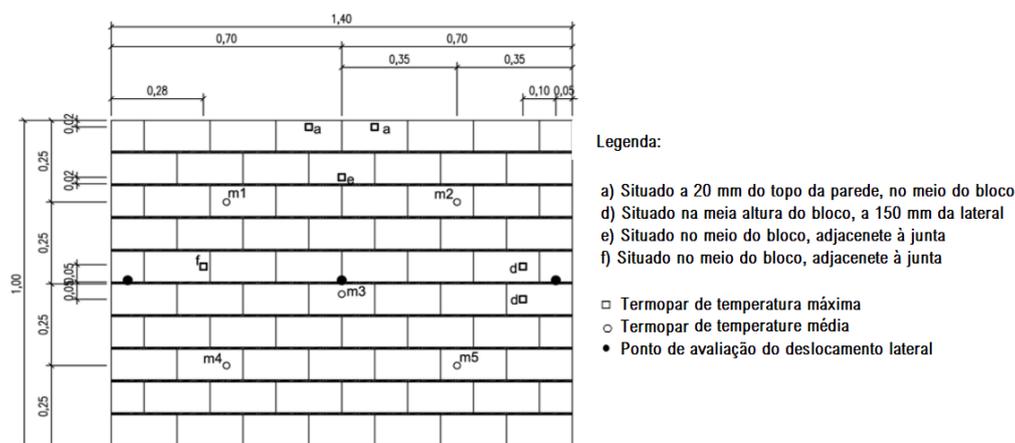


Figura 3: Dimensão dos provetes e localização dos termopares (Lopes, 2017) [5]

### 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.

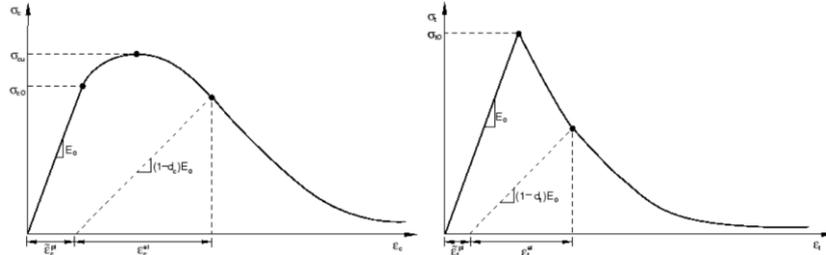


Figura 4. Resposta do concreto em carregamentos uniaxiais: (a) compressão e (b) tração [14]

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.

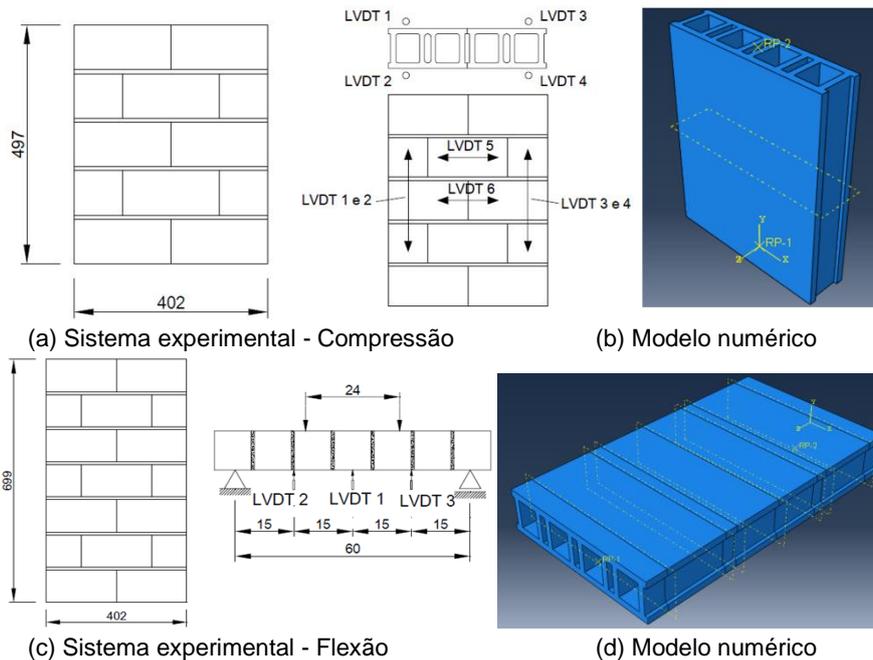


Figura 5: Dimensões do provete (Haach, 2017) [12] e modelos numéricos desenvolvidos

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.

