

# 9<sup>as</sup> Jornadas de Segurança aos Incêndios Urbanos

## 4<sup>as</sup> 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<sup>as</sup> Jornadas de Segurança aos Incêndios Urbanos  
4<sup>as</sup> 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<sup>a</sup> 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.<sup>a</sup> 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

<b>Prefácio</b> .....	III
<b>Comissão Organizadora</b> .....	IV
<b>Comissão Executiva</b> .....	IV
<b>Comissão Científica</b> .....	V
<b>Índice</b> .....	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



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



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



**9JORNINC-4JORPROCIV**

9<sup>ª</sup> Jornadas de Segurança aos Incêndios Urbanos  
4<sup>ª</sup> Jornadas de Proteção Civil

Coimbra, 7 de novembro de 2025

Dinis Costa; João Paulo Gouveia.....	293
<b>Índice remissivo de autores.....</b>	<b>305</b>



**9JORNINC-4JORPROCIV**

9<sup>ª</sup> Jornadas de Segurança aos Incêndios Urbanos  
4<sup>ª</sup> Jornadas de Proteção Civil

Coimbra, 7 de novembro de 2025



**9JORNINC-4JORPROCIV**

9<sup>as</sup> Jornadas de Segurança aos Incêndios Urbanos  
4<sup>as</sup> Jornadas de Proteção Civil

Coimbra, 7 de novembro de 2025

9<sup>AS</sup> JORNADAS DE SEGURANÇA AOS INCÊNDIOS  
URBANOS (9JORNINC)

4<sup>AS</sup> JORNADAS DE PROTEÇÃO CIVIL (4JORPROCIV)

PALESTRAS



**9JORNINC-4JORPROCIV**

9<sup>ª</sup> Jornadas de Segurança aos Incêndios Urbanos  
4<sup>ª</sup> Jornadas de Proteção Civil

Coimbra, 7 de novembro de 2025



## SUSTENTABILIDADE E SEGURANÇA CONTRA INCÊNDIOS: EQUILÍBRIOS NECESSÁRIOS



**Elisabete Cordeiro** \*  
Investigadora  
Auxiliar  
LNEC/Lisboa/Portugal



**A. Leça Coelho**  
Professor  
Catedrático  
Universidade  
Lusófona/Porto/  
Portugal



**João E. Almeida**  
Investigador Auxiliar  
LNEC/Lisboa/Portugal

A construção de edifícios é uma das atividades de maior impacto ambiental e social na atualidade, desempenhando um papel determinante na forma como as sociedades respondem aos desafios da sustentabilidade e da segurança. A procura por soluções construtivas sustentáveis, que reduzam o consumo energético e a pegada ecológica, tem crescido de forma significativa, acompanhada pela necessidade de garantir níveis adequados de segurança contra incêndio em edifícios (SCIE). Contudo, estas duas dimensões — sustentabilidade e SCIE — nem sempre se harmonizam facilmente. O equilíbrio entre ambas constitui um desafio técnico e regulamentar que requer uma abordagem integrada e multidisciplinar.

A sustentabilidade ambiental na construção tem como objetivo satisfazer as necessidades do presente sem comprometer as gerações futuras, conciliando eficiência energética, bem-estar humano e preservação dos recursos naturais (Robbins, 2012; Liu et al., 2022), sem comprometer a SCIE. O conceito de construção sustentável engloba o ciclo de vida completo dos edifícios, desde o planeamento e conceção até à demolição e reutilização de materiais. De acordo com o *World Green Building Council*, um edifício verde é aquele que reduz ou elimina os impactos negativos sobre o ambiente, promovendo simultaneamente a saúde e o conforto dos ocupantes (McNamee & Meacham, 2023). Neste enquadramento, certificações como a *Leadership in Energy and Environmental Design* (LEED) e a *Building Research Establishment Environmental Assessment Method* (BREEAM) desempenham um papel fundamental, promovendo a implementação de boas práticas que reduzem o impacto ambiental e melhoram o desempenho energético.

Os materiais e tecnologias utilizados na construção sustentável são fatores determinantes. O seu impacto não se limita ao consumo energético durante a utilização do edifício, mas estende-se à energia incorporada e à pegada de carbono associadas à extração, transporte e fabrico (Asdrubali et al., 2023). Assim, uma abordagem verdadeiramente sustentável deve considerar não apenas a eficiência operacional, mas também a durabilidade, reciclabilidade e a reação ao fogo dos materiais utilizados. A introdução de novos produtos — como isolamentos avançados, compósitos leves ou novas soluções estruturais baseadas em derivados de madeira — cria oportunidades de inovação, mas também novos riscos de incêndio ainda insuficientemente estudados (Gollner et al., 2012).

A segurança contra incêndio continua a ser um dos pilares fundamentais do projeto de edifícios.

\* Autor correspondente – Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, Portugal, [ecordeiro@lnec.pt](mailto:ecordeiro@lnec.pt) <http://www.lnec.pt>



Os regulamentos de SCIE evoluíram historicamente devido, não só, à evolução do conhecimento científico, mas também em resposta a grandes catástrofes, como o Grande Incêndio de Londres (1666), que originou o *London Building Act* e inaugurou a regulamentação moderna de segurança (Hood, 2020). Atualmente, a SCIE baseia-se em medidas de proteção passiva — como a compartimentação, ventilação, aplicação de materiais com boa reação ao fogo e resistência estrutura — e proteção ativa, como deteção automática, sprinklers e sistemas de controlo de fumo. No entanto, muitos regulamentos mantêm um carácter prescritivo, impondo soluções fixas que, restringem a inovação e a utilização de materiais alternativos (Markel, 2021; Society of Civil Engineers, 2020).

Neste contexto, a construção sustentável introduz novos desafios à segurança. O uso de materiais com elevado poder calorífico e facilmente inflamáveis pode comprometer o desempenho ao fogo do edifício. Por exemplo, sistemas como o Isolamento Térmico pelo Exterior (ETICS), os painéis fotovoltaicos integrados, ou as fachadas verdes, podem contribuir para alterar profundamente as condições de desenvolvimento e propagação do incêndio, afetando a evacuação do edifício e dificultando a intervenção dos meios de socorro (Meacham & McNamee, 2020). Além disso, os materiais sintéticos utilizados em revestimentos interiores podem reduzir drasticamente o tempo disponível para evacuação — de 14–20 minutos em materiais tradicionais para apenas 2–4 minutos —, agravando o perigo (Gollner et al., 2012), pois os produtos que resultam de um incêndio em que estejam presentes são mais tóxicos do que os de um incêndio com combustíveis tradicionais (celulósicos).

O relatório da *Fire Protection Research Foundation*, “Fire Safety Challenges of Green Buildings”, analisa diversos materiais e soluções sustentáveis, concluindo que muitos apresentam perigo elevado de propagação do incêndio. A madeira lamelada colada cruzada (CLT), por exemplo, pode delaminar sob calor intenso, contribuindo para um aumento da carga de incêndio e comprometendo a estabilidade estrutural. Os painéis fotovoltaicos também podem contribuir para o aumento do risco de ignição e dificultar as operações de combate (Meacham & McNamee, 2020). Para mitigar estes perigos, recomenda-se a utilização de materiais aprovados, a instalação de sistemas de sprinklers e a previsão de mecanismos adequados de ventilação e desenfumagem.

A articulação entre sustentabilidade e a SCIE requer uma abordagem mais rigorosa desta, baseada no desempenho, que permita avaliar o comportamento real dos materiais e sistemas em condições de incêndio, em vez de se limitar a prescrições genéricas. Esta abordagem, amplamente defendida na literatura (Roberts et al., 2016; McNamee & Meacham, 2023), promove a flexibilidade no projeto, incentiva a inovação e permite encontrar soluções fundamentadas de SCIE, com uma otimização da relação custo-benefício das medidas de proteção, evitando soluções sobredimensionadas e ambientalmente onerosas.

O desafio atual consiste em integrar a segurança ao incêndio como um dos pilares da sustentabilidade. Um edifício que colapse ou sofra danos severos em caso de incêndio perde o seu valor ambiental e económico, anulando os benefícios das práticas sustentáveis implementadas. A inclusão da SCIE nos critérios de avaliação de sustentabilidade — em paralelo com energia, água, materiais e conforto — é, portanto, essencial para garantir a durabilidade e segurança do edificado.

Em síntese, a conciliação entre sustentabilidade e segurança contra incêndio é um equilíbrio necessário e inevitável. As regulamentações devem evoluir no sentido de promover a inovação responsável, permitindo a utilização de novos materiais e tecnologias, sem comprometer a proteção das pessoas e do património.

## REFERÊNCIAS

- Asdrubali, F., Grazieschi, G., Roncone, M., Thiebat, F., & Carbonaro, C. (2023). Sustainability of Building Materials: Embodied Energy and Embodied Carbon of Masonry. *Energies*, 16(4), 1846.
- Hood, D. W. T. (2020). *The Fire Problem: Social Responsibility for Fire in the British Empire, 1817–1919*.
- Liu, T., Chen, L., Yang, M., Sandanayake, M., Miao, P., Shi, Y., & Yap, P.-S. (2022). Sustainability Considerations of Green Buildings: A Detailed Overview on Current Advancements and Future Considerations. *Sustainability*, 14, 14393.
- McNamee, M., & Meacham, B. J. (2023). Conceptual Basis for a Sustainable and Fire Resilient Built Environment. *Fire Technology*, 10.1007/s10694-023-01490-9.



**9JORNINC-4JORPROCIV**

9<sup>ª</sup> Jornadas de Segurança aos Incêndios Urbanos  
4<sup>ª</sup> Jornadas de Proteção Civil

Coimbra, 7 de novembro de 2025

- Meacham, B., & McNamee, M. (2020). Fire Safety Challenges of Green Buildings and Attributes. Fire Protection Research Foundation.
- Roberts, B., Webber, M., & Ezekoye, O. (2016). Why and How the Sustainable Building Community Should Embrace Fire Safety. Current Sustainable/Renewable Energy Reports, 3, 10.1007/s40518-016-0060-2.
- Gollner, M., Kimball, A., & Vecchiarelli, T. (2012). Fire Safety Design and Sustainable Buildings: Challenges and Opportunities. Report of a National Symposium.
- Society of Civil Engineers (2020). Performance-Based Structural Fire Design: Exemplar Designs of Four Regionally Diverse Buildings using ASCE 7-16, Appendix E.



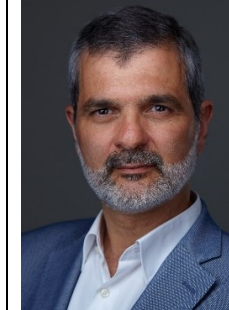
**9JORNINC-4JORPROCIV**

9<sup>ª</sup> Jornadas de Segurança aos Incêndios Urbanos  
4<sup>ª</sup> Jornadas de Proteção Civil

Coimbra, 7 de novembro de 2025



## Segurança contra incêndios: Abordagem prescritiva, baseada no Desempenho ou baseada no risco?

**Paulo Prata Ramos**

†

Projetista SCIE  
ETU Fire Safety  
Consultants

### SUMÁRIO

Existem vários tipos de regulamentos de SCIE, conceptualmente muito distintos: regulamentos prescritivos de 1<sup>a</sup> e de 2<sup>a</sup> geração, regulamentos baseados no desempenho e regulamentos baseados no risco, podendo também ser híbridos, conjugando as diferentes tipologias. Os regulamentos prescritivos, como o português, caracterizam-se por serem mais rígidos e conservadores, dificultando a inovação. Têm uma base empírica, não assegurando necessariamente um nível adequado de segurança. Os regulamentos de projeto baseado no desempenho, que já existem na Europa desde a década de 80, são muito mais flexíveis e têm uma sólida base científica, sendo possível verificar de forma transparente a eficácia dos sistemas de SCIE e, conseqüentemente, validar o nível de segurança dos edifícios. A generalidade dos países europeus já têm regulamentos de projeto baseado no desempenho ou permitem este tipo de abordagem. Os regulamentos baseados no risco, que são a vanguarda da inovação regulamentar, incorporam conceitos probabilísticos e de custo benefício que já são usados há década na área da saúde. Estão em implementação em países em que há maior conhecimento científico e estatístico na área da SCIE.

**PALAVRAS-CHAVE:** PBD; SCIE; prescritivo; risco; regulamentação.

### 1. INTRODUÇÃO

Assegurar a segurança dos cidadãos é um desígnio dos estados. A segurança tem várias áreas, uma das quais a Segurança Contra Incêndios em Edifícios (SCIE). Assim é normal que os estados regulamentem a SCIE, criando requisitos de forma que os edifícios tenham um nível de segurança adequado, salvaguardando a vida humana ou outros valores relevantes, como sendo o património cultural e o ambiente.

A regulação, sendo positiva, porque estabelece um referencial de aplicação para uma dada zona geográfica (normalmente um estado, regiões autónomas dentro de um estado ou mesmo regulamentos aplicáveis à escala metropolitana), também acarreta alguns inconvenientes:

---

† paulo.ramos@etu.pt



- A regulamentação cria, como é natural, limites, podendo estes limites cercear a inovação ou mesmo condicionar a operação ou funcionalidade dos edifícios, sobretudo se os regulamentos forem rígidos;
- Os requisitos podem onerar significativamente a construção, sobretudo se forem muito conservadores, ultrapassando largamente a relação custo-benefício;
- O processo administrativo associado à verificação do cumprimento da regulamentação poderá em alguns estados ser muito moroso, podendo pôr em causa a viabilidade de planos de investimento. Portugal é exemplo disso (pela negativa), podendo os projetos de SCIE levar mais de um ano a ser aprovados. Por oposição, em Singapura os projetos, por mais complexos que sejam são aprovados em escassos dias úteis. Considera-se que 6 dias úteis para aprovação de um projeto é demasiado tempo.

O conjunto dos fatores acima referidos podem ter um impacto negativo na economia, o que impacta um pilar fundamental da segurança, que é a segurança económica ou financeira dos estados e dos seus cidadãos.

Tendo presente esta dualidade, muitos estados, desde a década de 70 têm vindo a modernizar a sua regulamentação, de forma que seja mais flexível e adaptável.

Existem essencialmente três tipos diferentes de regulamentação de SCIE:

- Regulamentos prescritivos;
- Regulamentos de Projeto Baseado no Desempenho, frequentemente referidos pelo acrónimo PBD, igual em português e em inglês (*Performance-Based Design*);
- Regulamentos baseados no risco.

Dentro dos regulamentos prescritivos, podemos ainda fazer a distinção de dois subtipos:

- Regulamentos prescritivos de 1<sup>a</sup> geração;
- Regulamentos prescritivos de 2<sup>a</sup> geração.

Naturalmente que estes tipos e subtipos não são totalmente estanques, havendo regulamentos de características híbridas, mas facilmente se consegue catalogar qualquer regulamento dentro desta tipificação.

## 2. REGULAMENTOS PRESCRITIVOS

Os regulamentos prescritivos, que correspondem à primeira tipologia de regulamentação, já patente, por exemplo, no Império Romano, recorre a tipificações, estabelecendo em função dessas um conjunto de medidas. É disso exemplo a regulamentação portuguesa, cujas medidas assentam nos seguintes tipos:

- Doze utilizações-tipo, de I a XII;
- 4 categorias de risco, de 1<sup>a</sup> a 4<sup>a</sup> (baixo, médio, alto e muito alto);
- 4 alturas (pequena, média, alta e muito alta);
- 6 locais de risco, de A a F (ou 7, se considerarmos os locais de risco C agravado).

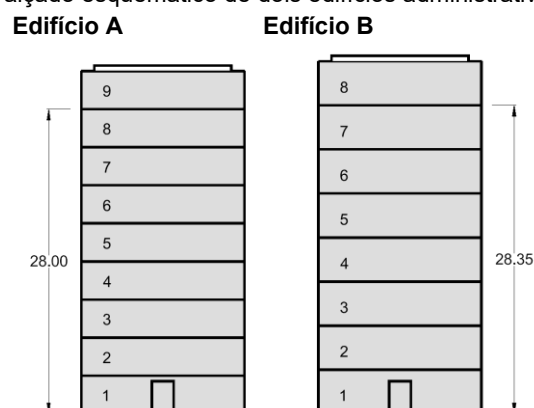
Esta tipificação, que necessariamente se faz por simplificação, faz com que os requisitos não sejam adaptáveis às nuances que inevitavelmente existem. É disso exemplo, a utilização tipo VI (“Espetáculos e reuniões públicas”), que agrega as seguintes realidades:

- **Teatros**, que se caracterizam por ter grande carga de incêndio, fontes de ignição, efetivo elevado;
- **Igrejas**, que se caracterizam também pelo efetivo elevado, mas que têm baixa carga de incêndio; relativamente ao efetivo tem a condicionante de servir uma população envelhecida e de menor mobilidade e capacidade visual e auditiva;
- **Discotecas**, que se caracterizam por ter um efetivo muito elevado, ambiente ruidoso e alienante, e potencialmente ter ocupantes em estados alterados, com pouca capacidade de reagir adequadamente em situação de emergência.



Relativamente à altura dos edifícios, que funciona por escalões, e a sua relação com a categoria de risco, também pode dar origem a situações caricatas. Mostra-se abaixo um exemplo esquemático de dois edifícios de escritórios cuja área em planta é idêntica, tendo o edifício A 9 pisos, com 3,5 m de laje a laje, e o edifício B 8 pisos, com 4,05 m de laje a laje. Tendo mais pisos, o edifício A tem naturalmente mais ocupantes.

Imagem 1: alçado esquemático de dois edifícios administrativos similares



Do ponto de vista regulamentar o edifício A é de média altura, classificando-se na 2<sup>a</sup> categoria de risco, e o Edifício B, com menos pisos, é de grande altura, sendo classificado na 3<sup>a</sup> categoria de risco.

Quadro 1: comparação dos requisitos aplicáveis a dois edifícios administrativos similares

Característica	A	B
Categoria de risco	2 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>
Vias verticais	Uma	Duas
Câmara corta-fogo	Não	Sim
Zona de refúgio	Não	Sim
Gerador	Talvez	Sim
Controlo fumo VHE	Talvez	Sim
Rede de 2 <sup>a</sup> intervenção	Não	Sim
Sprinklers	Não	Sim

Curiosamente, o facto de no edifício B ser obrigatório haver duas vias verticais protegidas por câmara corta-fogo, reduz de forma significativa a área útil, daí resultando um número menor de pessoas por piso, ou seja, menos pessoas expostas ao perigo, mas isso não tem qualquer reflexo nos requisitos regulamentares.

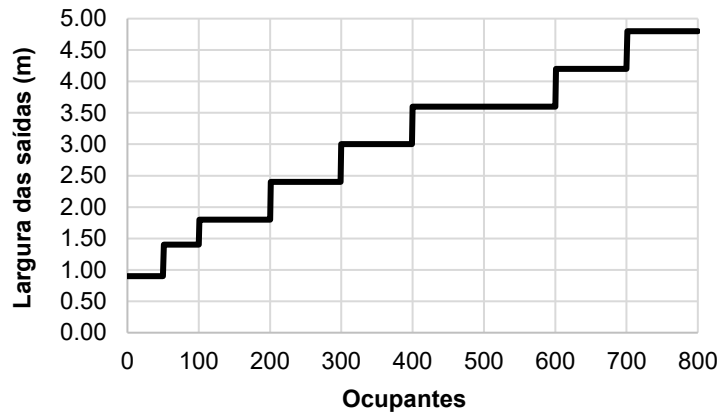
Importa também destacar que o conjunto de medidas adicionais que o edifício A tem de incorporar face ao B incrementaria o seu custo em mais de um milhão de euros. Ou seja, por ter mais 35 cm de altura, o edifício B é mais caro, tem menor retorno financeiro, por ter menos área locável, e irá gerar menos riqueza, porque consegue albergar menos trabalhadores.

Também o dimensionamento das vias de evacuação, baseado em unidades de passagem, em que a largura das vias cresce por escalões, bastando apenas mais uma pessoa para se ter de aumentar uma saída em 60 cm, demonstra a falta de sensibilidade dos regulamentos prescritivos a pequenas variações funcionais dos edifícios. No gráfico baixo, que tem no eixo das abcissas o número de ocupantes, e no eixo das ordenadas a largura da



saída de emergência correspondente de acordo com os requisitos do RT-SCIE, mostra a falta de correlação entre uma coisa e outra.

Gráfico 1: largura das saídas de evacuação em função do efetivo de acordo com o RT-SCIE



Da análise do gráfico resulta também a falta de razoabilidade técnica das prescrições, o que fica particularmente patente no intervalo entre as 0 e as 100 pessoas, com um crescimento mais acentuado, mas sobretudo entre as 400 e 600 ocupantes, em que não há qualquer alteração de largura. Isto é consequência de se estabelecer os requisitos por escalões, havendo, no caso do RT-SCIE, um critério até 50 pessoas (uma UP), outro para entre 50 e 500 pessoas (uma UP por cada 100 pessoas ou fração acrescido de mais uma UP) e outro ainda para mais de 500 pessoas ((uma UP por cada 100 pessoas).

O empirismo dos regulamentos prescritivos faz com que haja disposições bem díspares entre eles, não havendo na maior parte dos casos suporte científico que fundamente os requisitos ou certezas quanto à sua eficácia real.

Querendo-se assegurar a “salvaguarda da vida humana”, num regulamento prescritivo são indicadas as condições de evacuação, de compartimentação, de controlo de fumo e outras que possam garantir que os ocupantes chegam de forma segura ao exterior do edifício. Presume-se que cumprindo esses requisitos os ocupantes estejam seguros, mas não há de facto uma certeza que tal aconteça, porque não é feita uma verificação do desempenho dos sistemas.

Por exemplo, no RT-SCIE o controlo de fumo nos locais de risco e vias horizontais pode ser passivo ou ativo, não estabelecendo o regulamento quando se pode ou deve optar por um ou por outro. Sabemos que em edifícios com sprinklers, uma vez que este sistema de extinção reduz a temperatura da camada de fumo, os sistemas de controlo de fumo são bastante ineficazes, sobretudo nas vias horizontais de evacuação, onde a diferença de temperatura entre a camada de fumo e a camada livre de fumo é muito baixa para assegurar uma tiragem térmica (entenda-se, por convecção) eficaz.

Simulações computacionais de incêndios para validar a eficácia do controlo de fumo passivo em vias horizontais demonstram que cumprindo o RT-SCIE na íntegra não são garantidas as condições mínimas de sustentabilidade das vias de evacuação, fazendo com que as pessoas não consigam evacuar.

Os regulamentos prescritivos têm algumas vantagens. São de aplicação fácil, simplificando o projeto e a sua apreciação, garantem na generalidade dos casos um nível de segurança adequado e estão fortemente sedimentados na comunidade técnica. No entanto além das desvantagens já referidas (facilmente a sua aplicação é desajustada para edifícios atípicos ou existentes, a tipificação acarreta redundâncias que oneram muito a construção e a sua filosofia conservadora dificulta a inovação arquitetónica e tecnológica), o maior inconveniente é que a aplicação das prescrições cria a ilusão de que o edifício tem um nível adequado de segurança, o que de



facto pode não ser o caso. Os regulamentos prescritivos são como caixas negras, desconhecendo o que está lá dentro.

### 3. REGULAMENTOS PRESCRITIVOS DE 2<sup>a</sup> GERAÇÃO

Os regulamentos prescritivos de 2<sup>a</sup> geração são, como o nome indica, uma evolução relativamente aos de 1<sup>a</sup> geração. Embora mantendo uma filosofia de tipificação, apresentam normalmente três características distintas:

- Fazem uma conceptualização de cada medida de SCIE, referindo o seu propósito e objetivos, o que contribui para a tomada de decisões de projeto em situações em que o articulado possa ser mais vago ou flexível;
- Os requisitos dependem de critérios mais finos ou escaláveis, permitindo uma maior proporcionalidade entre as características funcionais e as medidas exigidas.

Estes regulamentos normalmente não têm um conceito de utilização-tipo estanque, como têm os regulamentos prescritivos português e francês, com requisitos aplicáveis a partes significativas do edifício e obrigatoriedade de compartimentação entre utilizações. Tem ainda assim o conceito de usos, mais abrangente, focado nas características dos ocupantes e risco dos espaços, mas não fazendo generalizações para o todo do edifício ou parte significativa, mas analisando caso a caso, compartimento a compartimento, não tendo exigência de compartimentação entre eles apenas por terem usos distintos.

É disso exemplo o regulamento inglês *Approved Document B* (ADB), que divide as construções em sete grupos muito genéricos e abrangentes, que se prendem com a semelhança do risco, decorrente da conjugação dos seguintes fatores:

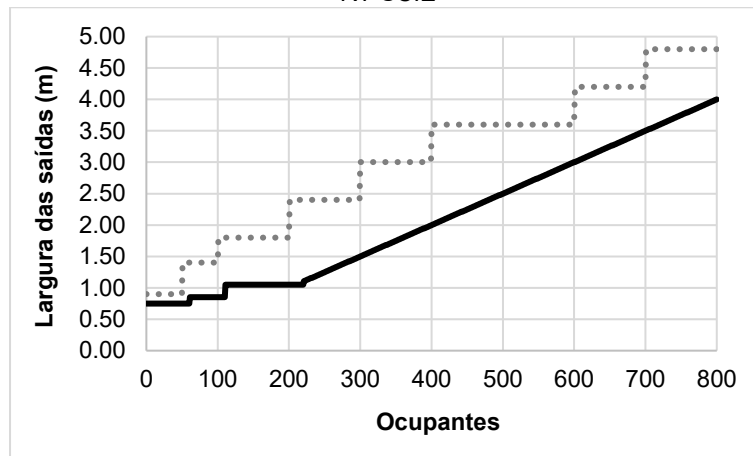
- Os ocupantes estarem a dormir ou acordadas;
- Os ocupantes estarem ou não familiarizados com os espaços;
- Os ocupantes serem autónomos;
- Não ter ocupação intensa de pessoas;
- Risco de incêndio.

A título de exemplo, armazéns (que no RT-SCIE está na UT XII) e estacionamento (que no RT-SCIE está na UT II), no regulamento inglês estão no mesmo grupo, dado que ambos partilham de características comuns: elevada carga de incêndio, mas baixa probabilidade de ignição. No caso deste regulamento, a indústria e oficinas, que tem mais fontes de ignição, estão num grupo distinto dos armazéns.

No que concerne aos requisitos, propriamente ditos, como referido não funcionam tanto por escalões, havendo uma maior correlação entre as necessidades funcionais do edifício e os requisitos aplicáveis. Dá-se como exemplo os requisitos de largura de vias de evacuação do ADB, que se mostram no gráfico abaixo, em que surgem, com linha preto contínua os requisitos do ADB, mostrando-se a tracejado cinza, para comparação, situação idêntica no RT-SCIE.



Gráfico 2: largura das saídas de evacuação em função do efetivo de acordo com o ADB e comparando com o RT-SCIE



Como se vê, embora haja um conceito de escalões para as situações de menor efetivo, para efetivos maiores há uma relação de linearidade, sendo necessário garantir 5 mm por pessoa.

Mesmo o regulamento francês, que embora tendo tido uma génese mais rígida, característica dos regulamentos de 1<sup>a</sup> geração, tem tido várias alterações ao longo do tempo, quer nos diplomas principais, quer através da publicação que IT (*Instruction technique*, que têm valor legal, comparável às Notas Técnicas portuguesas que sejam publicadas em Diário da República). É disso exemplo o requisito de distância mínima entre vãos sobrepostos de pisos diferentes. No RT-SCIE, essa distância é de 1,1 m, em qualquer circunstância. Na regulamentação francesa, assume nuances interessantes, que levam em consideração:

- A carga de incêndio do interior do edifício, considerada a partir da sua utilização;
- A densidade de carga de incêndio da fachada;
- A altura do edifício;
- Os sistemas de SCIE disponíveis.

Dão-se alguns exemplos dessas nuances no regulamento francês:

- Regra geral:
  - $\geq 1$  m se a densidade de carga de incêndio da fachada é  $\leq 130$  MJ/m<sup>2</sup>;
  - $\geq 1,3$  m se a densidade de carga de incêndio da fachada é  $> 130$  MJ/m<sup>2</sup>;
- Edifícios de grande altura:
  - $\geq 1,2$  m se a densidade de carga de incêndio da fachada é  $\leq 80$  MJ/m<sup>2</sup>;
  - $\geq 1,5$  m se a densidade de carga de incêndio da fachada é  $\leq 130$  MJ/m<sup>2</sup>;
- Estacionamento  $\geq 0,8$  m;
- Arquivos  $\geq 1,5$  m;
- Se o edifício tiver sprinklers o requisito não se aplica.

Conclui-se assim que os regulamentos prescritivos de 2<sup>a</sup> geração têm, por um lado, uma maior adesão e proporcionalidade entre o requisito regulamentar e o perigo que pretende mitigar, e que, por outro lado, permitem maior flexibilidade, variando os requisitos em função das soluções de projeto (construtivas ou de sistemas de SCIE).

#### 4. REGULAMENTOS DE PROJETO BASEADO NO DESEMPENHO

Os regulamentos de projeto baseado no desempenho são conceptualmente diferentes dos regulamentos prescritivos. Ao invés de estabelecerem requisitos específicos de SCIE para situações tipificadas, estabelecem



objetivos, métricas para validação dos objetivos e metodologias de demonstração. Assim, querendo-se assegurar a “salvaguarda da vida humana”, num regulamento baseado no desempenho é estabelecido:

- Objetivo – Não haver mortos nem feridos graves;
- Objetivo funcional – Assegurar que os ocupantes potencialmente em perigo evacuam com condições adequadas de sustentabilidade no local da ocorrência e ao longo das vias de evacuação;
- Metodologias de demonstração de desempenho.

O cumprimento do objetivo funcional acima referido é conceptualizado nos regulamentos através na seguinte fórmula:

$$ASET \ggg RSET$$

Em que:

- *ASET* é o tempo em que há boas condições de sustentabilidade ao longo do caminho de evacuação, sendo o acrónimo em inglês de *Available Safe Egress Time*;
- *RSET* é o tempo que os ocupantes necessitam para evacuar até ao exterior ou outro local seguro, sendo o acrónimo em inglês de *Required Safe Egress Time*;
- $\ggg$  representa consideravelmente maior.

Essa fórmula apesar de ser conceptual, tem de ser demonstrada através de modelos que tenham a devida validação científica, sendo que para isso os regulamentos baseados no desempenho estabelecem:

- Critérios de desempenho que permitam avaliar o cumprimento do objetivo funcional;
- Margem de segurança;
- Metodologias de demonstração.

Para este objetivo funcional, podem ser, por exemplo, estabelecidos os seguintes critérios exigenciais que garantam a sustentabilidade da evacuação:

- Altura da camada de fumo acima dos 2 m;
- Temperatura da camada de fumo abaixo dos 200°C;
- Fluxo radiante sobre os ocupantes inferior a 2,5 kW/m<sup>2</sup>;
- Visibilidade superior a 10 m no local da ocorrência e de 30 m nas vias de evacuação.

Estas condições físicas são avaliadas recorrendo a modelos computacionais, devidamente validados por trabalho de campo, que simulam diversos cenários de incêndio, dando-nos os valores para os parâmetros acima ao longo do tempo. A modelação considera não só o fogo em si, mas o efeito dos sistemas de proteção previstos e o seu impacto sobre o fogo e o fumo, nomeadamente os sprinklers e os sistemas de controlo de fumo. Isto vai-nos permitir determinar o *ASET*.

Paralelamente, há que determinar o tempo de evacuação dos ocupantes, o que mais uma vez é feito recorrendo a modelos computacionais, devidamente validados por trabalho de campo, que simulam a evacuação dos ocupantes para diversos cenários de ocupação. Isto vai-nos permitir determinar o *RSET*.

Uma vez determinado o *ASET* e o *RSET*, faz-se uma comparação entre ambos, para ver se de facto o primeiro é consideravelmente superior ao segundo, sendo que esta avaliação tem de ser objetiva, com base numa margem de segurança estabelecida no regulamento. Essa margem de segurança, que varia entre 1,2 e 2,0 depende do grau de segurança que temos na determinação do *ASET* e do *RSET*.

Quanto maior for a fiabilidade dos sistemas de SCIE do edifício, ou quanto maior a fiabilidade dos programas de modelação, ou quanto maior o grau de confiança relativamente aos cenários considerado, menor poderá ser a



margem de segurança. Por exemplo se usarmos o método de Monte Carlo na modelação da evacuação, correndo várias simulações em vários cenários, pode-se baixar a margem de segurança.

A metodologia e critérios exigenciais acima descritos são definidos na regulamentação. Por exemplo é normal definir-se quais os cenários de incêndio que têm de ser estudados, compreendendo nomeadamente:

- Incêndio no espaço com maior efetivo;
- Se houver caves, incêndio no piso de cota mais baixa;
- Incêndio no piso de cota mais alta;
- Incêndio no piso de entrada, bloqueando a principal saída de emergência;
- Incêndio no piso de maior carga de incêndio;
- Incêndio de crescimento lento em espaço confinado (por exemplo um ducto).

Relativamente aos modelos, também são feitas exigências, nomeadamente:

- Quanto à metodologia informática em que se baseiam:
  - Modelação de incêndio - Normalmente é requerido que se usem programas de elementos finitos em vez de modelos de zona;
  - Modelação de evacuação - Normalmente é requerido que se usem programas de elementos (cada pessoa é modelada como uma entidade, com características e comportamentos próprias) ao invés de sistemas mais simples, baseados em fluidos;
- Quanto à sua validação científica:
  - Devidamente validados através de trabalho de campo;
  - Com validação independente por investigação académica, publicada e com *peer review*.

Como resultado desta abordagem, o projetista tem um grande grau de liberdade na escolha das soluções técnicas de SCIE a implementar. Por exemplo:

- Pode optar por vias de evacuação de menor largura, aumentando a eficácia do controlo de fumo e vice-versa;
- Pode reduzir a proteção passiva, adotando sistemas de extinção automática mais robustos e vice-versa.

Ao longo do desenvolvimento do projeto vão-se experimentando as diversas soluções de projeto, validando o seu desempenho até se alcançar a solução final, otimizada. Daqui decorre que os regulamentos baseados no desempenho possam incorporar de forma holística a integração e interdependência dos diversos sistemas de SCIE, coisa que não acontece num regulamento prescritivo.

Embora os regulamentos de projeto baseado no desempenho possam dar grande liberdade ao projetista, com frequência referem limites mínimos que acabam por ser, em certa medida, similares aos que encontramos nos regulamentos prescritivos de 2<sup>a</sup> geração, mas com mais graus de liberdade, tendo em consideração as características físicas dos espaços (altura, natureza da carga de incêndio), a natureza dos ocupantes (a dormir, acordados, familiarizados ou não; com autonomia ou não) e os sistemas de SCIE presentes.

Dá-se abaixo o exemplo das distâncias máximas a percorrer no local de risco conforme a BS 9999, para um edifício administrativo. Este regulamento inglês estabelece um valor padrão de distância a percorrer, a que chamam *base line*, que pode ser aumentado percentualmente consoante a eficácia do sistema de alarme e pé direito do espaço, havendo no entanto um valor máximo. O *base line* e o valor máximo é diferente consoante se o edifício tem ou não sprinklers. Coloca-se na tabela o mesmo requisito no RT-SCIE para referência.

Quadro 2: distâncias máximas a percorrer de acordo com a BS 9999

<b>Característica dos espaços</b>	<b>Acréscimo</b>	<b>Alternativa</b>	<b>Impasse</b>
<b>Caso geral sem sprinklers</b>	<i>(Base line)</i>	55	22
Valores máximos permitidos		75	24



<b>Característica dos espaços</b>	<b>Acréscimo</b>	<b>Alternativa</b>	<b>Impasse</b>
1 - Detecção de incêndios + alarme de voz	15%	63,25	24 (*)
2 - Pé direito maior que 3 m	5%	57,75	23,1
3 - Pé direito maior que 4 m	10%	60,5	24 (*)
4 - Pé direito maior que 5 m	15%	63,25	24 (*)
5 - Pé direito maior que 5 m	20%	66	24 (*)
Conjugação de 1 e 5 (exemplo)	35%	74,25	24 (*)
<b>Caso geral com sprinklers</b>	<i>(Base line)</i>	65	26
Valores máximos permitidos		90	30
6 - Detecção de incêndios + alarme de voz	15%	74,75	29,9
7 - Pé direito maior que 3 m	5%	68,25	27,3
8 - Pé direito maior que 4 m	10%	71,5	28,6
9 - Pé direito maior que 5 m	15%	74,75	29,9
10 - Pé direito maior que 5 m	20%	78	30 (*)
Conjugação de 6 e 10 (exemplo)	35%	87,75	30 (*)
<b>Comparação com RT-SCIE</b>	-	30	15

(\*) Valores com acréscimo é superior, sendo limitado pelo valor máximo

O exemplo acima é para edifícios administrativos, mas importa referir que os regulamentos baseados no desempenho não têm o conceito de utilizações tipo. Os requisitos acima variam com a conjugação de dois fatores:

- Tipo de ocupantes:
  - A – Acordados e familiarizados com o edifício
  - B – Acordados mas não familiarizados com o edifício
  - C – Ocupantes que podem estar a dormir
- Ci – Ocupação de longo prazo, familiarizado
- Cii – Ocupação de médio prazo
- Ciii – Ocupação de curto prazo
  - D – Pessoas que recebam cuidados médicos
  - E – Ocupantes em circulação (por exemplo gares de transporte)
- Taxa de crescimento do incêndio
  - 1 – Lenta (0,0029 kJ/s<sup>3</sup>)
  - 2 – Média (0,012 kJ/s<sup>3</sup>)
  - 3 – Alta (0,047 kJ/s<sup>3</sup>)
  - 4 – Super alta (0,188 kJ/s<sup>3</sup>)

No caso de um edifício administrativo é considerado A2, mas se tiver sprinklers é um A1.

## 5. REGULAMENTOS DE PROJETO BASEADO NO RISCO

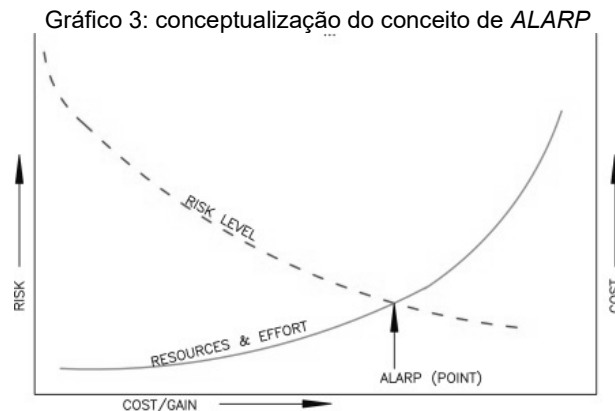
Os regulamentos de projeto baseado no risco, que são os mais modernos, têm pontos de contacto com os regulamentos baseados no desempenho, mas partem de princípios de bastante diferentes. A ideia chave subjacente a estes regulamentos é a seguinte:

- É impossível garantir a nível nacional que não há vítimas mortais decorrentes de incêndios;



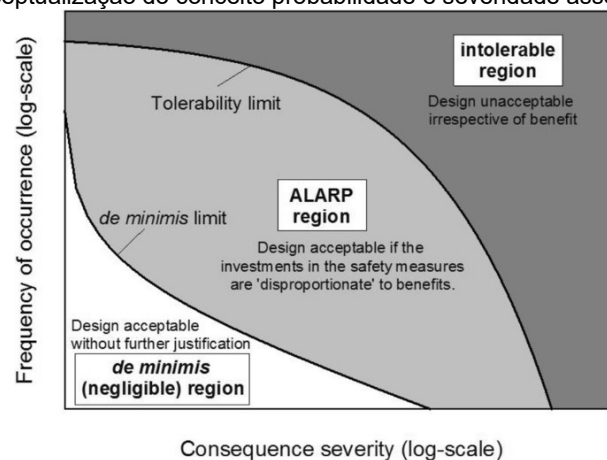
- Quanto mais tentarmos nos aproximar de edifícios em que não haja vítimas, maiores os custos de construção e maiores as limitações funcionais impostas ao edifício, podendo levar a que fiquem disfuncionais;
- Para todas as áreas de sinistro existe um número de vítimas que é socialmente aceite;
- Existe um ponto de equilíbrio entre o número de vítimas possíveis e os custos relacionados com a sua proteção.

Este conceito, definido como *ALARP* do acrónimo inglês *As Low As Reasonably Practicable*, que podemos traduzir por “*tão baixo como razoavelmente possível*” surgiu inicialmente no Reino Unido em 1974 para aplicação no serviço nacional de saúde, de forma a avaliar o custo-benefício das medidas de saúde pública, sendo atualmente usado em todo o mundo, na saúde e não só. Em Portugal, por exemplo, é usado para avaliar se uma determinada vacina é ou não introduzida no sistema nacional de vacinas como gratuita e universal. No gráfico abaixo, conceptualiza-se este conceito.



Assim, nestes regulamentos é necessário fazer modelações de incêndio e de evacuação, mas não tem de se assegurar que  $ASET \gg RSET$ , mas antes que o número provável de vítimas, numa análise de longo prazo, não excede o valor fixado para o *ALARP*. Admite-se que possa haver ocorrências frequentes com muito baixa severidade, e ocorrências de maior severidade com muito baixa frequência, o que pode ser ilustrado conceptualmente no gráfico abaixo.

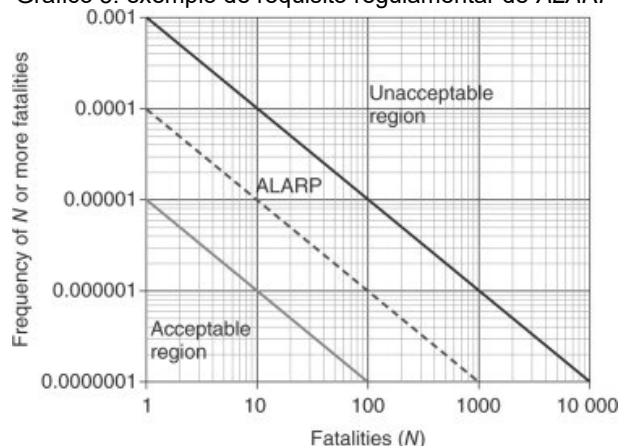
Gráfico 4: conceptualização do conceito probabilidade e severidade associado ao *ALARP*



Assim, no regulamento, é indicado o número de vítimas probabilisticamente aceitável, definido num gráfico de escala logarítmica como o exemplo abaixo.



Gráfico 5: exemplo de requisito regulamentar de ALARP



Como é natural, esta abordagem é de elevada complexidade, só sendo possível em países em que quer os projetistas quer as entidades licenciadoras disponham de elevado conhecimento e recursos computacionais, mas também que disponham de estatísticas sólidas e muita investigação pós-incêndio. Não é por acaso que o seu desenvolvimento está a cargo da VKF, a associação suíça de seguradoras.

Na Europa a Suíça já tem um regulamento baseado no risco, o BSV 2026, que está desde setembro em consulta pública, prevendo-se que entre em vigor em setembro de 2026.

## 6. COEXISTÊNCIA ENTRE REGULAMENTOS

Em muitos países os vários tipos de regulamentos coexistem, como é o caso de França e Inglaterra. Em Inglaterra existem 4 regulamentos, um prescritivo de 1<sup>a</sup> geração, um de 2<sup>a</sup> geração (ADB), um de projeto baseado no desempenho (BS 9999) e outro híbrido de projeto baseado no desempenho e no risco (BS 7974).

Embora na maior parte das vezes a escolha seja do dono de obra e do projetista, há regulamentos que têm recomendações ou limites. Por exemplo, os regulamentos prescritivos ingleses recomendam claramente que edifícios complexos, nomeadamente com mais de 18 m de altura, devem preferencialmente ser feitos ao abrigo de regulamentos baseados no desempenho, de forma a validar a eficácia das medidas implementadas.

## 7. CONCLUSÕES

Constata-se que:

- Os regulamentos prescritivos de 1<sup>a</sup> geração são empíricos, sem base científica, pouco flexíveis e não garantem necessariamente o nível de segurança desejável;
- Os regulamentos prescritivos de 2<sup>a</sup> geração, mais avançados, estão mais ajustados à realidade, havendo uma maior correlação entre necessidades funcionais e requisitos aplicados
- Os regulamentos baseados no desempenho, já bastante comuns na Europa, permitem maior flexibilidade e maior garantia que os edifícios têm o nível de segurança desejável;
- Os regulamentos baseados no risco são os mais avançados, sendo expectável que países com conhecimento mais sólido em SCIE caminhem em direção a esse modelo;
- É possível e desejável que os países tenham várias tipologias de regulamentação;
- O regulamento português de SCIE é arcaico e hiper conservador quando comparado com a legislação de outros países; não obstante não garante em algumas circunstâncias o nível de segurança adequado;



- É urgente modernizar a regulamentação de SCIE em Portugal; embora não se perspetive de todo que possa haver um regulamento baseado no risco, por falta de informação estatística e investigação pós-incêndio, já seria viável há muitos anos haver um regulamento baseado no desempenho.

## REFERÊNCIAS

- Decreto-Lei nº220/2008 de 12 de novembro, que publica o Regime Jurídico de Segurança Contra Incêndios em Edifícios, na sua redação atual.
- Portaria nº 1532/2008 de 29 de dezembro, que publica o Regulamento Técnico de Segurança Contra Incêndios em Edifícios, na sua redação atual.
- BS 9999:2017 - Code of practice for fire safety in the design, management and use of buildings. BSI British Standards, UK.
- BS 7974:2019 - Application of fire safety engineering principles to the design of buildings. BSI British Standards, UK.
- Approved Document B, Volume 2 – Buildings other than dwellinghouses. Department for Communities and Local Government, UK.
- Instruction Technique 249 relative aux façades, Arrêté du 24 mai 2010. BATISS - Bureau d'études spécialiste de la sécurité incendie, França.
- Réglementation et mise en sécurité incendie des ERP, CSTB (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment), 2011.
- Guide d'application de la réglementation incendie, CSTB (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment), 2012.
- Réglementation et mise en sécurité incendie des bâtiments d'habitation, CSTB (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment), 2015.
- RAMOS, Paulo; Projeto Baseado no Desempenho. Proteger n.º 22, dezembro de 2014, APSEI.
- RAMOS, Paulo; RODRIGUES, João Paulo; Análise pelo despenho dos sistemas de controlo de fumo nas vias horizontais de evacuação. Proteger n.º 11, junho de 2011, APSEI.
- RAMOS, Paulo; Anacronismo da regulamentação de SCIE portuguesa face à de outros países europeus. Atas da 8.as JORNINC, junho de 2023.



## O USO DO FOGO NA GESTÃO DA PAISAGEM



**Emanuel de Oliveira**<sup>‡</sup>  
Técnico e investigador  
no Município de  
Paredes de  
Coura/Laboratório  
Rural.

**PALAVRAS-CHAVE:** fogo prescrito; gestão de combustíveis; fogo tradicional; queimadas; incêndios florestais.

A relação entre humanidade e fogo começou antes da antropização da paisagem. Os incêndios naturais desempenharam um papel primordial na modelação das florestas durante milhões de anos (Pyne & Goldammer, 1997; Bowman et al., 2009, 2011). Com o domínio humano do fogo, há mais de 300 mil anos, verificou-se um salto qualitativo para o uso regular e sistemático deste como ferramenta, tendo desempenhado um papel determinante na evolução humana, quer ao nível físico, cognitivo e social (MacDonald, 2018; Roebroeks & Villa, 2011; Shimelmitz et al., 2014). Nas sociedades primitivas, o uso do fogo estava associado ao nomadismo dos primeiros povos caçadores-recoletores, tendo este uso também um carácter itinerante (Fábregas Valcarce, 1988; Fábregas Valcarce & Otero, 1999; Jorge, 2000; Sanches, 2003). Com o sedentarismo e surgimento de comunidades pastorícias e agrícolas no Neolítico, o fogo passa a ser elemento estruturante dos sistemas de gestão e transformação da paisagem, proporcionando a abertura de clareiras, a renovação de pastos, a facilitação da caça e a gestão sustentável da biomassa, além de desempenhar funções culturais e cerimoniais (Pyne & Goldammer, 1997; Bowman et al., 2011). Assim, o fogo acompanhou a evolução das sociedades humanas, moldando simultaneamente a paisagem e a própria espécie (Smil, 2004).

Desde o início da humanização do território, o fogo constitui um elemento estruturante na dinâmica das paisagens portuguesas, desempenhando funções ecológicas, agronómicas e socioeconómicas essenciais (Vázquez-Varela et al., 2022; Berkes et al., 2000). A análise histórica realizada sobre 135 documentos entre o século VI a.C. e o século XIX identifica 124 citações relevantes para os usos do fogo no território português, evidenciando o seu papel na modelação de sistemas agrossilvopastoris (Oliveira et al., 2023a). O resultado da investigação permitiu identificar diferentes usos do fogo nas paisagens portuguesas antes da motorização agrícola e da introdução de fertilizantes químicos. Estes usos foram praticados durante vários séculos, e o conhecimento tradicional foi transmitido de geração em geração, sendo abruptamente interrompido pela força da lei. Apenas as comunidades rurais mais remotas conseguiram manter vestígios deste fogo tradicional ou nativo, que desempenhou um papel essencial na configuração e conservação das paisagens durante todo o tempo em que perdurou (Oliveira et al., 2023a). A análise das fontes documentais históricas permitiu identificar a diversidade de usos do fogo pelas comunidades rurais portuguesas e a evolução das técnicas até à sua regulamentação. O estudo também permitiu compreender a diferença entre transferência e transmissão do conhecimento tradicional do fogo. a primeira envolve

<sup>‡</sup> Autor correspondente – Laboratório Rural – Município de Paredes de Coura, Largo Visconde de Mozelos, Portugal; email: laboratoriorural@paredesdecoura.pt



a passagem geracional com aplicação prática das técnicas de gestão sustentável dos recursos e do ambiente, enquanto a segunda pode ocorrer sem prática associada, permanecendo apenas no plano teórico (Armatas et al., 2016; Berkes, 2012; S. J. Pyne, 2006). Apesar da atual visão redutora sobre o fogo tradicional, os registos demonstram que, historicamente, existiam múltiplos usos (Figura 1), revelando que este conhecimento era amplo e tão diverso quanto a complexidade da gestão dos recursos nas comunidades rurais (Vázquez-Varela et al., 2022). Esta diversidade de usos demonstra que o fogo foi uma ferramenta central na gestão da paisagem e na sustentação de sistemas agrossilvopastoris complexos e resilientes.



Figura 1. Identificação dos diversos usos do fogo de acordo com a documentação histórica.



## **A rutura: industrialização, legislação e abandono rural**

Ao longo do tempo, transformações sociais, políticas e legislativas, desde a Idade Média até ao processo de industrialização, impuseram restrições cada vez maiores ao uso do fogo, promovendo a sua exclusão progressiva do território (Oliveira et al., 2023d). A industrialização, iniciada no século XVIII, acompanhada pela expansão urbana, motorização da agricultura, intensificação da produção e privatização das terras comunais, provocou profundas alterações na socioecologia rural, conduzindo ao isolamento, abandono e envelhecimento das comunidades, assim como à fragmentação e homogeneização dos usos do solo.

As políticas públicas, focadas principalmente na repressão das práticas tradicionais, em particular o uso do fogo, e sem integrar as necessidades específicas das populações rurais, resultaram na marginalização e perda gradual destes saberes, restringindo-os a apenas algumas regiões de montanha. O estudo das sucessivas reformas legislativas em Portugal exemplifica claramente os conflitos, tensões e impactos resultantes dessas abordagens (Oliveira et al., 2023d). Desde meados do século XX, a perceção sobre os incêndios tem estado centrada na sua dimensão como risco e desastre ambiental, obscurecendo o papel histórico do fogo como instrumento de gestão adaptativa e fator de resiliência territorial.

Este processo de marginalização do fogo tradicional, aliado à desestruturação rural e aos fenómenos migratórios e económicos, conduziu à acumulação excessiva de combustível nas paisagens, aumentando a vulnerabilidade a incêndios severos e à perda do mosaico característico das paisagens tradicionalmente geridas. A modernização e a especialização agrícola reforçaram essa tendência, criando cenários de elevada complexidade, incerteza e risco sistémico associados aos incêndios, particularmente em territórios periféricos como o noroeste ibérico, onde o uso tradicional do fogo permaneceu ativo por mais tempo (Pereira et al., 2006; Díaz-Fierros, 2019; Meira Castro et al., 2020; Vega et al., 2021).

## **Conhecimento Ecológico Tradicional (TEK) e Conhecimento Tradicional do Fogo (TFK)**

O conhecimento tradicional do fogo (*Traditional Fire Knowledge — TFK*) insere-se como uma vertente do conhecimento ecológico tradicional (*Traditional Ecological Knowledge — TEK*), definido como o conjunto acumulativo de saberes, práticas e crenças, transmitido de geração em geração através de processos culturais e adaptativos, sobre as relações entre os seres vivos - incluindo o ser humano - e o meio que o rodeia (Berkes et al., 2000). Embora o conceito de tradição seja complexo e muitas vezes utilizado com conotações redutoras ou valorativas, consolidou-se o uso do termo “conhecimento ecológico tradicional”, largamente apoiado pelas instâncias internacionais como a União internacional para a Conservação da Natureza (IUCN). Este tipo de conhecimento é sobretudo característico de sociedades com longa continuidade histórico-cultural, geralmente não-industriais ou com baixo desenvolvimento tecnológico, das quais muitas são indígenas ou rurais (Vázquez-Varela et al., 2022). No contexto europeu, o uso tradicional do fogo associa-se a práticas transmitidas intergeracionalmente que englobam atividades como a renovação de pastagens, controlo de pragas agrícolas, gestão cinegética, conservação da biodiversidade e realização de rituais culturais (Huffman, 2013; Williams, 2003). Estas práticas eram sustentadas por leitura fina da paisagem, considerando a fenologia, a humidade do solo, o estado da vegetação e épocas de reprodução e resultavam em fogos de baixa intensidade, executados como “cuidados” aplicados à terra. Nesse sentido, as comunidades rurais podem ser consideradas curandeiras do território, utilizando o fogo como instrumento de regeneração e equilíbrio ecológico.

Ao longo dos séculos, a transmissão do conhecimento tradicional sobre o fogo permitiu práticas sustentáveis de renovação das paisagens, otimizando a resiliência ecológica e o equilíbrio produtivo. Contudo, as profundas mudanças na ruralidade portuguesa no último século, em particular o abandono agrícola, o despovoamento e a perda de práticas tradicionais, conduziram a uma redução significativa do uso regular do fogo, acumulando combustível e alterando a estrutura da paisagem (Meira Castro et al., 2020; Oliveira et al., 2023a). Esta perda do conhecimento tradicional resultou em maior severidade dos atuais incêndios, evidenciando os riscos associados à homogeneização dos territórios e à rutura do modelo tradicional de mosaico.



## O fogo na gestão da paisagem: desafios atuais e futuros

Nas últimas décadas, a transformação das paisagens portuguesas e europeias resultou na fragmentação e abandono dos campos, desmantelando um sistema ancestral onde o fogo era uma ferramenta transversal na gestão equilibrada de recursos (Vázquez-Varela et al., 2022). Estas dinâmicas remetem para a conjugação de alterações climáticas e modificação do uso do solo, agravando a intensidade das épocas de incêndios, com destaque para os de comportamento extremo e crescente impacto socioeconómico (Castellnou et al., 2019; Tedim et al., 2028). A literatura indica que episódios como os de 2017 ou de 2025, poderão tornar-se recorrentes, degradando serviços ecossistémicos e colocando em risco a sustentabilidade dos territórios, se não forem adotadas medidas de mitigação eficazes (Rodrigues et al., 2023; Sayedi et al., 2024).

No noroeste ibérico, o uso atual do fogo está desligado do conhecimento tradicional e limita-se a queimas de restos agrícolas, configurando um fogo disfuncional e sem racionalidade ecológica (Meira Castro et al., 2020). As práticas tradicionais de fogo, antes integradas em sistemas socioecológicos sustentáveis, foram progressivamente desvalorizadas e sujeitas a restrições legais e estigma social, situação semelhante à vivida por comunidades indígenas na América e na Austrália (Domínguez & Luoma, 2020; Hoffman et al., 2022; Oliveira et al., 2023d). No Alto Minho, estudos recentes demonstram que os fogos de baixa intensidade realizados fora da época (Figura. 2), ligados ao pastoreio e à gestão de fauna, são essenciais para manter paisagens em mosaico e habitats de elevado valor ecológico (Oliveira & Fernandes, 2023b; Oliveira et al, 2023c). Contudo, a legislação transforma estes fogos em “proscritos”, aumentando o risco de incêndios florestais severos quando não são geridos corretamente.

Eliminar o fogo do mosaico rural é contraproducente; a exclusão total contribui para incêndios catastróficos, enquanto os usos tradicionais, muitas vezes seletivos e de baixa intensidade, promovem descontinuidades e resiliência ecológica. Recuperar e adaptar o conhecimento tradicional do fogo, integrando saber local em políticas, educação e práticas reguladas é fundamental para a sustentabilidade e renovação das paisagens (Williams, 2003; Pyne & Goldammer, 1997). A comunidade rural deve ser envolvida como aliada estratégica em planos de gestão do fogo, combinando enquadramento legal adaptado, formação técnica e apoio preventivo focado nos setores mais vulneráveis.

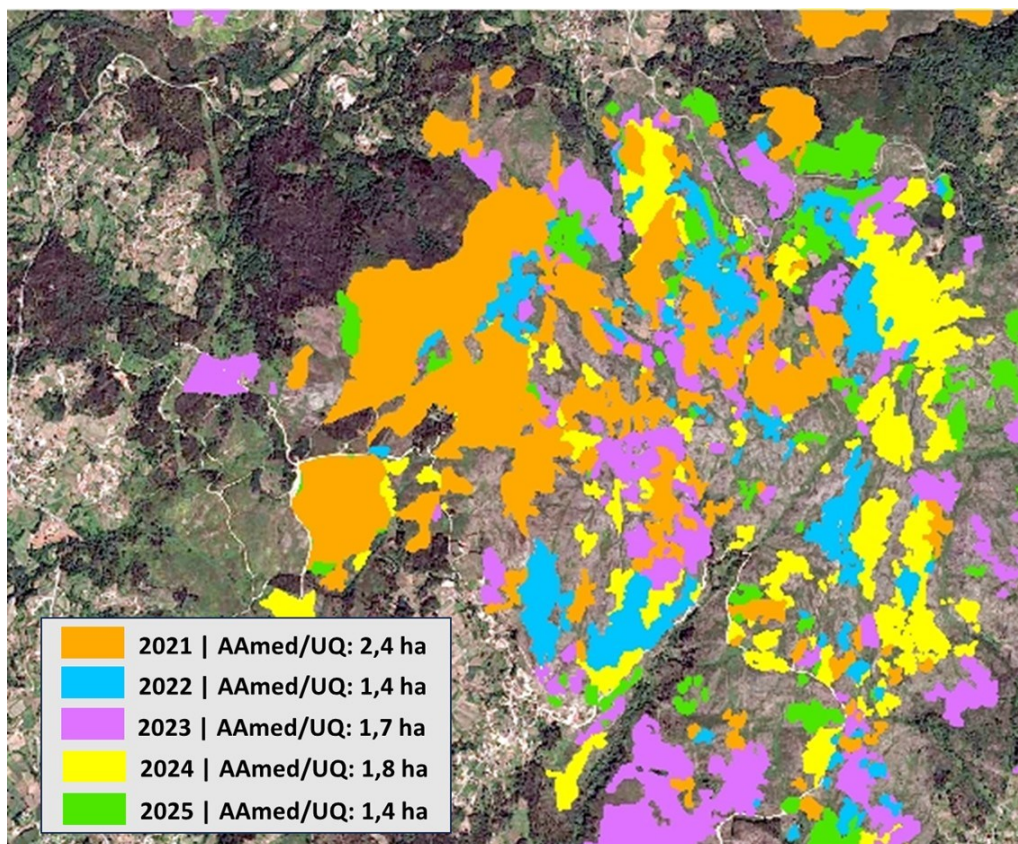


Figura 2. Distribuição das queimas de outono à primavera (sem intervenção de equipas de extinção) no período de 2021 a 2025. Fonte: trabalho do autor

### Qual o fogo que queremos na gestão da nossa paisagem

O Conhecimento Tradicional Ecológico (CTE) inclui variáveis essenciais como a leitura da paisagem, fenologia da vegetação, comportamento animal e estado do solo, que fundamentam a decisão sobre onde e quando realizar as queimadas. Este conhecimento sobrevive em áreas como o Alto Minho, onde se observam pequenas queimadas dispersas, conduzidas sem intervenções dos meios de extinção e fortemente autorreguladas pelas comunidades locais. Tal cultura de autorregulação revela a importância do envolvimento dos utilizadores tradicionais no controlo e planeamento do fogo, garantindo práticas ancestrais de baixo impacto e elevada eficácia ecológica (Huffman, 2013; Williams, 2003).

O presente trabalho distingue claramente dois regimes de uso do fogo (Quadro 1): as queimas tradicionais e as queimas institucionais. As queimas tradicionais têm como objetivo primordial a regeneração, a gestão dos recursos naturais e o cuidado da paisagem, sendo caracterizadas por pequenas manchas queimadas, baixa intensidade, velocidades de propagação lentas e impacto reduzido na flora e fauna, permitindo a preservação do solo e a fuga da fauna local. A recuperação ecológica nestes casos ocorre em semanas, com emissões de carbono significativamente inferiores e criação de descontinuidades funcionais no combustível, garantindo a manutenção da paisagem mosaico. Pelo contrário, as queimadas prescritas institucionais centram-se na redução rápida de combustível com fins de prevenção de incêndios, em áreas geralmente superiores a um hectare, operando com intensidades moderadas a elevadas e velocidade de propagação moderada a alta. Estas queimas, focadas essencialmente na gestão de grandes áreas, podem provocar efeitos adversos como destruição do banco de sementes, maior mortalidade da fauna e proliferação de espécies invasoras, com recuperação ecológica prolongada, contribuindo à homogeneização da paisagem (Bowman et al., 2011; Pyne & Goldammer, 1997).



Quadro 1. Tabela Comparativa: Queimas Tradicionais vs Queimas Institucionais. Fonte: trabalho do autor

<b>Critério</b>	<b>Queimas Tradicionais</b>	<b>Queimas Institucionais (Prescritas / DFCD)</b>
<b>Objetivo</b>	Regeneração e cuidado da paisagem	Redução de combustível
<b>Dimensão</b>	Manchas pequenas	> 1 ha
<b>Calendário</b>	Definido pela observação local	Segundo a carga de combustível
<b>Velocidade</b>	Lenta	Moderada a rápida
<b>Temperatura</b>	Baixa	Alta / Muito Alta
<b>Altura da chama</b>	Até ao joelho	> 1,5 m
<b>Propagação</b>	Controlada	Controlada (com risco de piroescape)
<b>Frequência</b>	Várias vezes por ano	A cada 5 anos ou nunca
<b>Plantas</b>	Herbáceas e pastagens autóctones	Matos, risco de invasoras
<b>Troncos / habitat</b>	Não ardem (mantêm habitat)	Reduzidos a cinzas
<b>Carbono</b>	Menor emissão, maior retenção	Maior emissão, menor retenção
<b>Esforço</b>	Muito elevado	Elevado
<b>Flora</b>	Dano parcial	Queima total da vegetação
<b>Fauna</b>	Tempo para fugir	Pode ser mortal
<b>Solo</b>	Sementes e nutrientes intactos	Nutrientes destruídos
<b>Atmosfera</b>	Fumo ligeiro	Fumo intenso
<b>Clima</b>	Menor efeito de estufa	Elevadas emissões de GEE
<b>Recuperação</b>	Semanas	Meses ou anos

A investigação evidencia que o fogo prescrito institucional pode ser significativamente beneficiado pela integração de metodologias tradicionais, originando práticas híbridas que promovem maior sustentabilidade e adaptabilidade às múltiplas funções dos territórios. Os trabalhos realizados entre 2023 e 2025 pelo Laboratório Rural do Município de Paredes de Coura demonstram que a incorporação do Conhecimento Tradicional Ecológico (CTE) no planeamento técnico dos fogos prescritos permite reduzir a severidade destes incêndios, favorecer a regeneração natural dos ecossistemas e potenciar a biodiversidade. Estas práticas híbridas incluem técnicas tradicionais como queimas de margem, mosaico, manchas e “mata-a-mata”, cada uma orientada para fins específicos que vão desde a gestão de combustível, criação e conservação de habitats, controlo de espécies invasoras até à manutenção extensiva de pastagens. Esta abordagem combinada revela-se fundamental para o equilíbrio ecológico e a sustentabilidade das paisagens e sistemas agrossilvopastoris.

## Conclusão

A gestão do fogo deve ser repensada para incorporar o conhecimento tradicional, essencial para práticas sustentáveis e responsáveis. Proibir o uso tradicional sem alternativas promove incêndios descontrolados e mais severos, agravando riscos ambientais e sociais. Envolver as comunidades rurais com formação, apoio e enquadramento legal é fundamental para conservar as paisagens, reforçar a resiliência climática e reduzir o impacto dos incêndios florestais.

A introdução do conhecimento tradicional no uso do fogo permite aliar saberes ancestrais a técnicas modernas, garantindo uma gestão mais eficaz e ecológica. Iniciativas como a NODFYR, criada em 2024 em Portugal, exemplificam este caminho ao empoderar comunidades locais para uma gestão integrada dos habitats, preservando a biodiversidade e os solos.

Em suma, revalorizar o conhecimento tradicional do fogo é estratégico para restaurar a funcionalidade dos territórios, criar paisagens resilientes e promover a sustentabilidade dos sistemas agroecológicos, tornando o fogo uma ferramenta adaptativa crucial frente às alterações climáticas.



## REFERÊNCIAS

- Armatas, C. A., Venn, T. J., McBride, B. B., Watson, A. E., & Carver, S. J. (2016). Opportunities to utilize traditional phenological knowledge to support adaptive management of social-ecological systems vulnerable to changes in climate and fire regimes. *Ecology and Society*, 21(1). <https://doi.org/10.5751/ES-07905-210116>
- Berkes, F., Colding, J., & Folke, C. (2000). Rediscovery of traditional ecological knowledge as adaptive management. *Ecological Applications*, 10(5), 1251–1262. <https://doi.org/10.2307/2641280>
- Bowman, D. M. J. S., Balch, J. K., Artaxo, P., Bond, W. J., Carlson, J. M., Cochrane, M. A., D'Antonio, C. M., DeFries, R. S., Doyle, J. C., Harrison, S. P., Johnston, F. H., Keeley, J. E., Krawchuk, M. A., Kull, C. A., Marston, J. B., Moritz, M. A., Prentice, I. C., Roos, C. I., Scott, A. C., & Pyne, S. J. (2009). Fire in the Earth system. *Science*, 324, 481–484. <https://www.sciencemag.org>
- Bowman, D. M. J. S., Balch, J., Artaxo, P., Bond, W. J., Cochrane, M. A., D'Antonio, C. M., DeFries, R., Johnston, F. H., Keeley, J. E., Krawchuk, M. A., Kull, C. A., Mack, M., Moritz, M. A., Pyne, S., Roos, C. I., Scott, A. C., Sodhi, N. S., & Swetnam, T. W. (2011). The human dimension of fire regimes on Earth. *Journal of Biogeography*, 38(12), 2223–2236. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2011.02595.x>
- Castellnou, M., Prat-Guitart, N., Arilla, E., et al. (2019). Empowering strategic decision-making for wildfire management: Avoiding the fear trap and creating a resilient landscape. *Fire Ecology*, 15(31). <https://doi.org/10.1186/s42408-019-0048-6>
- Díaz-Fierros, F. (2019). Forest fires in Galicia and Portugal: An historical overview. *Territorium: Revista Portuguesa de Riscos, Prevenção e Segurança*, 26(1), 97–114. [https://doi.org/10.14195/1647-7723\\_26-1\\_7](https://doi.org/10.14195/1647-7723_26-1_7)
- Domínguez, L., & Luoma, C. (2020). Decolonising conservation policy: How colonial land and conservation ideologies persist and perpetuate Indigenous injustices at the expense of the environment. *Land*, 9(3), 65. <https://doi.org/10.3390/land9030065>
- Fábregas Valcarce, R., & Otero, J. S. (1999). El proceso de neolitización en Galicia. *Saguntum*, (Extra 2), 541–548. <http://hdl.handle.net/10347/24607>
- Fábregas Valcarce, R. (1988). Cronología y periodización del megalitismo en Galicia y Portugal. *Espacio, Tiempo y Forma. Serie I, Prehistoria*, 1, 279–291.
- Ganteaume, A., Camia, A., Jappiot, M., San-Miguel-Ayanz, J., Long-Fournel, M., & Lampin, C. (2013). A review of the main driving factors of forest fire ignition over Europe. *Environmental Management*, 51(3), 651–662. <https://doi.org/10.1007/s00267-012-9961-z>
- Hoffman, K. M., Christianson, A. C., Dickson-Hoyle, S., Copes-Gerbitz, K., Nikoulakis, W., Diabo, D. A., McLeod, R., Michell, H. J., Al Mamun, A., Zahara, A., Mauro, N., Gilchrist, J., Ross, R. M., & Daniels, L. D. (2022). The right to burn: Barriers and opportunities for Indigenous-led fire stewardship in Canada. *FACETS*, 7, 464–481. <https://doi.org/10.1139/facets-2021-0062>
- Huffman, M. R. (2013). The many elements of traditional fire knowledge: Synthesis, classification, and aids to cross-cultural problem-solving in fire dependent systems around the world. *Ecology and Society*, 18(4). <https://doi.org/10.5751/ES-05843-180403>
- Jorge, S. O. (2000). Domestication of the land: The first agricultural communities in Portugal. *Journal of Iberian Archaeology*, 2, 43–98.
- Macdonald, K. (2018). Fire-free hominin strategies for coping with cool winter temperatures in north-western Europe from before 800,000 to circa 400,000 years ago. *PaleoAnthropology*, 16, 7–26. <https://doi.org/10.4207/PA.2018.ART109>
- Meira Castro, A. C., Nunes, A., Sousa, A., & Lourenço, L. (2020). Mapping the causes of forest fires in Portugal by clustering analysis. *Geosciences*, 10(2). <https://doi.org/10.3390/geosciences10020053>
- Nodfy. (2024). Taking care of fire in Europe — Manifesto. <https://www.afpe-nodfyportugal.org/manifesto>
- Oliveira, E., Colaço, M. C., Fernandes, P. M., & Sequeira, A. C. (2023a). Remains of traditional fire use in Portugal: A historical analysis. *Trees, Forests and People*, 14, 100458. <https://doi.org/10.1016/j.tfp.2023.100458>
- Oliveira, E., Fernandes, P. M. (2023b). Pastoral burning and its contribution to the fire regime of Alto Minho, Portugal. *Fire*, 6(5), 210. <https://doi.org/10.3390/fire6050210>
- Oliveira, E., Fernandes, P. M., Barros, D., & Guiomar, N. (2023c). Unraveling the effect of fire seasonality on fire-preferred fuel types and dynamics in Alto Minho (2000–2018). *Fire*, 6(7), 267. <https://doi.org/10.3390/fire6070267>



- Oliveira, E., Sequeira, A. C., Fernandes, P. M., & Colaço, M. C. (2023d). The use of vegetation fire in Portugal: Historical legislative and normative analysis. *Environment and History*, 31(1). <https://doi.org/10.3828/whp.eh.63835725711833>
- Pereira, J. M. C., Carreiras, J., Silva, J. M. N., & Vasconcelos, M. J. P. (2006). Alguns conceitos básicos sobre os fogos rurais em Portugal. In J. S. Pereira et al. (Eds.), *Incêndios florestais em Portugal: Caracterização, impactes e prevenção* (pp. 133–158). ISA Press.
- Pyne, S. J., & Goldammer, J. G. (1997). The culture of fire: An introduction to anthropogenic fire history. In J. S. Clark et al. (Eds.), *Sediment records of biomass burning and global change* (Vol. 51, pp. 71–114). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-59171-6\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-642-59171-6_5)
- Pyne, S. J. (2006). Fogo no jardim: Compreensão do contexto dos incêndios em Portugal. In J. S. Pereira et al. (Eds.), *Incêndios florestais em Portugal: Caracterização, impactes e prevenção* (pp. 115–131). ISA Press.
- Rodrigues, M., Cunill Camprubí, A., Balaguer-Romano, R., et al. (2023). Drivers and implications of the extreme 2022 wildfire season in Southwest Europe. *Science of the Total Environment*, 859, 160320. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160320>
- Roebroeks, W., & Villa, P. (2011). On the earliest evidence for habitual use of fire in Europe. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108, 5209–5214. <https://doi.org/10.1073/pnas.1018116108>
- Sanches, M. de J. (2003). Sobre a ocupação do Neolítico inicial no Norte de Portugal. In *Muita gente, poucas antas? Origens, espaços e contextos do megalitismo* (pp. 155–179). <https://hdl.handle.net/10216/111573>
- Sayed, S. S., Abbott, B. W., Vannière, B., et al. (2024). Assessing changes in global fire regimes. *Fire Ecology*, 20, 18. <https://doi.org/10.1186/s42408-023-00237-9>
- Shimelmitz, R., Kuhn, S. L., Jelinek, A. J., Ronen, A., Clark, A. E., & Weinstein-Evron, M. (2014). “Fire at will”: The emergence of habitual fire use 350,000 years ago. *Journal of Human Evolution*, 77, 196–203. <https://doi.org/10.1016/j.jhevol.2014.07.005>
- Smil, V. (2004). World History and Energy. *Encyclopedia of Energy*, 6, 549–561.
- Tedim, F., Leone, V., Amraoui, M., et al. (2018). Defining extreme wildfire events: Difficulties, challenges, and impacts. *Fire*, 1(1), 9. <https://doi.org/10.3390/fire1010009>
- Vázquez-Varela, C., Martínez-Navarro, J. M., & Abad-González, L. (2022). Traditional fire knowledge: A thematic synthesis approach. *Fire*, 5(2), 47. <https://doi.org/10.3390/fire5020047>
- Vega, J. A., Arellano-Pérez, S., Fernández, C., Fontúrbel, T., & Ruiz, A. D. (2021). Os incendios florestais do cambio global xa están aquí. In F. Díaz-Fierros Viqueira (Coord.), *Unha nova xeración de lumes? Actas do Coloquio Galaico-Portugués sobre Incendios Forestais*. <https://doi.org/10.17075/unxl.2021.002>
- Williams, G. (2003). References on the American Indian use of fire in ecosystems.



## A INTERFACE URBANO-FLORESTAL EM PORTUGAL



**Luís Mário Ribeiro** §  
Investigador Sénior  
CEIF/ADAI,  
Universidade de  
Coimbra, Portugal

### RESUMO ALARGADO

O problema dos incêndios florestais na Interface Urbano Florestal (IUF) é crescente, não só em Portugal, mas nas várias regiões do Planeta onde os fogos tendem a coexistir, com uma severidade cada vez maior, com a presença humana em habitações ou aglomerados urbanos, com diferentes graus de dispersão (Ribeiro, 2016).

Com mais ou menos variações, é comum aceitar que a IUF é o espaço onde a vegetação, as estruturas e (normalmente) as pessoas coexistem num ambiente propício à ocorrência de incêndios (e.g. Stewart *et al.*, 2007; BRP, 2008; Ribeiro *et al.*, 2020a; Maranghides *et al.*, 2022). Em Portugal, esta definição é aplicável a uma grande extensão do território, uma vez que a continuidade do espaço natural não tem dimensão tal que não se encontre uma qualquer estrutura humana a cada poucos quilómetros.

A forma como vegetação e estruturas se encontram no espaço pode variar e podem ser adotadas diferentes terminologias. Usualmente consideram-se três categorias distintas, conforme amplamente estabelecido na literatura especializada (e.g. Federal Register, 2001; Stewart *et al.*, 2003; Haight *et al.*, 2004; Mell *et al.*, 2010; Ribeiro *et al.*, 2020a):

1. **Interface simples:** caracteriza-se por uma fronteira espacialmente bem definida entre a matriz urbana e o espaço rural ou florestal. Este tipo prevalece em contextos de desenvolvimento urbano de maior densidade (Johnston *et al.*, 2019).
2. **Intermix** (termo mais usado, podendo, no entanto, ser traduzido como “interface de fusão” (Ribeiro, 2016)): ocorre quando há estruturas misturadas na vegetação, sem fronteiras ou separações bem definidas.
3. **Interface oclusa:** Resulta da presença de uma área florestal delimitada e totalmente encapsulada no interior do tecido urbano.

Alguns autores subdividem ainda mais estas categorias de acordo com o principal uso do solo e a sua relação com o agrupamento de casas ou estruturas. Alguns exemplos destas abordagens são:

- Long-Fournel *et al.* (2013), dando importância à densidade das construções (ou das estruturas residenciais) e à estrutura horizontal da vegetação envolvente.

§ Autor correspondente – Univ Coimbra, ADAI, Departamento de Engenharia Mecânica, Rua Luís Reis Santos, Pólo II, 3030-788 Coimbra, Portugal; email: luis.mario@adai.pt <http://www.adai.pt/ceif>



- Ribeiro (2016), com uma abordagem mais detalhada, identificando casas isoladas, agregados populacionais (com diferentes dimensões) e áreas industriais. A classificação da IUF faz-se, neste caso, consoante a principal ocupação do espaço onde estas se inserem: floresta, zonas de mato ou mosaicos agroflorestais.

Portugal tem problemas de IUF distintos em diferentes partes do país. A análise de Ribeiro (2016) apresenta um mapa de risco na IUF para Portugal Continental que evidencia estas desigualdades, conforme se vê na Figura 3.

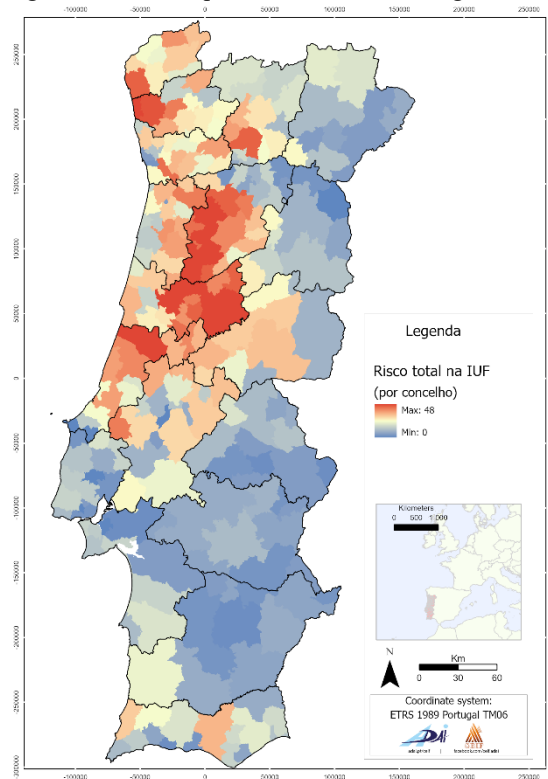


Figura 3. Risco na IUF, de acordo com a metodologia proposta por Ribeiro (2016)

De um modo geral, o estudo conclui que o problema da IUF em Portugal se manifesta principalmente no litoral norte e no centro. O Noroeste tem um elevado número de ignições, mas também uma densidade populacional elevada, o que aumenta o risco na IUF. Já no litoral Centro e em partes do Algarve, o principal fator que induz esse aumento é o edificado disperso nas zonas de montanha, em áreas frequentemente percorridas por incêndios. Por todo o país, em praticamente todos os centros urbanos e independentemente das suas dimensões, existem edifícios isolados ou pequenos grupos de edifícios fora dos respetivos perímetros. Estes espaços encontram-se misturados com a vegetação, em diferentes graus. Nos grandes centros urbanos estas situações acontecem com a proliferação de novos bairros ou urbanizações na periferia. Estas serão, porventura, as situações que merecem uma primeira abordagem na gestão do problema dos incêndios na interface. Nesta análise reconhece-se ainda que o grau de abandono dos campos agrícolas não é de fácil distinção com a aplicação desta metodologia. Esta ressalva é importante, pois a segurança das populações diminui inversamente com o grau de abandono. A proliferação de espécies herbáceas e de matos, onde outrora existiam campos cultivados, dilui a fronteira entre o espaço florestal e o espaço de ocupação humana.

Ainda que seja um trabalho de 2016, as tendências identificadas parecem manter-se atualmente. Mais recentemente, numa contribuição para um relatório publicado pelo Banco Mundial e pela Comissão Europeia (World Bank and European Commission, 2024), intitulado “*From Data to Decisions: Tools for Making Smart Investments in Prevention and Preparedness*”, o Centro de Estudos sobre Incêndios Florestais da ADAI (Universidade de Coimbra), do qual o autor faz parte, realizou uma análise custo-benefício para a extensão dos



programas Aldeias Seguras Pessoas Seguras (ANPC, 2018) a todo o país. Para esta finalidade, foi criado um índice simplificado que permitiu a elaboração de um mapa de prioridades, a nível das freguesias portuguesas, para a adoção de medidas de autoproteção das populações contra incêndios florestais, que se reproduz na Figura 4. Este índice é baseado em diferentes dados abertos, que incluem:

- Localização e Tipo de interface (DGT, 2023);
- Perigosidade estrutural de incêndio (ICNF, 2022)
- Censos (INE, 2021), a partir dos quais se criaram dois índices:
  - Índice de população, que procura refletir o número máximo de pessoas que podem estar presentes numa determinada área no seu pico de ocupação, normalmente o verão, dando assim uma ideia do possível aumento da população que está ausente durante o resto do ano.
  - Índice de habitação, que se concentra no número de casas sem ocupação permanente. As casas que não são residências principais são mais suscetíveis a danos, pois podem não estar ocupadas durante um incêndio e, conseqüentemente, podem não ter ninguém para defendê-las.
- Vulnerabilidade social (Santos et al., 2022; Santos et al., 2023).
- Indicadores de perigo de incêndio futuro com base em cenários climáticos (Copernicus Climate Change Service, 2020).

Os resultados complementam aqueles da Figura 3, evidenciando a necessidade das populações do interior Norte e Centro, bem como de parte do Algarve, aumentarem a sua capacidade de autoproteção em relação à chegada de eventuais incêndios florestais.

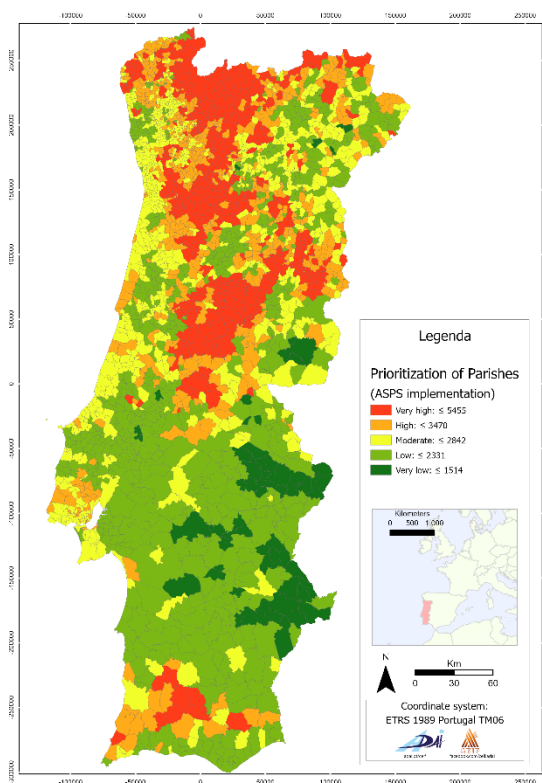


Figura 4. Priorização para adoção de medidas autoproteção (fonte: World Bank and European Commission, 2024)



Um aspeto muito importante, relacionado com a vulnerabilidade das habitações relativamente aos incêndios florestais, é a sua facilidade de ignição. A definição mais antiga que se conhece de IUF (Butler, 1974) acrescenta um aspeto importante relacionado com este aspeto, dizendo que “ (...) *Para que isto [a ignição] aconteça, o fogo florestal deve estar suficientemente perto para que as projeções de partículas incandescentes ou as chamas possam contactar com partes da estrutura*”. Esta definição introduz, desde a sua génese, a ideia de que não é necessário que o fogo principal atinja uma estrutura para que ela entre em ignição. Embora as estruturas possam incendiar-se devido a qualquer um dos três mecanismos de transferência de calor – condução (Restuccia, 2019), radiação (Hu & Delichatsios, 2019) e convecção (McAllister *et al.*, 2018) – são as partículas incandescentes (fagulhas), transportadas pelos fluxos de ar da frente do incêndio, que pode estar a centenas de metros ou mesmo a alguns quilómetros de distância (Manzello *et al.*, 2007; Cohen *et al.*, 2008; Maranghides & Mell, 2011; Manzello & Foote, 2014; Caton *et al.*, 2017; Babrauskas, 2018), que são responsáveis pela maioria das ignições em estruturas. Estas fagulhas depositam-se nos seus pontos vulneráveis, ou em combustíveis que lhes estão adjacentes (sejam naturais ou artificiais), provocando a ignição e por vezes destruição das mesmas (Cohen, 2000a, 2000b, 2008; Leonard & Bianchi, 2005; Leonard *et al.*, 2009; Maranghides *et al.*, 2015; Westhaver, 2017; Ribeiro *et al.*, 2020). Quando o combustível principal do incêndio passa de vegetação natural para as estruturas podemos estar na presença de um processo que leva a uma sequência de desastre na IUF, conforme definido por Cohen (2008). É inquestionável que a importância do tema da IUF, nomeadamente o risco relacionado com incêndios florestais, tem vindo a aumentar em todo o mundo. Uma das razões é o facto de a própria IUF se ter expandido ao longo dos anos (Radeloff *et al.*, 2018), à medida que os aglomerados urbanos crescem e entram em áreas de floresta ou mato, expondo cada vez mais as pessoas ao perigo. Existem inúmeros eventos que demonstram isso (Ribeiro *et al.*, 2020b), alguns deles muito recentes. Por exemplo, os incêndios florestais de 2017 em Portugal, seja em Pedrógão Grande, em junho (Viegas *et al.*, 2017), ou na região central de Portugal, em outubro (Viegas *et al.*, 2019), os eventos em Mati, em 2018, na Grécia (Efthimiou *et al.*, 2020) e, mais recentemente, o desastre de Maui, em 2023 no Havaí (Marris, 2023) ou o de janeiro de 2025 em Los Angeles (Horton *et al.*, 2025), ambos nos Estados Unidos. Foi precisamente no complexo de incêndios de Pedrógão Grande que foi possível, pela primeira vez em Portugal e um dos raros exemplos a nível mundial, realizar uma análise intensiva do impacto do fogo nas estruturas, incluindo os mecanismos de ignição, a caracterização das estruturas e da sua envolvente, bem como a identificação das vulnerabilidades do parque habitacional (Ribeiro *et al.*, 2020). Os autores, com base num exaustivo trabalho de campo, investigaram todas as estruturas danificadas ou destruídas pelo complexo de incêndios que foi possível identificar, num total de 1043. Esta investigação estabeleceu que a principal causa de ignição foi a deposição de fagulhas, e que os telhados foram o ponto de entrada mais vulnerável em mais de 60% dos casos. Os resultados evidenciam que a manutenção precária das estruturas e a gestão ineficaz da vegetação circundante contribuíram significativamente para os danos. Contudo, os autores concluem, ainda assim, que as casas em Portugal podem servir de bom refúgio, desde que estejam em boas condições e com a sua envolvente bem gerida.

Esta envolvente das estruturas, mais concretamente das habitações, pode desempenhar um papel decisivo na sua própria sobrevivência, na eventualidade de ocorrência de um incêndio florestal na proximidade. Ela pode conter não só combustíveis florestais (e.g. Ribeiro *et al.*, 2021; Almeida, M (Ed) 2024; Muñoz *et al.*, 2025), cuja gestão em muitas circunstâncias é definida por lei (Decreto-Lei n.º 82/2021, 2021), como também combustíveis antropogénicos, ou artificiais, que muitas vezes amplificam o problema (e.g. Westhaver, 2017; Àgueda *et al.*, 2023; Barbosa *et al.*, 2023).

Almeida (2024), no livro “A Gestão do risco de incêndio rural em edifícios de habitação” (Almeida, M. (Ed) 2024), reporta-se a um trabalho, com génese num projeto financiado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia, intitulado House Refuge (Ref. PCIF/AGT/0109/2018, [www.adai.pt/houserefuge](http://www.adai.pt/houserefuge)), no qual se caracteriza, com detalhe, o espaço envolvente aos edifícios nas zonas rurais de Portugal. Esta caracterização do risco de incêndio rural, ou florestal, em torno de edifícios em Portugal Continental permite detalhar a vulnerabilidade do parque habitacional nas zonas rurais. Ela aborda a gestão do risco de incêndio, observando que o cumprimento da legislação relativa à criação de Faixas de Gestão de Combustíveis (FGC) é inconsistente, apesar das diretrizes existentes. Uma análise de 2.000 construções avaliou a perigosidade com base na distância, no tipo e no arranjo da vegetação, concluindo que a vegetação arbórea e arbustiva é a principal facilitadora da propagação do fogo para as casas, resultando numa classe de perigosidade em média "Alta".



Este estudo é complementado no capítulo seguinte do mesmo livro por um outro que analisa o parque habitacional e envolvente imediata (inferior a 2m) focando-se na caracterização dos edifícios e tendências de construção em áreas rurais de Portugal que são mais suscetíveis a incêndios florestais (Calmeiro *et al.*, 2024). Um dos focos dos autores é a importância de compreender as técnicas construtivas rurais e o estado das habitações, a fim de garantir a segurança dos residentes e a proteção das estruturas. A análise detalha a tipologia de uso (primeira ou segunda habitação), o estado de conservação e a vulnerabilidade de elementos construtivos, como telhados, fachadas, portas e janelas, à propagação do fogo. Além disso, aborda a importância da autoproteção das habitações, incluindo a posse de meios de extinção (por exemplo mangueiras e motobombas) e a autonomia em água e energia, alertando para as vulnerabilidades existentes face à falta de eletricidade durante ocorrências de incêndio.

Para concluir, é seguro dizer que Portugal tem zonas de IUF expostas a incêndios de modo quase generalizado, embora a diferentes escalas e com graus de perigosidade distintos.

A implementação de medidas de mitigação, como a manutenção do espaço envolvente das habitações, sobretudo a mais próxima, aliada ao uso de elementos construtivos que ofereçam resistência ao fogo e à entrada de fagulhas, pode diminuir a perigosidade e os impactos de um eventual incêndio florestal que se aproxime.

A proteção de pessoas e bens na IUF, face a incêndios florestais, será sempre prioritária em todas as fases da gestão de incêndios, mas a diminuição da vulnerabilidade das estruturas e a gestão de combustíveis na sua envolvente são igualmente cruciais. Neste contexto, é fundamental salientar a necessidade de melhorar as estratégias de autoproteção e capacitar a população para mitigar os riscos de incêndios rurais, pois os recursos de combate nunca serão suficientes para proteger tudo e todos.

**PALAVRAS-CHAVE:** incêndios florestais; gestão de combustíveis na IUF; impacto do fogo na IUF; ignição de estruturas; autoproteção.

## REFERÊNCIAS

- Àgueda, A., Vacca, P., Planas, E., & Pastor, E. (2023). Evaluating wildfire vulnerability of Mediterranean dwellings using fuzzy logic applied to expert judgement. *International Journal of Wildland Fire*, 32(6), 1011–1029. <https://doi.org/10.1071/WF22134>
- Almeida, M. (Ed.). (2024a). *A gestão do risco de incêndio rural em edifícios de habitação*. Imprensa da Universidade de Coimbra. <https://doi.org/10.14195/978-989-26-2592-8>
- Almeida, M. (2024b). Caracterização do espaço envolvente aos edifícios nas zonas rurais em Portugal. In M. Almeida (Ed.), *A Gestão do risco de incêndio rural em edifícios de habitação*. Imprensa da Universidade de Coimbra. <https://doi.org/https://doi.org/10.14195/978-989-26-2592-8>
- ANPC. (2018). *Aldeia Segura, Pessoas Seguras – Guia de Apoio à Implementação Edição*. Autoridade Nacional de Proteção Civil. <http://www.prociv.pt/bk/EDICOES/OUTRASEDICOES/Documents/Guia de Apoio a Implementacao Web.pdf>
- Babrauskas, V. (2020). Firebrands and Embers. *Encyclopedia of Wildfires and Wildland-Urban Interface (WUI) Fires*, 1–14. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-52090-2\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-319-52090-2_3)
- Barbosa, T. F., Reis, L., Raposo, J., Rodrigues, T., & Viegas, D. X. (2023). LPG stored at the wildland–urban interface: recent events and the effects of jet fires and BLEVE. *International Journal of Wildland Fire*, 1–15. <https://doi.org/10.1071/WF22084>
- BRP. (2008). *The Blue Ribbon Panel on Wildland/Urban Interface Fire*. Blue Ribbon Panel. International Code Council (ICC), USA.
- Butler, C. P. (1974). The urban/wildland fire interface. *Proceedings of Western States Section/ Combustion Institute Papers, Vol. 74, No. 15. May 6-7*.
- Calmeiro, C., Almeida, M., & Ribeiro, L. M. (2024). Caracterização do edificado e tendências de construção em Portugal. In M. Almeida (Ed.), *A Gestão do risco de incêndio rural em edifícios de habitação*. Imprensa da Universidade de Coimbra. <https://doi.org/https://doi.org/10.14195/978-989-26-2592-8>
- Caton, S. E., Hakes, R. S. P., Gorham, D. J., Zhou, A., & Gollner, M. J. (2017). Review of Pathways for Building Fire Spread in the Wildland Urban Interface Part I: Exposure Conditions. *Fire Technology*, 53(2), 429–473.



- <https://doi.org/10.1007/s10694-016-0589-z>
- Cohen, J. D. (2000a). *Examination of the Home Destruction in Los Alamos Associated with the Cerro Grande Fire*. 1–6. <https://doi.org/http://www.treesearch.fs.fed.us/pubs/4686>
- Cohen, J. D. (2000b). Preventing disaster: Home ignitability in the wildland-urban interface. *Journal of Forestry*, 98(3), 15–21. <https://doi.org/10.1093/jof/98.3.15>
- Cohen, J. D. (2008). The wildland-urban interface fire problem: a consequence of the fire exclusion paradigm. *Forest History Today*, 2008(Fall), 20–26.
- Cohen, J. D., & Stratton, R. D. (2008). *Home Destruction Examination Grass Valley Fire* (Issue June). <https://doi.org/http://www.treesearch.fs.fed.us/pubs/31544>
- Copernicus Climate Change Service, C. D. S. (2020). *Fire danger indicators for Europe from 1970 to 2098 derived from climate projection*. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). <https://doi.org/10.24381/cds.ca755de7>
- Decreto-Lei n.º 82/2021. (2021). *Presidência do Conselho de Ministros de 13 de outubro*. Diário da República n.º 199/2021, Série I de 2021-10-13. <https://diariodarepublica.pt/dr/detalhe/decreto-lei/82-2021-172745163>
- DGT. (2023). *Carta de áreas edificadas e cartas de interfaces de áreas edificadas*. Relatório Técnico. Direção-Geral do Território. [https://geo2.dgterritorio.gov.pt/info/CartografiaAreasEdificadas2021\\_DGT\\_POSEUR\\_Visualizador\\_junho2022.pdf](https://geo2.dgterritorio.gov.pt/info/CartografiaAreasEdificadas2021_DGT_POSEUR_Visualizador_junho2022.pdf)
- Federal Register. (2001). *Urban Wildland Interface Communities Within the Vicinity of Federal Lands That Are at High Risk From Wildfire*. Federal Register Notes, vol. 66, no. 3. <https://federalregister.gov/a/01-52>
- Haight, R. G., Cleland, D. T., Hammer, R. B., Radeloff, V. C., & Rupp, T. S. (2004). Assessing fire risk in the wildland-urban interface. *Journal of Forestry*, 102(7), 41–47. <https://doi.org/10.1093/jof/102.7.41>
- Horton, M., Sedgwick, S. M., Adams, J., Wei, D., & Skyberg, M. (2025). *Impact of 2025 Los Angeles Wildfires and Comparative Study*. Los Angeles County Economic Development Corporation. <https://laedc.org/wp-content/uploads/2025/02/LAEDC-2025-LA-Wildfires-Study.pdf>
- Hu, L., & Delichatsios, M. (2019). Thermal Radiation. *Encyclopedia of Wildfires and Wildland-Urban Interface (WUI) Fires*, 1–8. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-51727-8\\_78-1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-51727-8_78-1)
- ICNF. (2022). *Carta de perigosidade de incêndio rural (carta estrutural 2020-2030)*. <https://sig.icnf.pt/portal/sharing/rest/content/items/65e7a435415e467b82f84b0640205409/info/metadata/metadata.xml?format=default&output=html>
- INE. (2021). *Censos 2021, Resultados Preliminares*. 1–12. file:///C:/Users/Maria J. Conde/Downloads/28Censos2021\_preliminares\_28julho.pdf
- Johnston, L., Bianchi, R., & Jappiot, M. (2019). Wildland-Urban Interface. In *Encyclopedia of Wildfires and Wildland-Urban Interface (WUI) Fires* (Vol. 2017, pp. 1–13). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-51727-8\\_130-1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-51727-8_130-1)
- Leonard, J., & Bianchi, R. (2005). *Investigation of bushfire attack mechanisms involved in house loss in the ACT bushfire 2003*.
- Leonard, J., Bianchi, R., Lipkin, F., Newnham, G., Siggins, A., Opie, K., Culvenor, D., Cechet, B., Corby, N., Thomas, C., Habili, N., Jakab, M., Coghlan, R., Lorenzin, G., Campbell, D., & Barwick, M. (2009). *Building and land-use planning research after the 7th February 2009 Victorian bushfires*. Bushfire CRC.
- Long-Fournel, M., Morge, D., Bouillon, C., & Jappiot, M. (2013). La cartographie des interfaces habitat-forêt: un outil de diagnostic territorial dans la prévention du risque d'incendie de forêt dans le Sud de la France. *Sciences Eaux and Territoires : La Revue Du IRSTEA, IRSTEA*, 2013, 8 p. <hal-00824644>.
- Manzello, S. L., & Foote, E. I. D. (2014). Characterizing Firebrand Exposure from Wildland-Urban Interface (WUI) Fires: Results from the 2007 Angora Fire. *Fire Technology*, 50(1), 105–124. <https://doi.org/10.1007/s10694-012-0295-4>
- Manzello, S. L., Shields, J. R., Yang, J. C., Hayashi, Y., & Nii, D. (2007). On the use of a firebrand generator to investigate the ignition of structures in wildland-urban interface (WUI) fires. *Eleventh International Fire Science and Engineering Conference (INTERFLAM)*.
- Maranghides, A., Link, E. D., Hawks, S., McDougald, J., Quarles, S. L., Gorham, D. J., & Nazare, S. (2022). *WUI structure/parcel/community fire hazard mitigation methodology*. <https://doi.org/10.6028/NIST.TN.2205>
- Maranghides, A., McNamara, D., Vihnanek, R., Restaino, J., & Leland, C. (2015). A Case Study of a Community Affected by the Waldo Fire – Event Timeline and Defensive Actions. *NIST Technical Note 1910*.



