

9^{as} Jornadas de Segurança aos Incêndios Urbanos

4^{as} Jornadas de Proteção Civil



INSTITUTO POLITÉCNICO DE COIMBRA

07 de novembro de 2025

LIVRO DE ATAS

AUTORES

António José Pedroso de Moura Correia

Susana Catarina Neves Meneses

Teresa Cristina Melo Fragoso



9JORNINC-4JORPROCIV

9^ª Jornadas de Segurança aos Incêndios Urbanos
4^ª Jornadas de Proteção Civil

Coimbra, 7 de novembro de 2025

Nenhuma parte desta obra pode ser reproduzida sem autorização escrita do editor.

ISBN: 978-989-8331-21-2

Tiragem:

USB Flash Drive

1^ª edição: novembro de 2025

Editado por:

IPC/ISEC – Instituto Politécnico de Coimbra/Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, Rua Pedro Nunes, Quinta da Nora, 3030-199 Coimbra. Portugal.



PREFÁCIO

É com enorme satisfação e sentido de responsabilidade que o Departamento de Engenharia Civil do Instituto Superior de Engenharia de Coimbra acolhe as 9.as Jornadas de Segurança aos Incêndios Urbanos (9JORNINC) e as 4.as Jornadas de Proteção Civil (4PROCIV), no ano em que se assinalam duas décadas desde a realização da primeira edição destas Jornadas, nascidas precisamente no seio da academia de Coimbra.

Este regresso a Coimbra, vinte anos depois, simboliza mais do que uma simples coincidência temporal: representa o reencontro com as origens e o reforço do compromisso contínuo com a investigação, a inovação e a disseminação do conhecimento técnico e científico na área da Segurança Contra Incêndios em Edifícios e da Proteção Civil.

Ao longo destes vinte anos, as Jornadas têm-se afirmado como um ponto de encontro incontornável entre investigadores, docentes, profissionais e entidades dedicadas à segurança das populações e à resiliência das infraestruturas. A sua evolução espelha também as transformações que o país — e o mundo — têm enfrentado no domínio da gestão do risco e da resposta a catástrofes naturais e tecnológicas.

Vivemos tempos em que os desafios climáticos e urbanos se cruzam de forma cada vez mais evidente. A intensificação dos incêndios florestais e a crescente exposição das áreas urbanas a eventos extremos exigem uma reflexão conjunta e uma ação coordenada entre a investigação académica e o setor operacional. É neste contexto que estas Jornadas assumem um papel essencial: o de aproximar o conhecimento técnico-científico das práticas de terreno, promovendo uma cultura de prevenção, preparação e colaboração.

O Instituto Superior de Engenharia de Coimbra orgulha-se de abrir as suas portas a este evento, acolhendo todos os que, com o seu saber e experiência, contribuem para um debate construtivo e para o avanço das soluções que tornarão as nossas cidades mais seguras, resilientes e sustentáveis.

Deixo, por isso, uma palavra de reconhecimento e agradecimento às Comissões Organizadora, Executiva e Científica, bem como a todos os participantes — investigadores, profissionais, estudantes e agentes da proteção civil — que tornam possível esta edição. Que este encontro inspire novas ideias, parcerias e projetos, continuando a honrar o legado iniciado há vinte anos.

Prof.^a Doutora Susana Catarina Neves Meneses

Presidente do Departamento de Engenharia Civil



COMISSÃO ORGANIZADORA

Alexandra Maria Galvão Ribeiro (ISEC, Politécnico de Coimbra)

António José P. Moura Correia (ISEC, Politécnico de Coimbra) (Coordenador)

Cristina Calmeiro dos Santos (IPCB, Politécnico Castelo Branco)

Gilberto Cordeiro Vaz (ISEC, Politécnico de Coimbra)

João P. Martins Gouveia (ISEC, Politécnico de Coimbra)

Luís Manuel Araújo Santos ISEC, Politécnico de Coimbra)

Susana Catarina Neves Meneses (ISEC, Politécnico Coimbra)

Teresa Cristina Melo Fragoso (ISEC, Politécnico de Coimbra)

COMISSÃO EXECUTIVA

Ana Matias (Técnica Superior da Câmara Municipal da Mealhada)

António José P. Moura Correia (Coordenador) (ISEC, Politécnico de Coimbra)

Gilberto Cordeiro Vaz (ISEC, Politécnico de Coimbra)

Hugo Oliveira (Proteção Civil, SMPC/DGFRN da Câmara Municipal de Cantanhede - Portugal)

João P. Martins Gouveia (SUScita, ISEC, Politécnico de Coimbra)

José Carlos Marques (Câmara Municipal de Oliveira do Hospital)



COMISSÃO CIENTÍFICA

Aldina Santiago (UC, Universidade de Coimbra)
Ana Paula Colavite (Universidade Estadual do Paraná, Brasil)
Aline Lopes Camargo (UC, Universidade de Coimbra)
Avelino Virgílio Monteiro (ISEC, Instituto Politécnico de Coimbra)
Áurea Andrade Viana (SUScita, IPC & Unespar, U. E. Paraná, Brasil)
António José P. de Moura Correia (SUScita, ISEC, Instituto Politécnico de Coimbra)
(Coordenador)
Carlos André Soares Couto (Universidade de Aveiro)
Cristina Calmeiro dos Santos (IPCB, Politécnico de Castelo Branco)
Cristiane Kreutz (UTFPR, Univ. Tecnológica Federal do Paraná, Brasil)
Débora Macanjo Ferreira (IPB, Instituto Politécnico de Bragança)
Domingos Xavier Viegas (UC, Universidade de Coimbra)
Edison Fortes (UEM, Universidade Estadual de Maringá, Brasil)
Elza M. M. Fonseca (IPP, Instituto Politécnico do Porto)
Gilberto Cordeiro Vaz (ISEC, Politécnico de Coimbra)
Hugo Costa (IPC, Instituto Politécnico de Coimbra)
João Carlos Viegas (LNEC, Laboratório Nacional de Engenharia Civil)
Julieta Pires António (UC, Universidade de Coimbra)
João Paulo Correia Rodrigues (UC, Universidade de Coimbra)
João P. Martins Gouveia (SUScita, ISEC, Politécnico de Coimbra)
João Ramôa Correia (UL, Universidade de Lisboa)
José Carlos Góis (UC, Universidade de Coimbra)
José Gaspar (IPC, Instituto Politécnico de Coimbra)
José Luís Zêzere (UL, Universidade de Lisboa)
Jorge Raposo (IPC, Instituto Politécnico de Coimbra)
Lino Marques (UC, Universidade de Coimbra)
Luís M. R. Mesquita (IPB, Instituto Politécnico de Bragança)
Mário Silva Uacane (UniLicungo, Universidade Licungo, Moçambique)
Murillo Vetroni Barros (Unespar, Univ. Estadual do Paraná, Brasil)
Nuno Lopes (UA, Universidade de Aveiro)
Paulo A. G. Piloto (IPB, Instituto Politécnico de Bragança)
Paulo Vila Real (UA, Universidade de Aveiro)
Pedro Figueiredo Vieira Carvalheira (UC, Universidade de Coimbra)
Rafael F. Pequeto Lima (UTFPR, Univ. Tecn. Federal do Paraná, Brasil)
Ricardo Carmo (IPC, Instituto Politécnico de Coimbra)
Ricardo Mendes (UC, Universidade de Coimbra)



