

XXV
**CONGRESSO DE
CONSTRUÇÃO
METÁLICA MISTA**

**CONGRESSO DE
ENGENHARIA
DE FACHADAS**

**TEMAS ESPECIAIS
INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL
ENERGIA**

Editores
Luís Simões da Silva
Paulo Vila Real
Filip Ljubinković
Jorge Conde
Rohola Rahnavard
Luís Figueiredo Silva



**CONGRESSO DE
CONSTRUÇÃO
METÁLICA E MISTA**

**CONGRESSO DE
ENGENHARIA
DE FACHADAS**

TEMAS ESPECIAIS
INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL
ENERGIA



Atas do XV Congresso de Construção Metálica e Mista e I Congresso de Engenharia de Fachadas

20 e 21 de Novembro de 2025

Luís Simões da Silva

Departamento de Engenharia Civil
Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra
Coimbra, Portugal

Paulo Vila Real

Departamento de Engenharia Civil
Universidade de Aveiro
Aveiro, Portugal

Filip Ljubinković

Departamento de Engenharia Civil
Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra
Coimbra, Portugal

Jorge Conde

Departamento de Estructuras de Edificación
Universidad Politécnica de Madrid
Madrid, Espanha

Rohola Rahnavard

Departamento de Engenharia Civil
Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra
Coimbra, Portugal

Luís Figueiredo Silva

Associação Portuguesa de Construção Metálica e Mista
Coimbra, Portugal

organização: **CMM** – Associação Portuguesa de Construção Metálica e Mista
EdF – Associação Portuguesa de Engenharia de Fachadas



XV Congresso de Construção Metálica e Mista e I Congresso de Engenharia de Fachadas

Copyright © 2025

por Luís Simões da Silva, Paulo Vila Real, Filip Lubinković, Jorge Conde, Rohola Rahnavard,
Luís Figueiredo Silva

Editora:

cmm – Associação Portuguesa de Construção Metálica e Mista
Business Center Leonardo da Vinci
Coimbra iParque Lote 3
3040-540 Coimbra, Portugal
Tel.: +351 239 098 422; Tlm.: +351 965 061 249; Fax: +351 239 091 216
Email: cmm@cmm.pt
Url: www.cmm.pt

1ª Edição: Novembro 2025

Não é permitida a reprodução total ou parcial deste livro, o registo em suporte informático, ou a transmissão através de qualquer processo electrónico ou mecânico, sem a prévia autorização por escrito dos titulares dos direitos da edição.

ISBN: 978-989-35292-3-2

Coordenação editorial: Joana Albuquerque
Conceção gráfica da capa: Joana Albuquerque
Formatação de conteúdos e paginação: Joana Filipe Albuquerque

Nota da editora

Este texto foi elaborado a partir da reprodução dos originais preparados pelos autores. Por conseguinte, a editora não pode aceitar qualquer responsabilidade pelo conteúdo, nem por possíveis erros no texto.

Prefácio

O XV Congresso de Construção Metálica e Mista e I Congresso de Engenharia de Fachadas representam um momento de grande relevância para o setor em Portugal, reunindo especialistas, investigadores e empresas num espaço comum de partilha de conhecimento. Nesta décima quinta edição, o Congresso de Construção Metálica e Mista reafirma a maturidade e solidez de um percurso iniciado há mais de duas décadas, consolidando-se como o principal evento técnico-científico nacional dedicado à construção metálica e mista. O crescimento contínuo do número de participantes, comunicações e empresas envolvidas testemunha o reconhecimento da sua importância e o papel que tem desempenhado na promoção da inovação, na disseminação prática do conhecimento e na aproximação entre a academia e a indústria.

Regista-se com satisfação o envolvimento excecional do setor empresarial. O Congresso conta com 80 patrocinadores e uma exposição técnica com 77 stands, números que revelam a confiança e o entusiasmo das empresas na valorização da construção metálica e mista e das fachadas, bem como no papel agregador que este evento desempenha no panorama nacional. No plano técnico-científico, foram submetidos 99 artigos e proferidas 28 palestras, refletindo a intensidade e qualidade da participação da comunidade académica e profissional. A todos expressamos o nosso reconhecimento.

É neste cenário de continuidade, progresso e consolidação que se integra, com especial significado, o I Congresso de Engenharia de Fachadas, que surge como resposta natural à evolução tecnológica do setor e à necessidade de um espaço próprio para discutir temas específicos associados à envolvente dos edifícios. Este novo congresso afirma definitivamente a Engenharia de Fachadas no panorama nacional, como área multidisciplinar, inovadora e essencial para a construção sustentável do futuro, refletindo o avanço das soluções construtivas, a crescente complexidade dos sistemas de fachada e o reconhecimento de que o desempenho do edifício depende, cada vez mais, da qualidade e integração destes elementos.

Num contexto em que a construção enfrenta novos desafios – desde a descarbonização e economia circular, até à necessidade de sistemas construtivos mais eficientes, industrializados e tecnologicamente avançados – este encontro conjunto mostra a capacidade do tecido técnico e industrial português para responder com soluções maduras, competitivas e orientadas para o futuro. A diversidade de comunicações recebidas e a forte participação académica e empresarial atestam o dinamismo do setor e reforçam a importância do diálogo contínuo entre investigação, projeto e indústria.

A fundação em 2025 da EdF – Associação Portuguesa de Engenharia de Fachadas, concretiza uma ambição longamente amadurecida por diversos profissionais e instituições. A EdF nasce para promover o conhecimento técnico, contribuir para a evolução normativa e potenciar a qualidade e visibilidade do trabalho português, dentro e fora do país. Este passo representa não apenas a criação de uma nova entidade, mas a consolidação de uma comunidade empenhada em reforçar competências e abrir novos horizontes à tecnologia de fachadas.

Por fim, a publicação de livro de atas testemunha a vitalidade técnica e científica do Congresso. Reúne trabalhos que refletem o que de mais recente se investiga e pratica, oferecendo um registo permanente do conhecimento aqui partilhado e convidando à reflexão sobre os caminhos que ainda temos por trilhar. Que estas páginas sirvam de referência, inspiração e instrumento de progresso para engenheiros, arquitetos, investigadores, estudantes e todos quantos contribuem para a evolução do setor.