- <https://doi.org/10.6028/NIST.TN.1910>
- Maranghides, A., & Mell, W. (2011). A Case Study of a Community Affected by the Witch and Guejito Wildland Fires. *Fire Technology*, 47(2), 379–420. <https://doi.org/10.1007/s10694-010-0164-y>
- Marris, E. (2023). Hawaii wildfires: did scientists expect Maui to burn? *Nature*, 620(7975), 708–709. <https://doi.org/10.1038/d41586-023-02571-z>
- McAllister, S., Service, U. F., & Fire, R. M. (2018). Convection. In *Encyclopedia of Wildfires and Wildland-Urban Interface (WUI) Fires* (Issue 2, pp. 1–8). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-51727-8\\_1-1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-51727-8_1-1)
- Mell, W. E., Manzello, S. L., Maranghides, A., Butry, D., & Rehm, R. G. (2010). The wildland-urban interface fire problem - Current approaches and research needs. *International Journal of Wildland Fire*, 19(2), 238–251. <https://doi.org/10.1071/WF07131>
- Muñoz, J. A., Planas, E., Almeida, M., Ribeiro, L. M., Vacca, P., & Pastor, E. (2025). A New Full-Scale Method for Ranking Flammability of Ornamental Vegetation. *Fire and Materials*, 0, 1–12. <https://doi.org/10.1002/fam.3284>
- Radeloff, V. C., Helmers, D. P., Kramer, H. A., Mockrin, M. H., Alexandre, P. M., Bar-Massada, A., Butsic, V., Hawbaker, T. J., Martinuzzi, S., Syphard, A. D., & Stewart, S. I. (2018). Rapid growth of the US wildland-urban interface raises wildfire risk. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(13), 3314–3319. <https://doi.org/10.1073/pnas.1718850115>
- Restuccia, F. (2019). Conduction. In *Encyclopedia of Wildfires and Wildland-Urban Interface (WUI) Fires* (pp. 1–6). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-51727-8\\_224-1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-51727-8_224-1)
- Ribeiro, L. M. (2016). *Os incêndios na interface urbano-florestal em Portugal: uma análise de diagnóstico* [Dissertação para o obtenção do grau de Mestre em Dinâmicas sociais, riscos naturais e tecnológicos. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra]. [https://estudogeral.uc.pt/bitstream/10316/36976/1/2016\\_Risco\\_IUF\\_Ribeiro.pdf](https://estudogeral.uc.pt/bitstream/10316/36976/1/2016_Risco_IUF_Ribeiro.pdf)
- Ribeiro, L. M., Rodrigues, A., Lucas, D., & Viegas, D. X. (2020a). The Impact on Structures of the Pedrógão Grande Fire Complex in June 2017 (Portugal). *Fire*, 3(4), 57. <https://doi.org/10.3390/fire3040057>
- Ribeiro, L. M., Viegas, D. X., Almeida, M., Alves, D., Barbosa, T., & Modarres, M. (2021). *Planeamento da gestão de combustíveis: Efeito da distância e da frequência das limpezas na proteção das estruturas e rede viária*. ForestWISE (Coord.) - Projetos AGIF 2021 (P32100231). Vila Real, 160p. [https://www.agif.pt/app/uploads/2022/07/Relatório-Projeto-Distancia-e-frequencia-de-intervenções\\_FW\\_final\\_06072022.pdf](https://www.agif.pt/app/uploads/2022/07/Relatório-Projeto-Distancia-e-frequencia-de-intervenções_FW_final_06072022.pdf)
- Ribeiro, L. M., Viegas, D. X., Almeida, M., McGee, T. K., Pereira, M. G., Parente, J., Xanthopoulos, G., Leone, V., Delogu, G. M., & Hardin, H. (2020b). Extreme wildfires and disasters around the world: lessons to be learned. In F. Tedim, V. Leone, & T. McGee (Eds.), *Extreme Wildfire Events and Disasters* (pp. 31–51). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815721-3.00002-3>
- Santos, P. P., Pinheiro, S., & Trindade, J. (2023). 2021 Social Vulnerability Assessment at the Civil Parish Level in Mainland Portugal (1.0.0). [Data Set]. Zenodo. <https://doi.org/doi.org/10.5281/zenodo.8379359>
- Santos, P. P., Zêzere, J. L., Pereira, S., Rocha, J., & Tavares, A. O. (2022). A Novel Approach to Measuring Spatiotemporal Changes in Social Vulnerability at the Local Level in Portugal. *International Journal of Disaster Risk Science*, 13(6), 842–861. <https://doi.org/10.1007/S13753-022-00455-W/TABLES/7>
- Stewart, S. I., Radeloff, V. C., Hammer, R. B., & Hawbaker, T. J. (2007). Defining the Wildland – Urban Interface. *Journal of Forestry*, 105(June), 201–207. <https://doi.org/10.1093/jof/105.4.201>
- Stewart, S., Radeloff, V., & Hammer, R. (2003). Characteristics and location of the wildland–urban interface in the United States. *Proceedings of the “2nd International Wildland Fire Ecology and Fire Management Congress”*. Orlando, FL, 19 November.
- Viegas, D. X., Almeida, M. A., Ribeiro, L. M., Raposo, J., Viegas, M. T., Oliveira, R., Alves, D., Pinto, C., Rodrigues, A., Ribeiro, C., Lopes, S., Jorge, H., & Viegas, C. X. (2019). *Análise dos Incêndios Florestais Ocorridos a 15 de outubro de 2017*. Centro de Estudos sobre Incêndios Florestais (CEIF/ADAI/LAETA). Coimbra, Portugal. <https://www.portugal.gov.pt/pt/gc21/comunicacao/documento?i=analise-dos-incendios-florestais-ocorridos-a-15-de-outubro-de-2017>
- Viegas, D. X., Almeida, M., Ribeiro, L. M., Raposo, J., Viegas, M. T., Oliveira, R., Alves, D., Pinto, C., Jorge, H., Rodrigues, A., Lucas, D., Lopes, S., & Silva, L. F. (2017). *O complexo de incêndios de Pedrógão Grande e concelhos limítrofes, iniciado a 17 de junho de 2017*. Centro de Estudos sobre Incêndios Florestais (CEIF/ADAI/LAETA). Coimbra, Portugal. <https://www.portugal.gov.pt/pt/gc21/comunicacao/documento?i=o->



**9JORNINC-4JORPROCIV**

9<sup>th</sup> Jornadas de Segurança aos Incêndios Urbanos  
4<sup>th</sup> Jornadas de Proteção Civil

Coimbra, 7 de novembro de 2025

complexo-de-incendios-de-pedrogao-grande-e-concelhos-limitrofes-iniciado-a-17-de-junho-de-2017

Westhaver, A. (2017). Why some homes survived: Learning from the Fort McMurray wildland/urban interface fire disaster. In *ICLR research paper series* (Issue 56). Institute for Catastrophic Loss Reduction Research paper series (56). [https://www.iclr.org/images/Westhaver\\_Fort\\_McMurray\\_Final\\_2017.pdf](https://www.iclr.org/images/Westhaver_Fort_McMurray_Final_2017.pdf)

World Bank and European Commission. (2024). *From Data to Decisions: Tools for Making Smart Investments in Prevention and Preparedness*. <https://documents1.worldbank.org/curated/en/099050224072033005/pdf/P17907015a302401f1b7e51fc14ed9b73ef.pdf>



**9JORNINC-4JORPROCIV**

9<sup>ª</sup> Jornadas de Segurança aos Incêndios Urbanos  
4<sup>ª</sup> Jornadas de Proteção Civil

Coimbra, 7 de novembro de 2025

9<sup>AS</sup> JORNADAS DE SEGURANÇA AOS INCÊNDIOS  
URBANOS (9JORNINC)

4<sup>AS</sup> JORNADAS DE PROTEÇÃO CIVIL (4JORPROCIV)

ARTIGOS



**9JORNINC-4JORPROCIV**

9<sup>ª</sup> Jornadas de Segurança aos Incêndios Urbanos  
4<sup>ª</sup> Jornadas de Proteção Civil

Coimbra, 7 de novembro de 2025



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

**Paulo A. G. Piloto\*\***Professor  
IPB – Bragança  
GICoS**Renata G. L. Silva**Professor  
CEFET– MG**Giovanna Frizzera**Engineer  
CEFET– MG**Leonardo Torres**PhD student  
UA – Aveiro**Carlos Couto**Investigador  
UA – Aveiro  
CERIS-Aveiro**Paulo Vila Real**Professor  
UA – Aveiro  
CERIS-Aveiro**Luís M. R. Mesquita**Professor  
IPB – Bragança  
GICoS**Nuno Lopes**Professor  
UA – Aveiro  
CERIS-Aveiro

### ABSTRACT

This study presents the development and validation of advanced 3D numerical models to analyse the fire performance of non-load-bearing Light Steel Frame (LSF) partition walls under different fire scenarios, specifically the standard ISO 834 and HYDROCARBON fire. Medium-scale experimental fire resistance tests from prior research were used for validation, focusing on LSF walls with and without cavity insulation (external composite insulation). Three computational solution methods were compared and used to predict the fire behaviour of LSF walls with a void cavity. The finite element method was employed for transient thermal analysis with temperature-dependent material properties, including adaptations to simulate material degradation such as gypsum board cracking and rock wool melting under HYDROCARBON fire conditions. Hydrocarbon fires reduced fire resistance by an average of 57% compared to ISO 834 fires for cavity-insulated walls, whereas external insulation configurations showed less reduction.

**KEYWORDS:** Fire; Light Steel Frame; Partition Walls; Computational Models.

### 1. INTRODUCTION

The growing concern about fire safety in buildings is driven by recent accidents and their tragic consequences in terms of loss of lives and material damage. These accidents have heightened the importance of evaluating the fire performance of Light Steel Frame (LSF) walls.

Although regulations and simulations of the standard ISO 834 fire test are widely used to assess performance under fire conditions, there is a lack of information regarding other fire scenarios. HYDROCARBON fires, usually applied in facilities of oil, gas, and chemical complexes, can also occur in buildings, as evidenced by the attack on the Twin Towers on September 11, 2001 (Kodur, 2003), contributing to the total collapse of the structure (Gravit & Golub, 2018). These events led to in-depth studies of fires under non-conventional conditions.

---

\*\* Paulo A. G. Piloto – GICoS, Instituto Politécnico de Bragança, Campus Santa Apolónia, 5300-253 Bragança, Portugal, email: pppiloto@ipb.pt, <http://www.ipb.pt>



The cladding of LSF walls plays a crucial role in optimising thermal insulation. Commonly used materials include plasterboard, calcium silicate boards, oriented strand boards (OSB), and steel sheets (Chen et al., 2020). Their application not only serves as a surface prepared for finishes but also plays a vital role in protecting against direct fire exposure and lateral containment of steel studs, contributing to structural stability (Kesawan & Mahendran, 2018). Additionally, insulation materials such as mineral wool, fibreglass, and cellulose fibre can be employed to improve the acoustic and thermal control of walls due to their low heat transfer characteristics. However, using these materials within the cavity of walls provides lower fire resistance (R) compared to walls with empty cavities (Kodur & Sultan, 2006) (P. Kolarkar & Mahendran, 2012). On the other hand, using insulation between protective layers offers better thermal and fire protection (P. Kolarkar & Mahendran, 2012), because external insulation results in a near uniform temperature distribution over the stud cross-sections, reducing the risk for thermal bowing, and increasing the thermal protection to the LSF walls.

Previous studies (Magarabooshanam et al., 2020) devoted special attention to the thermal analysis performance of LSF walls when used as partitions. These authors conducted full-scale experimental tests to investigate the fire resistance of LSF walls using single, double, and alternate studs, considering different cavity depths. The results highlighted that two layers of gypsum coating and a wider cavity exhibited greater fire resistance. These results are in agreement with previous experimental investigation developed at IPB (Alves et al., 2021), when testing double stud LSF walls. This investigation also presented highly accurate computational models and a new simplified design method.

Only a small number of investigations have been dedicated to CFS walls exposed to HYDROCARBON fires (Chen et al., 2020). This study also includes a comparison with standard fire ISO834 (ISO, 1999), external fire and realistic fire, using an external composite insulation strategy with mineral wool (60 kg/m<sup>3</sup>). This new insulation strategy was compared with the same LSF using full cavity insulation, using the same mineral wool (Chen et al., 2019). Both studies (Chen et al., 2020), (Chen et al., 2019) will be used for the numerical validation of the models developed in this manuscript.

To improve the knowledge and the computational models, the initial research developed at IPB, (Piloto, Khetata, & Gavilán., 2017) contributed significantly to the field by developing an accurate numerical model based on thermal and fluid analysis with air-structure interaction. This research increased by introducing a simplified method, (Piloto, Khetata, & Gavilán, 2017), based on one-dimensional heat flow algebraic equations, considering different thermal flow paths, across the steel stud. These results were compared with a 2D solid finite element analysis, with a very good agreement during time and a maximum relative difference in fire resistance up to 5%. In the same year, (M. Khetata et al., 2017) developed a numerical validation using finite cells, with air-structure interaction, and finite elements in solid parts to determine the thermal performance of four experimental results developed by (P. N. Kolarkar, 2010). This study also included a parametric analysis to consider the effect of the steel thickness, the effect of the cavity thickness, and the number and thickness of the gypsum boards.

(Piloto et al., 2018) presented four experimental tests with numerical validation and a parametric study for load-bearing resistance. The fire resistance is usually provided by one or more layers of materials and or by the cavity insulation. This investigation evaluates the fire resistance of the load-bearing walls, from the point of view of insulation (I) and load-bearing capacity (R). Experimental results obtained from partition walls were used in the numerical model to accurately predict the cracking, falling off and the ignition of combustible material. The 3D numerical model was validated under the same fire conditions. The load-bearing capacity was determined using this hybrid model. This model can predict an accurate fire resistance for any load level, taking into account the brittle behaviour of gypsum panels and the ignition of combustible materials. The load-bearing decreases with the increase in the load level. A new formula was presented to determine the critical average temperature of the LSF. More experimental results were developed with validation using 2D numerical models (S. M. Khetata et al., 2020). Seven small-scale specimens were tested to define the fire resistance of non-load bearing LSF walls made with different materials, including external composite layers and cavity insulated partition walls using rockwool and superwool. All tests were validated using 2D numerical models, based on the finite-element method, the finite-volume method and the hybrid finite-element method. It was concluded that the fire resistance increases with the number of studs and also with the thickness of the protection layers. The hybrid finite-element solution method seems to be the best



approximation model to predict fire resistance. Following the previous investigation, (Piloto et al., 2022) presented the simulation results of composite LSF walls in reduced scale and full scale, based on variable load levels (20 to 80%). The numerical model used the hybrid model approximation to accurately determine the temperature field under fire conditions. The insulation ability to sustain fire usually increases with the number of studs and with the application of insulation material in the cavity region. The ability to sustain the load under fire also increases with the number of studs, especially for higher load levels. A new proposal was presented for the critical temperature of the LSF, based on the maximum temperature of the LSF during the fire, allowing the calculation of the critical temperature, based on the load level of the specimen. This relation can predict the fire resistance time, based on the preliminary thermal analysis of the specimen. The reduced scale specimens present higher critical temperatures when compared to the full scale specimens, due to the typical failure mode (local modes for the reduced scale and global modes for the large scale). A more detailed analysis regarding the cavity region was developed by the same research group (Piloto et al., 2023), analysing three different computational methods to compare the fire performance of LSF walls with void cavities.

External wall are also being investigated (Torres et al., 2023), focusing on the fire affecting external walls from the external and internal side. The results show that the temperature evolution is slower when the fire is impacting the outer side of the wall but, in these cases, the recommended critical temperature of 350 °C is reached earlier in the steel profiles, but this conclusion is materially dependent.

The performance of CFS stud walls under compression loading, subjected to one-sided and double-sided fire exposure, has also been investigated (Hassoune et al., 2025). The results demonstrate the significant impact of the double-sided fire exposure on CFS walls performance, reducing the fire resistance by 41 % and 50 % for CFS thicknesses of 1.15 mm and 1.5 mm, respectively, compared to one-sided fire exposure.

This current investigation aims to enhance knowledge in the analysis of partition walls subjected to standard and HYDROCARBON fires. Unlike the standard fire curve, which demonstrates a gradual increase over time, hydrocarbon fires exhibit a rapid increase in temperature accompanied by a flame shock wave in the LSF structures and building materials (Gravit & Golub, 2018). The specific curve for this fire reaches approximately 1100°C in about half an hour, maintaining a constant temperature from that point on. The high temperatures of HYDROCARBON fires are typically used for hazard assessments in the offshore industry, petrochemical plants, road and railway tunnels, and ships,

## 2. COMPUTATIONAL MODEL

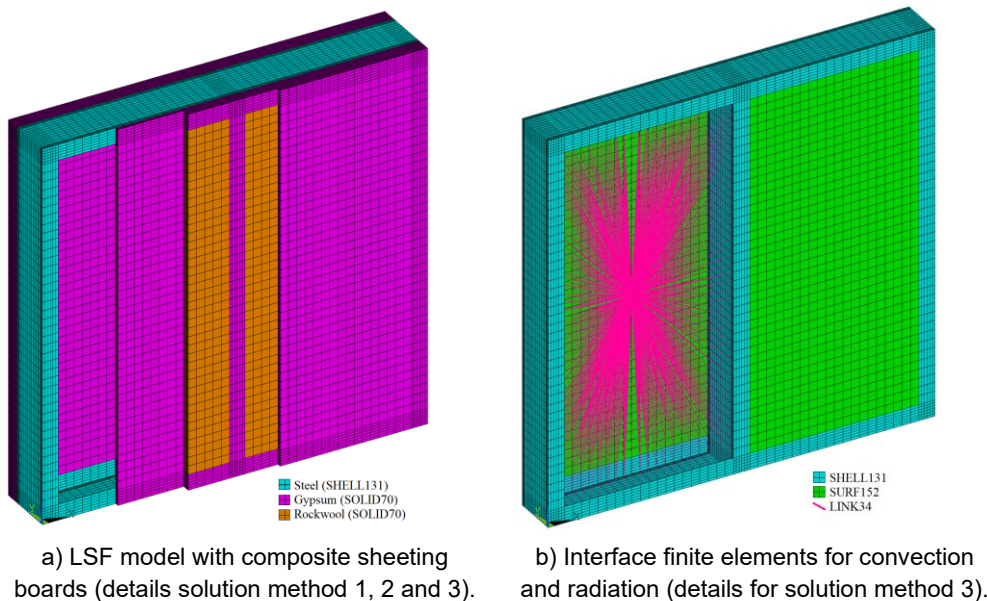
This section outlines the methodology, focusing on the analysis with finite element models. These models were conceived based on LSF partition walls used in experimental tests conducted by other researchers (Chen et al., 2019), (Chen et al., 2020). The adopted approach incorporates various methods to assess the fire resistance of non-load-bearing LSF walls, considering both standard ISO834 and HYDROCARBON fire conditions. The simulations covered fire test conditions, using transient thermal analysis with temperature-dependent material properties. Validation of the results will be conducted through a comparison with experimental tests.

Heat transfer analysis through the finite element method was used to solve the 3D second-order partial differential equation, using the weighted residual method and Galerkin approximation to transform into a set of nonlinear algebraic equations. This system is solved using incremental and iterative numerical methods. The temperature field  $T$  is determined by solving the heat conservation equation inside the solid parts, through the discretisation of the domain using a finite element mesh as illustrated in Figure 1. The material properties are temperature dependent, and the solution method is incremental and iterative, using a time increment of 60 s, with the possibility to reduce to 1 s, if required. The convergence criterion was based on heat flow, with a tolerance of  $10^{-3}$  and a minimum reference value of  $10^{-6}$  W.

Three distinct numerical solution methods were used for a more accurate simulation of the fire performance of LSF walls with external insulation. The hybrid method (solution method 1) incorporates convection and radiation in the



cavity region based on the previously measured experimental cavity temperature (bulk temperature is introduced as a boundary condition). The second method (solution method 2) considers interface elements for heat transfer exclusively by radiation, while the third method (solution method 3) involves heat transfer by radiation and convection in the cavity region. Additionally, a finite element model was developed to simulate the fire test on internally insulated LSF walls. Modifications to the thermal properties of the mineral wool insulation were implemented to simulate the material degradation during the test under hydrocarbon fire conditions. These adaptations aim to bring the numerical results closer to the experimental results.



The boundary conditions are defined in the exposed and unexposed sides of the LSF walls. Depending on the model, the boundary conditions should also be applied to the cavity region. The exposed surface is submitted to radiation and convection, while convection is assumed in the unexposed surface with an appropriate convection coefficient to consider the radiation effect. The cavity region is also submitted to convection and radiation, but using average convection coefficients between the exposed and unexposed surfaces.

To simulate heat transfer that occurs when LSF walls are subjected to standard ISO834 fire and HYDROCARBON boundary conditions, the following parameters were applied: For the validation models, an initial temperature of 5 °C was set at all nodes, based on conducted experimental tests (Chen et al., 2019) (Chen et al., 2020). Subsequently, conditions were applied for the exposed fire side (FS), for the unexposed side (UNEX), and lastly, for the cavity region (if necessary). According to EN 1991-1-2 (CEN, 2002), different values should be used for the convective heat transfer coefficient for the exposed fire side. For the fire scenario using the standard ISO834, a convective heat transfer coefficient  $\alpha_c$  of 25 W/m<sup>2</sup>K was used. For the HYDROCARBON fire curve, a convective heat transfer coefficient  $\alpha_c$  of 50 W/m<sup>2</sup>K. The boundary condition for the unexposed side used a convective heat transfer coefficient  $\alpha_c$  of 9 W/m<sup>2</sup>K, assuming it encompasses the effects of radiation heat transfer.

Different boundary conditions were applied to the cavity region depending on the solution method, considering that in LSF walls with empty cavities (external insulation), heat transfer occurs through convection and radiation. When using convection inside the wall cavity, one can assume an average value between the exposed fire side and the unexposed side, using 17 W/m<sup>2</sup>K for Standard ISO834 and 29.5 W/m<sup>2</sup>K for the HYDROCARBON fire scenario (Piloto et al., 2018).

The finite element mesh includes different element types. The finite element SOLID 70 (ANSYS) is a 3D element used to model protection materials (gypsum and mineral wool), has eight nodes with a single degree of freedom



per node (temperature), uses linear interpolating functions and the full Gauss integration method (2x2x2). The finite element SHELL 131 (ANSYS) is a 3D layered shell element used to model the LSF structure, having in-plane and through-thickness thermal conduction capability. The element has four nodes with up to 32 temperature degrees of freedom at each node, uses linear interpolation functions with a full Gauss integration scheme (2x2). The interpolation through thickness uses 5 integration Gauss points.

For the case of void cavities in LSF walls, the finite element LINK34 (ANSYS) simulates uniaxial thermal convection between nodes. The convective heat transfer rate is determined based on the film coefficient, convection area, and possible empirical coefficients (not used here). This element also has no interpolating function or numerical integration, and uses a direct formula to determine the heat flow by convection. The finite element SURF 152 (ANSYS) simulates the radiation from inside the cavity region (surface to node). It may be overlaid onto the face of any 3D thermal element (SOLID 70). The element uses linear interpolating functions and full in-plane Gauss integration (2x2).

## 2.1 Specimens used for validation

The non load-bearing LSF walls used to validate the models include the test specimens "S1" and "S5," developed in 2019 (Chen et al., 2019), and the specimens "S9" and "S13," developed in 2020 (Chen et al., 2020). The medium-scale LSF wall specimens, used in both studies, were manufactured with a width and height of 1.2x1.2 m, as depicted in Figure 2. The LSF was constructed by assembling three C140 studs (140x50x13x1.2 mm) every 600 mm and two unlippped U142 tracks (142x50x1.2 mm). The steel studs and tracks were made from a galvanised steel sheet (Q345) with a nominal wall thickness of 1.2 mm and a nominal yield strength of 345 MPa. The LSF was covered with two layers of gypsum board on both sides (1200x1200x12 mm), each with a thickness of 12 mm.

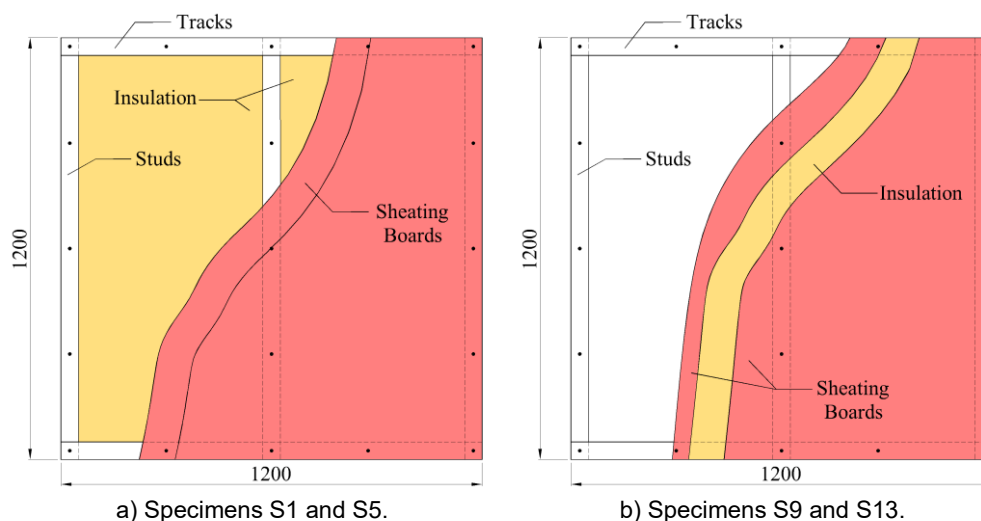


Figure 2: LSF wall with insulated cavity and external insulated wall (composite layers).

The cross-section configuration is depicted in Figure 3, where one can see the different insulation methods (inside cavity and outside cavity) and the position of the thermocouples. To monitor the thermal response of the LSF walls during the fire experiments, a total of 21 and 29 type K thermocouples were used at mid-height sections of each specimen. For the LSF wall specimens "S1" and "S5," a 150 mm thick rockwool insulation (density of 60 kg/m<sup>3</sup>) was used as insulation in the cavity of the steel frames. For specimens "S9" and "S13," a 24 mm thick rockwool insulation (density of 60 kg/m<sup>3</sup>) was used as external insulation between the gypsum boards. Simultaneously, two layers of gypsum board strips are placed directly on the line of the steel studs to prevent compression deformations and irregular joints on the wall surfaces.

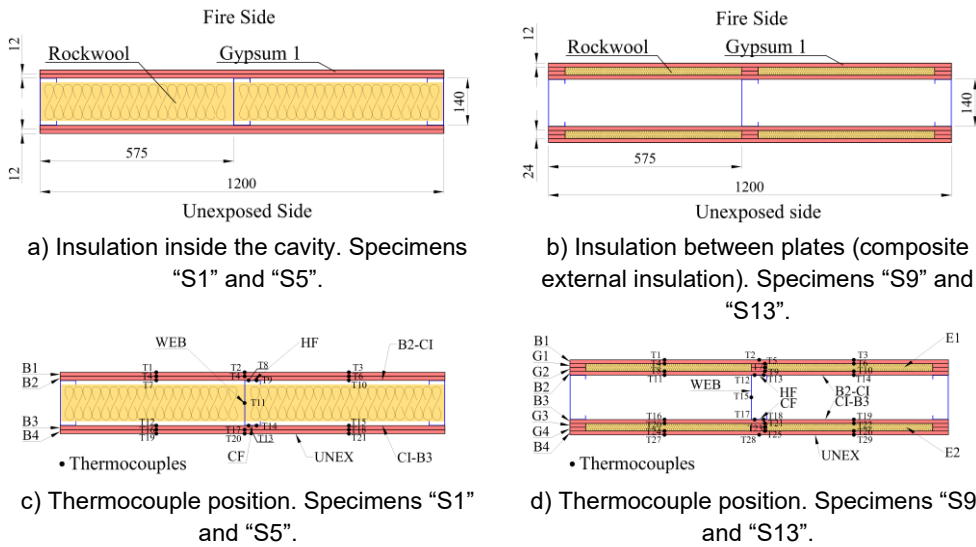


Figure 3: LSF walls under investigation (Chen et al., 2019), (Chen et al., 2020).

For the validation of void cavities with external insulation in LSF walls, three different solution methods were used. The solution Method 1 employs a hybrid finite element approach to simulate heat transfer through radiation and convection in the cavity region. This model is based on the cavity temperature behaviour derived from previous experiments. The cavity temperature (bulk temperature) is determined as the average between the inner faces in contact with the cavity, the most exposed (hot) layer, and the least exposed (cold) layer. This method was applied to model Specimens "S9" and "S13", as per the conducted experimental test (Chen et al., 2020). The application of convection and radiation should cover the surfaces in contact with the cavity, including the internal surfaces of the studs and the internal surfaces of the gypsum boards. Therefore, the boundary conditions adopted for the cavity region, when the models are subjected to the standard ISO834 fire, include a convection coefficient of  $17 \text{ W/m}^2\text{K}$ . For the models subjected to the HYDROCARBON fire, a convection coefficient of  $29.5 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Both models were subjected to the radiation boundary condition inside the cavity region with a flame emissivity value of 1. Additionally, the final time for the simulations was defined to be 185 min and 91 min for specimens S9 and S13, respectively. The solution method 2 only considers radiation inside the cavity region, using the interface finite element SURF 152. Unlike solution method 1, the solution methods 2 and 3 do not rely on experimental data to input boundary conditions, thus allowing to increase the simulation time. The solution method 3 is similar to solution method 2, but includes additional boundary conditions for convection heat flow. This method uses the same previous finite element SURF 152. Additionally, it includes the finite element LINK 34 to impose a convection boundary in the cavity region. The LINK 34 element facilitates simulating thermal convection between the nodes of the internal areas of the plasterboard in contact with the cavity and the node inserted at the centre of this region, as shown in Figure 1. Finally, higher simulation times were used, as in solution method 2, to reach the fire resistance criteria.

The simulation model used to validate Specimens S1 and S5, does not require interface finite elements. However, during the comparison of numerical results with experimental results, there was a need to adjust the model to enhance the accuracy of the results. There is a physical limitation to simulate these specimens, because thermal degradation is difficult to predict. Thus, adjustments were made to the thermal properties of the mineral wool, aiming for better agreement with experimental results, reflecting the increase in heat transfer associated with these phenomena. After each implemented modification, the error (RMSE) was calculated for each layer of the LSF wall. To select the most appropriate property modification, the criteria adopted were the lowest average RMSE and the lowest RMSE in the layer not exposed to fire, as the latter is used to determine the fire resistance time by insulation (I) of LSF walls.

## 2.2 Thermal properties



The accuracy and reliability of any numerical modelling are directly related to the correct definition of the properties of the materials involved. In the context of simulating LSF walls, different materials were used, each contributing in a unique way to the system's integrity. It is important to note that the properties of these materials have a significant impact on the overall performance of LSF walls. To ensure accurate simulations, the thermal properties of the materials used in the models (specimens) were obtained from established standards EN1993-1-2 (CEN, 2005), the next generation of prEN 1995-1-2 (CEN, 2023) as well as through experimental studies (Sultan, 1996). These properties include thermal conductivity, specific heat, density, and material emissivity, all of which are temperature-dependent and critical to determine the fire performance of LSF walls. Figure 4 illustrates the specific heat of carbon steel, thermal conductivity, and density, which remains at the value of  $7850 \text{ kg/m}^3$ . The emissivity of carbon steel is equal to 0.7. Two distinct varieties of gypsum plasterboard were used, namely Gypsum 1 defined by prEN 1995-1-2 (CEN, 2023) and Gypsum 2 defined by (Sultan, 1996). Gypsum 1 was selected to validate the numerical models with the experimental results, see Figure 4. The material Rockwool is approximated by the mineral wool thermal properties defined by prEN 1995-1-2 (CEN, 2023), as depicted in Figure 4. The material density  $60 \text{ kg/m}^3$ , was obtained from the experimental tests (Chen et al., 2019) (Chen et al., 2020). The emissivity was assumed to be 0.8.

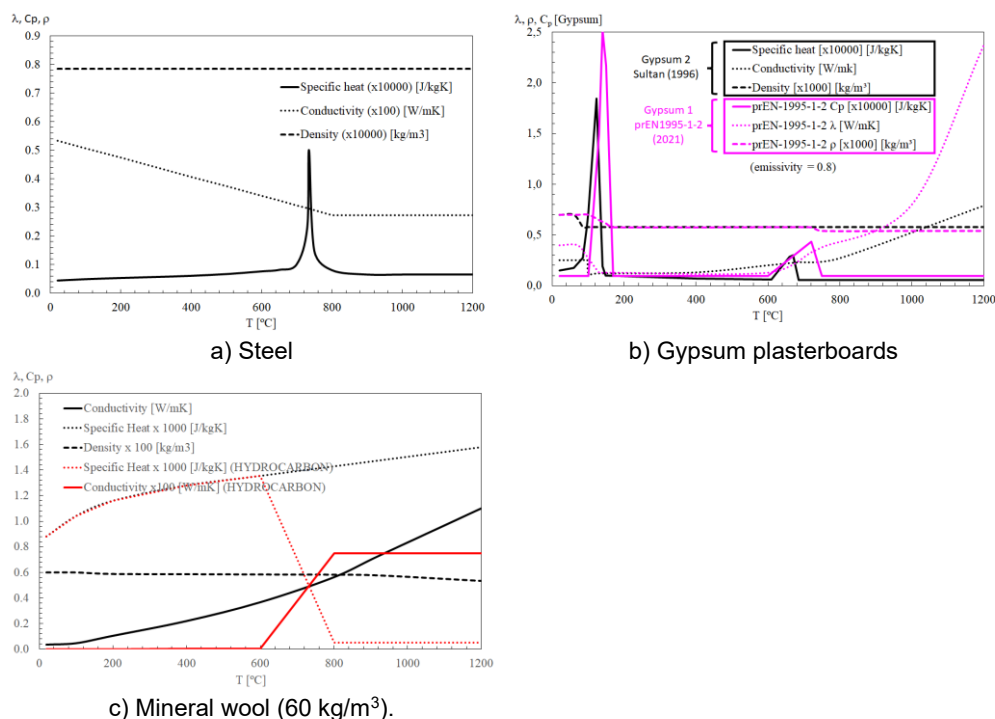


Figure 4: Thermal properties used for the material models.

To increase the accuracy of the models, the mineral wool thermal material properties were modified for the case of using HYDROCARBON fire, see Figure 4.

### 2.3 Validation of the computational model

The temperature evolution over time across all layers of the LSF walls was recorded by the thermocouples installed in the experimental tests, as shown in Figure 3. Therefore, the temperatures in the numerical models were extracted at the same locations as these thermocouples. In this study, a comparison is presented using the RMSE error for the temperature evolution of each component. The relative error (RE) will be used to compare the fire resistance time for insulation (I).

The numerical validation will be presented in the sequence number order of the experimental specimens. Initially, the LSF walls with insulation in the cavity region, referred to as "S1" and "S5" in the experimental test (Chen et al.,



2019), will be evaluated based on the average temperature for similar positions. Subsequently, the LSF walls with external insulation, referred to as “S9” and “S13” (Chen et al., 2020), will be examined using the same procedure. Furthermore, this study starts the analysis of Light Steel Framing (LSF) walls exposed to HYDROCARBON fires, followed by walls subjected to the standard fire ISO834.

Figure 5 includes the average temperatures of each layer. According to the authors (Chen et al., 2019), the failure of the insulation (I) for Specimen “S5” occurred by the average temperature criterion (140°C above the initial average temperature) after 73 minutes.

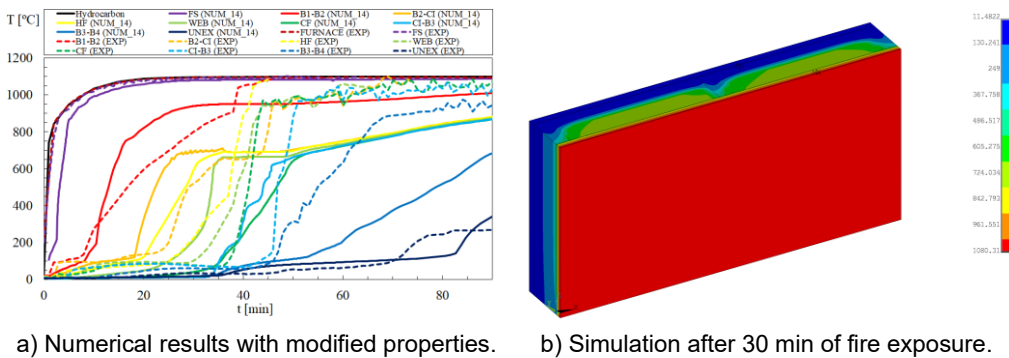


Figure 5: Experimental and numerical results for Specimen “S5”.

The comparison of experimental results with numerical outcomes for the Specimen “S1” is presented in Figure 6. This specimen underwent a 185-minute fire test. According to the authors (Chen et al., 2019), the insulation failure of Specimen “S1” occurred at the maximum temperature criterion (180°C above the initial average temperature).

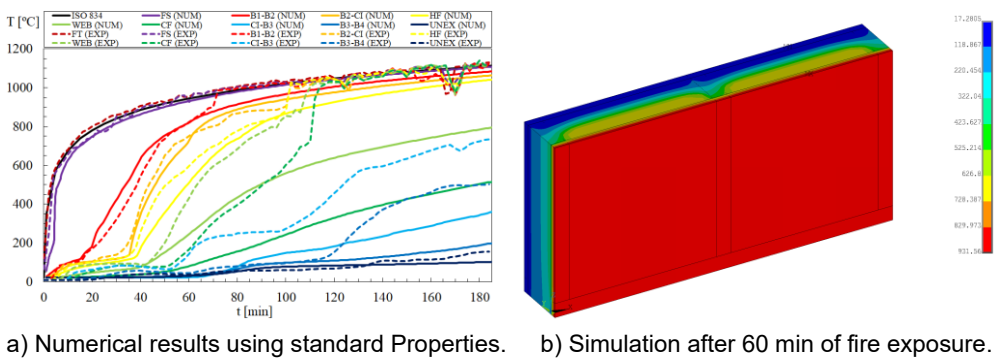


Figure 6: Experimental and numerical results for Specimen “S1”.

Analysing the temperature-time curves obtained from the numerical tests of the two specimens, “S5” and “S1”, a discrepancy in results is apparent when gypsum board drops occur, as the numerical models do not assume this modelling event. Additionally, imperfect contact may have occurred between the rockwool insulation and the internal surfaces of the boards and steel profile, creating void spaces in the region, leading to heat transfer through radiation in these small gaps. To address these events, modifications were made to the thermal properties of the materials to simulate such effects as the emergence of cracks, board drops, material combustion, or any other heat release. After processing and extracting data from each implemented modification, the obtained results were compared using RMSE, as shown in Table 1. The best modification option for Specimen “S5” produced the lowest RMSE for the unexposed fire surface (UNEX). One can see that RMSE decreased from 75.9 °C to 44.3 °C, corresponding to a better approximation to the experimental results.



Table 1: Comparison of the RMSE values for the numerical results of Specimen “S5” with and without material properties modification.

Thermal properties	FS	B1-B2	B2-C1	HF	WEB	CF	CI-B3	B3-B4	UNEX	Average
standard	111.4	148.5	191.8	181.4	272.7	559.1	581.6	483.2	75.9	289.5
modified	112.5	143.3	204.0	208.1	201.5	222.3	196.6	277.6	44.3	178.9

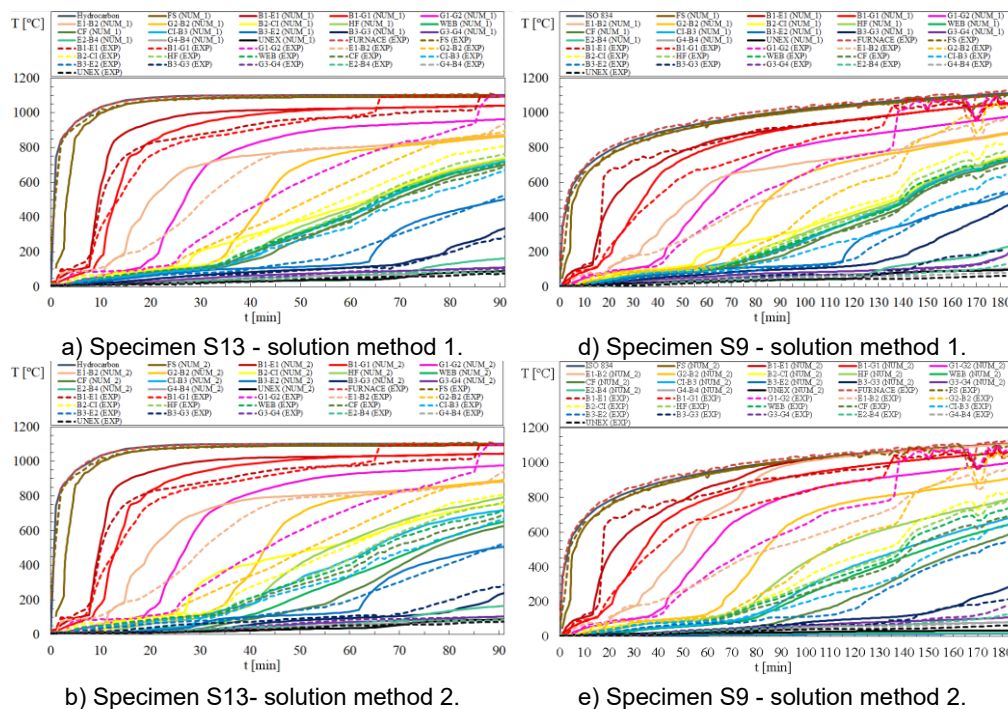
The best material option to evaluate the performance of Specimen “S1” was the starting guess, where standard properties were assumed, possibly due to the partial melting of rockwool insulation, unlike that degradation event in Specimen “S5”. The same modification has been tested, and the comparison is presented in Table 2.

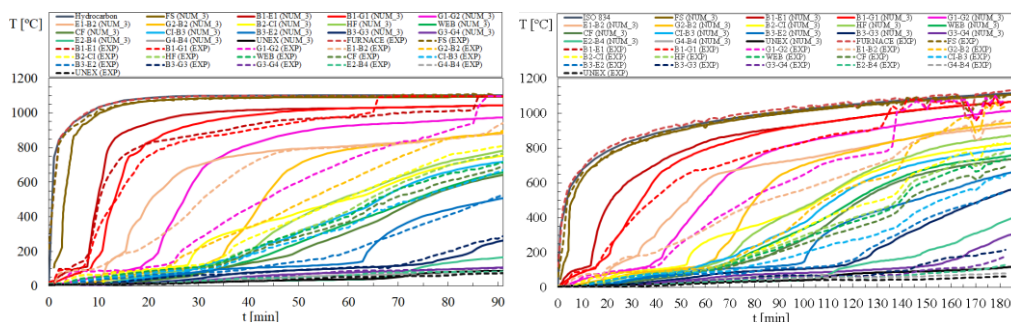
Table 2: Comparison of the RMSE values for the numerical results of Specimen “S1” with and without material properties modification.

Modification	FS	B1-B2	B2-C1	HF	WEB	CF	CI-B3	B3-B4	UNEX	Average
0	49.9	48.2	43.4	76.3	211.6	308.2	151.8	53.6	11.0	106.0
2	68.5	95.5	189.7	183.1	175.7	162.1	187.2	164.1	180.1	156.2

Therefore, according to the results, when the LSF wall is subjected to standard ISO834 fire, no changes should be made to the material properties. However, for LSF walls subjected to a HYDROCARBON fire curve, modifications should be made. This double strategy is physically understandable because higher material degradation is expected with HYDROCARBON fire.

The comparisons between the experimental results of Specimen “S13” and the numerical simulations are presented in Figure 7, using the three solution methods. The average temperatures of each layer from the LSF walls were selected for the graphical comparison. The LSF wall of specimen “S13” was subjected to a HYDROCARBON fire, without insulation in the cavity region. This specimen underwent a 91 minutes fire test and did not reach the insulation fire resistance failure criteria.





c) Specimen S13- solution method 3.

f) Specimen S9 - solution method 3.

Figure 7: Experimental and numerical results for Specimens “S13” and “S9”.

After processing the numerical results, the comparison between the three solution methods was done using RMSE, as shown in the next Table 3 and Table 4.

Table 3: RMSE for the results of Specimen S13 using solution methods 1, 2, and 3.

Specimen S13	Sol. Method 1 RMSE °C	Sol. Method 2 RMSE °C	Sol. Method 3 RMSE °C
FS	96.5	96.4	96.4
B1-E1	79.5	80.3	79.1
B1-G1	72.5	70.4	70.8
G1-G2	216.3	214.3	214.9
E1-B2	113.4	114.9	110.8
G2-B2	103.8	109.9	109.3
B2-CI	49.4	79.9	50.9
HF	21.3	56.1	43.6
WEB	9.9	74.2	57.6
CF	17.6	94.5	56.8
CI-B3	46.4	65.3	55.1
B3-E2	28.2	34.4	29.7
B3-G3	13.1	33.8	18.7
G3-G4	9.6	8.8	4.4
E2-B4	28.6	31.1	30.1
G4-B4	12.8	4.9	8.4
UNEX	8.8	9.4	8.9
Average	54.6	69.3	61.5

The biggest RMSE for the specimen S13 was found to be in the most exposed layers of the composite insulation system. For the other regions, the RMSE is below 100 °C. Solution method 1 had the smallest RMSE, because it used the addition boundary from experimental tests (cavity temperature) when using the hybrid finite element approach.

Table 4: RMSE for the results of Specimen S9 using solution methods 1, 2, and 3.

Specimen S9	Sol. Method 1 RMSE °C	Sol. Method 2 RMSE °C	Sol. Method 3 RMSE °C
FS	39.8	39.9	39.8
B1-E1	53.4	76.1	53.2
B1-G1	74.6	77.3	76.4
G1-G2	124.8	128.2	126.4
E1-B2	127.2	293.6	142.6
G2-B2	128.8	147.4	156.3
B2-CI	56.3	79.5	108.1
HF	22.5	81	131.7
WEB	14.4	57.4	65.2
CF	14.8	97	74.4
CI-B3	76.6	73.8	182.3
B3-E2	27.5	241.1	107.9
B3-G3	89.6	22.5	145.1
G3-G4	17.9	18.9	41.2
E2-B4	39.7	45	96.5



G4-B4	18.7	5.2	22
UNEX	20.2	14.1	27.8
Average	55.7	88.1	93.9

The biggest RMSE for the specimen S9 was found to be, again, in the most exposed layers of the composite insulation system. For the other regions, the RMSE is below 100 °C. Solution method 1 had the smallest RMSE, also, for the case of the specimen 9 being subjected to ISO834. The fire test standard EN 1363-1 (CEN, 2020) recommends that, after the initial 10 minutes of the test, the temperature recorded by any thermocouple in the furnace should not deviate by more than 100°C from the corresponding temperature in the standard fire curve.

The fire resistance time for insulation (I) was also compared using the Relative Error (RE). As the fire resistance time for Specimen “S1” of 137 minutes was obtained through portable thermometer measurement, it was possible to identify the temperature across the entire surface, not limited to the thermocouple locations. The fire test was terminated at 185 min of fire exposure, when the average temperature on the unexposed surface reached 156 °C.

The experimental insulation fire resistance for specimen S5, subjected to HYDROCARBON, was 73 min. The simulation using modified thermal properties reached the average temperature criterion after 82.1 min and the maximum temperature criterion at 82.7 min. The RE (12.48 %) for the fire resistance time was reached.

In the case of Specimens “S9” and “S13”, it was not possible to determine the relative error (RE) since the criteria for insulation fire resistance were not achieved in the experimental tests. Moreover, the solution method 1 is limited to the maximum time of fire exposure, due to the need to determine the average cavity temperature. Therefore, Table 5 and Table 6 solely compare the results obtained by each solution method.

Table 5: Comparison of insulation fire resistance for Specimen S13 ( $t_{fi}(EXP) \geq 91$  min).

Solution	$t_{ave}^T$ min	$t_{max}^T$ min	$t_{fi}$ min
Sol. Method 1	>91	>91	>91
Sol. Method 2	136	136	136
Sol. Method 3	136	136	136

Table 6: Comparison of insulation fire resistance for Specimen S9 ( $t_{fi}(EXP) \geq 185$  min).

Solution	$t_{ave}^T$ min	$t_{max}^T$ min	$t_{fi}$ min
Sol. Method 1	>185	>185	>185
Sol. Method 2	>360	335	335
Sol. Method 3	187	187	187

Solution methods 2 and 3 used for Specimen “S13” exhibit a higher RMSE compared to the solution method 1. This can be explained by the absence of the convection component in the heat flow (solution method 2) and the impossibility of detecting material degradation under fire conditions, even when using effective material properties. This is why one did the adjustment of the thermal properties, especially when using HYDROCARBON fire exposure. Additionally, besides thermal analyses for insulation criteria (I), it is observed that the hybrid method is also more suitable for structural resistance (R) analyses of LSF walls, as it yields better results for temperatures recorded in the studs (HF, WEB, and CF), which are crucial to verify the compression failure modes along the steel studs (Chen et al., 2020) (Kesawan & Mahendran, 2018).

It is essential to highlight that the differences in RMSE were more pronounced in the regions of plasterboards facing the cavity or between the plasterboards. These differences in RMSE results can be explained by the singularities in the behaviour of materials during experiments, as well as in numerical simulations, where perfect contact between materials is assumed.



### 3. CONCLUSÕES

This manuscript presents a computational model to simulate the effect of different fire scenarios on LSF walls, using different insulation strategies. For the case of void cavities using external insulation, the computation model includes three distinct solution methods, demonstrating good agreement with medium-scale experimental fire resistance tests. The Solution Method 1 (hybrid method), which incorporates convection and radiation in the cavity region using experimental cavity temperatures as boundary conditions, provided the most accurate temperature predictions and the lowest RMSE across various wall layers and for both standard ISO834 and HYDROCARBON fire scenarios. Solution Methods 2 and 3, which rely on interface elements to simulate radiation and convection/radiation in the cavity without experimental temperature input, produced higher RMSE values and less accurate predictions, especially in regions affected by material degradation and cavity effects. Adjustments to effective thermal properties of materials, particularly mineral wool insulation under HYDROCARBON fire exposure, were necessary to simulate degradation phenomena such as gypsum board cracking, fall-off, and insulation melting, improving the model's predictive capability.

LSF walls subjected to HYDROCARBON fires showed significantly reduced fire resistance times compared to those exposed to the standard ISO 834 fire, with an average reduction of about 57% observed in the studied specimens. The high temperatures and rapid heating rate of HYDROCARBON fires lead to more severe damage and faster degradation of protective materials and insulation.

LSF Walls with insulation placed inside the cavity showed better fire resistance compared to those with external insulation, but the latter with significantly less insulation material (82% reduction in volume). The external insulation exhibited only a 19% reduction in fire resistance under ISO 834 compared to cavity insulation, suggesting practical benefits for specific applications.

The hybrid finite element approach (solution method 1) is recommended for accurate fire resistance prediction of LSF walls, especially when experimental cavity temperature data are available. Numerical models should incorporate material degradation effects, such as gypsum board cracking and melting of insulation, to enhance the fire resistance prediction.

In summary, the research provides a robust and validated computational framework for analysing the fire performance of LSF partition walls under both ISO834 and HYDROCARBON fire conditions. The findings highlight the critical role of gypsum plasterboard thickness, insulation density, and fire scenario in determining fire resistance.

### ACKNOWLEDGMENT

This work was supported by fct (Fundação para a Ciência e a Tecnologia), by project reference UID/6213/2023 (GICoS). This work was also supported by the project FireLSF + Development of predictive models for the fire resistance of LSF walls – an experimental, numerical and machine learning approach”, reference COMPETE2030-FEDER-00846200 (2023.16480.ICDT), supported by Innovation and digital transition Programme - COMPETE 2030.

### REFERENCES

- Alves, M. H., Constantini, G., Ianni, A., Kimura, E. F. A., Meda, A., & Piloto, P. A. G. (2021). Fire performance of non-load-bearing double-stud light steel frame walls: Experimental tests, numerical simulation, and simplified method. *Fire and Materials, February*, fam.2969. <https://doi.org/10.1002/fam.2969>
- CEN. (2002). EN 1991-1-2, Eurocode 1: Actions on structures – Part 1-2: General actions – Actions on structures exposed to fire. Em CEN- European Committee for Standardization (Ed.), *CEN- European Committee for Standardization* (p. 59). CEN- European Committee for Standardization.
- CEN. (2005). *EN 1993-1-2: Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design*



- (CEN- European Committee for Standardization (ed.); CEN-Europ). CEN- European Committee for Standardization.
- CEN. (2020). EN 1363-1: Fire resistance tests Part 1 : General Requirements. Em CEN- European Committee for Standardization (Ed.), *CEN* (p. 52). CEN - European Committee for Standardization.
- CEN. (2023). pr EN 1995-1.2, Eurocode 5: Design of timber structures - Part 1-2: General - Structural fire design. Em *CEN*. CEN - European Committee for Standardization.
- Chen, W., Jiang, J., Ye, J., Zhao, Q., Liu, K., & Xu, C. (2020). Thermal behavior of external-insulated cold-formed steel non-load-bearing walls exposed to different fire conditions. *Structures*, 25(March), 631–645. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.03.044>
- Chen, W., Ye, J., & Zhao, Q. (2019). Thermal performance of non-load-bearing cold-formed steel walls under different design fire conditions. *Thin-Walled Structures*, 143(January). <https://doi.org/10.1016/j.tws.2019.106242>
- Gravit, M., & Golub, E. (2018). The fire resistant ceiling construction in a hydrocarbon fire. *MATEC Web of Conferences*, 245, 03004. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201824503004>
- Hassoune, M., Kada, A., Menadi, B., Lamri, B., Yessad, O., Piloto, P. A. G., & Jiang, L. (2025). Performance of single and built-up I-shaped cold formed steel stud under double sided walls fire exposure. *Engineering Structures*, 335(April), 120392. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2025.120392>
- ISO. (1999). *ISO834-1: Fire-resistance tests - Elements of building construction - Part 1: General requirements* (International Organization for Standardization (ed.); p. 25). International Organization for Standardization.
- Kesawan, S., & Mahendran, M. (2018). A Review of Parameters Influencing the Fire Performance of Light Gauge Steel Frame Walls. *Fire Technology*, 54(1), 3–35. <https://doi.org/10.1007/s10694-017-0669-8>
- Khetata, M., Fernandes, L., Marinho, C., Piloto, P., Gavilán, A., & Razuk., H. (2017). Fire resistance of non-loadbearing light steel framing walls: numerical validation. *XI Portuguese Congress on Steel and Composite Construction – CMM 2017*, 853–862.
- Khetata, S. M., Piloto, P. A. G., & Gavilán, A. B. R. (2020). Fire resistance of composite non-load bearing light steel framing walls. *Journal of Fire Sciences*, 38(2), 136–155. <https://doi.org/10.1177/0734904119900931>
- Kodur, V. K. R. (2003). Role of fire resistance issues in the collapse of the twin towers. Em CIB (Ed.), *CIB-CTBUH International Conference on Tall Buildings* (pp. 111–118). CIB.
- Kodur, V. K. R., & Sultan, M. A. (2006). Factors Influencing Fire Resistance of Load-bearing Steel Stud Walls. *Fire Technology*, 42(1), 5–26. <https://doi.org/10.1007/s10694-005-3730-y>
- Kolarkar, P., & Mahendran, M. (2012). Experimental studies of non-load bearing steel wall systems under fire conditions. *Fire Safety Journal*, 53, 85–104. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2012.06.009>
- Kolarkar, P. N. (2010). *Structural and Thermal Performance of Cold-formed Steel Stud Wall Systems under Fire Conditions* (Número September). Queensland University of Technology.
- Magarabooshanam, H., Ariyanayagam, A., & Mahendran, M. (2020). Fire resistance of non-load bearing LSF walls with varying cavity depth. *Thin-Walled Structures*, 150(October 2019). <https://doi.org/10.1016/j.tws.2020.106675>
- Piloto, P. A. G., Gomes, S., Torres, L., Couto, C., & Vila Real, P. (2023). Accuracy of 2D numerical models towards the prediction of the fire resistance on LSF partition walls. *International Journal of Thermal Sciences*, 193(March), 108511. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2023.108511>
- Piloto, P. A. G., Khetata, M. S., & Gavilán, A. B. R. (2017). Fire performance of non-loadbearing light steel framing walls - numerical simulation. *7th international conference mechanics and materials in design*, 1603–1610.
- Piloto, P. A. G., Khetata, M. S., & Gavilán, A. B. R. (2017). Fire Performance of Non-Loadbearing Light Steel Framing Walls-Numerical and simple calculation methods. *MATTER: International Journal of Science and Technology*, 3(3), 13–23. <https://doi.org/https://dx.doi.org/10.20319/mijst.2017.33.1323> FIRE
- 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. <https://doi.org/https://dx.doi.org/10.20319/mijst.2018.43.104124>
- Piloto, P. A. G., Khetata, M. S., & Ramos-Gavilán, A. B. (2022). Analysis of the critical temperature on load bearing LSF walls under fire. *Engineering Structures*, 270(July), 114858. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114858>
- Sultan, M. A. (1996). A model for predicting heat transfer through noninsulated unloaded steel-stud gypsum board wall assemblies exposed to fire. *Fire Technology*, 32(3), 239–259. <https://doi.org/10.1007/BF01040217>



**9JORNINC-4JORPROCIV**

9<sup>ª</sup> Jornadas de Segurança aos Incêndios Urbanos  
4<sup>ª</sup> Jornadas de Proteção Civil

Coimbra, 7 de novembro de 2025

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(July), 103946. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2023.103946>



## A CAPACIDADE DE CARGA EM LIGAÇÕES DE MADEIRA AO FOGO



**João Aguiar**  
MSc  
DEM, ISEP, IPP –  
Porto, Portugal



**Elza M.M. Fonseca**  
††  
Professor  
DEM, ISEP, IPP –  
Porto, Portugal

### SUMÁRIO

Neste trabalho será apresentada uma análise térmica em regime transiente à ligação em madeira em estudo, considerando as propriedades não lineares dos materiais envolvidos (aço e madeira). Os resultados desta análise permitirão obter a evolução da temperatura nodal, o campo de temperatura no interior da ligação e a taxa de carbonização nos elementos de madeira. Posteriormente, será apresentada uma análise termomecânica da mesma ligação em madeira, que permitirá avaliar a sua capacidade resistente, ao longo do tempo de exposição ao fogo, comparando-se os resultados obtidos entre ligações, com e sem proteção passiva.

**PALAVRAS-CHAVE:** Ligações em madeira; Resistência ao fogo; Eurocódigos; Método dos elementos finitos.

### 1. INTRODUÇÃO

A capacidade de carga é definida como a aptidão de um membro estrutural suportar a sua carga de teste, sem exceder critérios específicos, relacionados com o valor e a taxa de deformação, segundo a norma (ISO 834-1, 1999), (Aguiar, 2025).

O (RT-SCIE, 2020) define como “Estabilidade ao fogo, a propriedade de um elemento de construção, com funções de suporte de cargas, capaz de resistir ao colapso durante um período de tempo determinado, quando sujeito à ação de incêndio”, (RT-SCIE, 2020), (Aguiar, 2025).

A integridade é definida na norma (ISO 834-1, 1999) como a capacidade de um elemento separador, exposto a chamas em um lado, impedir a passagem de chamas ou gases quentes através de si mesmo, tal como obstruir a ocorrência de chamas no lado não exposto. Na regulamentação portuguesa (RT-SCIE, 2020), este conceito é definido como “Estanquidade ao fogo, a propriedade de um elemento de construção com função de compartimentação de não deixar passar, durante um período de tempo determinado, qualquer chama ou gases quentes”, (RT-SCIE, 2020), (Aguiar, 2025).

O isolamento térmico, conforme a norma (ISO 834-1, 1999), é a capacidade de um elemento separador, exposto a chamas em um lado, manter a temperatura do lado não exposto inferior a valores estipulados. Este conceito é

---

†† Autor correspondente – LAETA, Departamento de Engenharia Mecânica, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Instituto Politécnico do Porto. Rua Dr. Bernardino de Almeida, nº 431, 4200-072 Porto. PORTUGAL. e-mail: elz@isep.ipp.pt



definido no (RT-SCIE, 2020) como “Isolamento térmico, propriedade de um elemento de construção com função de compartimentação de garantir que a temperatura na face não exposta ao fogo, desde o seu início e durante um período de tempo determinado, não se eleva acima de dado valor”, (RT-SCIE, 2020), (Aguiar, 2025).

O tipo de madeira a utilizar no presente trabalho é designado como Glulam, que, de acordo com a definição da norma (EN 1194:1999, 1999), é um componente estrutural constituído através da junção de camadas de madeira, paralelamente ao grão. É um dos produtos mais utilizados em estruturas em madeira, oferecendo uma enorme flexibilidade geométrica (Xu et al., 2013), (Aguiar, 2025). É tecnologicamente avançado, composto por diferentes espécies de madeira, com alta resistência e estabilidade. Além das vantagens apresentadas anteriormente, é facilmente integrado com outros materiais isolantes, placas de gesso, acabamentos, azulejos e alvenaria (Xu et al., 2013), (Aguiar, 2025).

As diferentes classes de resistência são definidas de acordo com a norma (EN 1194:1999, 1999). As classes são nomeadas GL<sub>x</sub>h, para disposições homogéneas, ou seja, todas as placas são de categoria e espécie equivalente, ou GL<sub>x</sub>c, em que a secção transversal contém placas interiores e exteriores de classes diferentes (Xu et al., 2013). Além disso, o valor associado à classe de resistência (na posição do “x”), corresponde ao valor da resistência à flexão, (Aguiar, 2025).

O presente trabalho incidiu sobre o estudo de ligações mecânicas de madeira em corte simples, com e sem proteção em gesso, submetidas à ação do fogo. O trabalho combinou uma abordagem analítica, com base no Eurocódigo 5, e uma abordagem numérica, através da análise por elementos finitos, com o objetivo de avaliar o comportamento térmico e estrutural destas ligações ao longo do tempo de exposição ao fogo. Neste trabalho serão apresentados os resultados gerais obtidos, com a discussão dos mesmos.

## **2. MODELO DE LIGAÇÃO EM MADEIRA**

Na primeira fase, foi avaliada a capacidade resistente da ligação sem proteção, à temperatura ambiente, comparando com a carga resistente obtida através do método simplificado de cálculo, baseado no (Eurocódigo 5, parte 1-1, 2004), (Aguiar, 2025).

Posteriormente foi avaliado o efeito da adição das placas de gesso no modelo em estudo. Na figura 1 representam-se os modelos da ligação em estudo, com e sem proteção, (Aguiar, 2025).

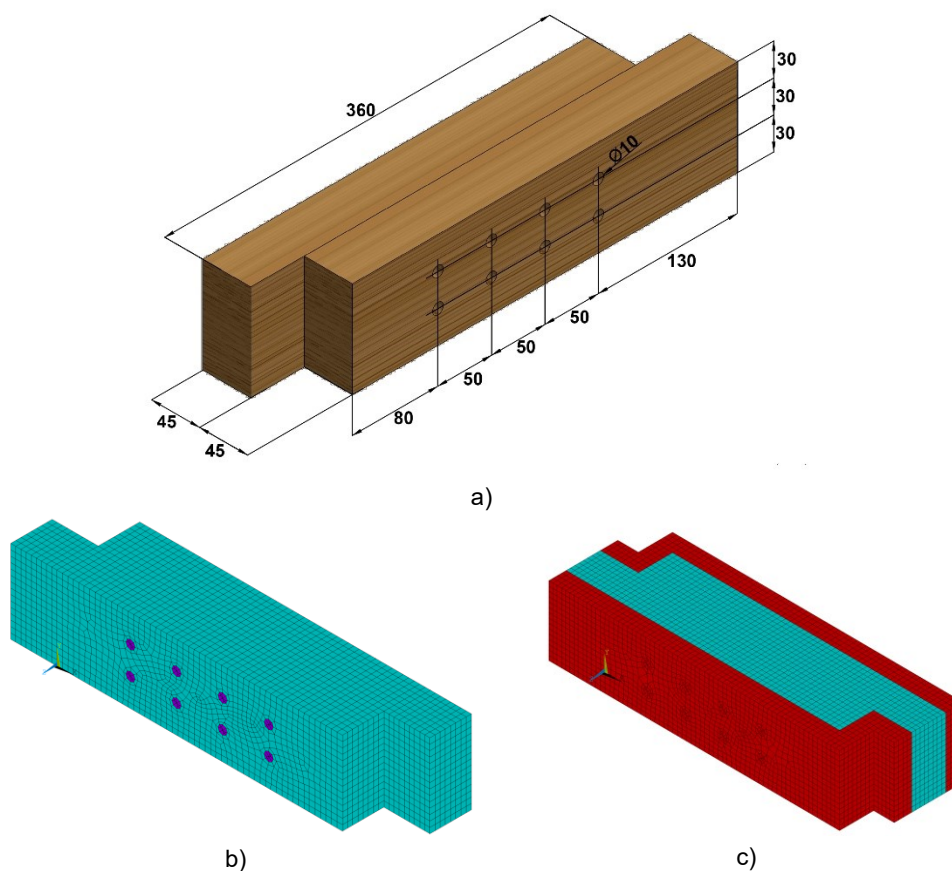


Figura 1: Ligação em madeira: a) dimensões, b) malha no modelo não protegido, c) malha no modelo protegido

### 3. CAPACIDADE DE CARGA NA LIGAÇÃO EM MADEIRA: DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Na análise termomecânica, é avaliada a capacidade resistente das ligações para diferentes instantes de exposição ao fogo, com o objetivo de quantificar o decréscimo de resistência mecânica ao longo do tempo e analisar a eficácia da proteção em gesso.

A Figura 2 apresenta os resultados numéricos obtidos, com curvas de tendência polinomiais de segundo grau. As respetivas equações são fornecidas no gráfico, permitindo a previsão da carga resistente em função do tempo de exposição ao fogo, (Aguiar, 2025).

Para a ligação sem proteção, foi avaliada a capacidade resistente para os instantes de tempo de exposição ao fogo de 0 s, 560 s, 680 s, 720 s, 900 s e 1200 s.



No caso da ligação protegida com placas de gesso, que mantém a resistência mecânica durante mais tempo, foi possível estender a análise até aos 1800 s.

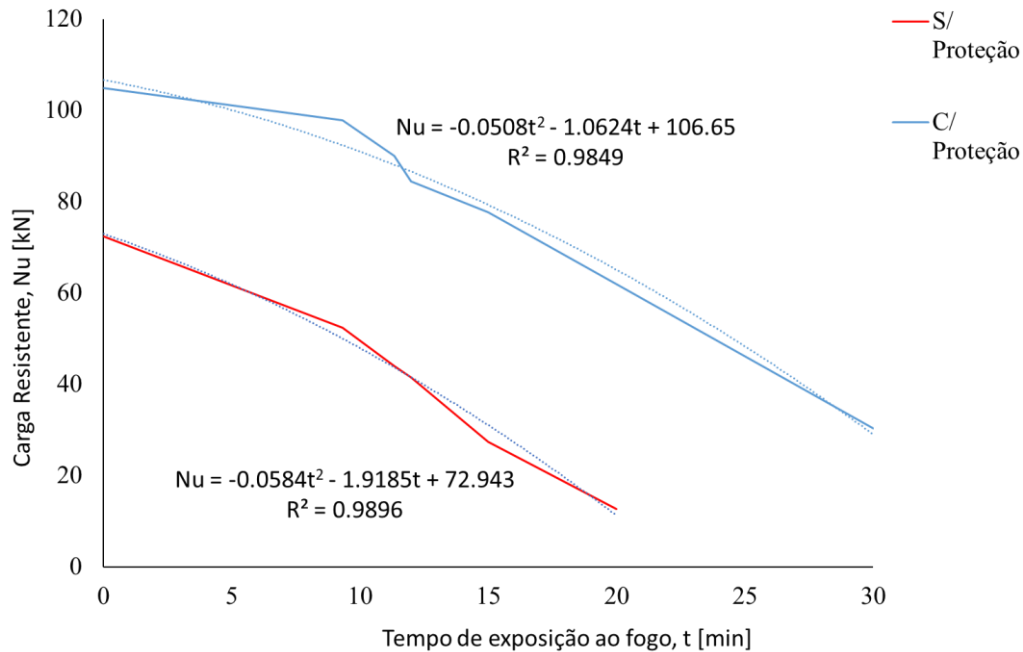


Figura 2: Carga resistente das ligações com e sem proteção, em função da exposição ao fogo

Observa-se uma tendência de desempenho mais elevado na ligação protegida pelas placas de gesso, retendo a sua capacidade de carga durante mais tempo, sobretudo nas fases iniciais da ação do fogo. Para o primeiro instante considerado, 560 s, a ligação sem proteção possui, aproximadamente, 72% da sua capacidade resistente à temperatura ambiente, a ligação com proteção conserva ainda 93%. Com o aumento do tempo de exposição, a ligação sem proteção apresenta uma redução progressiva mais acentuada da capacidade resistente, exibindo apenas 17% da resistência original aos 1200s. A partir deste ponto verifica-se uma perda total da resistência mecânica. Por contraste, embora a ligação protegida inicie uma descida acentuada após os 560 s, mantém um desempenho significativamente superior, conservando cerca de 59% da sua capacidade de carga resistente aos 1200 s.

Entre os 560 s e os 720 s, a capacidade resistente da ligação protegida diminui de forma substancial, período de degradação das propriedades mecânicas do gesso. Após os 900 s, embora o gesso já não exerça função estrutural relevante, continua a desempenhar o papel importante como barreira térmica, retardando a propagação de calor e, consequentemente, a perda de resistência dos componentes interiores da ligação.

Nas Figura 3 e Figura 4, apresentam-se o gradiente de tensões equivalentes de von Mises, para as ligações sem e com proteção, a 1200 s e 1800 s de exposição ao fogo, respetivamente, (Aguiar, 2025).

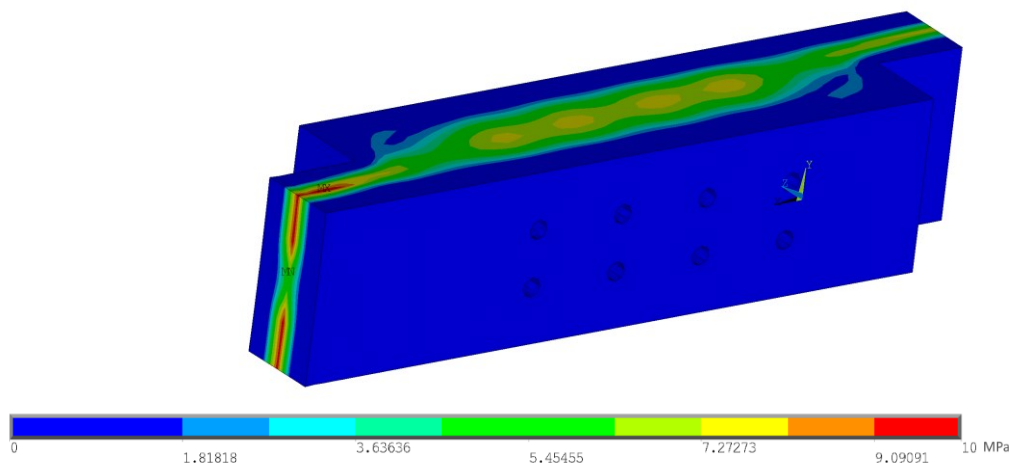


Figura 3: Tensão nos elementos de madeira sem proteção, para 1200 s de exposição ao fogo

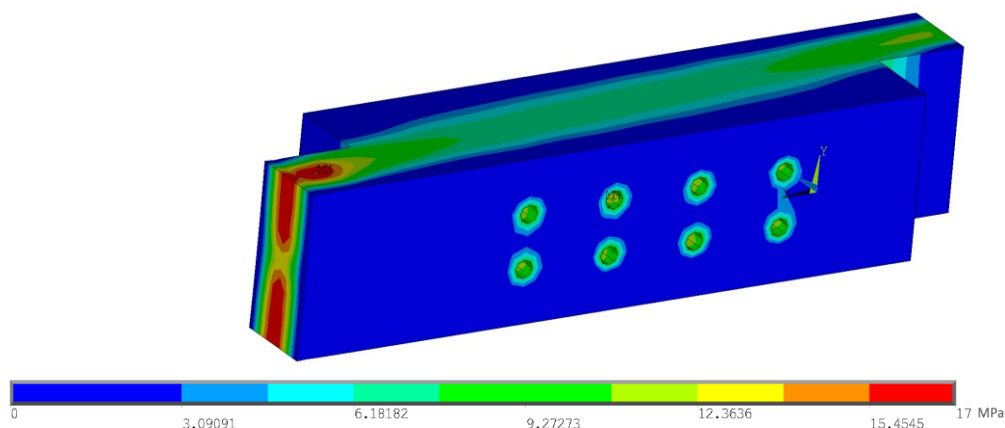


Figura 4: Tensão nos elementos de madeira com proteção, para 1800 s de exposição ao fogo

Para ambos os modelos, observa-se uma diminuição da tensão máxima observada nos elementos de madeira, 10 MPa para a ligação não protegida e 17 MPa para a protegida, nas zonas de aplicação de condições fronteira.

Na ligação protegida, além da tensão máxima ser consideravelmente superior, observa-se que os elementos de madeira têm um nível de tensões instalado, devido à sua capacidade em atrasar a carbonização, mantendo por isso, uma área resistente superior durante mais tempo de exposição ao fogo.

De acordo com o (Eurocódigo 5, parte 1-2, 2003), o tempo de resistência ao fogo para a ligação sem proteção, com cavilhas, é igual a 20 min (1200 s). Na verificação ao fogo das ligações, de acordo com o método simplificado, a ligação é verificada para a carga de 12 kN, correspondente ao resultado das ações de projeto na situação de exposição ao fogo. De acordo com os resultados da análise termomecânica, para 1200 s de exposição ao fogo, a carga resistente da ligação é igual a 12,66 kN, o que resulta num coeficiente de segurança de 1,05, consideravelmente inferior ao obtido através da verificação através do (Eurocódigo 5, parte 1-2, 2003). Além disso, como se observa na Figura 3, a tensão máxima suportada pela ligação no instante da rotura é de 10 MPa, muito inferior à resistência à tração em exposição ao fogo, calculada no método simplificado, de 23,55 MPa.

Esta discrepância pode dever ao facto de os membros de madeira da ligação em estudo possuírem uma espessura de 45 mm, o valor mínimo exigido pelo (Eurocódigo 5, parte 1-2, 2003), para atingir os 20 min de resistência ao fogo. Tal como observado nos resultados de (M. Audebert, et al. 2013), ligações com membros de espessura significativamente superior apresentam uma redução mais lenta da capacidade resistente ao longo do tempo.



(P. Palma e A. Frangi, 2019) realizaram um estudo dedicado à análise da influência de diferentes parâmetros geométricos na resistência ao fogo de ligações madeira-aço. Os autores demonstraram que a espessura dos membros de madeira destaca-se como uma variável crítica no desempenho termomecânico das ligações. O aumento da espessura dos membros de madeira tem consideravelmente mais impacto na resistência ao fogo da ligação do que os outros fatores geométricos considerados, como a altura da ligação, e o espaçamento e o diâmetro dos ligadores.

#### 4. CONCLUSÕES

Em termos globais, confirma-se que a ligação protegida apresenta uma degradação gradual, demorando consideravelmente mais tempo a apresentar, a total perda de resistência mecânica perante a ação do fogo, face à ligação sem proteção. Os resultados obtidos reforçam a eficácia do gesso como material de proteção passiva contra a ação do fogo.

Os resultados apresentados evidenciaram algumas das limitações do (Eurocódigo 5, parte 1-2, 2003), cujos fatores de redução de resistência não são dependentes de variáveis geométricas relevantes, como a espessura dos elementos ou a configuração dos ligadores, mas, como se demonstrou, estes fatores podem exercer uma influência significativa no comportamento de ligações em situação de incêndio.

#### REFERÊNCIAS

- Aguiar, J. (2025). *Resistência de ligações mecânicas em madeira em corte simples, com e sem proteção ao fogo* (Master's thesis, Instituto Superior de Engenharia do Porto, (Portugal). Disponível em <https://recipp.ipp.pt/home>
- British Standard, BS EN 1194:1999: Timber structures - Glued laminated timber. Brussels, 1999.
- B.H. Xu, A. Bouchaïr, M. Taazount, P. Racher. (2013). *Numerical simulation of embedding strength of glued laminated timber for dowel-type fasteners*, *J. Wood Sci.*, vol. 59, p. 17–23. doi: 10.1007/s10086-012-1296-0.
- Diário Da República, Regulamento Técnico de Segurança Contra Incêndio em Edifícios. Lisboa, 2020, p. 2–214.
- E.M.M. Fonseca. (2024). *Brief Overview of the Thermal and Mechanical Properties of Wood, Steel, and Gypsum Board for Structural Connections*, *GeoStruct Innov.*, vol. 2, p. 77–89. doi: 10.56578/gsi020203.
- European Committee for Standardization, Eurocode 5: Design of Timber Structures. Part 1-1: General Common Rules and Rules for Buildings. Brussels, 2004.
- European Committee for Standardization, Eurocode 5: Design of timber structures - Part 1-2: General Structural fire design. Brussels, 2003.
- International Organization for Standardization, ISO 834-1, Fire Resistance Tests - Elements of Building Construction, Part 1: General requirements, vol. 1. Geneva, 1999, p. 25.
- M. Audebert, D. Dhima, M. Taazount, A. Bouchaïr. (2013). *Thermo-mechanical behaviour of timber-to-timber connections exposed to fire*, *Fire Saf. J.*, vol. 56, p. 52–64. doi: 10.1016/j.firesaf.2013.01.007
- P. Palma, A. Frangi. (2019). *Modelling the fire resistance of steel-to-timber dowelled connections loaded perpendicularly to the grain*, *Fire Saf. J.*, vol. 107, p. 54–74. doi: 10.1016/j.firesaf.2017.12.001.



## COMPORTAMENTO AO FOGO DE VIGAS ALVEOLARES COM ABERTURAS CIRCULARES

**Luana V. da Silva<sup>1</sup>**  
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.

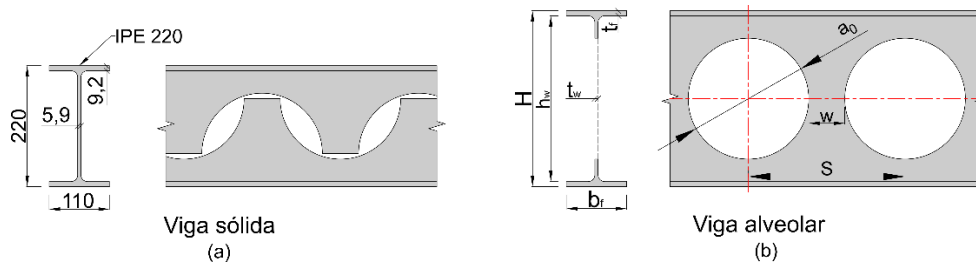


Figura 1. a) Perfil IPE 220 com suas dimensões nominais e esquema do processo de fabricação. b) Parâmetros geométricos da viga alveolar.

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.

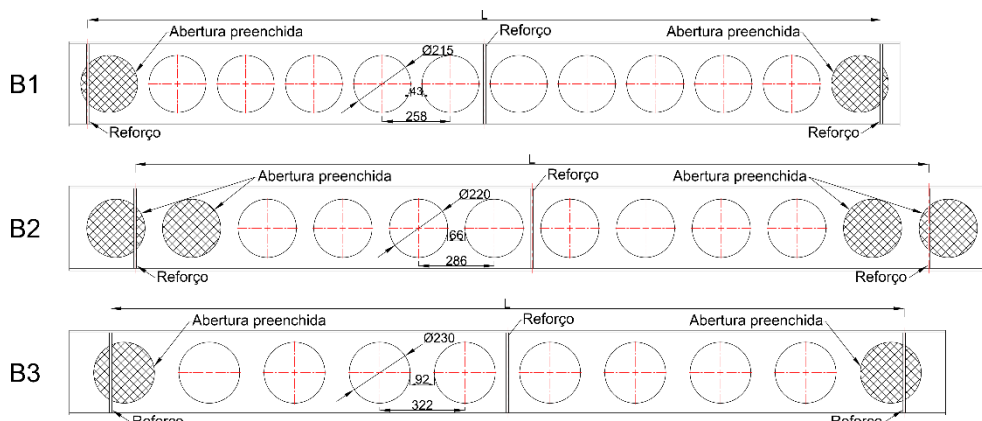


Figura 2. Configuração geométrica e detalhamento das vigas alveolares experimentais.

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.

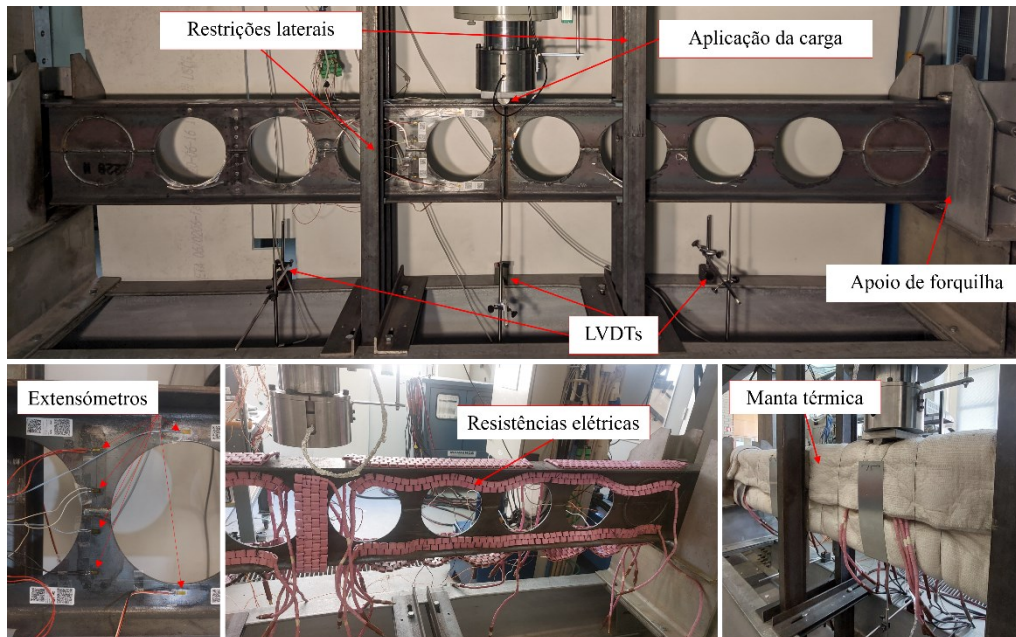


Figura 3. Vistas fotográficas da montagem experimental.

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.

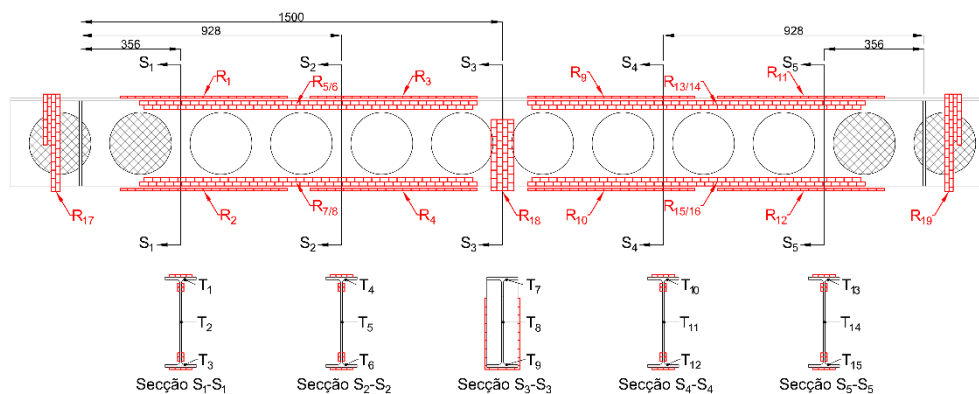


Figura 4. Sistema de aquecimento e monitorização da temperatura.

### 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 ( $0.3 f_{y,f}$ ), conforme o modelo proposto pela ECCS para perfis laminados a quente (ECCS, 1984).

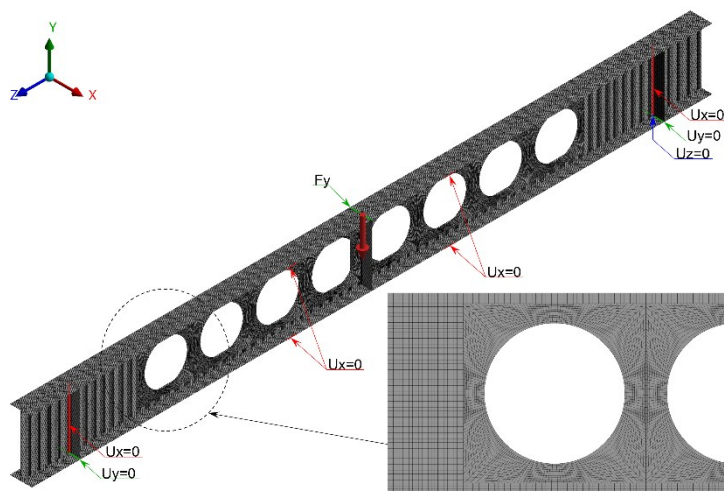


Figura 5. Condições de contorno do modelo numérico de detalhe da malha.

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.

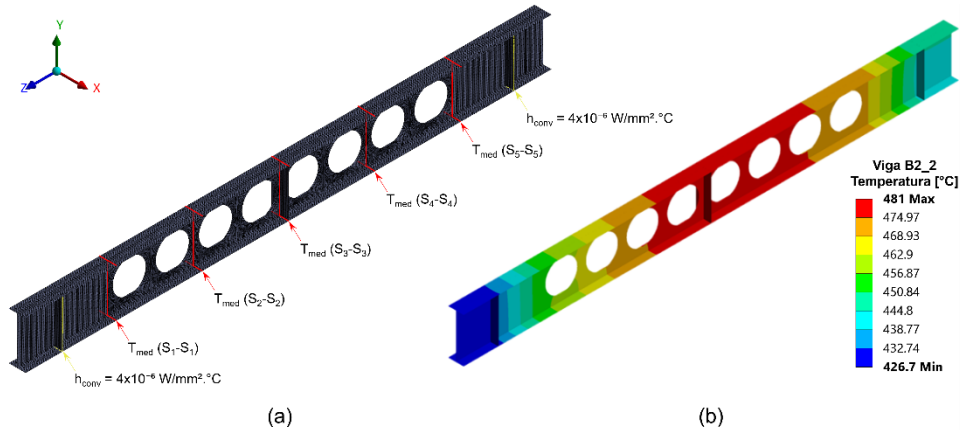


Figura 6. Análise térmica estacionária: a) Condições de contorno aplicadas. b) Distribuição de temperaturas na viga B2\_2.

#### 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.

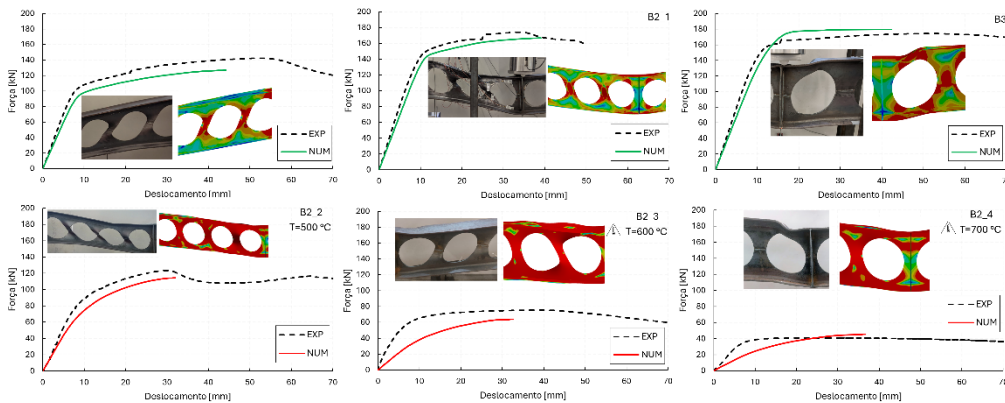


Figura 7. Comparação entre as curvas força-deslocamento experimentais (EXP) e numéricas (NUM).

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.

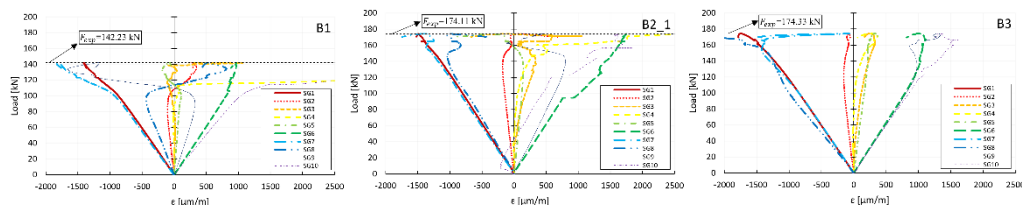


Figura 8. Resultados dos extensómetros para as vigas B1, B2\_1 e B3 à temperatura ambiente

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 <sub>1</sub> -S <sub>1</sub>	Secção S <sub>2</sub> -S <sub>2</sub>	Secção S <sub>3</sub> -S <sub>3</sub>	Secção S <sub>4</sub> -S <sub>4</sub>	Secção S <sub>5</sub> -S <sub>5</sub>	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 <sub>EXP</sub> [kN]	F <sub>NUM</sub> [kN]	F <sub>EXP</sub> / F <sub>NUM</sub>
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
<b>Média</b>			0.96
<b>Desv. padrão</b>			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, & Veríssimo, 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>



**9JORNINC-4JORPROCIV**

9<sup>ª</sup> Jornadas de Segurança aos Incêndios Urbanos  
4<sup>ª</sup> Jornadas de Proteção Civil

Coimbra, 7 de novembro de 2025



## USE OF BIOCHAR TO ENHANCE GEOTECHNICAL PERFORMANCE OF FOREST ROADS: A PRELIMINARY INVESTIGATION

**João Murta**  
Student  
IPC – Coimbra

**Carlos Renato Rodrigues**  
Lab. Technician  
IPC – Coimbra

**Luis Araújo Santos<sup>‡‡</sup>**  
Professor  
IPC – Coimbra  
SUSCita – Coimbra

**Verónica Oliveira**  
Researcher  
IPC – Coimbra  
CERNAS – Coimbra  
SUSCita – Coimbra

### SUMMARY

Climate change has led to an increase in extreme events like fires, prompting both national and local authorities to invest in communication infrastructure to ensure year-round access. In sensitive areas such as forests, traditional soil stabilisation methods like cement or lime are not feasible. Early research indicates that biochar enhances soil properties and significantly improves the stress, strain, and resistance behaviour of granular soils. This paper introduces a preliminary study as part of a larger investigation into the potential of biochar to improve forest roads, aiming to lower maintenance costs. These roads are vital for forest management and firefighting, and the paper highlights the key characteristics of this geomaterial.

### 1. INTRODUCTION

The mimosa (*Acacia dealbata*), native to Australia, was brought to Portugal in the 19th century for ornamental use and soil erosion control. However, it has become highly invasive, spreading across large parts of Portugal (Marchante et al., 2008). This species is particularly aggressive due to its rapid growth, large seed production—seeds that can stay viable for decades—and its ability to regenerate easily after pruning or fire. Moreover, it releases chemicals into the soil that hinder the growth of other plants, enabling it to dominate ecosystems and significantly reduce local biodiversity.

In Portugal, its distribution mainly occurs in the central and northern regions, although it is also present in other parts of the country. The species prefers acidic soils and is commonly found in degraded areas, along roadsides, riverbeds, slopes, and regions affected by fires. Its ability to colonise is especially noticeable following environmental disruptions, such as forest fires, where it quickly takes hold and hinders the regeneration of native plants. Due to its harmful ecological effects, mimosa is listed as an invasive species in Portugal, and its planting, cultivation, transport, trade, and release into the wild are strictly forbidden. Moreover, there is a requirement to control and eradicate the species, particularly in public spaces or protected ecological zones.

Converting mimosa into biochar directly helps control this invasive plant. Removing biomass reduces its ability to reproduce and spread, but it cannot fully eliminate the plant, as it can regrow from its roots. Biochar is a carbon-rich material made through pyrolysis, a process that thermally decomposes biomass in low-oxygen conditions. A key benefit is carbon sequestration: converting mimosa wood into biochar stabilises the carbon within the plant in solid form, helping to mitigate climate change by preventing CO<sub>2</sub> release. Additionally, pyrolysis produces gaseous

---

<sup>‡‡</sup> Luis M. Araújo Santos – Instituto Politécnico de Coimbra, Rua da Misericórdia, Lagar dos Cortiços – S. Martinho do Bispo, 3045-093 Coimbra, Portugal. e-mail: [imsantos@isec.pt](mailto:imsantos@isec.pt)



and liquid by-products like synthesis gas and bio-oil, which can be harnessed as energy sources. These by-products improve process efficiency and enable thermal or electrical energy generation in suitable facilities.

Despite the many benefits this approach offers, it also presents challenges and risks. Collecting, transporting, and processing biomass can incur significant logistical expenses, particularly in hard-to-reach areas. The implementation of this technology demands proper infrastructure. Additionally, controlling plant shoots after cutting is crucial. Mimosas have a strong regenerative ability and can regrow from remaining roots; thus, transforming them into biochar requires additional control methods such as localised herbicide application, complete bark removal from the trunk, or mechanical/manual root removal. Pyrolysis must be performed in strictly controlled conditions with certified equipment and adherence to environmental standards to prevent the release of toxic or polluting substances. Ensuring the biochar's quality involves obtaining specific certifications like the European Biochar Certificate (EBC), which verifies its safety and suitability for soil use.

The conversion of mimosa into biochar via pyrolysis presents an innovative and promising method for managing this invasive species in Portugal. It offers a dual benefit: protecting ecosystems and repurposing plant waste to combat climate change. Recently, biochar has gained attention as a sustainable and innovative material in geotechnical engineering. While initially used in agriculture and environmental applications, this porous substance, produced from organic waste through pyrolysis, exhibits physical and chemical traits that can improve soil properties. Adjusting features such as density, porosity, water retention, and mechanical strength opens new possibilities for its application in geotechnical projects.

Efforts to find alternative, environmentally friendly materials have led to exploring biochar for soil stabilisation, slope reinforcement, embankment construction, and foundation improvement. Its use can also help with moisture regulation in expansive soils and reduce erosion issues. These advantages make biochar a promising component in sustainable infrastructure, although additional research is necessary to understand its interactions with various soil types and environmental conditions. Traditionally employed as a soil conditioner in agriculture, biochar has demonstrated significant potential for enhancing geotechnical properties such as strength, compressibility, and water retention (Wani et al., 2022).

Recent studies demonstrate that incorporating biochar into soils can markedly affect their mechanical properties. For instance, when mixed with clayey or sandy loam soils, biochar modifies the maximum dry density and optimum moisture content, resulting in lower density and enhanced water retention. This benefits projects focused on erosion control, slope stabilisation, or landfill covers (Wani et al., 2022). Experimentally, research by Manahiloh (2018) investigated soil-biochar mixtures in road construction, with preliminary results showing promise. Early findings suggest biochar improves soil characteristics and notably impacts soil strength (Eze et al., 2023). Its positive influence is also evident in the stress-strain and resistance behaviour of granular soils (Orense and Pardo, 2016). Additionally, biochar increases soil compressibility, which can be useful in hydraulic barriers or stormwater retention systems. While these effects vary based on soil type and biochar particle size, the findings support its potential as a sustainable geotechnical material.

Climate change has heightened the frequency of extreme events like wildfires, prompting both national and local authorities to invest in communication infrastructure that remains accessible throughout the year. Unlike conventional materials, soil stabilisation methods used in sensitive regions enhance infrastructure resilience without damaging local ecosystems. One sustainable alternative involves using biochar, a carbon-rich stable material, derived from the pyrolysis of acacia, an invasive species, which helps preserve biodiversity and recycles waste.