ÍNDICE

Prefácio	III
Comissão Organizadora	IV
Comissão Executiva	IV
Comissão Científica	V
Índice	VI

PALESTRAS

SUSTENTABILIDADE E SEGURANÇA CONTRA INCÊNDIOS: EQUILÍBRIOS NECESSÁRIOS

Elisabete Cordeiro, A. Leça Coelho, João E. Almeida

.....13

SEGURANÇA CONTRA INCÊNDIOS: ABORDAGEM PRESCRITIVA, BASEADA NO DESEMPENHO OU BASEADA NO RISCO?

Paulo Prata Ramos

.....17

O USO DO FOGO NA GESTÃO DA PAISAGEM

Emanuel de Oliveira

.....29

A INTERFACE URBANO-FLORESTAL EM PORTUGAL

Luís Mário Ribeiro

.....37

ARTIGOS

ACCURATE 3D NUMERICAL MODELS FOR THE FIRE PERFORMANCE ON LSF PARTITION WALLS UNDER DIFFERENT FIRE SCENARIOS

Paulo A.G. Piloto; Renata G.L. Silva; Giovanna Frizzera; Leonardo Torres; Carlos Couto; Paulo Vila Real; Luís M. R. Mesquita; Nuno Lopes

.....47

A CAPACIDADE DE CARGA EM LIGAÇÕES DE MADEIRA AO FOGO

João Aguiar; Elza M.M. Fonseca

.....61

COMPORTAMENTO AO FOGO DE VIGAS ALVEOLARES COM ABERTURAS CIRCULARES

Luana V.da Silva; Luís M. R. Mesquita ; Paulo A.G. Piloto; Debora Ferreira; Luisa Barreira; Nuno Lopes; Carlos Couto; Paulo Vila Real.

.....67



USE OF BIOCHAR TO ENHANCE GEOTECHNICAL PERFORMANCE OF FOREST ROADS: A PRELIMINARY INVESTIGATION João Murta; Carlos Renato Rodrigues; Luis Araújo Santos; Verónica Oliveira.	77
INFLUÊNCIA DA TERRA DIATOMÁCEA RESIDUAL NO COMPORTAMENTO DO BETÃO A TEMPERATURAS ELEVADAS Mónica Fernandes Gomes; Luciane Marcelo Miscovicz; Débora Macanjo Ferreira.	85
PROPOSTA DE FÓRMULAS ANALÍTICAS PARA O CÁLCULO DA RESISTÊNCIA AO FOGO DE PILARES MISTOS DE SEÇÃO QUADRADA, DUPLO TUBO E DUPLA PELE Ruben Lopes; António Correia; João Rodrigues.	95
CATEGORIAS DE RISCO: UMA ANÁLISE CRÍTICA E PROPOSTA ALTERNATIVA João E. Almeida; Elisabete Cordeiro; A. Leça Coelho	105
DESENVOLVIMENTO DE CERTIFICADO DE SEGURANÇA CONTRA INCÊNDIOS EM EDIFÍCIOS EXISTENTES Luís C. Ferreira Moreira; João Carlos Gonçalves Lanzinha	115
CONDIÇÕES DE TRABALHO EXTREMAS NO COMBATE A INCÊNDIOS: AVALIAÇÃO DE MEDIDAS DE PROTECÇÃO E SEGURANÇA Gilberto Vaz; António M. M. Raimundo; A. Virgílio M. Oliveira; Miguel Almeida	125
REQUERIMENTOS DE RESISTÊNCIA AO FOGO FLORESTAL EM PAREDES EXTERNAS DE HABITAÇÕES António Renato Bicelli; Mohamed Zitouni; Mário Rui Arruda; Fernando Branco.	135
CASO DE ESTUDO DE UM INCÊNDIO NUMA HABITAÇÃO PORTUGUESA Jorge Raposo; Hugo Raposo; André Rodrigues; Artur Costa; Torres Farinha; Luis Reis.	149
MODELAGEM NUMÉRICA DE COLUNAS MISTAS DE AÇO PREENCHIDAS COM CONCRETO ARMADO, COM ELONGAÇÃO TÉRMICA CONTIDA E SUJEITAS AO FOGO Sérgio R. O. Q. Braga; António J. P. M. Correia; João Paulo C. Rodrigues	159
RUMO À RESILIÊNCIA INTEGRADA: A REORGANIZAÇÃO DA GESTÃO DE EMERGÊNCIAS EM PETRÓPOLIS (RJ), BRASIL, PÓS-TRAGÉDIA DE 2022 Vanessa Corrêa; António Correia; Susana Meneses	167
SISTEMA PARA DETEÇÃO DE INCÊNDIO EM EDIFÍCIOS UTILIZANDO INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL Rúben Santo; Carlos Couto	177
MEDIDAS DE AUTOPROTEÇÃO - DO MODELO REGULAMENTAR À REALIDADE NO TERRENO	