Luís Simões da Silva

Presidente da CMM e da Comissão Organizadora do

XV Congresso de Construção Metálica e Mista e I Congresso de Engenharia de Fachadas

Comissão Organizadora

Luís Simões da Silva, CMM
Filip Ljubinković, UC
Jorge Conde, UPM
Rohola Rahnavard, UC
Luís Figueiredo Silva, CMM

Comissão Científica

Paulo Vila Real, UA
Abílio de Jesus, FEUP
Aldina Santiago, UC
Alejandro Bernabeu, BERNABEU INGENIEROS
Alexandra Feliz, O FELIZ
Alfonso Loureiro, UDC
Altino Loureiro, UC
Ana Espinós Capilla, UPV
Ana Girão Coelho, BCSA
Ana Isabel Silva, IP
António Adão da Fonseca, FEUP
António Matos Silva, MARTIFER SA
António Reis, IST
Artur Mateus, UC
Beatriz Gil, UNAV
Bruno Marques, FERPINTA
Carlos Couto, UA
Carlos Graciano, UNAL
Carlos Muñoz, UPC
Carlos Poço, O POÇO SA
Carlos Rebelo, UC
Constança Rigueiro, IPCB
Daniel Aelenei, UNL
David Andrade, UC
Dinar Camotim, IST
Diogo Ribeiro, ISEP
Dulce Rodrigues, UC
Elsa Caetano, FEUP
Filip Ljubinković, UC
Filipe Santos, VESAM GROUP
Filipe Amarante dos Santos, UNL
Francisco Virtuoso, IST
Hélder Craveiro, UC
Helena Gervásio, UC
Humberto Varum, FEUP
Isabel Valente, UM
Javier Gracia, UNIOVI
João Almeida Fernandes, LNEC
João Pedro Martins, UC João Pires da Fonseca, UBI
João Rocha de Almeida, UNL
Jorge Conde, UPM
Jorge Paiva, CIN
José António Correia, INEGI
José Miguel Castro, FEUP
José Oliveira Pedro, IST
Juan Carlos Vielma, PUCV
Juan Rey, UDC
Leonor Côrte-Real, HEMPEL
Luís Borges, STRUCTURAME
Luís Calado, IST
Luís Câncio, J.L. CÂNCIO MARTINS, LDA
Luís Godinho, UC
Luís Laím, UC
Luís Simões da Silva, UC
Nuno Lopes, UA
Nuno Silvestre, IST
Paulo Cruz, UM
Paulo Piloto, IPB
Paulo Santos, UC
Rodrigo Gonçalves, UNL
Rohola Rahnavard, UC
Rui Alves, PROINDUSTRIAL
Rui Simões, UC
Sandra Jordão, UC
Tiago Abecasis, TAL PROJECTO, Lda
Tiago Mendonça, BETAR
Trayana Tankova, TU DELFT
Victor Ferreira, UA

Comissão Executiva

Luís Figueiredo Silva, CMM

Ana Gomes, CMM

Catarina Gomes, CMM

Flávia Veiga, CMM

Henrique Lima, CMM

Joana Albuquerque, CMM

Pedro Fernandes, CMM

Sérgio Gonçalves, CMM

CMM Associação Portuguesa de Construção Metálica e Mista | **BCSA** British Constructional Steelwork Association | **EdF** Associação Portuguesa de Engenharia de Fachadas | **FEUP** Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto | **INEGI** Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial | **IP** Infraestruturas de Portugal | **IPB** Instituto Politécnico de Bragança | **IPCB** Instituto Politécnico de Castelo Branco | **ISEP** Instituto Superior de Engenharia do Porto | **IST** Instituto Superior Técnico | **LNEC** Laboratório Nacional de Engenharia Civil | **PUCV** Pontificia Universidade Católica de Valparaíso | **TU DELFT** Universidade Técnica de Delft | **UA** Universidade de Aveiro | **UBI** Universidade da Beira Interior | **UC** Universidade de Coimbra | **UDC** Universidade de Corunha | **UM** Universidade do Minho | **UNAL** Universidade Nacional da Colômbia | **UNAV** Universidade de Navarra | **UNIOVI** Universidade de Oviedo | **UNL** Universidade Nova de Lisboa | **UPC** Universidade Politécnica da Catalunha | **UPM** Universidade Politécnica de Madrid | **UPV** Universidade Politécnica da Valência



AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO AO FOGO DE PAREDES EXTERIORES EM LIGHT STEEL FRAMING

Leonardo Torres ^a; Carlos Couto ^b; Paulo Vila Real ^c; Paulo Piloto ^d

^{a,b,c} CERIS, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Aveiro, Portugal

^d GICoS, Instituto Politécnico de Bragança, Bragança, Portugal

Resumo. Este estudo avaliou o comportamento ao fogo de paredes em Light Steel Framing (LSF) através de quatro ensaios experimentais de pequena escala, sujeitos à curva de incêndio padrão ISO 834 pelo lado interior (revestido com gesso) e exterior (revestido com ISOLPRO). Como esperado, verificaram-se diferenças significativas no isolamento térmico (I) e no aquecimento dos perfis metálicos. As simulações numéricas por elementos finitos confirmaram a tendência observada experimentalmente, sobretudo no cenário de fogo pelo lado interior. Os ensaios demonstram-se essenciais para a calibração de modelos e para o desenvolvimento de soluções construtivas mais seguras.

1 Introdução

O comportamento ao fogo de painéis de parede em Light Steel Framing (LSF) tem sido amplamente estudado, refletindo a expansão da utilização de perfis de aço enformado a frio no sector da construção em diversos mercados. Estes perfis podem integrar sistemas estruturais de suporte em edifícios de vários pisos ou atuar como elementos complementares em conjunto com estruturas de betão ou aço.

O desempenho ao fogo depende da resistência dos perfis de aço enformados a frio que aquecem rapidamente e com o aumento da temperatura do aço, há uma degradação das propriedades mecânicas e, conseqüentemente, uma redução da rigidez e da resistência mecânica [1, 2]. Para diminuir a transferência de calor e melhorar a resistência dos perfis metálicos ao fogo, as estruturas LSF são normalmente protegidas por placas de gesso ou outros materiais que formam os painéis de parede em LSF [3].

Entre os materiais mais usados nas paredes LSF destacam-se o gesso cartonado e o OSB "Oriented Strand Board". O OSB, em particular, embora versátil, apresenta comportamento combustível quando exposto ao fogo, dificultando a simulação numérica do comportamento termo-mecânico [4].

Os sistemas de parede LSF são classificados quanto à sua resistência ao fogo segundo os critérios de estanquidade (E), isolamento (I) e resistência mecânica (R), conforme a EN 13501-

2 [5]. Em paralelo, a EN 1993-1-2 [6] fornece regras para o dimensionamento estrutural do aço em situações de incêndio, incluindo perfis de classe 4 que compõe as paredes no sistema LSF.

Nas últimas décadas, vários estudos exploraram alterações nas paredes LSF como o aumento do número de camadas de placas de gesso, ou na adoção de placas cimentícias [6]. Nalguns estudos, o isolamento interno melhorou o critério de isolamento da resistência ao fogo (I) dos painéis de parede de LSF [7, 8]. De um modo geral, estes estudos avaliaram os efeitos destes parâmetros através de ensaios ao fogo em grande escala [9] ou simulações numéricas expostos à curva de incêndio da norma ISO 834 [10]. Estudos recentes específicos de paredes exteriores em LSF também começaram a emergir [11].

A crescente severidade dos incêndios em países do sul da Europa, como Portugal, exige que se investigue de forma diferenciada o desempenho ao fogo de paredes exteriores LSF, pois as condições climáticas, a radiação solar e as especificidades construtivas, podem influenciar significativamente a resposta ao incêndio. Este trabalho visa colmatar estas lacunas, apresentando ensaios experimentais em pequena escala e a sua comparação com simulações numéricas, para oferecer uma melhor base para dimensionamento e regulamentos adaptados.