## **2. LABORATORY CHARACTERISATION**

Characterising biochar as a geomaterial involves reducing it to the smallest possible particle size because biochar particles tend to have coarse and irregular grains (see Figure 1a). To achieve this, tools like a mortar and a rubber pestle (see Figure 1b) were used to prevent damaging the sample. The characterisation encompassed several



tests: (i) identification tests to recognise and classify biochar as a geomaterial, (ii) resistance tests, and (iii) deformation tests.



Figure 1: Biochar preparation: a) material prior to disintegration; b) disintegration process.

Granulometric analysis was conducted as identification tests, following NP EN 933-1 (IPQ, 2014), which involves coarse and fine sieving and sedimentation to determine soil particle size distribution. The soil consistency limits were studied using the methodology specified in British standard BS 1377-2 (BS, 1990). This approach was selected because applying the Portuguese standard was unfeasible, as it requires a Casagrande procedure. Since it did not show clear plastic behaviour, only the liquidity limit of the biochar could be measured. The activity of the fine fraction was assessed via the methylene blue test, following NP EN 933-9 (IPQ, 2017) procedures. Lastly, the density of solid particles was measured according to NP EN ISO 17892-3 (IPQ, 2018).

To evaluate the geotechnical resistance parameters of biochar—specifically cohesion ( $c'$ ) and the angle of shear resistance ( $\phi'$ )—direct shear tests were carried out on samples in different initial states. Using samples with varying densities allows for the assessment of the material's behaviour under different conditions, simulating real-world field scenarios. Loose samples represent soils with lower compaction, while dense samples mimic situations where soil has been compacted, such as in engineering projects. This approach enables analysis of how density affects resistance parameters, as denser materials generally display higher shear strength due to increased particle contact and reduced movement. The precise state (loose or dense) was not quantified, since maximum and minimum void ratios were not measured. The shear box accommodates square samples with 6 cm sides, which are tested through horizontal movement. During testing, shear stresses are recorded based on displacement and normal stress, indicating failure points. Both sample types were subjected to various initial confinement stresses, applied via calibrated weights ranging from 2 to 30 kg. Deformation and friction force were monitored throughout, facilitating an assessment of the soil's shear strength behaviour.

To further investigate how biochar deforms under constant stress, a uniaxial compression test was conducted with a standard edometric device. Initial results indicated that biochar consolidates very quickly, allowing load increments to be shortened from 24 hours to only 1 hour. Besides the loading cycle, an unloading cycle was also carried out to understand how this geomaterial behaves during unloading and reloading.

### 3. DISCUSSION OF RESULTS

#### 3.1 Material identification

The results of the granulometric analysis are summarised in Figure 2. Using the data and the Unified Soil Classification System, biochar is identified as poorly graded sand, characterised by a narrowly distributed particle



size with mostly similar grains. Additionally, a substantial amount of fines is present, affecting its compaction, permeability, and plasticity. The triangular textural classification, which assesses the relative proportions of sand, silt, and clay, shows that biochar falls into the silt sand category. This classification suggests that, while sand dominates, the material also contains a notable amount of fine silt particles, enhancing water retention and reducing drainage compared to pure sand.

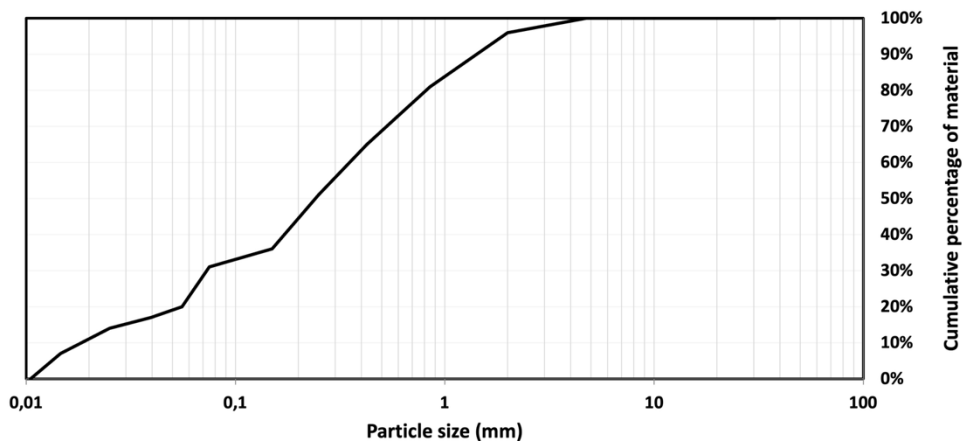


Figure 2: Biochar particle size distribution curve.

The results of the biochar identification tests, including its plasticity and fine fraction analysis, are summarised in Table 1. The methylene blue (*MB*) value, indicating the sample's adsorption capacity, is relatively low, implying a moderate presence of active fines in the biochar. This aligns with the granulometric analysis and consistency limits, confirming that biochar primarily behaves like sandy material with some fine silt, but without significant clay activity.

Additionally, measuring the density of solid particles (*G*) reveals the organic nature of biochar. The observed value is much lower than the typical value for sandy soils (2.65), which is due to the lightweight, porous structure of the material.

Table 1: Biochar identification tests.

<i>G</i> (-)	<i>MB</i> (ml/g)	<i>w<sub>L</sub></i> (%)
1.46	1.153	128

### 3.2 Stress-strain behaviour

The stress-strain behaviour of biochar was analysed based on results from direct shear box and uniaxial compression tests. During the direct shear test, loose samples experienced six normal stresses ( $\sigma$ ), calibrated with weights ranging from 2 kg to 30 kg. For dense samples, tests were limited to a normal stress of 20 kg. For each test, the peak shear stresses ( $\tau_{peak}$ ) and residual shear stresses ( $\tau_{res}$ ) were recorded (see Table 2).

By graphically illustrating the resistant stresses on the Mohr-Coulomb plane, the failure envelope of biochar can be identified, as shown in Figure 3 for dense samples along with their geotechnical resistance parameters, which are summarised in Table 3. Even for loose samples, the peak values are notably high compared to typical soil values, even when the soil is compacted. Maksimovic (2009) noted that very dense sands- unlikely in forest areas- can have shear strength angles slightly below 50°. These findings suggest that mixing biochar with less competent local soils can significantly improve resistance in forest road platforms. Additionally, as shown in Figure 3, the correlation coefficients are significant, indicating the reliability of the tests conducted.

Table 2: Peak and residual shear stresses across various initial conditions and confinement levels stresses.



Weight (kg)	$\sigma$ (kPa)	Loose samples		Dense samples	
		$\tau_{peak}$ (kPa)	$\tau_{res}$ (kPa)	$\tau_{peak}$ (kPa)	$\tau_{res}$ (kPa)
2	19.6	22.9	23.0	31.4	27.5
5	27.7	35.8	34.2	47.6	40.5
7	33.2	38.2	35.7	-	-
10	41.3	56.3	54.0	39.9	32.7
20	68.6	83.5	85.1	94.0	88.66
30	95.8	104.3	102.5	-	-

Table 3: Peak and residual shear stresses for different initial states and confinement stresses.

States	Loose samples		Dense samples	
	$c'$ (kPa)	$\phi'$ (°)	$c'$ (kPa)	$\phi'$ (°)
Peak	0	46.2	0	55,1
Residual	0	36.7	0	52,9

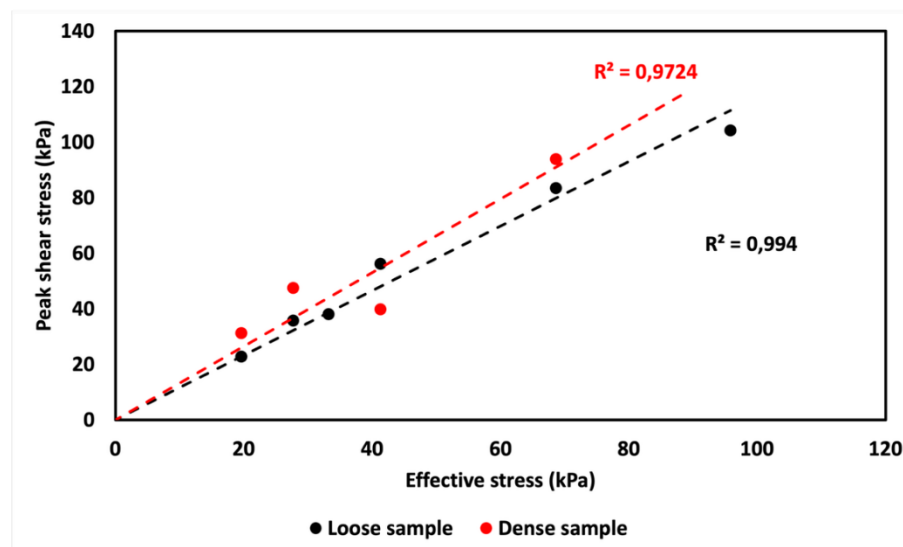


Figure 3: Failure envelope for dense samples.

The uniaxial compression test involved seven load stages, ranging from 1 to 64 kg, and three unloading stages up to 4 kg. By integrating all the results from the previous time-settlement graphs into a single plane ( $e - \ln \sigma$ ), the evolution of biochar's compressive behaviour under confined loads can be visualised (Figure 4). Overall, the curve indicates a typical trend of decreasing void ratio with increasing stress, demonstrating the material's progressive compaction. Notably, due to its organic nature, the material appears highly compressible. However, in the final load stage, the curve reverses, with the void ratio seemingly increasing. This anomaly results from a test error, as continuous compression should not cause volume expansion. During this stage, the load arm approached its lower limit, restricting free deformation of the sample. This issue affected the vertical displacement readings and rendered the last data point invalid.

The graph also highlights differences between the loading and unloading segments. The line connecting the first three points of the loading phase is not parallel to the line of the unloading phase points, showing that biochar's behaviour during unloading differs from earlier loading phases. According to soil consolidation theory, unloading and reloading typically follow the same behaviour, setting them apart from virgin conditions. This supports the idea that, despite being initially compressible, biochar has a non-recoverable structure. However, since only one test was performed and some issues were noted, no definitive conclusions should be drawn.

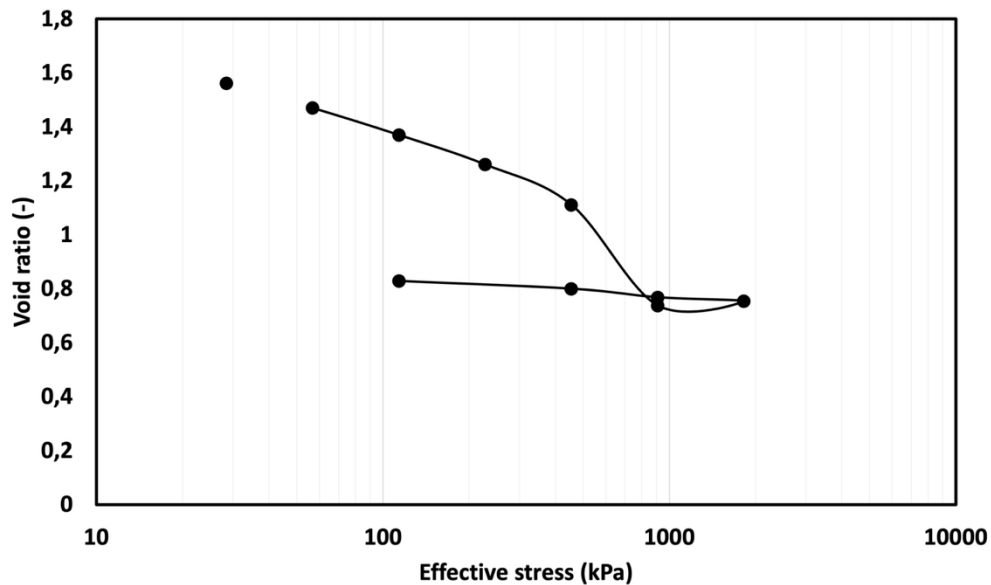


Figure 4: Variation of the void index with the effective stress.

#### 4. CONCLUSIONS

Initial studies on biochar from acacia pyrolysis reveal notable geotechnical properties. Classified as silty sand, biochar has a considerably lower solid particle density than sands. Mechanically, it shows strength parameters that may exceed those of traditional compacted soils, indicating a potential to enhance soil strength significantly. However, uniaxial compressibility tests show that biochar is highly compressible, which could influence its suitability for some geotechnical uses.

This research highlights biochar's promising role in stabilising forest roads but suggests further research to explore factors like mixture ratios and erosion effects.

#### REFERENCES

- BS (1990). *Methods of tests for soils for civil engineering purposes – Part 2: Classification tests*. British Standard, BS 1377-2.
- Eze, F. E., Okeke, E. C., Arinze, C. V., & Adejumo, T. E. (2023). Effects of bio-char on geotechnical properties of lateritic soil. *International Journal of Engineering Processing and Safety Research* 2(2). <https://cambridgepublishing.com/ijepsr/article/view/73>.
- IPQ (2014). *Test for geometrical properties of aggregates. Part 1: Determination of particle size distribution. Sieving method*. Instituto Português da Qualidade, NP EN 933-1. (in Portuguese).
- IPQ (2017). *Test for geometrical properties of aggregates. Part 9: Assessment of fines. Methylene blue test*. Instituto Português da Qualidade, NP EN 933-9:2009+A1. (in Portuguese).
- IPQ (2018). *Geotechnical investigation and testing. Laboratory testing of soil. Part 3: Determination of particle density*. Instituto Português da Qualidade, NP EN ISO 17892-3. (in Portuguese).
- Manahiloh, K. N., & Lamprinakos, R. (2018). *Experimental evaluation of the engineering behavior of soil-biochar mixture as a roadway construction material* (Final Report CAIT-UTC 42). Centre for Advanced Infrastructure and Transportation, University of Delaware. <https://doi.org/10.1061/9780784482117.013>
- Maksimovic, M. (2009). *Note on the shearing strength of sand*. Proceedings of the 17<sup>th</sup> International Conference of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Alexandria, Egypt. <https://www.issmge.org/publications/online-library>



- Marchante, E., Kjølner, A., Struwe, S., & Freitas, H. (2008). Short- and long-term impacts of *Acacia longifolia* invasion on the belowground processes of a Mediterranean coastal dune ecosystem. *Applied Soil Ecology*, 40(2), 210-217. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2008.04.004>.
- Orense, R., & Pardo Tobar, G. (2016). Use of biochar as countermeasure against liquefaction. In *New Zealand Society for Earthquake Engineering Annual Technical Conference*, Christchurch, NZ (pp. 1-8). New Zealand Society for Earthquake Engineering Inc.
- Wani, I., Kushvaha, V., Garg, A., Kumar, R., Naik, S., & Sharma, P. (2022). *Review on effect of biochar on soil strength: Towards exploring usage of biochar in geo-engineering infrastructure*. *Biomass Conversion and Biorefinery*. <https://doi.org/10.1007/s13399-022-02795-5>



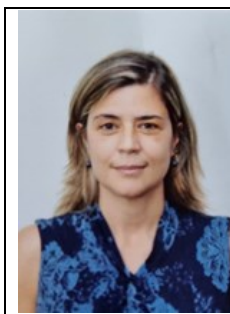
**9JORNINC-4JORPROCIV**

9<sup>ª</sup> Jornadas de Segurança aos Incêndios Urbanos  
4<sup>ª</sup> Jornadas de Proteção Civil

Coimbra, 7 de novembro de 2025



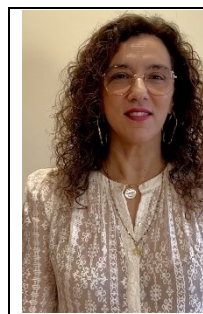
## INFLUÊNCIA DA TERRA DIATOMÁCEA RESIDUAL NO COMPORTAMENTO DO BETÃO A TEMPERATURAS ELEVADAS



**Mónica Fernandes  
Gomes<sup>§§</sup>**  
Aluna  
GICOS/IPB/Bragança



**Luciane Marcelo  
Miscovicz**  
Mestre  
GICOS/IPB/Bragança



**Débora Macanjo  
Ferreira**  
Prof. Coordenadora  
GICOS/IPB/Bragança

### SUMÁRIO

O setor da construção civil enfrenta o desafio crescente de reduzir os impactos ambientais associados ao consumo intensivo de recursos naturais e à elevada emissão de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) resultantes da produção de cimento. Neste contexto, a incorporação de resíduos industriais e subprodutos como materiais cimentícios suplementares tem-se revelado uma estratégia eficaz para aumentar a sustentabilidade dos betões. A terra diatomácea residual (TDR), subproduto do processo de filtração de vinhos, apresenta um elevado teor de sílica e potencial pozolânico significativo, revelando-se promissora para a substituição parcial de cimento e da areia. O presente estudo avaliou o comportamento do betão com incorporação de TDR quando sujeito a temperaturas de 20 °C, 250 °C, 350 °C e 500 °C, considerando diferentes regimes de arrefecimento (gradual e acelerado) e tempos de cura pós-arrefecimento (24 horas e 28 dias). Os resultados demonstraram que, à temperatura ambiente, a resistência à compressão das misturas com incorporação de TDR é estatisticamente equivalente à do betão de referência. Contudo, a exposição a altas temperaturas evidenciou maior sensibilidade térmica e variabilidade da resistência residual nas composições com TDR. O arrefecimento em água mostrou-se benéfico para a recuperação mecânica, especialmente após 28 dias de cura em câmara húmida. Em contrapartida, verificou-se ocorrência de spalling nos provetes com incorporação de TDR expostos a 500 °C com taxa de aquecimento de 5 °C/min, atribuída à maior densidade e baixa porosidade destes provetes. Os resultados indicam que a TDR constitui um material ambientalmente vantajoso e tecnicamente viável para a substituição parcial do cimento e, principalmente, da areia em composições de betão sustentável.

**PALAVRAS-CHAVE:** Terra diatomácea residual; temperaturas elevadas; substituição de cimento; substituição de areia; resistência à compressão.

### 1. INTRODUÇÃO

O aumento global da temperatura média e as metas de neutralidade carbónica têm impulsionado a investigação de alternativas sustentáveis no sector da construção civil. O fabrico de cimento Portland é responsável por cerca

<sup>§§</sup> Autor correspondente – Gicos, Instituto Politécnico de Bragança, Campus de Santa Apolónia 5300-253 Bragança, Portugal  
email: [a13466@alunos.ipb.pt](mailto:a13466@alunos.ipb.pt) <https://gicos.ipb.pt/>



de 8 % das emissões globais de CO<sub>2</sub> [1], enquanto a extração de areia contribui significativamente para a degradação ambiental e escassez de recursos [2]. Assim, a substituição parcial destes componentes por resíduos industriais ou subprodutos naturais tem sido amplamente estudada [3].

Entre as alternativas emergentes destaca-se a terra diatomácea residual (TDR), proveniente da indústria vinícola. Este material apresenta um elevado teor de dióxido de silício (87–91 %) [4], sendo classificado como uma pozolana natural capaz de reagir com o hidróxido de cálcio formado durante a hidratação do cimento, promovendo ganhos de resistência e de durabilidade. Estudos anteriores [5, 6] demonstraram que a incorporação de TDR melhora a compacidade e reduz a absorção de água do betão.

A resistência do betão em condições extremas, como incêndios, constitui um aspeto fundamental para a segurança estrutural. Pesquisas anteriores [7, 8] evidenciam que, quando exposto a temperaturas elevadas, o betão sofre degradações microestruturais e perda de resistência mecânica. O comportamento após o arrefecimento depende não apenas da temperatura atingida, mas também do tipo de arrefecimento e do tempo de cura subsequente [9].

Neste contexto, o presente estudo insere-se no projeto BacchusTech, que tem como objetivo valorizar resíduos provenientes da vinificação em diferentes aplicações industriais. O principal objetivo consiste em avaliar o comportamento mecânico do betão com incorporação de TDR após exposição a altas temperaturas e diferentes processos de arrefecimento, de modo a determinar a sua viabilidade técnica e ambiental.

## 2. METODOLOGIA

O programa experimental foi desenvolvido no Laboratório de Materiais de Construção do Instituto Politécnico de Bragança, utilizando materiais previamente caracterizados por Zolin [5] e Schincaglia [6].

### 2.1 Materiais e composições

Foram produzidas três composições distintas de betão: uma de referência (REF) e duas com incorporação de terra diatomácea residual (TDR), substituindo parcialmente o cimento (RC) e a areia (RA).

Os materiais utilizados (Figura 5) incluíram cimento Portland de calcário CEM II/B-L 32,5 N (1), areia fina seca (2), brita (4), água da torneira (3) e TDR (5) proveniente do processo de filtração de vinhos da empresa Caves Campelo. Este material foi posteriormente calcinado no laboratório a 900 °C durante 2 horas, de acordo com as recomendações de estudos anteriores [5, 6, 10]. A opção pela utilização de TDR calcinada justifica-se pela necessidade de eliminação da matéria orgânica presente no resíduo, a qual poderia comprometer a hidratação do cimento e consequentemente, a durabilidade do betão.



Figura 5: Materiais utilizados para o fabrico dos provetes.



Com base no estudo de Schincaglia [6], foram definidas substituições de 10 % do cimento (traço RC) e 5 % da areia (traço RA) por TDR calcinada, bem como um traço de referência (REF), sem incorporação de TDR. A Tabela 1 apresenta a quantificação dos materiais utilizados na preparação de cada composição.

Tabela 1: Quantificação de materiais para elaboração de cada traço (6).

Traço	Cimento	Areia	Brita	TD	Água
	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>
REF	350,00	804,35	1010,06	0,00	218,50
RC	315,00	804,35	1010,06	35,00	218,50
RA	350,00	764,13	1010,06	40,22	218,50

A preparação do betão seguiu as recomendações da norma NP EN 12390-2:2019 [11], garantindo homogeneidade e consistência adequadas. Os provetes de betão, decorridas 24 horas, foram desmoldados e posteriormente curados em câmara húmida a  $(20 \pm 2) ^\circ\text{C}$  e  $(100 \pm 5) \%$  de humidade relativa até à realização dos ensaios, conforme Figura 6.



(a)

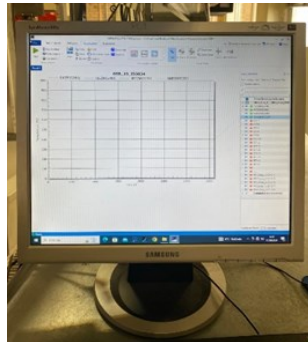


(b)

Figura 6: (a) Provetes moldados; (b) Provetes desmoldados em cura na câmara húmida.

## 2.2 Exposição a elevadas temperaturas

Os provetes foram expostos a diferentes patamares de temperaturas ( $250 ^\circ\text{C}$ ,  $350 ^\circ\text{C}$  e  $500 ^\circ\text{C}$ ), com taxa de aquecimento controlada ( $2\text{--}5 ^\circ\text{C}/\text{min}$ ). Para monitorizar a temperatura interior do forno, foi utilizado um termopar tipo K de controlo, que permitiu comparar as temperaturas internas com as fornecidas pelo leitor do próprio equipamento. A temperatura no interior dos provetes foi medida através termopares tipo K inseridos em pequenos furos de 3 mm no centro de um provete de cada traço (Figura 7). Após o forno atingir o patamar definido, o aquecimento foi mantido durante 2 horas para estabilização térmica.



(a)



(b)

Figura 7: Ensaio a elevadas temperaturas. (a) Central de acompanhamento dos termopares; (b) Provetes em posição de ensaio com termopares.

### 2.3 Ensaio mecânicos

A avaliação experimental da influência da incorporação de terra diatomácea residual (TDR) nas propriedades mecânicas do betão foi realizada através de ensaios de resistência à compressão sobre provetes cúbicos de 100 × 100 × 100 mm, conforme as especificações da norma NP EN 12390-2:2019 e NP EN 12390-3:2019 [11, 9].

Antes de cada ensaio, os provetes foram pesados para determinação da massa inicial e, posteriormente, submetidos ao ensaio de compressão axial, com uma velocidade de carregamento de 13 kN/s. O programa experimental incluiu quatro patamares de temperatura (20 °C, 250 °C, 350 °C e 500 °C) e dois métodos de arrefecimento, gradual (G) e acelerado (A).

O arrefecimento gradual consistiu em manter os provetes no forno durante 10 minutos após o fim do aquecimento, seguidos de 24 horas à temperatura ambiente com ventilação natural. O arrefecimento acelerado consistiu em manter os provetes no forno durante 10 minutos após o fim do aquecimento e, posteriormente, na imersão dos provetes em água durante 2 horas, seguida de 24 horas à temperatura ambiente. Em ambos os aquecimentos, ao fim das 24 horas à temperatura ambiente, os provetes foram pesados; metade dos provetes de cada traço foram ensaiados à compressão (24 horas) e a outra metade foi armazenada em câmara húmida até completarem 28 dias do aquecimento, para posteriormente serem pesados novamente e então ensaiados à compressão. Este procedimento permitiu avaliar o comportamento mecânico residual e a eventual recuperação da resistência por reidratação [12, 13].

Para cada condição experimental (traço, temperatura, tipo de arrefecimento e idade de ensaio), foram testados três provetes, totalizando 117 provetes. Os resultados obtidos foram analisados estatisticamente no software RStudio, com o objetivo de identificar efeitos significativos das variáveis independentes sobre a resistência residual à compressão.

Inicialmente, verificaram-se os pressupostos para a aplicação de métodos paramétricos, nomeadamente a normalidade e a homogeneidade de variâncias. A normalidade dos dados foi avaliada através do teste de Shapiro–Wilk, considerando-se uma distribuição normal quando  $p > 0,05$ . A homogeneidade das variâncias foi verificada pelo teste de Levene, adotando o mesmo critério para aceitação da hipótese nula ( $p > 0,05$ ) [14].

Atendidos esses pressupostos, aplicou-se a análise de variância (ANOVA) para a comparação das médias dos grupos. A ANOVA permite determinar se as diferenças observadas entre as médias das amostras são estatisticamente significativas, considerando os parâmetros: Soma dos Quadrados (SQ), Graus de Liberdade (gl),



Média dos Quadrados (MQ), Estatística F e valor-p. Um valor-p inferior a 0,05 indica rejeição da hipótese nula e, consequentemente, a existência de diferenças significativas entre os grupos analisados.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os ensaios à compressão realizados em temperatura ambiente (20 °C) indicaram que a substituição parcial de cimento e areia por terra diatomácea residual (TDR) não provocou perdas significativas de desempenho mecânico. As resistências médias obtidas foram de 20,75 MPa para o traço de referência (REF), 19,96 MPa para o traço com 10% de substituição de cimento (RC) e 20,52 MPa para o traço com 5 % de substituição de areia (RA). Estes resultados confirmam que o teor de sílica presente na TDR contribui para reações pozolânicas, promovendo um ganho de resistência a longo prazo e maior estabilidade estrutural, conforme observado por Li et al. (2020) e Hasan et al. (2022) [15, 16], (Figura 8). A análise estatística (ANOVA) revelou diferenças significativas entre as composições ( $p < 0,05$ ), porém dentro de margens aceitáveis para betões com adições pozolânicas.

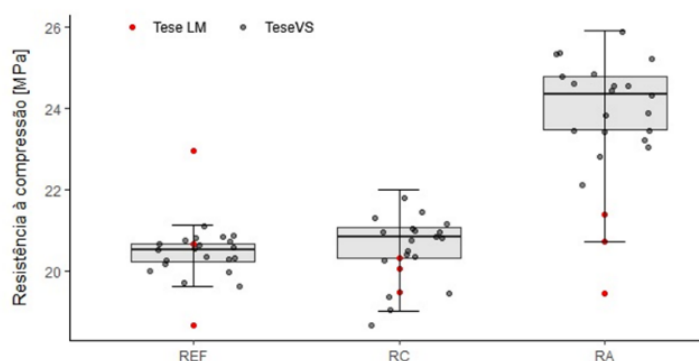


Figura 8: Comparação por Boxplot dos resultados da literatura com os obtidos neste estudo (6).

Após exposição a 250 °C, observou-se um ligeiro aumento da resistência à compressão nos provetes submetidos a arrefecimento gradual (G), com incrementos de 8,43 % (REF), 1,90 % (RC) e 9,50 % (RA) em relação ao estado inicial (Figura 9). Este comportamento está associado ao fenómeno de reidratação da sílica amorfa e à redistribuição da água nos poros capilares, típica do intervalo entre 200 °C e 300 °C [12]. Em contraste, os provetes arrefecidos de forma acelerada (A) apresentaram redução de resistência, evidenciando o efeito negativo do choque térmico e da formação de microfissuras internas. Aos 28 dias, observou-se a recuperação de resistência em todos os traços, destacando a ação da humidade na recomposição parcial da matriz cimentícia pós-exposição a altas temperaturas, especialmente nos provetes arrefecidos de forma acelerada.

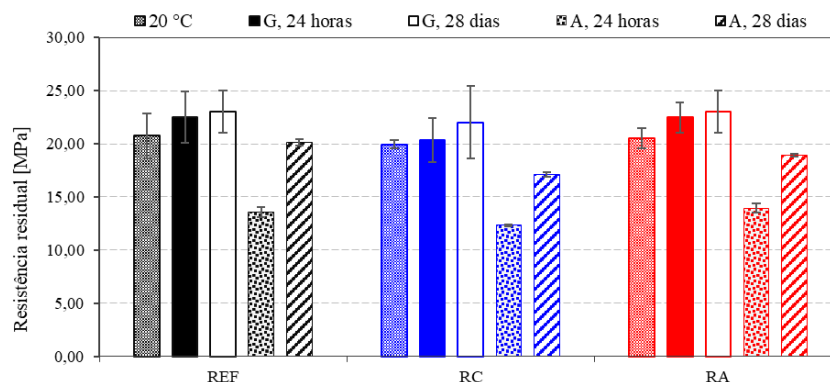


Figura 9: Resistência residual à compressão após exposição a 250 °C.



A análise de variância (Tabela 2) confirmou influência estatisticamente significativa do tipo de arrefecimento sobre a resistência residual ( $p < 0,05$ ) Tabela 2: Resultados da análise de variância para diferentes arrefecimentos em 24 horas.

Fonte de variação	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>Valor-p</i>
Arrefecimento	324,20	1	324,2	156,61	$3,03.10^{-8}$
Traço	12,80	2	6,40	3,09	0,08
Interação	0,60	2	0,30	0,15	0,85
Resíduo	24,80	12	2,10	-	-

A temperatura de 350 °C marcou o início de uma degradação progressiva da resistência, especialmente nos provetes sujeitos ao arrefecimento acelerado. Esta redução está associada à decomposição parcial do hidróxido de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) e à instabilidade dos produtos de hidratação C–S–H. Os provetes com incorporação TDR apresentaram um comportamento mais estável, sugerindo que a sílica reativa da diatomita contribui para a formação de fases adicionais de silicato de cálcio hidratado (C–S–H) mais resistentes à temperatura. O arrefecimento gradual mostrou-se mais eficaz na mitigação de danos microestruturais, corroborando as observações de estudos anteriores de [17, 18].

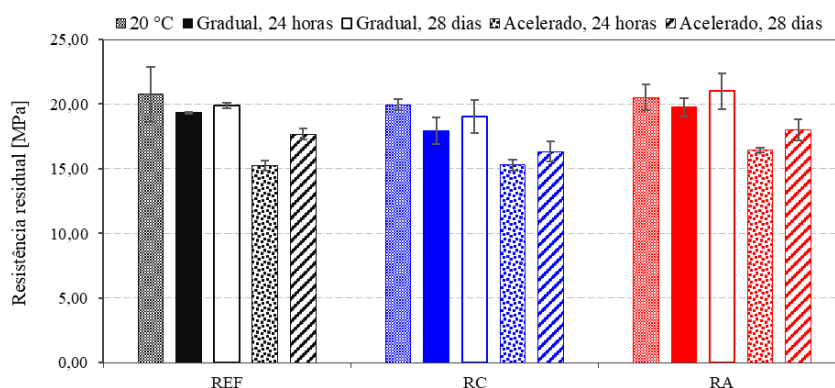


Figura 10: Resistência residual à compressão após exposição a 350 °C.

A exposição a 500 °C provocou uma redução acentuada da resistência mecânica nas primeiras 24 horas, sobretudo nos provetes sujeitos a arrefecimento acelerado (Figura 11). No entanto, após 28 dias, os provetes arrefecidos em água apresentaram uma recuperação total ou parcial da resistência original, com ganhos observados nos traços REF e RA. Esta recuperação decorre da reidratação dos silicatos e da precipitação de novos produtos de hidratação secundária.

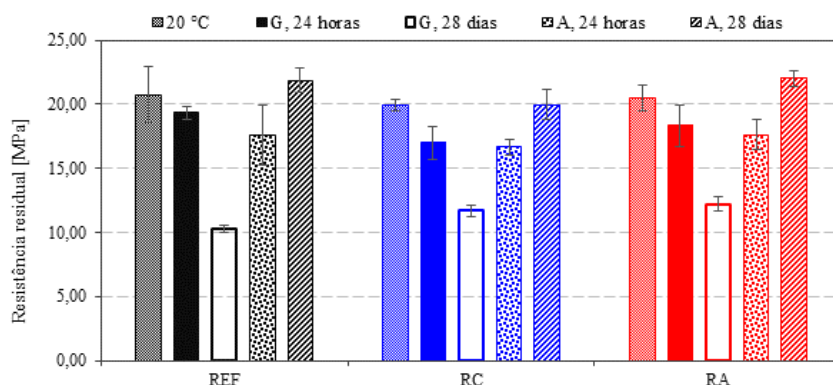


Figura 11: Resistência residual à compressão após exposição a 500 °C.



As análises estatísticas (Tabela 3, Tabela 4) evidenciaram diferenças significativas entre as idades de ensaio e os traços ( $p < 0,01$ ), confirmando que tanto o tipo de resíduo incorporado, como as condições de cura pós-aquecimento, influenciam de forma significativa o comportamento mecânico.

Tabela 3: Resultados da análise de variância para diferentes idades com arrefecimento gradual.

<i>Fonte de variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>Valor-p</i>
Idade	11,49	1	11,49	45,71	$8,26 \cdot 10^{-5}$
Traço	5,74	2	2,87	11,41	$3,40 \cdot 10^{-3}$
Interação	2,09	2	1,04	4,15	0,053
Resíduo	2,26	9	0,25	-	-

Tabela 4: Resultados de normalidade e homogeneidade para diferentes idades com arrefecimento gradual.

<b>Idade</b>	<b>Composição</b>	<b>Shapiro-Wilk</b>		<b>Levene</b>	
		<b>W</b>	<b>Valor-p</b>	<b>F</b>	<b>Valor-p</b>
24 horas	REF	0,864	0,280	0,481	0,784
	RC	0,794	0,101		
	RA	0,938	0,519		
28 dias	REF	0,856	0,256	0,481	0,784
	RC	0,978	0,713		
	RA	0,750	0*		

\*Valor nulo pois duas resistências são iguais, assim o R entende como apenas um valor, mesmo que sejam dois valores iguais

As observações visuais revelaram fissuração superficial generalizada após o aquecimento, associada à dilatação diferencial entre agregados e pasta cimentícia, fenómeno já documentado por Maharani et al. (2021) [19]. O padrão de fissuração foi mais intenso nos provetes aquecidos com taxa de 5 °C/min (Figura 12) e reduziu-se quando a taxa foi diminuída para 2 °C/min (Figura 13), evidenciando o efeito da velocidade de aquecimento na integridade estrutural.

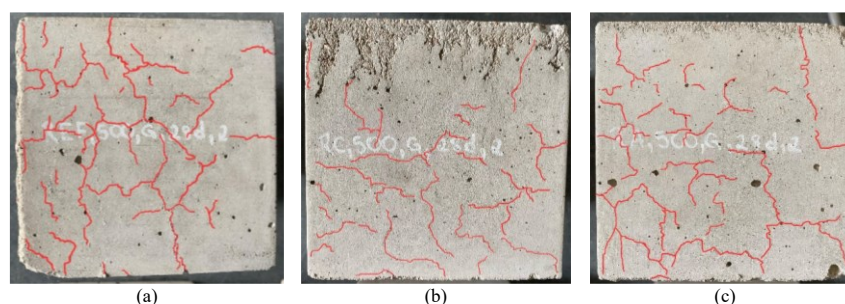


Figura 12: Fissuração dos provetes após aquecimento a 500 °C com taxa de aquecimento de 5 °C/min. (a) Referência; (b) Redução de cimento; (c) Redução de areia.

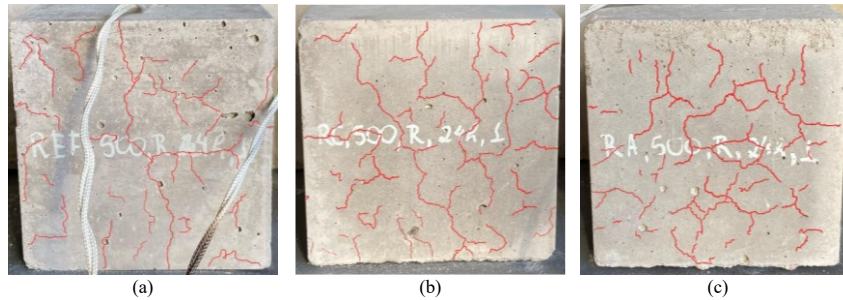


Figura 13: Fissuração dos provetes após aquecimento a 500 °C com taxa de aquecimento de 2 °C/min. (a) Referência; (b) Redução de cimento; (c) Redução de areia.

Em síntese, a incorporação de TDR demonstrou potencial para melhorar a estabilidade térmica do betão, sobretudo até 350 °C. A substituição parcial da areia apresentou resultados ligeiramente superiores aos da substituição de cimento, indicando que a diatomita atua de forma mais eficiente como enchimento reativo do que como agente cimentício. Os melhores resultados de resistência residual e menor fissuração foram obtidos para o traço RA (5 % de TDR substituindo areia) sob arrefecimento gradual, evidenciando um equilíbrio entre durabilidade térmica e sustentabilidade.

De um modo geral, a TDR contribuiu para uma maior variabilidade térmica do betão, mas sem comprometer o desempenho mecânico até 350 °C. A resistência residual apresentou uma correlação pouco significativa com a perda de massa, indicando que a degradação é predominantemente de natureza microestrutural. O comportamento observado está em consonância com os resultados de Kessel et al. [14] e Ramzi e Hajiloo [20], que descrevem a influência positiva da sílica amorfa na reatividade e durabilidade do betão exposto ao

#### 4. CONCLUSÕES

A terra diatomácea residual (TDR) revelou-se um material promissor para substituição parcial do cimento e da areia, mantendo uma resistência semelhante à do betão de referência. A exposição até 350 °C não provocou degradação significativa, demonstrando estabilidade térmica adequada. A cura em câmara húmida, após os provetes estarem sujeitos a diferentes patamares de aquecimento, mostrou ser determinante para a recuperação da resistência, sobretudo após arrefecimento acelerado, devido ao processo de reidratação das fases cimentícias. No entanto, a ocorrência de *spalling* no aquecimento a 500 °C com taxa de 5°C/min, nas composições com TDR, indica que a microestrutura densa do material pode dificultar a dissipação de vapor de água. Do ponto de vista ambiental, a utilização da TDR contribui para a redução das emissões de CO<sub>2</sub> e para a valorização de um resíduo industrial, evidenciando a sua viabilidade técnica e ecológica como adição sustentável em betões expostos a temperaturas moderadas.

#### REFERÊNCIAS

- [1] Althoey F, Ansari WS, Sufian M, Deifalla AF. Advancements in low-carbon concrete as a construction material for the sustainable built environment. *Dev Built Environ.* 2023;16:100284. <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2023.100284>.
- [2] Jesus S, Pederneiras CM, Farinha CB, Brito J de, Veiga R. Reduction of the Cement Content by Incorporation of Fine Recycled Aggregates from Construction and Demolition Waste in Rendering Mortars. *Infrastructures.* 2021. Disponível em: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:234110674>
- [3] Guzmán AM, Maldonado NG, Affranchino G. Comprehensive Evaluation for Mortars and Concretes Incorporating Wastes. *Reusable and Sustainable Building Materials in Modern Architecture.* 2019. Disponível em: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:139866779>



- [4] Brahami Y, Saeidi A, Fiset M, Ba K. The Effects of the Type and Quantity of Recycled Materials on Physical and Mechanical Properties of Concrete and Mortar: A Review. *Sustainability*. 202. Disponível em: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:253467041>
- [5] Zolin RC. Argamassa com incorporação de terra diatomácea residual proveniente da filtração de vinhos. Dissertação de Mestrado - Instituto Politécnico de Bragança, Bragança, 2023; Disponível em: <http://hdl.handle.net/10198/28606>
- [6] Schincaglia VT. Concrete blocks with incorporation of diatomaceous earth. Dissertação de Mestrado - Instituto Politécnico de Bragança, Bragança, 2022. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10198/25866>
- [7] Hertz KD. Limits of spalling of fire-exposed concrete. *Fire Safety Journal*. 2003;38(2):103–16.
- [8] Jansson R. Material properties related to fire spalling of concrete. Dissertação de Licenciatura - Lund University. 2008. Disponível em: <https://lucris.lub.lu.se/ws/portalfiles/portal/3617053/1480982.pdf>
- [9] NP EN 12390-3:2019. Ensaio do betão endurecido. Parte 3: Resistência à compressão de provetes. 2019.
- [10] NP EN 12390-2:2019. Ensaio do betão endurecido. Parte 2: Execução e cura de provetes para ensaios de resistência mecânica. 2019.
- [11] Rodriguez C, Miñano I, Costa C, Pujante P, Benito F. Properties of Precast Concrete Using Food Industry-Filtered Recycled Diatoms. *Sustainability*. 2021;13:3137.
- [12] Poon CS, Azhar S, Anson M, Wong YL. Strength and durability recovery of fire damaged concrete after post-fire-curing. *Cement and Concrete Research*. 2001;31(9):1307–18.
- [13] Lin Y, Hsiao C, Yang H, Lin YF. The effect of post-fire-curing on strength–velocity relationship for nondestructive assessment of fire-damaged concrete strength. *Fire Safety Journal*. 1 de maio de 2011;46(4):178–85.
- [14] Kessel O, Bennia A, Bravo Hidalgo D, Abderraouf Belkadi A, Lyes Kamel Khoudjia M. Experimental investigation of High-Performance Concrete subjected to high temperatures. *Revista Ingeniería de Construcción*. 2023;38:114–26.
- [15] Li J, Zhang W, Li C, Monteiro PJM. Green concrete containing diatomaceous earth and limestone: Workability, mechanical properties, and life-cycle assessment. *Journal of Cleaner Production*. 2019;223:662–79.
- [16] Hasan M, Jamil M, Saidi T. Mechanical properties and durability of ultra-high performance concrete with calcined diatomaceous earth as cement replacement. *Journal of the Mechanical Behavior of Materials*. 2023;32(1):20220272.
- [17] Li M, Sun W. Mechanical properties of high-strength concrete after fire. *Cement and Concrete Research*. 2004;34:1001–5.
- [18] Fontes LFP. Comportamento Físico e Mecânico de Blocos de Granito Submetidos a Altas Temperaturas. Dissertação de Mestrado - Instituto Politécnico de Bragança, Bragança, 2021. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10198/23731>.
- [19] Maharani EA, Hasan M, Saidi T. The resistance of high-strength concrete with ramie fiber using diatomaceous earth to high temperatures. *Materials Today: Proceedings*. 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221478532301773X>
- [20] Ramzi S, Hajiloo H. The Effects of Supplementary Cementitious Materials (SCMs) on the Residual Mechanical Properties of Concrete after Exposure to High Temperatures Review. *Buildings*. 2022. Disponível em: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:255680898>



**9JORNINC-4JORPROCIV**

9<sup>ª</sup> Jornadas de Segurança aos Incêndios Urbanos  
4<sup>ª</sup> Jornadas de Proteção Civil

Coimbra, 7 de novembro de 2025



## PROPOSTA DE FÓRMULAS ANALÍTICAS PARA O CÁLCULO DA RESISTÊNCIA AO FOGO DE PILARES MISTOS DE SEÇÃO QUADRADA, DUPLO TUBO E DUPLA PELE



**Rúben F. R. Lopes**  
Doutorando /  
Investigador  
UC – Coimbra,  
Portugal / Itecons –  
Coimbra, Portugal



**António Correia**  
Prof. Coordenador  
ISEC-IPC, SUSCITA  
Portugal



**João P. C. Rodrigues**  
Professor Associado c/  
Agregação  
UC - Coimbra  
Portugal

**Keywords:** Aço-Betão, Duplo-tubo, Dupla-pele, Estudo Paramétrico, Resistência ao Fogo

### 1. INTRODUÇÃO

A resistência ao fogo de pilares mistos de aço e betão, de secção transversal quadrada, de tubo duplo e de dupla pele, foi previamente avaliada através de ensaios experimentais realizados na Universidade de Coimbra [1]. Os resultados destes ensaios experimentais foram utilizados para calibrar um modelo numérico de elementos finitos. Este modelo numérico permitiu um estudo paramétrico para o desenvolvimento de novas fórmulas simplificadas de dimensionamento em situação de incêndio para estes tipos de pilares [2].

Após um extenso programa de ensaios experimentais e numéricos, o objetivo deste trabalho é fornecer fórmulas analíticas que permitam a avaliação da resistência ao fogo de pilares mistos de aço e betão, de secção transversal quadrada, de tubo duplo e de dupla pele, sob carga mecânica e ações de incêndio.

### 2. PROGRAMA EXPERIMENTAL, NUMÉRICO E PARAMÉTRICO

#### 2.1 Provetes para ensaio

Para manter a uniformidade dos provetes, todos os pilares de ensaio foram fabricados com as mesmas secções de aço, com uma altura de 3,00 m. Os três pilares de dupla-pele (CFDSHS) e os sete de duplo-tubo (CFDTHS) testados, num total de dez, eram compostos por dois perfis tubulares quadrados (SHS), sendo o perfil exterior um SHS 220, com uma largura ( $b_o$ ) de 220 mm e uma espessura de parede ( $t_o$ ) de 8 mm, e um perfil interior SHS 110, com uma largura ( $b_i$ ) de 110 mm e uma espessura de parede ( $t_i$ ) de 6 mm. O perfil interior tinha exatamente metade da largura do perfil de aço exterior. O perfil de aço exterior era de aço S355 e o perfil de aço interior era de aço S275. Foram ainda fabricados dois pilares de referência, um misto com perfil tubular preenchido com betão (CFHS) e outro vazio (SHS-H), com perfis SHS 220 e aço S355. Para o preenchimento dos pilares foram utilizados três tipos de betão: betão normal (PC) da classe C30/37, betão de alta resistência (HSC) da classe C55/67 e betão leve de agregado de argila expandida (LWC) da classe LC30/33. A Figura 1a) mostra um esquema com as seis combinações de secções transversais testadas e o posicionamento dos termopares tipo K isolados com trança de vidro utilizados para medir as temperaturas nas secções transversais. O termopar T1 foi colocado no centro do



núcleo de betão. O termopar T2 foi soldado a meio da largura do perfil interior de aço. O termopar T3 estava a meio da espessura do anel de betão. Os termopares T4 e T5 foram soldados a meio da largura e no canto do perfil exterior de aço, respetivamente. A Figura 1b) mostra as secções em altura onde foram medidas as temperaturas.

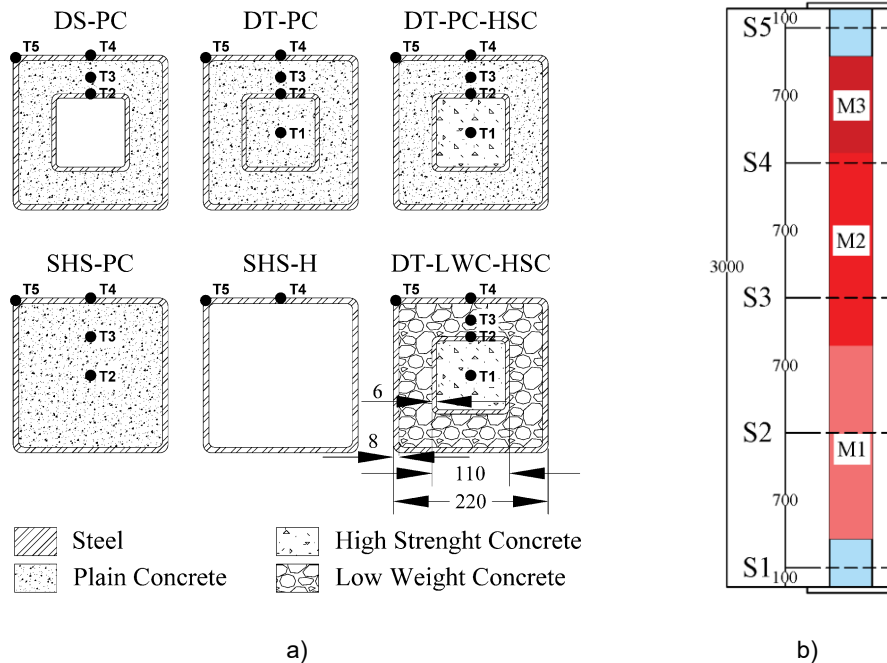


Figura 1 – a) Seções transversais dos pilares ensaiados e localização dos termopares b) Seções de colocação de termopares, ao longo da altura dos pilares.

## 2.2 Plano dos ensaios experimentais

Os valores de carga aplicados aos pilares foram de 30% e 50% do valor de dimensionamento da resistência à encurvadura de um elemento de compressão à temperatura ambiente ( $N_{b,Rd}$ ), calculado de acordo com o método da cláusula 6.3.7.5 da EN 1994-1-1:2005 [3]. O perfil interior de aço na secção transversal foi considerada no cálculo como uma área equivalente de aço de reforço. Estes níveis de carga foram utilizados, pois são comumente utilizados no projeto estrutural de incêndio de pilares mistos de perfis tubulares preenchidos com betão. A curva de incêndio da norma ISO 834 [4] foi adotada para a ação do fogo nos pilares. Dois níveis de restrição da estrutura envolvente foram adotados durante os ensaios. Para os ensaios com um nível mínimo de restrição K1, foi adotada uma restrição axial  $K_a$  de 30 kN/mm e uma restrição rotacional nos dois eixos  $K_r$  de 94 615 kN.m/rad. Nos ensaios com nível máximo de restrição K2 foi utilizada uma restrição axial  $K_a$  de 110 kN/mm e uma restrição rotacional nos dois eixos  $K_r$  de 131 340 kN.m/rad.

Para diferenciar os pilares ensaiados, estes foram identificados através de uma combinação de rótulos, conforme apresentado na Tabela 1: TXX (em que XX é o número de referência do pilar); DS, DT ou SHS (DS, para pilares de dupla pele, DT para pilares de duplo-tubo e SHS para pilares de aço com perfis tubulares quadrados; PC, HSC, LWC e H, para diferenciar o tipo de enchimento do pilar (PC para betão classe C30/37, HSC para betão de alta resistência classe C55/67, LWC para betão leve de agregado de argila expandida classe LC 30/33 e H para secção vazia); K1 ou K2 para identificar o tipo de nível de restrição aplicado; 30 ou 50 para o nível de carregamento.



Tabela 1: Designação dos provetes ensaiados, betões de preenchimento utilizados, níveis de restrição e níveis de carregamento impostos durante o ensaio – adaptado de [1]

Provete	Preenchimento de betão	Restrição	$P_0$ (kN)	$N_{b,Rd}$ %
T1-DS-PC-K1-30	Anel: PC; Núcleo: -	K1	1009	30
T2-DS-PC-K1-45	Anel: PC; Núcleo: -	K1	1525	50
T3-DS-PC-K2-30	Anel: PC; Núcleo: -	K2	1009	30
T4-DT-PC-K1-30	Anel: PC; Núcleo: PC	K1	1053	30
T5-DT-PC-K1-45	Anel: PC; Núcleo: PC	K1	1546	50
T6-DT-PC-K2-30	Anel: PC ; Núcleo: PC	K2	1053	30
T7-DT-PC-HSC-K1-30	Anel: PC ; Núcleo: HSC	K1	1091	30
T8-DT-PC-HSC-K2-30	Anel: PC ; Núcleo: HSC	K2	1091	30
T9-DT-LWC-HSC-K1-30	Anel: LWC; Núcleo: HSC	K1	1091	30
T10-DT-LWC-HSC-K2-30	Anel: LWC; Núcleo: HSC	K2	1091	30
T11-SHS-PC-K1-30	Núcleo: PC	K1	919	30
T12-SHS-H-K1-30	Vazio	K1	493	30

Os pilares foram colocados na estrutura de restrição tridimensional utilizando a ponte rolante do laboratório e centradas na cruz inferior da estrutura de restrição. Após os pilares terem sido fixados à cruz inferior através de varões de aço roscados M24 classe 8.8, a cruz superior foi baixada e ligada ao topo do pilares através de parafusos M24 classe 8.8. Após este momento, o pilar suportou principalmente a cruz superior até ao final da aplicação da carga de serviço. Isto ocorreu porque as porcas das hastes roscadas que aparafusavam a cruz superior aos pilares da estrutura de contenção foram desapertadas para permitir o movimento da cruz superior durante a aplicação da carga de serviço. Após o nível de carga pretendido para a carga de serviço medida na célula de carga ter sido atingido, as porcas dos varões roscados M27 classe 10.7 foram apertadas, criando uma ligação rígida entre a cruz superior e os pilares da estrutura de restrição. De seguida, os pilares da estrutura de restrição foram aparafusados à cruz inferior e, a partir desse momento, o pilar a ensaiar ficou sob restrição axial e rotacional da estrutura envolvente. O forno elétrico foi ligado e o ensaio de resistência ao fogo foi iniciado, mantendo-se a carga de serviço medida na célula de carga entre a cruz superior e o macaco hidráulico constante como uma carga real do pilar no piso acima do local onde o incêndio estava a ocorrer. As forças de restrição, os deslocamentos axiais e laterais e as temperaturas da secção transversal no pilar e no forno foram medidos e adquiridos através de um datalogger.

### 2.3 Modelos Numéricos

Após os ensaios experimentais apresentados na secção anterior, foi realizado um estudo numérico com recurso à análise de elementos finitos assistida por computador. A análise é semelhante à realizada por Correia [5] para pilares de perfis de aço HEA 160 e 200 parcialmente preenchidos com betão. O estudo numérico foi realizado com o software de elementos finitos Abaqus [6], utilizando elementos extrudidos 3D homogêneos. O modelo numérico utiliza uma análise termomecânica sequencialmente acoplada. Este modelo foi validado apenas com os resultados experimentais de pilares CFDTHS e CFDSHS preenchidos apenas com PC.

Os pilares foram modelados longitudinalmente, dividindo-os em cinco secções (Figura 2). Foram consideradas duas secções longitudinais aquecidas indiretamente, correspondentes às extremidades do pilar (a azul na Figura), com uma altura de 0,25 m, para além de três secções longitudinais aquecidas, cada uma com a mesma altura dos módulos do forno (duas com 1 m e uma com 0,5 m de altura).

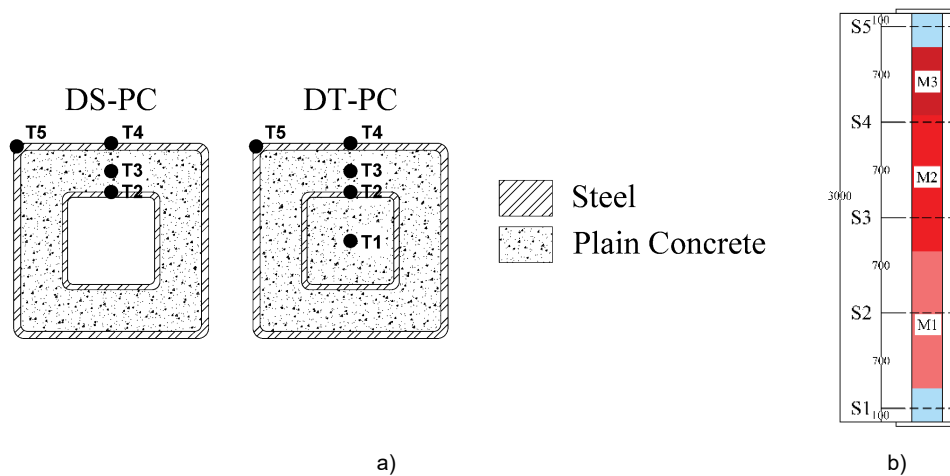


Figura 2 – a) Secções transversais modeladas numericamente e localização dos termopares; localização dos termopares na secção transversal b) Secções transversais dos termopares e secções aquecidas ao longo da altura do pilar.

As interações entre as superfícies de aço e betão foram consideradas como superfície-superfície, as quais, dependendo do tipo de análise realizada, transferência de calor ou termomecânica, tiveram as suas propriedades de contacto alteradas. As interações entre os elementos de aço, ou seja, entre as secções de aço ocas quadradas exteriores ou interiores e as chapas de apoio, foram definidas como restrições do tipo encastrado. Este tipo de restrição proporciona uma ligação perfeita em ambas as análises, tanto em relação à transferência de calor como à transição de forças e deslocamentos.

Nas secções transversais, foi modelada uma malha, como a apresentada na Figura 3, para garantir a existência de regularidade da malha por razões de simetria e para melhorar a interação entre os nós dos diferentes elementos, minimizando assim os problemas de convergência nas arestas, durante as simulações de incêndio.

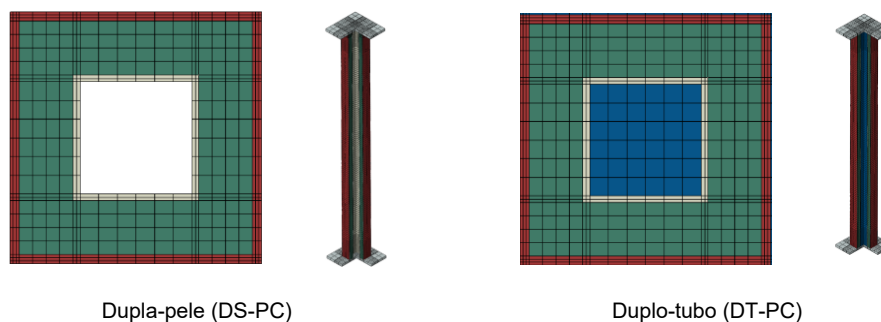


Figura 3: Pormenor da malha de elementos finitos das seções transversais e longitudinais.

### 2.3 Estudo paramétrico

Após a calibração do modelo numérico, foi realizado um estudo paramétrico no qual se estudou a influência de três parâmetros no comportamento dos pilares DT-PC e DS-PC a altas temperaturas: a altura do pilar e esbelteza relativa, o nível de carregamento e o nível de restrição axial e rotacional.

A altura do pilar e o parâmetro de esbelteza relativa mostraram uma influência particular no tempo de colapso final. Quanto mais altos eram os pilares, menor era o tempo de colapso final, para cada combinação de restrição e nível de carga testada.

Quando se estudou a influência do nível de carga, observaram-se dois caminhos distintos no comportamento dos pilares. No primeiro caminho, os pilares submetidos aos níveis de carga 30 LL e 40 LL apresentaram uma



recuperação e um patamar do valor  $PIP_0$  antes do tempo crítico. No entanto, no segundo caminho, os pilares submetidos aos níveis de carga de 50 LL e 70 LL avançaram diretamente para o tempo crítico, sem a ocorrência de recuperação do valor  $PIP_0$  ou patamares. Apesar disso, quanto maior o nível de carga, menor foi o tempo de colapso final.

No estudo da influência do nível de restrição, os valores de restrição axial e rotacional tiveram um efeito claro no valor máximo de  $PIP_0$  e no tempo correspondente. Quanto mais altos os valores de restrição, maiores os valores  $PIP_0$  e menores os tempos necessários para alcançá-los. Quando os valores de restrição axial e rotacional eram iguais a  $K_{min}$ , observou-se um aumento insignificante no valor  $PIP_0$  e um tempo de colapso final menor. Para os níveis de restrição restantes, os tempos crítico e de colapso final apresentaram quase o mesmo valor, apesar do uso de valores de restrição diferentes.

### 3. PROPOSTA DE FÓRMULAS PARA AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO FOGO

Com o objetivo de criar métodos simplificados baseado no tempo para o cálculo da resistência ao fogo de pilares CFDTHS e CFDSHS de secção quadrada, sujeitos a restrições axiais e rotacionais à extensão térmica, os resultados do estudo paramétrico para cada esbelteza relativa nos instantes de recuperação, ou tempo crítico ( $PIP_{0, rec\ ou\ cr}$ ) e colapso final ( $PIP_{0, ult}$ ) foram inseridos em gráficos. Cada método apresenta quatro gráficos para cada secção transversal, um para cada combinação de níveis de restrição de carga (30 LL K1, 30 LL K2, 50 LL K1, 50 LL K2). Os instantes de recuperação e de tempo crítico foram combinados no mesmo gráfico, uma vez que estes dois instantes marcam um ponto específico na resistência ao fogo dos pilares, que é a capacidade do anel e do núcleo de betão e da secção interior de aço suportarem a carga aplicada aos pilares após a secção exterior de aço perder a sua resistência. Os resultados provenientes do estudo paramétrico foram aproximados com curvas de regressão polinomial de terceiro grau, em função da esbelteza relativa dos pilares, resultando nas equações apresentadas em cada gráfico. Este tipo de curva de regressão polinomial foi utilizado por apresentar um bom equilíbrio entre a utilização de equações polinomiais com o menor número de constantes e o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) obtido, para cada situação (tipo de secção transversal, instante e combinação nível de carregamento-nível de restrição).

Uma análise das equações é apresentada nas subsecções seguintes para os métodos do tempo e da temperatura. As Figuras 4 a 7 apresentam os gráficos e as equações produzidas para a previsão da resistência ao fogo de pilares quadrados de secção transversal DT-PC e DS-PC em função do tempo, sujeitos a quatro combinações de níveis de restrição de carga.

As equações de instante recuperação ou crítico para o método do tempo ( $PIP_{0, rec\ ou\ cr}$ ) apresentaram um coeficiente de determinação que variou de 0,6615 (30 LL-K2) a 0,9983 (50 LL-K2) para a secção transversal DS-PC, enquanto que para a secção transversal DT-PC variou de 0,7995 (30 LL-K2) a 0,9921 (30 LL-K1). Para as equações do método do tempo de colapso final ( $PIP_{0, ult}$ ), o coeficiente de determinação variou de 0,8421 (50 LL-K2) a 0,9961 (30 LL-K1) para a secção transversal DS-PC e de 0,9952 (50 LL-K2) a 0,9999 (30 LL-K2). Apesar do bom coeficiente de determinação para algumas das equações apresentadas nas Figuras 4 a 7, estas equações devem ser utilizadas apenas entre os valores mínimo e máximo de esbelteza relativa utilizados no estudo paramétrico para prever os valores de tempo. Isto deve-se a inversões das curvas das equações fora dos valores mínimo e máximo de esbelteza relativa, o que pode levar a valores de tempo de resistência ao fogo mais elevados para valores de esbelteza relativa que excedem os valores máximos utilizados no estudo paramétrico. Para as secções transversais DS-PC, o valor mínimo de esbelteza relativa a utilizar é de 0,172188, e o valor máximo é de 0,795629. Para as secções transversais DT-PC, os valores de esbelteza relativa a utilizar situam-se entre 0,175881 e 0,812691.

Os gráficos seguintes apresentam exemplos das fórmulas derivadas com recurso ao estudo paramétrico, em situação de incêndio, em função da esbelteza do pilar.

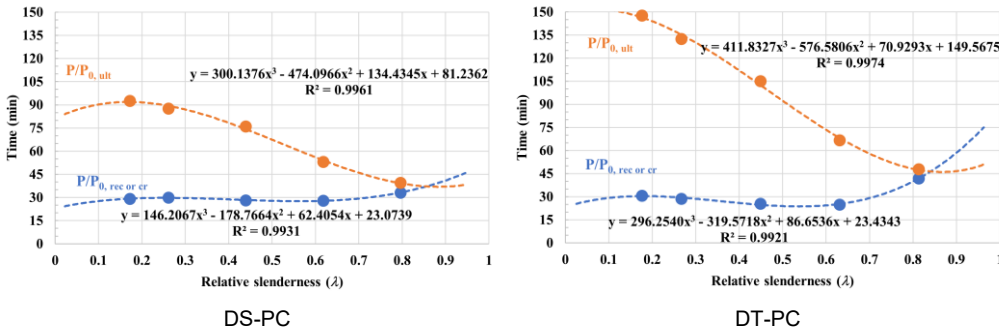


Figura 4 – Fórmulas para o cálculo dos valores do tempo de resistência ao fogo para os pilares DS-PC e DT-PC submetidas à combinação 30 LL-K1, em função da esbelteza do pilar

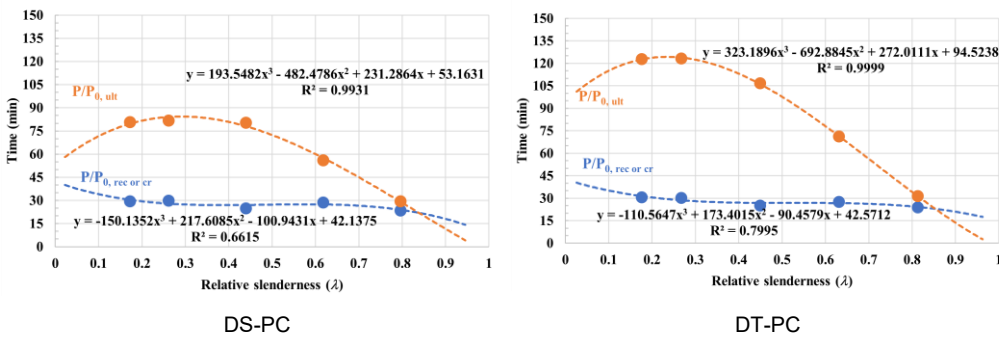


Figura 5 – Fórmulas para o cálculo dos valores do tempo de resistência ao fogo para os pilares DS-PC e DT-PC submetidas à combinação 30 LL-K2, em função da esbelteza do pilar.

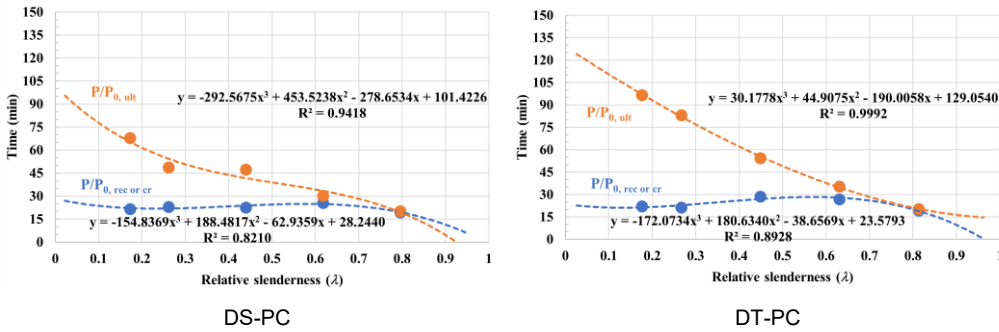


Figura 6 – Fórmulas para o cálculo dos valores do tempo de resistência ao fogo para os pilares DS-PC e DT-PC submetidos à combinação 50LL K1, em função da esbelteza do pilar.

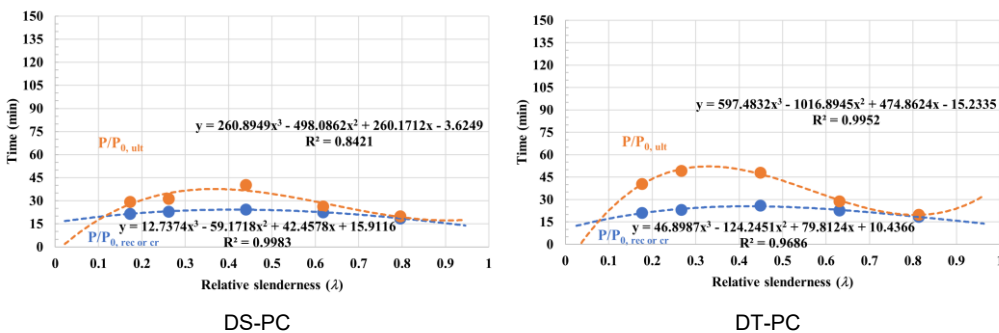




Figura 7 – Fórmulas para o cálculo dos valores do tempo de resistência ao fogo para os pilares DS-PC e DT-PC submetidos à combinação 50 LL-K2, em função da esbelteza do pilar.

Para cada equação apresentada nas Figuras 4 a 7, foram calculados os valores de resistência ao fogo em cada um dos valores de esbelteza relativa utilizados no estudo paramétrico. Os valores obtidos (Eq.) estão presentes nas Tabelas 2 a 5, ao lado dos respetivos valores do estudo paramétrico (Par.). Para cada par, foi calculado o respetivo erro relativo.

Analisando os valores de resistência ao fogo em tempo real para os pilares DS-PC e DT-PC nos instantes de recuperação ou críticos das equações apresentadas nas Tabelas 2 e 3, as equações que apresentam menor erro são as das combinações de 30 LL-K1 e 50 LL-K2 para ambas as secções transversais, sendo as equações da combinação de 30 LL-K2 e 50 LL-K1 as que apresentam maior erro. Para as equações DS-PC, o valor de erro mais baixo foi encontrado para uma esbelteza relativa de 0,795629 com a equação 30 LL-K1 (0,09%) e o maior foi encontrado para uma esbelteza relativa de 0,439377 com a equação 30 LL-K2 (8,24%). Nas equações DT-PC, o valor mais baixo foi para o valor de esbelteza relativa de 0,812691 com a equação 30 LL-K1 (-0,26%), e o valor mais elevado foi com o valor de esbelteza relativa de 0,266854 com a equação 50 LL-K1 (7,57%). O erro com estas equações tende a ser menor em direção aos limites das mesmas, sendo maior nos três valores médios de esbelteza relativa.

Tabela 2 – Comparação dos valores de tempo obtidos a partir das equações com os valores do estudo paramétrico para secções transversais DS-PC no instante  $P/P_{0,cr}$  e o respetivo erro relativo.

Combinação	0.172188			0.261251			0.439377			0.617503			0.795629		
	Eq.	Par.	Erro	Eq.	Par.	Erro	Eq.	Par.	Erro	Eq.	Par.	Erro	Eq.	Par.	Erro
	(min)	(min)	(%)	(min)	(min)	(%)	(min)	(min)	(%)	(min)	(min)	(%)	(min)	(min)	(%)
30 LL-K1	29.3	29.2	0.34	29.8	30.0	-0.72	28.4	28.2	0.77	27.9	28.0	-0.46	33.2	33.2	0.09
30 LL-K2	30.4	29.5	3.19	27.9	30.0	-6.87	27.1	25.0	8.24	27.4	28.7	-4.31	24.0	23.7	1.24
50 LL-K1	22.2	21.7	2.48	21.9	23.1	-5.10	23.8	22.7	5.20	24.8	25.5	-2.77	19.5	19.3	0.87
50 LL-K2	21.5	21.6	-0.23	23.2	23.1	0.47	24.2	24.3	-0.45	22.6	22.5	0.29	18.7	18.7	-0.08

Tabela 3 – Comparação dos valores de tempo obtidos a partir das equações com os valores do estudo paramétrico para secções transversais DT-PC no instante  $P/P_{0,cr}$  e o respetivo erro relativo.

Combinação	0.175881			0.266854			0.448800			0.630745			0.812691		
	Eq.	Par.	Erro	Eq.	Par.	Erro	Eq.	Par.	Erro	Eq.	Par.	Erro	Eq.	Par.	Erro
	(min)	(min)	(%)	(min)	(min)	(%)	(min)	(min)	(%)	(min)	(min)	(%)	(min)	(min)	(%)
30 LL-K1	30.4	30.8	-1.13	29.4	28.7	2.66	24.7	25.5	-2.99	25.3	24.8	1.84	41.8	41.9	-0.26
30 LL-K2	31.4	30.7	2.47	28.7	30.3	-5.46	26.9	25.3	6.56	26.8	27.8	-3.58	24.2	24.0	0.98
50 LL-K1	21.4	22.2	-3.31	22.9	21.3	7.57	27.1	28.7	-5.61	27.9	26.9	3.58	19.1	19.3	-1.19
50 LL-K2	20.9	21.2	-1.32	23.8	23.2	2.65	25.5	26.1	-2.35	23.1	22.8	1.62	18.4	18.5	-0.47

Nos valores de tempo de resistência ao fogo para os pilares DS-PC e DT-PC no instante de colapso final das equações, apresentadas na Tabela 4 e na Tabela 5, as equações de combinação 30 LL-K1 e 30 LL-K2 são as que



apresentam menor quantidade de erro para os pilares DS- PC, sendo a menor quantidade de erro em pilares DT-PC para as equações de combinação 30 LL-K2 e 50 LL-K1. Para as equações DS-PC, o valor de erro mais baixo foi encontrado para uma esbelteza relativa de 0,795629 com a equação 30 LL K1 (- 0,64%) e o maior foi encontrado para uma esbelteza relativa de 0,439377 com a equação 50 LL K1 (- 11,69%). Nas equações DT PC, o valor de erro mais baixo foi para o valor de esbelteza relativa de 0,175881 com a equação 30 LL K2 (-0,18%), e o valor mais elevado foi para o valor de esbelteza relativa de 0,448800 com a equação 30 LL K1 (-2,54%). Como se observa nas equações para os instantes de recuperação ou crítico, o erro para os instantes de colapso final também tende a ser menor nos seus limites, sendo maior nos três valores intermédios de esbelteza relativa.

Tabela 4 – Comparação dos valores de tempo obtidos a partir das equações com os valores do estudo paramétrico para secções transversais DS-PC no instante  $PI/P_{0,ult}$  e o respetivo erro relativo.

Combinação	0.172188			0.261251			0.439377			0.617503			0.795629		
	Eq.	Par.	Erro	Eq.	Par.	Erro	Eq.	Par.	Erro	Eq.	Par.	Erro	Eq.	Par.	Erro
	(min)	(min)	(%)	(min)	(min)	(%)	(min)	(min)	(%)	(min)	(min)	(%)	(min)	(min)	(%)
30 LL-K1	91.9	92.7	-0.87	89.3	87.6	2.02	74.2	76.0	-2.32	54.1	53.1	2.00	39.2	39.5	-0.64
30 LL-K2	79.7	80.8	-1.33	84.1	81.8	2.89	78.1	80.4	-2.93	57.6	56.2	2.52	29.2	29.6	-1.14
50 LL-K1	65.4	67.9	-3.72	54.4	48.8	11.31	41.7	47.3	-11.69	33.4	30.1	11.02	19.5	20.3	-3.90
50 LL-K2	27.7	29.4	-5.70	35.0	31.3	11.72	36.7	40.3	-9.11	28.5	26.3	8.37	19.5	20.0	-2.62



Tabela 5 – Comparação dos valores de tempo obtidos a partir das equações com os valores do estudo paramétrico para secções transversais DT-PC no instante  $P/P_{0,ult}$  e o respetivo erro relativo.

Combinação	0.175881			0.266854			0.448800			0.630745			0.812691		
	Eq.	Par.	Erro	Eq.	Par.	Erro	Eq.	Par.	Erro	Eq.	Par.	Erro	Eq.	Par.	Erro
	(min)	(min)	(%)	(min)	(min)	(%)	(min)	(min)	(%)	(min)	(min)	(%)	(min)	(min)	(%)
30 LL-K1	146.4	147.7	-0.83	135.3	132.6	2.02	102.5	105.2	-2.54	68.3	66.7	2.41	47.5	47.8	-0.80
30 LL-K2	122.7	122.9	-0.18	123.9	123.4	0.40	106.3	106.8	-0.46	71.5	71.3	0.42	31.4	31.5	-0.22
50 LL-K1	97.2	96.7	0.54	82.1	83.3	-1.36	55.6	54.4	2.09	34.7	35.3	-1.93	20.5	20.3	0.80
50 LL-K2	40.1	40.6	-1.24	50.4	49.3	2.21	47.1	48.2	-2.31	29.6	29.0	2.14	19.7	19.9	-1.08

#### 4. CONCLUSÕES

Baseada num estudo numérico e paramétrico detalhado realizado para a grande variedade de casos analisados no presente estudo, permitiu a obtenção de fórmulas simplificadas, de fácil utilização, para os dois tipos de pilares, neste caso no domínio do tempo. As fórmulas simplificadas apresentadas provêm de um estudo numérico e paramétrico calibrado a partir de resultados experimentais.

Observou-se que estas fórmulas podem ser utilizadas com um elevado nível de precisão, o que se pode observar comparando as diferenças entre os valores obtidos no estudo paramétrico e os obtidos com as fórmulas.

#### 5. REFERÊNCIAS

- [1] Lopes, R.F.R., Rodrigues, J.P.C., Behaviour of restrained concrete filled square double-skin and double-tube hollow columns in case of fire Eng. Struct., 216 (2020), Article 110736, 10.1016/j.engstruct.2020.110736
- [2] Lopes, R. F. R., Rodrigues, J. P. C., Correia, A. J. P. M., Numerical modelling of composite steel and concrete double-skin and double-tube square cross-section columns subjected to fire". Fire Safety Journal (2023) - 10.1016/j.firesaf.2023.103808
- [3] Comité Européen De Normalisation, (2012). EN 1363-1 *Fire resistance tests - Part 1: General requirements*
- [4] International Standard Organization, (1999). ISO 834-1 *Fire-resistance tests — Elements of building construction — Part 1: General requirements*.
- [5] Correia, A.J.M. (2012) *Fire Resistance of Steel and Composite Steel-Concrete Columns*, Tese de Doutoramento, Universidade de Coimbra, 388 p.
- [6] D.S. Simulia, Abaqus 6.14 User's Manual, (2014), Providence, RI, USA



**9JORNINC-4JORPROCIV**

9<sup>ª</sup> Jornadas de Segurança aos Incêndios Urbanos  
4<sup>ª</sup> Jornadas de Proteção Civil

Coimbra, 7 de novembro de 2025



## CATEGORIAS DE RISCO: UMA ANÁLISE CRÍTICA E PROPOSTA ALTERNATIVA

9<sup>as</sup> JORNADAS DE SEGURANÇA AOS INCÊNDIOS URBANOS



**João E. Almeida** \*\*\*

Investigador  
LNEC  
Portugal



**Elisabete Cordeiro**

Investigadora  
LNEC  
Portugal



**A. Leça Coelho**

Investigador e Professor  
U. Lusófona – Centro  
Universitário do Porto  
Portugal

### SUMÁRIO

O conceito de “categoria de risco” das utilizações-tipo, consagrado na legislação atual de segurança ao incêndio, determina grande parte das medidas a implementar nos edifícios. Dada a sua importância e a natureza prescritiva da atual legislação, a sua formulação deve assentar em princípios científicos sólidos. Contudo, verifica-se que a metodologia adotada para a sua determinação introduz distorções que importa corrigir. Neste artigo, distinguem-se os conceitos de perigo e risco, identificam-se os principais problemas relacionados com a metodologia adotada na presente legislação para determinar as “categorias de risco”, ilustram-se as consequências das classificações resultantes, apresentam-se princípios gerais de uma metodologia alternativa e, por fim, expõem-se as conclusões.

**PALAVRAS-CHAVE:** SCIE; Categorias de risco; Risco; Perigo; Índice de Perigo.

### 1. INTRODUÇÃO

Da legislação portuguesa relativa à segurança contra incêndio em edifícios (SCIE) destacam-se os seguintes diplomas: o Regime Jurídico da Segurança contra Incêndios em Edifícios (RJ-SCIE) e a Regulamentação Técnica da SCIE (RT-SCIE).

Do conteúdo do RJ-SCIE, estabelecido pelo Decreto-Lei n.º 220/2008, de 12 de novembro, salientam-se conceitos fundamentais como as utilizações-tipo (UT) e as categorias de risco (CR), bem como as responsabilidades dos intervenientes na conceção, na construção, na utilização e na gestão dos edifícios.

Este regime foi, posteriormente, revisto pelo Decreto-Lei n.º 224/2015, de 9 de outubro, que alterou as CR para a UT VII e para a UT XI, clarificou responsabilidades e melhorou os procedimentos de avaliação. Mais recentemente, a Lei n.º 123/2019, de 18 de outubro, introduziu alterações adicionais, harmonizando critérios técnicos com normas europeias e considerando novas tecnologias e métodos construtivos.

---

\*\*\* Autor correspondente – Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Departamento de Edifícios, Av. do Brasil 101, 1700-066 LISBOA, Portugal; email: jalmeida@lnec.pt  
<http://www.lnec.pt>



O RT-SCIE, aprovado pela Portaria n.º 1532/2008, de 29 de dezembro, complementa o RJ-SCIE fornecendo a regulamentação técnica detalhada necessária para a aplicação prática das exigências legais

Neste artigo introduz-se os conceitos de perigo e risco, identificam-se os principais problemas relacionados com a metodologia adotada na legislação para determinar as CR, ilustram-se as consequências da classificação associada a essas categorias e, finalmente, enunciam-se os princípios gerais de uma metodologia alternativa. Por fim, apresentam-se as conclusões.

## 2. PERIGO E RISCO

### 2.1 O conceito de perigo

Não existe uma definição única do conceito de perigo (*hazard*, na terminologia anglo-saxónica). É frequente a confusão entre perigo e risco, mesmo em contextos, como acontece na atual legislação SCIE. O perigo pode dever-se a agentes diversos, como mecânicos, ambientais, físicos, biológicos ou químicos, os quais podem provocar danos sobre pessoas, outros organismos, o edificado e o ambiente. O perigo é um evento com potencial para causar danos e, portanto, uma fonte de risco (Kaplan e Garrich, 1981). A ISO 16732-1:2012 define o perigo de incêndio como uma condição com potencial para provocar uma consequência indesejável de fogo. O *Canadian Centre for Occupational Health and Safety* considera o perigo como qualquer fonte com potencial para provocar danos na saúde das pessoas, salientando que, nesta área, o perigo é frequentemente identificado pelo efeito sobre a saúde e não pela causa. Por exemplo, no caso da tuberculose, considera-se por vezes esta doença como sendo o perigo, quando a causa real são as bactérias que a provocam. No caso do incêndio, o perigo pode estar representado pelos resultados do seu desenvolvimento, como a temperatura, a radiação, o fumo e os gases tóxicos. A sua identificação constitui o primeiro passo numa avaliação do risco.

### 2.2 O conceito de risco

À semelhança do perigo, também não existe uma definição universal do risco, sendo o termo frequentemente usado com significados distintos, mesmo entre a comunidade técnica (Renn, 1988) que define risco como a possibilidade de determinados eventos ocorrerem e terem consequências sobre as pessoas.

Segundo Paulsson, o risco corresponde ao produto da probabilidade de ocorrência de um evento – desencadeado por causas humanas ou naturais – e da severidade das respetivas consequências (Paulsson, 2007). O comportamento das pessoas em situações de risco encontra-se associado à perceção desse risco e à sua aversão ao mesmo. Watts e Hall consideram o risco como o potencial para a concretização de um evento não desejado, com consequências adversas sobre as pessoas, a propriedade e o ambiente (Watts e Hall, 2002).

Meacham considera que o risco de incêndio resulta do perigo inerente à ocorrência desse evento, associada a uma incerteza, podendo provocar danos sobre as pessoas, a propriedade ou a continuidade da atividade (Meacham, 2001; Meacham, 2002). A ISO 16732-1:2012 define risco de um cenário de incêndio como a combinação da probabilidade de ocorrência desse cenário pelas consequências da sua concretização.

Nas ciências sociais é frequente considerar que o risco está sempre associado a uma significativa subjetividade. Slovic defende que o risco é uma construção social do ser humano, com o objetivo de ajudá-lo a lidar com incertezas e perigos da vida (Slovic, 2001). A questão da subjetividade do risco é também discutida por Kaplan e Garrick, que consideram que é relativo e depende do conhecimento que se tem sobre aquilo que o produz (Kaplan e Garrick, 1981).

Para além dos autores referidos, outros poderiam ser mencionados, evidenciando a inexistência um entendimento único sobre o risco. No entanto, na generalidade das definições, o risco encontra-se associado à probabilidade de ocorrência de um dado evento e as suas potenciais consequências.



## 2.3 A relação entre o perigo e risco

Para ilustrar a relação entre o perigo e o risco, considere-se que duas pessoas têm de atravessar o oceano Atlântico, entre Portugal e os Estados Unidos. Uma delas utilizará um pequeno barco a remos, enquanto outra fará a travessia num transatlântico. Neste exemplo, o oceano representa o perigo, enquanto o barco a remos e o transatlântico representam os meios adotados por cada pessoa para o minimizar, modificando as respetivas condições de exposição a esse perigo. A pessoa que utiliza o barco a remos está sujeita a um nível de perigo superior àquela que recorre ao transatlântico. Tanto o perigo como a exposição são influenciados pelas medidas de segurança adotadas para os reduzir. O risco decorre do perigo (P) e pressupõe um balanço entre este e a exposição (E) aquele, sendo a consequência (C) o resultado desse balanço.

Assim, podemos definir esta consequência a partir da seguinte expressão geral:

$$C = \frac{P}{E} \quad (1)$$

Considerando que  $P_{ri}$  representa a probabilidade de ocorrência de um determinado cenário de incêndio,  $P_i$  o perigo e  $E_i$  a exposição a esse perigo, o risco de incêndio  $R_i$  correspondente a esse cenário é definido pela seguinte expressão:

$$R_i = P_{ri} \times \frac{P_i}{E_i} \quad (2)$$

Se considerarmos que num edifício podem ocorrer N cenários de incêndio, então o risco R desse edifício será igual a:

$$R = \text{máx}\langle R_i \rangle \quad (3)$$

## 3. PERIGO E RISCO NA LEGISLAÇÃO PORTUGUESA DE SCIE

### 3.1 Categorias de risco versus Fatores de risco

As CR previstas na legislação resultam da combinação dos designados “fatores de risco”, indicados no Artigo 12.º do DL n.º 220/2008, na sua redação atual, com os critérios definidos no Artigo 13.º e no Anexo III desse decreto-lei. Os “fatores de risco” considerados para espaços cobertos são os seguintes:

- Altura da utilização-tipo ( $H_{UT}$ );
- Número de pisos abaixo do plano de referência ( $NP_{APR}$ );
- Área bruta ( $A_B$ );
- Efetivo total ( $E_T$ );
- Efetivo em locais de risco D ( $E_{LRD}$ );
- Efetivo em locais de risco E ( $E_{LRE}$ );
- Saída independente direta ao exterior de locais de risco D ( $SIE_{LRD}$ );
- Densidade de carga de incêndio modificada ( $DCI_M$ ).

Se observarmos estes fatores verifica-se que somente a densidade de carga de incêndio modificada está relacionada com o perigo sendo, no entanto, considerada somente na UT XI e na UT XII. A informação que a densidade de carga de incêndio nos dá, é nitidamente insuficiente para quantificar o perigo. Quanto aos restantes fatores eles têm, nuns casos mais, noutros menos, alguma relação com a exposição dos ocupantes. Consta-se,



assim, que o primeiro dos erros imputável à metodologia adotada para determinar as CR, reside no facto dos fatores de risco que considera são manifestamente insuficientes para caracterizar o risco, com destaque para a componente perigo.

Outro erro diz respeito aos fatores de risco associados a cada uma das UT. No Quadro 1 pode-se observar as 12 utilizações-tipo a que correspondem nove conjuntos de fatores distintos; apenas as UT III e UT X, as UT IV e UT V e as UT VI e UT IX apresentam fatores comuns.

Quadro 1: “Fatores de risco” por utilização-tipo

UT	H <sub>UT</sub>	NP <sub>APR</sub>	A <sub>B</sub>	E <sub>UT</sub>	E <sub>LRD</sub> , ou E <sub>LRE</sub>	SIE <sub>LRD</sub>	DCI <sub>M</sub>
UT I	Sim	Sim	-	-	-	-	-
UT II	Sim	Sim	Sim	-	-	-	-
UT III	Sim	-	-	Sim	-	-	-
UT IV	Sim	-	-	Sim	Sim	Sim	-
UT V	Sim	-	-	Sim	Sim	Sim	-
UT VI	Sim	Sim	-	Sim	-	-	-
UT VII	Sim	-	-	Sim	Sim	Sim	-
UT VIII	Sim	Sim	-	Sim	-	-	-
UT IX	Sim	Sim	-	Sim	-	-	-
UT X	Sim	-	-	Sim	-	-	-
UT XI	Sim	Sim	-	Sim	-	-	Sim
UT XII	-	Sim	-	-	-	-	Sim

em que:

- H<sub>UT</sub> – Altura da UT
- NP<sub>APR</sub> – Número de pisos abaixo do piso de referência;
- A<sub>B</sub> – Área bruta (em m<sup>2</sup>);
- E<sub>UT</sub> – Efetivo para uma determinada UT;
- E<sub>LRD</sub> – Efetivo em locais de risco D;
- E<sub>LRE</sub> – Efetivo em locais de risco E;
- SIE<sub>LRD</sub> – Risco de incêndio para um determinado cenário;
- DCI<sub>M</sub> – Densidade da carga de Incêndio modificada (em MJ/m<sup>2</sup>).

Verifica-se que a metodologia adotada evidencia critérios arbitrários de aplicação. Por exemplo, apenas considera carga de incêndio na UT XI e na UT XII. Por outro lado, não existe efetivo nas UT I, na UT II e XII. Se não existe carga de incêndio, este não pode ocorrer; e se não há efetivo, não são necessárias medidas de proteção das pessoas.

### 3.2 Critério para a determinação da CR

A determinação da “categoria de risco”, decorre do critério definido no Artigo 13.º do DL n.º 220/2008 na sua redação atual, cujo conteúdo é o seguinte:

*“1 - A categoria de risco de cada uma das utilizações-tipo é a mais baixa que satisfaça integralmente os critérios indicados nos quadros constantes do anexo III ao presente decreto-lei.*

*2 - É atribuída a categoria de risco superior a uma dada utilização-tipo, sempre que for excedido um dos valores da classificação na categoria de risco.*

*3 - Nas utilizações de tipo IV, onde não existam locais de risco D ou E, os limites máximos do efetivo das 2.ª e 3.ª categoria de risco podem aumentar em 50 %.”*



Os critérios definidos no n.º 1 e no n.º 2 do referido artigo dão origem a classificações de risco incoerentes. Considere-se a UT III (Administrativos), que tem como “fatores de risco” a altura e o efetivo.

No Quadro 2 apresentam-se algumas combinações e a respetiva “categoria de risco”. Um edifício de rés-do-chão ( $H_{UT}=0,2$  m) com 1001 pessoas é classificado na 3.ª CR; tal como um edifício com 28 m de altura e 1000 pessoas. Outro edifício de R/C com 5001 ocupantes é da 4ª CR; mas um com 50 m de altura e 5000 pessoas será “apenas” da 3.ª CR. Ao aplicar estas considerações a outras UT com mais “fatores de risco” do que a UT III, os desajustamentos identificados são ainda mais evidentes.

Quadro 2: Exemplos da UT III em diferentes combinações de altura ( $H_{UT}$ ) e efetivo total ( $E_T$ )

Fatores de risco		Categoria de risco (atual legislação)
$H_{UT}$ (m)	$E_T$	
0,2	5	1. <sup>a</sup>
10	20	2. <sup>a</sup>
0,2	1 001	3. <sup>a</sup>
9,0	100	1. <sup>a</sup>
0,2	5 001	4. <sup>a</sup>
28	1 000	3. <sup>a</sup>
50	5 000	3. <sup>a</sup>
60	10 000	4. <sup>a</sup>

### 3.3 As “categorias de risco” em função do produto dos fatores de risco

Estas imprecisões poderiam ser atenuadas, se o critério adotado dependesse do produto dos fatores de risco altura e efetivo ( $H_{UT} * E_T$ ). Os edifícios seriam ordenados em termos de “risco” de forma mais ajustada à realidade.

Considerando os seguintes valores limites de  $H_{UT}$  e  $E_T$ , para cada uma das CR:

- 1.<sup>a</sup> CR –  $H_{UT} * E_T \leq 1000$ ;
- 2.<sup>a</sup> CR –  $H_{UT} * E_T \leq 5000$ ;
- 3.<sup>a</sup> CR –  $H_{UT} * E_T \leq 15000$ ;
- 4.<sup>a</sup> CR –  $H_{UT} * E_T \leq 30000$ ;
- Para  $H_{UT} * E_T > 30000$  – utilizar engenharia de segurança ao incêndio (ESI).

No Quadro 3 apresentam-se as CR de acordo com a atual legislação e segundo o critério alternativo proposto, utilizando as mesmas combinações hipotéticas apresentadas no Quadro 2. Consta-se uma redução das discrepâncias com uma representação mais coerente da realidade. Com efeito, não é razoável que dois edifícios, um com a altura de 0,2 m e um efetivo total de 1001 pessoas, o outro com 50 m de altura e efetivo total de 5000 pessoas, sejam enquadrados na mesma “categoria de risco”. Se observamos a coluna relativa ao produto  $H_{UT} * E_T$ , verifica-se que o valor para o primeiro exemplo (200,2) é muito menor ao do segundo (250 000). Assim, de acordo com a classificação proposta, o primeiro seria da 1.<sup>a</sup> categoria de risco, enquanto no segundo o projeto teria de ser concretizado recorrendo à ESI.

Quadro 3 – CR obtidas a partir da atual legislação e da metodologia alternativa

Fatores de risco		$H_{UT} * E_T$	Categoria de risco conforme a atual legislação	Categorias de risco de acordo com critério alternativo
$H_{UT}$	$E_T$			
0,20	5	1,0	1. <sup>a</sup>	1. <sup>a</sup>
10	20	200,0	2. <sup>a</sup>	1. <sup>a</sup>
0,20	1 001	200,2	3. <sup>a</sup>	1. <sup>a</sup>



9,0	100	900,0	1. <sup>a</sup>	1. <sup>a</sup>
0,20	5 001	1 000,2	4. <sup>a</sup>	2. <sup>a</sup>
28	1 000	28 000,0	3. <sup>a</sup>	4. <sup>a</sup>
50	5 000	250 000,0	3. <sup>a</sup>	ESI
60	10 000	600 000,0	4. <sup>a</sup>	ESI

A metodologia alternativa apresentada não pretende servir de base para uma revisão futura da legislação atual. Tem como objetivo evidenciar os resultados desajustados da legislação vigente, que classifica as UT em CR para exigir determinadas medidas de SCIE. A legislação está, implicitamente, a admitir que o risco que resulta é admissível. Contudo, essa presunção de risco máximo admissível não assenta em critérios científicos, mas numa base empírica.

#### 4. PROPOSTA DE METODOLOGIA ALTERNATIVA ÀS “CATEGORIAS DE RISCO”

##### 4.1 Aspetos gerais

A metodologia alternativa proposta passa pela identificação dos diversos fatores que constituem o perigo e pelas condições de exposição dos ocupantes a esse perigo. O perigo devido ao incêndio pode ser traduzido pela quantificação de várias grandezas, com destaque para a quantidade de fumo libertado, da temperatura do fumo e gases quentes, da concentração de gases tóxicos e da radiação que pode incidir sobre os ocupantes.

Quanto à exposição ao perigo, esta abrange os ocupantes, o edifício onde ocorre o incêndio, o conteúdo físico existente no seu interior, os bombeiros envolvidos no combate, os edifícios vizinhos e, ainda, ao meio ambiente. A exposição dos ocupantes depende de vários fatores com destaque para a altura da UT, o efetivo da UT, o perfil dos ocupantes e sua localização na UT e distâncias necessárias a percorrer para atingir o exterior da UT.

##### 4.2 Fatores de perigo

Nesta proposta, as CR são substituídas pelo “Índice de Perigo” (IP), formado a partir dos seguintes “fatores de perigo”:

- Fator severidade do incêndio ( $F_{SI}$ );
- Exposição dos ocupantes ( $F_{EO}$ );
- Fator altura ( $F_A$ );
- Fator efetivo ( $F_E$ );
- Fator tipo de ocupantes ( $F_{TO}$ ).

##### 4.3 Índice de perigo

O Índice de Perigo (IP) é obtido a partir da seguinte equação:

$$IP = F_{SI} \times F_{EO} \quad (4)$$

em que:

- $F_{SI}$  – Fator severidade de incêndio;
- $F_{EO}$  – Fator exposição dos ocupantes.

###### 4.3.1 Fator severidade do incêndio ( $F_{SI}$ )

Para quantificar o fator severidade do incêndio ( $F_{SI}$ ), recorre-se à taxa de crescimento do incêndio ( $F_{Tci}$ ) e à densidade de carga de incêndio ( $F_{Dci}$ ), a partir da seguinte equação:



$$F_{SI} = F_{Tci} \times F_{Dci} \times F_C \quad (5)$$

em que  $F_C$  é o fator de correção da carga de incêndio.

As taxas de crescimento do incêndio ( $F_{Tci}$ ) devem ser categorizadas de acordo com o Quadro 4.

Quadro 4: Taxas de crescimento do incêndio

Taxa de crescimento	Categoria	Valor da taxa de crescimento $t_\alpha$ (s)
Lento	L	600
Médio	M	300
Rápido	R	150
Ultrarrápido	U	75

A componente do índice de severidade devida à taxa de crescimento do incêndio ( $F_{Tci}$ ) é obtida a partir da seguinte equação:

$$F_{Tci} = \left(\frac{600}{t_\alpha}\right)^2 \times \frac{Dci}{100} \quad (6)$$

em que:

$t_\alpha$  – Taxa de crescimento do incêndio (s);

$Dci$  – Densidade de carga de incêndio ( $\text{MJ}/\text{m}^2$ ).