Cidália Worm; Paulo Prata Ramos	189
PAINÉIS FOTOVOLTAICOS E BATERIAS DE LÍTIUM – UM RISCO ACRESCIDO PARA OS BOMBEIROS	
José Pedro Lopes	197
UTILIZAÇÃO DE TERMOGRAFIA TÁTICA NO COMBATE A INCÊNDIOS ESTRUTURAIS: ADAPTAÇÃO AO CONTEXTO OPERACIONAL PORTUGUÊS	
Luís C. Ferreira Moreira; Cristina Calmeiro; Andrew Starnes	209
SISTEMA DE GESTÃO INTEGRADA DE FOGOS RURAIS (SGIFR) E O DESPACHO N.º 8591/2022 DA ANEPC	
Paulo Prata Ramos; Vilarim Reis	215
ANÁLISE DA VULNERABILIDADE DAS SOLUÇÕES CONSTRUTIVAS NA INTERFACE URBANO-FLORESTAL	
Susana Meneses; António Correia; Teresa Fragoso; João Gouveia; Alexandra Ribeiro; Luis Araújo Santos; Cristina Calmeiro; Gilberto Vaz	225
COMPETÊNCIA TÉCNICA E DOMÍNIO CIENTÍFICO NA AVALIAÇÃO DO RISCO DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS (ARDA)	
Paulo Prata Ramos; Diogo Teixeira	237
APOIO À DECISÃO NA ANÁLISE DE RISCO DE EXPLOÇÃO DE POEIRAS NA INDÚSTRIA DE PASTA E PAPEL EM PORTUGAL	
Aurélio João Cardoso Pereira; José Carlos Góis	245
CFD ASSESSMENT ON SMOKE VENTILATION SYSTEMS’ PERFORMANCE IN CAR PARKS: PORTUGUESE REGULATION VS STANDARDS	
Miguel del Moral Cejudo	255
A INTEGRAÇÃO DE IMIGRANTES EM CONTEXTO DE PROTEÇÃO CIVIL	
Lucínia Viana Aires; Ana Margarida Matias	263
GESTÃO OPERACIONAL DAS INUNDAÇÕES EM PETRÓPOLIS (2022): DA CHUVA EXTREMA À RESILIÊNCIA URBANA	
Vanessa Corrêa; António Correia; Teresa Fragoso.	269
A VULNERABILIDADE DA PAMPILHOSA DA SERRA: ANÁLISE DA RECORRÊNCIA DE GRANDES INCÊNDIOS E AS IMPLICAÇÕES NA GESTÃO DO RISCO	
Duarte Chamiça; Dinis Costa; João P. M. Gouveia; Aurea V. Andrade; António Correia	283
COMPORTAMENTO DO BETÃO ARMADO EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO: PROPRIEDADES, NORMAS E ESTRATÉGIAS DE PROTEÇÃO	



9JORNINC-4JORPROCIV

9^ª Jornadas de Segurança aos Incêndios Urbanos
4^ª Jornadas de Proteção Civil

Coimbra, 7 de novembro de 2025

Dinis Costa; João Paulo Gouveia.....	293
Índice remissivo de autores.....	305



9JORNINC-4JORPROCIV

9^ª Jornadas de Segurança aos Incêndios Urbanos
4^ª Jornadas de Proteção Civil

Coimbra, 7 de novembro de 2025



COMPORTAMENTO AO FOGO DE VIGAS ALVEOLARES COM ABERTURAS CIRCULARES

Luana V. da Silva¹
Doutoranda
IPB – Bragança
GICoS

Luís M. R. Mesquita
Professor
IPB – Bragança
GICoS

Paulo A. G. Piloto
Professor
IPB – Bragança
GICoS

Débora Ferreira
Professora
IPB – Bragança
GICoS

Luísa Barreira
Professora
IPB – Bragança
GICoS

Nuno Lopes
Professor
UA – Aveiro
CERIS-Aveiro

Carlos Couto
Investigador
UA – Aveiro
CERIS-Aveiro

Paulo Vila Real
Professor
UA – Aveiro
CERIS-Aveiro

SUMÁRIO

O comportamento de vigas alveolares de aço à flexão, especialmente em situação de incêndio, foi investigado através de uma campanha experimental e da validação de um modelo numérico. Os resultados demonstram que o modelo de elementos finitos prevê com boa precisão a capacidade de carga e os modos de falha observados nos ensaios. A análise evidencia que a geometria das aberturas condiciona o modo de colapso à temperatura ambiente, enquanto o aumento da temperatura pode alterar o mecanismo de falha para uma mesma geometria, promovendo o colapso por encurvadura do montante da alma ou pelo Mecanismo de Vierendeel. A investigação apresenta dados experimentais relevantes e um modelo numérico validado, essenciais para o desenvolvimento de futuras regras de dimensionamento.

PALAVRAS-CHAVE: Vigas Alveolares; Resistência ao Fogo; Testes Experimentais; Modos de Falha; Mecanismo de Vierendeel.

1. INTRODUÇÃO

A segurança das estruturas de aço em situação de incêndio é um aspeto fundamental da engenharia civil. No caso das vigas alveolares, elementos estruturais cada vez mais populares devido à sua eficiência (Fares et al., 2016; Lawson & Hicks, 2011), a ausência de regras de dimensionamento específicas para condições de incêndio constitui uma lacuna relevante a nível normativo e científico. A degradação das propriedades do aço com a temperatura intensifica a complexidade dos modos de falha destes elementos, que já à temperatura ambiente são governados por diferentes mecanismos. Por exemplo, estudos como os de Grilo et al. (2018) centraram-se na encurvadura do montante da alma, enquanto outros, como os de Zeytinci et al. (2021) e Panedpojaman et al. (2015), analisaram o Mecanismo de Vierendeel.

Embora os modelos numéricos sejam ferramentas poderosas para prever este comportamento, como demonstram os trabalhos de Ben Seghier et al. (2024) e Oribi et al. (2023), a sua fiabilidade depende de uma validação rigorosa com base em dados experimentais. Estes dados são ainda escassos, especialmente para vigas isoladas e submetidas a temperaturas estacionárias. A literatura existente foca-se maioritariamente em ensaios à temperatura ambiente (Amrous et al., 2023; Boissonnade et al., 2024; Kang et al., 2021) ou em sistemas estruturais completos, como lajes mistas (Cashell et al., 2021; Sunar Bükülmez & Celik, 2020), dificultando a análise do comportamento isolado da viga.