2 Ensaio experimental

Foram realizados quatro ensaios de pequena escala (S_A01, S_A02, S_A03, S_A04), de dimensões: 1000×975 mm, em pares de repetição, compostos de estruturas em LSF com 4 montantes, com camada interna de placa de gesso cartonado, e camada externa com placa ISOLPRO (painel compósito de EPS e cimento aligeirado com uma estrutura interna reforçada), com junta de dilatação, devido à largura da placa. Nos dois primeiros ensaios, aplicou-se a curva ISO 834 no lado interior (gesso), e restantes, aplicou-se a curva ISO 834, pelo lado exterior (ISOLPRO).

Os critérios de avaliação, registados por diversos termopares, conforme descritos no subitem relativo à instrumentação, consideram os tempos até $T(\max) = T_0 + 180^\circ\text{C}$ e $T(\text{ave}) = T_0 + 140^\circ\text{C}$ na face não exposta, bem como os tempos em que a estrutura LSF atinge 350°C nas principais regiões dos perfis (HF, WEB, CF). A referência de 350°C , segue a orientação da temperatura crítica para secções de classe 4, como as utilizadas nos perfis LSF, prescrito na EN 1993-1-2:2024 [6], na ausência de um cálculo mecânico mais rigoroso em situação de incêndio.

2.1 Instrumentação

Para o acompanhamento da evolução térmica foram instalados 23 termopares, distribuídos por diferentes tipologias e funções de medição, de acordo com o esquema de posicionamento apresentado na Fig. 1.

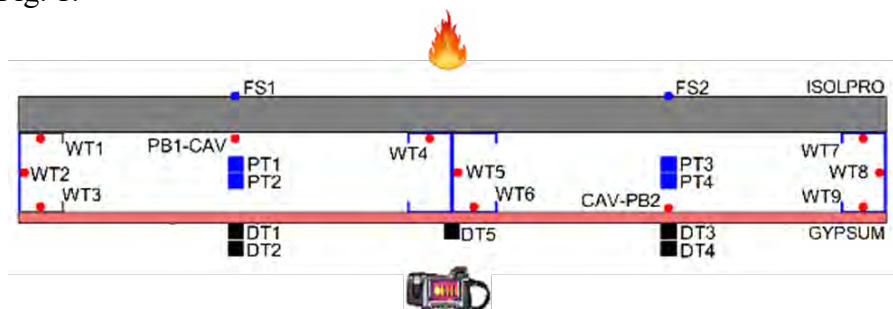


Fig. 1: Indicação de termopares: FS (Termopar área exposta); WT (Termopar de solda nos perfis); PT (Termopar de placa); DT (termopar de disco)

A Fig. 2 apresenta a instrumentação com termopares de disco (DTs), aplicados na face não exposta da amostra. Na imagem observa-se a configuração completa destes sensores, enquanto a imagem complementar mostra em detalhe o processo de fixação por soldadura do termopar de disco.

A correta distribuição e fixação destes sensores é essencial para assegurar a fiabilidade das leituras e a representatividade dos resultados, possibilitando uma avaliação rigorosa do comportamento térmico da parede durante a exposição ao fogo.



Fig. 2: Termopares de disco (DTs) e termopares de placa (PTs)

2.2 Resultados experimentais

As duas primeiras amostras (S_A01 e S_A02), ensaiadas em condições idênticas, foram submetidas à aplicação da curva de incêndio padrão ISO 834 pelo lado interno da parede, revestida com placa de gesso cartonado, apresentaram resultados muito próximos no critério de isolamento térmico (I): T(max) 124 min (S_A01) e 121 min (S_A02); T(ave) 118 min (S_A01) e 117 min (S_A02). Para a temperatura de 350 °C, estabelecida na EN 1993-1-2:2024 [6] como a temperatura crítica para perfis de classe 4, verificaram-se os seguintes resultados: HF 32 min (S_A01) e 30 min (S_A02); WEB 52 min (S_A01) e 43 min (S_A02); CF 57 min (S_A01) e 55 min (S_A02) ver (Tabela 1).

Tabela 1: Resultados experimentais usados para critério I e temperatura na estrutura LSF

Temperatura Máxima e Média			Temperatura de 350°C no perfil LSF			
Amostras	T(max) (min)	T(ave) (min)	Amostras	HF (min)	WEB (min)	CF (min)
S_A01 - EXP	124	118	S_A01 - EXP	32	52	57
S_A02 - EXP	121	117	S_A02 - EXP	30	43	55
S_A03 - EXP	113	108	S_A03 - EXP	84	95	103
S_A04 - EXP	111	111	S_A01 - EXP	83	99	103

Para membros com seções transversais de classe 4, uma temperatura crítica padrão, $\theta_{a,cr}$ de 350 °C é sugerida na cláusula 7.5 da EN1993-1-2:2024, portanto, essa temperatura é usada aqui como referência.

A repetição dos ensaios teve como objetivo avaliar a reprodutibilidade dos ensaios em pequena escala. Os resultados confirmam uma excelente consistência experimental, com diferenças de apenas alguns minutos, tanto para o critério de isolamento, como na evolução da temperatura nos perfis LSF.

Ao analisar o comportamento das curvas experimentais (ver Fig. 3), verifica-se a proximidade entre os dois ensaios, o que reforça a validade dos resultados e a robustez do método experimental, em particular no que respeita à precisão da instalação dos termopares utilizados na recolha das medições.

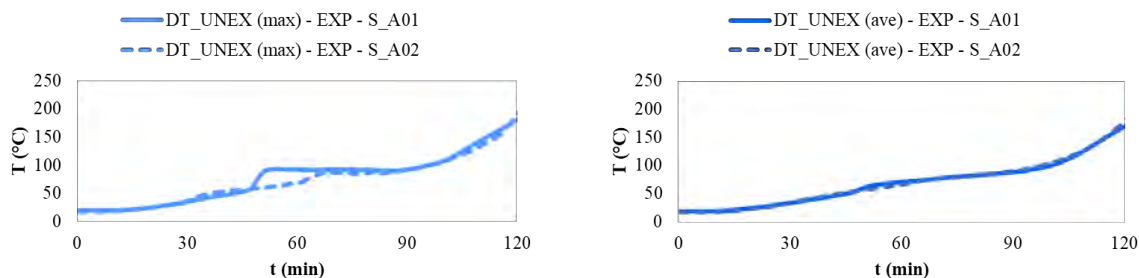


Fig. 3: Resultado na superfície não exposta $T(\max)$ e $T(\text{ave})$ – S_A01 e S_A02

Apresentam-se ainda registos complementares que permitem uma caracterização mais detalhada do comportamento térmico da parede LSF (S_A01). A Fig. 4 mostra a curva global obtida a partir do conjunto de termopares instalados, incluindo a curva do forno, a curva ISO 834 e a curva IR (resultados na face não exposta, registados por câmara de infravermelhos), possibilitando uma avaliação integrada da evolução térmica da amostra ao longo do ensaio. Importa referir que este foi interrompido quando as temperaturas na face não exposta ultrapassaram os limites definidos para $T(\max)$ em todos os DTs, de acordo com os critérios normativos aplicáveis (EN1363-1). A Fig. 5 apresenta um registo da câmara infravermelhos no final da exposição ao fogo, onde se evidenciam as zonas de maior temperatura na face não exposta e imagem da amostra (S_A02) na área exposta, no final do ensaio.