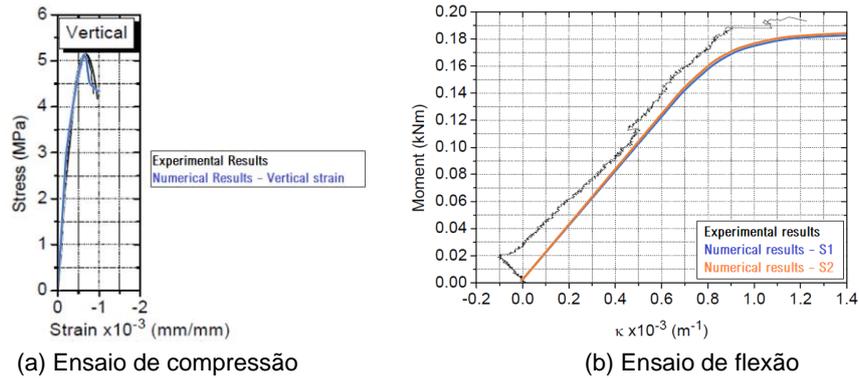


Figura 6: Comparação dos resultados experimentais [12] e numéricos

### 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).

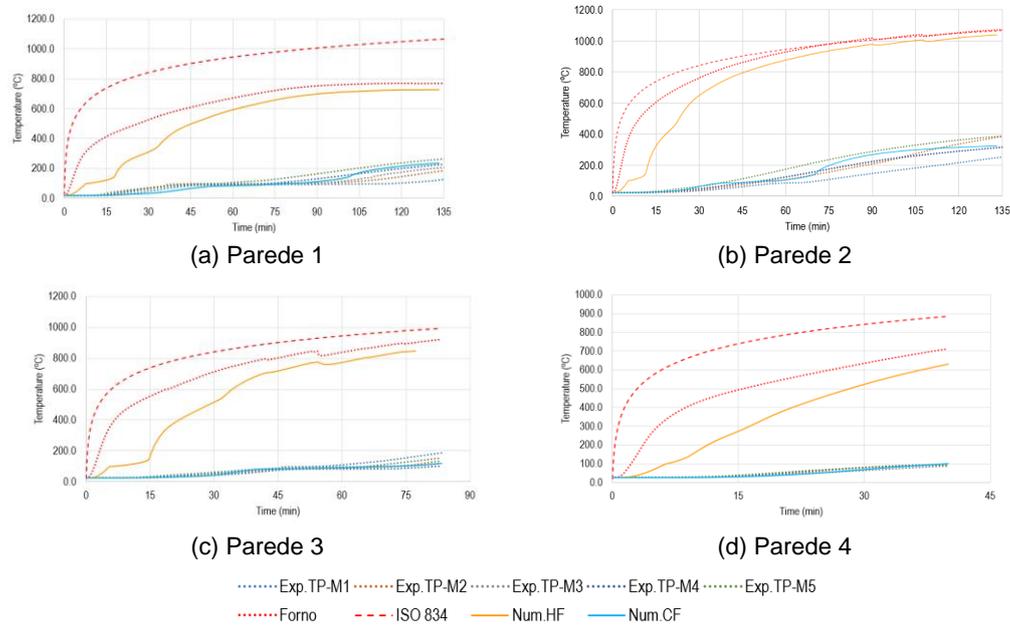


Figura 7: Comparação dos resultados experimentais [5] e numéricos: Temperaturas

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.