O fator densidade de carga de incêndio ( $F_{Dci}$ ) é obtido a partir da seguinte equação geral:

$$F_{Dci} = \frac{q_{f,k} + q_r}{100} \quad (7)$$

em que:

$q_{f,k}$  – Densidade de carga de incêndio do conteúdo do local – ver Quadro 5 ( $\text{MJ}/\text{m}^2$ );

$q_r$  – Densidade de carga de incêndio dos revestimentos, quando estes não cumprem as exigências regulamentares de reação ao fogo ( $\text{MJ}/\text{m}^2$ )<sup>†††</sup>.

Quadro 5: Reprodução do quadro E.5 da EN 1991-1-2  
(densidade de carga de incêndio  $q_{f,k}$  para diferentes tipos de ocupação)

Ocupação	(MJ/m <sup>2</sup> )	
	Média	Quantilho de 80%
Habitação	780	948
Hotel (quarto)	310	377
Escritório	420	511
Salas de aula de uma escola	285	347
Centro comercial	600	730

Nota: Admite-se uma distribuição de Gumbel para o quantilho de 80%.

#### 4.3.2 Fator de exposição dos ocupantes ( $F_{EO}$ )

O fator de exposição dos ocupantes ( $F_{EO}$ ) é obtido a partir da seguinte equação geral:

$$F_{EO} = F_H \times F_E \times F_{PO} \quad (8)$$

em que:

$F_H$  – Fator altura do edifício

<sup>†††</sup> O método de cálculo relativo a este fator  $q_r$  será publicado posteriormente.



$F_E$  – Fator efetivo do edifício  
 $F_{PO}$  – Fator perfil do ocupante

#### 4.3.3 Fator altura do edifício ( $F_H$ )

O valor do fator perigo altura ( $F_H$ ) é obtido a partir das seguintes expressões:

- a) Para pisos acima do plano de referência

$$F_H = 0,0009 \times H^2 + 0,0659 \times H + 0,0797 \quad (9)$$

- b) Para pisos abaixo do plano de referência

$$F_H = 0,0036 \times NP_C^2 + 0,8221 \times NP_C - 0,1214 \quad (10)$$

em que:

H – Altura da UT em m;  
 $NP_C$  – Número de pisos em cave.

#### 4.3.4 Fator efetivo do edifício ( $F_E$ )

Relativamente a este fator considerou-se que o efetivo será dividido em 4 escalões:

- $E \leq 100$ ;
- $100 < E \leq 500$ ;
- $500 < E \leq 1000$ ;
- $E > 1000$ .

#### 4.3.5 Fator perfil de ocupantes ( $F_{TO}$ )

Foram considerados 7 tipos distintos de perfis dos ocupantes, conforme se pode constatar no Quadro 6. O fator a atribuir a cada perfil será feito posteriormente, recorrendo à realização de simulações relacionadas com o desenvolvimento e propagação do incêndio, assim como da evacuação, com o objetivo de aferir, de forma fundamentada, esses valores.

Quadro 6: Fator relativo ao tipo de ocupantes

Tipo de ocupantes	Designação	Exemplos
Ativos e conhecedores do edifício	OP1	Escritórios e instalações industriais
Ativos e não conhecedores do edifício	OP2	Lojas, centros comerciais, museus
Em repouso e conhecedores do edifício	OP3	Habitação s/ organização e gestão de SI
Em repouso e não conhecedores do edifício	OP4	Habitação c/ organização e gestão de SI
Ocupação gerenciada de longo prazo	OP5	Alojamento local, residências ou internatos
Em repouso, permanência curta	OP6	Hotéis e residências
Cuidados médicos, idosos ou crianças até 3 anos	OP7	Hospitais, lares, creches

## 5. CONCLUSÕES E ESTUDOS FUTUROS



A análise apresentada neste artigo evidencia diversos factos com destaque para os seguintes:

- i) importância das designadas “categorias de risco”, no âmbito do RT-SCIE e RJ-SCIE;
- ii) confusão de conceitos entre risco e perigo;
- iii) ausência de fundamentação científica na fixação dos designados “fatores de risco” das UT;
- iv) ausência de fundamentação científica na fixação dos critérios para a determinação da “categoria de risco”;
- v) possibilidade de desenvolvimento de metodologia alternativa para concretizar as exigências legislativas.

A manutenção das atuais “categorias de risco” constitui um risco técnico e legal que não pode ser ignorado, especialmente após o reconhecimento das suas fragilidades no Decreto-Lei n.º 224/2015. Urge, portanto, que a futura revisão legislativa não só reconheça este problema, mas adote uma solução fundamentada.

A metodologia proposta neste artigo — baseada na correta determinação do perigo e da exposição a este — oferece uma alternativa cientificamente robusta e viável para descontinuar o conceito atual de “categorias de risco”, promovendo um quadro de SCIE mais coerente e eficaz. Para a concretização desta alternativa, torna-se necessário definir os valores a atribuir aos diferentes fatores que integram a formulação da metodologia proposta, tarefa que exigirá a realização de estudos complementares. A determinação desses valores será efetuada com recurso a trabalho de simulação, prevendo-se, para diversas tipologias de edifícios, a realização de simulações do desenvolvimento e da propagação do incêndio, bem como da evacuação, de modo a aferir esses valores de forma fundamentada.

## REFERÊNCIAS

Decreto-Lei n.º 220/2008 (2008). *Regime Jurídico da Segurança Contra Incêndios em Edifícios*. Diário da República, 1.<sup>a</sup> Série. N.º 220 (2008-11-12), pp. 7903-7922. Disponível em <https://diariodarepublica.pt/dr/detalhe/decreto-lei/220-2008-439866>.

Decreto-Lei n.º 224/2015 (2015). *Procede à primeira Alteração ao Regime jurídico de segurança contra incêndio em edifícios*. Diário da República, 1.<sup>a</sup> Série. N.º 198 (2015-10-9), pp. 8740-8774. Disponível em <https://diariodarepublica.pt/dr/detalhe/decreto-lei/224-2015-70497202>.

Portaria n.º 1532/2008 (2008). *Regulamento Técnico de Segurança contra Incêndios em Edifícios*. Diário da República, 1.<sup>a</sup> Série. N.º 250 (2008-12-29), pp. 9050-9127. Disponível em <https://diariodarepublica.pt/dr/detalhe/portaria/1532-2008-444380>.

Coelho, A. L. (1997) – *Modelação Matemática da Evacuação de Edifícios Sujeitos à Acção de Um Incêndio*. Tese de doutoramento, Universidade do Porto (Portugal).

ISO 16732-1:2012, 2012. *Fire safety engineering—Fire risk assessment - Part 1: General*.

Kaplan, S. & Garrick, B.J. (1981) – *On The Quantitative Definition Of Risk*, Risk Analysis, Vol. 1, No. 1, pp.11–27.

Meacham, B.J. (2001) – *Addressing risk and uncertainty in performance-based fire protection engineering*, Fire Protection Engineering, Vol. 10, pp. 16-25.

Meacham, B.J. (2002) – *Building fire risk analysis*, SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, National Fire Protection Association, Quincy, MA, pp.5–153.

Paulsson, U. (2007). *On managing disruption risks in the supply chain – the DRISC model*. Doctoral dissertation, Department of Industrial Management and Logistics, Engineering Logistics, Lund University (Suécia).

Renn, O. (1998). *The role of risk perception for risk management*. Reliability Engineering and System Safety. Vol. 59, pp. 49-62.

Slovic, P. (2001) – *The risk game*. Journal of Hazardous Materials, Vol. 86, pp. 17-24.

Watts, J.M. & Hall, J.R. (2002) – *Introduction to fire risk analysis*, SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, National Fire Protection Association, Quincy, MA, pp. 5–1.



**9JORNINC-4JORPROCIV**

9<sup>ª</sup> Jornadas de Segurança aos Incêndios Urbanos  
4<sup>ª</sup> Jornadas de Proteção Civil

Coimbra, 7 de novembro de 2025

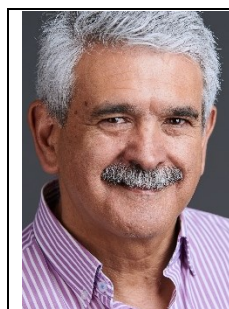


## DESENVOLVIMENTO DE CERTIFICADO DE SEGURANÇA CONTRA INCÊNDIOS PARA EDIFÍCIOS EXISTENTES

UTILIZAÇÃO DO MODELO DE AVALIAÇÃO DE RISCO EBRAFIRE 2.0



**Luís C. Ferreira  
Moreira** **##**  
Msc. Eng. Civil  
Investigador C-  
MADE, UBI, Covilhã,  
Portugal



**João Carlos  
Gonçalves  
Lanzinha**  
Docente, Doutor,  
Prof. Associado,  
Investigador C-  
MADE, UBI, Covilhã,  
Portugal

### SUMÁRIO

O EBRAFire 2.0 (Existing Building Risk Assessment for Fire) surge da necessidade contínua de investigação na área da segurança contra incêndios em edifícios, dada a natureza complexa e imprevisível dos riscos associados ao fogo. Aplica-se maioritariamente a edifícios existentes, que apresentam deficiências de segurança, quer por questões regulamentares, quer por degradação ou falta de manutenção. Com base na regulamentação e em dados estatísticos, este modelo avalia os riscos de incêndio através de inspeções no local e emite um Certificado de Segurança Contra Incêndio (CSI), classificando o nível de segurança do edifício numa escala mensurável. O CSI também compila informação essencial de segurança num único documento, apoiando decisões em diversas áreas. O modelo apoia o planeamento urbano, identificando zonas de risco e fornece informação útil para as operações de resposta a emergências.

**PALAVRAS-CHAVE:** Segurança Contra Incêndios; Modelo de Avaliação de Risco em Edifícios Existentes; Certificado de Segurança Contra Incêndio; Proteção Civil.

### 1 INTRODUÇÃO

O EBRAFire 2.0 é uma ferramenta concebida para a avaliação da segurança contra incêndios em edifícios, especialmente em edifícios existentes, abrangendo quatro aspetos principais: condições de ignição, propagação do incêndio, medidas de extinção e capacidades de evacuação. Este método é aplicado principalmente a edifícios já construídos, em particular aqueles edificados numa época em que não existia regulamentação de segurança contra incêndios, ou em situações em que a manutenção e atualização dos sistemas de segurança foram negligenciadas ao longo do tempo. Este instrumento de avaliação possui ainda a capacidade essencial de avaliar riscos associados a eventos excecionais.

---

**##** Luís C. Ferreira Moreira – Mestrado em Engenharia Civil, investigador C-MADE (Centre of Materials and Civil Engineering for Sustainability), Departamento de Engenharia Civil e Arquitetura, 6201-001, Universidade da Beira Interior, , Covilhã, Portugal; email: luis.moreira@ubi.pt



O desenvolvimento deste método exigiu a recolha de dados técnicos e regulamentares, dados estatísticos sobre incêndios estruturais e registos de incêndios reais. Envolveu também a comparação, aperfeiçoamento e atualização de conceitos presentes noutras metodologias de avaliação de risco de incêndio. A principal inovação deste modelo de avaliação reside na sua capacidade de emitir um Certificado de Segurança Contra Incêndios, permitindo a validação técnica da integridade estrutural e a identificação dos riscos de incêndio, enquanto facilita a implementação das medidas corretivas necessárias. É aplicável a todas as fases do ciclo de vida de um edifício.

O modelo permite identificar unidades ou partes de edifício com potencial risco de incêndio, propondo um gradiente de risco, desempenhando um papel crucial no planeamento urbano e na Proteção Civil, e auxiliando na gestão de proprietários e administrações de condomínios.

A Segurança Contra Incêndios em Edifícios (SCIE) é uma temática ampla e complexa que exige atualização constante. Para além dos fatores regulamentares aplicáveis, devem também ser considerados outros elementos na avaliação do risco de incêndio. Como resultado, o atual parque edificado apresenta diversos riscos, muitos dos quais estão associados à ausência de requisitos regulamentares à época da construção. É, por isso, essencial realizar uma análise abrangente dos riscos de incêndio em todos os edifícios, uma vez que todas as construções, pela sua natureza, podem apresentar riscos, mesmo quando cumprem a regulamentação.

## 2 RECOLHA E TRATAMENTO DE DADOS

### 2.1 Interpretação da Regulamentação e de Outras Metodologias de Avaliação de Risco de Incêndio

O desenvolvimento do método proposto baseou-se na legislação portuguesa, em particular no Regulamento de Segurança Contra Incêndios e no respetivo enquadramento legal [2], bem como nas instruções técnicas emitidas pela Autoridade Nacional [1]. Uma análise detalhada desta regulamentação permitiu identificar os requisitos aplicáveis e definir critérios de análise de risco de incêndio. Foram definidas variáveis com base na tipologia de utilização do edifício, envolvente, especificações de equipamentos e materiais, condições de evacuação e disponibilidade de sistemas e equipamentos de segurança contra incêndios.

Foi realizada uma análise comparativa de metodologias existentes, que permitiu identificar fatores críticos frequentemente desconsiderados nos enquadramentos regulamentares. A organização destas metodologias segundo critérios regulamentares comuns possibilitou uma avaliação sistemática e fundamentada.

Foram analisadas diversas metodologias consolidadas, incluindo: Gretener [5], FRAME [6], FRIM [7], MARIEE [8], CHICHORRO [9], ARICA2019 [10], BFSEM [11], FSES [12] e FLAME [13]. O Método EBRAFire 1.0, desenvolvido pelo autor [3], também foi estudado, destacando-se a sua abordagem matricial de comparação de risco, cuja aplicação em casos de estudo [4] permitiu melhorias significativas no EBRAFire 2.0.

Para compreender melhor os critérios abordados por cada método, foi desenvolvida uma matriz de comparação, tendo como referência a regulamentação portuguesa, identificando necessidades adicionais de segurança. Este estudo comparativo foi fundamental para a definição dos critérios de avaliação, métodos de análise e fluxogramas de avaliação de edifícios, nos quais foram identificadas três limitações principais na maioria dos métodos existentes:

- **Interpretação dos Resultados:** Falta de clareza na apresentação das conclusões.
- **Avaliação Holística:** Alcance limitado na avaliação do risco de incêndio em edifícios existentes.
- **Sequenciação de Riscos Locais:** Consideração insuficiente das cadeias de risco e dos impactos interedifícios.

O EBRAFire 2.0 visa superar estas limitações, integrando todos os critérios essenciais de avaliação do risco de incêndio numa ferramenta unificada e prática.

## 3 EBRAFIRE 2.0 – AVALIAÇÃO DO RISCO DE INCÊNDIO EM EDIFÍCIOS EXISTENTES



Com base na recolha abrangente de dados, no contexto regulamentar, nos critérios de desempenho e na análise de ocorrências reais, é proposto um fluxograma inicial para o processo de cálculo e avaliação do risco, que se inicia com a caracterização dos elementos relacionados com o edifício, os seus ocupantes e as suas atividades e de seguida são determinadas as contribuições individuais de cada fator.

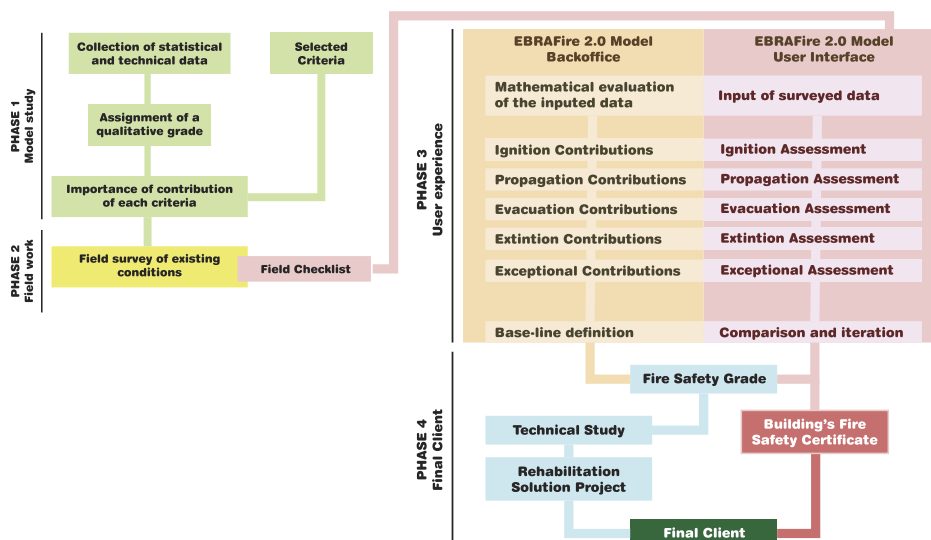


Figura 1: Fluxograma de rotina de cálculo da avaliação do Risco de Incêndio, EBRAFire 2.0

A rotina de cálculo do EBRAFire 1.0 foi também considerada, em particular a sua metodologia de triangulação de múltiplas matrizes correspondentes aos diferentes critérios de avaliação em análise.

### 3.1 Definição de Critérios

Os critérios considerados no Modelo EBRAFire 2.0 baseiam-se numa análise da regulamentação de segurança contra incêndios, de outras metodologias internacionais de avaliação de riscos, e de dados estatísticos sobre ocorrências reais. Foram definidos os seguintes capítulos principais e subcategorias, que constituem a estrutura de referência para a avaliação [2]:

- **Envolvente:** Inclui os acessos exteriores, a caracterização da envolvente do edifício, a disponibilidade de água para combate a incêndios, a resistência ao fogo dos materiais circundantes e as condições na interface urbano-florestal, que é um critério inovador, ausente de modelos comparáveis, que aborda os riscos associados à proximidade de áreas vegetadas ou florestais.
- **Características do Edifício:** Avalia-se a utilização ou tipologia do edifício, a configuração geométrica, as propriedades de reação ao fogo dos materiais, a compartimentação, e a natureza dos conteúdos móveis e fixos. São também considerados o índice de propagação do fogo, o potencial de emissão de fumo e a capacidade de ventilação.
- **Evacuação:** Engloba a avaliação dos percursos de evacuação (horizontais, verticais e entre compartimentos corta-fogo), o número e mobilidade dos ocupantes, as características comportamentais em emergência e o número e localização das saídas.
- **Instalações Técnicas:** Inclui a avaliação dos sistemas fixos (elétricos, AVAC, armazenamento de combustíveis, geradores), equipamentos temporários ou móveis, sistemas de ventilação e elevadores. Este modelo introduz de forma pioneira o conceito de potencial de *backdraft*, ausente na maioria dos outros métodos.
- **Sistemas de Segurança Contra Incêndios:** O modelo analisa a eficácia da sinalização, iluminação de emergência, deteção e alarme de incêndio, sistemas de controlo de fumo (ativos e passivos) e monitorização da qualidade do ar (por exemplo, CO e gases inflamáveis). Estes sistemas são avaliados quanto ao seu desempenho nas fases de alerta precoce e de supressão. É igualmente avaliada a



capacidade de intervenção, incluindo a disponibilidade e adequação dos meios de 1.<sup>a</sup> e 2.<sup>a</sup> intervenção, bem como sistemas fixos de extinção e cortinas de água.

- **Proteção Contínua:** Avalia-se a presença e adequação de medidas de proteção permanente, como postos de segurança, medidas de autoproteção e o estado de prontidão operacional das equipas de combate a incêndio.
- **Condições Excepcionais:** É proposto um índice de risco específico para eventos que envolvam grandes concentrações de público, instalações especiais ou pirotecnia. Os critérios foram definidos com base em ocorrências históricas de incêndios associadas a eventos de grande escala.

Cada critério foi posteriormente desdobrado em um conjunto de perguntas orientadoras, com opções de resposta de escolha múltipla. A cada opção é atribuído um valor quantitativo, representando um risco ou um benefício, que contribui para o cálculo do índice global de risco de incêndio. Esta abordagem estruturada permite um processo de avaliação padronizado, adaptável a diferentes tipos de edifícios.

Este modelo de avaliação permite aos utilizadores realizar análises de risco de incêndio precisas, baseadas em cenários reais, o que promove resultados consistentes e decisões eficazes ao longo de todas as fases do ciclo de vida do edifício.

O processo de avaliação é atualmente implementado em *Microsoft Excel*, embora a sua estrutura flexível permita a adaptação a outras linguagens de programação. O objetivo é garantir que a lista de opções disponíveis seja clara, coerente e aplicável a uma ampla variedade de cenários.

### 3.2 Princípios de Funcionamento do EBRAFire 2.0

O modelo de avaliação de risco de incêndio considera que cada critério contribui positivamente para a segurança do edifício ou, em alternativa, aumenta o risco de incêndio, mediante uma clara avaliação da sua característica e influência.

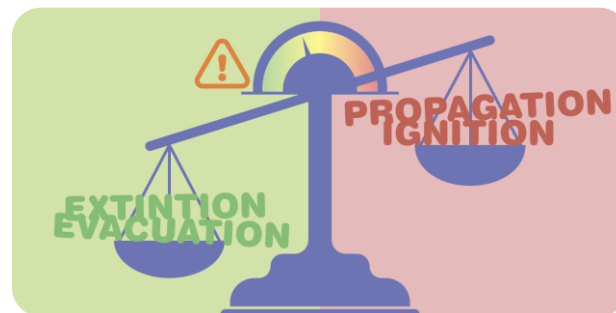


Figura 2: Princípios do equilíbrio para o EBRAFire 2.0

Para o Contributo para a Eficácia do Combate a Incêndios existem fatores que melhoram as operações de combate ao incêndio, tanto pelos meios de socorro como pelos ocupantes, nas fases iniciais do sinistro. Os critérios incluídos são: Acessos exteriores, Geometria do edifício, Características estruturais, Abastecimento de água, Recursos de combate, Facilidade de abordagem das equipas de socorro e Capacidade de extinção.

Os fatores de Contributo para a Propagação do Incêndio avaliam como o incêndio se pode desenvolver e propagar dentro do edifício, tendo em conta a envolvente do edifício, combustibilidade dos materiais, emissão de fumo, ventilação e controlo de ar, gravidade e velocidade de propagação do fogo e risco de *backdraft*. A consideração do Risco de *Backdraft* é uma das características do EBRAFire 2.0 que o tornam inovador, e é a avaliação do potencial de ocorrência de explosões de fumo, através da análise do equilíbrio entre ventilação e emissão ou acumulação de fumo. Este procedimento permite identificar cenários críticos onde pode ocorrer comportamento explosivo do fogo.



Os fatores de contributo para a Ignição do Incêndio avalia a probabilidade de início de incêndio devido a negligência, falhas de equipamentos ou condições ambientais, considerando a interface urbano-florestal, conteúdos e cargas de incêndio, instalações elétricas, de aquecimento, gás e outras, qualidade da ventilação, comportamento humano e fatores de probabilidade de ignição.

Os fatores de Contributo para a Evacuação avaliam a capacidade do edifício para permitir a saída segura dos ocupantes, caracterizando os percursos de evacuação horizontais e verticais, perfil e mobilidade dos utilizadores, sistemas de deteção e alarme de incêndio e tempo de alarme e evacuação, que é calculado com base em intervalos estimados que englobam a ativação do alarme, a reação dos ocupantes e o tempo necessário para evacuar todas as pessoas em segurança.

Os fatores de Contributo de Eventos e Atividades Temporárias são medidos após a avaliação do risco global de incêndio. Realiza-se uma análise adicional para eventos ou utilizações temporárias que possam colocar à prova os sistemas de segurança existentes. Estas condições ou eventos temporários podem aumentar o risco de incêndio e são avaliados separadamente, considerando a concentração de público, pirotecnia, equipamentos ou utilizações temporárias, potencial de ignição ativa e risco de atividade excecional.

### **3.3 Apresentação dos Resultados**

Os resultados são compilados numa folha de síntese, que agrega todos os dados introduzidos e destaca as vulnerabilidades críticas. Esta folha serve também de base para a emissão do Certificado de Segurança Contra Incêndios [2]. Todos os fatores são normalizados numa mesma escala, de modo a garantir ponderações equilibradas no cálculo final.

A classificação global do risco de incêndio varia entre -1 e 1, distribuído com as classificações G, F, E, D, C, B, A3, A2 e A1, sendo G a pior, e a A1 a melhor. A Escala de Avaliação é representada visualmente por uma cor e num gráfico de desempenho.

Um gráfico radar de quatro eixos ilustra visualmente a posição do edifício em relação aos princípios do EBRAFire 2.0, ajudando a identificar as áreas de risco predominantes.

Para eventos temporários, são apresentadas três classificações distintas, para base do edifício (sem evento), durante o evento sem pirotecnia e durante o evento com pirotecnia.

Estas classificações são exibidas utilizando a mesma escala e representação visual da avaliação global, garantindo coerência e comparabilidade.

## **4 CERTIFICADO DE SEGURANÇA CONTRA INCÊNDIOS**

O Modelo EBRAFire 2.0 foi estruturado para permitir a emissão de um documento que compila informação sobre as características do edifício, possibilitando uma análise detalhada dos dados recolhidos, a identificação de não conformidades e a proposição de soluções direcionadas a pontos específicos do edifício [2].

Este documento destina-se a integrar o Dossier Técnico do edifício, que normalmente inclui outros documentos como manuais de manutenção de equipamentos, guias de procedimentos de emergência, certificados de eficiência energética e outros registos relevantes para a operação do edifício.

O cabeçalho do Certificado de Segurança Contra Incêndios contém informação identificativa do edifício, incluindo localização, código de referência único, entidade requerente e o técnico responsável pela avaliação. Apresenta igualmente o nível de certificação de segurança contra incêndios atribuído ao edifício.

De seguida, o documento fornece uma visão completa de todos os dados introduzidos pelo avaliador, descrevendo de forma clara as premissas utilizadas no cálculo e avaliação da segurança contra incêndios.



Esta listagem detalhada permite que o documento seja consultado por outros profissionais após a sua emissão, sem necessidade de aceder ao ficheiro original do projeto.

Com base nas quatro principais categorias de contribuição para a análise de Segurança Contra Incêndios e nas condições de autoproteção, o certificado apresenta os resultados obtidos pela rotina de avaliação.

Na sua secção final, o certificado apresenta a classificação global de segurança contra incêndios do edifício, incluindo um resumo visual conciso dos resultados globais, igualmente disponível nas folhas de análise detalhada.

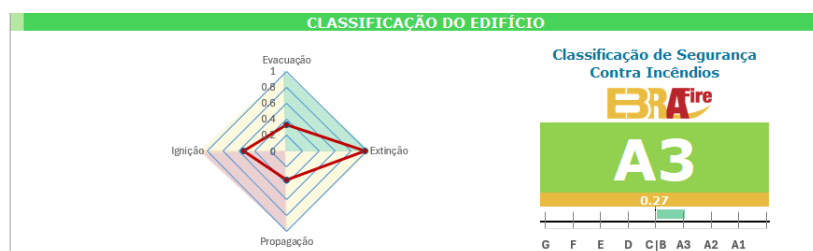


Figura 3: Representação da classificação final do edifício, EBRAFire 2.0

Por fim, o certificado inclui um resumo gráfico de todos os critérios considerados, organizados de forma a ilustrar as suas contribuições individuais para a classificação do edifício, seja da estrutura total, de uma unidade específica ou de um compartimento.

## 5. APLICAÇÃO DO MODELO E INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS

Foi realizado um estudo de caso num edifício de utilização de cuidados de saúde [2], concretamente uma pequena unidade local de saúde situada em Tortosendo, no concelho da Covilhã, Portugal. O estudo envolveu o levantamento das características do edifício, registadas numa ficha de campo e posteriormente introduzidas na interface EBRAFire 2.0. Os dados resultantes permitiram uma análise completa e a emissão de um Certificado de Segurança Contra Incêndio (SCI).

O documento resume os dados inseridos e apresenta de imediato uma classificação A3, indicando um edifício com nível médio de segurança. O estudo teve como objetivo identificar possíveis melhorias para reforçar a segurança contra incêndio. Cada um dos quatro princípios principais do modelo EBRAFire foi analisado para determinar quais os fatores com melhor ou pior desempenho nas respetivas categorias.

### 5.1. Fatores de Combate ao Incêndio

Os fatores de disponibilidade de água e meios de combate ao incêndio revelam baixa eficiência do sistema, sugerindo a necessidade de melhorias nos recursos de combate inicial.

### 5.2. Fatores de Propagação do Incêndio

Embora os contributos globais para a propagação do incêndio sejam reduzidos, a má ventilação aumenta o potencial de *backdraft*. O Gráfico de Risco de *Backdraft* apresenta um resultado numérico e a respetiva comparação relativa. Embora não permita confirmar com certeza a ocorrência de explosão de fumo, indica a probabilidade de fenómenos semelhantes devido à combustibilidade dos materiais e à falta de renovação de ar.

Esta avaliação de risco contribui não só para a preparação das equipas de emergência, mas também para a implementação de medidas preventivas, como a melhoria da ventilação ou a seleção de materiais de baixa emissão de fumo. Assim, melhora-se a visibilidade e a segurança das rotas de evacuação durante um incêndio e durante a evacuação.



### 5.3. Proteção do Edifício

O edifício possui medidas de autoproteção atualizadas e implementadas, o que reduz significativamente o risco global.

### 5.4. Linha Temporal

São analisadas três fases principais na Linha Temporal de Resposta ao Incêndio:

- **Evacuação:** o gráfico identifica o momento do alarme e da evacuação. Sobrepondo estes dados ao possível flashover, verifica-se que a evacuação não ocorreria dentro de um prazo seguro, aumentando o risco para os ocupantes devido ao alerta tardio.
- **Operações de Socorro:** o tempo médio de resposta dos bombeiros é estimado em 3,5 minutos, influenciado pela distância e complexidade do edifício. Seguem-se as tarefas de combate direto, busca e salvamento, proteção de exposições, entre outras. Em média, a operação de combate dura cerca de 40 minutos.
- **Gráfico de Desenvolvimento do Incêndio:** as linhas tracejadas servem de referência para avaliar a energia térmica do incêndio ao longo do tempo (eixo horizontal). Embora a energia seja apresentada sem unidades, a curva reflete o comportamento típico de um incêndio, comparando a energia de um fogo não controlado com a energia após intervenção.

A interpretação do estudo indica que o alerta inicial coincide com o momento esperado de flashover, revelando uma falha crítica e aumento do risco de exposição dos ocupantes.

### 5.5. Fatores de Ignição

Os riscos de ignição no edifício estudado são muito baixos, sendo as instalações elétricas e de aquecimento as principais áreas de preocupação. Nos resultados são apresentadas graficamente as características com maior peso no risco de ignição.

### 5.6. Fatores de Evacuação e Alerta

Quanto ao tempo de evacuação, observa-se um valor elevado para o tempo de alarme e alerta, agravado por uma evacuação mais lenta devido à possível presença de pessoas com mobilidade reduzida. Utiliza-se um gráfico que simula um cronómetro com duração total de 1 hora, mostrando dois intervalos temporais: tempo de alerta e tempo de evacuação. O alerta está associado à capacidade de deteção do incêndio, seja pelos ocupantes ou pelo sistema automático de deteção. Já a evacuação relaciona-se com a capacidade de interpretar os alertas, a mobilidade dos utilizadores e as condições das vias de evacuação.

### 5.7. Gráfico de 4 Eixos e Classificação Global do Edifício

A análise termina com a interpretação do gráfico de classificação global, estruturado em quatro eixos que representam os quatro princípios do EBRAFire 2.0, cuja leitura permite compreender quais os critérios mais expressivos na avaliação do edifício, tendo sido observado no estudo de caso, que o aspeto mais desfavorável engloba as características de evacuação.

### 5.8. Resumo Gráfico do Certificado SCI

No Certificado SCI, observa-se o resumo gráfico de cada critério, no qual se pode indicar que quanto maior a barra, maior a contribuição para a respetiva categoria. Distinguem-se dois tipos de contributos:

- Critérios que contribuem positivamente para a Segurança Contra Incêndio (barras verdes);
- Critérios que aumentam o Risco de Incêndio (barras vermelhas).



No edifício estudado, o resumo gráfico relativo às Condições de Evacuação mostra claramente como os critérios considerados influenciam a classificação final, sendo esta a principal preocupação identificada na análise dos resultados anteriores.

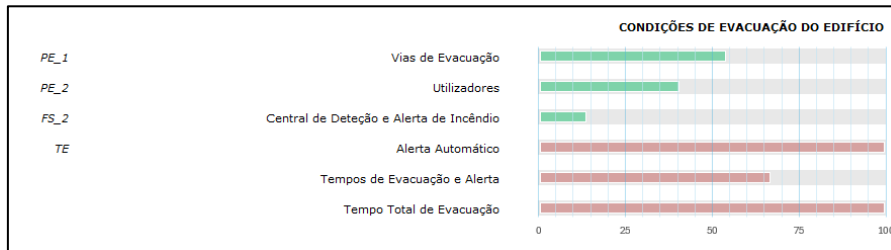


Figura 4: Interpretação das Condições de Evacuação do edifício, EBRAFire 2.0

Pode interpretar-se que os três critérios que poderiam contribuir para melhorar as condições de evacuação apresentam valores relativamente baixos em comparação com aqueles que as dificultam. Uma vez identificados os critérios relevantes, é possível analisar a causa dos resultados e compreender quais as alternativas que poderiam ser implementadas a fim de obter um resultado mais favorável.

Esta interpretação dos resultados deve ser feita de forma iterativa. Primeiro, faz-se uma leitura geral dos resultados e, posteriormente, uma interpretação individual de cada critério, permitindo definir e priorizar soluções específicas para o edifício.

### 5.9. Medidas Propostas de Mitigação e Correção

Após a análise dos fatores que mais contribuem para o risco, são propostas medidas corretivas e de mitigação, permitindo uma compreensão direta dos resultados no modelo, com alterações sucessivas nas opções selecionadas durante o processo de introdução de dados.

Foram propostas aplicar as seguintes medidas:

- Implementação de Centrais de Detecção de Incêndio, detetores automáticos e sistemas de alarme com vigilância permanente.
- Substituição dos sistemas de aquecimento por sistemas novos.
- Promoção da ventilação dos espaços e distribuição de portas corta-fogo.
- Distribuição eficaz dos meios de extinção.
- Realização de simulacros de incêndio.
- Redistribuição dos lugares de estacionamento no perímetro do edifício.

É possível observar a melhoria da Segurança Contra Incêndio ao comparar as classificações antes e depois da implementação das medidas propostas com os novos dados introduzidos no modelo, onde já foram selecionadas as opções correspondentemente às correções e intervenções realizadas.



Figura 5: Antes e depois: Gráfico de 4 eixos e Gráfico de Tempo de Evacuação

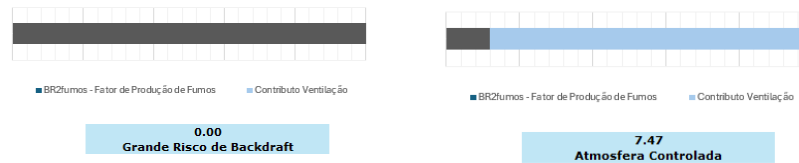


Figura 6: Antes e depois: Gráfico de Risco de *Backdraft*



Figura 7: Antes e depois: Gráfico da Classificação Final

## 6. CONCLUSÃO

Esta investigação descreve o desenvolvimento e aplicação do Modelo de Avaliação EBRAFire 2.0, concebido para avaliar a Segurança Contra Incêndios (SCI) em edifícios. A sua metodologia utiliza um fluxograma operacional e integra critérios técnicos, atribuindo valores ponderados com base no impacto de cada fator no desempenho global da segurança contra incêndios.

É possível sistematizar a recolha de dados in situ através de uma ficha de campo, o que simplifica o processo de introdução de dados na aplicação EBRAFire 2.0. O modelo permite ainda a obtenção de resultados habitualmente indisponíveis em avaliações convencionais, tais como estimativas de tempo de evacuação, risco de explosão de fumo (*backdraft*) e impactos de utilizações excecionais.

Um dos principais resultados do modelo EBRAFire 2.0 é a geração de um Certificado de Segurança Contra Incêndio (SCI) padronizado, que serve como indicador do desempenho do edifício em matéria de segurança contra incêndios. Este certificado atribui uma classificação numa escala de A1 a G, baseada numa avaliação ponderada dos critérios técnicos e das respetivas contribuições para o desempenho global da SCI. Desta forma, constitui uma ferramenta de avaliação clara, acessível e tecnicamente fundamentada, útil para uma ampla variedade de intervenientes. O certificado revela-se particularmente valioso como instrumento de apoio à decisão, em contextos como reabilitação de edifícios, transações imobiliárias, processos legais e formulação de estratégias de mitigação de risco.

No estudo de caso, o Certificado de SCI mostra-se eficaz na identificação de vulnerabilidades específicas, permitindo a definição de soluções direcionadas para as áreas de risco elevado.

A ampla aplicabilidade do modelo também possibilita a elaboração de mapas urbanos de risco, contribuindo para o planeamento territorial e para a gestão integrada da Proteção Civil.

A usabilidade e a robustez analítica do EBRAFire 2.0 destacam o seu forte potencial como ferramenta científica e técnica para a avaliação abrangente da Segurança Contra Incêndios em ambientes edificados.

## REFERÊNCIAS

- [1] ANEPC. (2023). Autoridade Nacional de Emergência e Proteção Civil., [www.procivil.gov.pt](http://www.procivil.gov.pt) último acesso a 04/2024
- [2] Moreira, L. Modelo de Avaliação e Certificação da Segurança Contra Incêndios em Edifícios Existentes. <https://ubibliorum.ubi.pt/handle/10400.6/14788> Dissertação de Mestrado em Eng. Civil. Faculdade de Eng. Civil e Arquitetura, Universidade da Beira Interior, Covilhã, Portugal. (2024).
- [3] Silva, F. J., Moreira, L., Lanzinha, J., Krüger, P. EBRAfire: Fire Safety Assessment And Classification Of Buildings. *Int. Journal of Engineering Research and Application (IJERA)* Vol. 10 - No. 12, pp. 57-65 (2020).



- [4] Kruger, P., Silva, et al.. An Assessment of Fire Hazard in the Historic Town of Ouro Preto based on Four Established Analysis Methodologies. *Global Journal Of Human-Social Science* Vol 21 Issue 4 V 1.0 (2021).
- [5] Barra, C. P. Avaliação Do Risco De Incêndio Dum Edifício De Triagem De Resíduos Sólidos Urbanos. *TERRITORIUM Journal* Vol 21, p. 147-156. (2014).
- [6] Guo, S. Fire Risk Assessment for Commercial Buildings Based on FRAME Method, *IOP Conference Series Earth and Environmental Science* 223 (012048) (2019).
- [7] Brzezinska, D., & Bryant, P. Risk Index Method—A Tool for Building Fire Safety Assessments. *Appl. Sci.* 2021, 11, 3566, DOI: 10.3390/app11083566, p. 16 (2021).
- [8] Pissarra, J. F. Desenvolvimento e Implementação Numérica de um Modelo de Análise de Risco de Incêndio Urbano – MARIEE. Mestrado Integrado em Eng. Civil - 2013/2014 – Dept. de Eng. Civil, Faculdade de Eng. da Univ do Porto, Portugal, 2014. (01 de 2014).
- [9] Soares, M. B. Avaliação do Risco de Incêndio do Centro Urbano de Amarante com o Modelo CHICHORRO. Mestrado Integrado em Eng. Civil - 2020/2021 – Dept. de Eng. Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2021.
- [10] LNEC - Laboratório Nacional de Engenharia Civil. ARICA:2019 Método de Avaliação da Segurança ao Incêndio em Edifícios Existentes, pp. 13-48. (12 de 2019)
- [11] Fitzgerald, R. W. *Building Fire Performance Analysis*. (2004).
- [12] McGhie, C. Apparent Level of Safety of Buildings Meeting the New Zealand Building Code Approved Document C/AS1 – Fire Safety. In *Fire Engineering Research Report 07/2*, pp. 93-97 Christchurch - New Zealand (2007).
- [13] Danzi, E., Marmo, L., & Fiorentini, L. FLAME: A Parametric Fire Risk Assessment Method Supporting Performance Based Approaches, p. 45 (2021).



## EXTREME WORKING CONDITIONS IN FIREFIGHTING: ASSESSMENT OF PROTECTIVE AND SAFETY MEASURES

**Gilberto Vaz** <sup>§§§,2,\*</sup>  
Professor  
ISEC/IPC - Coimbra  
ADAI/UC - Coimbra

**António M. M. Raimundo** <sup>3</sup>  
Professor  
UC - Coimbra

**A. Virgílio M. Oliveira** <sup>1,2</sup>  
Professor  
ISEC/IPC - Coimbra  
ADAI/UC - Coimbra

**Miguel Almeida** <sup>2</sup>  
Professor  
ADAI/UC - Coimbra

### ABSTRACT

Wildland and urban fires generate high heat release rates due to the combustion of the materials involved. Heat fluxes emitted often far exceed the exposure limits supported by the human body. The main methods for calculating incident heat fluxes resulting from fire fronts and the critical values of heat fluxes supported by the human body are presented, and the consequences of exposure time are discussed. Additionally, some safety distance thumb-rules for different critical heat fluxes are presented and discussed. Physiological response of people exposed to these conditions was determined through numerical simulation, using the HuTheReg software, considering protected firefighters for incident heat flux from 0 to 40 kWm<sup>-2</sup>. The present study shows that even respecting incident heat flux for unprotected people, but using appropriate protective equipment, time for the onset of heat stroke is strongly dependent on the impinging radiation on the firefighter's body. Several protective measures and good practices to prevent injuries are suggested. These findings highlight the critical need for time-limited exposure strategies and improved personal protective equipment standards to prevent heat-related injuries. This study also shows that the HuTheReg software is a powerful tool that allows the assessment of consequences for the human body in different working conditions and helps to define safety rules and procedures for the firefighting activity.

**KEYWORDS:** Wildland Fires; Urban Fires; Safety Distances; Thermal Stress; Personal Protective Equipment.

---

1 Instituto Politécnico de Coimbra, Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, Rua Pedro Nunes, Quinta da Nora, 3030-199 Coimbra.

2 Univ Coimbra, ADAI, Departamento de Engenharia Mecânica, Rua Luís Reis Santos, Pólo II, 3030-788 Coimbra

3 Univ Coimbra, Departamento de Engenharia Mecânica, Rua Luís Reis Santos, Pólo II, 3030-788 Coimbra

\* Autor correspondente – Instituto Politécnico de Coimbra, Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, Rua Pedro Nunes, Quinta da Nora, 3030-199 Coimbra; email: gcvaz@isec.pt; <https://www.isec.pt/pt/instituto/departamentos/dem/>



## 1. INTRODUCTION

Wildland and urban fires generate high heat release rates resulting from the combustion of the materials involved (Vaz, *et al.*, 2004, 2022). The heat fluxes emitted, mainly radiative, but also convective, often exceed  $100 \text{ kWm}^{-2}$ , far exceeding the exposure limits supported by the human body.

Firefighting represents one of the most physically and thermally demanding human activities. First responders are often required to perform intense physical tasks while being exposed to radiant and convective heat far exceeding the body's tolerance thresholds. Understanding how these extreme environments interact with human physiology and protective equipment is essential to define realistic safety distances and operational limits.

Among those involved in wildfire response, operational personnel working close to the fire front are the most exposed to the heat emitted by the fire. Several authors have proposed minimum safety distances that keep human heat exposure below tolerable physiological thresholds. These distances depend on flame geometry, environmental conditions, and the relative position of the exposed person. However, these safety distances are normally too high to allow effective firefighting, which is why agents must use personal protective equipment (PPE) to work closer to the fire fronts. Without adequate PPE, the tolerance to heat fluxes emitted by wildland and urban fires would be easily exceeded becoming unbearable.

Radiation is the primary heat transfer mechanism from the fire front, and has a long-distance effect, since the transmissivity of air is normally very high. Most models for calculating heat flux at a target at a certain distance from the fire front only consider thermal radiation. The calculation of convective heat fluxes is more complex and typically involves using CFD simulation tools or experimental tests to directly measure this parameter. Often, in the absence of reliable models, it is assumed that the convective heat flux corresponds to a certain percentage of the radiative heat flux (Zarate *et al.*, 2008). Based on experimental tests, Modarres *et al.* 2024 recently proposed a model for calculating convective heat flux.

From a fire safety perspective, fires have two main impacts: they can damage structures and they can be dangerous for people. The incident heat flux, the degree of protection, the person activity intensity and the exposure time are the most relevant parameters to determine the consequences for the human body.

For impinging radiation fluxes below  $1.7 \text{ kWm}^{-2}$  no pain is caused, regardless of the exposure time (Zarate *et al.*, 2008). The incident heat flux threshold of  $4.7 \text{ kWm}^{-2}$  is frequently adopted (Zarate *et al.*, 2008) and corresponds to maximum tolerable heat flux for people, which marks the onset of human injury for 25 seconds of exposure. Several European countries have adopted an impinging heat flux level of  $5 \text{ kWm}^{-2}$  as the criterion for determining the hazard distance to people exposed to large fires (Raj, 2008). The level  $7 \text{ kWm}^{-2}$  is the maximum tolerable value for firefighters completely covered by special protective equipment. The level of  $12 \text{ kWm}^{-2}$  is the unpiloted ignition of wood exposed to thermal radiation and the level of  $37.5 \text{ kWm}^{-2}$  causes instantaneous death (Rossi *et al.* 2011).

Even with moderate heat fluxes burn injury to human skin can range from heat pain to first, second and third degree burns. Table 1 displays the exposure times to cause an injury at a heat flux level of  $5 \text{ kWm}^{-2}$  (Rossi *et al.* 2011).

Table 1 - Burn injury vs. exposure time. Fixed threshold value:  $5 \text{ kWm}^{-2}$ . (Rossi *et al.* 2011)

Effect	Injury time (s)
Threshold of blistering	35 - 60
Second degree burn	140
Third degree burn threshold	125
Third degree burn, 50% mortality	270

Firefighting is a physically demanding activity, carried out under extreme temperatures and intense heat fluxes. Furthermore, firefighting environments are typically immersed in smoke, worsening firefighting conditions. In the absence of adequate PPE and without control of over exposure duration, agents are exposed to various hazards, including thermal stress which is one of the most serious. Without effective mitigation measures, thermal stress can evolve into severe hyperthermia, which can culminate in a potentially fatal heat stroke.



This work aims to present a brief summary of the methods for calculating fire heat fluxes and safety distances, as well as the consequences for firefighters. The physiological implications of working in these conditions are assessed using a simulation tool. Moreover, several objective protective strategies and measures are suggested.

## 2. METHODOLOGY

The first part of this work provides an overview of methods for estimating incident heat fluxes from fire fronts. A target exposed to a heat source receives a certain amount of heat flux, depending on the characteristics of the source, the view factor and environmental conditions. Incident heat flux from fires is mainly characterized by fire front properties, specifically: flame dimensions and thermal properties, topography, and meteorological factors.

These heat fluxes are always radiative but can also be strongly convective, for example, in the case of strong winds, steep slopes, etc.

The assessment of incident heat flux tools enables the calculation of safety distances that individuals must respect to keep heat fluxes below critical values. Several safety distance thumb-rules for different critical heat fluxes are presented and discussed. The critical values of heat fluxes supported by the human body and the consequences of exposure time are also presented.

Firefighters are subjected to these heat fluxes, frequently for long periods. Furthermore, these operational personnel are also often subjected to cyclical thermal shocks. These extreme working conditions require a more detailed study of the human body's response.

The exposure of firefighters to the extreme thermal environments, that characterize both urban and wildland fires can be studied and assessed using thermoregulation models. In fact, firefighting demands very hard work in very hot environments which often leads to a continuous increase of body heat, triggering heat stress; consequently, heat strain and heat-related illnesses are quite often among firefighters. For safety reasons, a complete characterization of firefighters' thermal stress can only be achieved through numerical simulations of human thermophysiology. Field measurements during active firefighting are extremely difficult without interfering with the activities. Therefore, simulations using validated mathematical models represent a significant step forward in the health and safety of firefighters.

The human thermal regulation (HuTheReg) tool used in this study was designed to allow simulations of the human thermophysiological response to a wide range of environmental conditions, namely to extreme conditions like the ones faced by firefighters (Raimundo *et al.* 2018a,b,c).

Developed by Raimundo *et al.* 2012, this program is composed by several modules, namely (i) male thermophysiological response, (ii) heat and water vapor transport through the clothing, (iii) heat and water exchange between the external surface of clothing (or skin) and the environment and surroundings, (iv) start and evolution of skin injuries (pain and burn), and (v) detection of specific drawbacks within the human being. Due to their interdependency, all modules run iteratively in each time step until a specific convergence criterion is reached.

The main module of HuTheReg is based on work from Stolwijk (1971), which, in this area, is considered the reference study. However, more recent contributions have been introduced, and the HuTheReg is consistently updated to improve existing capabilities and also to include additional modules.

The HuTheReg model considers the human body divided in 22 segments (face, scalp, neck, chest, abdomen, upper back, lower back, pelvis, left shoulder, right shoulder, left arm, right arm, left forearm, right forearm, left hand, right hand, left thigh, right thigh, left leg, right leg, left foot, and right foot). Each body part has five layers (core, muscle, fat, skin and clothing), totaling 110 nodes, plus an additional node (111<sup>th</sup>) corresponding to the central blood compartment.

The model was implemented for an average man of 1.72 m tall, weighing 74.43 kg and with 14% of body fat (1.869 m<sup>2</sup> of skin). However, other anthropometric data may be considered, since each coefficient is proportionally changed as a function of the body weight, skin area and body fat. Each run may include up to 60 consecutive scenarios (phases), representing variations in posture, orientation, activity, food and drink intake, clothing, and thermo-hygrometric environment characteristics. Some inputs for each phase are specified for the whole human



body and others are specified for each body segment (each considered completely nude or completely dressed). The HuTheReg enables a significant number of output calculations, both for whole body, regional elements, and for physiological calculations.

The validation of the HuTheReg program was performed by comparing its predictions with experimental results, including different kinds of thermo-hygrometric environments (from very cold to very hot), exposure cycles, exercise intensities, and clothing properties [Raimundo *et al.* 2009, 2015a, 2018a, and others]. Also, a comparative evaluation was carried out with two thermoregulation models used by the United States of America Armed Forces (the software's SCENARIO and SCTM) and with a model developed by a researcher from the National Academy of Sciences of Ukraine (the HRP software), in the context of exposure to very hot thermal environments (Yermakova *et al.* 2022). A good agreement was achieved, which indicates an interesting capacity of the program to predict the thermophysiological response of the human body across wide variety of situations. The ability of the HuTheReg program to predict the thermophysiological response of the human body when exposed to very hot conditions enables its use on firefighting studies.

This numerical tool is used to assess and study the exposure of workers to different extreme thermal environments, either very hot (Yermakova *et al.* 2022) or very cold (Raimundo *et al.* 2015b, Raimundo & Oliveira 2025). In the specific case of firefighters, two contributions are highlighted:

One study assessed the HuTheReg software to predict the thermophysiological responses of firefighters, including those under different body cooling methodologies (Raimundo *et al.* 2018a). Three different classes of scenarios were tested: (i) body cooling during both exercise and recovery phases (by use of an ice jacket, by intake of very cold water or ice slurry, by both); (ii) body cooling only during the exercise phases (by use of an ice jacket, by intake of very cold water or ice slurry, by both); and (iii) body cooling only during the recovery phases by exposure to a cold environment (passive exposure, with hands and forearms immersion in cold water, with forced air movement using fans, with the use of an ice jacket, with the intake of very cold water or ice slurry, with a combination of these cooling methodologies).

The second study was designed to establish useful guidelines for secure firefighting, namely the evaluation of the influence of fire intensity, personal protective clothing properties and application of body cooling techniques on safety during firefighting operations (Raimundo *et al.* 2018b). In the present contribution, the main outcomes of those studies are stressed, aiming to present a holistic approach towards ensuring the safety of firefighters.

### 3. RESULTS

In most radiation models, the flame acts as a radiant surface. The heat flux on a target is then computed from flame thermal properties, air transmissivity, and the view factor between the flame and the target (Eq. (1)). In this equation,  $\psi$  is the heat flux on the target,  $\tau$  is the air transmissivity,  $\varepsilon$  is the flame emissivity,  $\sigma$  is the Stefan-Boltzmann constant,  $T$  is the flame temperature and  $F$  is the view factor between the flame and the target. The view factor can be calculated analytically or numerically by integrating the radiation view factor equation.

$$\Psi = \tau \varepsilon \sigma T^4 F \quad (1)$$

Once the heat flux calculation model for a target ahead of the fire front has been developed, the calculation of safety distances is possible, usually using numerical methods. The safety distance calculation is based on a fixed human exposure criterion, namely, a threshold heat flux level. The Acceptable Safety Distance (ASD) is the distance between the target and the fire at which the thermal flux is less than the threshold heat flux level. The safety distance can be calculated for unprotected people (threshold heat flux=4.7-5 kWm<sup>-2</sup>) or for protected firefighters (threshold heat flux=7 kWm<sup>-2</sup>).

Generally, the authors propose equations or correlations for ASD for finite fire fronts, as a function of the non-dimensional parameter (flame width)/(flame length). When the width of the fire front increases, the ASD asymptotically tends towards a maximum value, which corresponds to the ASD for an infinite width fire front. As the front has an irregular shape and is constantly changing, the effective fire front width is complex to estimate. Expressing the ASD as a function of flame length (for infinite fire width) can be highly advantageous for thumb rule



calculations, particularly for firefighters and policymakers. Modarres *et al.* 2024 present a model for ASD determination and propose the thumb rule equations (2) and (3), where  $l_f$  is the flame length. Equation (2) was obtained for the threshold heat flux of  $4.7 \text{ kWm}^{-2}$  and applies to unprotected people and Eq. (3) corresponds to the threshold heat flux of  $7 \text{ kWm}^{-2}$  and applies to protected people, namely firefighters. These thumb rules are easy to apply in firefighting scenarios.

$$ASD_{w \rightarrow \infty}(4.7 \text{ kWm}^{-2}) = 12.47 l_f \quad (2)$$

$$ASD_{w \rightarrow \infty}(7 \text{ kWm}^{-2}) = 8.347 l_f \quad (3)$$

The well-known BehavePlus fire modelling system from the United States Forest Service incorporates a theoretical model for ASD determination based on the radiation heat transfer for finite flame widths, proposed by Butler and Cohen 1997, that corresponds to the thumb rule equation (4).

$$ASD(7 \text{ kWm}^{-2}) = 4 l_f \quad (4)$$

Comparing equations (3) and (4), it can be seen that the BehavePlus software ASD predictions correspond, approximately, to half the ASD for wide fire fronts. This finding indicates that careless application of the software can cause fatal accidents in the case of wide fire fronts.

Respecting the safety distance does not guarantee protection from injury (cf. Table 1). Even protected firefighters can experience severe thermal stress when exposed for long periods. This concern deserves a more detailed study of this problem.

During firefighting activities, the firefighters can be exposed to radiant heat fluxes of up to  $40 \text{ kWm}^{-2}$  in environments with very high temperature and high relative humidity (Rossi *et al.* 2011, Raimundo *et al.* 2018b). These conditions cause considerable thermoregulatory strain and represent a substantial risk for the onset of health-related incidents within the firefighter (Raimundo *et al.* 2018b). As far as safety is concerned, the most important indicators seem to be the times delays for the onset of heat-stroke (fainting) and of skin pain, mainly the first one. The threshold for introversion is a good indicator for exposure limits that must not be exceeded (Raimundo *et al.* 2018b).

In this study, the thermophysiological reaction of firefighters exposed to impinging radiation fluxes from  $0$  to  $40 \text{ kWm}^{-2}$  under a firefighter scenario was predicted through numerical simulation, using the HuTheReg software. The reference considered for the onset of introversion, heat stroke, brain damage and death was the hypothalamus temperature, and for the beginning of skin pain was the maximum skin temperature. The prediction of skin burns degrees 1 and 2 was based on the heat stored on the skin.

The onset of heat-related diseases within the firefighter are shown in Figures 1 and 2 for impinging thermal radiation of  $I_{rad} = 1.5 \text{ kWm}^{-2}$  and  $I_{rad} = 5 \text{ kWm}^{-2}$ , respectively.

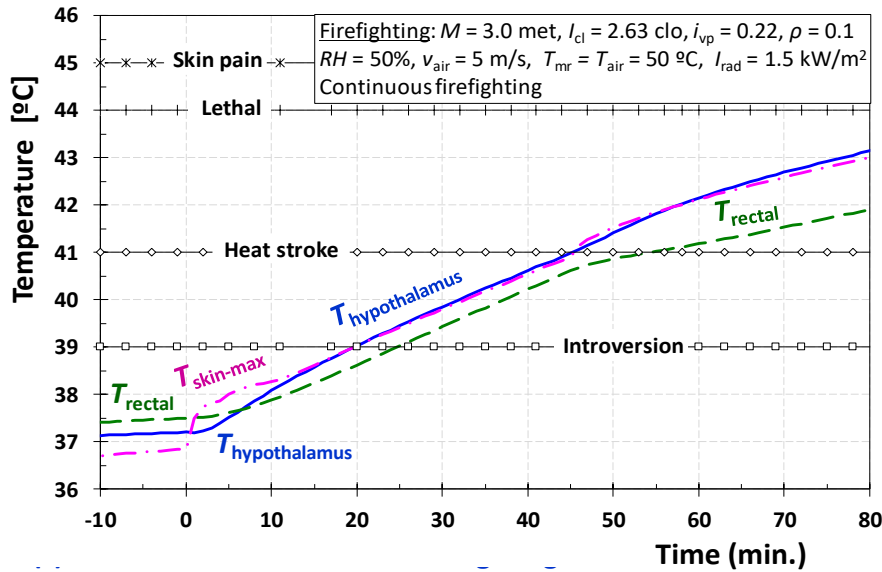


Figure 1: Incident thermal radiation  $I_{rad} = 1.5 \text{ kWm}^{-2}$ : Time evolution of temperatures on hypothalamus, rectal and maximum value of skin temperature and limiting temperatures for the beginning of introversion, heat stroke, lethal and skin pain, for current structural firefighting ensemble  $I_{cl} = 2.63 \text{ clo}$ .

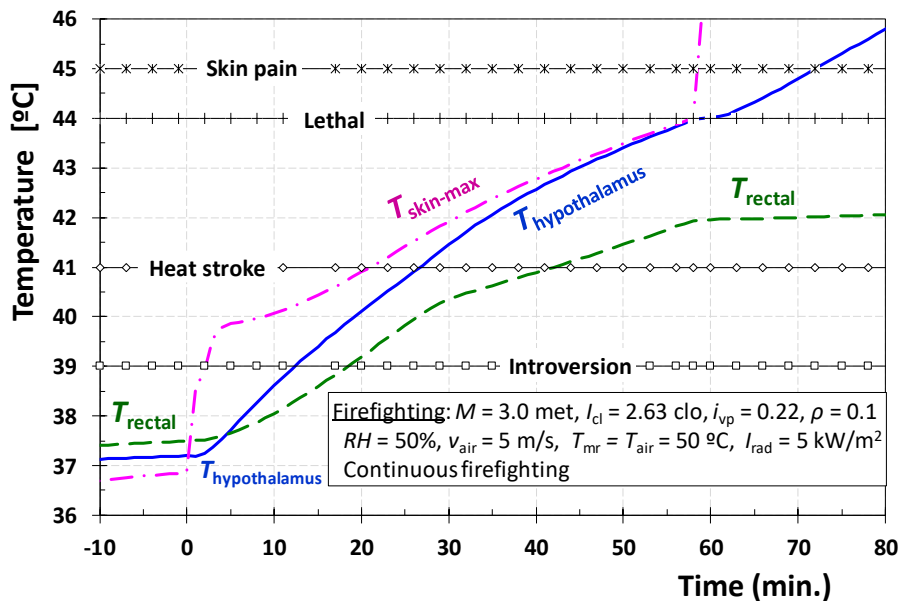


Figure 2: Incident thermal radiation  $I_{rad} = 5 \text{ kWm}^{-2}$ : Time evolution of temperatures on hypothalamus, rectal and maximum value of skin temperature and limiting temperatures for the beginning of introversion, heat stroke, lethal and skin pain, for current structural firefighting ensemble  $I_{cl} = 2.63 \text{ clo}$ .

Figures 1 and 2 show that the hypothalamus, rectal and maximum skin temperatures increase over time, but after a certain period of exposure the rectal temperature tends to stabilize. This is particularly clear in the simulation with the highest incident thermal radiation ( $I_{rad} = 5 \text{ kWm}^{-2}$ ). This conclusion is interesting and somehow contradicts what usually happens in thermal environments within the thermal comfort zone; in this case, the rectal temperature is one of the highest in the human body and is often taken as representative of the body core temperature. Based on the present results, this conclusion is not valid for situations in which the human body is exposed to extreme thermal conditions, such as those faced by firefighters. Figure 2 also highlights that very severe heat related consequences might appear after short exposures; for instance, if the hypothalamus temperature is used as a reference,



introversion occurs after approximately 11 minutes of exposure, and heat stroke, which represents a severe heat disorder, can occur around 25 minutes of exposure.

The onset of heat-related diseases within the firefighter as function of the impinging thermal radiation ( $I_{rad}$ ) is shown in Figure 3 for an ensemble with  $I_{cl} = 2.63$  clo (current for structural firefighting).

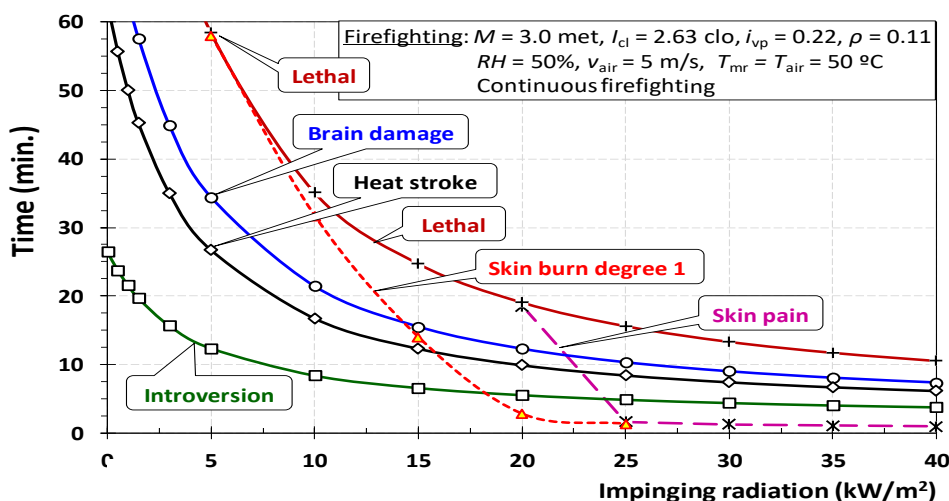


Figure 3: Time for the onset of skin pain, skin burn, introversion, heat stroke, brain damage and death, as function of impinging radiation, for current structural firefighting ensemble  $I_{cl} = 2.63$  clo. As for a suit with  $I_{cl} = 2.63$  clo skin burn degree 2 only “occurs” after death (so it is not shown).

Figure 3 shows that the time (after fire impact) for the onset of heat-related illness decreases very rapidly with the increase of the incident radiation (up to about 10 kWm<sup>-2</sup>). For higher values of impinging radiation, these times decrease less until practically stabilize in a kind of minimum value. Regardless of fire intensity, and if protected with a full ensemble with  $I_{cl} \geq 2.63$  clo, it will be possible to resist up to about 10 minutes without fainting. However, skin burn degree 1 can happen for  $I_{rad} \geq 15$  kWm<sup>-2</sup> and the onset of skin burn degree 1 and of skin pain is below one minute of exposure for  $I_{rad} \geq 25$  kWm<sup>-2</sup>. In short, convenient control of the duration of firefighting periods and / or of the temperature of the hypothalamus (which has practically the same value as the tympanum) is crucial and therefore recommended. Also, after a firefighting period and to allow the firefighter to be able to return safely to firefighting his initial thermal state must be restored. This is only possible through the application of an appropriate body cooling technique during the recovering time-break (Raimundo *et al.* 2018b).

#### 4. CONCLUSIONS

Firefighters and other personnel involved in firefighting must respect safety distances, which can be calculated using currently available models. The study shows that even respecting the heat flux level for unprotected people ( $I_{rad} = 1.5$  kWm<sup>-2</sup>), but using appropriate protective equipment ( $I_{cl} = 2.63$  clo), heat stroke can happen after 45 minutes of exposure, if the hypothalamus temperature is considered for reference. However, if the impinging radiation increases to  $I_{rad} = 5$  kWm<sup>-2</sup>, heat stroke arises after approximately 25 minutes. These results clearly suggest the dangers firefighters face when exposed to fire fronts as, in the field, exposure times are usually much longer. Therefore, increasing safety in firefighting operations requires not only defining adequate safety distances but also actively managing exposure duration and personnel's physiological state.

Very important protective measures to be taken include: 1) increasing safety distances to reduce incident heat flux, so using long-range firefighting equipment in the operations or attacking fire fronts from the flanks or the back; 2) using appropriate PPE, and controlling exposure times to avoid injuries. In addition, adopting body-cooling techniques, ensuring adequate hydration, and scheduling recovery periods should be considered essential operational procedures to minimize the risk of heat-related disorders.



Good practices are suggested to improve safety in firefighting activities, namely assessing fire intensity and thermal properties of personal protective clothing, and by applying body cooling techniques that can be implemented in an operational context. Integrating these practices into standard firefighting protocols could significantly reduce thermal stress and improve overall resilience in extreme environments.

This study shows that the calculation of the physiological responses of people exposed to these conditions through numerical simulation, using the HuTheReg software, enables a detailed assessment of the consequences for the human body across different working conditions for firefighters and helps define rules and procedures for this activity.

In addition to current findings, future research should focus on coupling numerical models, such as HuTheReg, with real-time physiological monitoring systems to enable dynamic risk management during firefighting operations.

## ACKNOWLEDGMENTS

This research was funded in whole or in part by the Fundação para a Ciência e a Tecnologia, I.P. (FCT, <https://ror.org/00snfq58>) under Grant UIDB/50022/2020 (<https://doi.org/10.54499/UIDB/50022/2020>), UIDP/50022/2020 (<https://doi.org/10.54499/UIDP/50022/2020>), LA/P/0079/2020 (<https://doi.org/10.54499/LA/P/0079/2020>).

For the purpose of Open Access, the author has applied a CC-BY public copyright license to any Author's Accepted Manuscript (AAM) version arising from this submission.

## REFERENCES

- B.W. Butler, J.D. Cohen (1997). *Firefighter safety zones: a theoretical model based on radiative heating*, International Journal of Wildland Fire, 8(2): 73–77.
- M-R. Modarres, M. Almeida, G.C. Vaz, D.X. Viegas (2024). *Analytical formulations with experimental validation for determining the incident heat flux from firefronts*. Fire Safety Journal, 147: 104205. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2024.104205>.
- A.M. Raimundo, A.V.M. Oliveira (2025). *Evaluating different working protocols in freezing chambers through a thermophysiological model*. Building and Environment, 267: 112331. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.112331>.
- A.M. Raimundo, A.R. Figueiredo (2009). *Personal protective clothing and safety of firefighters near a high intensity fire front*. Fire Safety Journal, 44: 514–521. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2008.10.007>.
- A.M. Raimundo, A.V.M. Oliveira, D.A. Quintela (2018a). *Assessment of a human body thermoregulation software to predict the thermophysiological response of firefighters*. Advances in Forest Fire Research, Chapter 3 – Fire Management, 2018: 349-358. ISBN Digital 978-989-26-16-506. [https://doi.org/10.14195/978-989-26-16-506\\_38](https://doi.org/10.14195/978-989-26-16-506_38).
- A.M. Raimundo, A.V.M. Oliveira, A.R. Gaspar, D.A. Quintela (2015b). *Thermal conditions in freezing chambers and prediction of the thermophysiological responses of workers*. International Journal of Biometeorology, Springer, 59(11): 1623-1632. <https://doi.org/10.1007/s00484-015-0969-y>.
- A.M. Raimundo, A.V.M. Oliveira, D.A. Quintela, A.R. Figueiredo (2018b). *Fire intensity, individual protective clothing and firefighting safety*. Advances in Forest Fire Research, Chapter 3 – Fire Management, 2018: 454-465. ISBN Digital 978-989-26-16-506. [https://doi.org/10.14195/978-989-26-16-506\\_49](https://doi.org/10.14195/978-989-26-16-506_49).
- A.M. Raimundo, C.D. Pereira, A.V.M. Oliveira, D.A. Quintela (2015a). *Human body thermoregulation: test and validation of a computer program*. Occupational Safety and Hygiene III, CRC Press, Taylor & Francis Group: London, eds: Arezes PM, Baptista JS, Barroso MP, Carneiro P, Cordeiro P, Costa N, Melo RB, Miguel AS, Perestrelo G, 2015: 99-103. ISBN 978-1-138-02765-7.
- A.M. Raimundo, A.V.M. Oliveira, D.A. Quintela (2018c). *Detailed evaluation of human body cooling techniques through thermophysiological modelling*. Occupational Safety and Hygiene VI, CRC Press, Taylor & Francis Group, London, eds: Arezes PM, Baptista JS, Barroso MP, Carneiro P, Cordeiro P, Costa N, Melo RB, Miguel AS, Perestrelo G, 2018: 103-108. ISBN 978-1-138-54203-7. <https://doi.org/10.1201/9781351008884-18>.



- A.M. Raimundo, D.A. Quintela, A.V.M. Oliveira, A.R. Gaspar (2012). *Development and Validation of a Computer Program for Simulation of the Human Body Thermophysiological Response*. 2<sup>nd</sup> Portuguese Bioengineering Meeting, Coimbra, Portugal, 23-25 February 2012. <https://doi.org/10.1109/ENBENG.2012.6331338>.
- P.K. Raj (2008). *A review of the criteria for people exposure to radiant heat flux from fires*. Journal of Hazardous Materials, 159: 61–71.
- J.L. Rossi, A. Simeoni, B. Moretti, V. Leroy-Cancellieri (2011). *An analytical model based on radiative heating for the determination of safety distances for wildland fires*, Fire Safety Journal, 46 (8): 520–527. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2011.07.007>.
- J.L. Rossi, K. Chetehouna, A. Collin, B. Moretti, J.H. Balbi (2010). *Simplified flame models and prediction of the thermal radiation emitted by a firefront in an outdoor fire*, Combustion Science and Technology, 182(10): 1457–1477. <https://doi.org/10.1080/00102202.2010.489914>.
- J.A.J. Stolwijk (1971). *A mathematical model of physiological temperature regulation in man*. NASA Contractor Report CR-1855, NASA, Washington, DC.
- G.C. Vaz, J.C.S. André, D.X. Viegas (2004). *Fire spread model for a linear front in a horizontal solid porous fuel bed in still air*. Combustion Science and Technology, 176:135-182. <https://doi.org/10.1080/00102200490255343>.
- G.C. Vaz, J. Raposo, L. Reis, P. Monteiro, D.X. Viegas (2022). *Rigid Protection System of Infrastructures against Forest Fires*. Fire, 5: 145. <https://doi.org/10.3390/fire5050145>.
- I.I. Yermakova, A.W. Potter, A.M. Raimundo, X. Xu, J.W. Hancock, A.V.M. Oliveira (2022). *Use of Thermoregulatory Models to Evaluate Heat Stress in Industrial Environments*. International Journal of Environmental Research and Public Health, 19: 7950. <https://doi.org/10.3390/ijerph19137950>.
- L. Zárate, J. Arnaldos, J. Casal (2008). *Establishing safety distances for wildland fires*, Fire Safety Journal, 43(8): 565-575. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2008.01.001>.



**9JORNINC-4JORPROCIV**

9<sup>ª</sup> Jornadas de Segurança aos Incêndios Urbanos  
4<sup>ª</sup> Jornadas de Proteção Civil

Coimbra, 7 de novembro de 2025



## REQUERIMENTOS DE RESISTÊNCIA AO FOGO FLORESTAL EM PAREDES EXTERNAS DE HABITAÇÕES

**ANTÓNIO RENATO  
BICELLI**

Investigador  
CERIS-IST-ID - Lisboa

**MOHAMED  
ZITOUNI**

Investigador  
CERIS-IST-ID -  
Lisboa

**MÁRIO RUI  
ARRUDA<sup>1</sup>**

Investigador Auxiliar  
LNEC - Lisboa

**FERNANDO BARNCO**

Professor de Mérito  
IST - Lisboa

**Resumo:** Este artigo investiga o desempenho à resistência ao fogo de paredes externas sujeitas a cargas térmicas de incêndios florestais. O estudo adota uma abordagem de segurança baseada no desempenho, alinhada com a Norma Australiana para Abrigos de Incêndios Florestais. A avaliação numérica inclui diferentes combinações de materiais de isolamento, tipos de camadas da parede e espessuras, utilizando curvas características temperatura-tempo de incêndio florestal. Um modelo de elementos finitos bidimensional foi desenvolvido no ABAQUS, aplicando uma análise térmica transiente não linear com propriedades dos materiais dependentes da temperatura. São examinados materiais de isolamento comuns na construção europeia como lã de rocha, poliestireno extrudido e cortiça composta. Os materiais principais das paredes incluem tijolo de alvenaria, blocos de betão leve e painéis de madeira laminada cruzada estrutural. As geometrias das paredes baseiam-se em recomendações de diretrizes anteriores e são avaliadas sob tempos de exposição ao fogo equivalentes, derivados da curva de fogo ISO-834. O estudo propõe projetos de paredes otimizados, capazes de suportar cenários de incêndio florestal, contribuindo para o desenvolvimento de soluções resistentes ao fogo e económicas para uma maior segurança na interface urbano-florestal.

**Palavras-chave:** Incêndio Florestal; Método de Elementos Finitos; Paredes Exteriores; Materiais de Isolamento; Resistência ao Fogo; Curvas Temperatura-Tempo.

### 1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, os incêndios na Interface Urbano-Florestal (IUF) tornaram-se mais frequentes e mais intensos. Como resultado, o ambiente construído e as áreas circundantes têm experienciado danos cada vez mais severos. Esta tendência constitui uma séria ameaça à segurança dos residentes que vivem em zonas de IUF e origina perdas consideráveis, incluindo a destruição e o colapso de estruturas. Os incêndios florestais geram frequentemente faúlhas que são transportadas pelo vento a distâncias consideráveis. Estas faúlhas são um mecanismo primário de propagação de incêndios florestais, particularmente na IUF, onde podem incendiar a vegetação e os componentes estruturais de habitações próximas (Suzuki e Manzello 2020).

Na engenharia civil, é uma prática comum projetar estruturas para resistir a eventos acidentais, como sismos (CEN/1998), impactos de veículos, explosões e incêndios internos em edifícios (CEN/2002a). Estes cenários estão bem estabelecidos na comunidade de engenharia e são abrangidos de forma compreensiva pelos Eurocódigos Estruturais Europeus. Em termos de segurança contra incêndios, as abordagens de projeto atuais permitem a verificação da integridade estrutural sob uma variedade de condições de incêndio, incluindo incêndios internos em compartimentos, incêndios propulsados por líquidos hidrocarbonetos, incêndios em fachadas e, em certos contextos, incêndios causados por veículos ou comboios em chamas. No entanto, apesar da ameaça crescente representada pelos incêndios florestais, particularmente na IUF, ainda existe uma falta de orientação padronizada para o projeto de estruturas sujeitas a incêndios florestais. Ao contrário da curva padronizada ISO-834, os incêndios florestais atingem tipicamente uma temperatura máxima de 800 °C a 900 °C por uma breve duração de 3 a 5 minutos, sendo influenciados por variáveis como o vento, o tipo de combustível e a topografia (Pyne al. 1996, Craveiro et al. 2023, Fiorini et al. 2023). Consequentemente, mesmo que um incêndio florestal dure 30 minutos, a sua temperatura máxima permanece abaixo dos 950 °C, normalmente associados a 60 minutos de resistência ao fogo em betão e tijolos de alvenaria.. Em Portugal, o despacho normativo (D8591/2022), associado ao (DL9/2021) permite a utilização da curva ISO-834 em análise térmica transiente como método para avaliar a segurança contra



incêndio de habitações expostas a incêndios florestais, com formulações de transmissão de calor baseados em (Hilton et al. 2020, Almeida et al. 2022). A metodologia baseia-se na norma australiana, que alinha as curvas de fogo padrão nacionais com os níveis de fluxo de calor dos incêndios florestais (AS3959/2018). Embora esta estratégia simplificada ofereça uma margem de segurança conservadora e resiliente, pode nem sempre resultar nas soluções de projeto mais económicas (Rodrigues e Paula 2022).

Investigações recentes têm salientado a importância de captar o impacto direto dos incêndios florestais através do fluxo de calor, impulsionado pela convecção e radiação das chamas. (Cantor et al. 2022). Nesse estudo, são introduzidas duas curvas de incêndio florestal temperatura-tempo, destinadas a ser utilizadas no futuro projeto de segurança contra incêndio de habitações expostas a incêndios florestais. Estas curvas foram derivadas de medições in situ de incêndios florestais que envolvem tipos de vegetação como árvores e arbustos, tendo sido validadas mais tarde por (Fiorini et al. 2025).

O impacto indireto dos incêndios florestais, nomeadamente as faúlhas, também é examinado (Cantor et al. 2023). Como resultado, é proposta uma curva temperatura-tempo para simular os efeitos térmicos da acumulação de faúlhas numa habitação. Esta curva de acumulação de faúlhas foi proposta com base em testes experimentais em que vários tipos de madeira foram incendiados para produzir faúlhas. Esta curva foi também validada através de simulação numérica (Bicelli et al. 2023, Zitouni et al. 2025a, Zitouni et al. 2025b).

Para garantir a segurança dos ocupantes, tal casa deve ser resiliente a uma exposição prolongada a fogos externos (Cantor et al. 2024). Um estudo recente introduz uma abordagem alternativa para projetar edifícios resilientes a incêndios florestais (Arruda et al. 2023a, Arruda et al. 2024). Afastando-se das estratégias convencionais de proteção contra incêndio focadas na evacuação, este conceito trata a habitação como um abrigo destinado a proteger os seus ocupantes durante a totalidade da duração de um incêndio florestal nas proximidades.

Os tempos de resistência ao fogo simplificados, de acordo com a importância estratégica do edifício, são apresentados na Quadro 7, em que o tempo equivalente de resistência máximo é de 120 min. Os valores da Quadro 7 foram calculados utilizando métodos analíticos simplificados, com base em tempos de exposição ao fogo equivalentes. A abordagem consiste em igualar a área sob as curvas temperatura-tempo e de fluxo de calor de um incêndio florestal com a da curva ISO-834. Esta é uma metodologia simplificada e não tem em conta as propriedades térmicas dos materiais, nem mesmo a transmissão de fluxo de calor por radiação e convecção que pode depender da superfície. Por conseguinte, este estudo permitirá verificar a eficácia destas recomendações simplificadas.

Quadro 7. Tempo equivalente de exposição ao fogo para incêndios florestais (Arruda et al. 2023).

ISO-834-EQ	Tempo equivalente de exposição ao fogo [min]			
	Habitação	Esquadra de Polícia	Quartel de Bombeiros	Hospital
Cenário de classe A	EI30	EI45	EI60	EI75
Cenário de classe B	EI45	EI60	EI75	EI120
Cenário de classe C	EI60	EI75	EI90	EI120

## 2. ESTUDO PARAMÉTRICO

Foram definidas sete geometrias diferentes de secções transversais de paredes, cada uma incorporando um reboco de argamassa em ambos os lados. Foram analisados materiais de isolamento comuns na construção europeia, como lã de rocha, poliestireno extrudido (XPS) e cortiça composta. Os materiais do núcleo da parede incluíram tijolo de alvenaria, bloco de betão leve e madeira laminada cruzada estrutural (CLT). Para a simulação de cargas térmicas de incêndios florestais, foram aplicadas curvas temperatura-tempo, incluindo a curva de projeto combinada de incêndio florestal (Cantor et al. 2022), a curva de acumulação de faúlhas (Cantor et al. 2023), e a curva de fogo exterior (EFC).

Esta secção apresenta as geometrias de parede selecionadas, juntamente com os respetivos materiais do núcleo e tipos de isolamento. Estes materiais foram adotados para representar os métodos construtivos típicos utilizados no sul da Europa, incluindo Portugal, Espanha, França, Itália e Grécia.

### 2.1 Espessura da Parede

Utilizando as diretrizes simplificadas de resistência a incêndios florestais previamente mencionadas, é agora possível pré-dimensionar a geometria de uma secção transversal de parede, com base nas normas europeias de resistência ao fogo estabelecidas. O Eurocódigo 6 parte 1-2 (CEN/1995) especifica os



requisitos mínimos de espessura para a alvenaria de cerâmica utilizada em paredes separadoras não resistentes, dependendo da presença de argamassa e das dimensões do tijolo. Considerando que foi aplicado um reboco de argamassa, a classificação de resistência ao fogo (EI) em termos de tempo (minutos) é a seguinte: EI30 e EI45 para espessuras de tijolo entre 5 cm e 7 cm, e EI60 para espessuras entre 6 cm e 7 cm. Devido à incerteza relativamente à reação ao fogo dos materiais de isolamento térmico, o Eurocódigo 6 não os considera nas avaliações de resistência ao fogo (CEN/1995).

Não é possível escolher uma secção transversal de parede unificada associada a uma classificação específica de resistência ao fogo, uma vez que a maioria dos códigos e diretrizes apresenta requisitos variáveis (LNEC/1990, CEN/1995, Council/2006, BS/2021). Até a espessura do revestimento de argamassa varia entre 5 mm e 15 mm, sendo esta considerada uma camada eficaz para fornecer proteção adicional contra incêndio. Por este motivo, os autores escolheram uma geometria que estava parcialmente alinhada com estas normas anteriormente citadas. Admitiu-se para este trabalho que o revestimento de argamassa deve ter pelo menos 10 mm para ser eficaz, e que os requisitos EI30, EI45 e EI60 devem exigir, respetivamente, uma espessura mínima do núcleo da parede de 5 cm, 6 cm e 7 cm.

## 2.2 Materiais

A camada principal do núcleo da parede utiliza materiais de construção tradicionais, como tijolos de alvenaria cerâmica, blocos de betão leve e CLT. Para o isolamento, foram incluídos os materiais mais comumente utilizados tanto em novas construções como na reabilitação de habitações antigas. Estes consistem em poliestireno extrudido (XPS), cortiça composta e lã de rocha. Com exceção do XPS, que tem um limite de temperatura de serviço de 75 °C (Bergman et al. 2011), todos os outros são bem conhecidos na comunidade científica pelo seu bom desempenho térmico a temperaturas elevadas. A argamassa é aplicada em ambos os lados da parede como uma camada de acabamento, tal como está tipicamente presente em aplicações reais.

Todas as propriedades termofísicas à temperatura ambiente utilizadas no modelo são apresentadas na Quadro 8, com as suas respetivas variações em função da temperatura mostradas na Figura 1. As propriedades a temperaturas elevadas são determinadas modificando os valores à temperatura ambiente através de um rácio definido para cada temperatura específica (1). É importante notar que estas propriedades são atualizadas localmente em cada ponto de integração de Gauss sempre que a temperatura interna se desvia das condições ambientais.

Quadro 8. Propriedades à temperatura ambiente (20 °C).

Material / Propriedades	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$k$ [w/mk]	$c_p$ [J/kgK]
CLT	510.00	0.120	1530.0
Betão Leve	1550.00	0.500	800.0
Tijolo de Alvenaria	1050.00	0.420	564.0
Argamassa	1676.00	0.500	360.0
XPS	55.00	0.027	1210.0
Cortiça	219.75	0.050	899.5
Lã de Rocha	100.00	0.037	862.5

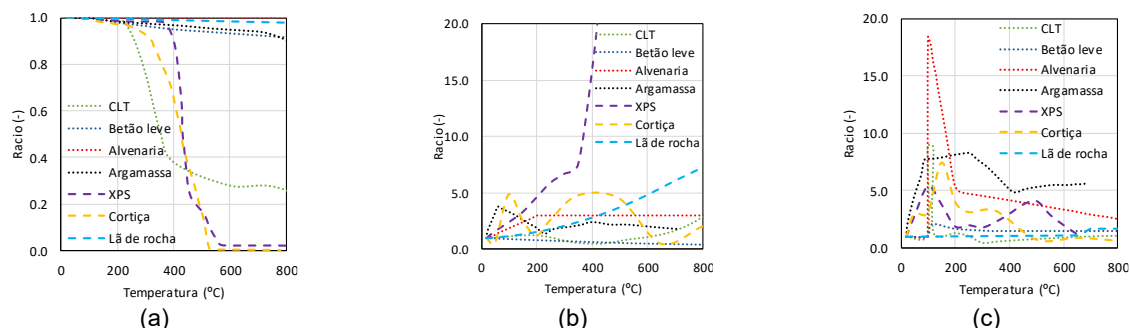


Figura 8. (a) Massa volúmica, (b) Condutividade térmica e (c) Calor específico a temperaturas elevadas.

$$prop(T^{\circ}\text{C}) = prop(T_{amb}^{\circ}\text{C}) \times rácio(T^{\circ}\text{C}) \quad (1)$$



As propriedades termofísicas (massa volúmica  $\rho$ , calor específico  $c_p$  e condutividade térmica  $k$ ) a temperaturas elevadas para a MLC e para o tijolo de alvenaria foram adotadas de acordo com os Eurocódigos (CEN/1995, CEN/2004). Adicionalmente, os dados para os blocos de betão leve foram obtidos de (Arruda et al. 2023b). Para a argamassa, foram utilizados valores de um estudo sobre o desempenho ao fogo de diferentes tipos de argamassa (Correia 2022). Os fornecedores de lâ de rocha afirmam que tanto a massa volúmica como o calor específico se mantêm constantes a temperaturas elevadas, correspondendo aos seus valores em condições ambientais (Perttu et al. 2015). Os valores das propriedades termofísicas da cortiça composta também foram obtidos de trabalhos anteriores (Bicelli et al. 2024).

Para o XPS, os valores à temperatura ambiente foram retirados do relatório (Bergman et al. 2011), e a dependência da temperatura foi obtida da literatura científica (Duarte et al. 2023). O modelo não tem em conta diretamente o ponto de fusão do XPS na sua formulação, mas utilizou propriedades termofísicas equivalentes para a massa volúmica, condutividade térmica e calor específico. Na prática, o isolamento de XPS não permaneceria no conjunto da parede assim que uma determinada temperatura fosse atingida, uma vez que amoleceria e se desprenderia devido à gravidade. Seria necessário um modelo de elementos finitos totalmente acoplado térmico-mecânico, incorporando CFD para capturar a formação de vazios de ar, para modelar este efeito diretamente. Esta abordagem está fora do âmbito deste trabalho, que se foca na análise comparativa de soluções construtivas existentes com diferentes configurações de isolamento. As propriedades equivalentes utilizadas para o XPS neste estudo contabilizam esta perda, com a condutividade térmica a aumentar exponencialmente, como mostrado na Figura 1(a), e o calor específico a apresentar dois picos, parcialmente devido à decomposição endotérmica das espumas, como mostrado na Figura 1(b). Conforme relatado pelos autores (Duarte et al. 2023), os efeitos dos vazios de ar e da possível perda de massa do XPS (devido à evaporação) foram incorporados nestas propriedades termofísicas equivalentes. Assim, embora não simulado explicitamente, este fenómeno está indiretamente representado no modelo.

### 2.3 Geometrias

Para este estudo paramétrico, foram seleccionadas sete geometrias diferentes. A Figura 2(a) ilustra um conjunto de parede genérico (sem isolamento e acabamento de argamassa) para fins de visualização, destacando a argamassa entre os tijolos, que funciona indiretamente como uma ponte térmica. As primeiras três geometrias analisadas consistem em quatro camadas de materiais, como mostrado na Figura 2(b). Nestas configurações, o isolamento é aplicado no lado exterior da parede, que está exposto ao fogo (lado esquerdo), mas também foi testado no interior (lado direito) e sem isolamento. É importante notar que estas geometrias incluem um acabamento de argamassa em ambos os lados. Para estas configurações, foram utilizados bloco de betão leve (C) e tijolo de alvenaria (MB) como materiais principais do núcleo.

Estas geometrias incorporam três materiais distintos, conforme ilustrado na Figura 2(b): argamassa, núcleo principal (sem vazios) e material de isolamento. A primeira e a última camadas, representadas a cinzento, consistem em argamassa, cada uma com uma espessura de 1 cm na direção x. A segunda camada, mostrada a verde, representa o material de isolamento com uma espessura de 3 cm. A terceira camada, mostrada a vermelho, é o núcleo principal, com espessuras de 5 cm, 6 cm e 7 cm. Adicionalmente, a argamassa é incorporada entre as camadas do núcleo principal, com uma altura de 1 cm na direção y e correspondendo à espessura do núcleo principal. O núcleo principal é considerado ter uma altura total de 11 cm. Devido à simetria, apenas metade das porções superior e inferior foi considerada, resultando num comprimento total do modelo de 12 cm na direção y (5,5 cm de núcleo principal e 1,0 cm de argamassa entre eles).

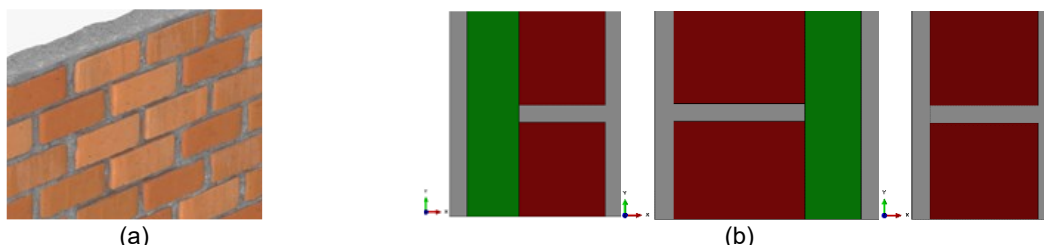


Figura 9. (a) Conjunto de parede genérico, e (b) geometria adotada para betão/alvenaria (cinza-argamassa, verde-isolamento e vermelho-núcleo principal).

Foram também testadas quatro configurações diferentes, mostradas na Figura 3. As duas primeiras geometrias consistem num núcleo principal de duplo pano com um acabamento de argamassa em ambos os lados, com e sem isolamento, conforme ilustrado na Figura 3(a) e na Figura 3(b). As duas últimas



geometrias utilizam CLT como núcleo principal, eliminando a necessidade de argamassa entre os materiais do núcleo. Adicionalmente, estas configurações foram testadas com e sem isolamento, como mostrado na Figura 3(c). O núcleo principal de duplo pano (betão leve e tijolo de alvenaria) inclui uma caixa de ar com espessuras de 1 cm, 2 cm e 3 cm para ambos os casos, mas emprega apenas um núcleo principal com 5 cm de espessura, uma vez que representa o cenário mais severo. Em contraste, o núcleo principal de CLT também utiliza espessuras de 5 cm, 6 cm e 7 cm.

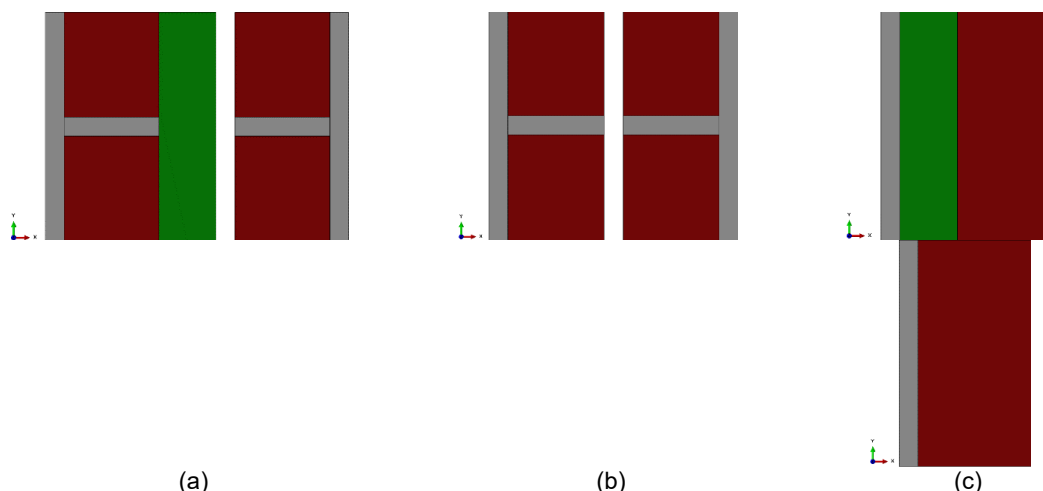


Figura 10. Geometrias adotadas (a) caixa de ar de 1 cm com isolamento central, (b) caixa de ar de 1 cm sem isolamento (c) CLT com e sem isolamento.

### 3. MODELO NUMÉRICO

Nesta secção, o modelo numérico 2D utilizado para avaliar o comportamento térmico de uma espessura de parede é totalmente descrito. Para a análise de elementos finitos, é utilizado o *software* comercial ABAQUS Standard, incorporando uma análise térmica transiente não linear em que todas as propriedades dos materiais são dependentes da temperatura. Embora o presente estudo não inclua uma validação direta dos modelos numéricos, a metodologia e condições de fronteira aplicadas são consistentes com as estabelecidas em investigações anteriores sobre acumulação de fálhas (Bicelli et al. 2023, Arruda et al. 2024, Zitouni et al. 2025a, Zitouni et al. 2025b). Estes estudos anteriores incluíram campanhas experimentais que mediram temperaturas superficiais e validaram diretamente o modelo numérico. A abordagem numérica simula a transmissão de calor por convecção e radiação, contabilizando pequenos vazios entre placas para replicar os efeitos térmicos de incêndios florestais em superfícies planas ou verticais. A análise utiliza uma formulação transiente termicamente não linear baseada no método clássico de elementos finitos, com todas as propriedades térmicas especificadas como dependentes da temperatura.

#### 3.1 Condições de Fronteira

A Figura 11 exibe as condições de fronteira e a malha (0,25 cm) adotadas para a geometria com isolamento colocado no lado exterior, fornecendo uma visão geral das condições de fronteira para todas as geometrias. Adicionalmente, todos os modelos incluem radiação de vazio (baseada num vazio inferior a 1 mm) entre as superfícies do núcleo principal e do material de isolamento. Este vazio na simulação é de facto necessário, uma vez que não existe garantia de comportamento coesivo entre o isolamento e o núcleo. As superfícies em contacto com a camada de argamassa são consideradas perfeitamente ligadas. As superfícies superior e inferior são assumidas como adiabáticas (com base na teoria da simetria) para avaliar a distribuição de temperatura ao longo da espessura. É importante notar que esta solução não é constante ao longo da direção x, uma vez que a argamassa atua como uma ponte térmica, resultando num fluxo de calor mais elevado em comparação com o tijolo de alvenaria. No entanto, para as geometrias de CLT, a solução é constante ao longo da direção x. Consequentemente, as dimensões na direção y são apenas para fins de visualização. A utilização de condições de fronteira adiabáticas verticais no modelo 2D leva a um cenário térmico mais severo em comparação com um modelo 3D completo, onde parte do fluxo de calor poderia dissipar-se verticalmente. A caixa de ar na geometria de núcleo principal de duplo pano é modelada usando radiação de cavidade, uma funcionalidade disponível no ABAQUS. As cavidades são definidas no ABAQUS como conjuntos de superfícies que são compostas por facetas. Nos casos axisimétricos e bidimensionais,



uma faceta é um lado de um elemento. O procedimento envolve a aplicação de condições de fronteira de convecção e radiação superficial para simular o fluxo de calor. Esta abordagem é consistente com as práticas padrão de projeto de segurança contra incêndio estabelecidas nos códigos estruturais, quando uma estrutura está exposta a cenários de incêndio nominais ou baseados no desempenho. Consequentemente, o fluxo de calor prescrito é definido utilizando:

$$q_n = -\bar{q} \quad (2)$$

$$q_n = -h_f(T_{SUF} - T_{SINK}) - \sigma\varepsilon(T_{SUF}^4 - T_{SINK}^4) \quad (3)$$

onde  $q_n$  representa o fluxo de calor na direção normal, e  $\bar{q}$  denota o vetor de fluxo de calor prescrito.

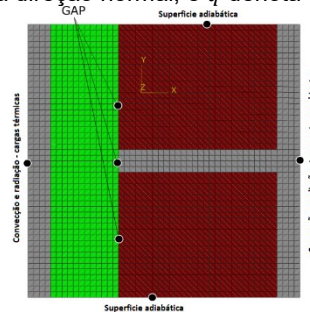


Figura 11. Geometria adotada com isolamento no lado exterior, incluindo as condições de fronteira prescritas e a malha.

O fluxo de calor pode assumir valores positivos, indicando entrada de calor no sistema, ou valores negativos, representando perda de calor do sistema. Na superfície onde a carga de incêndio é aplicada, foi adotada uma temperatura de sumidouro de fronteira correspondente às curvas temperatura-tempo prescritas, ou seja,  $T_{SINK} = T_{curvas}$  (Figura 12). A fronteira direita foi modelada com convecção e radiação usando uma temperatura de sumidouro ambiente ( $T_{SINK} = T_{amb}$ ), enquanto os dois lados restantes foram tratados como adiabáticos devido a eixos de simetria.

A radiação no GAP, uma funcionalidade disponível no ABAQUS para modelar a transferência de calor por radiação através de vazios estreitos entre superfícies, foi empregue para contabilizar a pequena separação entre a camada de isolamento e o material do núcleo. O valor de emissividade máximo foi utilizado para a radiação do vazio, uma vez que se assumiu que o tamanho do vazio é inferior a 1 mm ( $\varepsilon=1,0$ ). Consequentemente, o fluxo de calor por unidade de área superficial transferido através do vazio é calculado usando a seguinte expressão

$$q_n = C(T_{SUF.A}^4 - T_{SUF.B}^4) \quad (4)$$

$$C = \frac{F\sigma}{\frac{1}{\varepsilon_A} + \frac{1}{\varepsilon_B} - 1} \quad (5)$$

onde  $F$  é o fator de exposição efetivo, representando a fração de radiação que deixa a superfície A e atinge diretamente a superfície B.