Por fim, a Fig. 6 documenta fotografias no interior do forno, onde se observa a formação de fissuras no revestimento em gesso, fenómeno particularmente relevante para a compreensão da transferência de calor para a cavidade e para os perfis LSF.

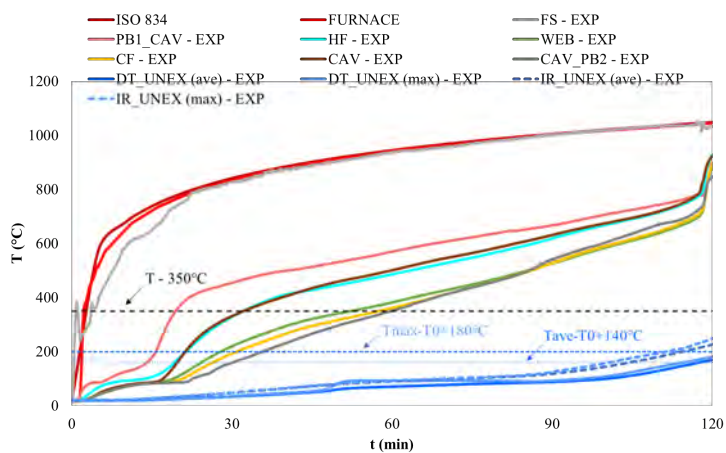


Fig. 4: Resultados experimentais em diferentes posições da amostra S_A01

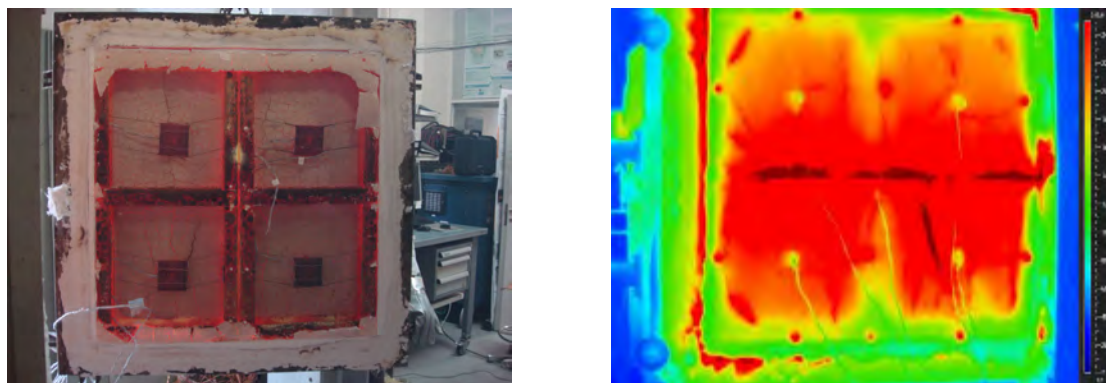


Fig. 5: IR no final da exposição e imagem da face exposta ao final do ensaio – S_A02

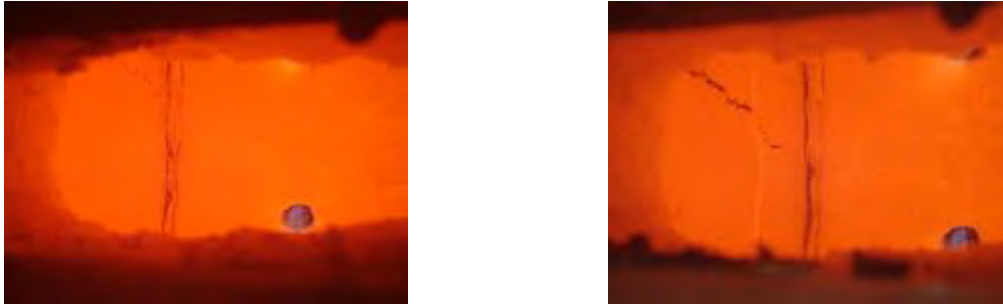


Fig. 6: Fissura no interior do forno – S_A01 e S_A02 (tempo = 55 min)

Na sequência, as duas últimas amostras ensaiadas (S_A03 e A_A04), seguindo os mesmos pressupostos das anteriores, foram submetidas à curva ISO 834 aplicada pelo lado exterior, com revestimento em placa ISOLPRO. Os resultados, tal como nos ensaios com fogo pelo lado interior, demonstraram igualmente uma boa repetibilidade, apresentando valores praticamente coincidentes entre as duas amostras. Para o critério de isolamento térmico (I), registram-se: T(max) 113 min (S_A03) e 111 min (S_A04); T(ave) 108 min (S_A03) e 111 min (S_A04). Relativamente à temperatura crítica de 350 °C, observam-se os seguintes tempos: HF 84 min (S_A03) e 83 min (S_A04); WEB 95 min (S_A03) e 99 min (S_A04); CF 103 min em ambas as amostras ver (Tabela 1). Estas temperaturas diferem substancialmente das determinadas nas amostras (SA_01) e (SA_02) e estão relacionadas com a excelente capacidade de integridade física das placas ISOLPRO.

Ao analisar o comportamento das curvas experimentais correspondentes (ver Fig. 7), constata-se a proximidade dos resultados entre os dois ensaios, reforçando a consistência dos resultados obtidos e a fiabilidade do método experimental aplicado.

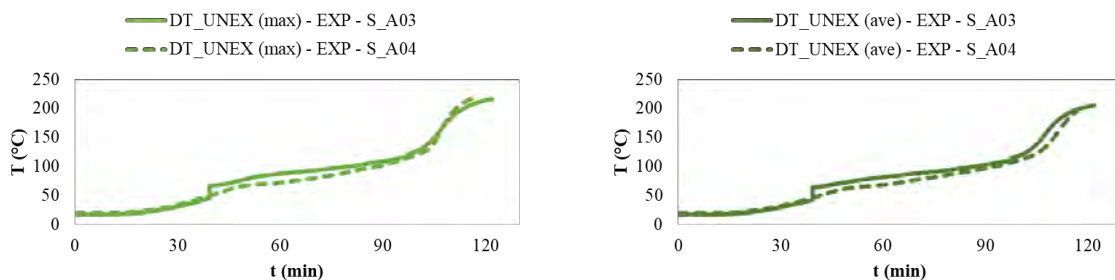


Fig. 7: Resultado na área exposta T(max) e T(ave) – S_A03 e S_A04

Tal como nos ensaios iniciais, a Fig. 8 apresenta a curva global da temperatura de todos os termopares, incluindo a curva de aquecimento do forno, a curva padrão ISO 834 e a curva IR. A Fig. 9 mostra o registo obtido por câmara de infravermelha no final da exposição, bem como a imagem das amostras na área exposta após o ensaio. Por fim, a Fig. 10 ilustra o interior do forno, evidenciando o revestimento da placa ISOLPRO.