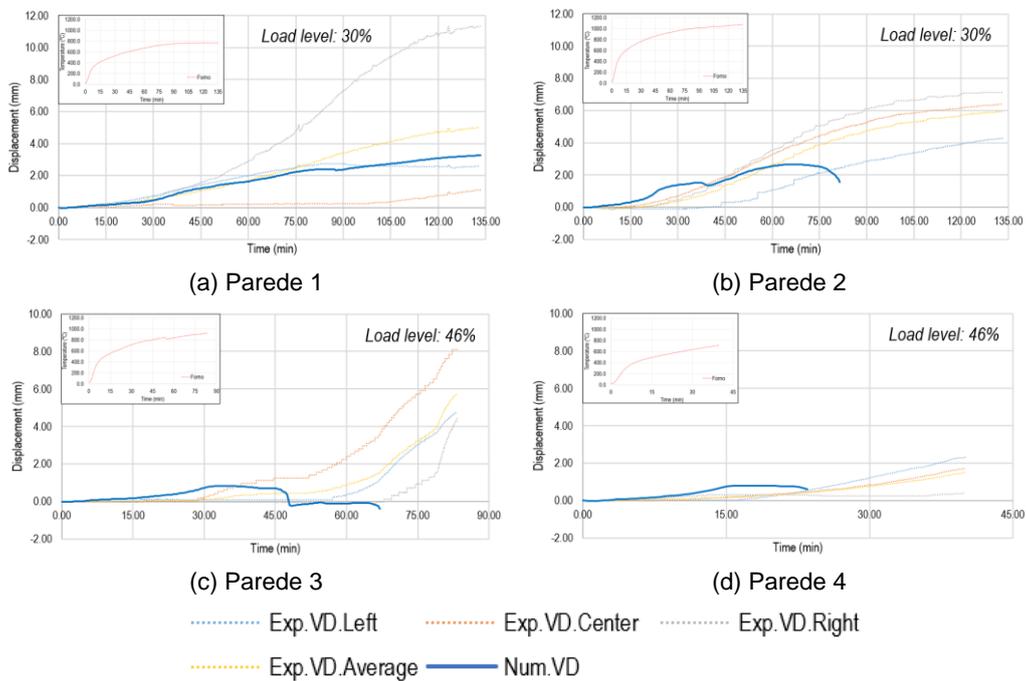


Figura 8: Comparação dos resultados experimentais [5] e numéricos: Deslocamentos verticais

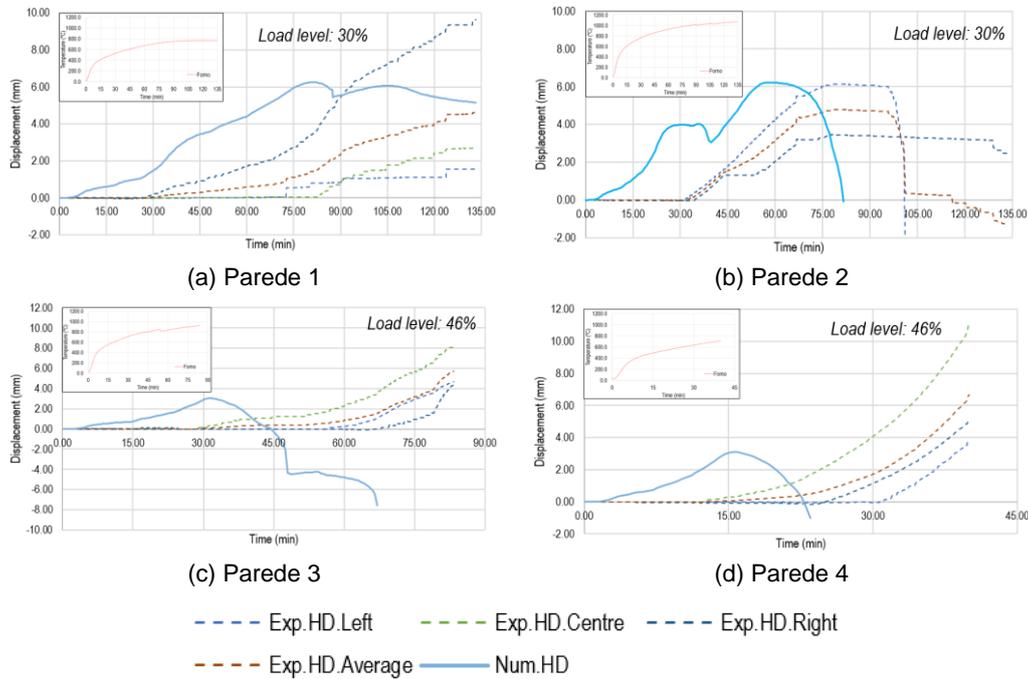


Figura 9: Comparação dos resultados experimentais [5] e numéricos: Deslocamentos horizontais para fora do plano

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.