

EDIFÍCIOS MODULARES PRÉ-FABRICADOS EM BETÃO

COMPORTAMENTO AO FOGO DE HABITAÇÕES MODULARES EM BETÃO — SIMULAÇÃO NUMÉRICA TÉRMICA PARA IDENTIFICAÇÃO DE CENÁRIOS CRÍTICOS

E. Castilho, J.P. Firmo

Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa

A edificação modular é uma evolução da construção tradicional *in situ*, em que os módulos são fabricados em ambiente industrial, reduzindo significativamente o tempo de execução em obra. Existem outros benefícios associados à produção em ambiente controlado, como redução da mão de obra e otimização de processos e geometrias, que promovem o uso eficiente dos materiais. Contudo, esta otimização resulta em elementos mais esbeltos, e, por isso, potencialmente com pior desempenho em situação de incêndio em relação aos elementos de edificações betonadas *in situ*. O comportamento das ligações entre elementos pode também influenciar negativamente a resistência ao fogo de edifícios pré-fabricados em betão armado (BA), assim como a necessidade de intervenções de reparação pós-fogo, nomeadamente para garantir um adequado desempenho à ação sísmica.

Neste artigo apresentam-se resultados de uma análise numérica térmica preliminar que teve como principal objetivo avaliar a vulnerabilidade ao incêndio de soluções modulares em BA, atualmente em desenvolvimento no âmbito do projeto PRR-R2UTechnologies. Pretende-se destacar a importância desta análise na definição da campanha experimental, assegurando o estudo dos aspetos críticos do comporta-

mento em situação de incêndio. As soluções em desenvolvimento destinam-se a habitação (residência sénior, universitária, unifamiliar ou multifamiliar), utilização *tipo I* de acordo com o Regulamento Técnico de Segurança contra Incêndios em Edifícios (RT-SCIE). A tipologia é personalizável, por meio da assemblagem de diferentes combinações de módulos, até um máximo de 5 pisos, classificando-se na 3ª categoria de risco do RT-SCIE. Segundo esse regulamento, os elementos de suporte e compartimentação deverão apresentar capacidade de suporte de carga (*R*), estanquidade (*E*) e isolamento térmico (*I*) de no mínimo 90 minutos (*i.e.*, REI90). Para tal, (i) o critério '*R*' é avaliado após cálculo mecânico; (ii) o critério '*E*' assegurado através da utilização de portas e janelas corta-fogo, bem como instalações de serviço com classificação de resistência ao fogo; e (iii) o critério '*I*' avaliado pelo aumento da temperatura na face não exposta.

ANÁLISE AO FOGO

A simulação numérica de estruturas ao incêndio é geralmente realizada através de um acoplamento termomecânico sequencial. Esta abordagem considera os efeitos térmicos nas

propriedades mecânicas do material, mas ignora o efeito da resposta mecânica nas propriedades térmicas (*e.g.*, influência da fendilhação na condutividade). No presente estudo abordou-se apenas a análise térmica.

No que respeita à ação, o uso do fogo padrão (como o definido na ISO 834) é prática comum no projeto de segurança contra incêndios. A resposta a esta ação depende das propriedades termofísicas dos materiais, condições iniciais e de fronteira e da geometria da estrutura [1]. Tendo em conta a gama de temperaturas atingida durante o incêndio, é essencial considerar a variação das propriedades termofísicas dos materiais, embora haja lacunas na literatura para materiais de isolamento. Neste estudo, essa variação foi considerada.

Apresenta-se a análise térmica de uma secção de parede em zona corrente (afastada das ligações) e de uma zona de ligação de uma das tipologias de habitação modular em desenvolvimento. A zona corrente incorpora isolamento (material EPS) numa configuração tipo sandwich. Nesta secção as paredes são compostas por duas camadas: 5 cm de UHDC¹ exterior, e 15 cm de LCLWAC² no interior. A ligação entre paredes adjacentes é composta por peças metálicas aparafusadas entre si, às quais estão soldados 4 varões metálicos