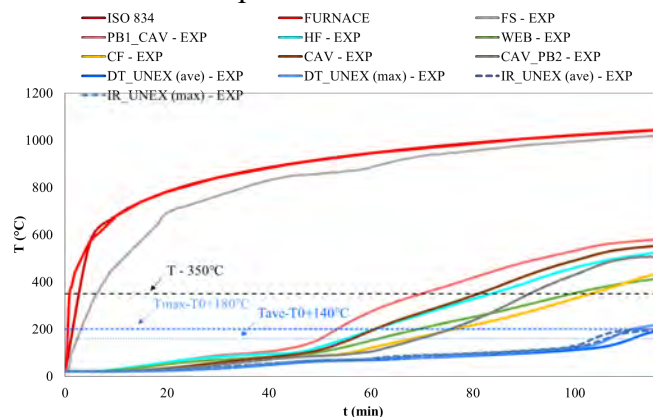


Fig. 8: Resultados experimentais em diferentes posições da amostra S_A04

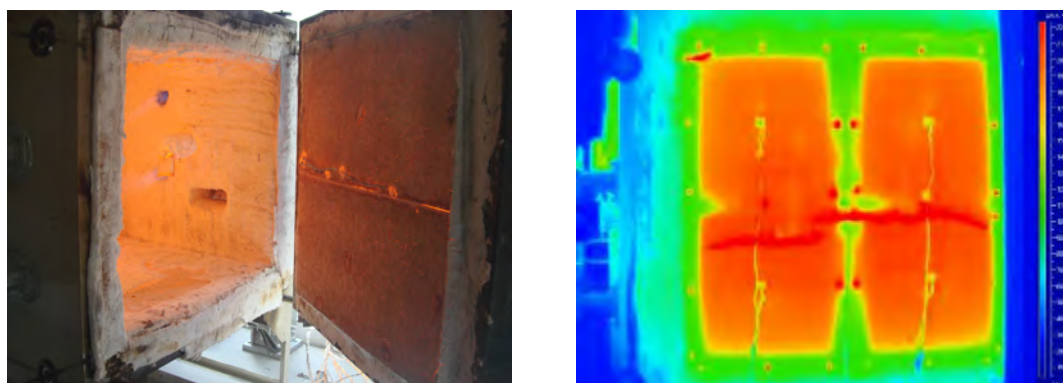


Fig. 9: IR no final da exposição e imagem da face exposta ao final do ensaio – S_A04 107 min

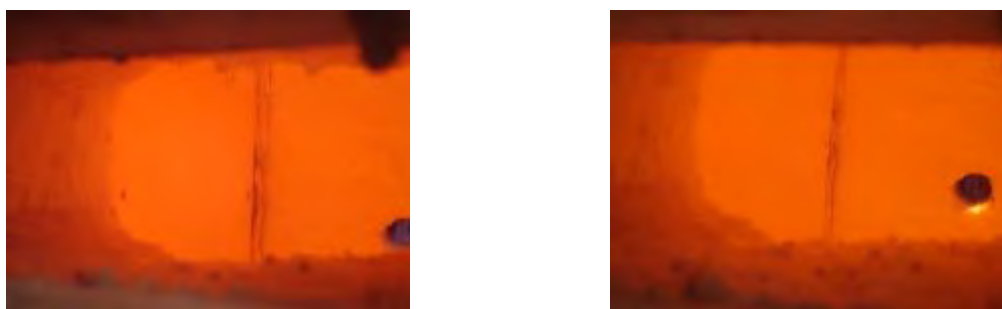


Fig. 10: Interior do forno – S_A03 e S_A04 (tempo = 120 min)

Pode observar-se, nos dois grupos ensaiados diferenças relevantes. No que respeita ao critério de isolamento térmico (I) na face não exposta, os tempos registados foram ligeiramente superiores quando a curva padrão ISO 834 foi aplicada pelo lado interior (gesso): T(max) 121 e 124 min, em contraste com 111 e 113 min, obtidos nos ensaios com a curva de incêndio pelo lado exterior (ISOLPRO). Este resultado indica que a resistência ao isolamento (I) foi superior quando a exposição ao fogo ocorreu pelo lado interior (gesso), como se pode verificar no comportamento das curvas apresentadas na Fig. 11.

No entanto, em relação à temperatura de referência de 350 °C nos montantes LSF, observou-se o comportamento inverso: na exposição pelo lado interior, os perfis (ver HF, WEB, CF) atingiram a condição crítica para tempos inferiores (30 a 57 min), em comparação com a exposição pelo lado exterior (83 a 103 min). Assim, apesar de o isolamento (I) ser ligeiramente inferior quando o fogo incide pelo lado exterior, os perfis metálicos demoram mais a aquecer, prologando o tempo até à condição crítica.

Estas diferenças assumem particular importância na avaliação desempenho térmico global das paredes, uma vez que o critério de isolamento (I) e a condição crítica dos perfis metálicos LSF (R) podem conduzir a interpretações distintas no que respeita à segurança em situação de incêndio.

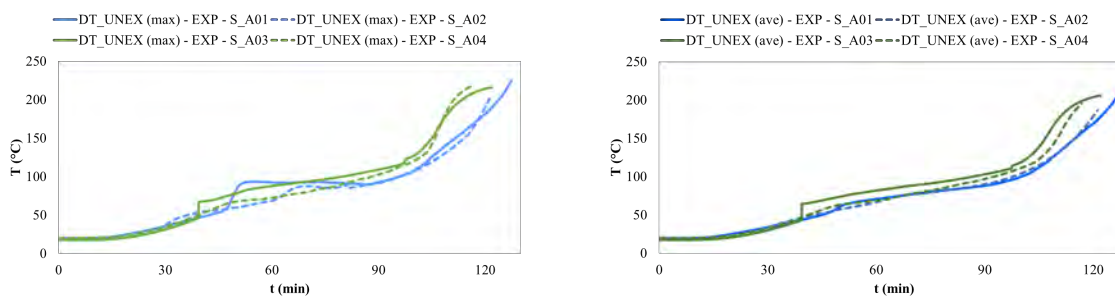


Fig. 11: Comparação dos resultados: fogo lado interior e exterior – T(max) e T(ave)

3 Simulação numérica e validação dos resultados experimentais

3.1 Modelo numérico

O modelo tridimensional foi desenvolvido no ANSYS Mechanical APDL (2023) [12] para simular a transferência térmica em paredes LSF. Para a modelação, recorreu-se ao SHELL 131 nas camadas em casca (perfis), e ao SOLID 70 nos volumes correspondentes ao gesso e ao ISOLPRO, representando assim a condução de calor nos diferentes materiais.

As condições de contorno no interior da cavidade foram aplicadas através dos elementos LINK 34, para a convecção térmica uniaxial entre nós com base no coeficiente de filme, e SURF 152, para a radiação de superfície sobreposta às faces dos sólidos. Estes elementos de interface permitiram integrar convecção e radiação no modelo, assegurando consistência com os fenómenos observados nos ensaios experimentais.

A malha de elementos finitos foi escolhida após uma análise de sensibilidade. O pormenor da malha de elementos finitos é fornecido na Fig. 12, sendo evidenciada a utilização de elementos de interface na região da cavidade.