O fator de visão varia entre 0 e 1, onde 0 indica que não há transferência de calor por radiação entre as superfícies, e 1 significa que as superfícies estão em contacto direto sem qualquer vazio. O fator de visão foi calculado considerando que o vazio é inferior a 1 mm, resultando num valor atribuído de 0,99 (Hottel 2023). Por outro lado, para a radiação da cavidade, onde existe ar no interior, foi adotada uma emissividade de 0,8, conforme sugerido por (CEN/2002).

Finalmente, a distribuição de temperatura no meio é determinada através de uma análise térmica baseada na condução. A equação de transferência de calor é derivada aplicando o princípio da conservação de energia a um volume de controlo diferencial em duas dimensões. A equação de transferência de calor para este problema, assumindo um material isotrópico, é expressa da seguinte forma:

$$\left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right) \right] = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (6)$$

onde  $\partial T/\partial x$  é o gradiente de temperatura na direção x, o mesmo para a direção y, e  $\rho c_p (\partial T/\partial t)$  é a taxa temporal de variação da energia térmica do meio por unidade de volume. É importante notar que, para



todos os modelos analisados neste estudo, a geração interna de calor foi negligenciada e nenhuma mudança de fase no material foi considerada.

### 3.2 Cargas Térmicas

As cargas térmicas consideradas neste estudo encontram-se representadas na Figura 12, e são em função da temperatura e do tempo. São aplicadas com base num fluxo imposto, usando a condição de fronteira de Robin, como requerido em geral pelos eurocodigos estruturais.

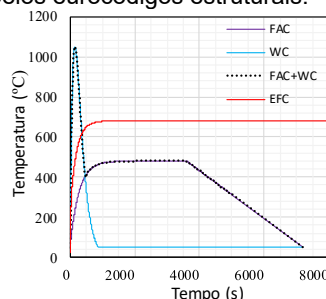


Figura 12. Cargas térmicas curvas temperatura-tempo.

Foram considerados os seguintes cenários térmicos: (i) Cenário de Classe A, baseado na curva de temperatura de acumulação de fálhas (FAC); (ii) Cenário de Classe B, incorporando uma combinação da curva de acumulação de fálhas e da curva de incêndio florestal (FAC+WC), que tem em conta a transferência de calor por convecção e radiação das chamas; e (iii) Cenário de Classe C, aplicando a curva de fogo exterior nominal (EFC) para representar o fluxo de calor proveniente de estruturas adjacentes em chamas. Em todos os cenários, a estrutura é obrigada a suportar a duração total da exposição ao incêndio florestal, em vez de apenas cumprir um limiar de tempo mínimo para a evacuação dos ocupantes. Estes cenários foram propostos num relatório de projeto de investigação (Arruda et al. 2023, Arruda et al. 2024), que servem de guias para dimensionar edifícios contra ação do fogo florestal, de acordo com a regulamentação europeia.

Neste contexto, a habitação deve ser projetada para suportar uma duração fixa de exposição a incêndios florestais de pelo menos 120 minutos. No entanto, esta duração não é equivalente a 120 minutos sob a curva ISO-834, uma vez que as curvas de incêndio florestal são caracterizadas por um aumento rápido de temperatura seguido por uma fase de arrefecimento. Para a curva de fogo exterior (EFC) aplicada no Cenário de Classe C, considerando que a frente de incêndio florestal tipicamente passa por uma habitação em menos de 30 minutos e que estruturas adjacentes podem continuar a arder durante pelo menos mais 30 minutos, é necessária uma duração mínima de resistência ao fogo de 60 minutos. No entanto, para garantir um projeto conservador e resiliente ao fogo, é adotada uma duração mínima de análise de 75 minutos para a curva de fogo exterior como uma medida de segurança de limite superior. Se uma duração de 120 minutos fosse aplicada sem uma fase de arrefecimento, a carga térmica resultante da curva de fogo exterior excederia significativamente a da curva de temperatura de incêndio florestal. Vale a pena salientar que a duração de tempo aplicada neste estudo foi retirada do código de projeto à prova de fogo proposto por (Arruda et al. 2023a). Nesse trabalho, foi recomendada uma duração de 75 minutos para a curva de fogo exterior. Este valor foi derivado dos efeitos combinados da passagem típica da frente de incêndio florestal, da queima de estruturas adjacentes e de um fator de segurança adicional.

As diferentes exposições temporais dos cenários a) e b) para o cenário c) são explicadas pela evolução distinta das cargas térmicas. No caso de a) e b), as curvas temperatura-tempo seguem uma abordagem baseada no desempenho com uma fase de arrefecimento. Conforme explicado em manuscritos anteriores (Arruda et al. 2023a, Arruda et al. 2024), a duração de 120 minutos corresponde à exposição máxima ao incêndio florestal, estimada em cerca de 30 minutos (uma suposição altamente conservadora). Assim, a duração de 120 minutos é justificada por três aspetos principais. Primeiro, para alcançar uma fiabilidade estrutural comparável com as normas de projeto, este valor deve ser estendido para pelo menos duas a três vezes a exposição máxima. Segundo, as simulações devem ser realizadas por pelo menos duas horas; caso contrário, devido à forte capacidade de isolamento da parede, quase nenhum fluxo de calor penetraria, levando a uma impressão enganosa de segurança. Terceiro, para a acumulação de fálhas, dados experimentais da comunidade científica indicam temperaturas e fluxos de calor elevados com uma duração entre 45 e 60 minutos. Por estas razões, os cenários a) e b) requerem um tempo total de análise mínimo de duas horas para garantir uma solução de projeto segura e económica, consistente com os códigos de segurança contra incêndio existentes quando são aplicadas curvas de temperatura baseadas no desempenho. No entanto, isto não implica que a habitação tenha de resistir efetivamente à exposição ao incêndio florestal durante as duas horas completas.



Para o cenário c), é adotada a curva de fogo exterior nominal do Eurocódigo 1, que assume que uma parede externa está a arder e a transmitir fogo para paredes adjacentes. Esta curva sobe e estabiliza em torno de 650 °C, sem uma fase de arrefecimento e, portanto, excede sempre as curvas baseadas no desempenho utilizadas nos cenários a) e b). Por esta razão, se a curva nominal fosse aplicada durante 120 minutos, as curvas baseadas no desempenho tornar-se-iam desnecessárias e o resultado provavelmente levaria a um projeto não económico. Isto ilustra porque é que a filosofia de exposição ao fogo de uma curva nominal não pode ser tratada da mesma forma que a de uma curva baseada no desempenho com uma fase de arrefecimento.

As cargas térmicas foram aplicadas à fronteira esquerda do modelo por um tempo total de análise de 7200 segundos. Isto não implica que a habitação tenha de resistir à exposição ao incêndio florestal durante duas horas, uma vez que o tempo total de análise não é diretamente comparável aos requisitos de resistência ao fogo definidos para fogos internos na ISO-834. Estas incluem a curva de acumulação de faúlhas (FAC) (Cantor et al. 2023) para a classe de cenário A, a curva de incêndio florestal (WC) (Cantor et al. 2022), e a aplicação combinada de ambas as curvas (FAC+WC) para a classe de cenário B. Para a classe de cenário C, a curva de fogo exterior (EFC) (CEN/2002) foi aplicada durante 4500 segundos Figura 12.

No lado oposto do modelo, deve ser admitida uma temperatura ambiente interior. Dependendo de o incêndio florestal ocorrer no verão ou na primavera, este valor pode variar entre 20 °C e 25 °C. Por conseguinte, foi admitido o valor que proporcionaria um limite superior de temperatura interior ( $T_{amb} = 25^{\circ}\text{C}$ ). Os parâmetros de convecção e radiação térmica foram definidos conforme proposto para simular incêndio natural com  $h_f = 25\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ ,  $\varepsilon = 1.0$ , and  $\sigma = 5.67 \times 10^{-8}\text{W}/(\text{m}^2\text{K}^4)$ . Para o lado não exposto (interior da parede), o coeficiente de convecção foi definido para  $h_f = 9\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ , contabilizando indiretamente os efeitos da radiação de acordo com a simplificação fornecida no euro código 1 (CEN/2002).

### 3.3 Malha adotada

A Figura 11 ilustra a malha utilizada na análise de elementos finitos. Para garantir que a sensibilidade da malha não afetasse os resultados, foram avaliadas três densidades de malha: grosseira (0,5 cm), intermédia (0,25 cm) e refinada (0,1 cm). A malha intermédia de 0,25 cm foi escolhida, uma vez que um maior refinamento para 0,1 cm não produziu diferenças significativas na distribuição do campo de temperatura. Esta análise de sensibilidade da malha alcançou um equilíbrio entre eficiência computacional e precisão, o que é essencial para um estudo paramétrico robusto. A análise foi realizada utilizando o solver implícito ABAQUS/Standard, utilizando elementos DC2D4, que são elementos quadriláteros lineares de transferência de calor de 4 nós com integração completa.

Foi imposta uma variação máxima de temperatura nodal permitida de 10 °C por incremento. Uma vez que as propriedades termofísicas são dependentes da temperatura, esta restrição faz com que o ABAQUS ajuste automaticamente o tamanho do passo de tempo para garantir que a variação de temperatura em qualquer nó não exceda o limite especificado durante a análise. Este procedimento foi aplicado consistentemente em todos os modelos numéricos apresentados neste estudo.

## 4. DISCUSSÃO E RESULTADOS

No trabalho de (Arruda et al. 2023a)a, é também possível utilizar uma verificação geral de incêndio florestal com curvas de temperatura baseadas no desempenho, o que deverá fornecer resultados semelhantes às verificações simplificadas anteriormente referidas. Uma habitação deve ser capaz de suportar a duração total de um incêndio florestal, e não apenas um tempo de exposição mínimo que poderia levar à evacuação. Portanto, é essencial que uma habitação resista à exposição ao incêndio florestal durante pelo menos 7200 segundos sob a curva de acumulação de faúlhas (FAC), a curva de incêndio florestal (WC), a sua combinação (FAC+WC) e os fluxos de calor analisado (Figura 12). Esta duração não é diretamente comparável aos 7200 segundos da curva ISO-834, uma vez que os incêndios florestais envolvem um aquecimento rápido e um subsequente arrefecimento. Para o cenário de classe C é também necessário analisar a curva de fogo exterior (EFC) com um tempo de análise conservador de 4500 segundos.

Está fora do âmbito deste trabalho explicar o flashover, a fase de arrefecimento ou mesmo a adoção destes tempos para as curvas de temperatura de incêndios florestais, mas a sua análise é retratada em (Arruda et al. 2023a). De acordo com as diretrizes australianas (ABCD/2014), a temperatura máxima para garantir a segurança das pessoas durante um incêndio florestal é de 70 °C para as paredes interiores; portanto, este valor é utilizado como referência.

A Figura 13 ilustra o comportamento da temperatura ao longo do período de análise para uma parede de 5 cm de tijolo de alvenaria, sujeita a diferentes cargas térmicas. Os resultados apresentados correspondem à temperatura medida no último elemento finito no lado interior da parede, a meio da sua altura. Os valores foram obtidos utilizando pontos de integração de Gauss (ver Figura 11, o ponto preto no lado direito do modelo é também a localização exata onde a temperatura foi registada). Cada caso é identificado usando uma convenção de nomenclatura consistente: a primeira parte identifica a carga térmica, seguida da



colocação do isolamento (exterior, interior ou não aplicável). Os materiais de isolamento são denotados como X para XPS (vermelho), C para cortiça composta (verde) e R para lã de rocha (azul). Estes resultados fornecem uma visão geral do comportamento da temperatura em diferentes cargas térmicas e posicionamentos de isolamento.

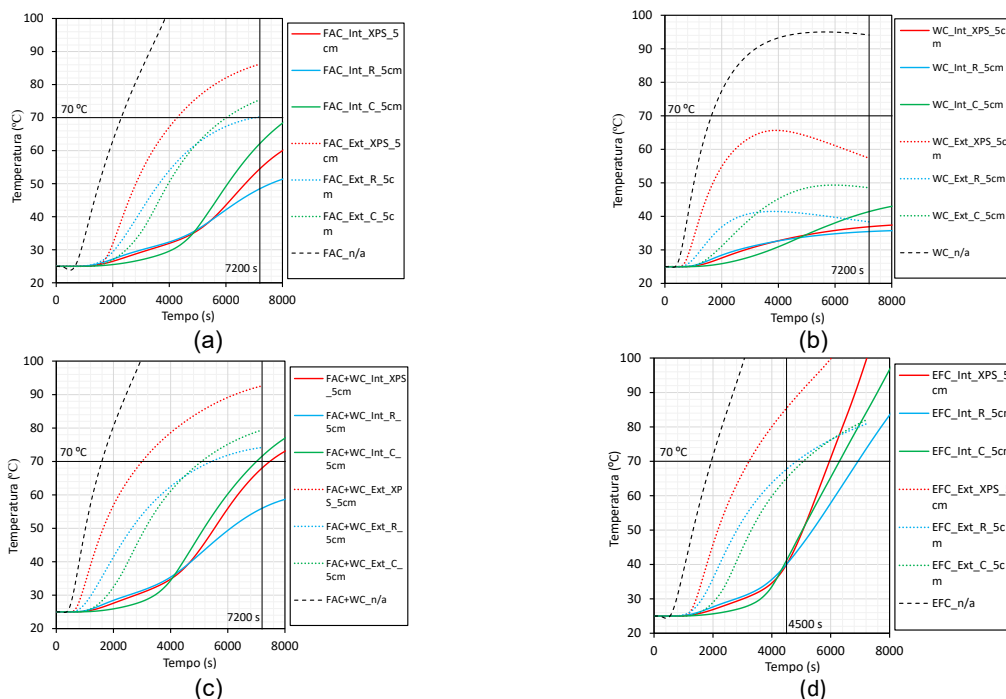


Figura 13. Comportamento da temperatura para os casos de tijolo de alvenaria de 5 cm para (a) FAC (cenário de classe A), (b) WC, (c) FAC+WC (cenário de classe B) e (d) EFC (cenário de classe C).

Estes gráficos foram traçados para compreender que tipo de eventos térmicos de incêndio florestal uma parede exterior, que apresenta um requisito de isolamento ao fogo de I30, pode suportar (CEN/1995). Como referido anteriormente, admitiu-se neste trabalho que uma parede de alvenaria com um núcleo de 5 cm e duas camadas de argamassa de revestimento poderia ser, no mínimo, uma EI30. Neste caso adotaria-se o valor do fabricante o EI30, visto a análise não simular a estanquidade do fumo.

De acordo com (Arruda et al. 2023a, Arruda et al. 2024), uma resistência ao fogo de EI30 é suficiente para garantir a segurança numa exposição de Cenário de Classe A de incêndio florestal. A Figura 13(a) mostra que, para uma parede externa com isolamento interno, todos os resultados de temperatura se mantêm abaixo do benchmark. No caso do isolamento externo, o critério é quase cumprido para a cortiça e a lã de rocha, que exibem temperaturas interiores ligeiramente superiores 78 °C para a cortiça e 71 °C para a lã de rocha excedendo o limite de 70 °C por uma pequena margem. É provável que estes valores ficassem dentro dos limites aceitáveis se tivesse sido assumida uma temperatura ambiente de 20 °C no modelo numérico (em vez de 25 °C), uma vez que este parâmetro influencia as condições de fronteira de convecção e radiação no lado interior da parede (ver Figura 11). Portanto, uma parede externa com uma espessura de 5 cm parece adequada para cumprir o cenário de classe A. Para os cenários B e C, no entanto, a conformidade só é alcançada quando o isolamento é colocado na face interior da parede, conforme ilustrado na Figura 13(c) e Figura 13(d).

Portanto, um conjunto de parede externa que cumpra o critério de resistência ao fogo EI30, com isolamento colocado no interior, pode ser considerado adequado para resistir à exposição a incêndios florestais, de acordo com os requisitos de sobrevivência delineados em (ABCD/2014).

A distribuição do campo de temperatura para uma parede de alvenaria de 5 cm com isolamento de cortiça colocado no lado exterior, sujeita à carga térmica combinada FAC+WC, é mostrada na Figura 14 em dois intervalos de tempo (4000 s e 7200 s). O comportamento da temperatura para este caso é ilustrado na Figura 13(c) (FAC+WC\_Ext\_C\_5cm). O efeito de radiação do vazio entre o isolamento e o núcleo principal é evidente na Figura 15(a), conforme indicado pela zona de transição entre os contornos de temperatura verde claro e azul claro.

Na Figura 15 (b), o efeito de radiação do GAP torna-se aparente na região onde a distribuição de temperatura ao longo da direção y começa a desviar-se da uniformidade. Isto corresponde à área onde se



forma uma ponte térmica na camada de argamassa, que transfere calor mais eficazmente do que o tijolo de alvenaria circundante. Adicionalmente, no passo de tempo final da análise (7200 s), é evidente que o material de isolamento exterior absorveu eficazmente o fluxo de calor, resultando em temperaturas elevadas dentro da camada de isolamento.

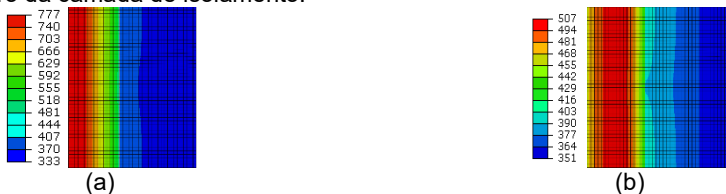


Figura 14. Distribuição do campo de temperatura para uma parede de alvenaria de 5 cm com isolamento de cortiça colocado no lado exterior, mostrada em (a) 4000 s e (b) 7200 s (valores em Kelvin), utilizando a FAC+WC como carga térmica aplicada.

Semelhante à distribuição do campo de temperatura, a Figura 15 apresenta o campo de fluxo de calor para uma parede de alvenaria de 5 cm com isolamento de cortiça colocado no lado exterior, sujeita à carga térmica combinada FAC+WC em três intervalos de tempo (90s, 4000 s e 7200 s). O primeiro intervalo de tempo corresponde ao pico de fluxo de calor a entrar no modelo. Estes resultados mostram explicitamente o efeito de ponte térmica da camada de argamassa entre o material do núcleo. É também possível ver claramente o impacto da radiação do vazio, que é mais intenso na Figura 15(b) no início da argamassa entre os núcleos principais.

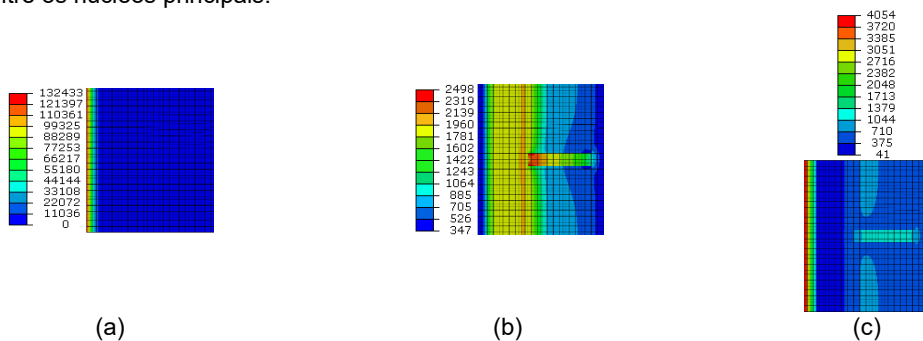


Figura 15. Distribuição do campo de fluxo de calor para uma parede de alvenaria de 5 cm com isolamento de cortiça colocado no lado exterior, mostrada em (a) 90 s, (b) 4000 s e (c) 7200 s (valores em W/m<sup>2</sup>), utilizando a FAC+WC como carga térmica aplicada.

#### 4.1 Resultados da curva de acumulação de fálhas

Os resultados apresentados nesta secção foram obtidos no último elemento finito no lado interior da parede, a meio da altura, utilizando os pontos de integração de Gauss. Os resultados estão organizados pela espessura do material do núcleo principal, sendo fornecidos gráficos separados para cada tipo de núcleo: betão leve (C), tijolo de alvenaria (MB) e madeira laminada cruzada (CLT).

Os materiais de isolamento são identificados pela seguinte nomenclatura: X para XPS (vermelho), C para cortiça composta (verde), R para lã de rocha (azul) e n/a (preto) para os casos isolamento não aplicado. Cada caso segue uma etiqueta estruturada: a primeira parte especifica a espessura do núcleo principal (5 cm, 6 cm ou 7 cm), seguida do tipo de material do núcleo (C, MB ou CLT), da colocação do isolamento (exterior, interior, caixa de ar ou n/d) e do material de isolamento (X,C,R).

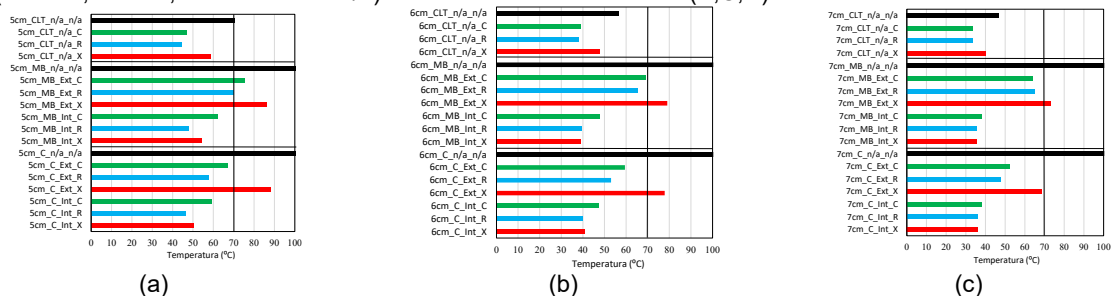


Figura 16. Resultados da FAC para núcleo principal com espessuras de (a) 5cm, (b) 6cm e (c) 7cm.



As Figura 16 e Figura 17 apresentam as temperaturas máximas registadas após 7200 segundos de exposição à FAC (cenário de classe A). Estes resultados foram medidos no mesmo local previamente descrito e estão igualmente categorizados pela espessura do material do núcleo principal. As observações dos resultados suscitam as seguintes observações: Para uma espessura de núcleo principal de 5 cm (Figura 16a), seis configurações não conseguiram manter as temperaturas abaixo dos 70 °C. Estas incluem a 5 cm\_MB\_n/a\_n/a, todas as configurações de isolamento exterior usando tijolo de alvenaria (MB) como núcleo principal, e 5 cm\_C\_Ext\_X. Para as configurações de 6 cm, quatro casos excederam o limite de referência, enquanto para as configurações de 7 cm, três casos falharam, conforme ilustrado na Figura 16(b) e Figura 16(c), respetivamente. Note-se que os núcleos principais de duplo pano com caixas de ar demonstraram consistentemente um desempenho superior, mantendo as temperaturas interiores dentro de limites aceitáveis. No total, treze configurações não conseguiram permanecer abaixo do limiar de referência.

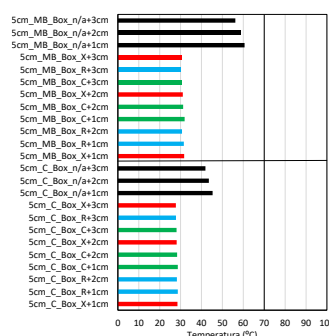


Figura 17. Resultados da FAC para o núcleo principal de duplo pano

## 4.2 Resultados da curva de incêndio florestal

A mesma análise é realizada para a curva WC, que representa a ação direta da exposição a incêndios florestais. Os resultados da temperatura máxima após 7200 segundos na superfície interior da parede são apresentados nas Figura 18 e Figura 19. As observações dos resultados suscitam as seguintes observações: apenas alguns casos sem isolamento, utilizando C e MB como materiais do núcleo principal, não cumpriram os critérios. No total, cinco configurações não mantiveram as temperaturas abaixo da referência. Este resultado é expectável, uma vez que a WC sobe e desce rapidamente, limitando assim a quantidade de fluxo de calor transmitido para as camadas interiores da parede.

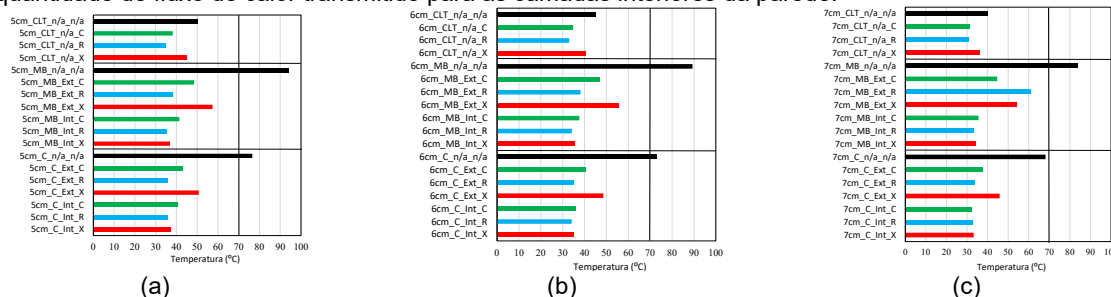


Figura 18. Resultados da WC para núcleo principal com espessuras de (a) 5 cm, (b) 6 cm e (c) 7 cm.

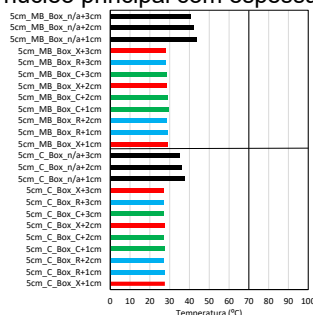


Figura 19. Resultados da WC para o núcleo principal de duplo pano.



### 4.3 Resultados da combinação das curvas de fálhas e incendio florestal

As Figura 20 e Figura 21 apresentam os resultados da temperatura máxima após 7200 segundos de exposição à FAC+WC (cenário de classe B). A análise revelou que várias configurações não cumpriram os critérios em todas as espessuras testadas. Note-se que todas as configurações que falharam ou não tinham isolamento ou tinham o isolamento colocado no lado exterior. Além disso, os núcleos principais de duplo pano com caixas de ar sem isolamento e utilizando tijolo de alvenaria (MB) como material do núcleo aproximaram-se do limite de referência. No total, dezanove configurações não conseguiram manter as temperaturas interiores abaixo do valor de referência prescrito. De acordo com a Quadro 7, uma parede de alvenaria com uma espessura de núcleo de 6 cm deverá ser capaz de cumprir os requisitos do cenário de classe B (EI45). No entanto, isto não se confirmou quando o isolamento foi colocado no lado exterior da parede, particularmente para o XPS. Se a cortiça ou a lã de rocha forem utilizadas como isolamento externo, este critério é quase cumprido. Esta conclusão é consistente com a verificação anterior para o cenário de classe A, onde a colocação do isolamento no lado interior da parede se mostrou fundamental para satisfazer os requisitos de resistência. Outra conclusão importante é que, quando é utilizada uma dupla camada de tijolos com uma caixa de ar, a temperatura da superfície interna da parede pode descer abaixo dos 45 °C, como mostrado na Figura 21.

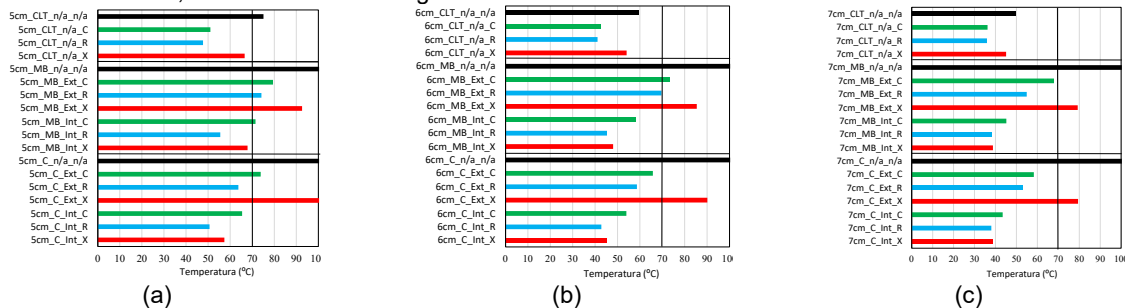


Figura 20. Resultados FAC+WC para núcleo principal com espessuras de (a) 5 cm, (b) 6 cm e (c) 7 cm.

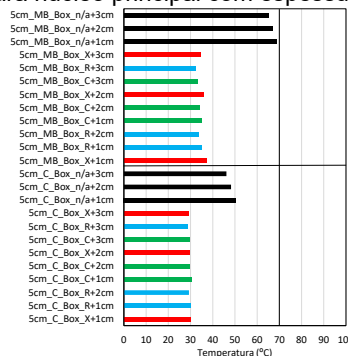


Figura 21. Resultados FAC+WC para o núcleo principal de duplo pano.

## 5. CONCLUSÕES

Os resultados mostraram que as configurações de parede com isolamento exterior apresentaram geralmente um desempenho inferior, com vários casos a excederem o limiar de 70 °C. Os conjuntos de paredes de duplo pano com caixas de ar demonstraram consistentemente uma melhor resistência ao fogo, enquanto as configurações com CLT como núcleo principal mostraram resultados variados.

O XPS, quando utilizado como material de isolamento, exibiu uma variação significativa no desempenho ao fogo consoante a sua colocação (lado interior ou exterior) e o tipo de carga térmica aplicada. As configurações com XPS colocado no lado exterior falharam frequentemente em manter as temperaturas da superfície interior abaixo do valor de referência de 70°C, particularmente sob condições de fluxo de calor prescrito. Em contrapartida, a colocação interior do XPS demonstrou uma resistência ao fogo melhorada, reduzindo eficazmente as temperaturas interiores máximas na maioria dos cenários.

O isolamento de cortiça demonstrou um forte desempenho em todas as configurações avaliadas. Manteve consistentemente as temperaturas interiores abaixo do valor de referência de 70 °C na maioria dos casos, independentemente da carga térmica aplicada. No geral, o isolamento de cortiça surgiu como uma opção fiável para melhorar a resistência ao fogo em conjuntos de paredes, especialmente quando aplicado na face interior.

A maioria dos requisitos simplificados apresentados em (Arruda et al. 2023a, Arruda et al. 2024) são satisfeitos quando o material de isolamento é colocado no lado interior ou quando é utilizado um sistema



de parede de duplo pano de tijolo. Esta recomendação de projeto deve ser considerada em investigações futuras. Além disso, é importante salientar que o fraco desempenho do isolamento colocado no lado exterior da parede a temperaturas elevadas pode comprometer a eficácia dos *External Thermal Insulation Composite System* (ETICS). Embora o ETICS seja amplamente adotado na Europa devido ao seu baixo custo e eficiência energética, esta limitação levanta preocupações quanto à sua resistência ao fogo em condições de exposição a incêndios florestais. Investigação futura é necessária para o sistema ETICS quando exposto ao fogo florestal.

## 6. AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi desenvolvido com o suporte providenciado pelo projecto de investigação P2I “SEPINOV – Sistemas Estruturais e Produtos Inovadores 0302/1102/24163” do Laboratório Nacional de Engenharia Civil – LNEC no Núcleo de Comportamento de Estruturas no Departamento de Estruturas. Os autores agradecem à Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT), Portugal, pelo financiamento do Projeto “New Fireproof Dwellings for Wildfire PTDC/ECI-CON/2240/2020” (DOI: 10.54499/PTDC/ECI-CON/2240/2020). Os autores gostariam também de agradecer à FCT pelo financiamento da bolsa de doutoramento SFRH/BD/03935/2023 (DOI: 10.54499/2023.03935.BD).

## 7. REFERÊNCIAS

- ABCD (2014). The design and construction of private bushfire shelters - Performance Standard. Australian Building Codes Board (ABCD).
- Almeida, M., L. M. Ribeiro and M. R. Modarres (2022). Análise do fluxo de calor incidente num edifício para diferentes cenários típicos da envolvente às construções no meio rural. Coimbra, Associação para o Desenvolvimento da Aerodinâmica Industrial (ADAI).
- Arruda, M. R. T., A. R. A. Bicelli and F. Branco (2024). "Ignition Locations and Simplified Design Guidelines for Enhancing the Resilience of Dwellings against Wildland Fires." *Fire* **7**(2): 40.
- Arruda, M. R. T., A. R. A. Bicelli, P. Cantor, E. B. Assis and F. Branco (2023a). "Proposal of a fireproof design code for dwellings against the action of wildland fires." *Resilient Cities and Structures* **2**(3): 104-119.
- Arruda, M. R. T., P. Cantor, A. Bicelli and F. Branco (2024). "Thermal reaction of firebrand accumulation in construction materials." *Case Studies in Construction Materials* **20**: e02985.
- Arruda, M. R. T., P. Cantor and R. Bicelli (2023b). "Thermal Insulation of Hybrid GFRP-Lightweight Concrete Structures." *CivilEng* **4**(2): 584-595.
- AS3959 (2018). Construction of Buildings in Bushfire Prone Areas. *Australian Standards*. S. GLOBAL. Australia, Sydney, Council of Standards Australia.
- Bergman, T. L., A. S. Lavine and F. P. D. Incropera, D.P. (2011). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer, 7th Edition*, John Wiley & Sons, Incorporated.
- Bicelli, A. R., P. Cantor, M. R. Arruda, C. Tiago, E. Bernardes de Assis and F. Branco (2023). "Numerical Assessment of Standard Firebrand Accumulation Curve When Transferring Temperature to Contact Surfaces." *Applied Sciences* **13**(17): 9657.
- Bicelli, A. R. A., P. Cantor, M. R. T. Arruda, C. Tiago, A. P. C. Duarte, F. Branco and J. Trindade (2024). "Thermophysical Properties of Composite Cork at Elevated Temperatures." *PREPRINT (Version 1) available at Research Square* [<https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-5261164/v1>].
- BS (2021). Code of practice for use of masonry — Part 3: Materials and components, design and workmanship, British Standard 5628-3:2001.
- Cantor, P., M. R. T. Arruda, F. Branco, A. R. A. Bicelli and E. B. de Assis (2024). Base para requisitos de projecto na protecção passiva anti-fogo florestal de edificações. CERIS – Civil Engineering Research and Innovation for Sustainability.
- Cantor, P., M. R. T. Arruda, J. Firmo and F. Branco (2022). "Proposal of Standard Wildfire Curves for the Design Protection of Dwellings against Wildland Fire." *Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste* **26**(3): 04022021.
- Cantor, P., M. R. T. Arruda, J. Firmo and F. Branco (2023). "Development of a standard firebrand accumulation temperature curve for residential wildfire protection system." *Results in Engineering* **17**: 100935.
- CEN (1995). Eurocode 6 - Design of masonry structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design. Brussels, Comité Européen de Normalisation, EN 1996-1-2: 1995.
- CEN (1998). Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance. Brussels, Comité Européen de Normalisation, EN 1998.
- CEN (2002). Eurocode 1: Actions on Structures - Part 1-2: General Actions - Actions on Structures Exposed to Fire. Brussels, Comité Européen de Normalisation, EN 1991-1-2: 2002.



- CEN (2004). Eurocode 5: Design of Timber Structures - Part 1-2: General - Structural Fire Design. Brussels, Comité Européen de Normalisation, EN 1995-1-2:2004.
- Correia, M. J. S. (2022). Fire and high temperature behaviour of thermal mortars. Master's thesis, Msc., Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa.
- Council, I. C. (2006). International Building Code 2006, International Code Council.
- Craveiro, H. D., C. Fiorini, L. Laím, B. Guillaume and A. Santiago (2023). "Experimental and Numerical Evaluation of a Wildland–Urban Interface Fire Scenario." Applied Sciences **13**(24): 13236.
- D8591/2022 (2022). Despacho n.º 8591/2022 Requisitos para adoção de medidas de proteção relativas à resistência do edifício à passagem do fogo florestal. A. d. República. Portugal, Diário da Republica Portuguesa. **134**: 67-72.
- DL9/2021 (2021). Regime Jurídico Da Segurança Contra Incêndios Decreto-Lei n.º 9/2021. D. d. R. Portuguesa. Lisbon, Diário da República Portuguesa.
- Duarte, A. P. C., P. Mazzuca, J. M. Lopo de Carvalho, C. Tiago, J. P. Firmo and J. R. Correia (2023). "Determination of the temperature-dependent thermophysical properties of polymeric foams using numerical inverse analysis." Construction and Building Materials **394**: 131980.
- Fiorini, C., M. Arruda, H. D. Craveiro, A. Santiago and F. Branco (2025). "Assessment of the proposed wildfire curves for housing design protection." Fire Safety Journal **155**: 104409.
- Fiorini, C., H. D. Craveiro, A. Santiago, L. Laím and L. Simões da Silva (2023). "Parametric evaluation of heat transfer mechanisms in a WUI fire scenario." International Journal of Wildland Fire **32**(11): 1600-1618.
- Hilton, J. E., J. E. Leonard, R. Bianchi, G. J. Newnham, K. Opie, A. Power, C. Rucinski and W. Swedosh (2020). "Radiant heat flux modelling for wildfires." Mathematics and Computers in Simulation **175**: 62-80.
- Hottel, H. C. (2023). "Radiant Heat Transmission Between Surfaces Separated by Non-Absorbing Media." Transactions of the American Society of Mechanical Engineers **53**(3): 265-271.
- LNEC (1990). E 364-1990 - Segurança contra Incêndio. Resistência ao Fogo de Elementos da Construção. Métodos de Ensaios e Critérios de Classificação. . Laboratório Nacional de Engenharia Civil.
- Perttu, L., N. Manuela and M. Jari (2015). "Heat release caused by the smouldering combustion of the binder of rockwool." Rakenteiden Mekaniikka (Journal of Structural Mechanics) **48**: 68-82.
- Pyne, S. J., P. L. Andrews and R. D. Laven (1996). Introduction to Wildland Fire. UK, John Wiley and Sons.
- Rodrigues, J. P. C. and D. J. Paula (2022). Proposta de Definição de Condições de Segurança Contra Incêndio para Edificações em Zonas de Interface Urbano-Florestal. Coimbra, Associação para o Desenvolvimento da Engenharia Civil da Universidade de Coimbra (ACIV\_UC).
- Suzuki, S. and S. L. Manzello (2020). "Garnering understanding into complex firebrand generation processes from large outdoor fires using simplistic laboratory-scale experimental methodologies." Fuel **267**: 117154.
- Zitouni, M., M. R. T. Arruda, P. Cantor and F. Branco (2025a). " Heat Penetration and Thermal Response due to Firebrand Accumulation on the Exterior Walls of Dwellings." Journal of Safety Science and Resilience, Accepted in press.
- Zitouni, M., A. R. A. Bicelli, M. R. T. Arruda and F. Branco (2025b). "Numerical Simulation of the Thermal Effect of Firebrand Deposition on External Composite Walls." Journal of Composites Science **9**(4): 151.



## CASO DE ESTUDO DE UM INCÊNDIO NUMA HABITAÇÃO PORTUGUESA

**Jorge Raposo**\*\*\*\*

Professor

UL – Universidade

Lusófona Portugal

**Hugo Raposo**

Professor

IPC - ISEC - RCM<sup>2+</sup>

Portugal

**André Rodrigues**

Professor

UL - Universidade

Lusófona Portugal

**Artur Costa**

Professor

UL – Universidade

Lusófona Portugal

**Torres Farinha**

Professor

IPC - ISEC - RCM<sup>2+</sup>

Portugal

**Luís Reis**

Professor

IPT

Portugal

### RESUMO

Os incêndios em habitações são um risco significativo, resultando frequentemente em perda de vidas e custos substanciais de reparação devido a danos na estrutura e no conteúdo. Existe uma clara necessidade de prevenir a sua ignição e propagação para as áreas adjacentes. Este estudo apresenta as ações tomadas, nomeadamente, contactos, recolha de dados, testes, análises e conclusões relativamente ao acidente resultante da deflagração e propagação de um incêndio em numa casa tradicional em Portugal. esta investigação envolveu observações e análise de dados seguidas de testes laboratoriais e análise de dados. Os testes de laboratório permitiram identificar consistentemente as características que levam à ignição e propagação do incêndio. Este trabalho identificou problemas de construção, materiais utilizados e fontes de calor responsáveis pelo acidente. As conclusões podem ser utilizadas para evitar futuros incidentes ou acidentes com casas do mesmo tipo de construção.

**PALAVRAS-CHAVE:** Incêndio Urbanos; Incêndio; Habitação; Teste de Laboratório.

### 1. INTRODUÇÃO

A evolução de um incêndio varia dependendo se ele ocorre em um espaço aberto ou confinado.

Embora possam seguir caminhos idênticos, sabe-se que um incêndio em espaço aberto tem a peculiaridade de depender do combustível e da energia dissipada, uma vez que o oxidante é praticamente ilimitado, sendo um fator determinante combinado com as condições meteorológicas. O caso de um incêndio confinado apresenta características como a quantidade limitada de oxigênio e o fato de os gases de combustão ficarem presos no local, com o conseqüente risco de combustão generalizada ou explosão. De acordo com Bishop e Drysdale (1998), inicialmente, em um incêndio confinado, a taxa de pirólise e a energia libertada são afetadas apenas pela queima dos elementos combustíveis e independentemente dos limites da compartimentação. Uma transição de um incêndio controlado pela ventilação para um incêndio controlado pelo combustível pode ocorrer, dependendo predominantemente da área da superfície do material combustível. Diversos estudos foram realizados, referenciados pelos seguintes autores: (Raposo et al. 2017), (Vaz et al. 2019), (Barbosa et al. 2022) e (Raposo et al. 2024).

Portanto, é extremamente importante conhecer o material combustível e a ventilação, pois esses fatores afetam a taxa de crescimento inicial do incêndio (Instituto Holandês de Segurança Nibra, 2009). Sabemos que incêndios em ambientes pequenos e confinados podem ser trágicos, mesmo na ausência de flashovers ou explosões.

A maioria dos incêndios residenciais e incidentes de incêndios resultam de 5 causas principais: cozinhar, aquecimento, distribuição elétrica e iluminação, incêndios intencionais e fumo (Ahrens e Maheshwarihome, 2020), (Arruda et al. 2024) e (Campbell, 2022). Os incêndios em residências são frequentes nos meses frios, quando as pessoas passam mais tempo dentro de casa, no período em que estão acordadas, com um pico de ignições entre 17h e 20h, que corresponde ao horário em que os incêndios ocorrem. As pessoas retornam para casa, preparam refeições ou realizam outras atividades no interior. Entre as causas mencionadas, destacam-se, em primeiro lugar,

\*\*\*\* Autor correspondente – Departamento de Proteção Civil, Faculdade de Ciências Naturais, Engenharias e Tecnologias, Centro Universitário do Porto, Rua Augusto Rosa, nº24 4000-098 Porto - Portugal, E-mail: p7976@ulusofona.pt.



a atividade de cozinhar, seguida pelo aquecimento e seus equipamentos. Dos incêndios que começam com aquecimento, destacam-se os incêndios em lareiras/chaminés. Em relação à localização, sabemos que dois terços dos acidentes e mortes em incêndios residenciais estão relacionados a incêndios que começam em salas de estar, quartos e cozinhas. Incêndios em salas de estar são um problema intimamente ligado a incêndios em chaminés. Assim, parece, a partir da recolha de dados realizada, que o incêndio na casa em Arganil, se enquadra na tipologia de incêndios com as causas mencionadas.

## 2. METODOLOGIA

A metodologia científica utilizada recorre ao método indutivo, que tem como ponto de partida a observação de fatos particulares para, através de sua associação, estabelecer generalizações que permitam a formulação de teorias. Portanto, o trabalho consiste na realização de observações e análise de dados.

Foram realizadas visitas à casa danificada, para coletar o máximo de informações registadas em fotos e informações em comunicações pessoais, das pessoas que estavam presentes durante o incêndio. Em seguida, os dados observados e analisados foram testados em laboratório para identificar consistentemente características que levaram à ignição e propagação do fogo.

Foram realizados testes em laboratório para simular as condições do acidente, utilizando materiais e condições semelhantes, a fim de demonstrar o potencial de ignição de uma viga em contato com os gases quentes da lareira. Termopares tipo K conectados ao sistema de aquisição NI CDAQmx através de uma placa NI9213, que permitiu o registo contínuo das temperaturas atingidas durante os testes, com resolução de 1 segundo, foram utilizados com o programa FLEXlogger da National Instruments. Além disso, o teste foi gravado nas faixas infravermelha e visível com a câmara infravermelha (IR) FLIR, modelo SC660.

## 3. CASO DE ESTUDO – INCÊNDIO EM HABITAÇÃO

O incêndio na casa ocorreu em 25 de dezembro de 2020, uma sexta-feira, quando eles já moravam na casa há mais de um mês. No dia 24, véspera de Natal, a família estava reunida na casa e, além dos moradores, havia outros membros da família, incluindo o irmão da senhora.

Nesse dia, e levando em consideração o frio que se fazia sentir nessa época, a lareira estava acesa e continuou queimando no dia 25, por mais de 48 horas. No dia 25, por volta das 16h, eles sentiram fumaça e abriram as janelas. Essa lareira já existia na casa antes da reconstrução, então foi solicitado apenas que a estrutura externa fosse ampliada. A lareira fica na sala de estar, no andar superior da casa. Um novo telhado também foi colocado na casa, mantendo a estrutura central de madeira, ou seja, substituindo o telhado por um painel sanduíche e instalando um forro de madeira no interior. Cabe ressaltar que consideramos relevante mencionar que notamos a inserção de uma viga na chaminé da lareira, estendendo-se até o interior, até a área por onde passam os gases quentes da combustão, como pode ser visto na Figura 1. Para alimentar a lareira, o casal utilizou lenha de pinho, principalmente, mas também de carvalho e oliveira.



Figura 1: Imagem da chaminé da estrutura da lareira e do teto da casa.

Após abrir as janelas, o cheiro de fumaça pareceu diminuir, porém, por volta das 18h, o irmão do proprietário, que estava no andar de baixo, decidiu tomar um banho e, para isso, subiu para o andar de cima, passou pela sala de estar e foi até o banheiro, que ficava ao lado da lareira. Ao passar pelo banheiro, ouviu uma espécie de crepitação vinda do fogo e, olhando para a chaminé, viu faíscas saindo. Assim, percebeu que o telhado estava pegando fogo e, naquele momento, ainda havia eletricidade. Imediatamente ligou para o proprietário e eles começaram a sair da casa, entre 18h30 e 19h30. Um vizinho chamou os bombeiros (Bombeiros Voluntários de Coja, Arganil), segundo os registos, com o alarme às 19h35, que chegaram ao local 45 minutos depois, com 22 bombeiros envolvidos no combate às chamas. Os membros da família já estavam no exterior, o casal, os 3 filhos e um irmão. O proprietário removeu os botijões de gás (Figura 2) para um local mais distante e o combustível de um gerador.



Figura 2: Local onde os cilindros de gás foram removidos.

Quadro 1: Dados de incêndio

Alerta	17h35m
Causa da ignição	Lareira, com falhas técnicas e ligação ao forro do teto
Equipamento envolvido na ignição	Lareira
Fonte de calor	Lenha de pinho
Extensão	Casa inteira
Fatores que contribuem para a ignição	Vigas de madeira dentro da chaminé da lareira, parede de gesso cartonado revestida de pedra entre a chaminé e o forro de madeira, com painéis sanduíche no teto



Local da ignição  
Pessoas operando

Sala de estar  
22 elementos dos bombeiros

---

Com base neste estudo, com os elementos coletados e a análise dos dados coletados, consideramos que a ignição ocorreu ao lado da lareira, que estava acesa e queimando material lenhoso, com a viga de madeira dentro da lareira e com o forro falso revestido de madeira, como mostrado na Figura 3.



Figura 3: Parede de gesso cartonado, revestida de pedra, e teto de madeira com uma viga dentro da lareira, sem ventilação.

A causa da ignição parece estar diretamente ligada à inserção da viga de madeira na estrutura da chaminé (com dimensões de 11 cm x 5 cm), onde entrou em contato com os gases quentes da combustão, com temperaturas superiores a 600 °C. A madeira, por ser um polímero natural, quando submetida ao fogo, sofre despolimerização e carbonização, alterando suas propriedades mecânicas, dependendo da temperatura atingida e do tempo de exposição ao calor. A tabela a seguir mostra as alterações que podemos observar com o aumento da temperatura na madeira.

Shafner (1973) afirma que os materiais lenhosos sofrem pirólise a temperaturas da ordem de ~300 °C. Portanto, essa prática de embutir as vigas, ou a negligência em não as remover durante a reconstrução, parece ser uma falha grave (qualquer uma dessas duas ações) que certamente contribuiu para o incêndio. Também lembramos que foi criada uma barreira adicional à liberação de calor, com a camada externa construída ao redor da chaminé, o que teria promovido o acúmulo de calor próximo ao revestimento e às vigas de madeira, já que havia isolamento de lã de rocha no topo. Painéis conhecidos como painéis sanduíche foram colocados no telhado, finas chapas de metal com material polimérico altamente combustível em seu interior, o que teria promovido a rápida propagação do fogo por todo o telhado (Figuras 4, 5 e 6).

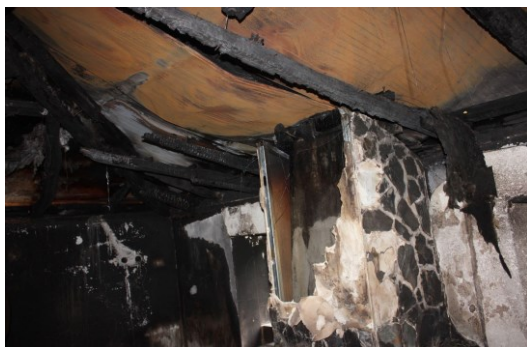


Figura 4: Local ao lado da lareira, onde o revestimento, a lã mineral e o enchimento do painel sanduíche foram completamente consumidos, na sala de estar.

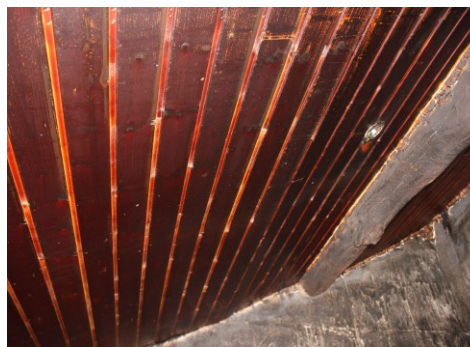


Figura 5: Localização da casa onde o teto não foi consumido pelo fogo.



Figura 6: As chamas espalharam-se pelo teto da sala de estar, destruindo-o completamente.

Realização de testes laboratoriais simulando as condições do acidente, utilizando materiais e condições semelhantes.

Para demonstrar o potencial de ignição de uma viga em contato com os gases quentes da lareira, foram realizados testes no laboratório de incêndio da Universidade de Coimbra. Na ausência de testes generalizados e padronizados para este tipo de acidente, as condições do local foram replicadas, utilizando um túnel de combustão vertical em laboratório, onde lascas de madeira semelhantes às utilizadas em uma lareira convencional foram acesas e queimadas. Uma viga de madeira com dimensões de 11 cm x 5 cm foi inserida através de um orifício em uma das laterais, a uma altura de 2 m da base e da área de combustão, tal como no local do acidente. A Figura 7 mostra o túnel de combustão vertical, com a viga de madeira sendo testada.



Figura 7: Túnel de combustão vertical, com viga de madeira durante o teste.

A viga de madeira foi instrumentada com termopares tipo K e conectada ao sistema de aquisição NI CDAQmx através de uma placa NI9213, o que permitiu o registo contínuo das temperaturas atingidas durante o teste, com resolução de 1 segundo, utilizando o programa FLEXIlogger da National Instruments. Adicionalmente, o teste foi registado nas faixas do infravermelho e do visível. A Figura 8 mostra uma imagem geral do teste com a câmara infravermelha (IR) FLIR, modelo SC660.



Figura 8: Visão geral do teste com a câmara infravermelha.

A câmara infravermelha, modelo SC660, da FLIR, permitiu o monitoramento espacial de todas as temperaturas registadas e a extração de quadros, o que possibilita esclarecer rapidamente a evolução do teste a qualquer momento.

O registo das temperaturas permitiu identificar que temperaturas superiores a 360 °C foram atingidas na viga de madeira, como pode ser visto nas figuras a seguir, nas áreas amarelas (Figura 9).

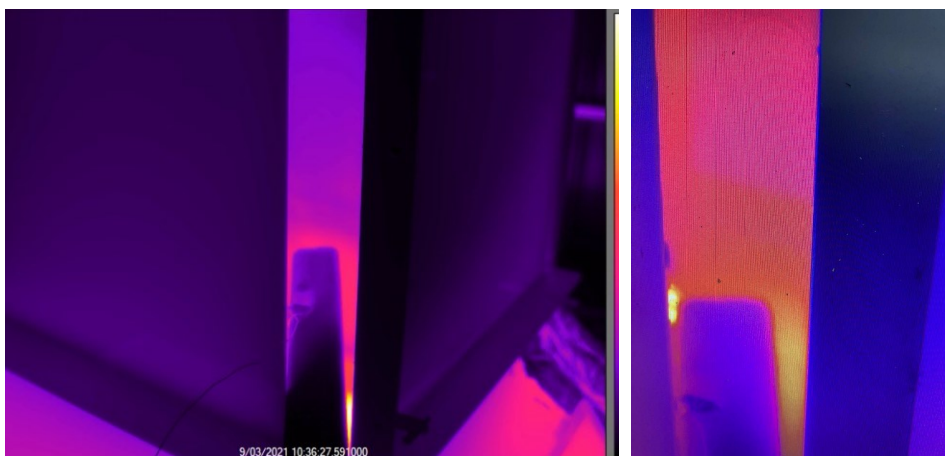


Figura 9: Imagens térmicas da câmara infravermelha com o feixe em teste (visão geral e detalhe do feixe). Após a realização do teste, que durou cerca de 40 minutos, a viga foi analisada e fotografada, sendo possível observar claramente as áreas queimadas que entraram em combustão, apesar de não terem tido contato com as chamas e apenas com os gases quentes, como no caso da chaminé (Figura 10).



Figura 10: Imagem de uma viga de madeira com zona evidente de pirólise e carbonização.

Após a realização deste teste e sua análise, verificou-se que era possível que a viga iniciasse o processo de combustão, ou seja, na chaminé havia condições para o início de um incêndio. Além disso, na casa, havia continuidade de combustível através do revestimento de madeira no teto, dos cabos elétricos e dos painéis sanduíche na cobertura do edifício, bem como do revestimento da chaminé com a estrutura de suporte de gesso acartonado e pedras, com conexão à estrutura de madeira.

#### 4. CONCLUSÕES

Considerando as evidências encontradas no local e após a realização de testes laboratoriais, foi possível confirmar que existiam as condições propícias para o início de um incêndio na casa da chaminé. Além disso, na casa havia continuidade de combustível, através de vigas inseridas na área de combustão, conectadas ao revestimento de madeira e com painéis sanduíche com apenas uma camada de lã de rocha. Essa continuidade é resultado da utilização de práticas e métodos construtivos que negligenciam completamente o risco de incêndio. Sabemos que materiais lenhosos, como a madeira, quando expostos ao calor, apresentam degradação térmica de seus polímeros, redução de suas propriedades mecânicas e carbonização de sua superfície, e inflamam-se a temperaturas em torno de 300°C. Assim, essa prática de embutir vigas, ou a negligência em não as remover do interior da lareira durante a reconstrução, configura um erro grave que certamente contribuiu para o ocorrido. Lembramos também que foi criada uma barreira adicional à dissipação de calor, com a camada externa construída ao redor da chaminé, o que favoreceu o acúmulo de calor próximo ao revestimento, às vigas de madeira e aos cabos elétricos. Na parte superior havia isolamento de lã de rocha mineral, que também promovia isolamento térmico e acúmulo de calor. Painéis conhecidos como painéis sanduíche foram colocados no telhado, finas chapas de metal com material polimérico altamente combustível em seu interior, o que teria favorecido a rápida propagação do fogo por toda a cobertura.

#### REFERÊNCIAS

- Ahrens, M.; Maheshwari, R. Home Structure Fires; National Fire Protection Association: Quincy, MA, 2020.
- Arruda, M.R.T.; Bicelli, A.R.A.; Branco, F. Ignition Locations and Simplified Design Guidelines for Enhancing the Resilience of Dwellings against Wildland Fires. *Fire* 2024, 7, 40. <https://doi.org/10.3390/fire7020040>
- Bishop, S. R., & Drysdale, D. D. Fires in Compartments: The Phenomenon of Flashover. *Philosophical Transactions: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1998). 356(1748), 2855–2872. <http://www.jstor.org/stable/55052>
- Barbosa, T.F.; Reis, L.; Raposo, J.; Viegas, D.X. A Protection for LPG Domestic Cylinders at Wildland-Urban Interface Fire. *Fire* 2022, 5, 63.
- Drysdale, Dougal. An introduction to fire dynamic - 2nd ed. UK 1998
- Vaz, G.; Raposo, J.; Reis, L.; Monteiro, P.; Viegas, D. Rigid Protection System of Infrastructures against Forest Fires. *Fire* 2022, 5, 145. <https://doi.org/10.3390/fire5050145>
- Viegas, D.X.; Almeida, M.; Ribeiro, L.; Raposo, J.; Viegas, M.T.; Oliveira, R.; Alves, D.; Pinto, C.; Humberto, J.; Rodrigues, A.; et al. O Complexo de Incêndios de Pedrógão Grande e Concelhos Limítrofes, Iniciado a 17 de Junho de 2017; CEIF/ADAI/LAETA: Coimbra, Portugal, 2017.



**9JORNING-4JORPROCIV**

9<sup>th</sup> Jornadas de Segurança aos Incêndios Urbanos  
4<sup>th</sup> Jornadas de Proteção Civil

Coimbra, 7 de novembro de 2025

- Raposo J., Raposo., H., Farinha, J., Pais, J. Fires in Urban Passenger Transport Vehicles. Public Transport 2024
- Richard Campbell. Caused by Electrical Failure or Malfunction. Quincy, MA: National Fire Protection Association, 2022.1, p. 1.
- Schaffer, E. L. 1973 Effect of Pyrolytic Temperatures on the Longitudinal Strength of Dry Douglas Fir. Journal of Testing and Evaluation, v. 1, n. 4, p319-329.
- Netherlands Institute for Safety Nibra. Consumer Fire Safety: European Statistics and Potential Fire Safety Measures; Netherlands Institute for Safety Nibra: Arnhem, The Netherlands, 2009.



**9JORNINC-4JORPROCIV**

9<sup>ª</sup> Jornadas de Segurança aos Incêndios Urbanos  
4<sup>ª</sup> Jornadas de Proteção Civil

Coimbra, 7 de novembro de 2025



## MODELAGEM NUMÉRICA DE COLUNAS MISTAS DE AÇO PREENCHIDAS COM CONCRETO ARMADO, COM ELONGAÇÃO TÉRMICA CONTIDA E SUJEITAS AO FOGO

**Sérgio R. O. Q. Braga<sup>1</sup>**  
Doutorando  
UC - Coimbra

**António J. P. M. Correia**  
Professor  
ISEC/IPC – Coimbra  
SUSCITA/IPC - Coimbra

**João Paulo C. Rodrigues**  
Professor  
UC – Coimbra

**Abstract.** Altos custos e complexidade limitam o número de experimentos com fogo em elementos estruturais. Colunas tubulares de aço preenchidas com concreto têm assumido um papel cada vez maior na construção civil. Seu excelente desempenho estrutural as torna particularmente adequadas para aplicações em edifícios altos e pontes. O enchimento de concreto oferece uma solução prática atraente para fornecer proteção contra incêndio sem a necessidade de nenhuma proteção externa. A segurança contra incêndios é um dos aspectos-chave do projeto estrutural e a resposta dessas colunas quando inseridas em uma estrutura de edifício é diferente de quando isoladas. A restrição ao alongamento térmico da coluna desempenha um papel importante na sua estabilidade, uma vez que induz a diferentes formas de interação entre a coluna aquecida e a estrutura fria adjacente do edifício. Este estudo numérico mostra resultados de simulações em colunas tubulares de aço preenchidas com concreto de seção transversal elíptica solicitadas ao fogo por meio de uma curva de incêndio padronizada. Foram avaliados os efeitos da esbeltez, nível de carga aplicada e nível de restrição axial. A avaliação da esbeltez pelo comprimento da coluna revelou que os tempos críticos diminuíam na medida em que se aumentava o comprimento das colunas. Também na medida em que os percentuais de carga inicial eram aumentados os tempos críticos ficavam menores. Foram avaliadas finalmente as influências das condições de apoio e esbeltez normalizada nas temperaturas experimentadas no momento do retorno da carga ao carregamento originalmente imposto aos modelos.

**Keywords:** Modelação Numérica; Coluna Mista; Restrição Térmica.

### INTRODUÇÃO

O emprego de seções ocas circulares e quadradas na construção de colunas tem sido amplamente documentado e o comportamento destas seções preenchidas com concreto tem sido extensivamente investigado tanto em temperatura ambiente quanto na solicitação por fogo. Embora o uso de seções transversais elípticas em colunas metálicas ocas preenchidas com concreto esteja crescendo e se tornando popular entre os projetistas poucas aplicações podem ser encontradas uma vez que os códigos atuais de projeto não cobrem esta nova forma. O comportamento estrutural das seções ocas elípticas em temperatura ambiente foi estudado nos últimos anos cobrindo a classificação da seção transversal e a avaliação das resistências à compressão, cisalhamento e flexão. Investigações disponíveis sobre este tipo especial de colunas em temperaturas elevadas ainda são muito limitadas. Poucos programas experimentais e numéricos foram realizados nos últimos anos, podendo citar [1] Espinos et al 2013, [2] Rodrigues e Laím, 2017 e [4] Correia e Rodrigues 2012 estes dois últimos no desenvolvimento de trabalhos abordando os efeitos das restrições ao alongamento térmico destes tipos de coluna inseridas em estruturas. Eles verificaram que as restrições desempenham um papel importante na estabilidade da coluna, uma vez que induzem diferentes formas de interação entre a coluna aquecida e a estrutura adjacente fria. Assim este estudo numérico relata resultados de simulações numéricas, validadas em experimentos, em colunas tubulares de aço preenchidas com concreto de seção transversal elíptica solicitadas ao fogo por meio da curva [5] ISO-834(1980), abordando aspectos importantes do seu dimensionamento. Foram avaliados os efeitos da esbeltez



em três parâmetros; esbeltez da seção transversal da coluna, esbeltez da seção transversal do perfil metálico e esbeltez normalizada  $\lambda$ .

## MODELOS DA COLUNA EXPERIMENTAL E NUMÉRICO

### Modelo experimental

O modelo experimentado por [3] Rodrigues e Laim, (2017) compunha um amplo programa experimental de colunas mistas de aço e concreto realizado na Universidade de Coimbra, Portugal. Este sistema experimental permitiu ensaiar colunas sob ação do fogo simulando os efeitos de sua ligação com a estrutura circundante; restrições axiais e rotacionais. A coluna ensaiada consistia em uma coluna tubular de seção transversal elíptica de dimensões transversais de 320x160 mm, espessura da parede do perfil de 12,5mm e comprimento de 3.150mm. O concreto do núcleo era reforçado por quatro barras de diâmetro 20mm dispostas nas extremidades dos eixos da seção transversal e por estribos de 8mm espaçados de 150mm. O recobrimento adotado para as armaduras era de 25mm. O concreto adotado foi da classe C25/30 e foi elaborado com agregados de dimensão máxima de 16mm. O aço empregado no perfil metálico tinha resistência nominal de 375MPa e no reforço de armadura foi de 500MPa.

A aplicação do fogo se deu por meio de três módulos elétricos de um forno, cada módulo com dimensões internas de 1500 x1500x1000mm, ajustados junto às colunas e que simulava a aplicação de curva de incêndio do tipo [5] ISO-834 (1980). As condições de apoio nas extremidades da coluna eram do tipo rotuladas e a ela foi imposto, por meio de um pórtico externo calibrado, uma restrição axial relativa à coluna de 0,03. Um carregamento vertical de compressão foi aplicado no topo da coluna à taxa de 30% da sua capacidade de carga aferida pela rotina prevista no [8] Eurocódigo 4 para temperatura ambiente. Este carregamento foi mantido durante o aquecimento da coluna.

A coluna carregada foi aquecida no instante inicial, alongou-se até um valor máximo de onde em razão da degradação das propriedades mecânicas dos componentes, contraiu-se. Em parte deste período a força na coluna aumenta até um valor máximo e retorna ao valor nominal inicialmente imposto. A este período temporal convencionou-se chamar de tempo crítico ( $t_{cr}$ ).

### Modelo numérico

As colunas para esta análise numérica foram moldadas em quatro partes distintas: O perfil metálico oco; o núcleo de concreto, as eventuais armaduras de reforço e os apoios. Para o perfil metálico e núcleo de concreto foram utilizados elementos finitos de tipo sólido C3D8R. Após avaliação de sensibilidade verificou-se que elementos de 20mm produziam resultados precisos com tempos computacionais práticos. Toda a coluna foi discretizada e através da seção metálica foram utilizados dois elementos.

Na validação do modelo numérico foi utilizada a curva real de temperaturas seguida pelo forno uma vez que o forno elétrico apresenta uma pequena resistência no aquecimento nos primeiros dez minutos. Para os parâmetros que governam o problema da transferência de calor foram adotados os valores recomendados no [6] Eurocódigo 1 (2011). O mecanismo de transferência de calor por radiação foi modelado na interface aço-concreto com emissividades de superfícies de aço e concreto iguais a 0,7 e um fator de configuração igual a 1. O coeficiente de transferência de calor por convecção ( $h_c$ ) adotado foi de 25 W/m<sup>2</sup> K. As propriedades térmicas e mecânicas do concreto em temperaturas elevadas foram obtidas do [9] Eurocódigo 4 (2011). No [8] Eurocódigo 3 (2010) foram obtidas as propriedades, térmicas e mecânicas dependentes da temperatura do aço.

A resistência térmica na fronteira entre o tubo de aço e o núcleo de concreto foi considerada através de um valor de condutância de espaço de 200 W / m<sup>2</sup> K. O teor de umidade do núcleo de concreto foi considerado através de um valor de pico no calor específico, representando o calor latente da vaporização da água. Um teor de umidade de 3% em massa do concreto proporcionou melhor convergência com o experimento.

Os valores dos parâmetros adotados nesta validação foram utilizados nas análises de transferência de calor não linear para cada uma das colunas do estudo numérico. A curva de incêndio padrão [5] ISO-834 (1980) foi aplicada à superfície exposta das colunas como uma carga térmica, através dos mecanismos de condução, convecção e radiação aplicados a todo o comprimento das colunas nas simulações numéricas de esbeltez, níveis de carregamento inicial e níveis de restrição relativos.



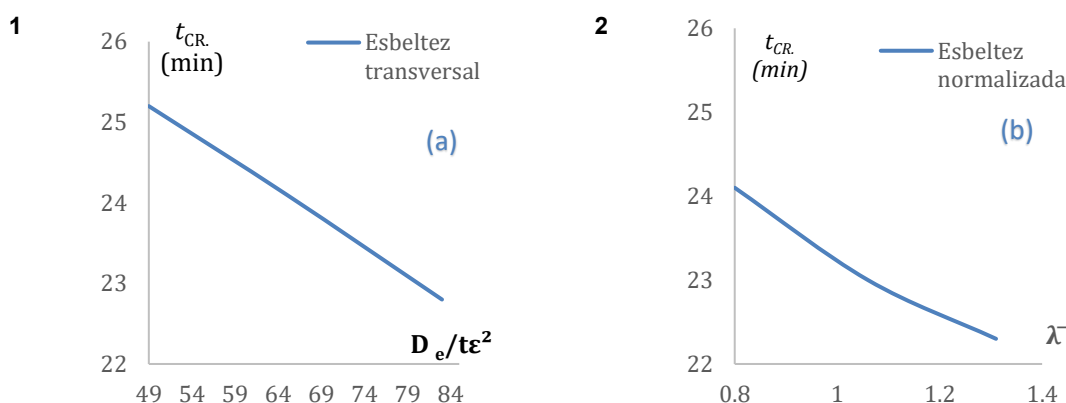
## RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES NUMÉRICAS

### Influência da esbeltez

A análise numérica da esbeltez da coluna foi executada verificando três parâmetros isoladamente: as dimensões da seção transversal, a esbeltez da seção transversal do perfil metálico empregado e o comprimento das colunas. Para cada um dos parâmetros foram executadas três simulações. A capacidade de carga das colunas à temperatura ambiente foi obtida por aplicação das rotinas do [9] Eurocódigo 4 (2011). As colunas eram carregadas verticalmente pelo topo a uma taxa de 30% desta capacidade e mantidas durante o aquecimento. Não havia armaduras de reforço no concreto do núcleo e as colunas eram apoiadas em rótulas em ambas as extremidades. Um fator multiplicador para a imperfeição geométrica inicial de  $L/1000$  foi imposto às colunas. Para analisar os efeitos da esbeltez na coluna devido ao tamanho da seção transversal foram utilizados 3 tamanhos padronizados: 250x125; 320x160; 400x200. Foram mantidas fixas a espessura do perfil metálico, 12,5mm e o comprimento da coluna, 3.150mm.

Nestas condições a esbeltez da seção do perfil metálico,  $D_e/t_e^2$ , aumenta com o aumento da seção transversal conjunta e os valores de esbeltez normalizada,  $\bar{\lambda}$ , fator de massividade,  $a_m/V$  e contribuição do aço  $\delta$  decrescem. A contribuição do aço  $\delta$ , é definida no [9] Eurocódigo 4 (2011) para colunas mistas como a relação entre força no elemento metálico e a força na seção conjunta. O fator de massividade,  $a_m/V$ , por definição do mesmo código é a relação entre a superfície exposta ao aquecimento e o seu volume. Logo maiores  $\delta$  produzem menores níveis de tensão no aço do perfil e quando aquecidos produzem maiores tempos críticos. As seções com maior  $a_m/V$ , como esperado, aqueceram mais e tiveram o maior alongamento axial.

Para analisar os efeitos da esbeltez da coluna devido a espessura da parede do perfil metálico foram realizadas simulações mantendo-se fixos o comprimento da coluna, 3.150mm, e as dimensões globais da seção transversal em 320x160mm. Assim foram simulados o emprego de três espessuras de perfil 10, 12,5 e 14,2mm. Nestas condições a esbeltez da seção transversal do perfil é menor na medida em que se aumenta a sua espessura e em consequência a contribuição do aço “ $\delta$ ”, definida no [9] Eurocódigo 4 (2011), é maior. Aqui também maiores contribuições do aço  $\delta$  geraram menores tensões mecânicas iniciais e por conseguinte, maiores tempos críticos no aquecimento, figura 3.1 (a). As relações  $a_m/V$  eram iguais para as colunas desta simulação razão pela qual foram verificados valores muito próximos de temperatura no momento do tempo crítico. Também em razão do aumento da espessura da parede do perfil foi verificado um aumento na deformação axial e lateral das colunas.



3 Figura 3.1: Tempo crítico por tipo de esbeltez

Na análise da influência do comprimento na esbeltez da coluna foram simulados três comprimentos de colunas: 3,150, 4,150 e 5,150mm. Assim a menor esbeltez normalizada  $\bar{\lambda}$  era de 0,80 e a maior de 1,31. As seções



transversais das colunas eram de 320x160mm e a espessura dos perfis metálicos era fixa de 12,5mm. A figura 3.1 (b) ilustra os tempos críticos obtidos na avaliação da esbelteza normalizada.

Os tempos críticos obtidos das simulações variaram pouco, menos de 10%, entre a menor e a maior coluna. As temperaturas no perfil metálico neste momento, por consequência, também. Já as deformações, axial e lateral das colunas, como esperado, cresceram à medida que a esbelteza aumentou.

### Influência do nível de carregamento

Para verificar os efeitos dos níveis de carregamento no desempenho das colunas frente a solicitação por fogo foram executadas simulações em três níveis de carregamento: 30, 50 e 70%. A coluna era de seção transversal de 320x160mm com espessura do perfil de 12,5mm e comprimento de 3.150mm. A capacidade de carga das colunas à temperatura ambiente foi obtida por aplicação das rotinas do [8] Eurocódigo 4 (2011) e considerando o perfil formado a quente. As colunas tinham as condições de apoio em rótulas em ambas as extremidades. Um fator de multiplicação da imperfeição geométrica inicial equivalente a  $L/1000$  foi imposta às colunas.

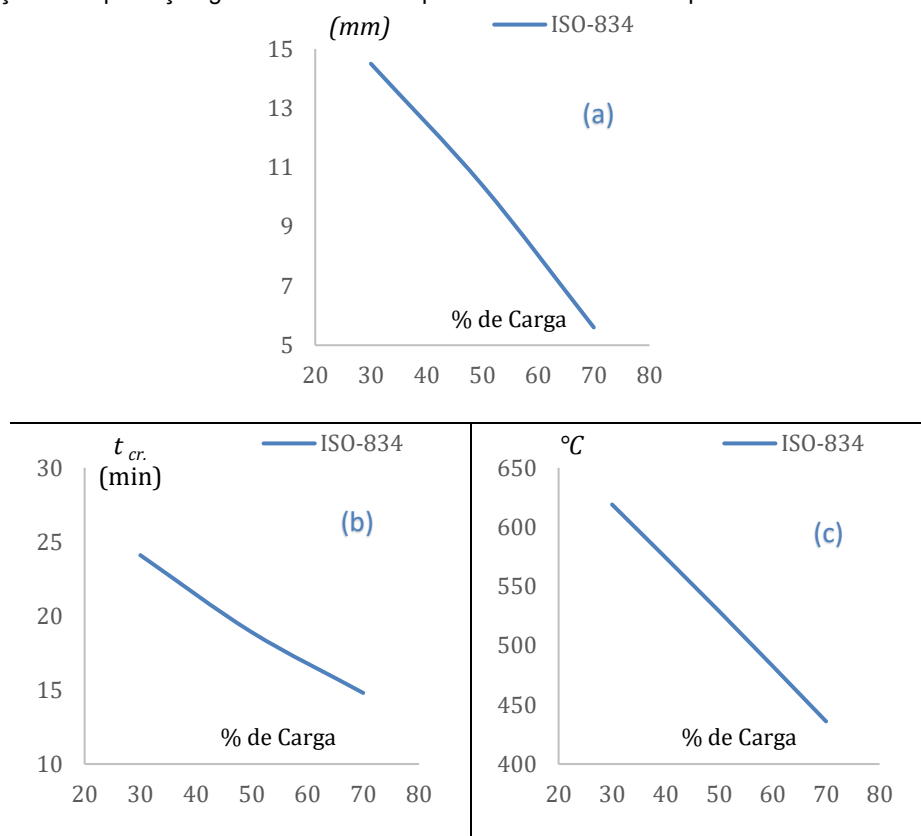


Figura 3.2 Comportamento do tempo crítico e da temperatura com % de carga aplicado

Os resultados alcançados vão na direção clara da diminuição do tempo crítico com o aumento percentual da carga aplicada, figura 3.2 (b). Esta diminuição de tempo de resistência ao fogo é acompanhada por uma redução na temperatura, no tempo crítico e por um menor alongamento longitudinal do perfil metálico, figuras 3.2 (c) e (a) respectivamente.

### 3.3 Influência do nível de restrição

As colunas selecionadas para análise de níveis de restrição eram de seção transversal de 320x160mm com espessura do perfil de 12,5mm e comprimento de 3.150mm apoiadas em ambas as extremidades por rótulas.



Todas as colunas experimentadas estavam submetidas a um nível de carregamento de 30% de sua capacidade de carga à temperatura ambiente obtida por aplicação das rotinas do [8] Eurocódigo 4 (2011). Um fator multiplicador para imperfeição geométrica inicial de  $L/1000$  foi imposto às colunas.

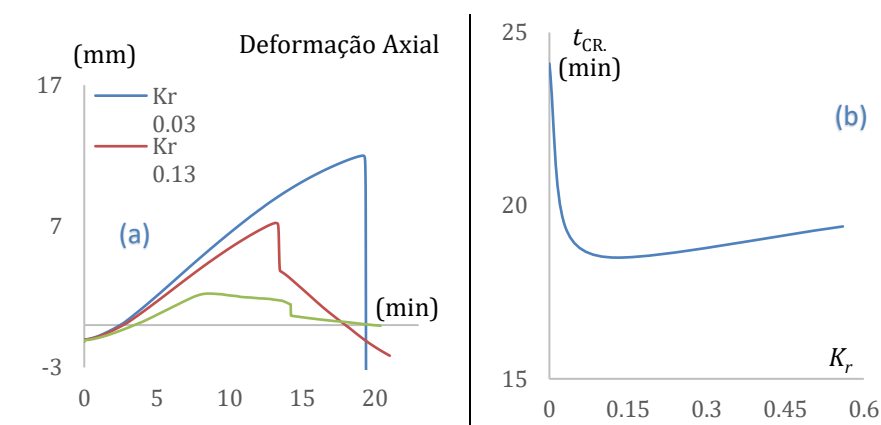
Foram experimentados quatro níveis de restrição relativa: 0 – 0,03, 0,13 e 0,56. A imposição de restrição axial aos modelos foi materializada por meio da colocação de uma mola, calibrada nas restrições axiais a experimentar e que iniciava sua atuação imediatamente após o carregamento de serviço da peça e no momento de início do aquecimento dos modelos. A mola era, portanto, funcional no período compreendido entre o início do aquecimento até a carga máxima e desta para a carga inicial aplicada, ou seja, no período do tempo crítico ( $t_{cr}$ ). A imposição destas restrições, que a rigor simulam os efeitos da estrutura fria circundante da coluna, a estrutura em condições reais, faz diminuir o tempo crítico ( $t_{cr}$ ), figura 3.3 (b).

Ao se comparar os tempos obtidos da coluna sem restrições com as restritas ao nível relativo,  $K_r$ , de 0,03 vê-se que houve uma diminuição do tempo crítico da ordem de 20%. Já a ampliação do nível de restrição relativa,  $K_r$ , de 0,03 para 0,13 afetou pouco o tempo crítico, menos de 5%. Esta tendência foi observada por [2] Rodrigues e Laim, 2017 em seus experimentos onde constataram que ampliação de um nível de restrição relativa de 0,04 para 0,14 produziu um decréscimo no tempo crítico de cerca de 5%.

A imposição de restrição axial às colunas fez também aumentar o nível de carga máxima por elas suportado. Aumentando o nível de restrição relativa,  $K_r$ , as forças experimentadas pelas colunas aumentam de forma significativa. Entre a coluna sem restrição e a com restrição relativa de 0,03 houve um incremento de carga na coluna da ordem de 40% e de 110% entre a restrição relativa de 0,03 e 0,13. A figura 3-3 (d) ilustra o desenvolvimento da força máxima nas colunas com a temperatura em três níveis de restrição relativa.

Das simulações foi possível observar também que à medida que se aumentava o nível de restrição relativa os tempos para atingir a carga máxima diminuía. Amostra sem restrições demorou 22,5min para atingir a carga máxima e a amostra com restrição relativa de 0,56 o fez em 8,4min. Em consequência as temperaturas observadas no momento de força máxima eram menores, 619 °C para a coluna sem restrição e 537 °C para a restrição relativa de 0,56.

Quanto as deformações observadas nas amostras, como esperado, quanto maiores eram os níveis de restrição relativa impostos, menores eram as deformações longitudinais observadas. A deformação axial da coluna com restrição relativa de 0,13 foi cerca de 40% menor que a observada na coluna com 0,03. Os níveis de deformação em função dos níveis de restrição impostos são consistentes com os observados por [3] Rodrigues and Laim, 2017 em seus experimentos. Quanto às deformações laterais, à meia altura da coluna. Também em conformidade com o observado por [3] Rodrigues and Laim, 2017 em seus experimentos, estes deslocamentos laterais das colunas a meia altura foram cada vez maiores após os deslocamentos axiais máximos serem atingidos. As Figuras 3-3 (a) e (c) ilustram estas observações para os três níveis de restrição relativa,  $K_r$ :



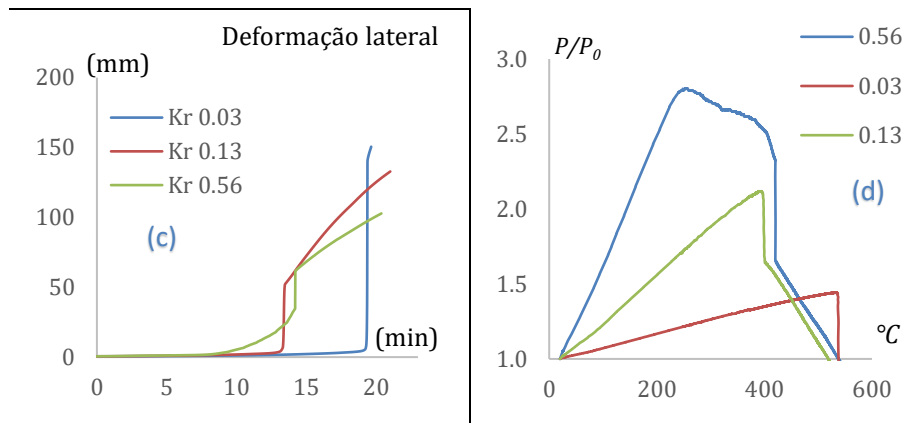


Figura 3-3: Influência dos níveis de restrição na coluna

### 3.4 Influência da esbeltez normalizada e condições de apoio

Uma nova campanha de simulação numérica com 72 modelos de colunas derivadas das anteriormente descritas e validadas está em processo de avaliação para futura publicação. Nesta nova avaliação foram simuladas colunas em duas condições de apoio distintas: sobre rótulas e engastadas, em três níveis de carregamento distintos e esbeltez normalizada  $\bar{\lambda}$ , no intervalo de 0.5 a 2.0. Os resultados completos ainda estão em tratamento, entretanto algumas respostas já são bastante significativas. Colunas de mesma esbeltez reduzida  $\bar{\lambda}$ , igual capacidade de carga na temperatura ambiente, mas de comprimentos e condições de apoio das extremidades distintos, apresentam temperaturas no momento do retorno da carga ao carregamento inicial imposto ( $T_{RC}$ ) com diferenças significativas. O critério de temperatura no momento do retorno ao carregamento inicial imposto, neste trabalho, é a maior temperatura experimentada pelo corpo de prova, que nos casos em análise é a maior temperatura na seção à meia altura, [8] Eurocódigo 4 (2011).

Quadro 1: Comparativo de temperaturas de colapso em função do  $\bar{\lambda}$

<sup>a</sup> $\bar{\lambda}$	Apoios	<sup>b</sup> $P_0$ (kN)	<sup>c</sup> $P_{máx.}$ (kN)	<sup>d</sup> $T_{RC}$ (°C)	<sup>e</sup> $\xi$ (%)
0.50	PP	1.202,0	1.449,0	347	22
	CC		1.961,0	448	
0.86	PP	902.0	1.263,0	412	27
	CC		1.351,0	563	
1.05	PP	775.0	1.196,0	417	30
	CC		1.320,0	594	
1.40	PP	475.0	997,0	425	29
	CC		1.250,0	599	

<sup>a</sup> esbeltez normalizada, <sup>b</sup> carregamento de projeto à temperatura ambiente, <sup>c</sup> força máxima experimentada pelo modelo, <sup>d</sup> temperatura máxima na seção a meia altura no momento do retorno da carga ao carregamento original imposto e <sup>e</sup> diferença percentual de temperatura  $T_{RC}$  entre os modelos de apoios PP (apoios sobre rótulas) e CC (apoios engastados)



Nos modelos com apoios em rótulas observa-se uma diferença nas temperaturas no momento do retorno da carga ao carregamento originalmente imposto bastante significativa, da ordem de 20 a 30% superiores entre as temperaturas obtidas nos modelos engastados, (SR), ante aos modelos apoiados em rótulas (PP). Os resultados obtidos são consistentes com as observações obtidas por [10] Simão (2023) em suas análises de colunas metálicas puras e, portanto, podem ser estendidos para as colunas mistas. Da mesma forma é lícito afirmar que apenas a esbeltez normalizada não é suficiente para caracterizar a resistência ao fogo.

## CONCLUSÃO

A análise da influência da esbeltez na resposta da coluna mista frente a uma solicitação por fogo por meio da curva de incêndio [5] ISO-834 foi executada com a consideração de três parâmetros de esbeltez de forma independente. Relativamente ao tempo crítico alcançado pelas colunas na análise da esbeltez por espessura do perfil metálico empregado e pelo tamanho da seção transversal bruta, verificou-se que a contribuição do aço  $\delta$ , definida no [9] Eurocódigo 4 (2011) como a relação entre força no elemento metálico e a força na seção conjunta, exerce maior influência sobre os demais índices. A avaliação do tempo crítico experimentado pelas colunas simuladas revela que maiores contribuições do aço da seção da coluna conduzem a maiores tempos críticos. Avaliação da esbeltez pelo comprimento da coluna mostrou que os tempos críticos diminuem na medida em que se aumenta o comprimento das colunas.

Nas simulações por níveis iniciais de carregamento observou-se que aumentando o nível inicial de carregamento os tempos críticos diminuem. Aumentar o nível inicial de carregamento de 30 para 70% fez o tempo crítico diminuir em 40%.

Nas simulações de níveis de restrição axial relativos, foram feitas simulações em quatro níveis o que permitiu conhecer os seus efeitos na solicitação por fogo das colunas. Entre a coluna sem restrição axial e o menor nível de rigidez relativa experimentado, 0,03, houve um decréscimo de cerca de 20% no tempo crítico. A magnitude deste decréscimo não se verifica entre a rigidez relativa de 0,03 e 0,13 onde foi de apenas 5%. Ampliando-se a rigidez relativa para níveis de 0,56 o tempo crítico pareceu estabilizar-se. Simulações com 1,11 de rigidez relativa produziram tempos críticos semelhantes aos da rigidez relativa de 0,56.

Da análise da influência das condições de apoio conjugadas aos valores idênticos de esbeltez normalizada e carregamento à temperatura ambiente pode-se concluir que apenas a esbeltez normalizada não é capaz de caracterizar a resistência ao fogo de colunas mistas de aço e betão.

## REFERENCIAS

- [1] Espinos, A., Romero, M., Hospitaler, A.: "Fire Design Method for Bar-Reinforced Circular and Elliptical Concrete Filled Tubular Columns." *Engineering Structures* 56: 384–95 (2013).
- [2] Rodrigues, J., Laím, L.: "Fire Resistance of Restrained Composite Columns Made of Concrete Filled Hollow Sections." *Journal of Constructional Steel Research* 133: 65–76 (2017).
- [3] Rodrigues, J., Laim, L.: "Fire Response of Restrained Composite Columns Made with Concrete Filled Hollow Sections under Different End-Support Conditions." *Engineering Structures* 141: 83–96 (2017).
- [4] Correia, A., Rodrigues, J.: "Fire Resistance of Steel Columns with Restrained Thermal Elongation." *Fire Safety Journal*, vol. 50, , pp. 1–11 (2012).
- [5] ISO 834: "Fire resistance tests, elements of building construction". International Organization for Standardization, Switzerland (1980).
- [6] EN 1991-1-2, Eurocode 1: Actions on structures, Part 1.2: General actions - Actions on structures exposed to fire. Brussels, Belgium: Comité Européen de Normalisation. (2010).
- [7] EN 1992-1-2, Eurocode 2: Design of concrete structures, Part 1.2: General rules – Structural fire design. Brussels, Belgium: Comité Européen de Normalisation. (2010).
- [8] EN 1993-1-2, Eurocode 3: Design of steel structures, Part 1.2: General rules – Structural fire design. Brussels, Belgium: Comité Européen de Normalisation. (2010).
- [9] EN 1994-1-1, Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures. Part 1-1: General rules and rules for buildings. Brussels, Belgium: Comité Européen de Normalisation. (2011).



**9JORNINC-4JORPROCIV**

9<sup>ª</sup> Jornadas de Segurança aos Incêndios Urbanos  
4<sup>ª</sup> Jornadas de Proteção Civil

Coimbra, 7 de novembro de 2025

[10] Pedro Dias Simão, João Paulo C. Rodrigues, Direct evaluation of fire resistance for restrained steel columns in frames using consistent rigid-plastic models and energy formulations, *Engineering Structures*, Volume 276, 2023, 115344, ISSN 0141-0296, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.115344>.



## RUMO À RESILIÊNCIA INTEGRADA: A REORGANIZAÇÃO DA GESTÃO DE EMERGÊNCIAS EM PETRÓPOLIS (RJ), BRASIL, PÓS-TRAGÉDIA DE 2022



**Vanessa Corrêa**  
Mestranda MCSI  
ISEC-IPC - Coimbra  
Portugal



**António Correia**  
Prof. Coordenador  
ISEC-IPC, SUSCITA  
Portugal



**Susana Meneses**  
Professor Adjunto  
ISEC-IPC, SUSCITA  
Portugal

**Keywords:** Gestão de risco, Desastres Naturais, Inundações, Resiliência urbana, Participação comunitária, Sistema de alerta e alarme, Governança de risco.

### 1. INTRODUÇÃO

O município de Petrópolis, localizado na Região Serrana do Estado do Rio de Janeiro apresenta características geográficas marcadas por relevo acentuado e declividades expressivas, o que o torna historicamente suscetível a desastres de natureza hidrológica e geológica. O evento ocorrido em 15 de fevereiro de 2022 evidenciou a magnitude dos desafios enfrentados em situações de precipitação extrema, reforçando a necessidade de aprimoramento contínuo dos sistemas de prevenção, resposta e recuperação [1].

O objetivo deste artigo é analisar o processo de reestruturação da Defesa Civil de Petrópolis após o referido evento. O foco recai sobre dois eixos interligados da nova organização de emergências: a inteligência tecnológica e de comando, centralizada no CIMOP (Centro Integrado de Monitoramento de Petrópolis), e o fortalecimento comunitário, conduzido pelo NUDEC 2.0 (Núcleo Comunitário de Defesa Civil). Ambos os pilares encontram-se alinhados com as diretrizes internacionais do programa MCR2030 (*Making Cities Resilient 2030*), da Organização das Nações Unidas [2].



Figura 1 – Trabalhos no local do deslizamento no Morro da Oficina, em Petrópolis (RJ) – Foto: Marcos Serra Lima/g1



Figura 2 – Rio no centro de Petrópolis que transbordou, arrastando veículos [1]

O **CIMOP (Centro Integrado de Monitoramento e Operações)** é um órgão que reúne diferentes serviços públicos, como Defesa Civil, Bombeiros, Polícia e Trânsito, para monitorizar, prevenir e responder rapidamente a emergências. Ele utiliza câmaras, sensores e dados em tempo real para identificar riscos, emitir alertas e coordenar ações. Sua importância está em reduzir o tempo de resposta em tragédias e atuar na prevenção, garantindo mais segurança e eficiência no atendimento à população.



Figura 3 – Apresentação do CIMOP

## 2. O CENÁRIO PÓS-TRAGÉDIA: CRISE E RESPOSTA INICIAL

### 2.1 O desastre e o comparativo de ocorrências

Em 15 de fevereiro de 2022, Petrópolis foi impactada pela passagem de uma frente fria e fortes instabilidades atmosféricas, resultando em um acumulado pluviométrico de 259,8 mm em apenas quatro horas (entre 15h20 e 19h20). O Rio Quitandinha atingiu a cota máxima de 5,01 metros, ocasionando múltiplos deslizamentos e inundações em diversas regiões do município [1].

A dimensão do evento é destacada pelo volume de ocorrências registradas:

Comparativo Crítico de Ocorrências: O número de 12.500 ocorrências registadas apenas no período de Janeiro a Maio de 2022 foi equivalente ao total de ocorrências acumulado em toda a década anterior, entre 2011 e 2021.[1].

Este facto demonstra o carácter excepcional do episódio e a necessidade de aprimorar os instrumentos de monitoramento e resposta, dada a escalada e magnitude dos eventos.

O gráfico apresenta a comparação entre a média mensal de precipitação em Petrópolis e o acumulado registado no dia 15 de fevereiro de 2022. Verifica-se que, enquanto a média mensal de fevereiro ronda os 200 mm, nesse dia choveu cerca de 259,8 mm em apenas quatro horas, um valor superior à média de todo o mês. Este episódio de chuva extrema foi um dos principais fatores que contribuíram para os graves deslizamentos de terras e inundações ocorridos na cidade, evidenciando a importância da monitorização meteorológica e dos sistemas de alerta precoce, como os coordenados por organismos de proteção civil e centros integrados de operações (como o CIMOP), para prevenir tragédias e garantir uma resposta rápida em situações de emergência.

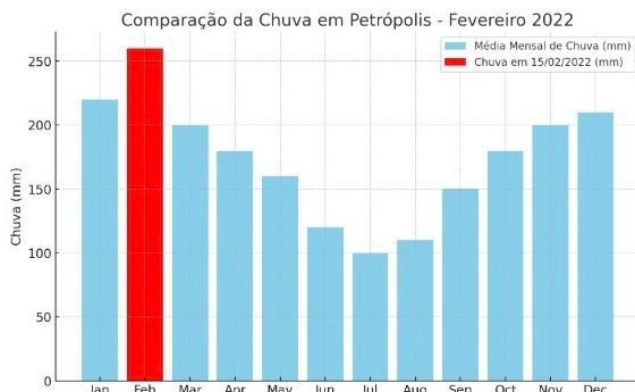


Figura 4 – Gráfico comparativo da chuva média em Petrópolis com o acúmulo de 259,8mm em 4 horas no dia 15 de fevereiro de 2022

O gráfico seguinte mostra a anormalidade de ocorrências que se verificaram no período de 5 meses em 2022, da mesma ordem de grandeza do ocorrido na década de 2011 a 2021.

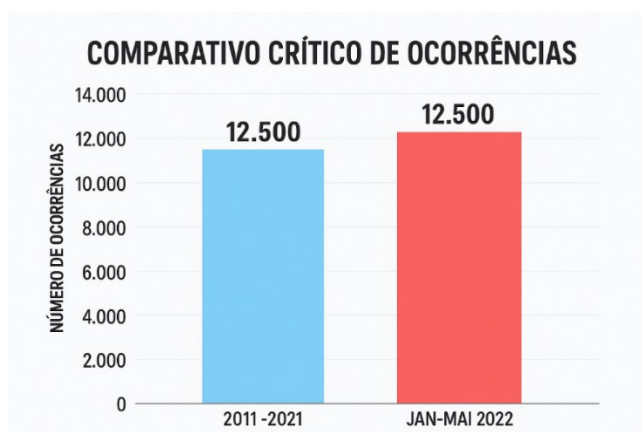


Figura 5 – Gráfico comparativo de ocorrências

## 2.2. O Protocolo de Crise e as Agências Integradas

Apesar de ter sido emitido um Alerta SMS às 15h23 e do acionamento do Protocolo de Mobilização do SAA (Sistema de Alerta e Alarme) às 16h42, a velocidade da catástrofe superou a capacidade de resposta [1].

Em resposta ao Estado de Calamidade decretado, o Gabinete de Crise foi estabelecido no CENIP (Centro de Inteligência e Operações). Este coordenou 15 frentes de Ações Operacionais, com o objetivo de coordenar e integrar as ações de resposta e reconstrução na cidade. Este gabinete reuniu diversos órgãos municipais, estaduais e federais, além de forças de segurança, Defesa Civil, Corpo de Bombeiros, Exército, voluntários e entidades humanitárias [3].

O Gabinete de Crise atuou de forma integrada, permitindo uma resposta mais rápida e organizada às necessidades da população afetada.



Figura 6 – Imagem ilustrativa do Gabinete de Crise do CENIP em Petrópolis

Entre as ações estratégicas realizadas destacaram-se o atendimento às vítimas, a vistoria de imóveis, a desobstrução de vias e o restabelecimento do abastecimento de água e eletricidade. As equipas também asseguraram a instalação de abrigos temporários para famílias desalojadas, a distribuição de donativos (alimentos, água e roupas), bem como o apoio médico e psicológico às pessoas afetadas.

A mobilização envolveu diversas agências integradas, incluindo o Corpo de Bombeiros Militar (CBMERJ), o Exército Brasileiro (32º Batalhão de Infantaria Leve), a Polícia Civil, o Serviço Geológico do Brasil (CPRM) e as concessionárias locais responsáveis pelos serviços essenciais. Estas entidades atuaram de forma conjunta nas operações de resgate e salvamento, limpeza das áreas atingidas, monitorização de encostas e avaliação de riscos para prevenir novos deslizamentos [3].

O restabelecimento gradual dos serviços públicos e o planeamento de ações preventivas foram igualmente prioridades do Gabinete, reforçando o compromisso com a segurança e o bem-estar da população.

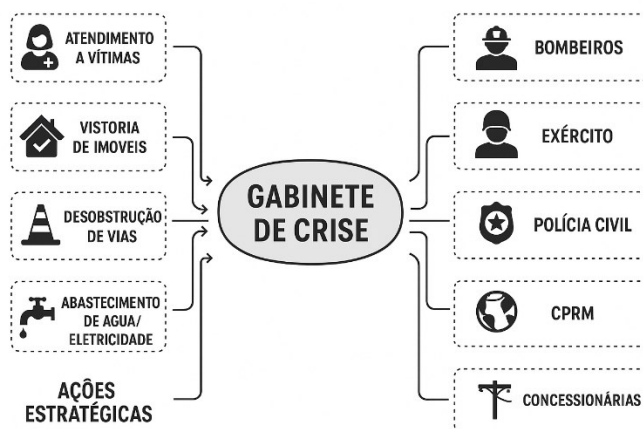


Figura 7 – Imagem ilustrativa das Ações Estratégicas

Além das ações estratégicas mencionadas, demonstrou-se crucial a implementação de mais uma medida essencial de suporte estrutural, focada na vertente económica das famílias atingidas: o Saque Calamidade do Fundo de Garantia por Tempo de Serviço (FGTS).

Esta iniciativa, articulada entre a municipalidade de Petrópolis e a Caixa Económica Federal, representou um passo fundamental para injetar liquidez imediata nas mãos de trabalhadores que viram as suas habitações e bens serem destruídos ou gravemente danificados.