Este artigo aborda diretamente esta necessidade, apresentando os resultados de uma campanha experimental em vigas alveolares de aço submetidas a flexão, tanto à temperatura ambiente como a temperaturas elevadas, em regime estacionário. O principal objetivo é fornecer dados experimentais detalhados sobre o comportamento estrutural e os modos de falha das vigas, utilizando-os para desenvolver e validar um modelo de elementos finitos. Os resultados aqui apresentados constituem um passo fundamental para o desenvolvimento de ferramentas de análise mais precisas e, em última análise, para a criação de regras de dimensionamento mais seguras para estas estruturas.

2. ENSAIOS EXPERIMENTAIS

2.1 Caracterização das vigas alveolares experimentais

A metodologia experimental foi projetada para investigar o efeito de diferentes geometrias de aberturas em ensaios à temperatura ambiente e a influência da temperatura sobre o comportamento estrutural. Para este fim, foi utilizado um conjunto de seis vigas alveolares. O estudo da geometria foi realizado com as vigas B1, B2_1 e B3, que foram projetadas com geometrias distintas entre si, variando o diâmetro (a_0) e o espaçamento (S) das aberturas para cada modelo. Estes parâmetros geométricos, juntamente com a largura do montante da alma definida por $w = S - a_0$, são apresentados na Figura 1.b. Para análise da temperatura foram utilizadas as vigas B2_2, B2_3 e B2_4 — geometricamente idênticas à viga de referência B2_1 — que foram ensaiadas a 500 °C, 600 °C e 700 °C, respetivamente.

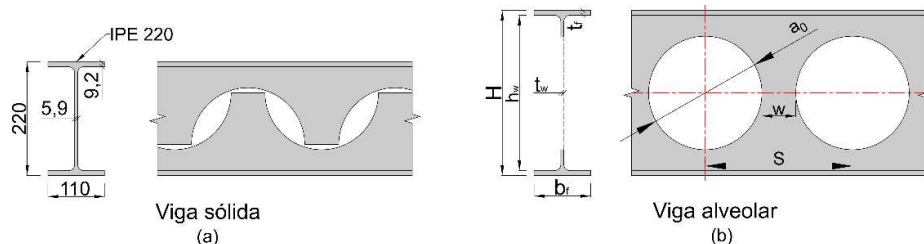


Figura 1. a) Perfil IPE 220 com suas dimensões nominais e esquema do processo de fabricação. b) Parâmetros geométricos da viga alveolar.

As vigas foram fabricadas a partir de um perfil IPE 220 em aço S275, através de duas passagens de corte seguidas pela soldagem das duas seções em T, conforme ilustrado na Figura 1.a, que também apresenta as dimensões nominais do perfil. Após este processo, todas as vigas, projetadas com uma altura total (H) de 320 mm e um vão entre apoios com um comprimento (L) de 3 m, apresentavam características comuns: a região central foi mantida sem aberturas, reforços verticais com espessura igual à da alma foram soldados nos apoios e no ponto de aplicação da carga, e as aberturas nas extremidades foram preenchidas (a última para B1 e B3; as duas últimas para a série B2). A configuração detalhada de cada viga, incluindo o número de aberturas (10 para B1 e 8 para as demais), é apresentada na Figura 2.

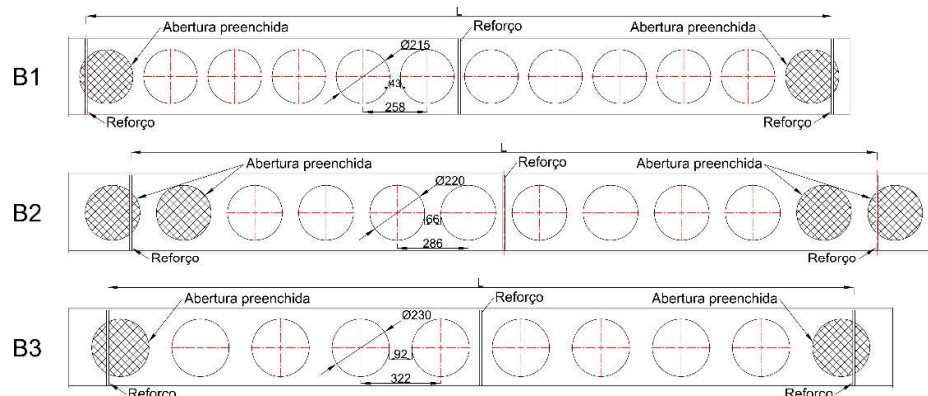


Figura 2. Configuração geométrica e detalhamento das vigas alveolares experimentais.

Para a caracterização inicial de cada viga alveolar, foram aferidas as suas dimensões geométricas reais em várias secções ao longo do seu comprimento. O Quadro 1 apresenta o valor medido de L e os valores médios de H , a_0 e S , juntamente com as dimensões da secção transversal: a largura (b_f) e espessura (t_f) dos banzos, e a espessura da alma (t_w), cuja nomenclatura se encontra ilustrada na Figura 1.b.

Quadro 1. Dimensões médias aferidas nas vigas experimentais (valores em mm).

Viga	H	b_f	t_f	t_w	a_0	S	L
B1	321.0	110.5	9.0	6.5	215	258	2998.0
B2_1	323.2	111.4	9.1	6.3	220	286	2998.0
B2_2 (500 °C)	323.0	111.2	9.0	6.4	220	286	2996.2
B2_3 (600 °C)	319.8	113.4	8.6	6.3	220	286	3000.0
B2_4 (700 °C)	321.5	110.6	9.2	6.5	220	286	3000.0
B3	321.8	110.3	9.2	6.5	230	322	2998.0

Realizou-se um estudo de caracterização do material do perfil IPE 220 à temperatura ambiente para determinar as suas principais propriedades mecânicas. Foram extraídas e ensaiadas à tração três amostras do banzo e seis da alma, preparadas segundo a norma EN ISO 377 (CEN, 1997) e testadas de acordo com a EN 10002-1 (CEN, 2001). Os ensaios foram conduzidos numa máquina de ensaio universal Instron 4485. A tensão de cedência média obtida foi de 390.14 MPa para o banzo ($f_{y,t}$) e de 317.95 MPa para a alma ($f_{y,w}$). O módulo de elasticidade médio (E), determinado a partir do conjunto de todos os ensaios, foi de 200 GPa. A maior resistência do banzo em comparação com a alma está em linha com as tendências reportadas na literatura (Morkhade & Gupta, 2015; Sonck & Belis, 2015).