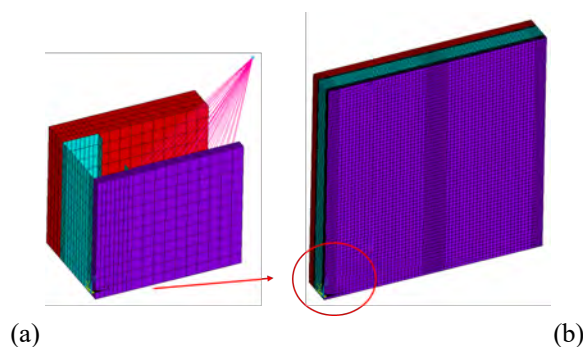


Fig. 12: Exemplos de malha de elementos finitos extraídas (a) da região do montante e (b) geral

3.2 Condições de fronteira

As condições de fronteira são definidas neste estudo considerando um lado da parede exposto ao fogo, a temperatura é definida pela curva de incêndio padrão ISO 834, sendo imposta num nó adicional. As propriedades térmicas do aço seguiram o EN1993-1-2 [13], contemplando as variações de condutividade, calor específico e massa volúmica, e emissividade. Para o gesso cartonado, utilizaram-se os valores do EN1995-1-2 [14], com massa volúmica de 576 Kg/m^3 e emissividade $\epsilon = 0,8$. No caso da placa (ISOLPRO), as propriedades foram adaptadas de Martínez-Martínez [16], ajustados à massa volúmica de 724 Kg/m^3 , considerando ainda, uma humidade inicial de 10% segundo a EN1992-1-2 [17], (ver Fig. 13).

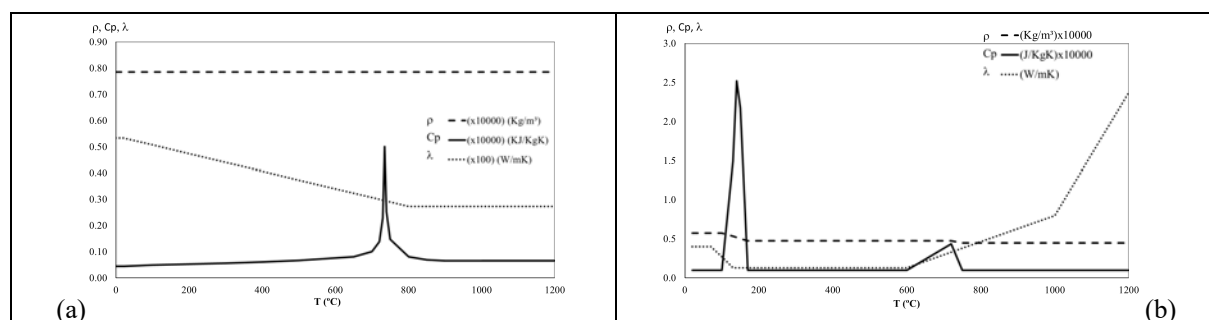


Fig. 13: Propriedades térmicas do (a) aço; (b) placas de gesso e (c) ISOLPRO

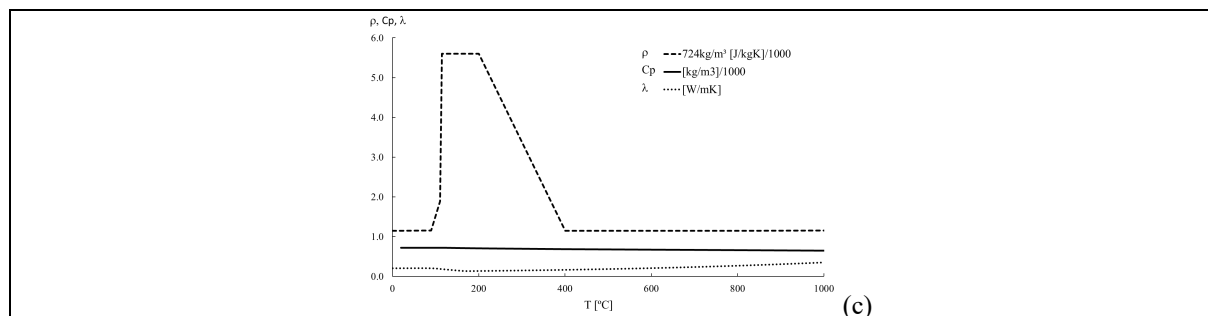


Fig. 13: Propriedades térmicas do (a) aço; (b) placas de gesso e (c) ISOLPRO (cont.)

As condições de fronteira (ver Fig. 16) foram impostas assumindo a transferência de calor por radiação (emissividade do fogo $\epsilon_f = 1$) e convecção ($\alpha_c = 25 \text{ W/m}^2\text{K}$) no lado exposto. A transferência de calor por convecção ($\alpha_c = 9 \text{ W/m}^2\text{K}$) foi aplicada no lado não exposto, para incluir o efeito da radiação EN 1991-1-2 [17]. No interior da cavidade, a convecção foi representada pelo elemento LINK 34, utilizando um valor médio ($\alpha_c = 17 \text{ W/m}^2\text{K}$), enquanto a radiação foi modelada com o SURF 152.

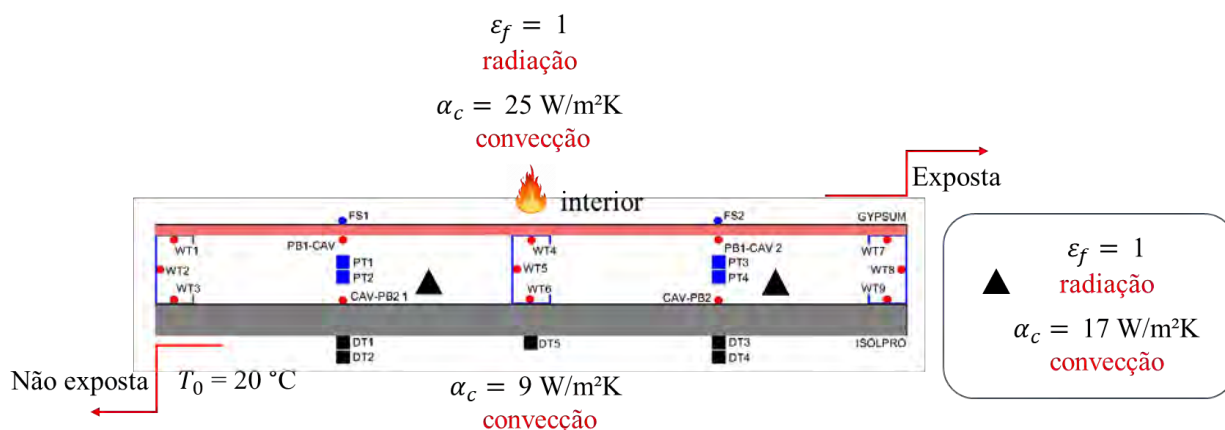


Fig. 14: Condição de contorno da modelação numérica (a) interno; (b) externo

As opções relacionadas com a solução de radiação foram definidas, o valor da constante de Stefan-Boltzmann, o valor da diferença entre a escala normal de temperatura e a escala absoluta e a definição do ambiente de radiação. No início das simulações, a temperatura do lado não exposto foi definida como igual à temperatura normal ($T_0 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$).

A análise transiente não linear foi realizada no ANSYS com uma solução incremental e iterativa, definindo-se uma variação máxima do intervalo de tempo igual a 60 segundos e mínima de 1 segundo, com a opção de ajustar automaticamente o intervalo de tempo durante o processo de solução incremental ativada. A convergência da solução considera a análise da transferência de calor, com um valor de tolerância de 0.001 e um valor de referência de 10^{-6} (W) . Em [11] são fornecidos mais detalhes sobre o modelo numérico.