A principal função desta medida foi permitir que os trabalhadores residentes nas zonas atingidas pudessem aceder aos seus próprios recursos de poupança forçada (o FGTS) para fazer face à emergência [4].

O processo foi criteriosamente balizado pela identificação e registo de áreas e habitações danificadas, através de laudos da Defesa Civil Municipal de Petrópolis. Só as famílias cujas residências foram comprovadamente afectadas puderam ser enquadradas para a solicitação do benefício [5].

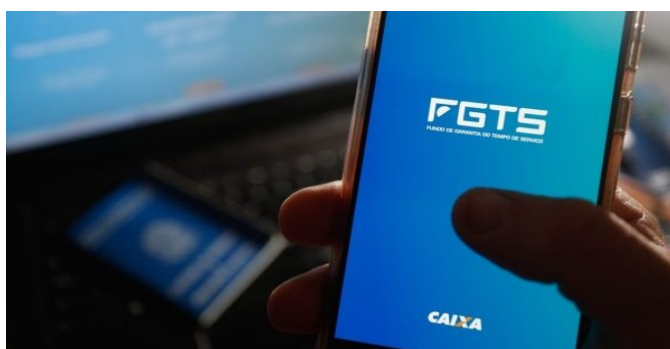


Figura 8 – Imagem ilustrativa do aplicativo FGTS

### 2.3. Gestão de Ocorrências e Laudos

Para fazer face ao aumento drástico de pedidos de apoio que gerou 5.868 vistorias realizadas em apenas dois meses, foram adotadas Medidas Emergenciais:

A criação do Posto Avançado para descentralizar e agilizar a abertura de Relatórios de Ocorrência (R.O.) e o encaminhamento de Laudos e Interdições (com 175 interdições registadas entre Julho e Setembro de 2022), providenciando suporte técnico e social no local, garantindo maior eficiência técnica e suporte social nas áreas afetadas [1].

## 3. O EIXO TECNOLÓGICO: O CIMOP (CENTRO INTEGRADO DE MONITORAMENTO DE PETRÓPOLIS)

O CIMOP é o pilar tecnológico que confere a Petrópolis o estatuto de "Cidade Inteligente" em termos de segurança e gestão de risco [2]. A sua importância e automação foram profundamente elevadas após 2022, alinhando-se com o Essencial 9 (Preparação e Resposta Efetiva) do MCR2030 [6].

Além disso, a estrutura de inteligência do CIMOP, contava com ferramentas tecnológicas para o acompanhamento do impacto da chuva na cidade, que contribuíam para o planeamento de ações operacionais de prevenção e resposta rápida, como Estações geotécnicas que mostravam o impacto da infiltração ao solo, assim como ferramentas que mostravam localidades com acumulado de chuva, Rede de Pluviômetros e Linímetros (para medição de níveis dos rios) e as Câmeras de Monitoramento distribuídas em pontos estratégicos da cidade.[7]





Figura 9 - Sistema instalado no Centro Integrado de Monitoramento e Operações de Petrópolis (CIMOP)

Avanços na Automação (Solução Inovadora): O CIMOP é o responsável pela automação do acionamento de alertas (SMS e Sirenes).

Uma solução inovadora foi a instalação de Cancelas Automáticas em corredores de alagamento (e.g., Rio Quitandinha), que são acionadas com base em protocolos pluviométricos críticos definidos, garantindo a interdição da via antes da inundação catastrófica, reduzindo riscos de acidentes. O sistema integra o protocolo municipal de resposta a inundações e foi instalado devido a frequência devido a alagamentos da região. [8].



Cancelas automáticas em teste visam impedir a passagem de veículos em áreas inundadas na rua Coronel Veiga, em Petrópolis — Foto: Carlos Miranda/g1

Figura 10 – Foto da Inter TV Região Serrana das Cancelas automáticas de Petrópolis.

O CIMOP atua como um centro de comando e controlo centralizado, reunindo e analisando informações provenientes de diversas fontes para apoiar a tomada de decisão do Gabinete de Crise. Esta integração de dados permite uma visão abrangente e atualizada das condições do município, facilitando respostas rápidas e coordenadas em situações de emergência.

A sua operação contribui diretamente para o Essencial 2 – “Conhecer e Usar os Riscos”, da estrutura MCR2030 (Making Cities Resilient 2030), ao fortalecer a gestão do conhecimento sobre riscos e vulnerabilidades urbanas, promovendo uma atuação mais preventiva, informada e eficaz na redução de desastres [2].



Figura 11 – Imagem ilustrativa das Agências Integradas



#### **4. O EIXO COMUNITÁRIO: O NUDEC 2.0 E AS SOLUÇÕES INOVADORAS**

O Núcleo Comunitário de Defesa Civil (NUDEC) foi revitalizado em Petrópolis sob o conceito de NUDEC 2.0, configurando-se como uma política pública transversal formalizada pela Lei Municipal n.º 8.544, de 26 de abril de 2023, e regulamentada pelo Decreto Municipal de 24 de fevereiro de 2023. Esta atualização representa uma nova fase de fortalecimento e modernização dos núcleos comunitários, ampliando a integração entre o poder público e as comunidades locais [9].

O programa atua como braço multiplicador da organização de emergência municipal, promovendo a participação social e o empoderamento comunitário. A sua implementação reforça o Essencial 7 (Capacidade Social) da estrutura MCR2030 (*Making Cities Resilient 2030*), ao fomentar comunidades mais conscientes, organizadas e preparadas para agir em situações de risco [2].

##### **4.1 Política Transversal e Desenvolvimento Comunitário**

Mais do que uma ferramenta de prevenção, o NUDEC 2.0 também incentiva o desenvolvimento económico e social das comunidades, por meio de projetos de capacitação profissional e empreendedorismo, como a Oficina de Empreendedorismo GARDE e a Central de Cursos FIRJAN. Estas iniciativas visam gerar emprego e rendimento, aumentando a resiliência social e económica das populações em áreas de risco [10].

##### **4.2 Solução Inovadora – Ação de Alerta Alternativa (S3AltEC)**

Entre as inovações implementadas, destaca-se o S3AltEC (Sistema de Alerta e Alarme Alternativo para Escorregamento em Comunidades). Este sistema não digital e de baixo custo utiliza assobios, cornetas e chifres de ar como forma de alerta rápido e localizado em situações de emergência, sobretudo em locais onde os meios eletrónicos não chegam ou são ineficazes. O método complementa os alertas oficiais, permitindo uma mobilização imediata para evacuação e salvando vidas [10].

##### **4.3 Rede de Monitores da Chuva**

O programa também inclui a formação de moradores como Monitores da Chuva, capacitados para operar pluviómetros caseiros e transmitir dados locais ao Centro Integrado de Monitoramento e Operações de Petrópolis (CIMOP). Estes monitores constituem um elo essencial entre a informação técnica e a ação comunitária, garantindo que os alertas se traduzam em respostas efetivas, reforçando a cultura de autoproteção e cooperação local [7].

Em síntese, o NUDEC 2.0 representa uma evolução na política de gestão comunitária do risco, consolidando a parceria entre o Estado e a sociedade civil. A sua atuação integrada com o CIMOP e com as políticas de resiliência urbana torna Petrópolis um referencial nacional em gestão participativa de desastres e fortalecimento social frente às mudanças climáticas [10].

#### **5. CONCLUSÕES: RUMO AO MCR2030**

A reestruturação da Proteção Civil de Petrópolis, catalisada pela dolorosa experiência da tragédia de 2022, marcou um avanço notável na integração de capacidades. O evento, que demonstrou a vulnerabilidade estrutural e social do município face a eventos climáticos extremos, não só evidenciou a necessidade de mudança, mas também serviu como um ponto de viragem para a construção de uma nova abordagem de prevenção e resposta.

É imperativo, no entanto, contextualizar as lições aprendidas para sustentar esta evolução. O episódio revelou a necessidade crítica de aprimorar a comunicação de alertas, investir em infraestrutura adequada em áreas de risco e fortalecer a coordenação interinstitucional e o planeamento urbano. Estas fragilidades, agora melhor compreendidas, reforçaram o compromisso com a integração de dados em tempo real (CIMOP) e o fortalecimento das redes comunitárias (como o NUDEC 2.0).



Aprendendo com estes desafios, Petrópolis investiu concretamente em tecnologia preditiva, expansão do sistema de sirenes e cancelas eletrônicas no Rio Quitandinha, e na capacitação das comunidades. Este esforço estrutural foi complementado pela regulamentação do Fundo Municipal de Proteção e Defesa Civil (FUMPDEC), através da Lei Municipal n.º 8.431, de 10 de outubro de 2022. O FUMPDEC assegura a captação e aplicação de recursos financeiros para desenvolver projetos, bem como garantir a execução de ações preventivas, de socorro e de assistência emergencial às populações atingidas por desastres [11,12].

Assim, ao transformar as dificuldades históricas em vetores de inovação e governação, Petrópolis demonstra uma capacidade ativa de aprender, adaptar e evoluir. O alinhamento do município às metas do MCR2030 reflete este novo caminho, onde a resiliência urbana é construída ativamente através da prevenção tecnológica, social e financeira integrada, consolidando a proteção de vidas humanas como prioridade máxima.

## 6. REFERÊNCIAS

- [1] **Relatório - Eventos chuvosos de 15 de fevereiro de 2022**, Prefeitura de Petrópolis. <https://www.petropolis.rj.gov.br>
- [2] **UNDRR – Campanha MCR2030 (Making Cities Resilient 2030)**, <https://www.petropolis.rj.gov.br>
- [3] **Notícias do Gabinete de Crise ( Fevereiro/2022)**, <https://www.gov.br/mds>
- [4] **Governo Federal Reconhece Estado de Calamidade Pública Petrópolis, Ministério da Integração e do Desenvolvimento Regional, (Fevereiro 2022)**, <https://www.gov.br>
- [5] **FGTS Calamidade, Câmara Municipal de Petrópolis (Março 2022)** <https://www.petropolis.rj.leg.br>
- [6] **CIMOP – Estrutura de Gestão e Segurança, Prefeitura de Petrópolis (Setembro 2021)**. <https://www.petropolis.rj.gov.br>
- [7] **Sistema de Monitoramento CIMOP, Matéria O Dia (Janeiro 2021)**. <https://www.meiahora.com.br>
- [8] **Defesa Civil testa cancelas eletrônicas do corredor Ponte Fones/ Obelisco, Diário Oficial, Prefeitura de Petrópolis (Julho 2023)**, <https://www.petropolis.rj.gov.br>
- [9] **Lei Municipal nº8544, Institui Núcleo Comunitário de Defesa Civil, Câmara Municipal de Petrópolis (Abril 2023)**. <https://sapl.petropolis.rj.leg.br>
- [10] **Governo Municipal mobiliza lideranças comunitárias para conhecer necessidades locais, Prefeitura de Petrópolis (Fevereiro 2022)**, <https://www.petropolis.rj.gov.br>
- [11] **LEI N.º 8.431 DE 10 DE OUTUBRO DE 2022, Regulamenta o fundo municipal de proteção e defesa civil- fumpdec- no âmbito do município de petrópolis e dá outras providências, Câmara Municipal de Petrópolis (Outubro 2022)**. <https://sapl.petropolis.rj.leg.br>
- [12] **Criados o conselho e o fundo municipais de Defesa Civil para reforço da prevenção, Prefeitura de Petrópolis (Outubro 2022)**. <https://www.petropolis.rj.gov.br>



**9JORNINC-4JORPROCIV**

9<sup>ª</sup> Jornadas de Segurança aos Incêndios Urbanos  
4<sup>ª</sup> Jornadas de Proteção Civil

Coimbra, 7 de novembro de 2025



## SISTEMA PARA DETEÇÃO DE INCÊNDIO EM EDÍFÍCIOS UTILIZANDO INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL



**Rúben Santo**  
Finalista Mestrado  
Eng. Computacional  
DFIS, Universidade  
de Aveiro



**Carlos Couto** <sup>†††</sup>  
Investigador Auxiliar  
CERIS, DECIVIL,  
Universidade de  
Aveiro

### SUMÁRIO

O presente artigo apresenta o desenvolvimento e a implementação de um sistema de deteção precoce de incêndio, FireView, em dois passos, baseado em redes neuronais convolucionais e otimizado para execução num computador de baixo custo (edge computing). A solução proposta explora modelos da série YOLO e o RT-DETR, combinando um modelo leve para monitorização contínua e outro de maior precisão para confirmação de eventos, garantindo um equilíbrio entre velocidade, consumo energético e fiabilidade. A metodologia desenvolvida neste trabalho inclui a criação de um conjunto de dados próprio, o FireSmokeDS, e a avaliação de desempenho em ambiente real com o Raspberry Pi 5. Os resultados demonstram a viabilidade da abordagem, com tempos médios de resposta inferiores a 2,5 segundos e valores de mAP superiores a 0,52, evidenciando o potencial desta solução para aplicações de segurança contra incêndios, promovendo edifícios mais inteligentes com monitorização autónoma de ambientes internos.

**PALAVRAS-CHAVE:** Deteção de incêndios; Redes neuronais convolucionais; YOLO; Edge computing; FireView.

### 1. INTRODUÇÃO

A ocorrência de incêndios no interior dos edifícios constitui, globalmente, uma das principais ameaças à segurança dos indivíduos e é a ação acidental mais frequente que conduz à destruição parcial ou total do património edificado (Center of Fire Statistics, 2024). Para além da perda direta de vidas e da destruição das infraestruturas, os incêndios provocam interrupções em serviços essenciais e acarretam elevados custos de reconstrução e descontaminação. Por outro lado, as estatísticas recentes indicam que, em países como o Reino Unido, mais de 40% das ocorrências que acionam os serviços de emergência correspondem a falsos alarmes (Ministry of Housing, Communities & Local Government, 2025), sobrecarregando os sistemas de resposta das equipas de emergência e reduzindo a eficiência na utilização dos recursos públicos.

Os sistemas tradicionais de deteção de incêndio são baseados em sensores de temperatura, sensores de fumo ou de infravermelhos, e são amplamente utilizados em edifícios residenciais, industriais e comerciais. Contudo, essas soluções apresentam uma relativa baixa precisão em ambientes compartimentados, uma vez que dependem da forma como fisicamente ocorre a propagação do fumo ou do calor e, frequentemente, dão origem a falsos alarmes (falsos positivos) causados por exemplo por vapor ou mudanças térmicas abruptas.

Mais recentemente, com o progresso associado às tecnologias de visão por computador (computer vision) e de aprendizagem automática profunda (*deep learning*), especialmente recorrendo a redes neuronais

<sup>†††</sup> CERIS, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Aveiro, Campus Universitário de Santiago, 3810-193, Aveiro, Portugal; email: ccouto@ua.pt <http://www.ua.pt/decivil>



convolucionais (*Convolutional Neural Networks*, CNNs), o paradigma da deteção de incêndios tem vindo a ser transformado. Ao contrário dos sensores convencionais, os sistemas baseados em visão por computador permitem a deteção direta do fenómeno visual, nomeadamente a chama e o fumo, com tempos de resposta mais curtos e uma cobertura espacial maior, e menos propensa ao surgimento de falsos positivos.

Neste contexto, este trabalho apresenta o desenvolvimento do protótipo FireView resultante do projeto SAFERFire parcialmente financiado pela AlticeLabs@UA. O FireView é um sistema modular com um algoritmo a dois passos para deteção de incêndio projetado para ser executado em computadores de baixo-custo, designados como *edge devices*, como o Raspberry Pi 5, priorizando um baixo consumo energético, o funcionamento em tempo real e a elevada fiabilidade. O sistema propõe uma arquitetura híbrida: um modelo leve realiza a monitorização contínua, enquanto um modelo mais preciso é ativado condicionalmente para confirmar a deteção, resultando assim numa solução inovadora e com elevado potencial para reduzir o impacto causado por incêndios em edifícios.

## 2. BREVE REVISÃO DA LITERATURA

As primeiras abordagens de deteção de fogo utilizando imagens focaram-se na análise de cores e de movimento. Ko et al. (2009) exploraram a deteção de pixels cujas cores estão na gama típica de coloração associada à chama, fazendo um mapeamento da luminância e utilizando modelos de classificação baseados em support vector machines (SVM). Da mesma forma, Truong et al. (2012) introduziram uma abordagem em várias etapas que combina deteção de movimento, agrupamento fuzzy c-means, características tempo-espaciais e classificação SVM para detetar eficazmente chamas com baixos níveis de falsos alarmes.

Com o avanço das CNNs, surgiram modelos capazes de extrair padrões visuais complexos de fogo e fumo. Muhammad et al. (2018) desenvolveram um sistema baseado em CNNs para câmaras de vigilância, enquanto Yar et al. (2023) introduziram mecanismos de atenção e convoluções 3D para lidar com condições meteorológicas adversas em ambientes exteriores, como a presença de chuva ou nebulosidade. Para cenários de incêndio no interior dos edifícios, Pincott et al. (2022) demonstraram a viabilidade de usar algoritmos como o Faster R-CNN InceptionV2 e SSD MobileNetV2. A sua estrutura foi treinada com apenas 480 imagens anotadas, atingindo boa precisão em alguns ambientes, mas notando a presença ainda elevada de falsos positivos.

Mais recentemente, diversos trabalhos têm-se concentrado em otimizar a eficiência dos modelos YOLO (*You Only Look Once*) proposto inicialmente por Redmon et al. (2016). Wang et al. (2025), introduziram o FireSmoke-YOLO, que aprimora a estrutura YOLO por meio de inovações como Funnel Space Pyramid Pooling Fast (FSPPF), uma camada de deteção de pequenos objetos, e Dynamic Snake Convolutions (DSC), levando a uma maior precisão, mantendo um tamanho de modelo mais reduzido. Akhmedov et al. (2024) desenvolveram um modelo de deteção de incêndios em navios baseado no YOLO-v10, integrado com um algoritmo de remoção de neblina para superar os desafios de visibilidade em ambientes marítimos. Além das CNNs, arquiteturas baseadas em *Transformers* também foram exploradas para sistemas de deteção de fogo. Ai et al. (2024) propuseram uma abordagem colaborativa de deteção de incêndios com múltiplas tecnologias para compartimentos de carga de aviões usando um modelo *Transformer*. Na mesma linha, Jiang et al. (2022) introduziram o SAN-SD, uma rede *self-attention* que combina CNNs com atenção baseada em *Transformers* e fusão de recursos, adaptada, por exemplo, para a deteção precisa de fumo em cenários como queimadas, reduzindo com sucesso o número de falsos positivos e mantendo uma alta eficiência de deteção. Através de uma abordagem diferente, Joshi et al. (2025) utilizaram técnicas de segmentação de incêndios, introduzindo o SAM2Segment, que combina anotações de caixas que delimitam as classes de fogo, com modelos mais simples para gerar máscaras de segmentação. O método proposto por estes autores melhora significativamente a deteção de incêndios em ambientes industriais, reduzindo o esforço manual de anotação e superando os sistemas tradicionais de deteção em conjuntos de dados proprietários e públicos.

Estão disponíveis na literatura trabalhos abrangentes que sintetizam o progresso neste campo. Khan et al. (2025) analisaram sistemas de deteção de incêndios baseados em IA em contextos interior e no exterior, comparando abordagens tradicionais, híbridas e de aprendizagem profunda (*deep learning*), ao mesmo tempo que identificaram desafios persistentes, como variabilidade ambiental, restrições em tempo real e limitação de conjuntos de dados. Geetha et al. (2021) fornecem uma revisão extensa de diferentes CNNs aplicadas à deteção de incêndios, incluindo *Dual Channel CNN*, *Dark Channel CNN*, *Spatio-Temporal CNN*, *Deep Multi-Scale CNN*, *Faster R-CNN*, *Recurrent Neural Networks (RNNs)*, CNNs profundas, CNNs básicas e *Deep Saliency Networks*. Em Santo (2025), pode ser encontrada uma revisão dos trabalhos mais importantes que se focam em arquiteturas desenvolvidas para execução em dispositivos de baixo custo, também designados por equipamentos de ponta (*edge devices*) particularmente computadores de placa única (*single board computers*, SBCs). São exemplos o LUFFD-YOLO que utiliza GhostNetV2 e a fusão de



múltiplos níveis de características; o SSE-YOLO que introduz módulos SimAM e um “slim-neck” para reduzir parâmetros; e o ESWD-YOLOv8n integra o mecanismo de perda Wise-IoU v3 e blocos residuais otimizados.

Embora os avanços atingidos nestes trabalhos tenham resultado em modelos rápidos e leves, a maioria das aplicações destinam-se a ambientes exteriores como florestas e áreas industriais abertas. Identificando-se uma lacuna na bibliografia uma vez que existem poucos estudos dedicados à integração destes modelos para computadores de baixo-custo (*single board computers*) que obrigam a uma baixa latência.

### 3. Metodologia

#### 3.1 Protótipo FireView e abordagem a dois passos

Dadas as limitações dos cenários de implementação no mundo real, o *single board computer* Raspberry Pi 5 (RPi5) foi selecionado como o suporte hardware para este protótipo. Equipado com um processador ARM Cortex-A76 de quatro núcleos a CPU@2.4 GHz e com 8 GB de memória SDRAM, este dispositivo foi escolhido devido ao seu equilíbrio entre custo-benefício, eficiência energética e poder de computação. Por outro lado, a acessibilidade e escalabilidade, do RPi5 tornam-no uma escolha viável para implementação em grande escala em sistemas de monitorização de incêndios, particularmente em ambientes com recursos limitados, e permitem uma maior integração com sensores adicionais, tais como detetores de temperatura e fumo, para melhorar a precisão da deteção de incêndios e reduzir a ocorrência de falsos positivos. Além disso, o sistema será alargado para incorporar notificações de alerta em tempo real para incidentes, permitindo, por exemplo, ativar de imediato equipas de bombeiros, e conduzir a uma melhoria significativa nos tempos de resposta. O protótipo FireView está ilustrado na Figura 1.

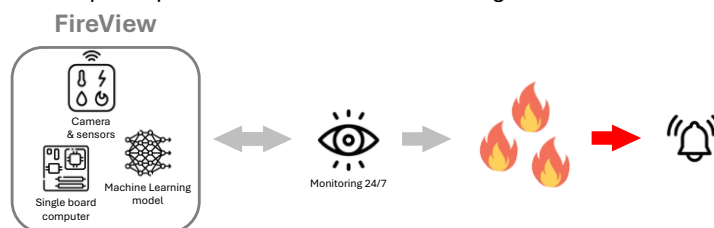


Figura 1: Vista esquemática do protótipo FireView.

O sistema utilizado para detetar incêndio é um modelo de aprendizagem automática (*machine learning*) que está estruturado com dois passos complementares, como se ilustra na Figura 2.

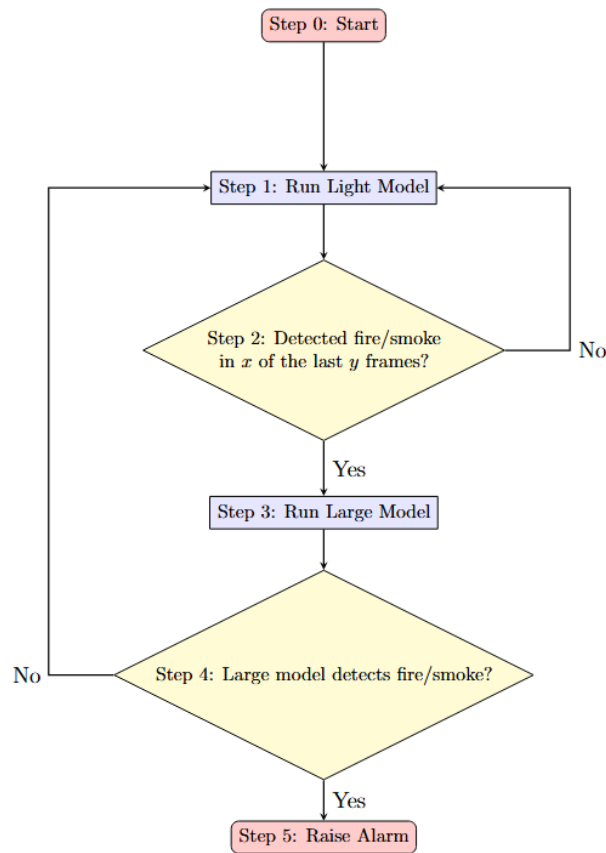


Figura 2: Sistema de deteção de incêndio a dois passos.

No primeiro passo, um modelo leve da família YOLO (YOLOv8n) executa continuamente a inferência sobre os *frames* recebidos da câmara instalada no RPi5. O objetivo é garantir uma monitorização eficiente em tempo real com mínimo esforço computacional. Quando o modelo identifica chama ou fumo num número pré-definido de *frames* consecutivos, o sistema ativa o segundo passo, no qual um modelo de maior precisão (YOLOv12m) processa as regiões suspeitas para confirmação do evento. Com esta estratégia condicional, a velocidade e precisão são equilibradas, existindo um compromisso entre o modelo leve, que assegura um tempo de resposta rápido, e o modelo mais pesado que valida o alarme, evitando falsos positivos e garantindo uma precisão mais elevada do sistema.

### 3.2 Conjunto de dados e *data augmentation*

O conjunto de dados utilizado neste trabalho, designado por FireSmokeDS, foi construído recorrendo a diferentes fontes públicas, nomeadamente os conjuntos D-Fire, FASDD e WSDYOLO, e complementado com amostras capturadas manualmente pelos autores (Santo, 2025). O conjunto de dados final contém 152.678 imagens com duas classes para classificação, “fogo” e “fumo”, sendo que cada imagem pode conter apenas uma das classes, ambas as classes em simultâneo ou nenhuma. Adicionalmente, para corrigir o desequilíbrio entre o número classes e melhorar a generalização, aplicaram-se técnicas de sobreamostragem (oversampling) e de *data augmentation*, ou seja, técnica de aumento de dados (translação, rotação, reflexão). O Quadro 1 apresenta o resumo dos subconjuntos de treino e validação, neste quadro BBoxes refere-se às *bounding boxes*, que são as caixas que delimitam as regiões na imagem onde a classe é identificada, podendo uma mesma imagem conter várias regiões com cada classe.

Quadro 1: Conjuntos de treino e de validação

Conjunto de Dados	Divisão	Apenas Fogo	Apenas Fumo	Ambos	Nenhum	Total de Imagens	BBoxes de Fogo	BBoxes de Fumo
D-Fire	Treino	944	4681	3763	7833	17221	11814	9550



Conjunto de Dados	Divisão	Apenas Fogo	Apenas Fumo	Ambos	Nenhum	Total de Imagens	BBoxes de Fogo	BBoxes de Fumo
D-Fire	Valid.	220	1186	895	2005	4306	2878	2315
FASDD	Treino	9550	21414	19651	37199	87814	66700	50205
FASDD	Valid.	3000	2000	500	2000	7500	6597	2875
Selfmade	Treino	1124	277	330	56	1785	2227	703
Selfmade	Valid.	452	132	119	22	725	782	303
WSDYOLO	Treino	-	516	-	-	516	-	516
WSDYOLO	Valid.	-	147	-	-	147	-	147
FireSmokeDS	Treino	11618	26888	23744	45086	107336	80741	60974
FireSmokeDS	Valid.	3672	3465	1514	4027	12678	10257	5640
FireSmokeDS*	Treino	30000	30000	25000	55000	140000	117630	66033
FireSmokeDS*	Valid.	3672	3465	1514	4027	12678	10257	5640
FireSmokeDS**	Treino	30000	30000	25000	55000	140000	231229	217972
FireSmokeDS**	Valid.	3672	3465	1514	4027	12678	15484	14877

\* = Sobreamostragem

\*\* = Sobreamostragem + Técnica de aumento de dados

### 3.3 Arquitetura dos diferentes modelos

Foram avaliadas diferentes versões da família YOLO, desde a v8 até a v12, contemplando diferentes tamanhos para as arquiteturas (**n**ano, **s**mall, **m**edium, **l**arge e **e**xtra-large), que dizem respeito ao número de parâmetros de cada modelo contém. Cada versão da série YOLO introduz avanços específicos com o objetivo de equilibrar a precisão e o esforço computacional necessário, sendo detalhados esses progressos em Santo (2025).

Adicionalmente, foi também considerado o modelo RT-DETR (*Real-Time Detection Transformer*) como uma abordagem baseada em *Transformers*, ou seja, baseados fundamentalmente em mecanismos de atenção, distinguindo-se das arquiteturas anteriores que implementam redes convolucionais. As diferentes estratégias implementadas no RT-DETR têm como objectivo reduzir o tempo de inferência. Para mais detalhes, ver Santo (2025).

A consideração de diferentes modelos permitiu uma comparação abrangente entre modelos baseados em mecanismos de convolução e mecanismos de atenção, destacando as vantagens e limitações de cada abordagem para aplicação em dispositivos de baixo-custo.

### 3.4 Procedimento de Treino

O treino foi realizado num nó de computação do cluster HPC Navigator da Rede Nacional de Computação Avançada. Este cluster está equipado com placas gráficas NVIDIA Tesla V100 (16 GB) e processadores Intel Xeon Gold 6148. Utilizou-se o ambiente PyTorch 1.12.1, com aceleração CUDA 11.3.1.

Cada modelo foi configurado com um número suficientemente alto de *epochs* (10000) ativando-se a opção *early stopping* de 20 *epochs*, ou seja, se em 20 *epochs* consecutivos não existirem melhorias no desempenho do modelo no conjunto de validação, o treino é concluído. A melhoria no desempenho é definida através do critério de *fitness*, tendo por base a seguinte fórmula:

$$\text{fitness} = 0,1 \times mAP_{50} + 0,9 \times mAP_{50-95} \quad (1)$$

onde  $mAP_{50}$  e  $mAP_{50-95}$  são métricas definidas na secção seguinte. Note-se que a aplicação do *early stopping* reduziu o tempo total de treino de todos os modelos de 190 para 95 dias.

## 4. MÉTRICAS DE AVALIAÇÃO

A avaliação considerou métricas padrão de deteção de objetos nomeadamente a precisão, recall, F1-score,  $mAP_{50}$  e  $mAP_{50-95}$ .

Para a sua definição, é necessário definir primeiramente o conceito de Interseção sobre União (IoU). A IoU é calculada como a razão entre a área de interseção e a área de união entre a previsão e o *ground truth*, este último



está ligado às *bounding boxes* indicadas no Quadro 1. Tipicamente, uma deteção é considerada correta quando o  $IoU \geq 0,5$  mas este valor pode ser alterado consoante as necessidades da aplicação.

$$IoU = \frac{\text{Área Interseção}}{\text{Área União}} \quad (2)$$

Para avaliar o desempenho da deteção, são definidos os *True Positives* (TP), *False Positives* (FP) e *False Negatives* (FN). O número de *True Positives* corresponde ao número total de deteções corretas, isto é, quando o modelo identifica uma classe e esta coincide com a observação real. Os *False Positives* representam as deteções incorretas, casos em que o modelo prevê a existência de uma classe que na realidade não está presente na imagem. Por fim, os *False Negatives* (FN) correspondem às falhas de deteção, situações em que o objeto existe na imagem, mas o modelo não o deteta. Assim, a precisão, *recall* e F1-score são definidos como:

$$\begin{aligned} \text{Precisão} &= \frac{TP}{TP + FP} \\ \text{Recall} &= \frac{TP}{TP + FN} \\ \text{F1-score} &= \frac{\text{Precisão} \times \text{Recall}}{\text{Precisão} + \text{Recall}} \end{aligned} \quad (3)$$

O desempenho global dos modelos foi avaliado através do  $mAP_{50-95}$ , que corresponde à média da precisão (Average Precision) nos intervalos de IoU entre 0,50 e 0,95. Esta métrica indica tanto a capacidade de deteção do modelo como a correta localização da classe em avaliação.

## 5. RESULTADOS

O Quadro 2 apresenta o resumo dos resultados obtidos durante o treino dos modelos, no ambiente original utilizando PyTorch com treino em GPU, e a Figura 3 apresenta o resultado de  $mAP_{50-95}$  em função do número dos parâmetros de cada modelo.

Quadro 2: Resultados obtidos durante o treino dos modelos

Modelo	Precisão	Recall	F1-Score	$mAP_{50}$	$mAP_{50-95}$	Parâmetros
<b>RT-DETR-l</b>	<b>0.78270</b>	<b>0.67402</b>	<b>0.72431</b>	<b>0.74457</b>	<b>0.47466</b>	32,8M
RT-DETR-x	0.77909	0.66825	0.71943	0.73425	0.46696	67,3M
YOLOv12m	0.75721	0.62803	0.68660	0.71407	0.46688	20,1M
RT-DETR-R101	0.77690	0.65821	0.71265	0.73020	0.46340	61,8M
YOLOv11x	0.77038	0.61730	0.68540	0.70644	0.46207	56,9M
YOLOv11l	0.77127	0.61040	0.68147	0.70546	0.45993	25,3M
RT-DETR-R50	0.76878	0.64544	0.70173	0.72063	0.45726	42,8M
YOLOv9e	0.76442	0.62006	0.68471	0.69947	0.45727	58,1M
YOLOv12x	0.75998	0.61381	0.67912	0.69833	0.45173	59,1M
YOLOv11m	0.75351	0.60341	0.67016	0.69438	0.45116	20,0M
YOLOv12n	0.75686	0.59941	0.66900	0.69321	0.44718	2,6M
YOLOv12s	0.73038	0.60208	0.66005	0.68874	0.44570	9,3M
YOLOv10x	0.76687	0.59680	0.67123	0.68740	0.44401	31,7M
YOLOv8x	0.77624	0.61173	0.68424	0.68598	0.44355	68,2M
YOLOv11s	0.75997	0.58993	0.66424	0.68640	0.44332	9,4M
YOLOv8l	0.77029	0.60038	0.67480	0.67963	0.43777	43,6M
YOLOv8m	0.77083	0.60502	0.67793	0.67540	0.43062	25,9M
YOLOv10n	0.74644	0.57858	0.65188	0.65843	0.42160	2,7M
YOLOv8s	0.76012	0.60003	0.67065	0.66306	0.41804	11,1M
YOLOv11n	0.73188	0.57205	0.64217	0.65736	0.41355	2,6M
YOLOv12l	0.73436	0.57103	0.64248	0.65060	0.41210	26,4M
YOLOv9t	0.74664	0.58110	0.65355	0.65244	0.41178	2,0M



Modelo	Precisão	Recall	F1-Score	$mAP_{50}$	$mAP_{50-95}$	Parâmetros
YOLOv8n	0.74112	0.58078	0.65123	0.64387	0.40190	3,0M

Os resultados mostram que o modelo RT-DETR-l alcançou o melhor desempenho absoluto, com  $mAP_{50-95}$  igual a 0,4746, seguido de perto pelo YOLOv12m, que atingiu 0,4669. Apesar do bom desempenho, o modelo RT-DETR-l apresenta uma elevada complexidade estrutural, exigindo mais de 32 milhões de parâmetros, o que o torna impraticável para execução eficiente em dispositivos baixo custo com recursos computacionais e de memória limitados. Essa limitação reforça a necessidade de procurar um equilíbrio entre precisão e eficiência, dando prioridade a arquiteturas que mantenham bom desempenho sem comprometer a viabilidade de implantação em computadores de baixo consumo energético.

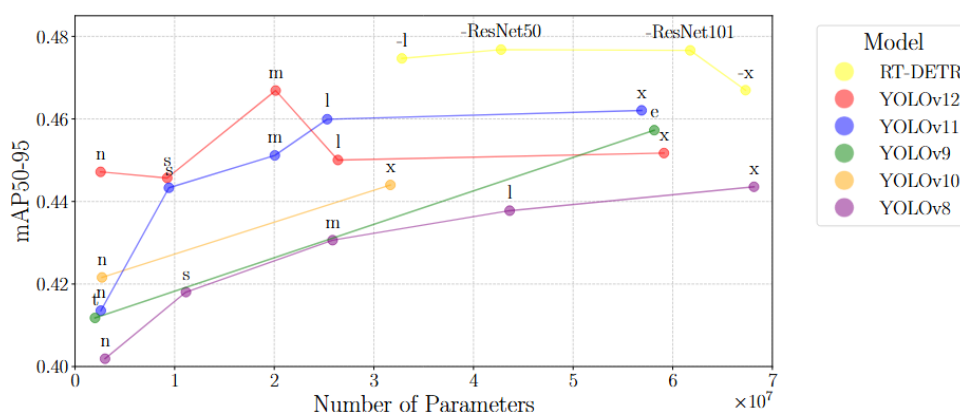


Figura 3: Resultado  $mAP_{50-95}$  em função do número de parâmetros nos modelos considerados.

Após o treino, todos os modelos foram convertidos para o formato ONNX (Open Neural Network Exchange) e reavaliados diretamente no Raspberry Pi 5, a fim de analisar o impacto da conversão sobre o desempenho e a velocidade de inferência, apresentando-se no Quadro 3 os resultados obtidos. De notar que a notação (↑) indica, por exemplo, que relativamente ao Quadro 2, o modelo em estudo subiu 4 posições.

Quadro 3: Resultados obtidos com os modelos em formato ONNX

Modelo	Precisão	Recall	$mAP_{50}$	$mAP_{50-95}$	Tempo de Inferência(ms)
<b>YOLOv12</b> <b>m (↑4)</b>	<b>0.79986</b>	<b>0.7144</b> <b>8</b>	<b>0.7869</b> <b>4</b>	<b>0.5264</b> <b>9</b>	1371.08403
YOLOv11x (↑4)	0.79359	0.6981 0	0.7778 5	0.5224 5	3043.26095
YOLOv11l (↑4)	0.79152	0.6993 7	0.7778 9	0.5208 0	1481.08136
YOLOv9e (↑4)	0.78216	0.6862 0	0.7693 2	0.5145 8	3362.70319
YOLOv11 m (↑5)	0.78244	0.6952 0	0.7720 4	0.5142 1	1194.15021
YOLOv12x (↑3)	0.79316	0.6918 6	0.7702 8	0.5100 0	3675.1585 6
YOLOv11s (↑9)	0.79168	0.6851 8	0.7677 5	0.5088 1	445.18261
YOLOv12s (↑5)	0.78880	0.6841 1	0.7664 5	0.5059 6	576.46669
YOLOv12l (↑2)	0.79460	0.6853 6	0.7660 0	0.5056 1	1910.58678



Modelo	Precisão	Recall	$mAP_{50}$	$mAP_{50-95}$	Tempo de Inferência(ms)
YOLOv12n (↑2)	0.78518	0.67956	0.76084	0.50176	245.40331
YOLOv10x (↑3)	0.78183	0.66598	0.75717	0.50180	2596.57105
YOLOv8x (↑3)	0.78158	0.68704	0.75748	0.49841	3252.56028
YOLOv8l (↑4)	0.77441	0.67739	0.75309	0.49361	2123.33823
YOLOv8m (↑4)	0.77451	0.66522	0.74415	0.48259	1078.38370
RT-DETR-R101 (↓14)	0.78071	0.68030	0.74918	0.47686	2833.18063
RT-DETR-R50 (↓14)	0.78902	0.68008	0.74736	0.47690	2077.93412
YOLOv10n (↑2)	0.76960	0.63731	0.72741	0.47855	192.63297
YOLOv11n (↑3)	0.76413	0.65479	0.73482	0.47643	204.46618
RT-DETR-l (↓16)	0.78288	0.67412	0.74470	0.47461	1707.82132
YOLOv8s (-)	0.76896	0.65730	0.73192	0.47057	468.78783
YOLOv9t (↑1)	0.76105	0.63816	0.72307	0.46989	197.68676
RT-DETR-x (↓18)	0.77967	0.66753	0.73410	0.46721	3144.16397
YOLOv8n (-)	0.75475	0.62295	0.70803	0.45037	<b>183.85543</b>

Como se pode constatar, esta avaliação revelou variações positivas (no caso dos modelos YOLO) ou nulas (no caso dos RT-DETR) nos valores de  $mAP$  e restantes métricas, indicando que a precisão dos modelos foi preservada, ao mesmo tempo em que se observaram melhorias expressivas no tempo de inferência, consequência direta da otimização de execução promovida pelo formato ONNX. Na Figura 4, apresentam-se os resultados no formato ONNX.

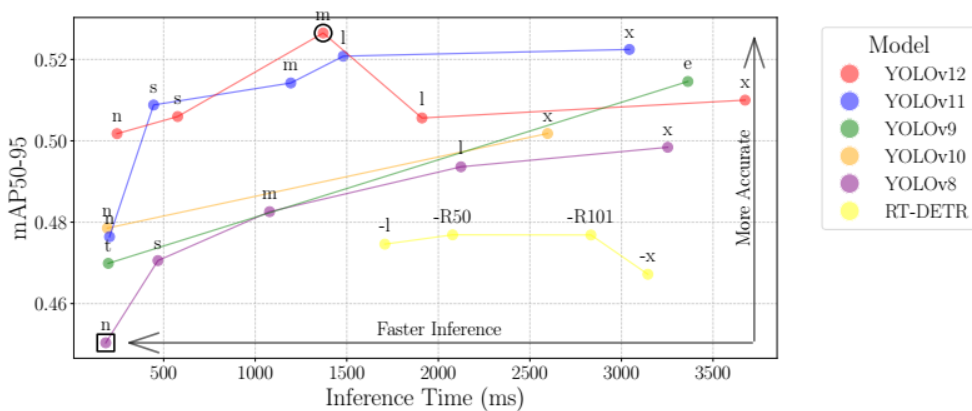


Figura 4: Resultado  $mAP_{50-95}$  em função do número de parâmetros nos modelos considerados considerando a conversão para o formato ONNX.



Considerando o formato ONNX, entre os modelos testados, o YOLOv8n destacou-se pela sua eficiência, apresentando um  $mAP_{50-95}$  de 0,4504 e tempo médio de 183,85 milissegundos por frame, o que o torna ideal para execução contínua em tempo real. Já o YOLOv12m, embora mais pesado, apresentou  $mAP_{50-95}$  de 0,5265 e tempo de 1371,08 milissegundos por frame, oferecendo desempenho superior em termos de precisão e recall. A combinação destes resultados levou à definição da arquitetura final do sistema: o YOLOv8n foi selecionado como o modelo leve responsável pela deteção contínua, enquanto o YOLOv12m foi adotado como o modelo de verificação, que confirma as ocorrências suspeitas identificadas pelo primeiro.

Na Figura 5, são apresentados exemplos de deteção de fogo e de deteção de fumo para dois casos diferentes. Em Santo (2025) são fornecidos mais exemplos.



Figura 5: Exemplos de deteção do sistema FireView.

## 6. SIMULAÇÃO EM TEMPO REAL E LATÊNCIA DO SISTEMA

Para avaliar o desempenho temporal foram considerados 12 vídeos de incêndios, maioritariamente, correspondendo ao interior de edifícios, reunidos pelos autores. Para medir a latência, foi simulada a leitura contínua de *frames*, ativando o modelo pesado quando o modelo leve detetava eventos em *frames* consecutivas. Esta simulação foi realizada no próprio protótipo FireView, ou seja, no RPi5. Assim, a latência total  $L_t$  foi calculada através da fórmula

$$L_t = \min(d_i) - \min(gt_j)$$

onde  $d_i$  representa o primeiro frame detectado e  $gt_j$  o primeiro frame anotado como ocorrência real, sendo os resultados, apresentados no Quadro 4.

Quadro 4: Resultados da simulação da latência no RPi5

Vídeo	Primeiro Frame (Sistema)	Primeiro Frame (Real)	Latência (nº de frames)	Latência (segundos)
1	91	1	90	3.00
2	36	1	35	1.17
3	34	1	33	1.10
4	298	116	182	6.07
5	758	643	115	3.83
6	168	77	91	3.03
7	191	158	33	1.10
8	98	55	43	1.43
9	132	1	131	4.37
10	58	2	56	1.87
11	44	23	21	0.70
12	39	7	32	1.07
<b>Média</b>			71.83	2.40



Os resultados demonstram uma latência média de 71,83 frames, equivalente a 2,40 segundos, considerando uma resolução para os vídeos de 30 FPS.

## 7. CONCLUSÕES

Neste trabalho apresentaram-se alguns detalhes relativos ao desenvolvimento do protótipo FireView que tem como finalidade ser uma solução de baixo custo para deteção de incêndio com base em modelos de visão por computador.

Em particular, foi proposta uma combinação de um modelo leve para deteção inicial e de um modelo mais pesado para confirmação revelou-se altamente eficaz na redução de falsos alarmes, mantendo simultaneamente o tempo de resposta dentro de limites aceitáveis. A utilização do formato ONNX demonstrou ser uma solução eficiente em termos de compatibilidade e desempenho no contexto da utilização de hardware de baixo-custo, em particular, computadores de placa única (*single board computers*). A arquitetura proposta é composta pelos modelos YOLOv8n e YOLOv12m, atingiu um equilíbrio consistente entre velocidade ( $\approx 183$  ms/frame) e precisão ( $mAP_{50-95} \approx 0,53$ ), com uma latência média de 2,4 segundos entre o início visual do incêndio e a emissão do alarme. Embora a latência média observada (2,4 segundos) possa ser superior à dos sensores físicos convencionais, esta é compensada pela deteção direta de sinais visuais, eliminando a dependência da propagação de fumo.

Os resultados obtidos demonstram o potencial do sistema para implementação edifícios, particularmente habitações, fábricas e edifícios públicos, reforçando a relevância da utilização de técnicas de visão por computador e de inteligência artificial na construção de cidades mais seguras e sustentáveis. Este trabalho está por isso alinhado com Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 11 (ODS 11) das Nações Unidas.

Como perspetivas futuras, propõe-se a integração do sistema com redes de Internet of Things (IoT, Internet das Coisas), a incorporação de sensores térmicos e de fumo no RPi5 que serão complementares ao modelo proposto, a implementação de um sistema de notificações e a possibilidade de alargar o sistema para a deteção de outro tipo de classes que façam sentido no interior de edifícios.

## AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi parcialmente financiado pelo projeto SAFERFire da AlticeLabs@UA e por fundos nacionais através da FCT - Fundação para a Ciência e a Tecnologia, I.P., no âmbito do Estímulo ao Emprego Científico - Concurso Institucional - CEECINST/00026/2018 atribuído ao segundo autor e do apoio da UCLCA, também financiado pela FCT I.P. no âmbito do projeto de Computação Avançada 2022.15930.CPCA.A1, plataforma Navigator. Os autores gostariam de expressar a sua sincera gratidão aos Professores Hélder Caixinha e Jorge Ferraz de Abreu, da AlticeLabs@UA, e a Fausto de Carvalho, da AlticeLabs, pelas suas inestimáveis contribuições para o aperfeiçoamento deste trabalho durante o desenvolvimento do projeto SAFERFire.

## REFERÊNCIAS

- Ai, H., Han, D., Wang, X., Liu, Q., Wang, Y., Li, M., & Zhu, P. (2024). Early fire detection technology based on improved transformers in aircraft cargo compartments. *Journal of Safety Science and Resilience*, 5(2), 194–203.
- Akhmedov, F., Nasimov, R., & Abdusalomov, A. (2024). Dehazing Algorithm Integration with YOLO-v10 for Ship Fire Detection. *Fire*, 7(9), 332. <https://doi.org/10.3390/fire7090332>
- Center of Fire Statistics. (2024). Word fire statistics. Report No 24. Center of Fire Statistics of CTIF.
- Geetha, S., Abhishek, C. S., & Akshayanat, C. S. (2021). Machine Vision Based Fire Detection Techniques: A Survey. *Fire Technology*, 57(2), 591–623. <https://doi.org/10.1007/s10694-020-01064-z>
- Jiang, M., Zhao, Y., Yu, F., Zhou, C., & Peng, T. (2022). A self-attention network for smoke detection. *Fire Safety Journal*, 129, 103547.
- Joshi, K., Li, X., Windisch, T., & König, M. (2025). From detection to segmentation: Combining foundation model with bounding boxes for efficient fire detection. *Neurocomputing*, 130513.
- Khan, R. A., Bajwa, U. I., Raza, R. H., & Anwar, M. W. (2025). Beyond boundaries: Advancements in fire and smoke detection for indoor and outdoor surveillance feeds. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 142, 109855.
- Ko, B. C., Cheong, K.-H., & Nam, J.-Y. (2009). Fire detection based on vision sensor and support vector machines. *Fire Safety Journal*, 44(3), 322–329. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2008.07.006>
- Ministry of Housing, Communities & Local Government. (2025). Fire and rescue incident statistics—England Table 0102.



- Muhammad, K., Ahmad, J., & Baik, S. W. (2018). Early fire detection using convolutional neural networks during surveillance for effective disaster management. *Neurocomputing*, 288, 30–42. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2017.04.083>
- Pincott, J., Tien, P. W., Wei, S., & Calautit, J. K. (2022). Indoor fire detection utilizing computer vision-based strategies. *Journal of Building Engineering*, 61, 105154. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.105154>
- Redmon, J., Divvala, Santosh, Girshick, Ross, & Farhadi, Ali. (2016). You only look once: Unified, real-time object detection. *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*.
- Rúben Santo. (2025). Development of a fire detection system based on machine learning and computer vision [Master's Thesis]. Universidade de Aveiro.
- Wang, S., Wu, M., Wei, X., Song, X., Wang, Q., Jiang, Y., Gao, J., Meng, L., Chen, Z., Zhang, Q., Zhang, Y., Liang, S., Wei, S., Liu, L., Yi, C., & Lv, J. (2025). An advanced multi-source data fusion method utilizing deep learning techniques for fire detection. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 142, 109902. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2024.109902>
- Xuan Truong, T., & Kim, J.-M. (2012). Fire flame detection in video sequences using multi-stage pattern recognition techniques. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 25(7), 1365–1372. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2012.05.007>
- Yar, H., Ullah, W., Ahmad Khan, Z., & Wook Baik, S. (2023). An Effective Attention-based CNN Model for Fire Detection in Adverse Weather Conditions. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 206, 335–346. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2023.10.019>



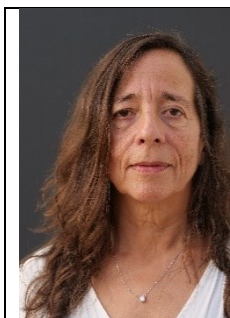
**9JORNINC-4JORPROCIV**

9<sup>ª</sup> Jornadas de Segurança aos Incêndios Urbanos  
4<sup>ª</sup> Jornadas de Proteção Civil

Coimbra, 7 de novembro de 2025



## MEDIDAS DE AUTOPROTEÇÃO - DO MODELO REGULAMENTAR À REALIDADE NO TERRENO

**Cidália Worm**###

Projetista SCIE  
ETU Fire Safety  
Consultants

**Paulo Prata Ramos**§§§§

Projetista SCIE  
ETU Fire Safety  
Consultants

### SUMÁRIO

A regulamentação de Segurança Contra Incêndios em Edifícios (SCIE) estabelece um conjunto de requisitos de meios passivos, instalações técnicas, meios ativos e medidas de autoproteção (MAPs), com vista a que os edifícios tenham boas condições de segurança. Todavia a implementação das MAPs é usualmente bastante ineficaz, levando à adoção de más práticas de prevenção no dia-a-dia, falta de manutenção dos equipamentos de SCIE, inoperacionalidade dos sistemas equipamento de SCIE e desconhecimento dos procedimentos de emergência.

**PALAVRAS-CHAVE:** SCIE; MAP; RT-SCIE; RJ-SCIE.

### 1. INTRODUÇÃO

O Decreto-Lei nº220/2008 de 12 de novembro, que publicou o Regime Jurídico de Segurança Contra Incêndios em Edifícios (RJ-SCIE), conjugadamente com a Portaria nº 1532/2008 de 29 de dezembro, que publicou o Regulamento Técnico de Segurança Contra Incêndios em Edifícios, constituem a espinha dorsal do quadro regulamentar da Segurança Contra Incêndios em Edifícios (SCIE). Este quadro regulamentar é norteado por três princípios gerais da segurança, que estão estabelecidos no RJ-SCIE:

- A salvaguarda da vida humana
- A proteção do património
- A preservação do meio ambiente

Para a prossecução destes objetivos o RJ-SCIE define os seguintes objetivos:

---

### [cidalia.worm@etu.pt](mailto:cidalia.worm@etu.pt)

§§§§ [paulo.ramos@etu.pt](mailto:paulo.ramos@etu.pt)



- Reduzir a probabilidade de ocorrência de incêndios
- Limitar o desenvolvimento de eventuais incêndios, circunscrevendo e minimizando os seus efeitos, nomeadamente a propagação do fumo e gases de combustão
- Facilitar a evacuação e o salvamento dos ocupantes em risco
- Permitir a intervenção eficaz e segura dos meios de socorro

Para alcançar estes objetivos a regulamentação estabelece medidas físicas, que são complementadas por medidas humanas.

## 2. ESTRUTURA DAS MEDIDAS DE SCIE E SUA IMPORTÂNCIA

A segurança contra incêndios, tal como é apresentada na regulamentação portuguesa, baseia-se em quatro grandes áreas:

- Medidas passivas
- Instalações técnicas
- Medidas ativas
- Medidas de autoproteção

As **medidas passivas** têm a ver com a construção propriamente dita, e compreendem por exemplo:

- Resistência ao fogo da estrutura do edifício, para que este não colapse em consequência de um incêndio
- Compartimentação corta-fogo, que confina um eventual foco de incêndio a um compartimento corta-fogo
- Reação ao fogo dos materiais de revestimento, decoração e mobiliário fixo, de forma a evitar que estes contribuam de forma significativa para o incêndio
- Existência de vias de evacuação em quantidade e largura suficiente para possibilitar uma evacuação rápida e segura do edifício

As disposições relativas às **instalações técnicas** estabelecem uma série de requisitos para que estas não constituam uma fonte de ignição e evitar que possam contribuir para a propagação de um incêndio. São disse exemplo:

- Necessidade de fontes de energia socorrida (UPS ou gerador) para alimentação dos sistemas de SCIE
- Obrigatoriedade de cortes de energia (eletricidade e gás)
- Disposições relativas a elevadores, nomeadamente destinados ao uso de bombeiros
- Evacuação de efluentes de combustão, seja de cozinha, seja de outros sistemas a combustão (centrais térmicas, geradores, motobombas, etc.)
- Condições de aquecimento, climatização e ventilação, incluindo disposições relativas a centrais térmicas
- Armazenamento e utilização de combustíveis, estabelecendo limites e condições técnicas

Já as **medidas ativas** têm a ver com os sistemas de segurança, como sendo:

- Marcos de água, que permitem aos bombeiros fazer a alimentação aos camiões;
- Sinalética de emergência, assinalando os caminhos de fuga e equipamentos de segurança
- Iluminação de emergência, que garante que, mesmo em situação de sinistro, sem alimentação elétrica, há um nível de luminosidade suficiente para garantir a evacuação do edifício
- Sistema de deteção, alarme e alerta de incêndios, para detetar um foco de incêndio na fase inicial, permitindo um combate precoce, que é muito mais eficaz, e ainda lançar o alarme para evacuação parcial ou total do edifício
- Sistema de controlo de fumo, que permite manter livre de fumo zonas específicas do edifício, garantindo a evacuação segura do edifício e controlando a propagação do incêndio
- Extintores portáteis, para conter de forma expedita um pequeno foco de incêndio
- Bocas-de-incêndio de 1<sup>a</sup> intervenção (carretéis), para que os ocupantes do edifício possam atacar focos de incêndios de maiores dimensões
- Sistemas de extinção automática de incêndios (sprinklers e dilúvio)
- Depósito de água para serviço de incêndios e respetivo grupo hidropressor



- Sistemas de extinção automática por agentes distintos da água (por exemplo sistemas aquosos nas hotte da cozinha ou sistemas por gases inertes ou químicos em data centres)
- Sistemas de cortina de água, por exemplo para irrigar vãos ou atravessamentos
- Controlo de monóxido de carbono em parques de estacionamento
- Detecção de fugas de gás combustível e sistema de corte automático em caso de fuga ou incêndio
- Drenagem de águas residuais de incêndio e bacias de retenção de hidrocarbonetos, de forma a não inundar pisos enterrados e não permitir a contaminação das redes públicas de drenagem
- Condições para o estabelecimento do posto de segurança, onde são centralizados os comandos dos sistemas de SCIE

Como vemos, quer as **medidas passivas**, quer as **instalações técnicas**, quer ainda as **medidas ativas** são muito importantes para garantir a segurança contra incêndios dos edifícios. No entanto elas só são eficazes se se mantiverem operacionais. Vejam-se alguns exemplos:

- A compartimentação corta-fogo é inútil se forem colocadas cunhas nas portas corta-fogo mantendo-as abertas durante um incêndio
- As vias de evacuação podem ser insuficientes se colocarmos obstáculos ao longo da via ou se as saídas de emergência estiverem bloqueadas
- Se o gerador que alimenta os sistemas de SCIE estiver inoperacional, todos os sistemas que dele dependam (elevador prioritário para bombeiros, grupo hidropressor, controlo de fumo, etc.) ficarão inoperacionais se houver corte de energia
- A iluminação de emergência não funciona se não tiver a devida manutenção, uma vez que dependem de baterias, que têm um tempo de vida limitado, ou de geradores, que se não tiverem combustível não funcionam
- Os detetores de incêndio e respetivas sirenes não funcionam se a Central de Detecção de Incêndio for desligada por ocorrerem falsos alarmes; não funcionando o sistema de detecção de incêndio outros sistemas que dependem dos seus comandos não terão o funcionamento devido, nomeadamente o corte automático de gás, o controlo de fumo ou alguns sistemas de extinção automática
- Os extintores podem não ser de grande utilidade se estiverem inacessíveis, por estarem tapados ou fora do seu lugar, ou se não tiverem a manutenção devida
- Os carretéis de nada servem se não estiverem em carga, por exemplo: por se ter fechado indevidamente uma válvula ou terem desligado as bombas de água, caso estas existam

De uma maneira ou de outra, a eficácia das medidas passivas, instalações técnicas e medidas ativas podem ser postas em causa por causas humanas, por ação (p.e. bloquear uma porta corta-fogo) ou inação (p.e. não fazer a manutenção dos equipamentos). Ora esta é uma das razões de ser das medidas de autoproteção (MAPs): garantir que ao longo da vida útil do edifício são mantidas as condições de segurança existentes.

É importante manter a operacionalidade dos sistemas de segurança, mas estes de nada servem se não houver alguém que os saiba utilizar, e esse é outro dos objetivos das medidas de autoproteção: garantir a formação e treino dos ocupantes do edifício na utilização dos meios de segurança ao seu alcance.

Por fim, e não menos importante, é que em caso de sinistro cada um saiba o que deve fazer. De pouco serve irem todos tentar apagar o incêndio se não houver pessoas a ajudar a evacuação. Para que tal não aconteça é necessário que haja Organização de Segurança, sendo definidas à priori funções específicas para pessoas específicas.

Assim, os objetivos das MAPs são os seguintes:

- A adoção de boas práticas de prevenção de incêndios
- A manutenção das condições de segurança, assegurando uma manutenção adequada
- Realização de ações de sensibilização dos ocupantes na área da SCIE e a formação e treino na operação dos meios de segurança
- A organização de segurança, para que cada um saiba qual as suas responsabilidades e funções em situação de emergência



Mas estes objetivos são meios para chegar a um fim – alcançar os princípios gerais da segurança contra incêndio em edifícios atrás enunciados, que estão estabelecidos na lei:

- A salvaguarda da vida humana
- A proteção do património
- A preservação do meio ambiente

No entanto a legislação estabelece apenas o mínimo, havendo liberdade para estabelecer objetivos mais exigentes. Se pensarmos por exemplo numa fábrica que arda por completo, e que todos os trabalhadores saiam ilesos isso é muito bom, mas todos eles estarão desempregados no dia seguinte e o proprietário da fábrica além da perda do seu ativo, perderá a sua carteira de clientes. Assim, além dos objetivos mínimos estabelecidos na regulamentação, poderá ainda considerar-se objetivos adicionais, como por exemplo:

- Evitar danos reputacionais que possam afetar a marca
- Minimizar ao máximo os prejuízos materiais
- Manter a continuidade de funções

A regulamentação de segurança contra incêndio é a única que enquadra as Medidas de Autoproteção, mas estas não se devem limitar à prevenção e proteção em relação apenas a incêndios, devendo ter procedimentos para outros cenários de acidente possíveis a avaliar caso a caso, como sendo:

- Sismo
- Tsunami
- Inundação ou cheia
- Ameaça de bomba
- Distúrbios sociais

### 3. A REALIDADE NO TERRENO

Embora globalmente a regulamentação tenha as disposições necessárias para que os edifícios tenham boas condições de segurança, a realidade no terreno é bastante díspar.

Em sede de auditorias no âmbito de desenvolvimento e implementação das medidas, constata-se que existe um conjunto de comportamentos, que por ação ou omissão, comprometem de forma séria as eficácia e operacionalidade dos sistemas e equipamentos de SCIE. Listamos as anomalias encontradas com maior frequência:

- Medidas passivas:
  - Compartimentação corta-fogo:
    - Cunhas ou outros sistemas de retenção para manter as portas para-chamas abertas
    - Portas para-chamas empenadas, sem mola ou sem seletor de fecho, não assegurando a sua estanquicidade
    - Portas para-chamas empenadas e retentores danificados por as pessoas tentarem soltar o retentor à força
    - Abertura de buracos em paredes corta-fogo, para acrescentar novas infraestruturas, sem haver o cuidado de fazer a selagem corta-fogo
    - Cortinas para-chamas sem a devida manutenção ou com obstáculos por baixo que impedem o seu fecho
    - Alteração do uso de um determinado espaço, sem que tenha a compartimentação corta-fogo adequada para tal uso (por exemplo arrumar mais de 10 litros de líquidos inflamáveis num local de risco A)
  - Reação ao fogo:
    - Alteração dos materiais de revestimento por outros com desempenho inferior, não regulamentar
  - Vias de evacuação:
    - Obstrução ou redução de vias de evacuação, sobretudo as que não são usadas no dia-a-dia, com mobiliário ou outros materiais



- Alteração do layout dos espaços interiores, aumentando significativamente as distâncias máximas a percorrer
  - Colocação de correntes e cadeados em saídas de emergência por motivos de intrusão
- Instalações técnicas:
  - Alteração das instalações técnicas sem que tenham sido tomadas em consideração as medidas de segurança correspondente; é disso exemplo alteração de equipamentos por outros mais potentes ou com maior risco (por exemplo a alimentados a gás), sem alterar em conformidade a compartimentação e meios de SCIE que servem o local
  - Falta generalizada de limpeza e manutenção preventiva das instalações técnicas
- Medidas ativas:
  - Sinalização de segurança inadequada, em falta, incorretamente posicionada ou parcialmente obstruída
  - Iluminação de emergência inoperacional ou obstruída
  - Meios de deteção, alarme e alerta:
    - Detetores tapados para não apanhar pó, fumo ou vapor
    - Botoneiras de alarme obstruídas
    - Zonas de deteção ou loops desativados porque tinham falsos alarmes ou equipamentos em erro
    - Matriz de comando desadequada ou mal programada
    - Matriz de comando desatualizada face a alterações introduzidas no edifício
  - Sistemas passivos e/ou ativos de controlo de fumo:
    - Erros de conceção ou instalação não detetados por falta de comissionamento ou testes
    - Inoperacionalidade por falta de comando da CDI, seja por problemas de interface, seja por defeitos de programação
    - Grelhas obstruídas de controlo de fumo obstruídas
  - Meios de combate a incêndios:
    - Obstrução de equipamentos
    - Rede de incêndios sem caudal e/ou pressão necessários, por avaria ou anomalia do grupo hidropressor
  - Sistemas de extinção automática de incêndios (se aplicável):
    - Sprinklers sem caudal e/ou pressão necessários, por avaria ou anomalia do grupo hidropressor
    - Sistemas de extinção por agente diferente de água inoperacionais, seja por ter havido descargas intempestivas sem reposição do agente extintor, seja por problemas de comando (má comunicação com a CDI ou erro na programação da matriz), seja por haver componentes danificados, como sendo electroválvulas
  - Deteção de gás combustível:
    - Válvulas de corte automático chantadas ou com by pass, para evitar cortes por falso alarme
- Posto de segurança e comunicações de emergência:
  - Comandos dos sistemas de SCIE obstruídos
  - Ausência do plano de emergência e prevenção
  - Ausência de chaveiro de emergência
- Medidas de autoproteção:
  - Comportamentos de risco listados nos pontos acima
  - Falta de ações de sensibilização dos funcionários, levando a um grande desconhecimento dos comportamentos de prevenção recomendados e de como agir em caso de emergência
  - Equipa de segurança sem a formação adequada
  - Falta de manutenção preventiva e corretiva, ou manutenção preventiva incorreta, dando como bons equipamentos que estão inoperacionais
  - Não realização de simulacros ou simulacros realizados de forma leviana, apenas para cumprir as obrigações, mas sem efeito prático de treino e melhoria de procedimentos



Nas imagens abaixo ilustram-se algumas dessas situações.



Figura 1: Porta corta-fogo obstruída



Figura 2: Via de evacuação obstruída, com equipamentos que podem ser derrubados e com excesso de sinalética que pode induzir em erro o ocupante



Figura 3: Central de deteção de incêndios inoperacional



Figura 4: Detetor mal posicionado



Figura 5: Carretel obstruído

#### 4. CONCLUSÕES

A atual regulamentação mudou o paradigma da SCIE em Portugal. Aumentaram de forma significativa os requisitos para os meios passivos e ativos, foram introduzidos requisitos para as instalações técnicas e foi dado um grande papel às medidas de autoproteção. Todavia as medidas de autoproteção revelam-se manifestamente ineficazes, havendo uma falta de cultura de segurança generalizada.

A adoção de maus hábitos de segurança, a falta generalizada de manutenção, a falta de formação e treino na operação dos equipamentos de SCIE faz com que na prática os sistemas de SCIE não tenham a eficiência desejável, não assegurando as condições de segurança necessárias.

A mudança de hábitos e a criação de uma cultura de segurança consegue-se através de ações de sensibilização, que primeiro que tudo deve partir de iniciativa do estado, mas que nas instituições e empresas deve ser uma iniciativa da liderança de topo.

#### REFERÊNCIAS

Decreto-Lei nº220/2008 de 12 de novembro, que publica o Regime Jurídico de Segurança Contra Incêndios em Edifícios, na sua redação atual.

Portaria nº 1532/2008 de 29 de dezembro, que publica o Regulamento Técnico de Segurança Contra Incêndios em Edifícios, na sua redação atual.



## **PAINÉIS FOTOVOLTAICOS E BATERIAS DE LÍTIU – UM RISCO ACRESCIDO PARA OS BOMBEIROS**



**José Pedro Lopes**  
Especialista em  
Proteção Pessoas e  
Bens / ISEC Lisboa  
Lisboa/ Portugal

### **SUMÁRIO**

A utilização de novos materiais e novos sistemas de produção de energia nos atuais edifícios deram origem a novos ou ao agravamento do risco de incêndio antes existentes. A instalação de painéis fotovoltaicos são disso um bom exemplo, agravado quando os sistemas incluem baterias de íões de lítio. A manutenção de corrente elétrica no edifício, mesmo após o corte geral de abastecimento pela rede pública, bem como a probabilidade de surgir o embalamento térmico nas baterias, acarreta riscos, para os quais os bombeiros podem não estar alertados, podendo dar origem a gravíssimos acidentes que importa evitar, divulgando esses riscos e alertando para as medidas de prevenção que devem ser tomadas pelos utilizadores e pelos operacionais caso ocorra um incêndio num edifício com um destes sistemas instalado.

**PALAVRAS-CHAVE:** Energia fotovoltaica; baterias; íões de lítio; embalamento térmico; segurança operacional.

### **1. INTRODUÇÃO**

A evolução da tecnologia e dos materiais empregues na construção e a necessidade de garantir a sustentabilidade têm trazido para a área da engenharia e arquitetura novos materiais, novas técnicas de construção e novas soluções arquitetónicas dando origem a edifícios tecnicamente mais evoluídos, mas simultaneamente com novos ou agravamento dos riscos de incêndio antes existentes. A energia produzida e não consumida pode ser enviada à rede ou armazenada em baterias, constituindo em si uma preocupação acrescida para os bombeiros.

A instalação de sistemas de produção de energia fotovoltaica (energia sustentável) nos edifícios mais recentes são exemplo desse acréscimo de risco, muito especialmente se incluírem baterias de acumulação de energia de íões de lítio.

Constatando o cada vez maior número de incêndios que têm início ou afetam os sistemas de produção de energia através de painéis fotovoltaicos, importa saber como funcionam estes sistemas, os riscos com a sua utilização e, acima de tudo, os riscos que os operacionais bombeiros correm durante uma intervenção em incêndios na presença de painéis fotovoltaicos e/ou baterias de íões de lítio, que mantêm o fornecimento de energia ao edifício, mesmo após o corte de energia geral fornecida pela rede.



Será também analisada a problemática dos incêndios em baterias de íões de lítio hoje presentes em diversos tipos de veículos utilizados diariamente, bem como nos equipamentos elétricos e eletrónicos, como sejam os telemóveis, os e-cigarros, as power-banks, as scooters, as e-bikes, os veículos Plug-in e os 100% elétricos.

## 2. CONSTITUIÇÃO DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO

### 2.1 Constituição do sistema

Os Sistemas fotovoltaicos convertem a luz solar em eletricidade, em contraste com os sistemas solares térmicos, que convertem luz solar em calor.

Os Sistemas fotovoltaicos (PV) são constituídos essencialmente pelos seguintes componentes (Figura 1):

1. Gerador fotovoltaico (PV);
2. Caixa de conexão do gerador (opcional);
3. Cablagem de corrente contínua;
4. Interruptores / seccionadores;
5. Inversor de Corrente Contínua (CC) em Corrente Alternada (AC);
6. Cablagem de corrente alternada;
7. Sub-distribuição;
8. Alimentador e/ou contadores para consumo próprio.

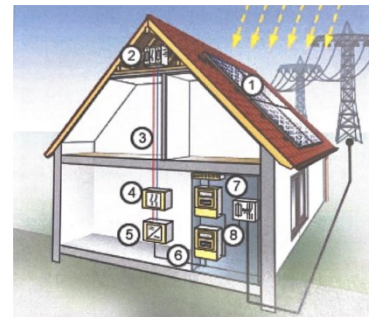


Figura 1

Um sistema fotovoltaico é um sistema complexo, com riscos que podem ser motivados por erro de projeto, má instalação ou erro na operação.

### 2.2 Origem dos incêndios em Painéis Fotovoltaicos

Os locais e o tipo de instalação tradicional dos sistemas fotovoltaicos dificultam e/ou desmotivam as indispensáveis ações de manutenção, o que leva a que as principais causas dos incêndios registados neste tipo de instalações estejam relacionadas com a antiguidade dos sistemas, danos neles verificados e não corrigidos, má instalação ou componentes de baixa qualidade. Estas anomalias proporcionam que as causas mais frequentes sejam o sobreaquecimento dos componentes, o arco-elétrico e a dificuldade em isolar um painel fotovoltaico em caso de incêndio, uma vez que, se houver luz solar, haverá sempre geração de energia elétrica.

As ligações defeituosas ou falhas de isolamento de cabos podem originar sobreaquecimento pontual que pode inflamar o material próximo. Por outro lado, os inversores de Corrente Contínua / Corrente Alternada incorretamente instalados ou defeituosos são conhecidos por causar incêndios em instalações fotovoltaicas e estando o incêndio em desenvolvimento pode ser muito difícil de conter.

Salienta-se a importância de se dispor de um projeto adequado, uma boa instalação e eficaz manutenção, que permitam salvaguardar uma operação sem sobressaltos.

Segundo dados do Building Research Establishment, Lda, 2017, [3] a origem dos incêndios em sistemas fotovoltaicos registada no Reino Unido, foi a indicada no Quadro 1.



Quadro 1: Origem dos incêndios nos sistemas PV

Origem	%
<b>CC Isoladores</b>	<b>44</b>
<b>CC conectores</b>	<b>24</b>
<b>Inversores</b>	<b>17</b>
<b>CC cabos</b>	<b>10</b>
<b>PV Módulos</b>	<b>5</b>

Estes Sistemas estão também sujeitos a ameaças externas, como sejam:

- Vento;
- Neve, gelo ou granizo;
- Raios e sobretensão;
- Fogo;
- Roubo;
- Roedores.

Em Portugal, não é ainda possível dispor de dados estatísticos pormenorizados sobre as causas de incêndios estruturais ocorridos no país, mas estamos em crer que, à semelhança do ocorrido internacionalmente, o número de incêndios com origem num dos componentes de sistemas fotovoltaicos tem crescido significativamente.

A título de exemplo, refira-se que um incêndio deflagrou nos painéis fotovoltaicos da empresa Água de S. Martinho, em Silvares São Martinho, Fafe (Figura 2), tendo sido dado o alerta às 11h 05m de quinta-feira, dia 16 de maio de 2025.

Foi assumido que a causa provável terá sido uma sobrecarga dos painéis.



Figura 2 – Bombeiros intervêm no incêndio em painéis PV, em Fafe.

Diversas têm sido as ocorrências de incêndio em telhados de grandes dimensões, como é o caso dos grandes edifícios comerciais, em que a causa mais comum é o arco de Corrente Contínua (CC), originado por instalação incorreta ou problemas nos materiais. Um arco de CC (Figura 3) é um arco elétrico ou fluxo de corrente, através do ar, de um condutor para outro ou para o solo.



Refira-se que nas 47 instalações que a Amazon possuía em 2019, nos Estados Unidos da América (EUA), segundo um artigo de Jacob Bourne, publicado na Emarketer, em 6 de setembro de 2022 e noticiado pela cadeia de televisão CNBC, entre abril de 2020 e junho de 2021, foram registados incêndios em Painéis Fotovoltaicos em 6 dessas instalações (12,7%). As causas de todas essas ocorrências foram atribuídas à má instalação ou falta de manutenção programada, tendo levado a Amazon a desligar os sistemas de energia solar em todas as suas instalações nos EUA, até à sua total revisão.

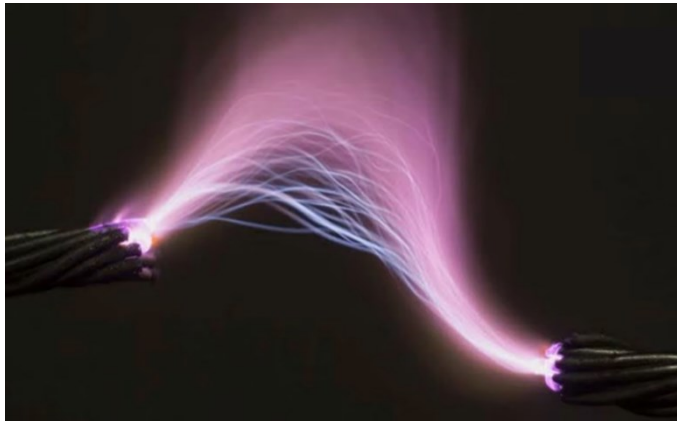


Figura 3 – Imagem de um arco de Corrente Contínua

Os sistemas fotovoltaicos são particularmente sensíveis a arcos elétricos, devido às altas correntes e tensões envolvidas. Arcos de Corrente Contínua não se autoextinguem e podem atingir temperaturas de até 3000°C. Até ao momento, não há nenhuma correção definitiva para evitar esses arcos.

Saliente-se que a temperatura gerada por um arco de CC é suficiente para derreter metal, que pode cair e inflamar materiais combustíveis próximos.

Em qualquer das situações referidas, os incêndios podem desenvolver-se rapidamente devido à alta combustibilidade dos sistemas solares. Além dos próprios painéis, os quadros, sistemas de montagem, cabos e caixas são geralmente altamente inflamáveis.

A credenciação das empresas instaladoras e a credenciação dos técnicos projetistas e dos instaladores é indispensável à operação segura com estes equipamentos. Importa optar por painéis fotovoltaicos certificados, devendo ser solicitado ao instalador recomendação sobre a forma de reduzir os riscos no período de instalação.

Um correto dimensionamento e escolha de cada componente do sistema pode trazer um maior retorno financeiro através do maior desempenho do conjunto de toda a instalação. Assim como os módulos fotovoltaicos, os componentes de montagem e as estruturas de suporte não devem ser de material combustível e devem resistir a ventos fortes.

### **2.3 Cuidados de manutenção**

Para além do cuidado na opção por sistemas com qualidade, estes devem ser verificados regularmente e serem sujeitos a testes de rotina.

É fundamental que seja garantida a execução de serviço de manutenção, para evitar problemas.



Um cuidado especial deve existir para verificar os danos causados por roedores e outras pragas, pois os danos causados por esses animais podem causar sérios prejuízos e originar fontes de ignição que poderão dar origem a incêndio.

## **2.4 Cuidados com a compartimentação**

Os sistemas devem ser constituídos por filamentos com um revestimento retardante de chamas e ser compostos por materiais que emitam pouco fumo e de baixa toxicidade.

A instalação de sistemas fotovoltaicos posteriormente à construção dos edifícios origina frequentes vezes a abertura de roços ou orifícios para passagem de cabos que depois não são devidamente protegidos, inviabilizando a compartimentação de algumas das paredes, pisos ou tetos atravessados por esses cabos.

Todos os orifícios de passagem de cablagens e penetração de cabos devem estar protegidos de forma a garantir a manutenção da compartimentação, em situação de incêndio, o que pode ser conseguido através de materiais intumescentes.

## **3. INTERVENÇÃO DOS BOMBEIROS**

### **3.1 Cuidados especiais devido à existência de sistema fotovoltaico**

Em caso de emergência, os sistemas fotovoltaicos representam um desafio para a capacidade dos bombeiros de apagar um incêndio rapidamente.

A segurança dos operacionais pode ser comprometida pela existência de painéis fotovoltaicos que se manterão a produzir energia, sendo a eletrocussão um perigo genuíno.

Os painéis fotovoltaicos estão a tornar-se cada vez mais potentes e a maioria deles é atualmente construída com maior robustez, de forma a resistir a enormes pedras de granizo e ventos fortes. Isso torna mais difícil para os bombeiros usar uma estratégia comum de combate a incêndios em edifícios, como seja a criação de aberturas nas coberturas para libertação do calor, do fumo e dos gases resultantes do incêndio, isto é, efetuando a designada ventilação tática.

O combate a um incêndio estrutural é, por si só, naturalmente perigoso e tentar parar um incêndio num edifício que possui painéis fotovoltaicos adicionará mais perigos aos bombeiros.

Como os novos modelos costumam ter designs elegantes e quase indetetáveis, os bombeiros podem não saber se o prédio tem painéis desse tipo até chegarem à cobertura. Mesmo quando os painéis fotovoltaicos estão secos, os revestimentos repelentes de poeira podem torná-los relativamente escorregadios.

Um problema a que os bombeiros devem estar atentos resulta do sistema não ser incorporado diretamente no material de cobertura e existe um espaço entre o telhado e os painéis. Deve ser evitada a acumulação de folhas e outros lixos por baixo do painel, que aumenta a carga de combustível disponível. Perante essas condições, uma única faísca natural ou provocada pelo homem pode originar o princípio de um pequeno incêndio que se vai desenvolver rápida e violentamente. Cortar a energia do sistema será assim outro desafio prioritário que os bombeiros podem ter de enfrentar.

Ao serem alertados para uma ocorrência de incêndio num edifício com painéis fotovoltaicos conectados à rede elétrica, a primeira preocupação dos operacionais será desligar a energia desses painéis. Será, para isso, necessário localizar os diversos componentes do sistema. Em vários países está estabelecida a obrigação de existir uma planta do edifício com a representação das componentes do sistema junto à entrada do edifício,



facilitando a observação pelos bombeiros. Não conseguindo obter essa informação, os bombeiros enfrentarão maiores dificuldades na resolução da ocorrência. Conseguindo localizar o inversor, deve o mesmo ser de imediato desligado. A caixa de desconexão de Corrente Alternada (CA) deve também ser desligada, como precaução extra. O apoio do proprietário ou de quem conheça toda a instalação é fundamental para orientação dos bombeiros, permitindo-lhes efetuarem um rápido corte a toda a energia do sistema.

Importa ainda ter consciência que, quando há necessidade de cortar a energia elétrica a um qualquer edifício, é fundamental saber se o mesmo dispõe de uma instalação de painéis fotovoltaicos, o que, a acontecer, origina o fornecimento de energia ao edifício e toda a instalação por essa via alternativa. Também durante o corte de energia efetuado pelos técnicos da rede para obras de manutenção / reparação, é fundamental salvaguardar que o(s) sistema(s) de produção através de painéis fotovoltaicos não fica(m) ativo(s), injetando energia na rede, o que, a acontecer, tem que ser interrompido de imediato, de forma a salvaguardar a segurança dos funcionários da concessionária.

Quando chegados a um incêndio estrutural, os bombeiros devem suspeitar da existência de painéis fotovoltaicos e, caso não consigam obter a informação sobre a localização dos diversos componentes do sistema e dos interruptores que permitam desligar o fornecimento de todas as fontes de energia, devem percorrer toda a área do edifício para descobrir esses painéis e, muito em especial e caso existam, os sistemas de armazenamento de energia (ESS - *Energy Storage System*).

A eletricidade para o edifício só é cortada quando o disjuntor primário da rede elétrica e o corte da Corrente Contínua / Corrente Alternada (CC/CA) do sistema solar e do armazenamento for concretizado, o que deverá ser feito pela equipa de reconhecimento. Há também que ter cuidado pelo facto de os painéis poderem ser desligados, mas o mesmo não acontecer com as baterias de acumulação da energia antes produzida que podem manter o fornecimento de energia ao sistema, pelo que é fundamental desligar todos os sistemas para evitar um choque elétrico aos bombeiros em intervenção.

Se o sistema de armazenamento de energia (ESS) for afetado pelo incêndio o impacto da chama pode fazer com que o sistema se degrade e possa induzir o embalamento térmico (*thermal runaway*), referido no capítulo 3.2.

Os painéis fotovoltaicos podem gerar eletricidade a qualquer hora do dia ou da noite! Como essa energia passa por condutores, os bombeiros devem evitar cortar, danificar ou tocar em qualquer componente do sistema. Se o cabo condutor estiver disfarçado, os bombeiros não devem fazer aberturas na cobertura, pois pode expô-los facilmente à eletrocussão.

Se o Comandante de Operações de Socorro ordenar a ventilação vertical, os bombeiros devem estar cientes de dois aspetos fundamentais:

- Os painéis fotovoltaicos podem continuar a gerar eletricidade;
- Os bombeiros não devem abrir um buraco na cobertura sem o devido cuidado dado o risco de eletrocussão.

A eletricidade para o edifício onde ocorra um incêndio só é cortada quando o disjuntor primário da rede elétrica e o corte da CC/CA do sistema solar e do armazenamento for concretizado, o que deverá ser feito pela própria equipa de reconhecimento.

Ocorrendo um incêndio num sistema fotovoltaico de produção de energia, esse incêndio pode desenvolver-se rapidamente devido à alta combustibilidade do material que compõe esses sistemas. Além dos próprios painéis, os quadros, sistemas de montagem, cabos e caixas são geralmente construídos com materiais facilmente inflamáveis.

Se os painéis fotovoltaicos localizados no telhado de um edifício se incendiarem, os bombeiros devem estar cientes de que as costas dos painéis são construídas com material também ele inflamável e pode incendiar rapidamente. É importante saber que uma quantidade considerável de chamas dentro ou ao redor dos painéis fotovoltaicos pode



indicar que o telhado também está em chamas, levando o Comandante de Operações de Socorro (COS) a ordenar a retirada e a operação em combate indireto. Assim, a intervenção à distância, longe do telhado, permite a extinção do fogo com segurança, usando água em jato, a uma distância de 20 m, ou em neblina, a uma distância superior a 5 m.

Um incêndio num painel fotovoltaico não requer nenhum agente extintor especial para ser extinto. Testes demonstraram ser a água o agente extintor mais eficaz.

### **3.2 O incêndio nas baterias – Embalamento térmico (“*Thermal runaway*”)**

No interior das baterias, os eletrões movimentam-se entre o Ânodo (elétrodo negativo) e o Cátodo (elétrodo positivo) entre os quais está um separador que mantém o processo seguro. Deficiências internas podem comprometer a integridade desse separador, originando um aumento desenfreado da temperatura dando assim origem ao embalamento térmico.

Embalamento térmico é uma reação em cadeia violenta de reações químicas exotérmicas que resulta num aumento incontrolável da temperatura no sistema. É uma reação autossustentável e incontrolável de aumento de calor e reações químicas internas que ocorre quando a geração de calor excede a sua dissipação. A energia química produzida durante o embalamento térmico é, como antes referido, libertada de forma incontrolável. Pode ocorrer nas baterias e nos sistemas de armazenamento de energia, que são partes integrantes da tecnologia dos sistemas fotovoltaicos, bem como de grande número de equipamentos e veículos atualmente em utilização. O embalamento térmico é desencadeado por condições como sobrecargas mecânicas (penetração, vibração, colisão ou esmagamento), sobrecargas térmicas (sobreaquecimento) ou sobrecargas elétricas (descargas ou cargas excessivas, curto circuitos internos) [8] e pode levar a temperaturas extremas, fumo denso, incêndio, explosões e à libertação violenta de gases tóxicos, corrosivos e inflamáveis, bem como a projeção de estilhaços e/ou partículas devido ao rebentamento violento das células das baterias.

Para iniciar o embalamento térmico é necessária a geração de calor. O calor é um subproduto normal da produção de eletricidade e, como sabemos, pequenas quantidades de calor libertado são típicas quando se utilizam baterias de iões-lítio. Se a bateria se mantém fria ou decide iniciar um processo de embalamento térmico depende, como antes referido, do equilíbrio entre o calor gerado e o calor dissipado para o ambiente.

Quando a dissipação de calor é maior do que a geração de calor, o fenómeno de embalamento térmico não se inicia e a bateria permanece segura. Se a geração de calor prevalecer, entra em ação o ciclo autossustentável do embalamento térmico, já referido. Neste efeito “bola de neve”, a geração de calor provoca um aumento da temperatura, acelerando a taxa de reação, o que leva a mais geração de calor. Devido a este ciclo positivo, o progresso do embalamento térmico é extremamente rápido. A temperatura da célula da bateria pode disparar para valores entre os 400° a 600° [8], podendo mesmo ultrapassar os 660°C [9], levando a que a bateria se possa incendiar ou até explodir em minutos. Para tornar as coisas ainda mais complicadas, o embalamento térmico gera oxigénio, de modo que um incêndio numa bateria pode iniciar-se mesmo sem oxigénio externo fornecido pelo ar ambiente envolvente. Esta situação é particularmente problemática, em especial em baterias de iões de lítio (LIBs), onde o eletrólito é inflamável.

Os gases libertados durante o embalamento térmico são diversos, muitos deles altamente tóxicos e/ou inflamáveis e podem contribuir para o desenvolvimento do embalamento térmico e até mesmo causar uma explosão, como antes se refere.

Os compostos gasosos libertados e as suas concentrações variam, dependendo, entre outros fatores, do tipo específico de bateria em questão, bem como do estágio do embalamento térmico.

Importa que os bombeiros e restantes elementos que possam estar nas proximidades de uma bateria a arder tenham consciência que nos gases libertados se incluem ácidos, como Fluoreto de Hidrogénio (HF), Cloreto de



Hidrogénio (HCl) e Cianeto de Hidrogénio (HCN), inorgânicos como Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>), Monóxido de Carbono (CO), Amónia (NH<sub>3</sub>), Dióxido de Enxofre / Anidrido Sulfuroso (SO<sub>2</sub>), carbonatos, sendo os mais comuns o Carbonato de Dimetilo (DMC), Carbonato de Etil Metilo (EMC), compostos orgânicos voláteis como etileno, acetileno e metanol, e carcinógenos, como formaldeído, de onde se pode deduzir a gravidade do risco para o ser humano que respirar esses gases.

O tamanho da bateria também afeta as concentrações de gás, razão pela qual as baterias de veículos automóveis originam ocorrências de maior gravidade que as verificadas nos telemóveis, nas trotinetas elétricas e nas bicicletas elétricas.

Desenvolvendo o embalamento térmico altas temperaturas e libertação de gases eles próprios inflamáveis, origina a propagação do incêndio a todo o veículo.

Os incêndios envolvendo baterias são normalmente difíceis de extinguir, o que significa que o fogo pode arder por mais tempo, causando riscos prolongados tanto para as pessoas como para a estrutura do edifício (se for o caso de estar nas proximidades) como para o ambiente próximo, o que requer conhecimento especializado dos operacionais.

Por tudo quanto se referiu, conclui-se que um incêndio e/ou uma explosão representam um enorme perigo nas imediações de uma bateria, em especial se for de íões de lítio. E como se isso não bastasse, os gases por ela libertados adicionam outra camada de risco que pode se espalhar por uma área consideravelmente maior. Os gases libertados e suas concentrações durante a embalagem térmico e o subsequente incêndio da bateria são altamente perigosos, dado o elevado nível de toxicidade, corrosividade e inflamabilidade, podendo alguns deles ser mesmo fatais para o ser humano.

Muitos estudos sobre as reações e os gases libertados durante o embalamento térmico têm sido feitos e são do interesse dos fabricantes de baterias e veículos elétricos, bem como das autoridades, uma vez que proporcionam informações preciosas sobre em que situações o embalamento térmico ocorre, quais os riscos que ele representa e, mais importante ainda, como evitar que isso possa acontecer.

Uma das tarefas prioritárias dos bombeiros ao chegarem a um incêndio num edifício que disponha de baterias de íões de lítio é arejar o compartimento onde se encontra(m) a(s) bateria(s), em especial se estiver(em) exposta(s) a temperaturas acima dos 65,6°C (150°F).

Saliente-se que já em 13 de fevereiro de 2022, o jornal “La Capitale”, publicou as declarações feitas em Bruxelas pelo presidente do SLFP Pompiers, Éric Labourdette, : *«Il est temps de légiférer pour interdire le stationnement des voitures électriques dans les parkings souterrains à l’instar de ce qui a été fait pour les voitures LPG»* - «É tempo de legislar para proibir o estacionamento de veículos elétricos em parques de estacionamento subterrâneos, à semelhança do que foi feito para os carros a GPL». Ao invés do verificado em muitos países europeus, em que tal proibição foi imposta, em Portugal, grande parte dos atuais edifícios de habitação e não só, que possuem pisos subterrâneos destinadas ao estacionamento de veículos, dispõem de posto(s) de carregamento destinado(s) a veículos elétricos - instalação que é mesmo obrigatória para edifícios novos, muitos deles com as respetivas baterias.

Não deve ser descurada a atenção sobre os veículos de micromobilidade elétrica, como são as scooters, as bicicletas e as trotinetas, elétricas, atualmente já apresentadas como a principal causa de incêndios estruturais nos Estados Unidos da América. A própria NFPA – *National Fire Protection Association*, divulgou em 2023, uma recomendação que, na presença de um destes veículos, se vir um incêndio:

- Abandone imediatamente o edifício;
- Não tente combater o incêndio;
- Ligue o número de emergência (na Europa é o 112).



Importa estarmos cientes que um incêndio que afete as baterias de íões de lítio assume características diferentes do habitual, desenvolvendo-se com alta intensidade, apresentando grandes dificuldades de extinção e sério risco de reígnição; mais importante ainda é o risco corrido pelos bombeiros que têm que intervir num ambiente extremamente desfavorável, com um nível de radiação térmica muito acima do que estão habituados, grande dificuldade de extinção e na presença de gases altamente nocivos para o ser humano. É conhecida a morte de dois Bombeiros de Alcorcón, em Espanha, ocorrida em 2 de abril de 2025 num incêndio num veículo elétrico, num parque de estacionamento de um edifício e em que um outro bombeiro foi internado em estado grave.

Importa referir também e conforme divulgado pelo canal televisivo 3 KCRA e difundido pelas redes sociais, um violento acidente ocorrido em 11 de abril do corrente ano de 2025, em que um veículo elétrico colidiu, a alta velocidade, contra uma árvore, tendo sido mobilizados os Bombeiros de Sacramento (EUA) que após desencarcerarem o único ocupante, permaneceram no local até à retirada do veículo. Durante a fase de limpeza da via, o veículo estava a ser movimentado para o reboque e quando os bombeiros já não estavam a utilizar os aparelhos respiratórios, algumas das baterias do veículo que se tinham espalhado na zona do acidente, libertaram uma nuvem de vapores altamente tóxicos a que 5 bombeiros ficaram expostos entre 1 a 5 min., o que foi suficiente para que, em 28 de setembro de 2025, ainda só um deles tinha regressado às suas funções, permanecendo os restantes de baixa médica, apresentando os seguintes sintomas:

- Redução da função pulmonar
- Infecção sinusal
- Frequência cardíaca elevada, hipertensão e taquicardia
- Bolhas na boca que evoluíram para lesões
- Problemas renais
- Altas concentrações de enxofre, fósforo e lítio nos exames ao sangue.

#### **4. A EVOLUÇÃO PREVISTA**

Têm sido difundidas notícias sobre incêndios ocorridos em veículos, alguns mesmo de gama alta, quando se encontravam parquoados na garagem dos edifícios onde residem os seus proprietários, incêndios esses que destruíram por completo esses veículos, uma vez que não é ainda conhecido nenhum agente extintor eficaz para a extinção rápida de incêndios em baterias de íões de lítio. Tem vindo a ser feito um grande esforço pela indústria da especialidade no sentido de conseguir colocar no mercado agentes extintores que consigam interromper o fenómeno do embalamamento térmico (*Thermal runaway*). Infelizmente e até ao momento não está ainda disponível qualquer agente que consiga satisfazer esses objetivos, ainda que existam já alguns produtos que se apresentam como controladores do desenvolvimento da combustão, impedindo a sua propagação, mas que estão a ser vendidos como extintores da combustão e irão provocar séria desilusão a quem deles esperar essa eficácia.

A indústria procura novas soluções para a produção eficiente de energia crendo-se que, em breve, poderão surgir no mercado novos tipos de baterias, nomeadamente de compostos sólidos. Em 13 de agosto do corrente ano, Evan Williams, jornalista automóvel conceituado e engenheiro mecânico com mais de 10 anos de experiência na indústria automóvel escreveu na "Toronto Star and AutoTrader Canada" que a Hyundai patenteou já um tipo de baterias solidas, que se prevê terem mais capacidade, inflamabilidade bastante reduzida, durabilidade ainda mais longa do que as células existentes e carregamento mais rápido. Estamos em crer que outras marcas se seguirão, aguardando-se a sua comercialização para confirmar que, em situação de incêndio ou acidente, não apresentam riscos de igual ou superior gravidade, que as baterias de íões de lítio.

Ao nível do risco nos edifícios provocado pelos novos sistemas de produção de energia, importa salvaguardar que as novas soluções técnicas e de arquitetura não acarretam riscos ainda mais graves dos até aqui enfrentados pelos operacionais que têm que intervir em incêndios nesses edifícios, em que os projetistas procuraram disfarçar



os painéis fotovoltaicos na envolvente aos edifícios, painéis esses que são cada vez mais robustos e escorregadios procurando minorar o impacto da acumulação de neve ou outras intempéries nesses equipamentos.

A nível europeu, vários são já os países que obrigam à afixação de um esquema elétrico junto à entrada do edifício e onde, antes de mais, se informa da existência de um sistema de produção de energia por painéis fotovoltaicos e ainda se descreve onde estão instaladas as baterias e os inversores e disjuntores de corrente contínua, de forma a que os bombeiros, ao chegarem ao local fiquem, de imediato, a saber onde se localizam. Conhecendo a existência de painéis fotovoltaicos e, conhecida a sua tecnologia, os bombeiros analisarão como obviar a que a sua intervenção seja dificultada pelas especificidades dos materiais com que esses painéis são construídos e adotarão as táticas de intervenção mais ajustadas à presença desses sistemas, procurando minimizar o risco para a sua segurança.

Alguns especialistas apontam a utilização do hidrogénio como a fonte de energia do futuro, mas importa termos consciência do alto grau de risco que a utilização de um gás com o elevadíssimo poder calorífico do hidrogénio pode representar, para além de reduzida dimensão da sua molécula, o que dificultará a sua contenção em caso de fuga e facilitará a sua dispersão por todo o volume disponível na envolvente. Refira-se que o Poder Calorífico Superior (PCS a 25°C e a 1 atm) do Hidrogénio é de 141,86 kJ/g, enquanto o do Metano é de apenas 55,53 kJ/g e o do Propano de 50,36 kJ/g. O Hidrogénio apresenta uma energia de ativação de apenas 0,016 mJ, enquanto o Metano apresenta 0,21 mJ e o Propano 0,24 mJ (superiores a mais de 10 vezes), a que podemos acrescentar um intervalo de inflamabilidade que para o Hidrogénio está entre os 4 e os 75%, enquanto que para o Metano se limita entre os 5 e os 15% e para o Propano entre os 2,1 e os 9,5%. Estas características fazem do Hidrogénio um gás com elevado risco de inflamação, produzindo muito mais energia durante a sua combustão, o que, além de o tornar muito eficiente enquanto fonte de energia, lhe dá características que, em caso de incêndio lhe dão uma capacidade muito superior de afetar a envolvente que seja atingida por esse incêndio.

Apesar da sua utilização industrial estar implantada há muitos anos, importará garantir que o seu uso generalizado exigirá um cuidado especial, quer no transporte, quer nos equipamentos de consumo.

## 5. CONCLUSÕES

Hoje, mais que nunca, a proteção contra incêndio não deve basear-se em “cumprimento mínimo” das medidas de segurança ao incêndio em Edifícios, qualquer que seja a sua tipologia, mas obrigando-nos a antecipar a atuação, através de medidas preventivas adequadas ao risco existente, redesenhar e proteger as vidas com ciência, técnica e responsabilidade. O problema não está nas baterias em si. Está na envolvente e na resposta técnica a ser dada, que deve ser a adequada para o risco atualmente presente e desconhecido na época da criação da Regulamentação de Segurança Contra Incêndios atualmente ainda em vigor.