2.2 Configuração do ensaio e instrumentação

Durante os ensaios de flexão de três pontos, cada viga experimental foi apoiada em apoios de forquilha e submetida a uma carga concentrada no meio do vão, aplicada por um atuador hidráulico. A restrição lateral, essencial para prevenir a encurvadura lateral torsional, foi garantida por quatro perfis IPE 100 posicionados em contacto com os banzos. Os deslocamentos verticais foram monitorizados por três transdutores de deslocamento diferencial linear (LVDTs) fixados no banzo inferior (no meio do vão, a $L/4$ e a $3L/4$). O sistema experimental de ensaio, está representado na Figura 3.

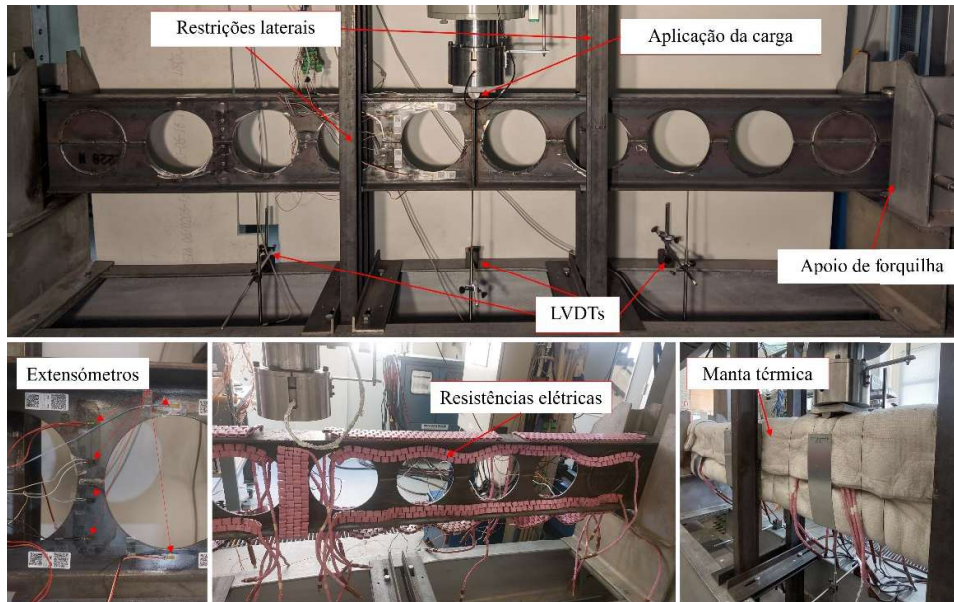


Figura 3. Vistas fotográficas da montagem experimental.

A instrumentação para os ensaios à temperatura ambiente incluiu a aplicação de extensómetros para monitorizar a deformação local em regime elástico. Conforme ilustrado na Figura 3, foram aplicados um total de dez extensómetros, sendo seis na secção transversal ao nível do montante da alma (quatro na alma e dois no banzo) e quatro na secção 2T (dois na alma e dois no banzo).

Para os ensaios em alta temperatura, a viga foi instrumentada com um sistema de aquecimento composto por 19 resistências elétricas (R_1 a R_{19}), distribuídas ao longo do seu comprimento e alimentadas por um sistema de aquecimento Mannings (modelo 16300). O isolamento térmico foi garantido por uma manta cerâmica de 50 mm de espessura. A temperatura foi monitorizada por 15 termopares do tipo K (T_1 a T_{15}), distribuídos por 5 secções transversais, conforme ilustrado na Figura 4. O procedimento consistiu em aplicar uma carga em controlo de força até ao colapso, após a temperatura na viga atingir o regime estacionário.

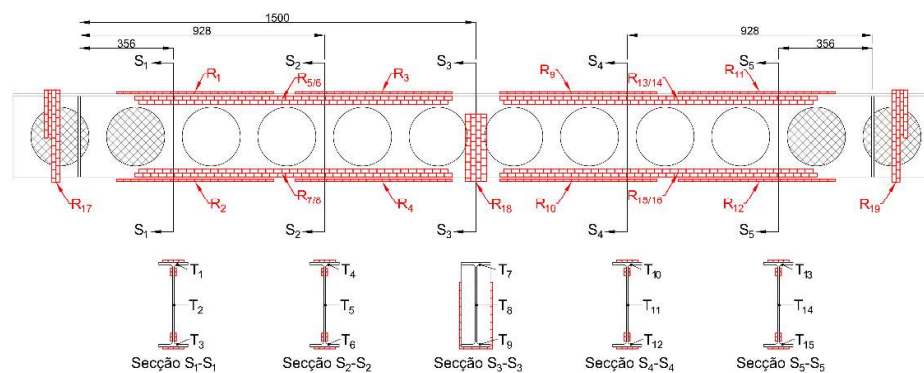


Figura 4. Sistema de aquecimento e monitorização da temperatura.

3. MODELO NUMÉRICO

Com o objetivo de simular o comportamento observado nos ensaios experimentais, foi desenvolvido um modelo numérico no software de elementos finitos ANSYS Mechanical. A estratégia de análise para cada viga foi



executada em fases, de modo a obter a sua capacidade de carga última e o respetivo modo de falha. Para isso, realizou-se uma análise estática não-linear (GMNIA – *Geometrically and Materially Nonlinear Analysis with Imperfections*), utilizando o método iterativo de Newton-Raphson. Nesta análise, foram introduzidas imperfeições geométricas no modelo, combinando modos de encurvadura locais e globais, cujas formas foram obtidas a partir de uma análise de encurvadura por valores próprios (LBA – *Linear Buckling Analysis*) prévia, com amplitudes de $h_w/200$ e $L/1000$, respetivamente. Estes valores foram baseados nas recomendações do Anexo C da EN 1993-1-5 (CEN, 2006).