3.3 Comparação entre resultados experimentais e numéricos

Os resultados foram obtidos através da aplicação do método de solução, desenvolvido em [18], que considera a transferência de calor por radiação e convecção na região da cavidade, sendo adotado um coeficiente de convecção de $17 \text{ W/m}^2\text{K}$. Este método permite reproduzir de forma

adequada a troca de calor por convecção no interior da parede LSF, mas não contempla fenômenos localizados, como a queda da placa de gesso, e ou, aberturas de juntas, e fissuras nas placas ISOLPRO, que podem originar aumentos súbitos de temperatura observados nas curvas experimentais.

A comparação dos resultados do modelo numérico S_A01_A02-FEM, apresentam uma boa correspondência com os valores medidos, como indicado na Tabela 2.

Tabela 2: Resultados experimentais e numéricos

Temperatura Máxima e Média			Temperatura de 350°C no perfil LSF			
Amostras	T(max) (min)	T(ave) (min)	Amostras	HF (min)	WEB (min)	CF (min)
S_A01 - EXP	124	118	S_A01 - EXP	32	52	57
S_A02 - EXP	121	117	S_A02 - EXP	30	43	55
S_A01_A02 - FEM	136	129	S_A01_A02 - FEM	26	42	62
S_A03 - EXP	113	108	S_A03 - EXP	84	95	103
S_A04 - EXP	111	111	S_A01 - EXP	83	99	103
S_A03_A04 - FEM	140	139	S_A03_A04 - FEM	113	139	159

Tanto no critério de isolamento térmico (I), como no aquecimento dos montantes LSF até 350 °C, os resultados das temperaturas numéricas (ver Fig. 15), acompanham a tendência experimental, embora com uma ligeira superestimação dos tempos de isolamento. Observa-se ainda que a curva numérica se mantém contínua, sem apresentar os incrementos bruscos de temperatura registrados nos ensaios experimentais.

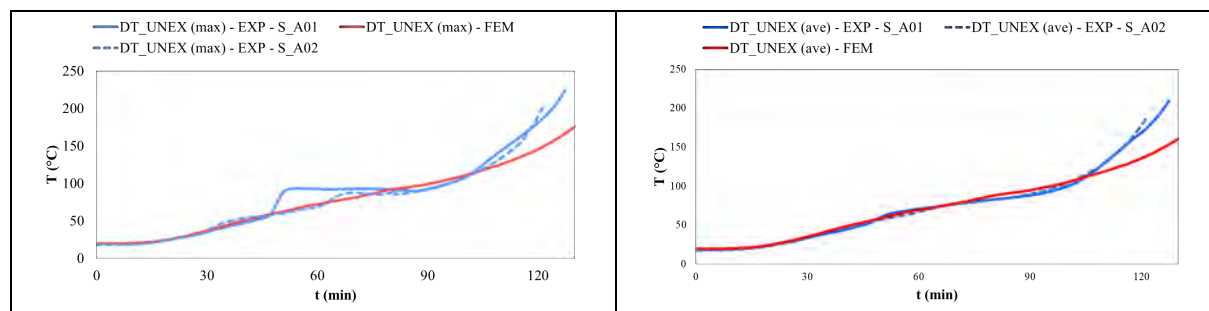


Fig. 15: Comparação dos resultados experimentais e numéricos na face não exposta: fogo lado interior - T(max) e T(ave)

Os resultados do modelo numérico S_A03_A04-FEM, apresentam diferenças mais significativas em relação aos resultados experimentais. O critério foi sobrestimado, no aquecimento dos perfis metálicos LSF ocorreram de forma mais tardia na simulação numérica só que nos resultados experimentais. Ainda assim, observa-se que o modelo preserva a sequência de aquecimento dos diferentes elementos do perfil (ver HF, WEB e CF), mantendo coerência física. Também aqui, a variação da temperatura numérica é suave (ver Fig. 16), não refletindo o aumento súbito de temperatura associado a falhas localizadas do gesso ou da junta da placa ISOLPRO.

É importante destacar que, neste cenário, a eficácia do método numérico utilizado, depende em grande medida do conhecimento das propriedades térmicas do material e das condições construtivas associadas. No presente caso, o material utilizado foi o ISOLPRO, e mesmo em ensaios de pequena escala verificou-se a necessidade de incluir uma junta de dilatação. Este fator pode contribuir para a alteração da resposta térmica real. Este detalhe não foi possível

incorporar no modelo de solução, o que ajuda a explicar a diferença entre a curva numérica contínua e o aumento repentino de temperatura registado nos ensaios físicos.

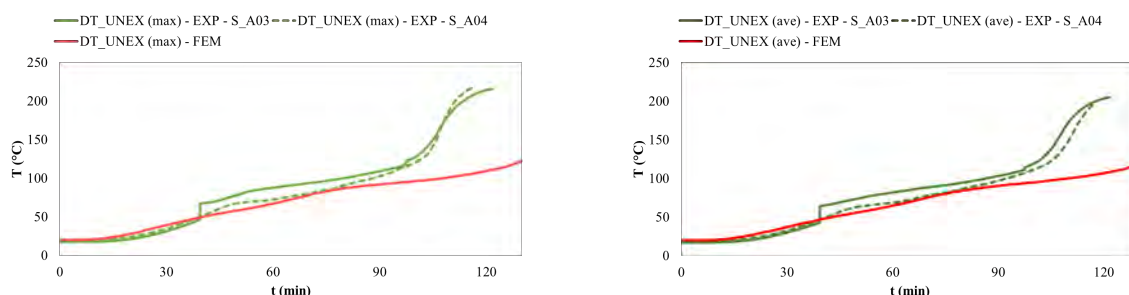


Fig. 16: Comparação dos resultados experimentais e numéricos na face não exposta: fogo lado exterior - T(max) e T(ave)

Apesar das vantagens demonstradas, as limitações deste método tornam-se evidentes nos ensaios com fogo pelo lado exterior, onde fenómenos experimentais não modelados (fissuração, juntas de dilatação) influenciam de forma significativa a evolução da temperatura.

No futuro, será estudada a possibilidade de aplicar o método híbrido, proposto em [19], e que integra a radiação e a convecção na cavidade com base na temperatura experimental da cavidade, introduzindo como condição de fronteira adicional. Sendo expectável que este método aproxime os resultados numéricos das curvas experimentais, especialmente em casos onde fenómenos como a fissuração do gesso ou a abertura de juntas desempenham um papel determinante no comportamento térmico.

4 Conclusão

Os ensaios experimentais de pequena escala permitiram caracterizar de forma quantitativa o desempenho ao térmico de paredes LSF expostas à curva ISO 834 pelo lado interior (gesso) e exterior (ISOLPRO). A repetição dos ensaios confirmou a repetibilidade dos resultados, com diferenças inferiores a 3% no critério de isolamento térmico $T(\max) = 124$ e 121 min; $T(\text{ave}) = 118$ e 117 min nos ensaios S_A01 e S_A02, e variações de apenas 2 a 9 min nos tempos até 350 °C nos perfis metálicos. Esta consistência evidencia a fiabilidade do método experimental e da instrumentação adotada.