Importa, por isso, que a Autoridade Nacional de Emergência e Proteção Civil e outras entidades com responsabilidades na exigência de condições de segurança contra incêndio dos diversos tipos de edifícios, atualizem a regulamentação, adaptando-a a estes novos riscos e ajustando as exigências de reação e resistência ao fogo que os materiais e os elementos de construção devem respeitar.

## REFERÊNCIAS

- [1] - ARUP- Office for Zero Emission Vehicles (OZEV), 2023. *T0194 – Covered car parks - fire safety guidance for electric vehicles*. Ove Arup & Partners Limited, 2023, 92 p.
- [2] - CFPD-Europe. (2018). *Guideline N° 37:2018 F - Photovoltaic systems: Recommendations on loss prevention*. 2018, 23 p.
- [3] – Pester S. (2017). *Fire and Solar PV Systems – Recommendations for the Photovoltaic Industry*. Science and Innovation, BEIS, Building Research Establishment Ltd, National Solar Centre and BRE Global Fire Safety Group, Report No. P100874-1006. 2017, 20 p.



- [4] - Graaf J. van der, Hessels T. & Rosmuller N. (2023). *Fire safety of indoor car parks accommodating electrically powered vehicles*. NIPV – Nederlands Instituut Publieke Veiligheid, Arnhem, The Netherlands, 2023, 74 p.
- [5] - Lopes J.P.G.O. (2025). *Painéis solares e baterias de lítio*. Apresentação. Algarsafe'23.
- [6] - Prudhomme J.& Peyre C. (2021). *Feux de batteries au lithium: Nouveaux enjeux operationnels, RCH4 2021, Memoire de conseiller technique en risques chimiques, ENSOSP – Ecole Nationale Supérieure des Officiers de Sapeur-Pompiers, 2021, 80 p.*
- [7] - Santos D. F. (2023). *Transição energética – desafios para a Segurança Contra Incêndio em edifícios*. Apresentação. Algarsafe'23.
- [8] – Dai Y. & Panahi A. (2022). *A review of thermal runaway prevention and mitigation strategies for lithium-ion batteries*. *Energy Conversion and Management: X*, Volume 16, ScienceDirect, Elsevier, Artigo 100310, 2025.
- [9] - Shahid S. & Agelin-Chaab M. (2025). *Thermal runaway process in lithium-ion batteries: A review*, Volume 6, ScienceDirect, Elsevier, Artigo 100186, 2022,



**9JORNINC-4JORPROCIV**

9<sup>ª</sup> Jornadas de Segurança aos Incêndios Urbanos  
4<sup>ª</sup> Jornadas de Proteção Civil

Coimbra, 7 de novembro de 2025



## UTILIZAÇÃO DE TERMOGRAFIA TÁTICA NO COMBATE A INCÊNDIOS ESTRUTURAIS

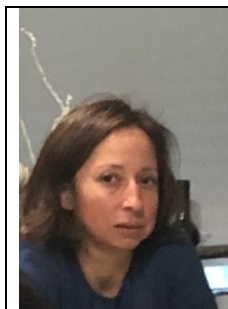
ADAPTAÇÃO AO CONTEXTO OPERACIONAL PORTUGUÊS



**Luís C. Ferreira**  
\*\*\*\*\*

**Moreira**

Msc. Eng. Civil  
Investigador C-  
MADE, UBI, Covilhã,  
Portugal



**Cristina Calmeiro**

Professor  
Instituto Politécnico  
de Castelo Branco,  
Portugal



**Andrew Starnes**

Instrutor de Combate  
a Incêndios  
Insight Fire Training  
Nth Carolina, EUA

### SUMÁRIO

A termografia infravermelha consolidou-se como uma tecnologia essencial no combate a incêndios estruturais, permitindo detetar ambientes de baixa visibilidade e identificar anomalias térmicas decisivas para a ação tática. Este estudo analisa o funcionamento das câmaras de imagem térmica (CIT), descrevendo os seus componentes, modos de operação e parâmetros críticos, como a resolução, a sensibilidade e a taxa de atualização. Destacam-se as aplicações práticas na leitura espacial, no apoio à decisão, na busca e salvamento e na monitorização de focos de calor. Estudos de incidentes envolvendo bombeiros evidenciam a CIT como uma ferramenta de mitigação de riscos. Contudo, identificam-se algumas limitações relacionadas com a dependência do utilizador, a necessidade de formação e as restrições físicas dos detetores. A eficácia operacional da termografia depende da integração entre equipamento adequado, conhecimento técnico e utilização estratégica nas operações de socorro.

**PALAVRAS-CHAVE:** termografia tática; incêndios estruturais; câmaras de imagem térmica; segurança operacional; reconhecimento térmico.

### 1. INTRODUÇÃO

O combate a incêndios estruturais representa uma das intervenções mais exigentes e perigosas no domínio da proteção civil. A complexidade das variáveis envolvidas - desde o comportamento imprevisível do incêndio até às limitações impostas pela visibilidade reduzida - exige dos operacionais a utilização de recursos tecnológicos que possibilitem decisões rápidas e fundamentadas. Neste contexto, a termografia infravermelha tem emergido como uma ferramenta tática de elevado potencial no apoio às operações de socorro.

A capacidade das câmaras de imagem térmica (CIT) para detetar variações de temperatura em ambientes opacos e saturados de fumo permite uma leitura mais precisa da envolvente, facilita a orientação espacial, a identificação de contrastes térmicos e a deteção de vítimas ou de perigos desconhecidos. Esta tecnologia, quando corretamente

---

\*\*\*\*\* Luís C. Ferreira Moreira – C-MADE (Centre of Materials and Civil Engineering for Sustainability), Departamento de Engenharia Civil e Arquitetura, 6201-001, Universidade da Beira Interior, Covilhã, Portugal; email: luis.moreira@ubi.pt



aplicada, contribui para mitigar riscos associados a colapsos estruturais, reacendimentos e evoluções imprevistas do incêndio, sendo particularmente relevante em contextos de visibilidade reduzida.

A integração da termografia nas operações táticas requer, contudo, uma compreensão aprofundada do funcionamento dos equipamentos, das suas limitações físicas e técnicas, bem como da necessidade de formação específica dos utilizadores. A eficácia da sua aplicação depende fortemente do conhecimento das propriedades da radiação infravermelha, dos modos de operação dos dispositivos e da correta interpretação das imagens térmicas em tempo real.

## 2. CÂMARA TERMOGRÁFICA

No mercado, existem vários modelos de câmaras e dispositivos de captura de termografia, que variam na constituição dos equipamentos e no funcionamento dos respetivos softwares. No entanto, todos partilham elementos-chave fundamentais à captura das radiações infravermelhas [1].

### 2.1 Propriedades das ondas Infravermelhas

As Câmaras de Imagem Térmica (CIT) detetam diferentes comprimentos de onda da radiação infravermelha, em função das propriedades físico-químicas dos materiais constituintes dos seus detetores. Esta característica é determinante para o desempenho e a sensibilidade dos equipamentos utilizados em contextos operacionais, nomeadamente nas operações táticas dos bombeiros.

A observação da Figura 1 permite identificar as principais zonas do espectro infravermelho: IV-N (infravermelho de comprimento estreito), IV-OC (infravermelho de onda curta), IV-OM (infravermelho de onda média), IV-OL (infravermelho de onda longa), IV-OML (infravermelho de onda muito longa) e a ZBT (zona de baixa transmitância). O IV-OL corresponde a ondas de infravermelho de longo comprimento, captadas pela maioria dos sensores e detetores térmicos atualmente disponíveis no mercado.

Importa salientar que as câmaras térmicas de uso tático em operações de combate a incêndios recorrem a detetores produzidos com óxido de vanádio (VOx) ou silício amorfo (a-Si), em função das suas propriedades termoelétricas e da estabilidade operacional [2].

Por sua vez, o IV-OM abrange ondas de infravermelho de comprimento médio, detetadas por equipamentos de elevado desempenho. Nestes sistemas, a combinação entre o tipo de material sensível e a refrigeração contínua dos recetores permite a deteção de radiação com maior conteúdo energético, assegurando maior precisão na leitura térmica e na representação das variações de temperatura do meio ambiente [3].

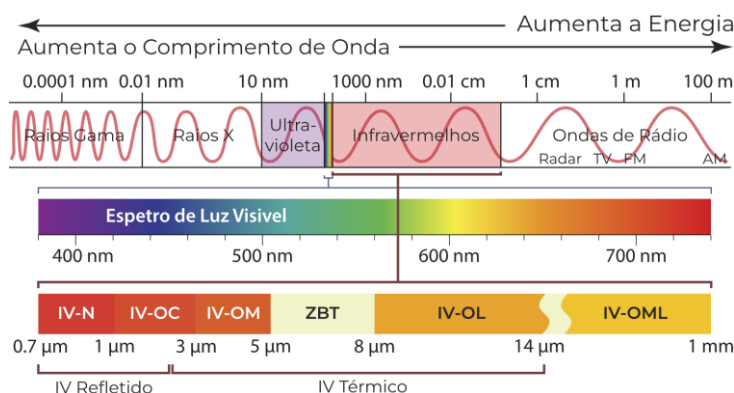


Figura 1: Esquema da distribuição de comprimentos de onda

A análise espectral das CIT evidencia a importância dos materiais dos detetores e das faixas de comprimento de onda na qualidade e precisão das imagens obtidas. A compreensão das zonas do infravermelho e das suas



aplicações práticas permite otimizar a utilização das CIT em contextos operacionais, particularmente em ambientes de risco e de baixa visibilidade. Assim, a seleção adequada do equipamento, aliada à formação técnica do utilizador, constitui um fator determinante para o aumento da eficácia e da segurança nas operações de combate a incêndios e de salvamento.

## 2.2 Dados estatísticos

O Quadro 1 apresenta as ocorrências de incidentes envolvendo bombeiros durante o combate a incêndios urbanos nos Estados Unidos, com base em dados disponibilizados pela NFPA. Esses dados permitem identificar as causas mais frequentes de acidentes com bombeiros no período de 1998 a 2022. No total, registaram-se aproximadamente 115 mortes [4][5].

O Quadro 2 apresenta o registo de ferimentos verificados no período entre 2018 e 2022. O registo destas ocorrências permite analisar quais as maiores e mais perigosas exposições que um bombeiro está sujeito durante o combate ao incêndio. Embora a forma de atuação dos bombeiros europeus seja relativamente diferente da forma dos bombeiros americanos, supõem-se a existência do mesmo tipo de riscos nas ocorrências. Por outro lado, dados estatísticos da NFPA reforçam que algumas mortes ou ferimentos de bombeiros deve-se à perda de orientação e falta de reconhecimento do espaço [4][5].

Quadro 1: Causas e número de mortes de bombeiros entre 1998 e 2022

Causa de lesão	n.º de mortes	%
Apanhado ou preso por colapso estrutural	90	31
<i>Colapso do telhado</i>	51	18
<i>Colapso do chão</i>	30	10
<i>Colapso da parede</i>	5	2
Apanhado ou preso pelo progresso do incêndio	57	20
Excesso de esforço, tensão ou stress	45	15
Perdido dentro do edifício	40	14
Queda ou escorregamento	13	4
<i>Queda em buraco queimado no chão</i>	10	3
Apanhado ou preso por flashover	12	4
Atropelado por objeto	7	2
Exposição a fumaça, produtos tóxicos	4	1

Quadro 2: Causas de ferimentos em bombeiros entre 2018 e 2022

Causa de Ferimento	Ferimentos
Desenvolvimento do fogo	51%
Progresso do fogo, incluindo condições de fumo	46%
Superfícies escorregadias ou irregulares	20%
Superfícies irregulares, incluindo buracos no solo	5%
Superfícies escorregadias ou irregulares não classificadas	4%
Superfícies geladas	4%
Colapso ou queda de objeto	10%
Queda de objetos	3%
Colapso do teto	3%
Buracos	3%
Perdido, preso, encurralado ou confinado	2%
Veículo ou equipamento	1%

## 2.3 O uso da Imagem Térmica Tática



O uso da Imagem Térmica Tática (ITT) [4] nas operações de socorro depende fortemente da competência do operador, que deve conhecer as limitações e capacidades do equipamento, bem como as consequências do seu uso adequado ou inadequado.

Com base em normas e formações específicas em Termografia Tática, foram reunidas orientações para o uso eficaz da ITT em incêndios estruturais e na gestão de operações de socorro. Segundo o Firehouse Magazine Survey (2020), em cerca de 50% dos incêndios urbanos a câmara térmica permanece no veículo, e em 38% dos casos fatais, também não é utilizada. Estes dados conduzem à seguinte questão: Será que o uso da Câmara de Imagem Térmica (CIT) poderia alterar os desfechos destas ocorrências? É fundamental garantir o uso da CIT em todas as fases da operação, assegurando a sua integração nos Equipamento de Proteção Individual (EPI), de modo a não interferir no trabalho do bombeiro. O equipamento deve ser transportado de forma segura, evitando danos físicos e mantendo-o sempre acessível durante a ação.

A termografia é dos assuntos mais descorados, senão negligenciados, na preparação de profissionais na área da proteção civil, emergência e segurança, principalmente no voluntariado. Pelo mesmo motivo que não é dada uma agulheta a um bombeiro despreparado para apagar um incêndio, não deve ser dada uma CIT a operacionais não preparados. Atualmente existem normas que aprofundam o uso da termografia tática, tais como a NFPA 1001, NFPA 1408 e a NFPA 1801 [2][4][5]. Além de definirem as regras de uso, definem as regras de fabricação. Esta normatização da fabricação dos equipamentos permite que qualquer modelo fabricado com intuito de captar e usar a ITT, possa ser usado por operacionais formados com a mesma base teórico-prática.

Torna-se fundamental a importante de reconhecer a interface dos sistemas, modos de uso, de temperatura, reconhecer as cores e os padrões de cor respetiva a temperatura, resolução, taxa de atualização de imagens, sensibilidade térmica da CIT, entre outras funções, e testá-la em ambiente proporcional à realidade. Durante as instruções, é realizada frequentemente a simulação de ambientes de incêndio urbano. Já que parte destas simulações são feitas através de fumos frios (fumos artificiais) estes não providenciam o treino correto para a termografia, pois a amplitude de temperaturas que o equipamento deve obter para calibrar entre os níveis de sensibilidade nunca é atingido, logo, não apresenta a capacidade tática da CIT-ITT. É preciso antecipar e há que garantir que o treino correto é aplicado, por meio da utilização de pontos quentes e efeitos simulados em ambiente controlado para testar as capacidades e limitações dos equipamentos do corpo de bombeiros.

Assim, recomenda-se a utilização de simulação de flashover em ambiente controlado, seguindo normas de segurança para os bombeiros e para os equipamentos, e que permitam o teste da CIT em cenário extremo: altas temperaturas, grande amplitude térmica e outras variáveis externas que condicionam o uso da ferramenta tecnológica. Alguns fornecedores da indústria de fabricação dos equipamentos termográficos recomendam cerca de 32 horas de formação, teórica e prática, em imagem termográfica com aplicabilidade em operações de socorro e reconhecimento, para que o operacional use a CIT em cenários de ocorrências reais.

A aplicação correta de treino e formação permitirá ao operacional realizar desde as tarefas mais comuns de uma operação de socorro em incêndio, tais como identificar os elementos da envolvente, as variações de temperatura, onde usar a água para arrefecimento, identificar líquidos em recipientes de grande dimensão ou reservatórios.

## **2.4 Interpretar a Imagem Térmica Tática**

A utilização de Câmaras de Imagem Térmica (CIT) não se limita à sua utilização correta, mas depende da capacidade de interpretar as imagens capturadas. A leitura e interpretação das informações fornecidas pelo Indicador de Temperatura Térmica (ITT) da CIT constituem etapas fundamentais para a realização de um exame eficiente, a tomada de decisões assertivas e a condução de operações de busca e salvamento de maneira mais rápida e eficaz [6]. Distintamente da separação visual gerada pelo fumo, as camadas térmicas identificadas pela CIT são representadas por variações de temperatura no ambiente, permitindo a identificação de diferentes zonas de interesse no compartimento [7].



As câmaras térmicas possibilitam a observação de três planos principais de temperatura: Vida, Layout e Fogo. A camada de Vida é exibida em tons de cinza e representa a zona em que o bombeiro pode, teoricamente, suportar a exposição térmica sem risco imediato. A camada de Layout, apresentada em branco, constitui a zona de transição entre as camadas de Vida e Fogo, correspondendo ao plano neutro visível em condições de fumo. A camada de Fogo é caracterizada pela paleta de cores que varia do amarelo ao vermelho, indicando temperaturas elevadas e condições de risco para a exposição direta do bombeiro (Figura 2).

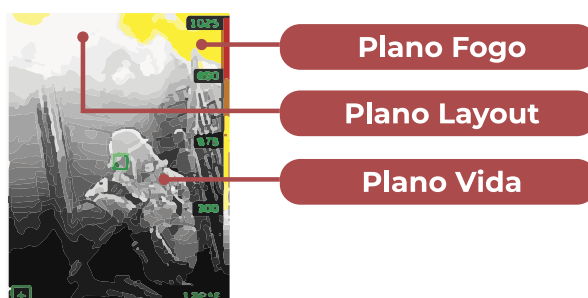


Figura 2: Distinção dos planos de temperatura

Assim, a interpretação correta das camadas térmicas é determinante para a eficiência das operações em situação de incêndio, contribuindo para a segurança dos profissionais e para a eficácia das ações de busca e salvamento [8].

## 2.5 As limitações das CIT-ITT

Saber identificar as limitações que os equipamentos de ITT, em função do ambiente, da função e do uso, configura um fator determinante na qualidade e sucesso de aplicação das CIT em ambientes de incêndios urbanos. Após o levantamento de todas as características técnicas das câmaras e da variabilidade de equipamentos e fornecedores destes equipamentos, consegue-se aferir um conjunto de limitações que o operador da CIT tem de ter em consideração, antes de usar em cenários reais de incêndio [9].

As câmaras recolhem informação das temperaturas de superfícies, como estruturas, paredes, tetos, entre outros. Não serve de visão Raio X, não permite ver além de materiais e não serve para detetar gases e outros combustíveis suspensos.

As CIT não são termómetros. As temperaturas são estimadas pela radiação que o detetor térmico capta. As condições da envolvente contribuem diretamente para que esta radiação no sensor seja alterada, podendo apresentar desvio das temperaturas reais entre os 5 a 20°C de diferença, ou até maiores, quanto maior for a temperatura, ou em função até da distância.

O mais complicado são os reflexos e as superfícies brilhantes e refletoras detetados nas câmaras de tal forma que algumas podem até simular outros compartimentos, identificar temperaturas que na verdade estão a ser emitidas por outros corpos e refletidas por essa superfície. Estas superfícies também podem emitir radiação de tal forma que representem falsos positivos ou falsos negativos – reflexos de outros focos, pontos quentes, etc. As superfícies com índices de refletividade muito altos (ou emissividade muito baixos) tendencialmente apresentam medições de temperatura mais baixas do que as realmente sentidas [9].

As Frequências de Rádio usadas nas comunicações podem também podem interferir tanto com a leitura de resultados pela câmara, como também, em alguns casos, podem bloquear o visor, por interferência com os dispositivos internos do equipamento. Entende-se este facto pela medida do comprimento de onda da rádio estarem relativamente próximas do comprimento de onda infravermelha detetável. É importante salientar que, desde 2013, os modelos mais recentes de câmaras termográficas utilizadas pelos corpos de bombeiros são obrigados a ter revestimentos de imunidade eletromagnética para prevenir interferências por radiofrequência. No entanto, têm-se verificado casos em modelos recentes em que esses revestimentos foram deficientemente aplicados, tendo gerado interferências na receção e tratamento de informação térmica [8][9].



Por fim, é importante salientar que o utilizador apresenta a maior limitação do equipamento. Deve ser facultada toda a informação técnica da CIT e toda a formação indispensável ao seu bom uso num cenário de incêndio urbano, reconhecimento, busca e salvamento ou apenas inspeção. Todo o equipamento tecnológico indevidamente usado, ou usado para outro fim, torna-se obsoleto [10].

### 3. CONCLUSÃO

A termografia infravermelha, por meio das Câmaras de Imagem Térmica para uso Tático (CIT-ITT), constitui uma ferramenta essencial para aumentar a eficácia e segurança em operações de combate a incêndios estruturais. A correta utilização depende da qualidade dos sensores e lentes, da calibração adequada e do conhecimento das propriedades das ondas infravermelhas e das limitações dos equipamentos.

A interpretação das imagens térmicas permite apoiar a tomada de decisão em ambientes de baixa visibilidade, facilitando a orientação espacial, a deteção de vítimas e o reconhecimento de focos de calor. A formação contínua e o treino dos operacionais são fatores críticos para garantir precisão na leitura térmica e minimizar riscos associados a colapsos estruturais e progressões imprevistas do fogo.

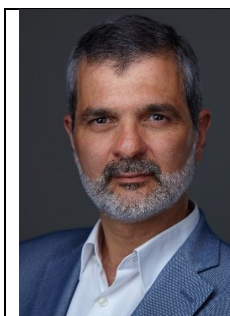
Apesar das limitações inerentes, como a incapacidade de atravessar materiais opacos e a sensibilidade a reflexos ou interferências, a integração criteriosa da termografia nas operações aumenta significativamente a perceção da envolvente e a segurança das equipas. A utilização informada desta tecnologia reforça o papel dos bombeiros como agentes de proteção civil preparados, proporcionando uma abordagem mais estratégica e segura na gestão de incêndios estruturais.

### REFERÊNCIAS

- [1] Gade, R., Moeslund, T. B. (2013). *Thermal cameras and applications: a survey*. Machine Vision and Applications, vol. 25(1), p. 245–262. <https://doi.org/10.1007/s00138-013-0570-5>
- [2] NFPA 1801. (2018). *Standard on thermal imagers for the fire service*. National Fire Protection Association.
- [3] Zhang, H., Sfarra, S., Ibarra-Castanedo, C., Maldague, X. P. V. (2019). *Dynamic Line-Scan Thermography for the Inspection of Paper-Based Materials: A Case Study Focused on an Ancient Book Cover*. Proceedings, vol. 27(1), p. 9.
- [4] NFPA 1001. (2019). *Standard for Fire Fighter Professional Qualifications*. National Fire Protection Association.
- [5] NFPA 1408. (2020). *Standard for Training Fire Service Personnel in the Operation, Care, Use, and Maintenance of Thermal Imagers*. National Fire Protection Association.
- [6] Pereira, C. A., Costa, E. S. (2021). *Tecnologia e perceção térmica no combate a incêndios urbanos*. Revista Segurança e Emergência, vol. 6(1), p. 15–29.
- [7] Sousa, D. F., Almeida, J. G. (2022). *Interpretação térmica em operações de salvamento: desafios e práticas emergentes*. Revista Latino-Americana de Engenharia de Incêndios, vol. 7(1), p. 31–48.
- [8] Lima, R. F., Duarte, P. S. (2020). *Uso de câmeras térmicas em ambientes confinados: aplicações e limitações*. Revista de Operações de Resgate, vol. 8(2), p. 25–39.
- [9] Martins, R., Almeida, P. (2021). *Infrared imaging systems in firefighting: operational principles and limitations*. Journal of Fire Science and Technology, vol. 37(4), p. 211–226.
- [10] Silva, A. R., Mendes, H. L., Torres, F. P. (2020). *Aplicação de termografia no apoio a operações de resgate*. Revista Técnica de Bombeiros, vol. 9(4), p. 10–22.



## SISTEMA DE GESTÃO INTEGRADA DE FOGOS RURAIS (SGIFR) E O DESPACHO N.º 8591/2022 DA ANEPC



**Paulo Prata Ramos**  
††††  
Projetista SCIE  
ETU Fire Safety  
Consultants



**Vilarim Reis††††**  
Projetista SCIE  
Engivillart

### SUMÁRIO

O Despacho n.º 8591/2022 da ANEPC, que publica os requisitos para adoção de medidas de proteção dos edifícios à passagem do fogo rural, no âmbito dos artigos 60.º e 61.º do Decreto-Lei n.º 82/2021, prevê um conjunto de medidas que agravam as disposições do RT-SCIE em edifícios construídos em áreas florestais ou a menos de 50 m destas. Esse conjunto de medidas, difíceis de defender do ponto de vista técnico e de eficácia discutível, oneram a construção e desincentivam a construção em meio rural contribuindo inclusivamente para o seu abandono.

**PALAVRAS-CHAVE:** SGIFR; fogos rurais; RT-SCIE; RJ-SCIE.

### 8. INTRODUÇÃO

O Despacho n.º 8591/2022 da ANEPC, adiante referido como “Despacho”, publica os “*Requisitos para adoção de medidas de proteção relativas à resistência do edifício à passagem do fogo, a constar em ficha de segurança ou projeto de especialidade no âmbito do Regime Jurídico de Segurança contra Incêndio em Edifícios*”, tendo sido publicado no âmbito dos artigos 60.º e 61.º do Decreto-Lei n.º 82/2021, de 13 de outubro, que estabelece o Sistema de Gestão Integrada de Fogos Rurais (SGIFR) no território continental.

O Despacho foi objeto da Declaração de Retificação n.º 723/2022, que se limita a corrigir formatação das suas tabelas, não alterando o conteúdo do mesmo.

### 9. TIPOLOGIA DE MEDIDAS

As medidas do Despacho assentam essencialmente na compartimentação e reação ao fogo da envolvente do edifício (paredes, coberturas e vãos nestes elementos), não considerando quaisquer outras medidas para além desta tipologia.

---

†††† paulo.ramos@etu.pt

†††† vilarimreis@engivillart.pt



Quando nos artigos 60.º e 61.º do DL 82/2021 se refere a “*resistência do edifício à passagem do fogo*”, isso deve ser lido no âmbito geral das medidas consideradas neste decreto-lei. De facto, estes artigos inserem-se no eixo de intervenção do SGIFR referido na alínea a) do número 2 do artigo 4.º do DL 82/2021, que prevê as seguintes medidas:

1. Promover a mudança de comportamentos;
2. Adoção de medidas de autoproteção;
3. Maior resistência do edificado.

Embora se possa alegar que o primeiro ponto apresenta alguma dificuldade de ser incluído no Despacho, no entanto através da inclusão de medidas de autoproteção específicas para a envolvente deste tipo de edifícios será possível a sua consideração como complemento ao ponto 2; os pontos 2 e 3 incluem-se no âmbito do RJ-SCIE e consequentemente do RT-SCIE, pelo que ambos deveriam ser considerados no Despacho, contatando-se que apenas o ponto 3 o foi. Por outro lado, quando no DL 82/2021 se refere “*resistência*”, isso não deve ser encarado no sentido estrito de “*sistema construtivo*”, mas num sistema mais vasto de medidas de mitigação do risco. Aliás sempre assim foi feito no âmbito das medidas de mitigação do risco florestal, que além de medidas passivas previa medidas ativas, como por exemplo reservas de água, meios de extinção, entre outros.

Constata-se assim que o Despacho considera apenas medidas de resistência ao fogo e reação ao fogo, não considerando várias dimensões e sistemas do RT-SCIE que podem ser significativos na mitigação do risco rural:

- Vias de acesso;
- Abastecimento de água aos meios de socorro externo;
- Criação de zonas de segurança e/ou zonas de refúgio;
- Meios de deteção (neste caso de fogos rurais), alerta e alarme;
- Meios de primeira intervenção;
- Meios de extinção automáticos (neste caso envolvente ao edifício);
- Medidas de autoproteção.

Ter feito incidir as medidas apenas em aspetos construtivos limitados, faz com que as medidas tenham de ser eventualmente mais gravosas (porque não são conjugadas com outras medidas) e que conferem aos proprietários e projetistas menos opções, como seria o caso de haver um leque amplo de opções.

## 10. CONCEITO INERENTE À SEVERIDADE DAS MEDIDAS

Parte das medidas previstas baseiam-se no conceito de “*Classe de Exposição ao Incêndio Rural*” (CEIR). A fórmula de cálculo do CEIR considera os seguintes aspetos:

- a) Tipo de vegetação (havendo quatro cenários, que têm a ver unicamente a ver com a altura vegetação);
- b) Inclinação do terreno;
- c) Distância da vegetação à edificação;
- d) Fator de agravamento no caso de as construções estarem inseridas numa APPS.

Os aspetos referidos em a), b) e c), conjugadamente, são usados para determinar o fluxo de calor incidente na edificação, em kW/m<sup>2</sup>.

A inclinação do terreno é um fator físico razoavelmente consensual, mas os demais não.

A taxa de libertação de calor libertada num incêndio rural depende de vários fatores, boa parte dos quais intrínsecos ao combustível, nomeadamente a sua massa, densidade de carga de incêndio, relação área/volume, teor de humidade, entre outros. O Despacho resume a categorização do combustível rural à sua altura:

- Apenas herbáceas;
- Herbáceas e árvores;
- Apenas arbustos (não referindo a altura);
- Arbustos e árvores.



Estes critérios são obviamente redutores e simplistas, não levando em linha de conta, entre outros fatores:

- Densidade da vegetação - É obviamente diferente que só haja arbustos ou árvores em parte do terreno ou na sua totalidade;
- Altura da vegetação – É muito diferente ter arbustos com meio metro ou com dois metros de altura, o mesmo se passando com árvores de pequeno, médio ou grande porte;
- Tipo de árvore – É muito diferente tratar-se, por exemplo, de um pinheiro-bravo/eucalipto ou de um pinheiro manso, o mesmo se passando com os arbustos; aliás não será por acaso que o Anexo do DL 124/2006 (ainda hoje em vigor) prever distâncias entre copas mais gravosas para o pinheiro-bravo e o eucalipto;
- Se se trata de uma cultura de regadio (por exemplo um pomar).

Por outro lado, os critérios para determinação da perigosidade de incêndio estrutural, que depois dá origem à classificação das APPS, já entra em linha de conta com a vegetação e inclinação, pelo que estes dois fatores, no caso das APPS são contabilizados como agravamento por duas vias (pela fórmula geral e pelo fator de agravamento 1,25).

Assim, assentam-se as medidas numa unidade física mensurável - fluxo de calor incidente, em kW/m<sup>2</sup>, mas não se tem em consideração com rigor o combustível e havendo fatores de agravamento adimensionais. Quer isso dizer que as fórmulas determinam um fluxo de calor incidente, que na realidade poderá ser metade ou menos, ou o dobro ou mais. Posto por outras palavras, pode resultar do cálculo uma Classes de Exposição ao Incêndio Rural (CEIR) “Média”, mas na realidade o fluxo de calor incidente efetivo no terreno ser muito menor ou maior, pelo poderia o CEIR ser “Baixa” ou “Alta”.

Por outro lado, existe uma questão conceptual discutível, que é considerar o meio rural imutável ou controlável pelo proprietário do terreno. Imagine-se isto:

- Um proprietário compra um lote de terreno e constrói uma casa, numa altura que os terrenos envolventes apenas têm herbáceas, pelo que a classe de CEIR será baixa, logo as exigências para o edifício será igualmente baixa; assim por exemplo, coloca apenas portas e janelas corta-fogo 45 minutos;
- O dono do lote ao lado, entretanto planta arbustos e árvores no seu terreno, pelo que em bom rigor, as janelas do primeiro proprietário a construir já são insuficientes para o fluxo de calor incidente a que vai estar exposto, e a sua casa estaria CEIR mais gravoso.

Por fim, existe um efeito perverso na classificação do CEIR. O facto de as medidas previstas onerarem muito a construção e os fatores críticos serem a vegetação e a sua distância, há um incentivo forte para transformar os terrenos em espaços estéreis, sem vegetação.

## 11. CLASSIFICAÇÕES DE REAÇÃO AO FOGO DE COBERTURAS

O Despacho adota (e bem), para a classificação ao fogo das coberturas a norma EN 13501-5, com testes feitos de acordo com a norma CEN/TS 1187. Todavia, o Despacho refere no seu preâmbulo e ainda no artigo 1.º e n.º 2 do artigo 2.º, que o Despacho é feito no âmbito do RJ-SCIE. Ora os ensaios e classificação de reação ao fogo são enquadrados pelo artigo 9.º e Anexo I do RJ-SCIE, que não refere a norma EN 13501-5 nem os respetivos fatores de classificação. Isso cria naturalmente um vazio legal, nomeadamente no que diz respeito às contraordenações que reportam ao cumprimento dos Anexos. Assim, cremos que o Despacho tem de referir o normativo de ensaio e classificação (que não o faz) e eventualmente deveria apresentar uma nova redação para o Anexo I do RJ-SCIE (que eventualmente é juridicamente complexo, mas indiscutivelmente necessário).

Por outro lado, coloca-se em causa os requisitos prescritos. Por um lado, na generalidade das circunstâncias pode-se adotar sistemas de cobertura  $B_{ROOF}(t1)$ ,  $B_{ROOF}(t2)$ ,  $B_{ROOF}(t3)$  ou  $B_{ROOF}(t4)$ , apresentando-os implicitamente como equivalentes ou equiparáveis. No entanto, o facto de todos terem um desempenho B, a forma de teste t1, t2, t3 e t4 são muito distintas. O teste t1 é feito com fagulhas, o teste t2 com fagulhas e vento, o teste t3 com fagulhas,

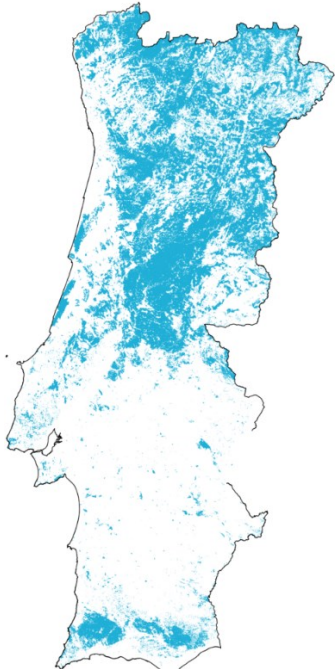
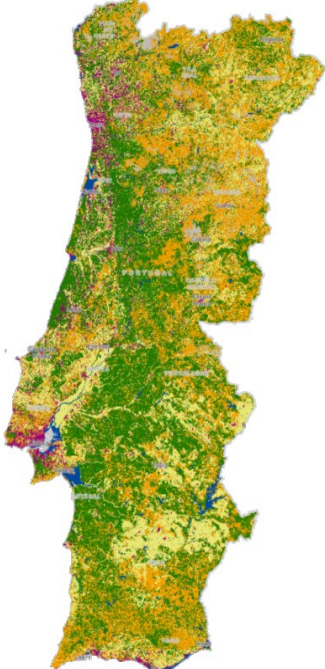


vento e exposição a fonte radiante adicional, e o teste t4 é um feito em duas etapas incorporando fagulhas, vento e exposição a fonte radiante adicional. Assim, embora todos tenham um desempenho B, os testes t1 e t2 são muito menos exigentes que o t3 e o t4, pelo que o desempenho dos sistemas construtivos com classificação  $B_{ROOF}(t1)$  e  $B_{ROOF}(t2)$  em situação de incêndio real é muito inferior aos que têm classificação  $B_{ROOF}(t3)$  ou  $B_{ROOF}(t4)$ . Importa também referir que não há qualquer paralelismo entre a classificação  $B_{ROOF}$  pela norma EN 13501-5 e uma classificação  $B_{fi}$  pela norma EN 13501-1. Por exemplo as telas de cobertura tipo TPO normalmente têm uma classe  $B_{ROOF}(t1)$ , que é o melhor desempenho possível do teste t1, sendo que obtêm uma classe  $E_{fi}$  pela norma EN 13501-1, que é dos piores desempenhos possíveis.

Por fim, tendo em conta que esta classificação nunca foi um requisito legal em Portugal, os fabricantes portugueses não têm os seus produtos ensaiados segundo esta norma e não há, que nós saibamos, qualquer laboratório em Portugal que faça este ensaio, que é muito específico. Assim os fabricantes nacionais terão de fazer ensaios no estrangeiro dos seus produtos, com os custos adicionais a isso inerentes, e os proprietários terão de empregar nas suas obras materiais importados que tenham essa classificação, daí advindo sobrecustos e atrasos nas obras.

## 12. ABRANGÊNCIA TERRITORIAL

O presente Despacho, face ao disposto no DL 82/2021, tem uma bastante vasta aplicação territorial, conforme se ilustra na tabela abaixo.

DL 82/2021	Alínea b) do n.º 2 do artigo 60.º	Número 1 do artigo 61.º
Área em que é aplicável	APPS - Áreas Prioritárias de Prevenção e Segurança; corresponde às áreas a azul no mapa abaixo	Solo rústico fora de aglomerados rurais, quando se situem em território florestal ou a menos de 50 m de territórios florestais e não seja uma APPS; corresponde às áreas a verde ou laranja no mapa abaixo
Mapa		



---

Edifícios abrangidos	Obras de reconstrução de edifícios destinados a habitação própria permanente ou a atividade económica objeto de reconhecimento de interesse municipal	Obras de construção, reconstrução ou ampliação de edifícios
----------------------	---	---

---

### 13. COMISSÕES DO DESPACHO

O Despacho define requisitos para os seguintes elementos e aspetos:

- Elementos estruturais (pilares, vigas, lajes e paredes portantes) – Resistência estrutural;
- Telhados e coberturas – Reação ao fogo;
- Claraboias e janelas – Resistência ao fogo e reação ao fogo;
- Paredes – Reação ao fogo.

Estão, portanto, omissos no Despacho os seguintes aspetos, para os quais aliás não há quaisquer requisitos no RT-SCIE quando se trata de edifícios isolados (que será o caso mais usual em meio rural):

- Telhados e coberturas – Resistência ao fogo;
- Paredes – Resistência ao fogo.

Assim, por exemplo, é possível construir um pavilhão industrial com painéis sanduiche de poliuretano nas paredes e cobertura (desde que estes painéis cumpra os requisitos de reação ao fogo, que facilmente cumprem), sendo necessário que as portas, janelas e claraboias sejam resistentes ao fogo. Cumprindo na íntegra todos os requisitos regulamentares, objetivamente, em caso de incêndio o edifício irá arder totalmente, dele restando apenas a estrutura, e as janelas, claraboias e portas corta-fogo, que resistiram ao fogo, mas caíram com as paredes e cobertura.

### 14. GRALHAS DO DESPACHO

O artigo 6.º do Despacho estabelece requisitos de reação ao fogo de cobertura, segundo a norma CEN/TS 1187 que é aplicável a coberturas inclinadas. Assim fica totalmente omissa neste Despacho qual os requisitos de reação ao fogo para coberturas planas ou coberturas em terraços visitáveis. Na omissão, presume-se que se deva cumprir apenas o disposto no RT-SCIE, que para edifícios de pequena ou média altura é a Euroclasse E (produto fortemente combustível). Parece-nos um contrassenso exigir coberturas inclinadas com boa reação ao fogo e permitir coberturas planas combustíveis.

O artigo 7.º do Despacho estabelece requisitos de reação ao fogo para “elementos de cerramento de vãos exteriores”, imaginando nós que se trata de estores ou similares. A classificação em causa e a forma como é feito o ensaio foi pensada para paredes e não estores, não sendo possível a certificação de estores com estes requisitos. Trata-se de uma gralha que já existe no RT-SCIE e que repetem no Despacho.

O artigo 8.º do Despacho estabelece requisitos de resistência ao fogo dos vãos. A normativa europeia para vãos resistentes ao fogo, aliás referida no Quadro IV do Anexo II do RJ-SCIE, prevê que os vãos tenham uma classificação complementar “C” (por exemplo EI45C), relativo ao sistema de fecho automático (mola). No artigo 8.º do Despacho não existe essa classificação complementar, o que parece indicar (cumprindo a normativa e por coerência com o RT-SCIE) que as janelas e claraboias são fixas (não abrem). Aliás na revisão de 2020 do RT-SCIE, acrescentou-se o parâmetro “C” para janelas que se pretende que possam abrir, de forma que ficasse que janelas sem “C” são janelas fixas. Por outro lado, tratando-se de portas, que devem poder abrir e fechar, terá sempre de haver o parâmetro “C”, o que não surge no Despacho. A redação do Despacho, tal como está, prevê, por falta do parâmetro “C” ou esclarecimento complementar que clarifique de outra forma, que todos os vãos, incluindo as portas, são fixos, o que naturalmente não é possível.



## 15. ADESÃO DAS MEDIDAS À REALIDADE

A estar correta a nossa leitura do artigo 8.º – que todas as janelas e claraboias são fixas – isso é naturalmente descabido, do ponto de vista funcional e de ventilação, incluindo o cumprimento do Regulamento Geral de Edificações Urbanas, pelo que consequentemente edifício não seria passível de ser licenciado.

Todavia há ainda várias questões construtivas que nos parecem impossível de solucionar:

- Artigo 5.º, Quadro I:
  - Os tempos de resistência ao fogo superiores a 120 minutos limitam muito o sistema estrutural possível, não sendo fácil encontrar soluções para a proteção de estruturas metálicas ligeiras, deixando assim apenas a opção do betão;
  - Mesmo no caso de estruturas de betão, alguns dos tempos de resistência previsto implicam enormes secções e recobrimentos dos varões; por exemplo, nos termos do Eurocódigo 2, parte 1- para R240 a dimensão mínima do pilar é 450 mm e a espessura de recobrimento dos varões é 75 mm; o sobrecusto de uma estrutura desta natureza é bastante significativo;
- Artigo 8.º, Quadro V:
  - Tanto quanto sabemos, é muito difícil encontrar claraboias com resistência superior a EI60;
  - A norma EN 12101-2 relativa a exutores prevê critérios de reação ao fogo, mas não de resistência ao fogo; tanto quanto sabemos, não existem no mercado exutores (que imaginamos que estejam enquadrados nos vãos na cobertura) com a resistência prevista no Despacho; ou seja, esta disposição não é possível de cumprir em edifícios que tenham de ter controlo de fumo passivo, sendo disso exemplo os edifícios industriais;
- Artigo 8.º, Quadro VI:
  - Tanto quanto sabemos, não é fácil encontrar no mercado janelas com resistência superior a EI90 ou portas com resistência superior a EI120; no caso das janelas a escolha é muito limitada e os vidros têm, para esse tempo de resistência, mais de 50 mm de espessura, havendo uma escolha limitada de caixilharia (que em termos normativos tem de ser corta-fogo);
  - Imaginando nós que as disposições deste quadro se aplicam também a portões de garagem e de edifícios industriais (não há nada que indique de contrário nem seria lógico que assim fosse), e tanto quanto sabemos, é difícil encontrar no mercado portões com resistência superior a EI90;
- Os vidros com classe de resistência ao fogo EI (estanquicidade e isolamento), necessários ao abrigo do artigo 8.º, não têm resistência aos raios UV, perdendo transparência e ficando opalinos com a exposição ao sol; mesmo os vidros melhorados suportam apenas 5000 horas de exposição UV, o que em Portugal, dependendo da localização, implicaria trocar os vidros anualmente ou de dois em dois anos; estes vidros têm um custo superior a 1.200 €/m<sup>2</sup>, implicando um elevado custo de manutenção.

## 16. CUSTO DAS MEDIDAS

A proteção ao fogo dos elementos estruturais, as portas, janelas e claraboias corta-fogo, são bastante onerosas. Assim a aplicação do Despacho irá representar um sobrecusto significativo nas construções a que for aplicável. Destacamos como as potencialmente mais afetadas as seguintes:

- Famílias que queiram construir a sua habitação própria em zona rural integrada nas APPS ou em qualquer zona florestal ou a 50 m desta (\*);
- Agricultores que queiram construir edifícios de apoio à sua atividade, se estiverem inseridos em zona florestal ou a 50 m desta (\*);
- Armazéns, edifícios industriais ou de pequena indústria, se estiverem inseridos em zona florestal ou a 50 m desta (\*);
- Equipamentos de turismo rural (\*).

(\*) – Constitui exceção se os edifícios em causa estiverem inseridos em aglomerados rurais, que nos termos do DL 82/2021 são “as áreas localizadas em solo rústico, com utilização predominantemente habitacional e de apoio a atividades localizadas em solo rústico, dispostas de infraestruturas e de serviços de proximidade, delimitadas”



como tal em plano territorial”; esta definição exclui muitas das áreas em que se implantam os edifícios agrícolas e industriais.

Assim estas medidas irão afetar sobretudo o interior, desincentivando a fixação das populações (por onerarem a habitação própria) e a captação de investimento das pequenas e médias empresas, contribuindo assim para a desertificação do interior.

## 17. METODOLOGIA ADOTADA PARA A REDAÇÃO DO DESPACHO

Embora saibamos pelo “Documento Enquadrador” que a ANEPC encomendou à Academia a redação do presente Despacho, cremos que na sua elaboração deveriam ter sido consultados as entidades que representam os profissionais que vão estar envolvidos na implementação do Despacho, nomeadamente as Ordens Profissionais (OA, OE e OET), as entidades licenciadoras (que além da ANEPC compreende os municípios, representados pela ANMP), os fabricantes/instaladores de materiais de compartimentação, representados pela APSEI e, por fim, o LNEC (que procede a ensaios de reação ao fogo). Todas estas entidades que têm assento na Comissão de Acompanhamento do RJ-SCIE. Uma vez que objetivamente o Despacho introduz alterações ao regulamento técnico emanado do RJ-SCIE, a Comissão de Acompanhamento deveria ter sido envolvida, o que não foi o caso. Cremos que se tal tivesse acontecido, teria resultado um diploma mais realista e equilibrado.

## 18. MEDIDAS QUE PODERIAM TER SIDO CONSIDERADAS

Seria expectável que este Despacho previsse algumas medidas mitigação do risco que correspondessem às boas práticas dos consultores que elaboravam processos de análise e mitigação de risco de incêndio florestal ao abrigo do anterior quadro jurídico (Decreto-Lei 124/2006, na sua última redação). Estas medidas eram aliás recomendadas pelos Gabinetes Técnicos Florestais dos municípios e incluíam, entre outras, as seguintes medidas:

- Rede anti fagulha nas chaminés e grelhas de ventilação;
- Folgas máximas nas janelas e portas;
- Estores em alumínio;
- Medidas específicas para grelhadores ao ar livre (requisitos construtivos dos materiais envolventes, meios de intervenção, etc.);
- Procedimentos de prevenção (posição de mobiliário relativamente a janelas, armazenamento de produtos combustíveis no exterior, limpeza de coberturas e caleiras, etc.);
- Meios de intervenção;
- Aceiros no perímetro dos terrenos;
- Pontos de água no perímetro dos terrenos;
- Em caso de terrenos vedados, portões para evacuação e acesso de emergência de viaturas de socorro.
- Identificam-se, a título de exemplo, algumas fragilidades decorrentes destas omissões:
- As medidas previstas no Despacho são de pouca eficácia se as fagulhas e gases quentes entrarem pelas chaminés, frestas de portas e grelhas de ventilação; aliás a norma europeia das portas resistentes ao fogo (que não foi pensada para fogos rurais) permite que a folga inferior da porta possa ter até 20 mm, o que permite que as fagulhas entrem para o interior dos edifícios;
- Mesmo tendo uma janela corta-fogo, as existências de estores, com caixa pelo interior, comprometem a compartimentação da envolvente exterior; sendo exigida compartimentação corta-fogo para janelas, teria de se exigir também para a caixa dos estores (o que não existe no mercado);
- As medidas previstas não minimizam as fontes de ignição no exterior, como sendo as decorrentes de grelhadores;
- Havendo uma ignição no exterior, não foram previstos meios de intervenção para a contenção inicial.



## 19. SOBRE OS OBJETIVOS DO SGIFR

O artigo 4.º do DL 82/2021 estabelece os seguintes objetivos que se podem considerar aplicáveis aos edifícios:

- Segurança e salvaguarda das pessoas e animais;
- Proteção de bens em áreas edificadas e nas demais áreas (\*)
- Mudança de comportamentos;
- Adoção de medidas de autoproteção;
- Maior resistência do edificado, no sentido de tornar as áreas edificadas menos suscetíveis ao risco de incêndio rural e menos geradoras de ignições.

(\*) - Poderá pôr-se em causa a constitucionalidade de o Estado obrigar os privados a proteger a sua própria propriedade. Todavia trata-se de uma matéria que foge ao âmbito deste documento.

Constata-se que o Despacho não dá resposta aos seguintes objetivos, que estão totalmente dentro do âmbito do RJ-SCIE:

- Proteção de animais (poderia ser conseguido através de medidas de autoproteção);
- Proteção de bens em áreas edificadas e nas demais áreas; as medidas previstas podem proteger o edifício, mas não os bens no exterior deste, o que seria possível se estivessem previstos aceiros e meios de intervenção;
- Mudança de comportamentos (poderia ser conseguido através de medidas de autoproteção)
- Adoção de medidas de autoproteção;
- Reduzir as fontes de ignição dos edifícios (o que poderia ser conseguido com rede anti fagulha nas chaminés e grelhas de ventilação, disposições relativas a grelhadores, etc.).

Por outro lado, embora conceber os edifícios de forma a resistir a incêndios (com muitas fragilidades como vimos) não salvaguarda, efetivamente, a vida humana. Se atentarmos nos incêndios de 2017, o número de vítimas dentro de edifícios, mesmo sem qualquer dos sistemas de proteção passiva agora previstos foram mínimas. A quase totalidade das vítimas mortais ocorreram fora do edifício, ou em zona próxima da residência (centenas de metros) ou nas estradas, nas viaturas em que tentavam fugir. Ou seja, a proteção dos edifícios tal como prevista no Despacho não garante, de todo, a redução de vítimas mortais. Mesmo que possa haver maior tendência para os ocupantes se sentirem mais protegidos em edifícios mais resistentes e terem menor tendência para fugir, se atentarmos ao que se passou nos incêndios de 2017, as populações fugiram quando houve falta de energia elétrica e água; mesmo em edifícios mais resistentes, provavelmente continuará a ocorrer o mesmo fenómeno.

## 20. CONCLUSÕES

Constata-se assim que:

- O Despacho foi elaborado sem os contributos dos representantes de quem o vai ter de pôr em prática, padecendo assim de uma visão abrangente e prática;
- Os requisitos assentam numa visão estática e imutável do meio rural e da florestal;
- As medidas previstas são excessivamente centradas em soluções de proteção da envolvente exterior do edifício (paredes, vãos e cobertura);
- As medidas são irrealistas, não havendo produtos no mercado que lhe possam dar resposta;
- Não foram consideradas medidas simples e eficazes que vinham sendo postas em prática, muito por recomendação dos Gabinetes Técnicos Florestais;
- O Despacho implicará custos elevados para as famílias e pequenas e médias empresas;
- O Despacho contribui para o abandono dos terrenos por parte dos seus proprietários com todas as consequências daí inerentes;
- O Despacho tem várias omissões e gralhas;
- Apesar de tudo isso, o Despacho não dá resposta completa ou eficaz aos objetivos do SGIFR, nomeadamente:
  - Não garante, efetivamente, a salvaguarda da vida humana;
  - Não contribui para a redução de ignições;
  - Não melhora a cultura de segurança;
  - Não estabelece requisitos específicos para as medidas de autoproteção.



Combater o flagelo dos incêndios rurais deve ser um desígnio nacional. Todavia trata-se acima de tudo um problema estrutural, cuja resolução primária reside no ordenamento do território e não medidas isoladas e de eficácia discutível como é o caso. No nosso entender os custos (humanos e financeiros) associados a este Despacho são desmesurados e não compensam, de todo, os poucos ganhos (se alguns!) que trará. Face ao exposto, cremos que o Despacho deve ser revogado.

## REFERÊNCIAS

Decreto-Lei n.º 82/2021, de 13 de outubro, com as alterações do DL n.º 6/2025, de 11/02, do DL n.º 56/2023, de 14/07, do DL n.º 49/2022, de 19/07, do DL n.º 119-A/2021, de 22/12 e Declaração de Retificação n.º 39-A/2021, de 10/12.

Despacho n.º 8591/2022, de 13 de junho, com as alterações da Declaração de Retificação n.º 723/2022, de 18 de agosto.

DESPACHO Nº 8591/ 2022 DE 13 DE JULHO “MEDIDAS DE PROTEÇÃO RELATIVAS À RESISTÊNCIA DO EDIFÍCIO À PASSAGEM DO FOGO” DOCUMENTO ENQUADRADOR versão 1.0 – julho/22

Aviso (extrato) n.º 6345/2022, de 28 de março

DOCUMENTO ENQUADRADOR do DESPACHO Nº 8591/ 2022 DE 13 DE JULHO, versão 1.0 – julho/22 (ANEPC)

EN 13501-1:2018 - Fire classification of construction products and building elements - Part 1: Classification using data from reaction to fire tests

EN 13501-5:2016 - Fire classification of construction products and building elements - Part 5: Classification using data from external fire exposure to roofs tests



**9JORNINC-4JORPROCIV**

9<sup>ª</sup> Jornadas de Segurança aos Incêndios Urbanos  
4<sup>ª</sup> Jornadas de Proteção Civil

Coimbra, 7 de novembro de 2025



## ANÁLISE DA VULNERABILIDADE DAS SOLUÇÕES CONSTRUTIVAS NA INTERFACE URBANO-FLORESTAL

**Susana Meneses**  
Professor Adjunto  
IPC-COIMBRA,  
SUSCITA-COIMBRA  
Portugal

**António Correia**  
Professor  
Coordenador  
IPC-COIMBRA,  
SUSCITA-COIMBRA  
Portugal

**Teresa Fragoso**  
Professor Adjunto  
IPC-COIMBRA,  
SUSCITA-COIMBRA  
Portugal

**João Gouveia**  
Professor Adjunto  
IPC-COIMBRA,  
SUSCITA-COIMBRA  
Portugal

**Alexandra Ribeiro**  
Professor Adjunto  
IPC-COIMBRA,  
SUSCITA-COIMBRA  
Portugal

**Luís Araújo Santos**  
Professor Adjunto  
IPC-COIMBRA,  
SUSCITA-COIMBRA  
Portugal

**Cristina Calmeiro**  
Professor Adjunto  
IPCB  
Portugal

**Gilberto Vaz**  
Professor Coordenador  
IPC – COIMBRA  
ADAI, UC - COIMBRA  
Portugal

**Keywords:** Interface urbano-florestal; resistência ao fogo; medidas passivas; fachadas; segurança construtiva.

### 1. INTRODUÇÃO

A interface urbano-florestal representa uma das zonas de maior risco na gestão dos incêndios rurais em Portugal. A coexistência entre edificações e vegetação densa cria condições favoráveis à propagação do fogo, quer pela radiação térmica, quer pela projeção de partículas incandescentes.

Os eventos de 2017, que resultaram em extensos danos materiais e humanos, demonstraram a necessidade urgente de adotar medidas de conceção e construção que limitem a vulnerabilidade dos edifícios à ação do fogo exterior.

### 2. ENQUADRAMENTO LEGAL E TÉCNICO

O enquadramento jurídico aplicável às medidas de proteção em zonas de interface urbano-florestal (IUF) encontra-se definido em diversos diplomas legais e regulamentares que visam assegurar a gestão integrada do risco e a resiliência dos edifícios face à ocorrência de incêndios rurais. Entre os principais instrumentos normativos destacam-se:

- Decreto-Lei n.º 82/2021, de 13 de outubro, que estabelece o Sistema de Gestão Integrada de Fogos Rurais, promovendo a articulação entre entidades e a definição de responsabilidades na prevenção e combate aos incêndios;
- Despacho n.º 8591/2022, da Autoridade Nacional de Emergência e Proteção Civil (ANEPC), que fixa os requisitos mínimos de resistência dos edifícios à passagem do fogo, contribuindo para o aumento da segurança estrutural e da proteção das populações;
- Decreto-Lei n.º 555/99, de 16 de dezembro, que aprova o Regime Jurídico da Urbanização e da Edificação (RJUE), definindo as regras aplicáveis ao licenciamento e execução de obras em áreas sujeitas a risco de incêndio;



- Planos Municipais de Defesa da Floresta Contra Incêndios (PMDFCI) e Planos Diretores Municipais (PDM), que identificam as zonas de risco e estabelecem condicionantes à edificação e à ocupação do solo, assegurando uma gestão territorial sustentável e compatível com a defesa da floresta.

Este conjunto normativo constitui a base legal que orienta a implementação das políticas públicas de proteção civil e ordenamento do território nas áreas de interface urbano-florestal (IUF) em Portugal.

### 3. METODOLOGIA

#### 3.1 – Identificação das partes mais vulneráveis da estrutura

A intervenção com fins preventivos na conceção de um edifício habitacional deve basear-se numa análise integrada dos seus elementos construtivos, com especial atenção àqueles que desempenham um papel essencial na prevenção da propagação do incêndio do exterior para o interior. Esta abordagem visa salvaguardar a integridade estrutural do edifício e minimizar os danos resultantes da exposição ao fogo.

Os principais componentes a considerar incluem:

- Estrutura do edifício (excluindo a cobertura), assegurando a resistência mecânica e a estabilidade perante temperaturas elevadas;
- 
- Cobertura, enquanto elemento crítico na proteção superior contra chamas e radiação térmica;
- 
- Fachadas, cuja conceção deve impedir a propagação vertical e horizontal do incêndio;
- 
- Vãos, incluindo portas e janelas, que devem ser executados com materiais e sistemas resistentes ao fogo, de modo a limitar a transmissão de calor e gases;
- 
- Aberturas no edifício, tais como as de ventilação primária e secundária das redes de esgotos, tubagens de AVAC e grelhas de ventilação para conforto térmico, que constituem potenciais vias de propagação de fumo e chamas;
- 
- Outros elementos construtivos relevantes, como sótãos, caves e alpendres, cuja compartimentação e ventilação devem ser cuidadosamente estudadas;

– Instalações associadas a risco agravado, nomeadamente garrafas de armazenamento de gás, depósitos de combustível e tubagens de abastecimento de gás, que requerem medidas específicas de segurança e isolamento. Esta metodologia de análise permite uma abordagem preventiva e integrada, contribuindo para a resiliência do edifício face ao fogo e para a proteção dos ocupantes e bens.

### 4 – MEDIDAS PASSIVAS DE CONCEÇÃO DE EDIFÍCIOS PARA A INTERFACE URBANO-FLORESTAL

Apresenta-se de seguida uma análise que pode servir para quantificação do risco do edifício, implantado numa zona de interface urbano-florestal, para avaliação do nível de segurança.

#### 4.1 – Estrutura do edifício

Consideraram-se diferentes tipos de estruturas:

- Estrutura em betão armado.
- Estrutura em alvenaria resistente de pedra;
- Estrutura em madeira, com ou sem proteção por verniz ignífugo;
- Estrutura metálica com ou sem proteção intumescente.



A análise desenvolvida baseia-se em observações diretas e registo fotográfico de diferentes soluções construtivas representativas das práticas construtivas nacionais. As imagens foram classificadas de acordo com os principais materiais estruturais e de revestimento, com o objetivo de avaliar o comportamento esperado perante a exposição ao fogo e de identificar boas práticas e vulnerabilidades.

As figuras ilustram alguns dos principais elementos construtivos e situações analisadas no âmbito da vulnerabilidade das construções localizadas na interface urbano-florestal. Procura-se, através destas figuras, exemplificar as partes mais suscetíveis à propagação do incêndio, bem como as soluções construtivas e medidas passivas que podem contribuir para a mitigação do risco

A Figura 1a) mostra um edifício com estrutura em betão armado e alvenaria de enchimento em tijolo cerâmico, e a Figura 1 b) uma construção em alvenaria resistente de pedra. Duas soluções construtivas de baixa vulnerabilidade aos incêndios de interface urbano-florestal.

Pelo contrário a Figura 1c) apresenta um exemplo de estrutura edificada com sistema construtivo leve em aço galvanizado, uma tipologia cada vez mais comum, e a Figura 1d) mostra uma habitação com estrutura e revestimento integral em madeira, coberta com telha cerâmica — um caso particularmente relevante para a vulnerabilidade em zonas de interface urbano-florestal (IUF).

A compreensão destas características é essencial para o desenvolvimento de modelos de avaliação de risco e para a implementação de medidas preventivas que garantam maior resiliência das construções situadas na interface urbano-florestal.



a)



b)



c)



d)

Figura 1 – Diferentes tipos de estruturas de edifícios

#### 4.2– Coberturas

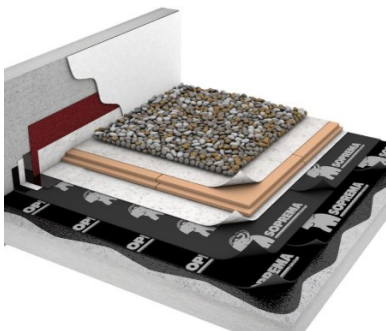
As coberturas dos edifícios podem apresentar diferentes tipologias construtivas, de acordo com os materiais e sistemas utilizados. Entre as principais tipologias, destacam-se:



- Cobertura tradicional, executada em estrutura de madeira ou metálica, com revestimento em telha cerâmica;
- Cobertura plana, dotada de sistema de impermeabilização com tela asfáltica ou de PVC, podendo incluir proteção em camada de brita;
- Cobertura inclinada em betão armado, com aplicação de telha e sub-telha para reforço da impermeabilidade e isolamento térmico;
- Cobertura em camarinha de zinco, caracterizada pela leveza e elevada durabilidade do material;
- Cobertura em painéis sandwich, composta por elementos pré-fabricados com núcleo isolante, proporcionando bom desempenho térmico e acústico.

Na Figura 2 apresentam-se 4 situações muito usuais de coberturas na construção nacional. A cobertura em terraço (Figura 2a)), com os isolamentos térmicos e telas asfálticas protegidas com lajetas, e a cobertura em telha cerâmica (Figura 2b)) são as mais robustas. No entanto, as novas tendências da construção têm proporcionado novas soluções construtivas, designadamente a camarinha de zinco (Figura 2c)) e os painéis sandwich, mais comuns nas construções industriais, geralmente com estruturas metálicas (Figura 2d)).

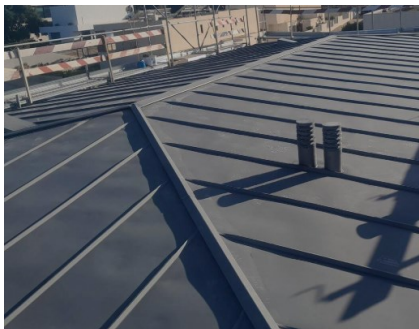
Naturalmente que a escolha dos materiais de cobertura é fundamental para a segurança das construções. As duas últimas soluções são de evitar a todo o custo na interface urbano-florestal (IUF).



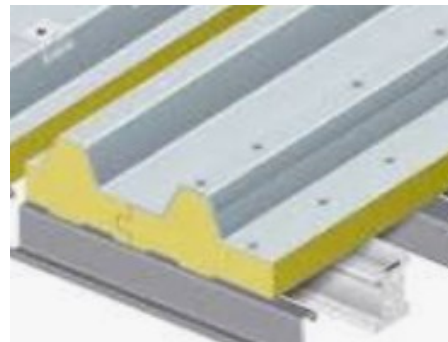
a)



b)



c)



d)

Figura 2 – Diferentes tipos de coberturas de edifícios



### 4.3– Fachadas

No que respeita às fachadas, observa-se uma diversidade de soluções construtivas, que variam em função dos materiais utilizados e das exigências de desempenho térmico, acústico e estrutural do edifício. Entre as tipologias mais comuns encontram-se:

- Alvenarias de parede de pedra tradicionais, frequentemente utilizadas em construções antigas ou em reabilitações que visam preservar o caráter histórico e estético;
- Alvenaria dupla de tijolo cerâmico ou blocos térmicos, proporcionando um bom desempenho térmico e acústico;
- Alvenaria simples de tijolo ou bloco térmico, adequada a construções mais económicas, embora com menor eficiência energética;
- Soluções leves, como painéis sandwich ou sistemas de gesso cartonado, que permitem uma execução mais rápida e uma redução do peso estrutural;
- Revestimentos de PVC, aplicados como camada exterior de proteção e acabamento, com vantagens em termos de durabilidade e manutenção;
- Painéis de fachada metálica, nomeadamente em zinco, frequentemente escolhidos pela sua resistência e pela estética contemporânea que conferem às edificações.

Esta variedade de opções permite ao projetista selecionar a solução mais adequada em função das condições climáticas, do contexto arquitetónico e dos objetivos de desempenho energético do edifício.

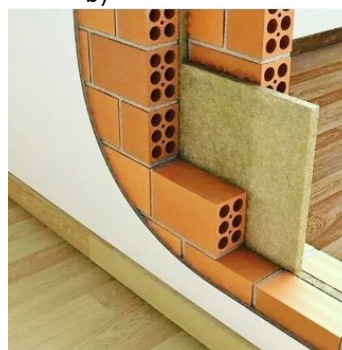
Na figura 3 podem observar-se diferentes tipos de fachadas, usuais na construção no nosso país.



a)



b)



c)

d)

e)



f)

g)

Figura 3 – Diferentes tipos de fachadas de edifícios

As figuras 3a), 3b), 3c) e 3d) mostram as soluções mais vulneráveis, com revestimentos em madeira, zinco, PVC e painéis sandwich, totalmente desaconselháveis nas zonas de interface urbano-florestal. As figuras 3e), 3f) e 3g) mostram as soluções em que os isolamentos térmicos estão pelo interior das paredes, e situações em que o isolamento exterior é feito com painéis de aglomerados de cortiça, em substituição do XPS e do EPS.

#### 4.4– Vãos de portas e janelas

Relativamente às caixilharias, é possível optar por diferentes materiais, nomeadamente madeira, alumínio ou PVC. No que respeita à proteção dos envidraçados, podem ser utilizados estores exteriores em PVC ou alumínio, ou, em alternativa, portadas interiores em madeira.

Os vidros poderão ser simples ou duplos, podendo ainda considerar-se, em determinados vãos, a aplicação de vidros refratários, apesar do seu custo significativamente superior.

As portas podem igualmente ser executadas em madeira, alumínio ou PVC. Contudo, o uso de PVC deverá ser excluído neste tipo de construção, por não apresentar características adequadas ao desempenho esperado. É ainda relevante avaliar a existência de elementos envidraçados nas portas, os quais, caso existam, deverão ser constituídos por vidro refratário, garantindo assim a necessária resistência ao fogo.

Na figura 4 apresentam-se situações correntes de proteção de vãos envidraçados.



a)



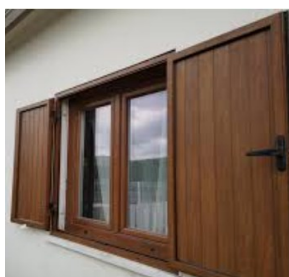
b)



c)



d)



e)



f)



g)

Figura 4 – Diferentes tipos de vãos de envidraçados

Nas figuras 4a), 4b) e 4c) apresentam-se imagens de proteções exteriores e interiores de madeira. Apesar de ser madeira, são boas soluções pela sua massividade. Na figura 4d) mostra-se uma solução de recurso a utilizar em caso de sinistro. A figura 4e), 4f) e 4g) mostra todas as soluções que não podem ser adotadas em zonas de interface urbano-florestal: proteções exteriores de PVC, persianas exteriores em alumínio e vãos totalmente desprotegidos.

#### 4.5– Aberturas no edifício

Nas instalações de redes prediais de esgotos, recomenda-se que, nas tubagens de ventilação primária e secundária, seja utilizado tubo metálico em todas as partes salientes para o exterior do edifício. Este prolongamento deve possuir, preferencialmente, uma extensão de 0,5 m; em alternativa, pode optar-se pela eliminação do troço exterior, desde que garantida a funcionalidade do sistema.

Todas as tubagens localizadas fora do edifício — incluindo chaminés de lareiras e condutas do tipo spiro utilizadas para exaustores de fumos de cozinhas — devem ser envolvidas por panos de alvenaria executados em tijolo ou blocos de cimento. As secções terminais das condutas devem estar protegidas com uma grelha metálica, cuja malha tenha a dimensão máxima de 10 mm, assegurando a proteção contra a entrada de elementos estranhos ou fauna.

No caso das tubagens de sistemas de ar condicionado, é obrigatória a instalação de registos corta-fogo nas zonas correspondentes ao envelope do edifício, de modo a garantir a compartimentação e segurança em caso de incêndio.



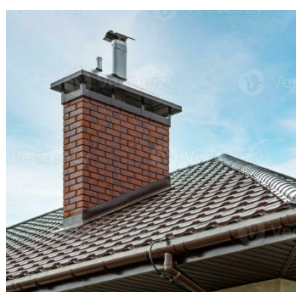
a)



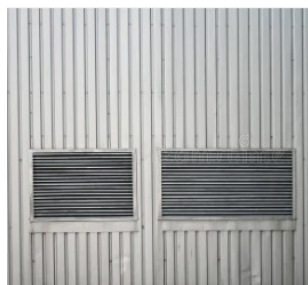
b)



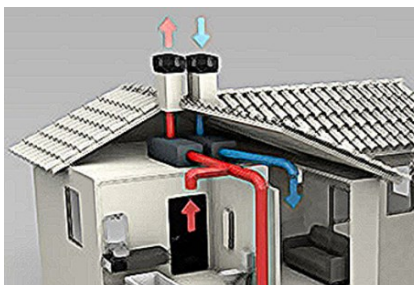
c)



d)



e)



f)



g)



h)



i)

Figura 5 – Aberturas para o exterior, provenientes de ventilações primárias e secundárias, tubagem e equipamento de AVAC, e ventilação ambiente

As figuras 5a) a 5g) mostram orifícios nas fachadas ou coberturas provenientes de ventilações e AVAC, que devem ser criteriosamente posicionadas nas construções de IUF. As figuras 5h) e 5i) mostram a realidade que se verifica com as exigências de renovações de ar.

#### 4.6 – Outros elementos construtivos

Os sótãos constituem, frequentemente, zonas vulneráveis nas edificações, devido à presença de materiais combustíveis, como caixas de cartão, tecidos e outros produtos obsoletos. Adicionalmente, estes espaços tendem a dispor de janelas sem proteção adequada nem garantias de estanquidade, o que potencia o risco de propagação de incêndios. Recomenda-se, por conseguinte, a limitação do armazenamento nos sótãos, devendo, sempre que



possível, evitar-se a sua utilização ou mesmo o seu acesso. Em alternativa, deverá ser prevista a implementação de medidas de proteção adequadas nos vãos, de modo a reduzir a vulnerabilidade estrutural e o risco de ignição.

As caves representam igualmente pontos críticos, uma vez que, de forma recorrente, incluem janelas sem proteção ao nível do solo pelo exterior, acessos constituídos por elementos de madeira e são utilizadas para armazenamento. Nessas circunstâncias, é fundamental considerar um agravamento do nível de risco de incêndio associado, podendo justificar-se a imposição de medidas compensatórias específicas para mitigar esse risco.

Relativamente aos alpendres — frequentemente construídos em madeira —, deve evitar-se a aplicação de materiais suscetíveis à combustão, como o PVC. Recomenda-se, de preferência, a utilização de vernizes com propriedades retardantes da ignição, contribuindo para a melhoria do comportamento ao fogo destes elementos estruturais.



a)



b)



c)



d)



e)

Figura 6 – Elementos construtivos vulneráveis

A figura 6 mostra outros elementos construtivos vulneráveis, como sejam as pérgolas, alpendres revestidos a madeira ou PVC, sótãos e caves. Todos estes elementos devem ser alvo de um rigoroso escrutínio para evitar a penetração das chamas e partículas incandescentes para o interior das habitações.

#### 4.7– Instalações de risco agravado

É recomendável proibir a utilização de garrafas de armazenamento de gás e depósitos de combustível ao nível do solo e em espaços ao ar livre, devido aos riscos associados à exposição direta e à potencial volatilidade dos materiais armazenados.

Em situações excecionais, poderá ser admitida a instalação destes equipamentos, desde que sejam enterrados e confinados em células estanques, garantindo assim a segurança e a mitigação de possíveis fugas.



Nos casos em que exista rede de gás canalizado, deve ser instalada uma válvula de corte automático (eletroválvula) à entrada da habitação, ou, em alternativa, uma válvula de corte manual, de modo a permitir o encerramento rápido do fluxo de gás em caso de emergência.



a)



b)



c)



d)

Figura 7 – Instalações de risco agravado

As figuras 7a) e 7b) mostram a colocação de garrafas de gás no exterior. Naturalmente que na IUFC, será recomendável que a solução para o armário seja em alvenaria, em vez de armário metálico. Na Figura 7c), mostra-se a colocação recomendável de depósitos de gás, totalmente enterrados. A evitar ou a interditar, a figura 7d) aponta a existência de lenha e outros materiais junto das fachadas.

Naturalmente, deve ser expressamente interdita a acumulação de materiais combustíveis, como lenha ou outros, nas proximidades das fachadas dos edifícios, de forma a prevenir a propagação de incêndios e reduzir o risco de ignição acidental.

#### 4.8 Síntese

A análise demonstra que as soluções construtivas em betão armado, alvenaria ou pedra natural constituem opções mais seguras face à ação do fogo exterior. Pelo contrário, materiais combustíveis ou termoplásticos, como a madeira sem tratamento ou revestimentos de PVC, aumentam significativamente a vulnerabilidade da edificação. A implementação de medidas passivas, como barreiras corta-fogo, escolha criteriosa de materiais e correta manutenção das fachadas, é determinante para a resiliência das construções na IUFC.

## 5. CONCLUSÕES

O estudo evidencia a importância da conceção construtiva na mitigação dos riscos associados aos incêndios florestais. A aplicação de medidas passivas de proteção — desde a escolha de materiais resistentes até à criação



de zonas de segurança perimetral — é essencial para reduzir a propagação do fogo e proteger vidas humanas e património. Deve promover-se, a nível técnico e regulamentar, a integração de critérios de resistência ao fogo e reação ao fogo no processo de licenciamento de edifícios situados em áreas de interface urbano-florestal (tal como o Despacho N.º 8591/2022), e adicionalmente promover ações de informação junto das populações, abrangendo as construções existentes, ou alvo de obras sem exigência de controle prévio camarário.

## 6. REFERÊNCIAS

- [1] Decreto-Lei n.º 82/2021, de 13 de outubro — Sistema de Gestão Integrada de Fogos Rurais.
- [2] Despacho n.º 8591/2022, da Autoridade Nacional de Emergência e Proteção Civil (ANEPC).
- [3] Decreto-Lei n.º 555/99, de 16 de dezembro — Regime Jurídico da Urbanização e Edificação.
- [4] Correia, A. M. (2024). Análise de Vulnerabilidade das Construções na Interface Urbano-Florestal. ISEC, Coimbra.
- [5] Pinto, L., & Almeida, R. (2020). Medidas Passivas de Proteção em Edifícios Habitacionais. Revista Engenharia Civil, n.º 75, 43–56.



**9JORNINC-4JORPROCIV**

9<sup>ª</sup> Jornadas de Segurança aos Incêndios Urbanos  
4<sup>ª</sup> Jornadas de Proteção Civil

Coimbra, 7 de novembro de 2025



## COMPETÊNCIA TÉCNICA E DOMÍNIO CIENTÍFICO NA AVALIAÇÃO DO RISCO DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS (ARDA)



**Paulo Prata Ramos**  
§§§§§  
Projetista SCIE  
ETU Fire Safety  
Consultants



**Diogo Teixeira**\*\*\*\*\*  
Projetista SCIE  
A400 – Projetistas e  
Consultores

### SUMÁRIO

A Nota Técnica nº 29, publicada pela ANEPC, veio a introduzir a necessidade de, no âmbito da elaboração de projetos de SCIE, desenvolver e submeter à apreciação da ANEPC uma Análise de Risco de Descargas Atmosféricas (ARDA). Todavia consta-se que não existe uma real fundamentação técnica para fazer a ARDA nem respaldo legal para solicitar a sua junção ao projeto de SCIE.

**PALAVRAS-CHAVE:** ARDA; SPDA; RT-SCIE; RJ-SCIE.

### 1. INTRODUÇÃO

A Nota Técnica nº 29, adiante referida apenas como “NT”, foi desenvolvida e publicada pela ANEPC. Esta NT veio a introduzir a necessidade de, no âmbito da elaboração de projetos de Segurança Contra Incêndios em Edifícios (SCIE), desenvolver e submeter à apreciação da ANEPC uma Análise de Risco de Descargas Atmosféricas (ARDA).

A avaliação do risco de descargas atmosféricas (ARDA), que é parte integrante dos Sistemas de proteção contra descargas atmosféricas (SPDA) é, em si mesma, uma componente técnica relevante da segurança de infraestruturas, uma vez que visa a proteção de pessoas, bens e equipamentos contra os efeitos diretos e indiretos de descargas atmosféricas. Contudo, esta avaliação não está diretamente relacionada com a génese ou propagação de incêndios em edifícios, sendo uma matéria primordialmente associada à engenharia eletrotécnica, em particular à proteção contra sobretensões e descargas atmosféricas, conforme definido nas normas IEC 62305 e NP EN 62305.

Dados de organismos como a NFPA (National Fire Protection Association) indicam que menos de 1% dos incêndios residenciais nos EUA têm origem em descargas atmosféricas, maioritariamente em edifícios de madeira, uma realidade distinta da construção corrente em Portugal, assente em estruturas de betão armado e alvenaria. Neste

---

§§§§§ paulo.ramos@etu.pt

\*\*\*\*\* diogo.teixeira@a400.pt



contexto, torna-se discutível que a ANEPC — entidade com competências na gestão do risco de incêndio e pânico — assumia responsabilidades na avaliação de risco de natureza eletrotécnica. A Direção-Geral de Energia e Geologia (DGEG) seria, por razões de competência técnica e institucional, a entidade mais adequada para regular e supervisionar as metodologias e requisitos técnicos associados à SPDA, dado o enquadramento destas matérias.

A atribuição desta responsabilidade à ANEPC representa, assim, um desvio conceptual face ao objeto do Regime Jurídico da SCIE (RJ-SCIE), que se centra na prevenção de incêndios e não na gestão de riscos elétricos.

## 2. METODOLOGIA DE ELABORAÇÃO

A elaboração da NT esteve a cargo de um grupo de trabalho compreendendo profissionais de várias entidades, nomeadamente ANEPC, DGEG, CPI, IEP, AGEFE e membros das CTE 37 e 81. Não foram consultadas ou chamadas a pronunciar-se a Comissão de Acompanhamento do Regime Jurídico de Segurança Contra Incêndio em Edifícios (adiante referida como “CA”), nem nenhuma das entidades que dela fazem parte (APSEI, LNEC, OE, OET, OA, ANMP, INCI e representantes dos Governos Regionais das Regiões Autónomas dos Açores e da Madeira). O envolvimento da CA faria todo o sentido no âmbito das suas competências. Independentemente da consulta à CA, parece-nos que teria sido da máxima importância auscultar as Ordens Profissionais – Ordem dos Arquitetos (OA), Ordem dos Engenheiros (OE) e Ordem dos Engenheiros Técnicos (OET) –, dado que são organismos do Estado, que representam os projetistas nas diferentes áreas, incluindo a SCIE. A visão das Ordens teria sido crucial para aferir a razoabilidade e aplicabilidade da NT, bem como a consistência técnica e regulamentar.

## 3. ENQUADRAMENTO REGULAMENTAR, ÂMBITO E ABRANGÊNCIA DAS MEDIDAS

As instalações de para-raios são referidas no artigo 191.º do Regulamento Técnico de Segurança Contra Incêndios em Edifícios (RT-SCIE) nos seguintes termos (sublinhado nosso):

*“Os edifícios em relação aos quais as descargas atmosféricas constituem um risco significativo de incêndio devem ser dotados de uma instalação de para-raios, de acordo com os critérios técnicos aplicáveis.”*

Da redação fica claro o seguinte:

- Essa instalação diz respeito apenas a edifícios e não a recintos, ao contrário do que é referido na própria NT e nos esclarecimentos constante nas “perguntas frequentes” disponíveis no site da ANEPC; assim a NT pretende fazer um alargamento do âmbito de aplicação que vai muito além do que está explicitamente referido no RT-SCIE;
- Que a instalação de para-raios só é necessária se as descargas atmosféricas apresentarem um “risco significativo de incêndio”; ora “significativo” quer dizer “expressivo” e “relevante”, pelo que, se o risco de incêndio decorrente das descargas atmosferas for “corrente” ou “insignificante”, não deveria ser necessário o para-raios;
- Que a proteção exigível é de para-raios, que é um sistema de proteção externo, sendo que a NT refere adicionalmente a necessidade de sistemas de proteção interna, que não são referidos no RT-SCIE.

Importa sublinhar que a terminologia usada na NT (nomeadamente “proteção externa” e “proteção interna”) deriva diretamente da IEC 62305-3 e 62305-4, e não do corpo regulamentar da SCIE. O RT-SCIE refere apenas “instalações de para-raios”, sem distinguir ou exigir sistemas internos de proteção contra sobretensões, o que reforça que o seu objetivo é a mitigação de ignição por descargas diretas e não a proteção eletrotécnica global.

Por outro lado, a NP EN 62305-2:2012, na qual se baseia grandemente a NT, além de se centrar na salvaguarda da vida humana e património, pretende salvaguardar de igual a proteção da propriedade e a continuidade dos serviços ao público, que não fazem parte dos princípios gerais da SCIE enunciados no n.º 1 do artigo 4.º do RJ-SCIE.



Constata-se que o âmbito e abrangência da NT n.º 29 ultrapassam claramente o articulado no artigo 191.º do RT-SCIE, incorporando critérios próprios das normas e da engenharia eletrotécnica, e não de princípios da SCIE.

Por último, é importante referir que a NT n.º 29 não traz informação nova, relevante e distinta, do já previsto na NP EN 62305. O que traz de diferente à comunidade, é a conexão “clara” entre as diferentes utilizações-tipo às exigências de implementação da SPDA.

#### 4. REFERENCIAL NORMATIVO INTERNACIONAL

Como se disse, a NT baseia-se parcialmente na NP EN 62305-2:2012, que transpôs para Portugal uma norma europeia, que por sua vez é a transposição da norma IEC com o mesmo número.

Importa referir que a norma IEC, que serviu de referencial, foi objeto de uma revisão bastante profunda, com a publicação da norma IEC 62305-2:2024, introduzindo alterações significativas na metodologia de avaliação do risco. Assim, quando a ANEPC elaborou a NT em 2022, o referencial técnico utilizado já tinha mais de uma década e encontrava-se em fase de substituição, o que compromete a atualidade científica do documento

Por fim, interessa referir que a tradução para português feita para a NP EN 62305-2:2012 tem algumas traduções literais que podem induzir em erro os leitores menos avisados, sendo disso exemplo a tradução de “*structures*” para “*estruturas*”, sendo que no sentido na norma essa palavra define “construções” ou “edifícios”.

#### 5. INCIDÊNCIA ESTATÍSTICA DE INCÊNDIOS CAUSADOS POR DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

Atualmente desconhece-se a existência de registos de incêndios urbanos que tenham sido causados por descargas atmosféricas. Isso é aliás confirmado em Portugal pela investigação pós-incêndios. Relatórios da ANEPC e dados do instituto Português do mar e da Atmosfera (IPMA) não identificam ocorrências urbanas relevantes com esta origem.

Países que têm estatísticas sobre esta matéria, como é o caso dos EUA, referem que cerca de 1% dos incêndios residenciais têm origem em descargas atmosféricas<sup>++++</sup>. Todavia, no caso particular, isso deve-se ao sistema construtivo dos edifícios, que por serem maioritariamente em madeira são consideravelmente mais propensos a incêndios de origem em descargas atmosféricas (mas a razão está diretamente associada ao facto das estruturas de madeira apresentarem baixa resistência térmica), conforme é referido na norma NFPA 921<sup>++++</sup> e de resto também está implícito na NT. Acresce que desse 1% de ocorrências, grande parte dos incêndios são focos localizados nos quadros ou elementos próximos, sem prejuízos relevantes, e parte dos incêndios não decorrem de descargas atmosféricas nos edifícios, mas em linhas de abastecimento elétrico<sup>§§§§§</sup> que causam picos na rede elétrica, ou seja, um para-raios no edifício teria impacto manifestamente baixo.

Face aos sistemas construtivos correntes em Portugal, assentes sobretudo em estruturas de betão, alvenaria de tijolo e revestimentos cimentícios ou de gesso, os incêndios em edifícios decorrentes de descargas atmosféricas serão seguramente inferiores a 0,1% das ocorrências. Daqui decorre que um “risco significativo de incêndio” (assim referido no artigo 191.º do RT-SCIE) não ocorre em construções correntes, mas apenas em algumas que apresentem fatores de risco especiais, como sendo construção em madeira ou edifícios com presença de atmosferas explosivas. Assim, a generalização da obrigatoriedade da ARDA a todas as utilizações-tipo e categorias de risco carece de base estatística e científica, e não encontra sustentação nas práticas internacionais.

<sup>++++</sup> Everts, B. Lightning Fires and Lightning Strikes. National Fire Protection Association. Fire Analysis and Research Division. 2010

<sup>++++</sup> NFPA 921 (2011) Guide for Fire and Explosion Investigations.

<sup>§§§§§</sup> Everts, B. op. cit., mas também implícito na NP EN 62305-2



## 6. VALOR LEGAL DAS NOTAS TÉCNICAS DA ANEPC

A ANEPC tem várias Notas Técnicas publicadas, de tipologias diferentes:

- Notas técnicas publicadas em Diário da República, em forma de Despacho, cujo valor legal decorre da sua referência noutros diplomas (Leis, Decretos-Lei ou Portarias);
- Notas técnica de carácter mais informal, não publicadas em Diário da República, que têm valor meramente informativo.

O RT-SCIE concede autorização à ANEPC para elaborar e publicar em Diário da República as seguintes notas técnicas, que por esse motivo têm força de lei:

- Nota Técnica n.º 8 — grau de prontidão dos meios de socorro, conforme n.º 4 do artigo 13.º do RT-SCIE
- Nota Técnica n.º 13 — redes secas e húmidas, conforme n.º 7 do artigo 168.º do RT-SCIE
- Nota Técnica n.º 14 — fontes abastecedoras de água para o serviço de incêndio, conforme n.º 2 do artigo 171.º do RT-SCIE
- Nota Técnica n.º 15 — centrais de bombagem para o serviço de incêndio, conforme n.º 2 do artigo 171.º do RT-SCIE;
- Nota Técnica n.º 16 — Sistemas Automáticos de Extinção de Incêndio por Água, conforme n.º 4 do artigo 172.º do RT-SCIE;
- Nota Técnica n.º 17 — Sistemas Automáticos de Extinção de Incêndio por Agentes Gasosos, conforme n.º 4 do artigo 172.º do RT-SCIE.

Contata-se que não está previsto no diploma a publicação de notas técnicas sobre para-raios ou sequer sobre instalações acessórias. Consequentemente, origina a que a NT n.º 29 não tenha base legal expressa que lhe confira carácter vinculativo, possuindo apenas valor interpretativo ou orientador.

## 7. OBRIGATORIEDADE DA ARDA NA INSTRUÇÃO DE PROCESSOS DE SCIE

As peças escritas e desenhadas que fazem parte de um projeto de SCIE, bem como a informação que devem conter, estão definidas no RJ-SCIE, com particular ênfase no Anexo IV do RJ-SCIE.

Nos termos do RJ-SCIE fazem parte do projeto de SCIE:

- Termo de responsabilidade do projetista (alínea a) do n.º 2 do artigo 6.º RJ-SCIE);
- Métodos de análise de risco quando se trate de edifícios de “perigosidade atípica” ou existentes com desconformidades (artigos 14.º e 14.º-A do RJ-SCIE); a ARDA não se enquadra nestes métodos de análise de risco
- Memória descritiva e justificativa (alínea a) do artigo 1.º do anexo IV do RJ-SCIE)
- Peças desenhadas (alíneas b) e c) do artigo 1.º do anexo IV do RJ-SCIE).

O artigo 2.º do anexo IV do RJ-SCIE refere de forma detalhada o conteúdo da memória descritiva, enumerando os vários sistemas de SCIE que devem ser descritos. Não é referida a necessidade de descrever os sistemas de para-raios, não sendo sequer mencionadas as “instalações acessórias”.

Daqui decorre que a exigência de uma ARDA na instrução do projeto de SCIE não tem respaldo legal. Adicionalmente, é importante lembrar que uma ARDA é uma análise de risco (risk management) e, de acordo com o RJ-SCIE, as análises de risco são aplicáveis ao abrigo do artigo 14º e 14º-A, não se prevendo nesse diploma a sua obrigatoriedade noutras circunstâncias.

Refere-se ainda que a aplicação “obrigatória” de uma NT com poder apenas orientador geram entraves processuais e incerteza jurídica para projetistas e promotores. Mais grave ainda, cria uma duplicidade de esferas de responsabilidades: a ANEPC, sem competência técnica na área da engenharia eletrotécnica, passa a avaliar



estudos de risco cuja análise exige conhecimento específico e; quaisquer projetistas ou outros profissionais, com ou sem capacidade técnica, passam a desenvolver análises de risco.

## 8. COMPETÊNCIA TÉCNICA PARA A SUA ELABORAÇÃO

A NT não refere qual a competência técnica necessária para a elaboração da ARDA. Todavia nas “*perguntas frequentes*” no site da ANEPC refere-se que a “*ARDA pode ser efetuada por qualquer técnico SCIE*”. Este entendimento é tecnicamente incorreto e juridicamente impreciso, uma vez que o termo “*técnico de SCIE*” não tem definição legal no RJ-SCIE nem em qualquer diploma complementa, presumindo-se por essa redação que possa incluir uma multiplicidade de profissionais além de projetistas.

A NT prevê a necessidade de ARDA para todos os edifícios e recintos de 2ª categoria de risco (CR) ou superior, ou de 1ª CR se forem da utilização tipo (UT) IV, V ou XII.

A NT prevê duas metodologias de desenvolvimento da ARDA:

- Cálculo risco é feito segundo a norma NP EN 62305-2;
- Método Simplificado.

Nos termos da NT, o método simplificado só pode ser empregue nas seguintes condições:

- O risco de incêndio é baixo, ou ordinário (“normal”), não importando qual é o risco de pânico, ou;
- O risco de incêndio é elevado, mas o risco de pânico baixo;
- Edifícios que não contenham produtos ou atmosferas explosivas;
- Edifícios que não apresentem perigo para o meio ambiente.

Nos termos da NT o risco de incêndio é elevado se acima dos 800 MJ/m<sup>2</sup>. Tendo em conta os valores de referência do Eurocódigo 1 (NP EN 1991-1-2, quadro E.4), apenas a UT I (habitação) e a UT XI (biblioteca e arquivos) são definidos como “risco de incêndio” elevado.

Quadro 1: Densidades de carga de incêndio [MJ/m<sup>2</sup>] para diferentes tipos de ocupação, retirado NP EN 1991-1-2, quadro E.4

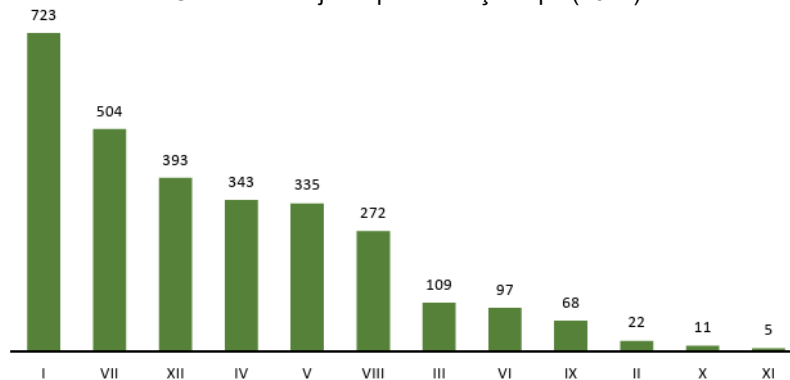
Ocupação	Média	Quantilho de 80 %
Habitação	780	948
Hospital (quarto)	230	280
Hotel (quarto)	310	377
Biblioteca	1500	1824
Escritório	420	511
Sala de aulas de uma escola	285	347
Centro comercial	600	730
Teatro (cinema)	300	365
Transporte (espaço público)	100	122

*NOTA: Admite-se uma distribuição de Gumbel para o quantilho de 80 %.*

Se nos focamos no referido no Anuário da ANEPC de 2024, a UT I é a que apresenta maior número de projetos submetidos à apreciação, conforme gráfico abaixo. Tendo em conta que muitos edifícios da UT I são de utilização mista, o risco de incêndio elevado abarcará uma quantidade apreciável de projetos.



Gráfico 1: Projetos por utilização-tipo (2024)



No que concerne ao “risco de pânico”, este é considerado baixo se o edifício tiver menos de 100 ocupantes (e limitado a dois pisos). Tendo em conta que nas UT III, IV, V, VI, VII, VIII, IX e X de 2<sup>a</sup> CR têm mais de 100 ocupantes, em todas essas UT o “risco de pânico” é médio, podendo em última instância ser elevado caso se ultrapasse as 1000 pessoas nesses casos.

Em termos práticos, o método simplificado só poderá ser usados em projetos da UT II e XII (com algumas ressalvas face à possibilidade de existência de produtos ou atmosferas perigosas), sendo que nas demais UT, ou o “risco de incêndio” é elevado (mais de 800 MJ/m<sup>2</sup>) ou o “risco de pânico” é normal ou superior. Assim, na vasta generalidade dos projetos de SCIE, terá de se recorrer ao cálculo de risco segundo a norma NP EN 62305-2.

A NP EN 62305-2 transpõe para Portugal a norma com o mesmo número, publicada pela IEC (*International Electrotechnical Commission*) e que foi posteriormente incorporada como norma europeia. É uma norma do domínio científico da eletrotécnica, pelo que não deve, no nosso entender, ser aplicada por projetistas de outras áreas, e muito menos por “técnicos de SCIE”, como referido no site da ANEPC.

Por fim, importa referir que os sistemas de proteção contra descargas atmosféricas, a ARDA ou sequer as instalações acessórias não constam do programa do curso de formação para certificação de projetistas de 2<sup>a</sup> a 4<sup>a</sup> CR, o que nos leva a um problema de competência técnica.

A aplicação correta da NP EN 62305-2 requer formação específica em engenharia eletrotécnica, domínio de conceitos como densidade de descargas (Ng), zonas de proteção (LPZ) e fatores de redução de risco, o que a torna impraticável para profissionais de outras áreas sem preparação técnica adequada. Deste modo, a elaboração de uma análise de risco ARDA deveria ser da competência exclusiva de projetistas eletrotécnicos qualificados, devidamente inscritos nas Ordens Profissionais.

## 9. FUNÇÃO DOS PARA-RAIOS NO ÂMBITO DA SCIE

Um para-raios não é um equipamento de SCIE, da mesma forma que o é um detetor de incêndios, um extintor ou um carretel. Trata-se de uma instalação técnica de proteção eletrotécnica externa, concebida para conduzir descargas elétricas à terra e reduzir a probabilidade de danos elétricos ou estruturais aos edifícios.

Se atentarmos na tradição regulamentar portuguesa, nomeadamente nos regulamentos mais recentes e sólidos (DL 409/98, DL 410/98 e DL 414/98), os equipamentos de proteção contra descargas atmosféricas surgiam no capítulo de instalações técnicas, mas sempre num subcapítulo à parte designado de “*Outras instalações técnicas*”, e que no RT-SCIE passou a designar-se “*Instalações acessórias*”, refletindo uma separação clara entre riscos elétricos e riscos de incêndio. É interessante ver a definição de acessório<sup>\*\*\*\*\*</sup>: “*Que se junta ou incorpora por*

<sup>\*\*\*\*\*</sup> in Dicionário Priberam da Língua Portuguesa



*acessão; que se pode dispensar; que não é muito importante*". Ou seja, o legislador, ao classificar os para-raios como instalações acessórias, afirma a sua irrelevância do ponto de vista da SCIE.

Assim, atribuir aos para-raios o mesmo estatuto funcional de um sistema de deteção ou extinção automática constitui uma extrapolação técnica sem fundamento regulamentar. O seu papel é, no máximo, de mitigação indireta do risco de ignição, e não de prevenção ou controlo ativo de um incêndio.

## 10. CONCLUSÕES

Com base na análise técnica, normativa e científica desenvolvida, conclui-se o seguinte:

- A Análise de Risco de Descargas Atmosféricas (ARDA) constitui uma ferramenta técnica relevante no domínio da engenharia eletrotécnica, essencial para a proteção de pessoas, equipamentos e infraestruturas contra sobretensões e impactos elétricos diretos ou indiretos;
- A competência técnica e institucional para regulamentar e supervisionar a ARDA deveria ter sido atribuída à Direção-Geral de Energia e Geologia (DGEG), e não à ANEPC, uma vez que esta matéria integra o domínio da segurança das instalações elétricas e da proteção contra sobretensões;
- A elaboração de uma ARDA requer competências técnicas específicas em engenharia eletrotécnica, domínio de normas IEC 62305 e NFPA 780 e conhecimento em análise de risco elétrico, devendo, portanto, ser desenvolvida por projetistas eletrotécnicos qualificados, inscritos nas respetivas Ordens Profissionais (OE ou OET), e não por quaisquer "técnicos de SCIE";
- Os sistemas de proteção contra descargas atmosféricas (SPDA) devem continuar a ser classificados como "instalações acessórias" no contexto da SCIE, conforme previsto no RT-SCIE, não constituindo sistemas de segurança contra incêndio propriamente ditos;
- Não existe base estatística que indique que as descargas atmosféricas causem incêndios em edifícios;
- Não foi consultada, a nível técnico, a Comissão de Acompanhamento ou as Ordens (OA, OE e OET) sobre a Nota Técnica n.º 29, não tendo essa sido validada por nenhuma das entidades que dela fazem parte;
- O âmbito e abrangência da Nota Técnica n.º 29 ultrapassam claramente o articulado do artigo 191.º do RT-SCIE;
- A Nota Técnica n.º 29 não tem valor legal, mas sim orientador, dado não haver qualquer diploma que preveja a sua elaboração e publicação em Diário da República;
- A exigência de apresentação de ARDA não tem respaldo legal no RJ-SCIE ou RT-SCIE;

Em complemento, importa refletir e clarificar um conjunto de questões fundamentais que permanecem sem resposta clara:

- Quais os edifícios para os quais as descargas atmosféricas constituem um risco significativo de incêndio?
- Que entidade deve definir e disponibilizar o mapeamento nacional de risco de descargas atmosféricas, com base em dados de incidência atualizados e metodologicamente validados (IPMA, EUMETSAT, CIGRE, etc.)?
- Como se pode estabelecer, com base científica e estatística, a relação direta entre descargas atmosféricas e incêndios urbanos?
- E, finalmente, como assegurar a competência técnica e científica por forma a assegurar rigor técnico e enquadramento legal?