As vigas foram modeladas utilizando elementos de casca de quatro nós (SHELL181), adequados para a análise de estruturas de parede fina. A geometria foi criada considerando a superfície média da secção transversal do perfil e a malha estruturada foi gerada com elementos de aproximadamente 5 mm, dimensão esta definida após um estudo de convergência. Para simular a rigidez do raio de concordância, que não é explicitamente modelado com elementos de casca, a espessura da alma foi localmente aumentada e foram aplicadas equações de restrição aos nós na região de junção entre a alma e os banzos, para restringir a rotação em torno do eixo Z.

As propriedades mecânicas do aço foram definidas de forma distinta para os banzos e para a alma com base nos resultados dos ensaios de tração (Secção 2.1). Foi implementado um modelo de plasticidade multilinear, utilizando a curva tensão-deformação verdadeira para representar o comportamento do material, incluindo o endurecimento, conforme as recomendações da EN 1993-1-5 (CEN, 2006). Para as análises em condições de incêndio, estas propriedades foram degradadas com a temperatura, de acordo com o modelo analítico e os fatores de redução prescritos na EN 1993-1-2 (CEN, 2024). Adicionalmente, foram consideradas as tensões residuais de fabrico. Foi aplicado um modelo de distribuição bitriangular linear apenas nos banzos, uma abordagem simplificada comum em estudos similares (da Silva & Mesquita, 2024; Oribe et al., 2023), com valores de compressão e tração de 30% da tensão de cedência do material ($0.3 f_{y,t}$), conforme o modelo proposto pela ECCS para perfis laminados a quente (ECCS, 1984).

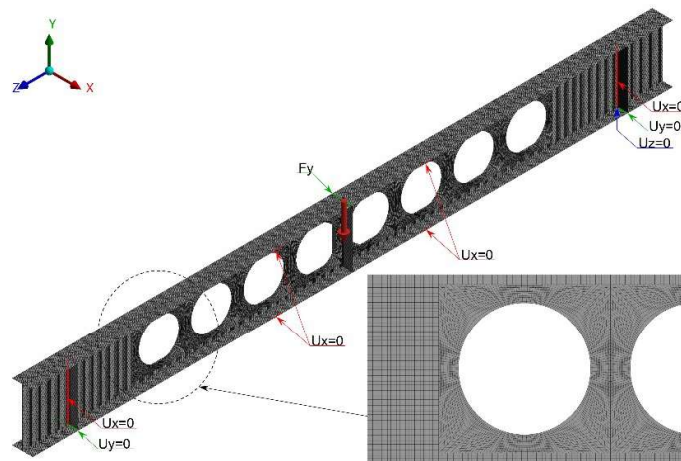


Figura 5. Condições de contorno do modelo numérico de detalhe da malha.

As condições de contorno, representadas na Figura 5, foram aplicadas de modo a replicar o comportamento de uma viga simplesmente apoiada com apoios de forquilha. Em ambas as extremidades, foi restringido o deslocamento vertical (U_y) no banzo inferior e o deslocamento horizontal (U_x) na alma. Para garantir a estabilidade do modelo, o deslocamento longitudinal (U_z) foi restringido em apenas um vértice de uma das extremidades. As restrições laterais do ensaio foram simuladas restringindo o deslocamento transversal ($U_x=0$) nos nós dos banzos superior e inferior, nas posições correspondentes às travessas de contenção.

No caso das simulações em condições de incêndio, foi primeiro realizada uma análise térmica em regime estacionário para determinar a distribuição de temperaturas na viga, que depois foi importada como uma condição



inicial no modelo estrutural, antes da aplicação da carga mecânica. Nesta análise, as temperaturas médias medidas em cada uma das cinco secções instrumentadas foram impostas aos nós correspondentes da secção transversal. Adicionalmente, para simular as perdas de calor nas extremidades da viga, foi aplicada convecção nas zonas em contacto com os apoios, com um coeficiente de $4 \times 10^{-6} \text{ W/mm}^2 \cdot ^\circ\text{C}$. A Figura 6 representa a aplicação destas condições de contorno e a distribuição de temperaturas resultante para o caso da viga B2_2.

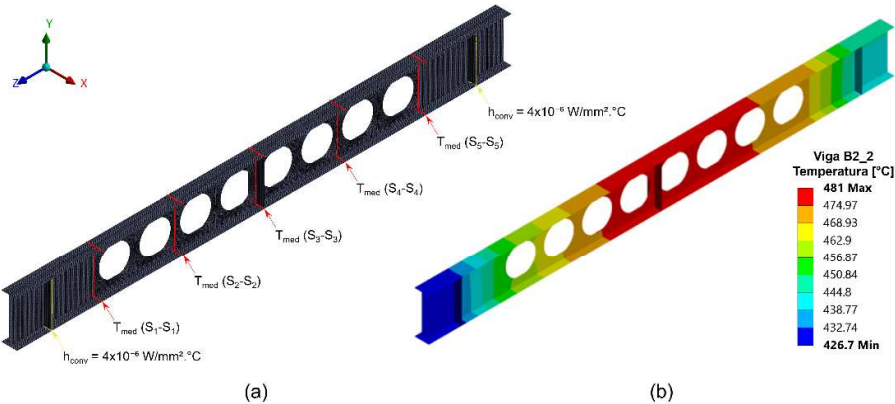


Figura 6. Análise térmica estacionária: a) Condições de contorno aplicadas. b) Distribuição de temperaturas na viga B2_2.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta secção, os resultados obtidos através do modelo numérico são comparados com os resultados dos ensaios experimentais, a fim de validar a sua precisão na previsão do comportamento de vigas alveolares à temperatura ambiente e em condições de incêndio. A Figura 7 apresenta as curvas força-deslocamento no meio do vão para todas as vigas ensaiadas, sobrepondo os resultados experimentais (EXP) e os numéricos (NUM). As imagens inseridas em cada gráfico mostram o modo de falha final observado em cada ensaio.