Na comparação entre os dois cenários de exposição, verificou-se que, quando o fogo incide pelo lado interior, revestido a placas de gesso, o critério de isolamento térmico (I) apresenta tempos ligeiramente superiores em aproximadamente 10 min ($T_{\max} = 121$ e 124 min) face à exposição pelo lado exterior ($T_{\max} = 111$ e 113 min), representando um aumento de 9%. No entanto, os perfis metálicos atingiram a temperatura crítica de 350 °C muito mais cedo (30–57 min no lado interior) do que nos ensaios com exposição pelo lado exterior (83–103 min), correspondendo a um aumento superior a 70% no tempo até à degradação estrutural quando a exposição ocorreu através das placas ISOLPRO. Estes resultados demonstram que, embora o isolamento térmico seja ligeiramente superior pelo lado interior, o desempenho estrutural (R) é consideravelmente mais favorável pelo lado exterior, evidenciando a importância de considerar simultaneamente os critérios I e R na avaliação global do comportamento ao fogo.

A análise numérica reproduziu adequadamente as tendências experimentais, sobretudo no cenário de exposição pelo lado interior, com diferenças de cerca de 10–15 min no critério I, como seja, $T(\max)_{\text{FEM}} = 136$ min vs. 124 min $T(\max)_{\text{EXP}}$, e variações inferiores a 10 min nos tempos até 350 °C nos perfis. Contudo, no cenário de fogo pelo lado exterior, o modelo numérico sobrestimou de forma mais expressiva os tempos de aquecimento, $CF_{\text{FEM}} = 159$

min vs. 103 min CF_EXP, devido à não inclusão de fenômenos localizados com o fissuração do gesso ou abertura de juntas na placa ISOLPRO. Assim, propõe-se a adoção futura de um método híbrido com base em temperaturas medidas na cavidade, prevendo-se uma aproximação mais fiel às curvas experimentais.

Em síntese, os resultados demonstram que os ensaios experimentais são indispensáveis tanto para a compreensão do comportamento de paredes LSF em situação de incêndio como para a calibração de modelos numéricos. Verificou-se que a escolha do lado de exposição ao fogo influencia de forma distinta os critérios I e R, podendo conduzir a interpretações opostas sobre a segurança ao fogo. Por conseguinte, recomenda-se que a avaliação do desempenho destas soluções construtivas considere simultaneamente a capacidade de isolamento térmico e a resistência estrutural dos perfis metálicos, garantindo decisões mais robustas em termos de dimensionamento e regulamentação futura.

Agradecimentos

Este trabalho de investigação foi apoiado pela AI² Agência para a Investigação e Inovação, pelo projeto financiado “FireLSF + Development of predictive models for the fire resistance of LSF walls – an experimental, numerical and machine learning approach”, referência COMPETE2030-FEDER-00846200 (2023.16480.ICDT), apoiado pelo Programa Inovação e Transição Digital - COMPETE 2030.

Agradecimento especial à empresa PERFISA pelo apoio na realização dos ensaios experimentais.

Referências

- [1] Laím, L., Rodrigues, J. P. C., Silva, L. S. (2014). *Experimental Analysis on Cold-Formed Steel Beams Subjected to Fire*. Thin-Walled Structures 74.
- [2] Craveiro, H. D., Rodrigues, J. P. C., Aldina Santiago, Laím, L. (2016). *Review of the High Temperature Mechanical and Thermal Properties of the Steels Used in Cold Formed Steel Structures - The Case of the S280 Gd+Z Steel*. Thin-Walled Structures 98.
- [3] Magarabooshanam, H., Ariyanayagam, A., Mahendran, M. (2020). *Fire Resistance of Non-Load Bearing LSF Walls with Varying Cavity Depth*. Thin-Walled Structures 150.
- [4] Piloto, P. A. G., Khetata, M. S., Gavilán, A. B. R. (2018). *Loadbearing Capacity of LSF Walls under Fire Exposure*. MATTER: International Journal of Science and Technology, 4(3), 104-124.
- [5] CEN, EN 13501-2: *Fire classification of construction products and building elements - Part 2: Classification using data from fire resistance tests, excluding ventilation services*, CEN. Brussels: CEN, 2016.
- [6] CEN. (2024). EN 1993-1-2: Eurocode 3 – *Design of Steel Structures - Part 1–2: General Rules - Structural Fire Design*.
- [7] Gnanachelvam, S., Ariyanayagam, A., Mahendran, M. (2020). *Fire Resistance of LSF Wall Systems Lined with Different Wallboards Including Bio-PCM Mat*. Journal of Building Engineering 32.
- [8] Feng, M., Y. C. Wang, J. M. Davies. (2003). *Thermal Performance of Cold-Formed Thin-Walled Steel Panel Systems in Fire*. Fire Safety Journal 38.
- [9] Alfawakhiri, Farid. (2001). *Behaviour of Cold-Formed-Steel-Framed Walls and Floors in Standard Fire Resistance Tests*. Carleton University, Ottawa, Ontario, Canada.

- [10] Kesawan, S., e Mahendran, M. (2018). *A Review of Parameters Influencing the Fire Performance of Light Gauge Steel Frame Walls*. Fire Technology 54.
- [11] Torres, L., Couto, C., Vila Real, P., Piloto, P. (2023). *Numerical Study of the Fire Behaviour of External Walls in Light Steel Framing*. Fire Safety Journal 141.
- [12] ANSYS® *Academic Research Mechanical, Release 18.2*. (2023). ANSYS, Inc.
- [13] European Committee for Standardisation (CEN), *EN 1993-1-2: Eurocode 3 – Design of Steel Structures - Part 1–2: General Rules - Structural Fire Design*, 2005.
- [14] European Committee for Standardisation (CEN), *prEN 1995-1-2: 2025 Eurocode 5 – Design of Timber Structures Part 1-2, Structural fire design*, 2021.
- [15] M.A. Sultan, A model for predicting heat transfer through noninsulated unloaded steel-stud gypsum board wall assemblies exposed to fire, Fire Technol. 32 (3)
- [16] Martínez-Martínez, S., Moragues, A., Lázaro, C., Moragues, J. J. (2021). Thermal and mechanical behaviour of fibre-cement composites at high temperature. Construction and Building Materials, 273, 121983.
- [17] CEN. (2002). EN 1991-1-2: Eurocode 1 - Actions on Structures - Part 1-2: General Actions - Actions on Structures Exposed to Fire.
- [18] Alves, M. H., Constantini, G., Ianni, A., Kimura, E. F. A., Meda, A., Piloto, P. A. G. (2022). *Fire performance of non-load-bearing double-stud light steel frame walls: Experimental tests, numerical simulation, and simplified method*. Fire and Materials, 46.
- [19] Piloto, P. A. G., Khetata, M. S., & Ramos, A. B. (2022). Analysis of the critical temperature on load bearing LSF walls under fire. Engineering Structures, 270, 114858.



cmm

ASSOCIAÇÃO
PORTUGUESA
DE CONSTRUÇÃO
METÁLICA E MISTA

Secretariado da CMM

Business Center Leonardo da Vinci,
Coimbra iParque Lote 3
3040-540 Antanhol
Coimbra, Portugal

Co-organização



cmm@cmm.pt
www.cmm.pt