(embebidos nas paredes, transmitindo os esforços por aderência ao betão, cf. Figura 1). Foi utilizado um modelo bidimensional (2D) para a zona corrente, aplicando a condição de *gap radiation* na interface entre materiais. Na Figura 1(a) apresenta-se a malha de elementos finitos adotada: discretização com elementos do tipo quadrilátero do 2º grau (8 nós) e 10 elementos igualmente espaçados em espessura (total de 2735 nós e 800 elementos). Nas Figuras 1(b) e (c) apresenta-se a zona de ligação (modelo 3D). Utilizaram-se elementos do tipo hexaédrico de 8 nós (1º grau) combinados com elementos lineares. Adotou-se uma discretização de 20 elementos igualmente espaçados em espessura, resultando malha de 102302 nós e 89725 elementos. Ambos os modelos foram desenvolvidos no software *Abaqus Standard*. Quanto à ação, simulou-se o cenário mais comum (incêndio apenas numa divisão): uma face exposta à temperatura ambiente ($T_{ar} = 20\text{ °C}$)

e a outra à curva da ISO 834. As faces laterais foram consideradas fronteira adiabática. Foi realizada a análise transiente desde a temperatura inicial nos materiais ($T_0 = T_{ar} = 20\text{ °C}$) até 6 h de exposição à curva padrão da ISO 834, adotando-se uma solução implícita (incremental e iterativa) para a integração no tempo, com passo de cálculo entre $1\text{E}^{-3}\text{ s}$ e 10 s (sendo permitida, por incremento, uma variação máxima de 10 °C).

É importante referir que certos fenómenos são ainda difíceis de simular numericamente e, por isso, requerem avaliação experimental: e.g.: (i) delaminação do recobrimento pela exposição a temperatura elevada, *spalling*; (ii) eventual desligamento de paredes compostas por diferentes camadas, promovido pela exposição a temperatura elevada; (iii) perda de aderência dos elementos das ligações devido a fissuração por variações de temperatura. Contudo, as campanhas experimentais são onerosas (temporal

e financeiramente). Assim, a análise numérica térmica apresenta-se como uma ferramenta útil na identificação dos cenários críticos em que se justifica a realização de ensaios. Estes deverão ser direcionados para as tipologias condicionantes, identificadas não só pela temperatura dos varões embebidos no betão, mas também pelo gradiente de temperaturas junto à face exposta. As Figuras 2 (a) e (b) apresentam o campo de temperaturas de uma parede em desenvolvimento neste projeto, indicando que o critério I (aumento médio $<140\text{ °C}$ / aumento pontual $<180\text{ °C}$) é claramente respeitado até aos 90 minutos de exposição ao fogo. Pela apreciação do gradiente térmico é possível estimar expeditamente o risco de *spalling*. Maluk [2] concluiu que o gradiente que espoletaria este fenómeno em betões correntes é $\sim 11\text{ °C/mm}$. Como o gradiente obtido é elevado (20 °C/mm), considera-se que o risco de *spalling* durante a ação de um incêndio é considerável. Além dis-



MADE in ITALY

SOLUÇÕES PARA A CONTABILIZAÇÃO DO CONSUMO DE ÁGUA E DE CALOR



CONTADOR DE ÁGUA RESIDENCIAL

CONTADOR DE ÁGUA INDUSTRIAL

CONTADOR DE CALOR

M-Bus

M-Bus

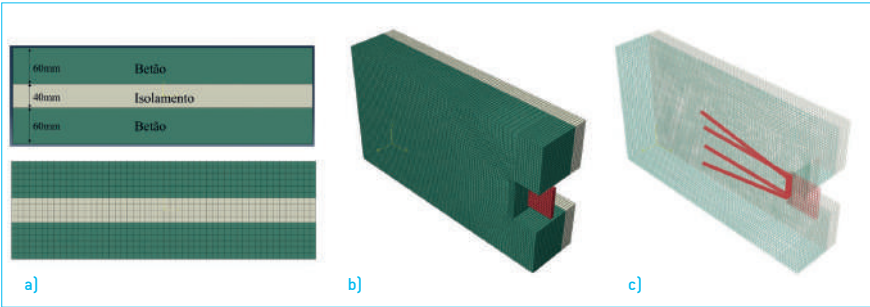
GMS

NB-IoT

LoRaWAN

ALPHA ENGENHARIA

Tel. 220 136 963 · info@alphaengenharia.pt · www.alphaengenharia.pt



1>

so, a faixa sujeita a temperaturas superiores a 300 °C é de aproximadamente 40 mm, i.e., superior à espessura do recobrimento (25 mm). Este perfil de temperaturas sugere a existência de danos não desprezáveis (classificados por “damage state 3” em [3]), os quais podem requerer significativa reparação pós-fogo. Evidentemente que a análise térmica não permite avaliar explicitamente a redução da capacidade de carga, contudo, evidencia fenómenos dignos de estudos futuros. Em particular, nesta secção recomenda-se a verificação experimental ao *spalling*, bem como da capacidade residual da parede. Relativamente à capacidade de carga das ligações: durante o incêndio, antevê-se que não seja um aspeto crítico, uma vez que a solicitação mecânica é praticamente nula nesta situação. Além disso, verifica-se que, após 90 minutos de exposição, a temperatura máxima no varão embebido no betão é de apenas 112 °C, pelo