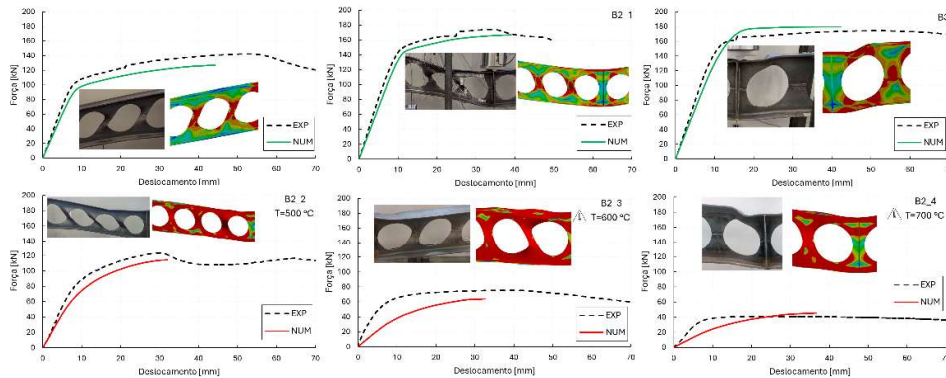


Figura 7. Comparação entre as curvas força-deslocamento experimentais (EXP) e numéricas (NUM).

Para os ensaios à temperatura ambiente, o modelo numérico demonstrou uma excelente capacidade de prever tanto a rigidez inicial como a carga última das vigas. Os dados experimentais dos extensómetros, apresentados na Figura 8, permitiram uma análise detalhada da sequência de colapso. Nas vigas B1 e B2_1, as curvas dos extensómetros instalados na alma revelaram uma inversão na direção da deformação. Este fenómeno que sugere a cedência por corte no montante da alma como o mecanismo que iniciou o colapso, levando subsequentemente à encurvadura do montante, conforme observado na Figura 7. Em contraste, a viga B3 não apresentou esta



inversão, o que é consistente com o seu modo de falha distinto: o Mecanismo de Vierendeel, conforme se pode observar na Figura 7. Em todos os casos, o modelo capturou de forma precisa o modo de falha observado.

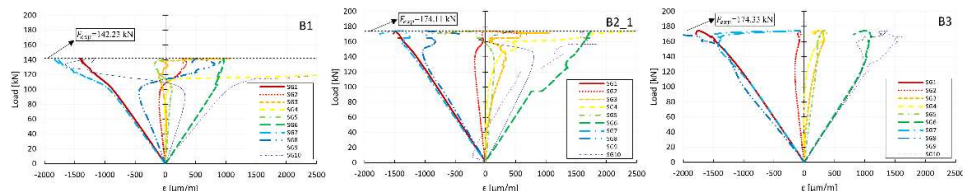


Figura 8. Resultados dos extensómetros para as vigas B1, B2_1 e B3 à temperatura ambiente

A diferença nos modos de falha e na capacidade de carga à temperatura ambiente evidencia a influência direta da geometria das aberturas. A maior capacidade de carga da viga B2_1 em relação à B1, apesar de ambas falharem pela instabilidade do montante da alma, deve-se ao maior espaçamento entre as aberturas na viga B2_1, que resulta num montante de alma mais largo, com maior área para resistir ao corte e menor esbelteza, aumentando a sua resistência à encurvadura. Por outro lado, a geometria da viga B3, com aberturas de maior diâmetro, apresentou o Mecanismo de Vierendeel como o modo de colapso governante.

Para os ensaios a alta temperatura, o modelo numérico capturou a tendência geral de redução da rigidez e da capacidade de carga, embora com uma maior diferença em relação aos resultados experimentais, quando comparado com os ensaios à temperatura ambiente (Figura 7). Esta diferença, mais notória na rigidez elástica inicial, principalmente nas vigas B2_3 e B2_4, pode ser atribuída à dificuldade em replicar fielmente no modelo a distribuição de temperaturas não-uniforme observada no ensaio. A não-uniformidade da distribuição de temperaturas é confirmada pelos dados do Quadro 2, que, ao apresentar as temperaturas médias por secção, evidencia um aumento do desvio padrão entre as temperaturas das secções com o aumento da temperatura nominal do ensaio, atingindo o valor máximo na viga B2_4. Apesar destas diferenças, o modelo previu de forma semelhante os modos de falha observados: a encurvadura do montante da alma para as vigas a 500 °C e 600 °C, e o Mecanismo de Vierendeel para a viga a 700 °C.

Quadro 2. Temperatura média [°C]

Viga	Secção S ₁ -S ₁	Secção S ₂ -S ₂	Secção S ₃ -S ₃	Secção S ₄ -S ₄	Secção S ₅ -S ₅	Média	Desv. padrão
B2_2	454	472	481	477	470	471	9.1
B2_3	572	590	599	574	570	581	11.4
B2_4	618	650	667	646	621	640	18.5

A análise dos ensaios em temperatura elevada permitiu isolar a influência térmica. É de notar que, para a série B2 de geometria idêntica, a temperatura não só reduziu a capacidade de carga, como também alterou o modo de falha. A viga B2_4, submetida à temperatura mais elevada (700 °C), colapsou por Mecanismo de Vierendeel, em contraste com a encurvadura do montante observada nas vigas a 500 °C e 600 °C. Este facto sugere que a degradação acentuada das propriedades do aço com a temperatura promoveu a formação das rótulas plásticas do Mecanismo de Vierendeel.

Quadro 3. Comparação resultados experimentais e numéricos.

Viga	F _{EXP} [kN]	F _{NUM} [kN]	F _{EXP} / F _{NUM}
B1	142.2	126.8	0.89
B2_1	174.1	166.8	0.96
B2_2	123.5	114.3	0.93
B2_3	75.4	63.9	0.85
B2_4	40.8	45.4	1.11



B3	174.3	179.7	1.03
Média			0.96
Desv. padrão			0.10

Para uma avaliação quantitativa da precisão do modelo, o Quadro 3 apresenta as cargas máximas obtidas experimentalmente (F_{EXP}) e numericamente (F_{NUM}), bem como o rácio entre elas. A análise do rácio F_{EXP} / F_{NUM} demonstra a boa correlação entre os resultados, com um rácio médio de 0.96 e um desvio padrão de 0.1. Tendo em conta a capacidade do modelo em prever a resposta carga-deslocamento, os modos de falha e a carga última com boa precisão, considera-se que o mesmo se encontra devidamente validado para ser utilizado em futuros estudos paramétricos.

5. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou uma investigação experimental e numérica do comportamento de vigas alveolares de aço à flexão, focada na validação de um modelo de elementos finitos. A comparação dos resultados demonstrou que o modelo numérico desenvolvido é uma ferramenta fiável, capaz de prever com boa precisão o comportamento das curvas carga-deslocamento e os modos de falha observados tanto à temperatura ambiente como em condições de incêndio.

A análise dos resultados permitiu concluir que a geometria das aberturas é um parâmetro governante à temperatura ambiente, influenciando não só a capacidade de carga, mas também o modo de falha, que transitou de um colapso no montante da alma para um Mecanismo de Vierendeel. Adicionalmente, verificou-se que a elevação da temperatura pode alterar o modo de falha para uma mesma geometria, promovendo mecanismos de colapso associados à plastificação em vez de mecanismos de instabilidade.

Apesar de o número de ensaios ser limitado, a validação bem-sucedida do modelo numérico cria uma base robusta para futuros estudos paramétricos, que são recomendados para alargar o âmbito desta investigação e contribuir para o desenvolvimento de regras de dimensionamento mais precisas de vigas com aberturas circulares em condições de incêndio.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho é financiado por fundos nacionais através da FCT – Fundação para a Ciência e a Tecnologia, I.P., no âmbito do projeto UID/6213/2023 e do projeto FIRECELL: COMPETE2030-FEDER-00833500.

REFERÊNCIAS

- Amrous, H., Yossef, N. M., & El-Boghdadi, M. H. (2023). Experimental study and structural analysis of tapered steel beams with cellular openings. *Engineering Structures*, 288, 116212. <https://doi.org/10.1016/J.ENGSTRUCT.2023.116212>
- Ben Seghier, M. E. A., Elshaboury, N., Abdelkader, E. M., Carvalho, H., de Faria, C. C., & Miguel, L. F. (2024). Two-stage framework for lateral-torsional buckling resistance prediction of cellular steel beams under fire conditions. *Structures*, 68, 107157. <https://doi.org/10.1016/J.ISTRUC.2024.107157>
- Boissonnade, N., Nseir, J., & Somja, H. (2024). Experimental and numerical investigations towards the lateral torsional buckling of cellular steel beams. *Thin-Walled Structures*, 195, 111388. <https://doi.org/10.1016/J.TWS.2023.111388>
- Cashell, K. A., Malaska, M., Khan, M., Alanen, M., & Mela, K. (2021). Experimental and numerical analysis of stainless steel cellular beams in fire. *Fire Safety Journal*, 121, 103277. <https://doi.org/10.1016/J.FIRESAF.2021.103277>



- CEN. (1997). *EN ISO 377:1997, Steel and steel products - Location and preparation of samples and test pieces for mechanical testing*. European Committee for Standardization.
- CEN. (2001). *EN 10002-1:2001, Metallic materials - Tensile testing - Part 1: Method of test at ambient temperature*. European Committee for Standardization.
- CEN. (2006). *EN 1993-1-5, Eurocode 3 - Design of steel structures - Part 1.5: Plated structural elements*. European Committee for Standardization.
- CEN. (2024). *EN 1993-1-2:2024, Design of steel structures - Part 1-2: General rules-Structural fire design*. European Committee for Standardisation.
- da Silva, L. V., & Mesquita, L. M. R. (2024). Elastic lateral-torsional buckling of cellular beams. *Structures*, 63, 106392. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.106392>
- ECCS. (1984). *Ultimate limit state calculation of sway frames with rigid joints*. European Convention for Constructional Steelwork.
- Fares, S. S., Coulson, J., & Dinehart, D. W. (2016). *Steel design guide 31: castellated and cellular beam design*. American Institute of Steel Construction.
- Grilo, L. F., Fakury, R. H., Castro e Silva, A. L. R. de, & Verissimo, G. de S. (2018). Design procedure for the web-post buckling of steel cellular beams. *Journal of Constructional Steel Research*, 148, 525–541. <https://doi.org/10.1016/J.JCSR.2018.06.020>
- Kang, L., Hong, S., & Liu, X. (2021). Shear behaviour and strength design of cellular beams with circular or elongated openings. *Thin-Walled Structures*, 160, 107353. <https://doi.org/10.1016/J.TWS.2020.107353>
- Lawson, R. M., & Hicks, S. J. (2011). *Design of composite beams with large web openings: in accordance with Eurocodes and the UK National Annexes* (P355 ed.). SCI.
- Morkhade, S. G., & Gupta, L. M. (2015). An experimental and parametric study on steel beams with web openings. *International Journal of Advanced Structural Engineering*, 7(3), 249–260. <https://doi.org/10.1007/s40091-015-0095-4>
- Oribi, S. B., Kada, A., Lamri, B., & Mesquita, L. (2023). Behaviour of cellular steel beams at ambient and high-temperature conditions. *Journal of Constructional Steel Research*, 207, 107969. <https://doi.org/10.1016/J.JCSR.2023.107969>
- Panedpojaman, P., Thepchatri, T., & Limkatanyu, S. (2015). Novel simplified equations for Vierendeel design of beams with (elongated) circular openings. *Journal of Constructional Steel Research*, 112, 10–21. <https://doi.org/10.1016/J.JCSR.2015.04.007>
- Sonck, D., & Belis, J. (2015). Lateral–torsional buckling resistance of cellular beams. *Journal of Constructional Steel Research*, 105, 119–128. <https://doi.org/10.1016/J.JCSR.2014.11.003>
- Sunar Bükülmez, P., & Celik, O. C. (2020). Experimental Study on Fire Behavior of Steel–Concrete Composite Cellular Beams with Large Opening Ratio. *International Journal of Steel Structures*, 20(1), 207–231. <https://doi.org/10.1007/S13296-019-00281-9/FIGURES/30>
- Zeytinci, B. M., Şahin, M., Güler, M. A., & Tsavdaridis, K. D. (2021). A practical design formulation for perforated beams with openings strengthened with ring type stiffeners subject to Vierendeel actions. *Journal of Building Engineering*, 43, 102915. <https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2021.102915>