que as propriedades mecânicas do aço estão inalteradas, c.f. Figura 2 [c]. Nos estudos experimentais a realizar no âmbito deste projeto o foco incidirá na capacidade residual (pós-incêndio) dessas ligações, em particular para avaliar a necessidade de reparação pós-fogo, nomeadamente para garantir um adequado desempenho sísmico.

CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou os resultados de um procedimento de cálculo térmico preliminar para avaliar a vulnerabilidade ao incêndio de uma solução modular em BA. As paredes em desenvolvimento respeitam a exigência I aos 90 minutos, e embora não seja possível avaliar explicitamente critério R com base em modelos térmicos, prevê-se que a capacidade de suporte seja cumprida pelo facto de as cargas atuantes

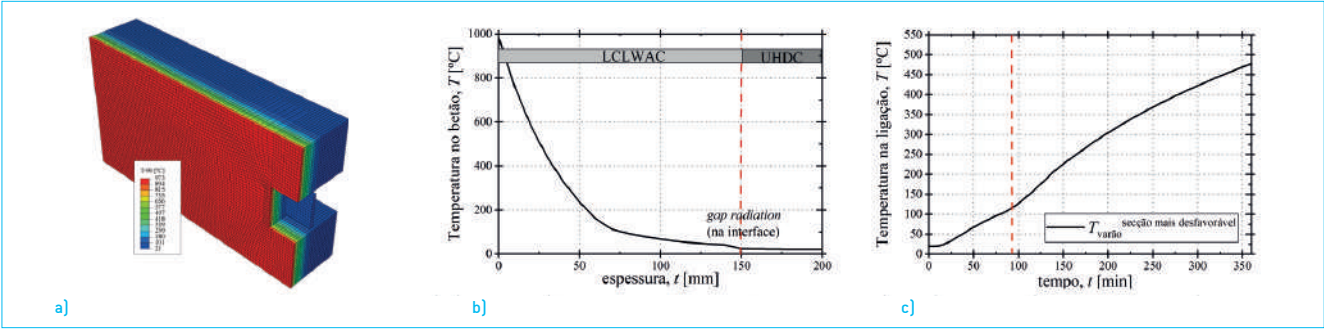
para combinação de incêndio serem reduzidas (situação a avaliar em análise mecânica posterior). Esta análise térmica ‘simples’ considera-se relevante pelo potencial demonstrado na identificação de cenários críticos e fenómenos que necessitam de avaliação experimental, permitindo direccionar os esforços experimentais para os aspetos potencialmente problemáticos (como o comportamento residual das ligações e a possibilidade de *spalling*), garantindo uma abordagem mais eficaz na melhoria das soluções em BA para habitações modulares em desenvolvimento neste projeto. ■

REFERÊNCIAS

[1] N. S. Leitão and E. Castilho, “Heat transfer analysis of infrastructures subjected to environmental actions: A finite element solver PAT,” *Therm. Sci. Eng. Prog.*, vol. 34, no. June, 2022.

[2] H. Y. Lam, K. T. E. Lim, and C. Maluk, “Quantifying the link between in-depth temperature gradients and onset of fire-induced concrete spalling,” in *SiF 2024 – The 13th International Conference on Structures in Fire*. University of Coimbra, Portugal, 19 to 21 June, 2024, pp. 567–576.

[3] F. S.-B. N. Tajik, N. Elhami-Khorasani, R. Ranade, A. Tessari, “Post-fire damage classification of reinforced concrete structures using thermal analysis,” in *SiF 2024 – The 13th International Conference on Structures in Fire*. University of Coimbra, Portugal, 19 to 21 June, 2024, pp. 545–554.



2>

> Figura 1: Modelo de Elementos Finitos de [a] zona corrente; e zona ligação [b] exterior; [c] interior.
> Figura 2: Resposta térmica: [a] Modelo EF; [b] em espessura [após 90 mins de exposição]; [c] evolução da temperatura no varão embebido no betão [representado na Figura 1(c)].