Em síntese e em bom rigor, a inclusão da ARDA no âmbito dos projetos de SCIE carece de fundamentação técnica, estatística e jurídica. A sua regulamentação deverá ser realocada ao domínio da engenharia eletrotécnica, sob a supervisão da DGEG, garantindo coerência normativa, competência técnica e rigor científico.



## REFERÊNCIAS

Decreto-Lei nº220/2008 de 12 de novembro, que publica o Regime Jurídico de Segurança Contra Incêndios em Edifícios, na sua redação atual.

Portaria nº 1532/2008 de 29 de dezembro, que publica o Regulamento Técnico de Segurança Contra Incêndios em Edifícios, na sua redação atual.

Nota Técnica nº 29 da ANEPC - “Proteção Contra Descargas Atmosféricas - Para-Raios”, ANEPC, outubro de 2022.

Análise do risco de descargas atmosféricas – Guia de avaliação do risco – Método simplificado, IEP (Instituto Eletrotécnico Português).

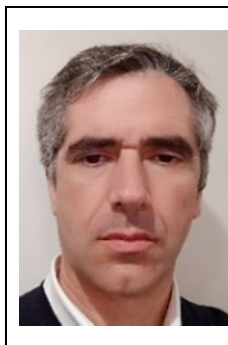
Guia prático Norma NP EN 62305-2: Proteção contra descargas atmosféricas (Parte 2: Avaliação do risco), IEP (Instituto Eletrotécnico Português).

NP EN 62305-2:2012 – Proteção contra Descargas Atmosféricas – Avaliação do risco

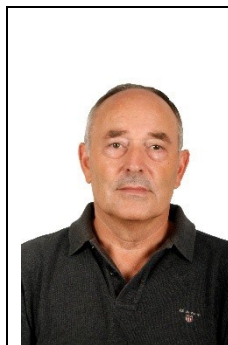
IEC 62305-2:2024 Protection against lightning – Part 2: Risk management



## APOIO À DECISÃO NA ANÁLISE DE RISCO DE EXPLOÇÃO DE POEIRAS NA INDÚSTRIA DE PASTA E PAPEL EM PORTUGAL

**Aurélio Pereira**

††††††

Estudante Mestrado  
DEC-UC  
/Coimbra/Portugal**José Góis**Professor/DEM-UC  
Coimbra/Portugal

### SUMÁRIO

A indústria da pasta e do papel é um pilar estratégico da economia portuguesa, destacando-se pela geração de valor e pela importância na bioeconomia. A competitividade do setor depende agora tanto do desempenho económico como da proteção das pessoas, do ambiente e do património. Cresce a exigência social por indústrias que controlem eficazmente os riscos, sobretudo de acidentes com forte impacto económico, ambiental e social, como é o caso de explosões. Assim, a cultura de segurança tornou-se essencial, especialmente face aos riscos associados à manipulação de poeiras combustíveis em processos de biomassa. Numa altura em que as indústrias de fabrico de pasta e papel em Portugal encetam mudanças nas fontes de energia, com a passagem para queima de derivados de madeira e biomassa, a adoção de boas práticas de gestão de risco é indispensável para manter o nível de confiança dos trabalhadores e de exigência da sociedade. Este trabalho realiza uma revisão sobre os mecanismos de explosão de poeiras, normas, medidas de mitigação e exigências legais. Analisa também métodos de avaliação de risco, bem como o contributo da análise experimental e da simulação numérica no apoio à tomada de decisão, apresentando algumas ferramentas de suporte a esse processo.

**PALAVRAS-CHAVE:** avaliação de risco; explosão; indústria papelreira; poeiras; segurança.

### 1. INTRODUÇÃO

Em numerosos processos industriais, a formação de poeiras combustíveis — suspensas no ar ou acumuladas sob a forma de depósitos — representa um enorme potencial de incêndio ou explosão na presença de oxigénio. Embora raros, estes fenómenos possuem um elevado poder destrutivo, constituindo um sério risco para a segurança de pessoas e bens. A complexidade das condições que conduzem a tais eventos pode, contudo, originar dois comportamentos igualmente prejudiciais: a adoção de medidas excessivas e desnecessárias ou, em sentido oposto, a inércia na tomada de decisão.

---

†††††† Autor correspondente – Universidade de Coimbra, Departamento de Engenharia Civil, Rua Luís Reis Santos, Coimbra, Portugal; email: [aueliopereira@sapo.pt](mailto:aueliopereira@sapo.pt) <http://www.dec.uc.pt>



A indústria portuguesa da pasta e do papel que é um dos pilares da bioeconomia nacional, sustentando cadeias de valor florestais certificadas, gerando exportações de elevado valor acrescentado e promovendo práticas de economia circular, que envolvem a recuperação de produtos químicos, reutilização de água e conversão de resíduos lenhocelulósicos em energia renovável, está entre as que apresentam potencial para a formação de poeiras combustíveis.

O aumento do uso de biomassa — como cascas, finos de madeira, “pellets” e lamas secas — para a geração de energia tem ampliado as fontes de emissão de partículas finas. Os sólidos particulados são especialmente adequados para operações de armazenamento, manuseamento, transporte e processamento. No entanto, a simples ação de converter um material sólido a granel num material particulado introduz novos perigos. Quando dispersas no ar, estas poeiras podem formar misturas explosivas sob determinadas condições, cuja previsão e controlo se revelam complexos devido à influência de múltiplos fatores, incluindo o tamanho das partículas, a concentração, a composição química e a presença de fontes de ignição.

O fenómeno das explosões de poeiras requer a presença simultânea de cinco fatores — representados no denominado “pentágono da explosão” — cujas variações dificultam a compreensão e a gestão eficaz do risco. Assim, a avaliação do risco de formação de atmosferas explosivas é, por conseguinte, um elemento fundamental na identificação de potenciais perigos nas instalações industriais, tornando-se por isso essencial aprofundar o conhecimento técnico, de modo a equilibrar a prevenção rigorosa com a operação segura e eficiente, evitando tanto a paralisia por excesso de precaução como a negligência operacional.

Os profissionais responsáveis pela segurança no trabalho enfrentam diariamente o desafio de antecipar e controlar riscos em ambientes onde coexistem poeiras combustíveis e processos energeticamente intensos. O aumento da utilização de biomassa, as metas de eficiência energética e as exigências legais reforçam a necessidade de sistematizar o conhecimento técnico disponível, convertendo-o em orientações práticas para engenheiros, gestores e técnicos de segurança.

Dada a diversidade de causas associadas às explosões, cabe também às autoridades competentes estabelecerem políticas e procedimentos de prevenção eficazes, pois essas políticas refletem-se diretamente nas empresas, traduzindo-se em custos e exigindo dos gestores uma postura prudente. É essencial, portanto, que as regulamentações incentivem a consideração equilibrada entre os aspetos económicos e a salvaguarda da segurança e da vida humana.

Apesar da existência de diversos métodos de avaliação de risco, persiste a ausência de uma síntese estruturada que oriente a seleção e aplicação adequada dessas ferramentas, de forma proporcional ao risco efetivo das operações industriais

O presente trabalho realiza uma revisão abrangente sobre os mecanismos associados às explosões de poeiras, bem como sobre as normas aplicáveis, as medidas de mitigação e as principais exigências legais. Adicionalmente, analisa diferentes métodos de avaliação de risco e explora o papel da análise experimental e da simulação numérica como instrumentos de apoio à tomada de decisão, apresentando ainda um conjunto de ferramentas que contribuem para uma gestão mais informada e eficaz do risco.

## **2. MECANISMOS DE EXPLOSÃO DE POEIRAS, NORMAS, MEDIDAS DE MITIGAÇÃO E EXIGÊNCIAS LEGAIS**

### **2.1 Mecanismos de explosão de poeiras**

Quando um pedaço de madeira é subdividido em fragmentos menores, a taxa de combustão aumenta em virtude do acréscimo da área total de contacto entre o material e o ar, o que facilita significativamente o processo de ignição. À medida que essa subdivisão prossegue até atingir partículas de pequenas dimensões — da ordem de 0,1 mm ou inferiores — e estas se dispersam no ar formando uma suspensão (ou nuvem) suficientemente extensa



para que cada partícula possa queimar sem restrições, a taxa de combustão torna-se extremamente elevada e a energia necessária para a ignição reduz-se substancialmente.

Lees [1] define uma explosão como uma libertação súbita e violenta de energia, cuja intensidade está diretamente relacionada com a taxa dessa libertação. Segundo Crowl e Louvar [2], bem como Cashdollar e Hertzberg [3], uma explosão corresponde a uma rápida libertação de energia que se dissipa através de diversos mecanismos, incluindo ondas de pressão, projeção de fragmentos, radiação térmica e energia acústica. De acordo com Silva [4], a explosão resulta de uma reação físico-química caracterizada por uma velocidade extremamente elevada, acompanhada por um aumento violento da pressão e da temperatura. Tal fenómeno ocorre porque a energia libertada é gerada num intervalo de tempo demasiado curto para ser dissipada à medida que se produz, propagando-se rapidamente através do meio — seja ele ar ou água — e originando variações de pressão responsáveis pela formação da onda explosiva.

A explosão pode ser entendida como uma reação físico-química de elevada velocidade, que se manifesta essencialmente sob duas formas:

- Deflagração, quando a velocidade de reação do material energético é inferior à velocidade do som nesse mesmo material;
- Detonação, quando a velocidade de reação excede a velocidade do som, ocorrendo simultaneamente a propagação de uma onda de choque à frente da reação.

A maioria das explosões de poeiras corresponde a fenómenos de deflagração, nos quais a chama se propaga a uma velocidade inferior à do som no meio não reagido, sendo precedida por uma onda de pressão. Em situações de confinamento reduzido ou inexistente, o fenómeno pode resultar num incêndio rápido, com potencial para originar incêndios secundários [5].

A transição de deflagração para detonação (DDT) pode ocorrer quando se verificam condições favoráveis, como a variação da geometria e da natureza do confinamento, o aumento da turbulência, a diminuição da granulometria das partículas e a adequação da concentração de poeira.

O denominado pentágono da explosão (Figura 1) representa graficamente as condições necessárias para a ocorrência de uma explosão de poeiras: combustível, oxidante, fonte de ignição, mistura ou dispersão e confinamento [6].



Figura 1: Pentágono da explosão de poeira (adaptado de NFPA).

Assim, um pré-requisito fundamental para a ocorrência de uma explosão de poeiras é a formação de uma dispersão homogénea de partículas combustíveis num meio oxidante, originando uma mistura suspensa com potencial de combustão. Quando esta mistura é submetida a uma fonte de ignição e a reação se inicia, a propagação da frente de chama através do meio resulta na libertação rápida de energia. A presença de confinamento, total ou parcial, impede a dissipação dessa energia, promovendo o desenvolvimento de uma sobrepressão que se manifesta sob a forma de uma explosão de poeiras.

## 2.2 Normas para caracterização experimental da explosividade de poeiras



De acordo com a NFPA 652, poeira combustível inclui pós, finos, fibras e materiais similares. Tradicionalmente, as poeiras eram definidas como materiais com partículas de 420 µm ou menores — ou seja, capazes de passar através de uma peneira padrão nº 40 dos EUA. Para garantir consistência com outros padrões internacionais, passou-se a considerar 500 µm (capazes de passar por uma peneira padrão nº 35 dos EUA) como critério adequado de tamanho.

Segundo a norma europeia EN ISO/IEC 80079-20-2:2016, são consideradas poeiras explosivas as partículas sólidas finamente divididas, com tamanho nominal inferior a 500 µm, capazes de formar misturas explosivas com o ar em condições atmosféricas e de temperatura padrão, incluindo poeiras e granalha conforme definido na ISO 4225:2020, bem como partículas ocas [7].

A Norma Europeia EN 14034-3:2006 define poeira como “partículas sólidas pequenas que permanecem suspensas na atmosfera por um período antes de se depositarem devido ao seu próprio peso”, cujo tamanho máximo não exceda 500 µm. Poeiras combustíveis são, por sua vez, definidas como “aquelas capazes de sofrer uma reação exotérmica com o ar, quando inflamadas” [8].

A avaliação do risco de incêndio ou explosão de uma amostra de material combustível pode ser realizada com base em metodologias de ensaio de triagem, como a ASTM E1226 – Método de Ensaio Padrão para Explosividade de Nuvens de Poeira. Alternativamente, métodos padronizados como a ASTM E1515 – Método de Ensaio Padrão para Concentração Mínima Explosiva de Poeiras Combustíveis podem ser utilizados para determinar a explosividade da poeira [9].

A ASTM E1226 estabelece procedimentos para ensaios laboratoriais que avaliam os principais parâmetros de deflagração de poeiras, enquanto a ASTM E1515 define o procedimento para determinação da concentração mínima de poeira no ar capaz de sustentar uma explosão. O ensaio em câmara de 20 litros (ASTM E1226) é projetado para gerar dados que possam ser correlacionados com os obtidos em uma câmara de 1 m<sup>3</sup>, conforme descrito na ISO 6184-1:1985.

De acordo com a ASTM E1226, “vários fatores — como concentração, uniformidade de dispersão, turbulência de ignição, idade da amostra, entre outros — podem influenciar os resultados do ensaio. Por esse motivo, o vaso de ensaio utilizado para trabalhos de rotina deve ser padronizado com amostras de poeira cujos parâmetros K<sub>st</sub> e P<sub>max</sub> sejam previamente conhecidos na câmara de 1 m<sup>3</sup>” [10–12].

A NFPA 68 também reconhece este desafio, observando que “o aparelho de ensaio de 20 litros é projetado para simular os resultados da câmara de 1 m<sup>3</sup>; no entanto, a descarga do ignitor dificulta a determinação de valores de K<sub>st</sub> inferiores a 50 bar·m/s. Quando se espera que o material produza valores abaixo deste limiar, os ensaios realizados numa câmara de 1 m<sup>3</sup> podem resultar em valores ainda menores” [13].

Os dados de ensaio obtidos em recipientes esféricos com ignição central podem ser escalonados pela Eq. 1:

$$K_{st} = \left( \frac{dP}{dt} \right)_{\max} * V^{1/3} \quad (1)$$

em que K<sub>st</sub> é o parâmetro de poeira combustível, (dP/dt)<sub>max</sub> é a taxa máxima de aumento de pressão medida no recipiente de ensaio (bar/s) e V é o volume do recipiente de ensaio (m<sup>3</sup>). Esta relação mantém-se razoavelmente correta para esferas com um volume de pelo menos 20 L. Uma grande parte dos métodos de concepção da proteção contra explosões tem sido baseados em dados de K<sub>st</sub> [14]. No entanto, é recomendável que o K<sub>st</sub> seja obtido utilizando dados de equipamento com dimensão adequada [15].

Os materiais capazes de causar explosões de poeiras incluem substâncias orgânicas naturais (como cereais, linho, açúcar, entre outros), materiais orgânicos sintéticos (plásticos, pigmentos orgânicos, pesticidas, entre outros), bem como carvão, turfa e metais (alumínio, magnésio, zinco, ferro, entre outros). A NFPA 652, norma que aborda os



fundamentos das poeiras explosivas, apresenta no Anexo A uma lista de materiais com potencial para formar misturas de poeira explosiva [8]. A consulta desta lista permite identificar os parâmetros de inflamabilidade e explosividade dessas substâncias, fornecendo informações sobre a sua reatividade e periculosidade típica [4].

Embora a NFPA 70 não trate diretamente de explosões de poeiras, a norma classifica locais com risco potencial com base nas propriedades de gases inflamáveis, vapores de líquidos inflamáveis, vapores de líquidos combustíveis, poeiras combustíveis ou fibras/partículas presentes, bem como na probabilidade da presença de concentrações inflamáveis ou combustíveis [16].

No contexto europeu, a EN 60079 corresponde a um conjunto de normas que estabelece os requisitos para a classificação de áreas com risco de explosão e para a seleção de equipamentos adequados a essas zonas.

Para além das normas mencionadas, existe um amplo conjunto de normas complementares destinadas a apoiar a caracterização da explosividade de poeiras.

### **2.3 Medidas de mitigação e principais exigências legais**

No contexto da segurança industrial, é fundamental reduzir os efeitos adversos de uma eventual explosão de poeira, quer através de equipamentos à prova de explosão, isolamento, supressão ou corta-chamas, quer mediante o controlo da explosão por sistemas de alívio de pressão ou válvulas sem chama, de modo a proteger tanto os trabalhadores como os equipamentos contra danos severos ou destruição [17].

Em Portugal, a regulamentação nacional integra diversas diretivas europeias aplicáveis a atmosferas potencialmente explosivas. A Diretiva 94/9/CE, dirigida a fabricantes de equipamentos, estabelece regras e requisitos para aparelhos e sistemas de proteção, sendo posteriormente alterada pela Diretiva 2014/34/EU e transposta para a legislação nacional pelo Decreto-Lei n.º 111-C/2017, que define critérios de conformidade e procedimentos de exame de equipamentos [18]. O âmbito desta diretiva inclui ainda dispositivos de segurança, controlo e regulação utilizados fora de atmosferas explosivas, desde que contribuam para o funcionamento seguro dos sistemas de proteção. Paralelamente, o Decreto-Lei n.º 236/2003 transpõe para a legislação nacional a Diretiva 1999/92/CE, que estabelece prescrições mínimas para a proteção da saúde e segurança de trabalhadores expostos a atmosferas explosivas [19]. Este diploma aborda, entre outros aspetos, a classificação de áreas perigosas, avaliação de risco de explosão, prevenção e proteção contra explosões, elaboração e atualização do Manual de Proteção contra Explosões, controlo de risco em áreas perigosas, critérios de seleção de equipamentos, sinalização das zonas classificadas, coordenação e gestão da emergência, bem como formação e informação dos trabalhadores.

Neste enquadramento, as empresas têm a responsabilidade de elaborar e manter atualizado o Manual de Proteção contra Explosões, recorrendo a um conjunto de documentos normativos e legais para identificar áreas de risco e definir medidas adequadas de prevenção e proteção, assegurando assim a segurança dos trabalhadores em atmosferas potencialmente explosivas.

## **3. MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DE RISCO E CONTRIBUTO DA ANÁLISE EXPERIMENTAL E DA SIMULAÇÃO**

### **3.1 Métodos de avaliação de risco**

A demanda crescente por energia, produtos químicos, matérias-primas e alimentos, alavancou o desenvolvimento tecnológico, conduzindo ao aumento da complexidade, tamanho e diversidade das instalações industriais de processamento. Consequentemente surgiram novos perigos e o tratamento dos riscos tornou-se ainda mais exigente, criando a necessidade de adaptar novas metodologias de análise [20].

Tradicionalmente a análise de risco foi sendo classificada em métodos qualitativos, semi-quantitativos, quantitativos e híbridos, cujas virtudes variam no grau de precisão e na forma de representar as incertezas



associadas aos processos perigosos. A análise qualitativa refere-se a uma representação não numérica e explicação baseada em atributos de gráficos, fluxogramas, diagramas e fontes de dados [20]. Entre estes salientam-se as abordagens de identificação e análise de perigos cujo método de identificação qualitativa de perigos mais conhecido e amplamente utilizado, é a Análise de Perigos e Operabilidade (HAZOP) [20].

O desenvolvimento mais significativo na modelação de acidentes surgiu nos anos 1990 com o Modelo do Queijo Suíço, proposto por James Reason [21]. Este modelo mostra como falhas humanas e organizacionais influenciam o processo de acidente, assumindo que há múltiplas causas simultâneas. É amplamente usado em indústrias de alto risco e no setor da aviação, para prevenir acidentes provocados por erro humano. Nesse modelo, fatias de queijo representam barreiras de segurança, e os buracos representam falhas latentes. Se os buracos das várias barreiras se alinham, todas falham, e o acidente acontece. Com base neste modelo, foi desenvolvida a Metodologia de Análise Sistemática de Ocorrências (SOAM) por Licu et al., [22], utilizada para investigar eventos que se configuram como desvios do funcionamento normal, devido a falhas humanas ou de equipamento.

A análise semi-quantitativa situa-se entre a análise quantitativa e a qualitativa e produz resultados aproximados, em vez de resultados exatos/absolutos. Este método de análise é útil quando a medição direta da segurança e do risco do processo não é possível, enquanto a inferência é aceitável. LOPA, acrónimo de Layer of Protection Analysis (Análise de Camadas de Proteção), é um método padronizado usado tipicamente como ferramenta de avaliação de risco, mas também pode ser aplicado na investigação de incidentes [23]. Desenvolvido para avaliar riscos industriais relacionados à segurança de processos, o conceito parte do princípio de que diferentes camadas de proteção são instaladas nas instalações (especialmente químicas) para reduzir os riscos de eventos indesejados, sendo uma metodologia de análise de perigos semi-quantitativa bem estabelecida e amplamente utilizada. A LOPA é geralmente conduzida em conjunto com outros métodos qualitativos de análise de perigos ou como análise pós-perigo.

As explosões de poeiras devem ser consideradas um risco de explosão muito grave na indústria de processos o que obriga a realizar uma avaliação sistemática do risco para melhor compreender a gravidade e a probabilidade de ocorrência de uma explosão de poeira. Um Método de Análise de Risco de Atalho (SCRAM) foi proposto por Davis et al. [24] para identificar a operação perigosa, as áreas e o risco de uma explosão de poeira. Neste método, a probabilidade de explosão foi estimada com base na probabilidade de ignição e na probabilidade de uma nuvem de poeira atingir o seu limite de inflamabilidade. Durante a análise de consequências, o efeito da explosão secundária foi também tido em consideração.

De acordo com Khan et al. [20], a maioria dos artigos de investigação centram-se no desenvolvimento de metodologias de análise de risco quantitativas. O principal benefício da análise quantitativa é que ela fornece uma estimativa numérica realista para melhor compreensão e tomada de decisão informada. A noção de "risco" na tomada de decisões relacionadas com a segurança remonta à Antiguidade, mas foi com a invenção da teoria das probabilidades por Pascal, em 1657, que o conceito passou a ser quantificado — originando o que hoje conhecemos como Avaliação Quantitativa de Risco (QRA) [20]. Uma revisão abrangente da evolução do conceito de risco antes do século XX foi realizada por Covello e Mumpower [25]. A Avaliação Probabilística de Risco (PRA), sinónimo de QRA, surgiu na indústria aeroespacial nos anos 1960 e foi posteriormente adotada pela indústria nuclear, especialmente para estudos de segurança de reatores [26].

A análise híbrida combina abordagens qualitativas e quantitativas. Difere da semi-quantitativa porque fornece resultados numéricos mais rigorosos e realistas. Além disso, nem toda análise semi-quantitativa inclui uma componente qualitativa; pode limitar-se a uma quantificação simples. Assim, a análise híbrida oferece uma avaliação de segurança de processo mais completa. Segundo Khan et al. [20] poucos modelos híbridos de identificação e análise de perigos foram propostos, mas entre eles destacam-se:

- fLOPA (fuzzy Layer of Protection Analysis) de Markowski & Mannan [27], depois adaptado a falhas em tubagens como pfLOPA (2009), e com Aplicações de fuzzy-LOPA na indústria do gás natural por Khalil et al., em 2012.
- Bayesian-LOPA referidos Yun et al., em 2009, que usa redes Bayesianas para lidar com dados de falhas em instalações de gás natural.



Análise de árvore de falhas (FTA) e extensões, para representar graficamente a propagação de erros e quantificar probabilidades recorrendo a teoria da fiabilidade e álgebra Booleana, foi criada em 1961 pelos Bell Telephone Laboratories para o sistema Minuteman. As indústrias aeroespacial e nuclear popularizaram o método. Para análise auxiliada por computador surgiram algoritmos BDD/TDD que permitem simplificar grandes árvores e foram desenvolvidas técnicas de modularização (KHIC) e interfaces gráficas facilitam a gestão de sistemas complexos [20]. Neste âmbito modulou-se análise Bow-Tie (BT) combinando técnicas de FTA (causas) e ETA (consequências) num diagrama único. Evoluiu para versões probabilísticas, fuzzy-BT e Bayesian BT, permitindo atualizar barreiras de segurança com dados do projeto arquitetónico.

Estruturas híbridas de avaliação de risco e métodos como Risk Influence Analysis (RIA) e SCAP integram identificação de perigos, quantificação e aplicação iterativa de medidas de segurança. Fuzzy-risk matrices e ferramentas como BART unem QRA simplificada e Bow-Tie para instalações onshore/offshore [20].

Em resumo, a última década viu uma evolução de métodos puramente qualitativos para ferramentas híbridas que integram FTA/ETA, lógica fuzzy, redes Bayesianas e actualização dinâmica — permitindo tratar incertezas, dependências temporais e comunicação visual (Bow-Tie) num quadro coerente de avaliação e gestão de risco.

### **3.2 Contributo da análise experimental e da simulação**

A análise e gestão de riscos em sistemas industriais complexos exige a aplicação de metodologias estruturadas que permitam identificar, avaliar e mitigar perigos de forma rigorosa. Abordagens como o HAZOP e o FMEA constituem ferramentas essenciais na identificação sistemática de desvios e modos de falha, enquanto metodologias como o Bow-Tie e o LOPA possibilitam a representação gráfica das barreiras de segurança e a avaliação semi-quantitativa do risco. Em paralelo, técnicas especializadas como o DHA, orientado para riscos de poeiras combustíveis, e a simulação CFD, direcionada para a modelação numérica de cenários de ignição e propagação, oferecem uma maior profundidade analítica. A aplicação destas metodologias, de forma isolada ou combinada, potencia uma visão integrada e abrangente, constituindo uma base sólida para a definição de medidas preventivas e estratégias de mitigação eficazes.

Experiências de simulação de contexto de risco em ambiente de laboratório podem ser criadas, elaborando mecanismos e sistemas que recriam condições específicas, para avaliar determinados parâmetros comportamentais decorrentes do manuseamento de poeiras, para determinar limites e valores de referência preventivos.

Nifuku e Enomoto [28], no sentido de compreenderem as causas das ocorrências de frequentes explosões em silos de cereais, atribuídas à eletricidade estática, elaboraram um trabalho de investigação acerca da carga eletrostática gerada durante o transporte pneumático de grãos de malte e da possibilidade de atingir níveis capazes de inflamar uma nuvem deste pó. Com o objetivo de conhecer e facilitar a caracterização dos parâmetros que definem o comportamento das poeiras explosivas, vários estudos foram realizados teorizando modelos preditivos e experimentais usando metodologias de análise laboratorial para validar os resultados obtidos.

Copelli et al. [29], realizaram um estudo para desenvolver e validar um modelo matemático capaz de prever o valor do índice de deflagração, para um determinado pó orgânico. A abordagem proposta foi validada através da comparação com valores experimentais medidos numa esfera de 20 L, sendo analisadas oito poeiras orgânicas diferentes: aspirina, cortiça, amido de milho, niacina, polietileno, poliestireno, açúcar e farinha de trigo.

No sentido de prever e controlar os estágios de pré-ignição em ensaios de explosividade, que tem como objetivo determinar tanto a inflamabilidade de uma nuvem de poeira combustível quanto as principais características da propagação da chama, Murillo [30] analisou o processo de dispersão da poeira combustível nas câmaras de explosão, tanto no tubo de Hartmann modificado como na esfera de 20 litros através de duas abordagens complementares.



Primeiramente, realizou-se uma caracterização experimental da evolução da nuvem de poeira, a qual permitiu identificar a evolução dos níveis de turbulência do fluxo de transporte gasoso e as principais variações na distribuição de tamanho de partículas da poeira combustível. Estes dados foram complementados pela análise do grau de segregação da poeira dispersa dentro das câmaras de ensaio. Em seguida, foi desenvolvido um conjunto de simulações numéricas CFD (Computational Fluid Dynamics) com base na formulação de Euler-Lagrange, com o objetivo de prever o comportamento da nuvem de poeira. O estudo considerou os principais mecanismos de interação, como a troca de momento entre as fases (acoplamento bidirecional) e o fenómeno de fragmentação das partículas de poeira. A formulação de Euler-Lagrange é uma abordagem amplamente utilizada em simulações computacionais multifásicas, especialmente em dinâmica de fluidos computacional (CFD), para descrever o comportamento conjunto de um fluido (fase contínua) e partículas sólidas dispersas (fase discreta) — como é o caso de nuvens de poeira combustível [31]. A dinâmica de fluidos computacional (CFD) é a técnica que utiliza programas informáticos para prever os fluxos de líquidos e gases com base nas equações que governam a teoria da conservação de massa, quantidade de movimento e energia. O CFD é utilizado sempre que existe a necessidade de prever o fluxo de fluidos e a transferência de calor, ou de compreender os efeitos do fluxo de fluidos num produto ou sistema. O CFD analisa diferentes propriedades do escoamento de fluidos, como a temperatura, a pressão, a velocidade e a densidade, e pode ser aplicado a uma vasta gama de problemas de engenharia em diversos setores [32].

Montero (Islas) [33] desenvolveu um estudo para desenvolver e validar um modelo computacional de dinâmica de fluidos para prever o comportamento de explosões de poeiras de biomassa. Ao contrário dos modelos convencionais, empregou uma estrutura Euler-Lagrangiana para simular a natureza discreta do escoamento em duas fases distintas (gás-partícula). Consciente de que as medidas preventivas desempenham tradicionalmente um papel vital na redução do risco de tais eventos, estratégias de mitigação também são empregues para minimizar o impacto das explosões de poeiras tais como os painéis de ventilação comumente utilizados para aliviar a sobrepressão e suprimir as explosões. No entanto, a determinação do tamanho apropriado das aberturas de ventilação é ainda objeto de controvérsia. Montero procurou desenvolver e validar um modelo computacional de dinâmica de fluidos, para apoio neste dimensionamento.

O modelo é baseado no programa de fonte aberta OpenFOAM e incorpora escoamento turbulento compressível, reações químicas, transferência de calor, radiação e combustão em fase gasosa. Para a simulação foram tidos em conta a composição da biomassa, o tamanho das partículas e inclui submodelos para a evaporação da humidade, desvolatilização e reações heterogéneas [34, 35].

Para validar o modelo, os resultados de CFD obtidos com o OpenFOAM foram inicialmente comparados com as medições experimentais de Dahoe et al. [36].

#### **4. CONCLUSÕES**

Devido à necessidade de assegurar a prevenção de riscos na indústria de pasta e papel — não apenas pela relevância socioeconómica deste setor, com significativo impacto na economia nacional, mas também em cumprimento da legislação nacional e europeia —, é essencial proteger vidas e bens. Nesse contexto, os decisores devem reunir informação de qualidade e recorrer às ferramentas mais adequadas para fundamentar a tomada de decisão. O presente estudo teve como objetivo fornecer dados que possam servir de base orientadora para a seleção das ferramentas mais úteis ou mais adaptadas à avaliação de risco.

Compreender os fenómenos associados à formação de atmosferas de poeiras potencialmente explosivas, bem como as suas características e os parâmetros que as influenciam, é fundamental para os profissionais e decisores conceberem ou escolher os sistemas preventivos mais adequados em função das especificidades dos processos industriais.

Embora existam diversas metodologias de avaliação de risco — incluindo abordagens qualitativas, semi-quantitativas, quantitativas e híbridas —, não existe uma metodologia específica para a avaliação do risco de explosão de poeiras. Por conseguinte, torna-se necessário integrar múltiplas ferramentas, incluindo ensaios experimentais baseados em metodologias normalizadas e simulação numérica. Perspectiva-se que o futuro da área passe pela digitalização de dados operacionais e pela integração de ferramentas de inteligência artificial na



simulação de processos, bem como na avaliação de soluções construtivas que permitam mitigar os efeitos de explosões de poeiras.

## 5. REFERÊNCIAS

- [1] Lees, Frank (2012)- Lees' Loss Prevention in the Process Industries-Hazard Identification, Assessment and Control-4th Edition - August 3, 2012-ISBN: 9780123971890
- [2] Crowl , Daniel A. And Louvar , Joseph L. (2015) - Segurança de Processos Químicos - Fundamentos e Aplicações- ISBN: 9788521625186
- [3] Cashdollar, K. L.; Hertzberg, M. (1986). Industrial Dust Explosions. 1<sup>a</sup>. ed. Pittsburgh: ASTM - special technical publication,
- [4] SILVA, W. C. L. (2007). Blast – Efeitos da Onda de Choque no Ser Humano e nas Estruturas. Tese de Mestrado – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.
- [5] Ogle, Russell A. (2017)- Dust Explosion Dynamics- Butterworth-Heinemann - ISBN: 978-0-12-803771-3
- [6] Eckhoff, R.K., (2013). Influence of dispersibility and coagulation on the dust explosion risk presented by powders consisting of nm-particles. Powder Technol. 239, 223–230.
- [7] BS EN ISO/IEC 80079-20-2:2016© ISO/IEC 2016
- [8] European Committee for Standardization - CEN/TC 305 - EN 14034-4:2004+A1- Determination of explosion characteristics of dust clouds – Part 4: Determination of the limiting oxygen concentration (LOC) of dust clouds
- [9] NFPA 652-Standard on the Fundamentals of Combustible Dust-2019 Edition-ISBN: 978-145592037-2
- [10] American Society for Testing and Materials: ASTM E1515-07 Standard Test Method for Minimum Explosible Concentration of Combustible Dusts
- [11] International Organization for Standardization. (1985) ISO 6184-1:1985 Explosion protection systems-Part 1: Determination of explosion indices of combustible dusts in air.
- [12] Vereins Deutscher Ingenieure e.V (2002) VDI 3673 Blatt 1- Pressure venting of dust explosions
- [13] NFPA 68®, Standard on Explosion Protection by Deflagration Venting (Quincy: National Fire Protection Association,2023)
- [14] Frank, W.L., Rodgers, S.A., 2012. NFPA Guide to Combustible Dusts. National Fire-Protection Association, Quincy, MA
- [15] Eckhoff, Rolf K. (2003) -Dust Explosions in the Process Industries- Third Edition- TableA.1
- [16] NFPA 70®, Código Elétrico Nacional (Quincy: National Fire Protection Association, 2021
- [17] Taveau, Jérôme. (2014). Application of Dust Explosion Protection Systems. Procedia Engineering. 84. 10.1016/j.proeng.2014.10.438.
- [18] Decreto-Lei N.º 111-C/2017, de 31/08, Regras de segurança que devem obedecer os aparelhos e sistemas de proteção destinados a ser utilizados em atmosferas potencialmente explosivas, Diário da República n.º 168/2017, 2º Suplemento, Série I de 2017/08/31.
- [19] Diretiva 1999/92/CE do Parlamento Europeu e do Conselho de 16 de Dezembro de 1999 relativa às prescrições mínimas destinadas a promover a melhoria da proteção da segurança e da saúde dos trabalhadores suscetíveis de serem expostos a riscos derivados de atmosferas explosivas (15.a diretiva especial, na aceção do n.º 1 do artigo 16.o da Diretiva 89/391/CEE)
- [20] Khan, Faisal & Rathnayaka, Samith & Ahmed, Salim. (2015). Methods and models in process safety and risk management: Past, present and future. Process Safety and Environmental Protection. 98. 116-147. 10.1016/j.psep.2015.07.005.
- [21] Reason, J., (1990). Human Error. University Press, Cambridge.
- [22] Licu, T., Cioran, F., Hayward, B., Lowe, A., (2007). EUROCONTROL—systemic occurrence analysis methodology (SOAM) a reason-based organisational methodology for analysing incidents and accidents. Reliab. Eng. Syst. Saf. 92, 1162–1169.
- [23] Fiorentini, Luca, (2022). Bow-Tie Industrial Risk Management Across Sectors A Barrier-Based Approach - First edition. | Hoboken, NJ: Wiley, 2022. | ISBN 9781119523826
- [24] Davis, S.G., Hinze, P.C., Hansen, O.R., Van Wingerden, K., (2011). Does your facility have a dust problem: methods for evaluating dust explosion hazards. J. Loss Prev. Process Ind. 24 (6), 837–846.
- [25] Covello, V.T., Mumpower, J., (1985). Risk analysis and risk management: an historical perspective. Risk Anal. 5 (2), 103–120.



- [26] Bedford, T., Cooke, R., (2001). Probabilistic Risk Analysis Foundations and Methods. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- [27] Markowski, A. (2010). Uncertainty aspects in process safety analysis. Journal of Loss Prevention in the Process Industries. <https://doi.org/10.1016/J.JLP.2010.02.005>
- [28] Nifuku, M., Enomoto, H. (2001) - Evaluation of the explosibility of malt grain dust based on static electrification during pneumatic transportation, Journal of Loss Prevention in the Process Industries 14 509–514
- [29] Copelli, S., Barozzi, M., Fumagalli, A., Scotton, M., Derudi, M., Rota, R., (2019). A predictive model for the estimation of the deflagration index of organic dusts.
- [30] Murillo, Carlos (2016). Experimental and numerical approaches to particles dispersion in a turbulent flow : application to dust explosions. Chemical and Process Engineering. Université de Lorraine,
- [31] Site da Internet da Khan Academy acedido em 20/05/2025: <https://www.khanacademy.org/math/multivariable-calculus/applications-of-multivariable-derivatives/constrained-optimization/a/lagrange-multipliers-single-constraint>
- [32] Site da Internet da Ansys acedido em 20/05/2025: <https://www.ansys.com/simulation-topics/what-is-computational-fluid-dynamics>
- [33] Montero, Alain Islas (2023) - CFD Modeling of dust explosions: Application to large-scale biomass silos - Department of Energy University of Oviedo
- [34] Christopher Greenshields. OpenFOAM v10 User Guide. London, UK: The OpenFOAM Foundation, 2022. url: <https://doc.cfd.direct/openfoam/user-guide-v10>.
- [35] Site da Internet da Kitware acedido em 25/05/2025: <https://www.kitware.com/openfoam-workshop-2021-leveraging-paraview/>
- [36] Dahoe, A. E.; Scarlett, B.; Cant, R. S.; Pegg, M. J. (2001). On the transient flow in the 20-liter explosion sphere - Journal of Loss Prevention in the Process Industries, ISSN: 0950-4230, Vol: 14, Issue: 6, Page: 475-487



## CFD ASSESSMENT ON SMOKE VENTILATION SYSTEMS' PERFORMANCE IN CAR PARKS: PORTUGUESE REGULATION vs STANDARDS

9<sup>as</sup> JORNADAS DE SEGURANÇA AOS INCÊNDIOS



**Miguel del Moral**

**Cejudo**

Projects Department

Director

S&P Ventilation

Systems

Spain

### SUMMARY

This article presents an assessment of the performance in case of fire of different technical solutions for car park ventilation systems. The considered options are presented along with their regulatory and normative frame and are analyzed by means of CFD simulation in case of fire.

Results presented in this article are extracted from *Libro Blanco de Ventilación en Aparcamientos*, by Lozano, del Moral, Rodriguez and Valladares, and adapted so they can be easily extrapolated to Portuguese regulation.

**KEYWORDS:** Jet fans. Car park ventilation. Electrical Vehicle. CFD.

### 1. INTRODUCTION AND CONTEXT

EPBD Directive defines the new efficiency requirements in buildings adapting them to the new needs from society, and these include the use of electrical vehicles (EV) and their storage and charging infrastructure in car parks.

Some months after, and following Directive's indications, the European Commission, aware of the safety implications of the electrical vehicle but also of their importance towards a sustainable future, published guidelines to mitigate the risks derived from EV in car parks (Sustainable Transport Forum).

These guidelines, a compilation of good praxis of different countries in Europe, remark for example the importance of a fast detection system, the thermal reduction capacity of sprinklers and the paramount importance of smoke evacuation systems in car parks.

The fire of a battery is of different nature than that from conventional combustion. This type of fire grows faster, for a much longer time, is much more toxic and does not need oxygen. This may lead to greater risk for occupants, but especially for firefighters' brigade.

Consequently, smoke evacuation systems become crucial to decrease temperature, ensure occupant's evacuation and assist firefighters. The bigger the exhaust duty, the lower the temperature, the better the visibility.

However, conventional ducted ventilation systems cannot easily increase exhaust duty to improve tenable conditions in the event of a fire. They are limited by the required height clearance in the car park. Also, they typically require mechanical supply, which normally introduces fresh air at high level, affecting smoke stratification.

If exhaust duty really needs to be increased to maintain safety levels, jet fan ventilation systems represent a very good option. Although these are not new and come with world-wide standardized procedures for their design, they are systems much more complex than conventional ducted systems.



Therefore, these standards (BSI, NP, UNE) are essential to mitigate the fire risks in car park, and designers, more than ever, need to rely on them and not limit themselves to comply with the minimal regulatory requirements. In order to assess the jet fan ventilation systems' capacity to improve conditions in the event of a fire and give the stakeholders tools to choose whether one system or another may represent the best option for each case, CFD simulations of different cases were carried out (Lozano et al.), considering some of these standards and conventional regulatory guidelines.

## 2. REGULATORY FRAME

Portaria 135/2020, which defines the Regulamento Técnico de Segurança Contra Incêndios em Edifícios (RT-SCIE), requires ventilation in car parks capable of evacuating the smoke in the event of a fire. As per this regulation, exhaust duty required is 600 m<sup>3</sup>/h per car parking space, which is similar to the required duty in other countries' regulations (France or Spain, for instance), but significantly below the exhaust duty defined by other European standards (UNE, BS).

Although the specific purposes of the ventilation system are not explicitly stated in the regulation, given that exhaust duty is defined depending on car parking spaces, and not on the size of the fire, one can assume that the main objective for the ventilation system in the event of a fire is to dilute the smoke during the fire and to clear it of smoke once it is extinguished, which would correspond to what is commonly referred as Smoke Clearance system (as described in BS 7346-7:2013, section 9).

Regarding the technology used to provide air movement in the car park, which is generally considered as the main acceptance criteria for smoke clearance systems, RT-SCIE makes no distinction. Both jet fan ventilation systems and ducted ventilation systems are valid alternatives.

However, RT-SCIE does not provide specific guidance for jet fan ventilation systems, so designers shall rely in European Standards, which generally recommend larger exhaust airflows than those in RT-SCIE, both for jet fan ventilation and ducted system.

Exhaust duty represents the key factor in the capacity of the system to evacuate the smoke, so any improvement in that parameter will have a direct effect on the performance of the ventilation system. However, increasing exhaust duty may become challenging in ducted systems, where it would rely on higher ducts than may compromise car park's height clearance. Jet fan systems, on the other hand, can easily adapt to an increase in the exhaust duty.

Given the importance the ventilation system poses in the safety in case of fire in enclosed spaces, reinforced by the European Commission recommendations on car parks (Sustainable Transport Forum) published as a result of the challenges in fire safety the EU faces regarding the electrical vehicle, this article would analyze the performance of the two main alternatives for the ventilation system: (1) a traditional ducted system sized with RT-SCIE airflows and (2) a jet fan ventilation system with an exhaust duty defined as per BS 7346-7:2013 and UNE 100166:2025, This article will not consider any design according to NP 4540 :2015, since this norm intends also to provide specific tenable conditions for firefighters and hence would provide for a much safer system (and thus not equivalent) than that defined by RT-SCIE.



Figure 22. Car park with a jet fan ventilation system



### 3. METHODOLOGY

CFD results are presented for two geometries: A, representative of a diaphanous car park; and B, representative of a tunnel shape. Each of the geometries are analyzed with a ducted system according to RT-SCIE (cases with index 1) and with a jet fan system according to BS 7346-7:2013 Section 9 and UNE 100166:2025 (cases with index 3). Consequently, the article presents 4 scenarios: A1, A3, B1 and B3.

Table 9. Geometry and airflows in considered scenarios

Shape	Height	Surface	Volume	Spaces	Exhaust duty RT-SCIE <i>Case 1</i>	Exhaust duty 10 ACH <i>Case 3</i>
	[m]	[m <sup>2</sup> ]	[m <sup>3</sup> ]	[-]	[m <sup>3</sup> /h]	[m <sup>3</sup> /h]
A	2,8	3.776	10.573	136	81.600	105.730
B	2,8	4.565	12.782	162	97.200	127.820

For simplicity purposes, only visibility results are presented, given it represents the most limiting factor in the event of a fire. These are shown in different time frames and also the average value at breathing height (1.8 m from the floor) is plotted along time, for easier comparison.

Simulations have been carried out using FDS.

Fire location and load is the same for each geometry.

The following table depicts the geometric details of each geometry and the exhaust duty of each scenario:

### 4. RESULTS

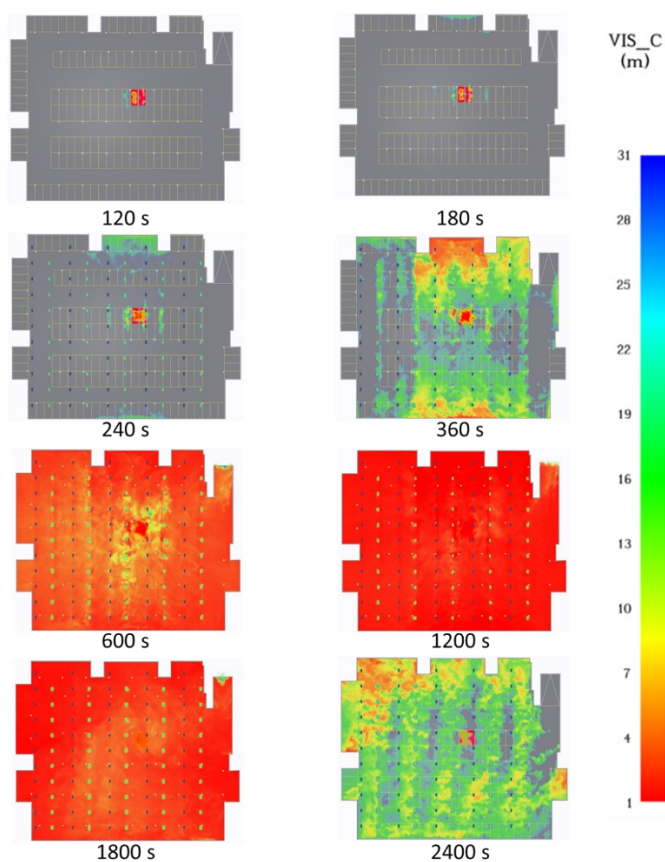


Figure 23: Scenario A1, visibility at 1.8 m from the floor at different instants

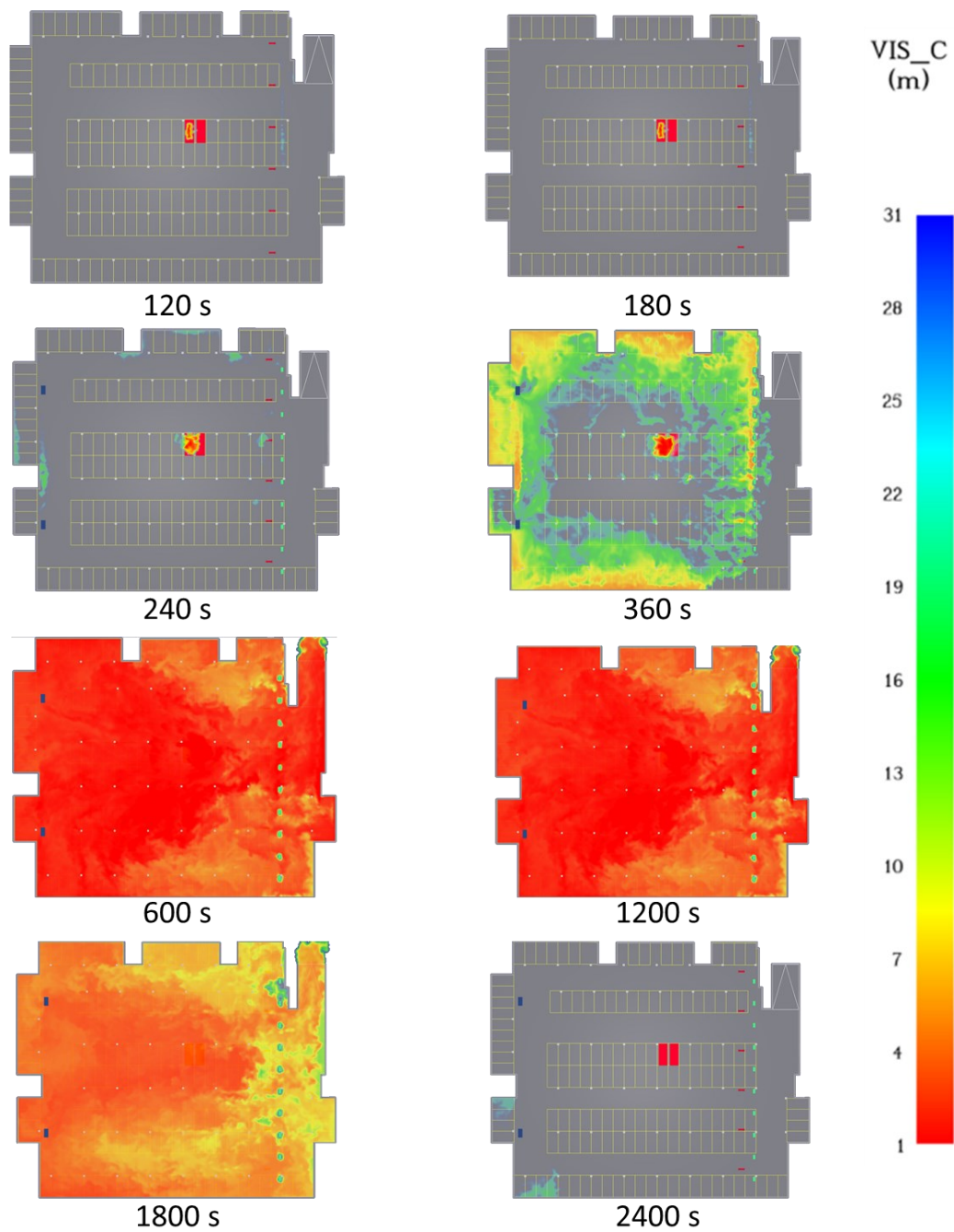


Figure 24: Scenario A3, visibility at 1.8 m from the floor at different instants

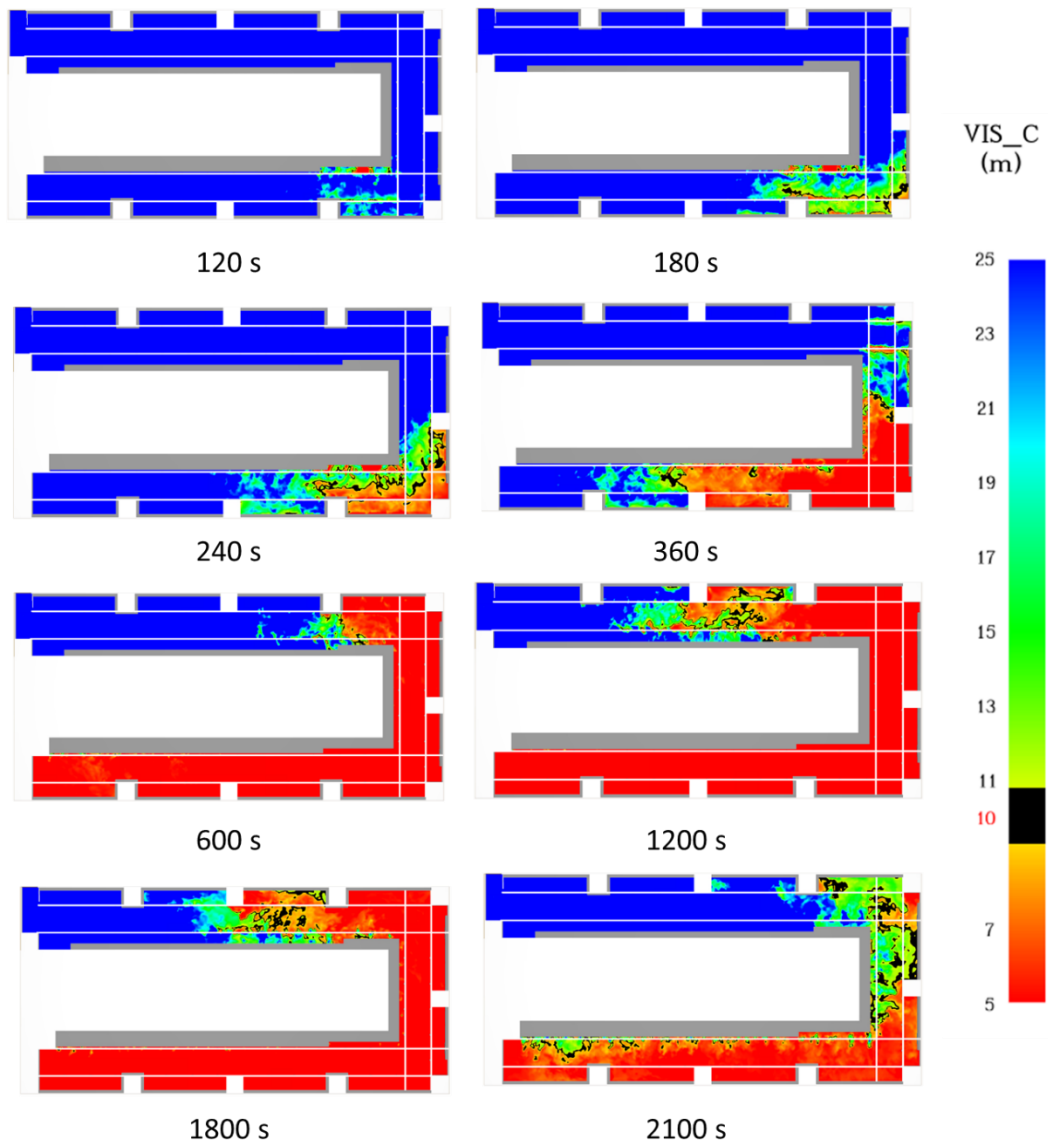


Figure 25: Scenario B1, visibility at 1.8 m from the floor at different instants

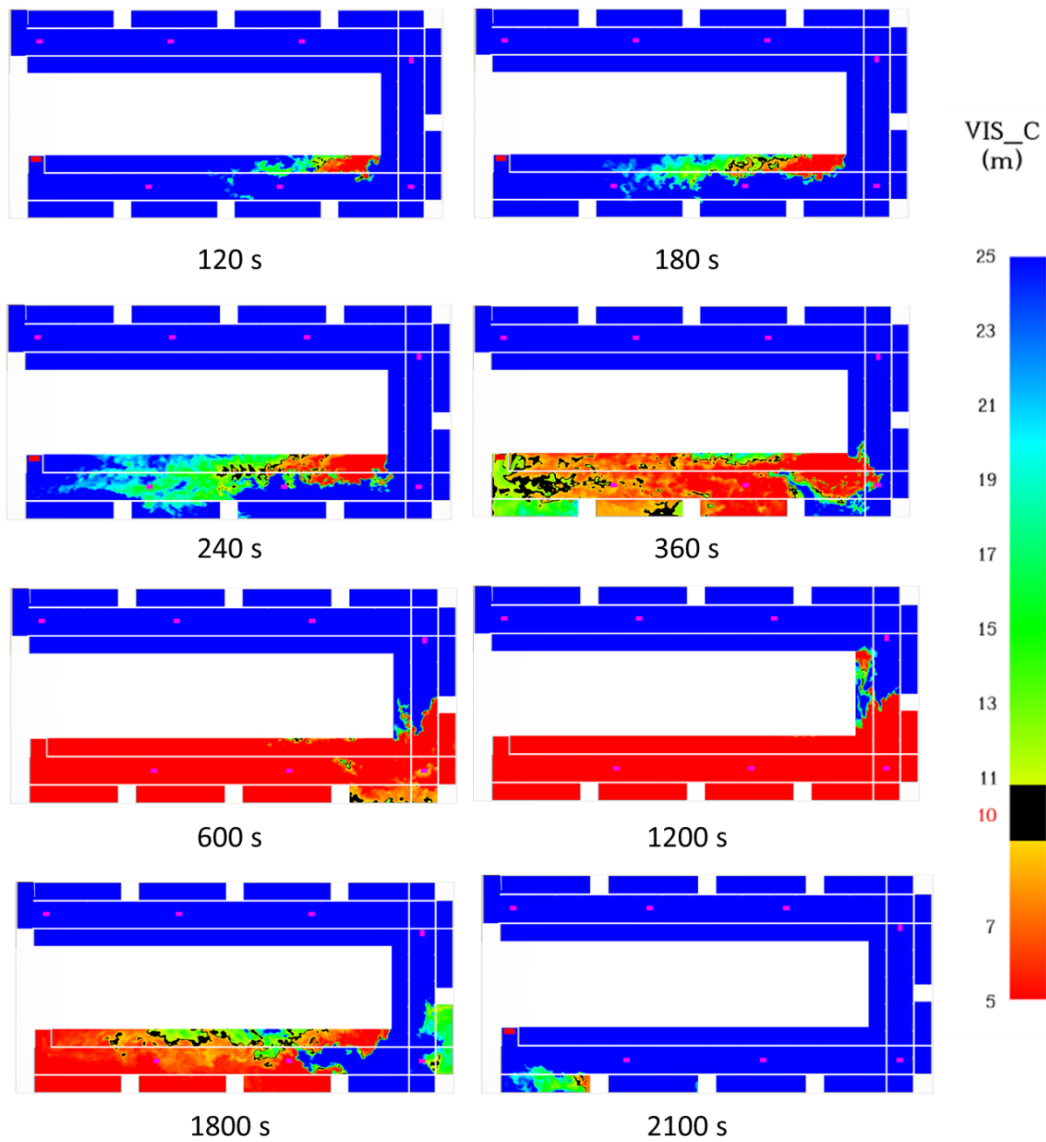


Figure 26: Scenario B3, visibility at 1.8 m from the floor at different instants

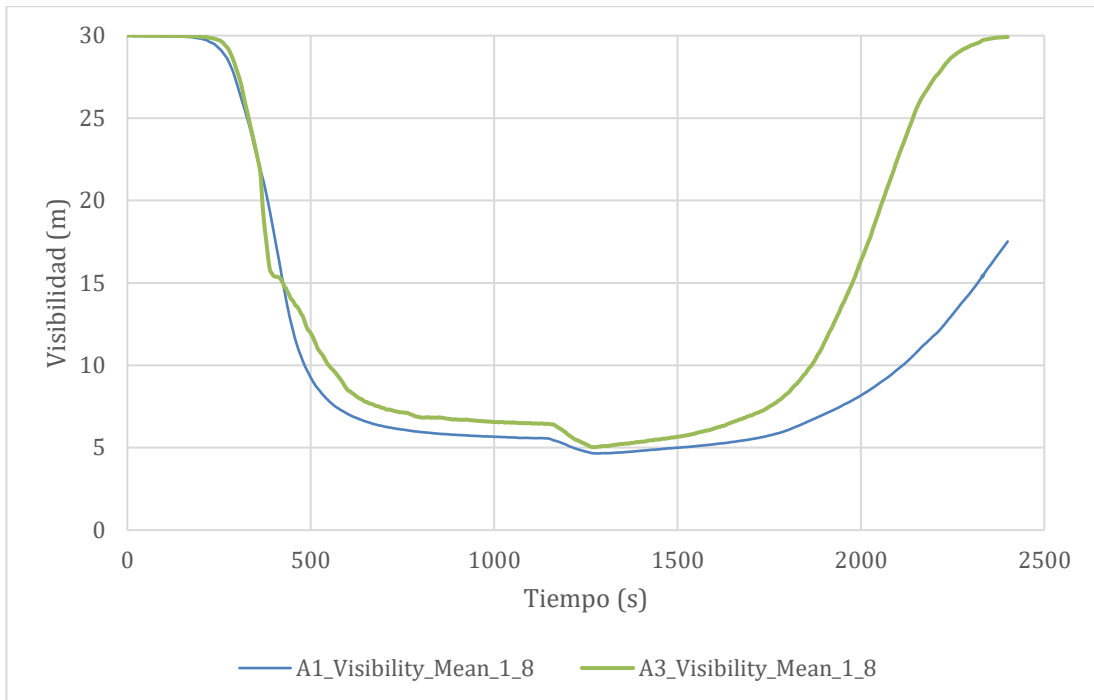


Figure 27: Average visibility at 1.8 m from the floor along the simulation of A1 and A3.

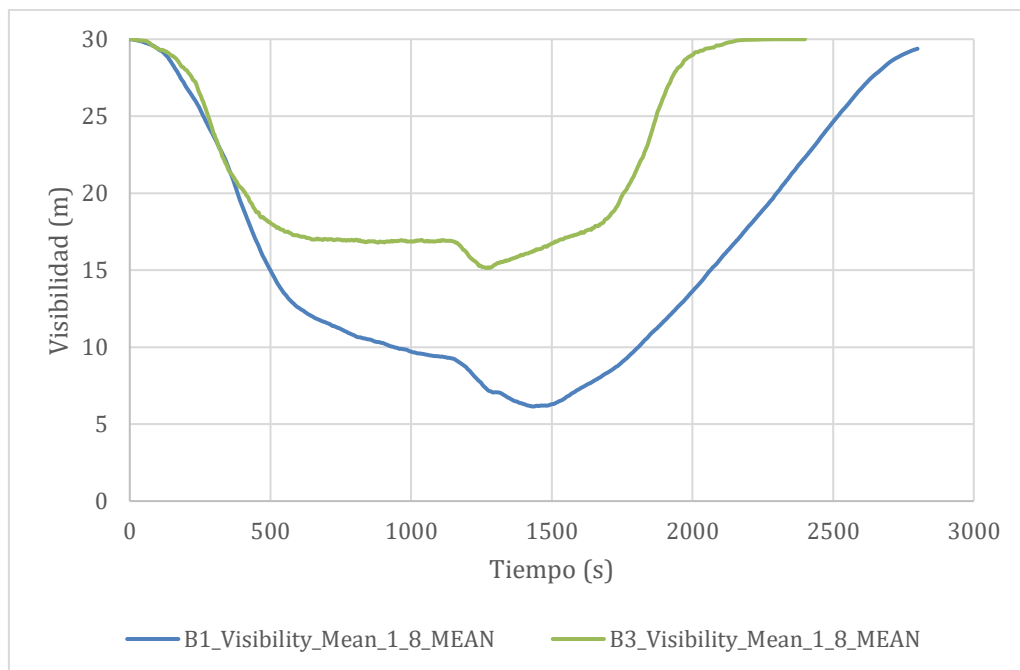


Figure 28: Average visibility at 1.8 m from the floor along the simulation of B1 and B3



## 5. CONCLUSIONS

Simulations carried out show that in scenarios A1, A3 and B1 the whole car park is filled with smoke. This is representative of Smoke Clearance systems, where the exhaust duty is defined independently of the fire load. This is something not known by many stakeholders: in case of a fire in a car park, visibility conditions decrease very fast and cover the whole car park with smoke in relatively few minutes. Fortunately, few casualties are produced in car parks, mainly as a result of a fast egress while the conditions still allow it.

B3 shows an excellent sweep of the smoke toward the exhaust points, preventing the smoke going upwards of the fire in most of the simulation. This is representative of the so-called *Smoke Control* conditions (as defined in BS 7346-7:2013 and CEN/TS 12101-11), intended to provide specific tenable conditions to firefighters. B3 ventilation system was not designed for that purpose and provides those conditions as a result of a combination of its length and width.

When comparing ducted (A1, B1) vs jet fan ventilation system (A3, B3), results show that during the first stages conditions are pretty similar, but as the fire develops and covers the whole car park, conditions improve much faster with a ducted system. A deeper analysis (Lozano et al) leads to the conclusion that this is mainly to two factors: (1) the extra dilution capacity of the jet fan ventilation system, capable of better providing air movement; and (2) the difference in the exhaust duty between both systems greater in A3 and B3 than that defined in RT-SCIE.

An important remark shall be made at this point, the fire load considered for the simulations is representative of the fire in two combustion cars (two cars are considered because with no sprinklers flashover may be expected), but the fire load may be larger with electrical battery vehicles and, its growth, faster, leading to even lower visibility levels.

This raises the important question this article will close with. Now that society knows for sure that electric vehicles are a must for sustainability and with the European Commission recommendations in hand, we, as designers, are making use of the available technologies to provide the safest possible solution for each car park and to mitigate any change in the risks nature in car parks derived from electrical vehicles?

## REFERENCES

- Lozano A., del Moral M., Rodriguez S., Valladares F. *Libro blanco de la ventilación en aparcamientos*, AEDICI, 2025.
- Sustainable Transport Forum (STF), *Fire Safety – Electric Vehicles and charging infrastructure*, European Commission, 2024.
- BSI, *BS 7346-7, Components for smoke and heat control systems – Part 7: code of practice on functional recommendations and calculation methods for smoke and heat control systems for covered car parks*, 2013.
- NP, *NP 4540:2015, Sistemas de ventilação de impulso em parques de estacionamento cobertos não compartimentados*, 2015.
- UNE, *UNE 100166:2025, Ventilación en Aparcamientos*, 2025.



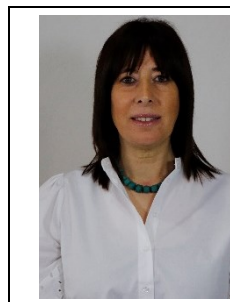
## A INTEGRAÇÃO DE IMIGRANTES EM CONTEXTO DE PROTEÇÃO CIVIL

### 4<sup>as</sup> JORNADAS DE PROTEÇÃO CIVIL

**Lucínia Viana Aires**

#####

Licenciada em  
Proteção Civil  
Odemira, Portugal

**Ana Margarida****Matias**

Mestre em  
Engenharia Civil-  
Construção Urbana  
e Mestre em Gestão  
de Emergência e  
Socorro  
Coimbra, Portugal

### SUMÁRIO

Este artigo analisa a importância da integração de migrantes nas políticas e práticas municipais no âmbito da proteção civil, considerando as dimensões da comunicação de risco, da vulnerabilidade social e da resiliência das comunidades. A inclusão de migrantes nas estratégias de prevenção e resposta a emergências é essencial para garantir a eficácia, a equidade e a sustentabilidade do sistema de proteção civil. Concluiu-se que uma abordagem intercultural e participativa, potencia comunidades mais seguras e coesas, fortalecendo a capacidade de resposta local, face a crises e desastres.

**PALAVRAS-CHAVE:** MIGRAÇÃO, PROTEÇÃO CIVIL, GESTÃO DE RISCO, INTEGRAÇÃO, MUNICÍPIOS.

### 1. INTRODUÇÃO

Portugal tem assistido, nas últimas duas décadas, a um aumento expressivo da população migrante, que segundo dados do Serviço de Estrangeiros e Fronteiras (SEF, 2023) [6], indica que mais de 800 mil cidadãos estrangeiros residem atualmente em território nacional, representando uma parte significativa da força de trabalho e da dinâmica sociocultural do país.

Este crescimento populacional, traduz-se em novas exigências para os serviços públicos locais, nomeadamente no domínio da proteção civil municipal, que tem como missão “prevenir riscos coletivos e a ocorrência de acidente grave ou catástrofe, atenuar os seus efeitos e proteger e socorrer pessoas e bens”, conforme disposto na Lei n.º 80/2015, de 3 de agosto [3].

Assim, para uma componente estratégica da gestão integrada do risco, é necessária a integração dos migrantes nos sistemas de proteção civil, uma vez que a eficácia das respostas a emergências depende da capacidade de compreensão dessas comunidades e, ainda, da sua participação e colaboração nos mecanismos de prevenção e



resposta. É por isso imperativo a discussão da relevância dessa integração e identificar os principais desafios, propondo orientações práticas para a sua concretização ao nível municipal.

A literatura sobre gestão do risco de desastre sublinha que a vulnerabilidade social é um fator determinante na exposição e na capacidade de resposta das populações (Wisner et al., 2004; UNDRR, 2015) [9]. Grupos minoritários, migrantes e refugiados tendem a apresentar vulnerabilidades acrescidas, devido a barreiras linguísticas, limitações de acesso à informação, condições habitacionais precárias e menor inserção nas redes institucionais (Cutter et al., 2013) [1].

No contexto português, a Lei n.º 80/2015 que estabelece a Lei de Bases da Proteção Civil e consagra o princípio da universalidade da proteção, determina que todas as pessoas no território nacional devem beneficiar igualmente das ações de proteção e socorro. Complementarmente, o Sistema Nacional de Gestão Integrada do Risco de Emergências e Catástrofes (Resolução do Conselho de Ministros n.º 157-A/2019) reforça a necessidade de uma abordagem centrada na resiliência comunitária e na participação cidadã.

A nível local, os Planos Municipais de Emergência e Proteção Civil (PMEPC) são instrumentos fundamentais de planeamento, devendo contemplar as características socioculturais da população residente. A integração de comunidades migrantes nestes planos está alinhada com a Estratégia Nacional para a Integração de Migrantes 2021–2025, que reconhece o papel das autarquias na promoção da inclusão e da coesão social.

Desta forma, o enquadramento normativo português oferece bases sólidas para uma abordagem inclusiva da proteção civil, mas a sua aplicação prática continua dependente da articulação entre políticas públicas, conhecimento local e participação ativa das comunidades

## **2. DESAFIOS E OPORTUNIDADES NA INTEGRAÇÃO DE MIGRANTES**

### **2.1 Barreiras Linguísticas e Culturais**

Um dos maiores obstáculos à integração efetiva de migrantes na proteção civil é a comunicação de risco. As mensagens oficiais — alertas meteorológicos, instruções de evacuação, avisos de incêndio — são frequentemente emitidas apenas em português, o que dificulta a compreensão por parte de migrantes recém-chegados ou com domínio limitado da língua.

Esta barreira pode comprometer a segurança em situações críticas, como incêndios florestais, cheias ou sismos. Por outro lado, comunidades migrantes podem possuir práticas culturais diferentes de gestão do perigo, o que requer uma adaptação das estratégias de comunicação e formação para garantir eficácia (Kapucu & Liou, 2014) [2].

Uma forma de ultrapassar esta barreira, é a integração de mediadores culturais. O Município de Odemira é exemplo desta boa prática, que conta com esta integração há já alguns anos, tendo sido um recurso facilitador, principalmente no decurso da Pandemia COVID-19.

Hoje em dia, é maioritariamente usada nos serviços públicos e nas ações de sensibilização do Programa Integrado de Sensibilização e exercícios do Programa “Aldeias Seguras” e “Pessoas Seguras”.



Fotografia 1: Exercício “Aldeias Seguras” e “Pessoas Seguras” - Oficial de segurança de origem asiática para facilitar a integração e a comunicação através da mediação.

## 2.2 Vulnerabilidade socioeconómica

Muitos migrantes residem em habitações sobrelotadas ou em zonas urbanas periféricas, frequentemente mais expostas a riscos. A precariedade económica e a informalidade laboral limitam a sua capacidade de resposta ou reação a situações de emergência ou de recuperação após um acidente ou catástrofe.

Esta realidade evidencia a importância de políticas locais que integrem a dimensão social do risco, cruzando a proteção civil com os serviços de habitação, ação social e saúde.

## 2.3 Participação e confiança institucional

A confiança nas autoridades é um fator essencial para a eficácia das medidas de emergência. Migrantes com estatuto irregular ou com experiências negativas de contacto com instituições públicas podem hesitar em procurar ajuda durante uma crise.

A promoção de redes de confiança e de representação comunitária é, portanto, essencial para criar canais de comunicação bidirecionais e fomentar uma cultura de segurança partilhada.



Fotografia 2: Mediador intercultural nos serviços públicos para facilitar a comunicação.



## 2.4 Envolvimento nos planos e simulacros

Poucos municípios portugueses incluem explicitamente, as comunidades migrantes nos seus planos de emergência. No entanto, experiências positivas, como os exercícios de evacuação das empresas agrícolas, das escolas e do Programa “Aldeias Seguras” e “Pessoas Seguras”, no Município de Odemira, demonstram que a participação direta dos migrantes nos exercícios e simulacros e formações fortalece o sentimento de pertença e melhora a capacidade de resposta coletiva.



Fotografia 3: Participação da comunidade migrante em exercícios de evacuação no Município de Odemira

## 3. RESILIÊNCIA COMUNITÁRIA

A integração dos migrantes na proteção civil deve ser entendida, não apenas como um imperativo ético, mas como uma estratégia de gestão do risco que aumenta a resiliência das comunidades locais.

A proteção civil moderna adota uma perspetiva multinível e intersectorial, em que os municípios assumem papel de proximidade. Neste contexto, a diversidade cultural pode ser transformada em recurso estratégico: os migrantes trazem consigo competências linguísticas, redes sociais transnacionais e experiências de adaptação que podem enriquecer a capacidade local de resposta.

A comunicação intercultural de risco surge como um eixo central. A tradução de avisos de emergência em várias línguas, a utilização de mediadores culturais e o envolvimento de associações de migrantes são práticas recomendadas pela Organização Internacional para as Migrações (OIM, 2020) e pela ONU (UNDRR, 2022). Em Portugal, estas medidas podem ser integradas nos planos municipais de comunicação de risco, articulados com os gabinetes de integração e com as equipas de proteção civil. Do ponto de vista organizacional, a inclusão pode traduzir-se em várias ações e iniciativas dos vários agentes e entidades intervenientes, tais como:



Figura 1: Ações e iniciativas dos vários agentes e entidades intervenientes para a inclusão

Além de melhorar a resposta operacional, estas medidas reforçam a coesão social e reduzem potenciais tensões em situações de crise, contribuindo para uma cultura de solidariedade e confiança entre residentes de diferentes origens.

#### 4. CONCLUSÃO

A proteção civil municipal em Portugal enfrenta o desafio de responder a riscos cada vez mais complexos — desde eventos climáticos extremos até crises sanitárias e tecnológicas — num contexto de crescente diversidade demográfica. Integrar os migrantes neste sistema não é apenas uma questão de justiça social, mas um investimento estratégico na resiliência comunitária.

A inclusão de todos os residentes nos processos de planeamento, comunicação e resposta de emergência garante maior eficácia operacional e fortalece a segurança coletiva. A nível prático, é fundamental que os municípios elaborem uma estratégia de gestão de risco inovadora e adaptada aos novos desafios e deve incluir:

Quadro 1: Eixos estratégicos de gestão de risco para a inclusão 1

1	2	3	4
Implementação de estratégias de comunicação de risco multilingue	Envolvimento de associações de migrantes nos conselhos municipais de segurança e proteção civil	Promoção de formação intercultural e sensibilização junto dos agentes de proteção civil	Inclusão de dados sociodemográficos e culturais nos seus planos de emergência.



Em síntese, a integração de migrantes em contexto de proteção civil municipal é um passo indispensável para a construção de sociedades mais seguras, inclusivas e resilientes, em consonância com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS 11 e 16) e com o Marco de Sendai para a Redução do Risco de Desastres (2015–2030).

## REFERÊNCIAS

- [1] Cutter, S. L., Boruff, B. J., & Shirley, W. L. (2013). Social vulnerability to environmental hazards. Springer.
- [2] Kapucu, N., & Liou, K. T. (2014). Disaster and development: Examining global issues and cases. Springer.
- [3] Lei n.º 80/2015, de 3 de agosto. Lei de Bases da Proteção Civil. Diário da República, 1.ª série, n.º 150.
- [4] Organização Internacional para as Migrações (OIM). (2020). Migrants in disaster risk reduction: Practices for inclusion. Geneva: IOM.
- [5] Resolução do Conselho de Ministros n.º 157-A/2019, de 27 de setembro. Sistema Nacional de Gestão Integrada do Risco de Emergências e Catástrofes. Diário da República, 1.ª série, n.º 188.
- [6] Serviço de Estrangeiros e Fronteiras (SEF). (2023). Relatório de Imigração, Fronteiras e Asilo 2023. Lisboa: MAI.
- [7] United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNDRR). (2015). Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015–2030. Geneva: UN.
- [8] United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNDRR). (2022). Guidelines for inclusive disaster risk reduction. Geneva: UN.
- [9] Wisner, B., Blaikie, P., Cannon, T., & Davis, I. (2004). At risk: Natural hazards, people's vulnerability and disasters (2nd ed.). Routledge



## INUNDAÇÕES EM PETRÓPOLIS (2022): DA CHUVA EXTREMA À RESILIÊNCIA URBANA



**Vanessa Corrêa**  
Mestranda MCSI  
ISEC-IPC - Coimbra  
Portugal



**António Correia**  
Prof. Coordenador  
ISEC-IPC, SUSCITA  
Portugal



**Teresa Fragoso**  
Prof. Adjunto  
ISEC-IPC, SUSCITA  
Portugal

**Keywords:** Chuvas extremas, Deslizamento de terras, Inundações, Vulnerabilidade urbana, Petrópolis 2022.

### 1. INTRODUÇÃO

O município de Petrópolis, localizado na envolvente geográfica da Serra Fluminense do Rio de Janeiro (Brasil), caracteriza-se por uma morfologia de elevada exigência, assinalada por vertentes acentuadas, depressões encaixadas e uma significativa saturação urbana em zonas de perigo. A interação destes atributos físicos com um crescimento urbanístico desordenado e com as limitações da rede de escoamento superficial estabeleceu uma condição de vulnerabilidade estrutural e crónica perante eventos hidro meteorológicos de severidade extrema [1].

Esta fragilidade tem vindo a ser acentuada pelas alterações no regime pluviométrico, manifestadas no aumento da frequência e intensidade das precipitações intensas, um fenómeno que se associa às alterações climáticas globais, conforme sinalizado pelo Intergovernamental Panel Climate Change, IPCC em 2014 [2]. O ano de 2022, em particular, ficou registado no município por atingir índices de pluviosidade inéditos nos registos recentes.

O dia 15 de fevereiro de 2022, no 1.º Distrito uma precipitação de 215 mm nas primeiras três horas, desencadeou um cenário de inundações repentinas, enxurradas violentas e centenas de deslizamentos. Um mês após, em 20 de março, um novo pico extremo registou 548 mm ao longo de 24 horas. O somatório destas duas catástrofes resultou em 241 óbitos, consolidando o momento mais negro da história do município e culminando no enquadramento de Petrópolis entre os 12 municípios do estado do Rio de Janeiro em Situação de Emergência ou Calamidade Pública (Si2D, 2022) [3].

A resposta implementada a nível municipal envolveu a mobilização da Defesa Civil, suportada por equipes técnicas compostas por profissionais de diferentes áreas e categorias, que atuaram prioritariamente na delimitação do risco remanescente e na produção de informação técnica para suporte à decisão. Este esforço resultou na identificação de 611 cicatrizes de deslizamento, na definição de 402 polígonos de risco residual e na geração de 283 pareceres técnicos e 15 Cartas de Risco Remanescente (escala 1:5.000), posteriormente transmitidas às instâncias decisórias [1].

A experiência vivida em Petrópolis evidencia, assim, que a severidade dos danos não é uma decorrência exclusiva da precipitação incomum, mas sim do conjunto de vetores que incluem a exposição territorial, a fragilidade intrínseca da encosta, a dinâmica climática modificada e a capacidade reativa das instituições. Este artigo dedica-se, a analisar a intervenção municipal na ocasião do desastre de 2022, baseando-se em documentação oficial e instrumentos técnico-operacionais. O propósito maior é extrair conclusões operacionais para o fortalecimento da



resiliência urbana, a melhoria da gestão do risco de desastres e a otimização da articulação diversificada em territórios de elevada suscetibilidade de eventos de massa e hidrológicos.

## 2. CONTEXTO CLIMÁTICO E METEREOLÓGICO

A Região Serrana do Estado do Rio de Janeiro caracteriza-se por um regime de pluviosidade acentuado. Conforme apontado por Silva e Dereczynski (2014) [4], a área regista acumulados anuais que se aproximam dos 1.000 mm, com a maior parte desta precipitação a ocorrer, de forma concentrada, durante o período do verão. Este padrão é uma consequência direta de vários fatores, destacando-se a influência da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), a travessia frequente de frentes frias e a transferência de calor de natureza local provocada pelo aquecimento diário.

O período compreendido entre novembro e março engloba os maiores volumes de chuva, totalizando, em média, cerca de 1.050 mm. No mês de fevereiro, historicamente o clima é mais crítico, apresentando uma média de 238,2 mm [4].

O evento catastrófico ocorrido a 15 de fevereiro de 2022 foi desencadeado pela aproximação de uma frente fria ao litoral Sudeste brasileiro. Este sistema estabeleceu uma interação com o ar quente e húmido que se deslocava do interior do país, gerando um ambiente atmosférico de extrema instabilidade sobre a Região Serrana. Esta dinâmica foi crucial para o rápido desenvolvimento de nuvens Cumulonimbus de grande porte, que se encontravam na origem das precipitações de elevada intensidade. Este fenómeno pode ser observado na Figura 1 [5].

Os episódios extremos que atingiram Petrópolis naquele dia configuraram o maior evento pluviométrico alguma vez registrado na área do município, sendo, consequentemente, qualificado como o mais grave desastre da história da cidade.

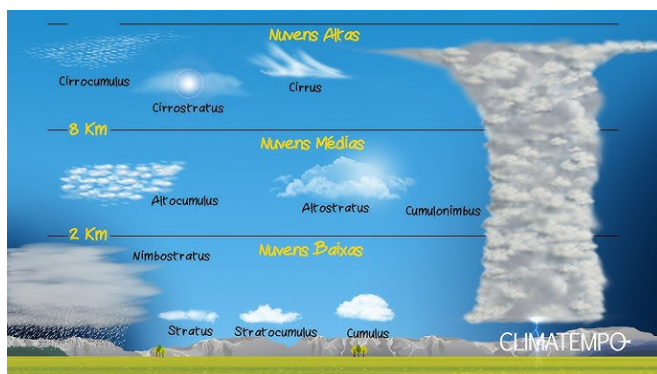


Figura 1 - Explicação da formação de Cumulonimbus - Clima tempo

A dimensão da tragédia resultou em mais de 200 vítimas mortais e deixou milhares de agregados familiares desalojados. A imagem de satélite captada no momento da ocorrência, disponibilizada pelo Alerta Rio, encontra-se apresentada na Figura 2 [6].

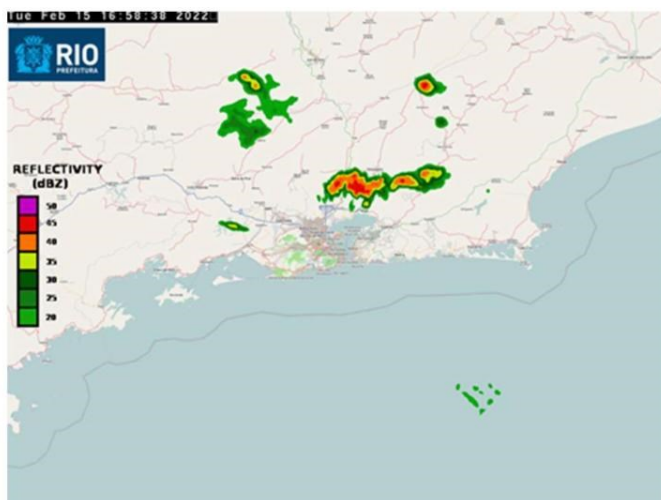


Figura 2 - Imagem de Satélite do evento de chuvas no dia 15/02/22 às 17 horas Fonte: Alerta Rio, 2022

Com base na precipitação acumulada ao longo das quatro horas de maior intensidade do evento, foram posteriormente elaboradas as isoietas que ilustram a distribuição espacial da precipitação. Conforme se pode observar na Figura 3, estas linhas demonstram a forma como se distribuiu o episódio de precipitação de fevereiro de 2022 no território [6].

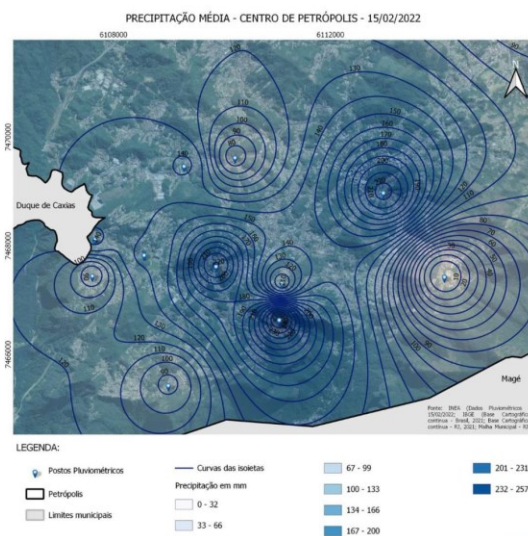


Figura 3 - Isoietas do evento de chuvas no dia 15/02/22.

Foram utilizados os postos do Sistema de Alerta de Cheias do INEA (Alto da Serra; Bingen; Coronel Veiga; Itaipava; Itamarati; Independência; Cuiabá; Pose; Bomfim; Samambaia; LNCC; Capim Roxo; Quitandinha; Morim) e do CEMADEN (Quitandinha; Dr. Thouzet; São Sebastião; Araras; Bingen; Estrada do Cantagalo). No total, foram registados 259,8 mm no dia 15/02/2022, sendo 250 mm apenas entre as 16h20 e as 19h20. A média climatológica de Fevereiro para Petrópolis é de 185 mm. O recorde anterior era de 168,2 mm em 24 horas (20/08/1952) [6].

As características relativas ao relevo da Região Serrana Fluminense, marcadas por declives acentuados, contribuem para um ambiente propício ao desenvolvimento de tempestades severas. No Estado do Rio de Janeiro, esta região apresenta os maiores totais pluviométricos médios anuais, especialmente no verão, resultado não só da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) e de frentes frias mais frequentes, mas também da convecção térmica local (Tempo e Clima no Brasil, 2009) [5].



De acordo com o INMET, os maiores acumulados de precipitação ocorrem entre Novembro e Março, totalizando cerca de 1.050 mm. Para Fevereiro, a climatologia é de 238,2 mm. Eventos extremos de curta duração, muito localizados e com elevada taxa de precipitação horária podem desencadear movimentos de vertente, inundações rápidas e alagamentos, com potencial de causar perdas humanas significativas [5].

Na manhã de 15 de fevereiro de 2022, Petrópolis encontrava-se sob influência de uma frente fria situada no oceano, junto ao litoral do Sudeste brasileiro (Figura 4). A carta sinótica das 09h, elaborada pela Marinha do Brasil, indicava convergência de umidade e instabilidade atmosférica na faixa costeira do estado do Rio de Janeiro, condições típicas da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) [1].

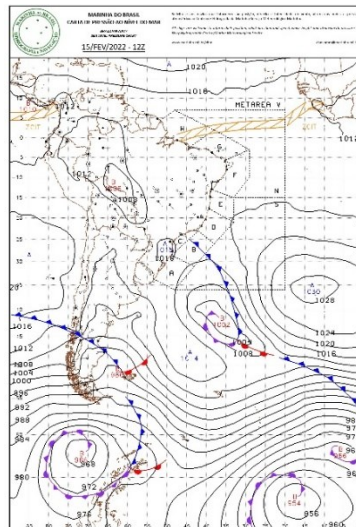


Figura 4 – Carta sinótica da Marinha do Brasil às 09h de 15/02/2022, mostrando a frente fria ao largo do litoral fluminense

Às 21h (Figura 5), o sistema frontal mantém-se ativo e mais próximo do continente, potenciando fortes movimentos ascendentes e a persistência de tempestades sobre a Região Serrana. Esta evolução sinótica explica a rápida intensificação da chuva em Petrópolis, resultado da combinação entre frente fria, umidade elevada e relevo acentuado [1].

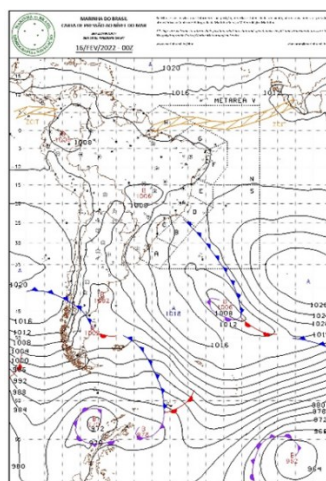


Figura 5 – Carta sinótica da Marinha do Brasil às 21h de 15/02/2022, com intensificação da instabilidade e núcleos convectivos sobre a Região Serrana.



De acordo com a Figura 6, a sondagem atmosférica realizada no Aeroporto Tom Jobim, para o dia 15 de fevereiro de 2022, às 09h (esquerda) e 21h (direita), assim como os índices termodinâmicos constantes, confirmaram um perfil termodinâmico favorável à convecção intensa, com ar húmido e energia suficiente para formação de nuvens de grande desenvolvimento vertical [5].

Além disso, a sondagem atmosférica do dia para o aeroporto Tom Jobim indicava um ambiente com condicionamento instável, com índices termodinâmicos favoráveis ao desenvolvimento de tempestades. Observa-se tais índices nas imagens a seguir:

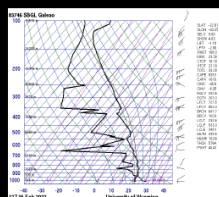


Figura 3 - Sondagem atmosférica para o Galeão/RJ para o dia 15 de fevereiro de 2022, às 09h (esquerda)

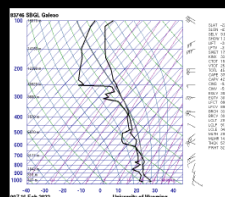


Figura 4 - Sondagem atmosférica para o Galeão/RJ para o dia 15 de fevereiro de 2022, às 21h

Índice	15/02 às 09h	15/02 às 21h	Valores de Referência
CAPE (J/Kg)	839.1	370.2	> 1000 (HOUZE, 1993)
K (°C)	29.30	33.90	> 30 (HENRY, 1987. NASCIMENTO, 2005)
TT (°C)	39.20	45.40	> 40 (HENRY, 1987)

Figura 6 – Relatório Prefeitura de Petrópolis, sobre a Sondagem atmosféricas e índices termodinâmicos.

Após cerca de seis horas de precipitação contínua e intensa, registrou-se uma série de deslizamentos de grande magnitude concentrados no 1.º Distrito de Petrópolis, com maior incidência entre as 17h00 e as 21h00. A saturação rápida dos solos e a elevada taxa de escoamento superficial provocaram inundações simultâneas em várias bacias hidrográficas urbanas, originando alagamentos súbitos e movimentos de massa em cadeia [1].

À medida que a intensidade da chuva diminuiu, tornou-se evidente a dimensão catastrófica do evento: habitações destruídas, moradores soterrados ou feridos, centenas de famílias desalojadas e vias de comunicação bloqueadas por lama, detritos e blocos rochosos. Além dos danos materiais, verificaram-se falhas generalizadas nos serviços essenciais, com interrupções no fornecimento de energia elétrica, água potável e comunicações, comprometendo a resposta imediata das equipas de emergência e agravando a vulnerabilidade da população afetada [1].

Conforme a Figura 7 demonstra, a localização, denominada Morro da Oficina, uma das áreas mais atingidas nesta catástrofe.



Figura 7 - 17/02 - Foto tirada com drone mostra o Morro da Oficina após deslizamento em Petrópolis (RJ) — Foto: Ricardo Moraes/Reuters



A Figura 8 demonstra o Centro de Petrópolis, uma das localidades mais importantes da cidade, onde foi invadida pelo transbordo do rio e inundou todo o território.



Figura 8 - Rua do Imperador, em Petrópolis, completamente tomada pelas águas – Foto: Reprodução/Tribuna de Petrópolis

### 3. CRONOLOGIA DAS AÇÕES ADOTADAS: COMUNICAÇÃO E ALERTAS

As medidas de natureza preventiva foram implementadas pela Defesa Civil Municipal já no dia 14 de fevereiro de 2022. Esta iniciativa consistiu na emissão de avisos através de SMS, redes sociais e, de forma descentralizada, nos grupos de WhatsApp dos Núcleos Comunitários de Defesa Civil (NUDECs) (PETRÓPOLIS, 2022). O objetivo desta estratégia de comunicação diversificada era maximizar o alcance da informação e reforçar a sensibilização comunitária para o risco iminente.

Face ao cenário meteorológico que se desenhava, a Secretaria Municipal de Defesa Civil emitiu, aproximadamente às 10h00 do dia 15/02/2022, um Boletim Meteorológico, como a Figura 9 abaixo, prevendo a possibilidade de chuvas isoladas, de intensidade moderada a forte, a iniciar-se durante a tarde no município de Petrópolis.



Figura 9 - Boletim Meteorológico pela SDCAV Prefeitura de Petrópolis, entre 12h do dia 15/02/2022 e 12h do dia 16/06/02/2022.



No entanto, a partir do monitoramento realizado pela Secretaria, notou-se a formação de células de precipitação entre a Baixada Fluminense e Petrópolis por volta das 13h30. Nesse momento, não se detetava potencial para chuvas fortes no concelho, uma vez que as imagens de satélite não evidenciavam instabilidades significativas na proximidade da serra.

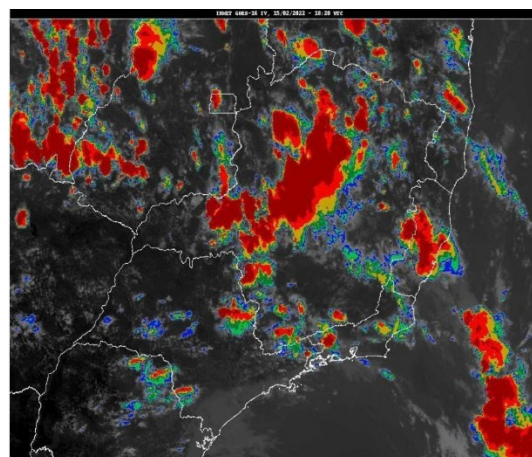
A situação alterou-se radicalmente por volta das 15h20. Conforme o radar meteorológico na Figura 10 e o satélite referente Figura 11, Núcleos de chuva detetados pelo radar meteorológico indicaram a concretização da previsão, o que levou ao envio de um SMS de alerta à população, utilizando a plataforma governamental IDAP, às 15h24.

É importante notar que, neste exato momento, a análise das imagens de satélite ainda não confirmava instabilidades significativas adjacentes ao município.

A partir deste ponto, assistiu-se a uma intensa agravamento dos núcleos de chuva, acompanhada por descargas elétricas. Registraram-se ocorrências de chuva forte a muito forte em diversas localizações do primeiro distrito, em especial, destaque para os registos horários das seguintes estações: Alto da Serra (Alerta de Cheias – INEA) registou 125.8 mm/h às 17h15; estação Cel Veiga (Alerta de Cheias – INEA) assinalou 111.4 mm/h às 18h15; e Dr. Thouzet (Cemaden RJ) reportou 100.2 mm/h às 18h06 [5].



*Figura 10 - Radar Meteorológico do sistema Alerta Rio, Prefeitura do Rio, em torno de 15h20*



*Figura 11 - Satélite no canal Infra Vermelho, GOES 16, em torno de 15h20.*

Em consonância com a evolução do cenário e sob orientação de entidades estaduais e federais, o Sistema de Alerta e Alarme (SAA) foi acionado com o protocolo de Mobilização às 16h42, aconselhando os habitantes das zonas de perigo a deslocarem-se para os pontos de apoio face ao risco de deslizamento [5].

As primeiras áreas a atingirem os limiares de mobilização (45 mm/h) foram Vila Felipe (Campinho e Chácara Flora) e Dr. Thouzet. Seguiram-se as localidades de Ferroviários às 16h47, a região de 24 de maio (Morro do Estado e Rua Nova) às 16h57, João Xavier às 17h11, Sargento Boening às 17h16, e, às 17h20, as restantes áreas cobertas pelo SAA. O detalhe das ações adotadas pela Secretaria de Defesa Civil e Ações Voluntárias (SDCAV), INEA e Cemaden RJ, podendo ser notado na Tabela 1 [5].



Hora	Ação
14/02 – 12h09.	<b>SDCAV.</b> Estágio Operacional de Observação em função da previsão de chuva para os próximos dias para o Município de Petrópolis.
15/02 – 12h26	<b>Cemaden RJ.</b> Previsão de chuva moderada a forte para todas as regiões do Estado do Rio de Janeiro.
15/02 - 15h24	<b>SDCAV.</b> Envio de SMS com alerta de chuva moderada/forte para as próximas horas.
15/02 – 16h09	<b>INEA.</b> Possível elevação dos rios em função da chuva nas próximas horas.
15/02 – 16h12	<b>SDCAV.</b> Estágio Operacional de Atenção.
15/02 – 16h20	<b>INEA –</b> Transbordamento. Registro de transbordo do Rio Quitandinha na localidade Cel. Veiga às 16h20.
15/02 – 16h23	<b>Cemaden RJ.</b> Risco Geológico Moderado
15/02 – 16h34	<b>INEA.</b> Subida do nível do Rio Piabanha acima do normal na localidade Bingen/Vila Militar.
15/02 – 16h40	<b>Cemaden RJ.</b> Risco Hidrológico Alto.
15/02 – 16h41	<b>INEA.</b> Alerta. Subida do nível do Rio Piabanha acima do normal na localidade Alto da Serra.
15/02 – 16h42	<b>SDCAV.</b> Mobilização SAA. Vila Felipe (Campinho e Chácara Flora) e Dr. Thouzet.
15/02 – 16h45	<b>SDCAV.</b> Estágio Operacional de Alerta.
15/02 – 16h47	<b>SDCAV.</b> Mobilização SAA. Ferroviários.
15/02 – 16h56	<b>Cemaden RJ.</b> Risco Geológico Alto
15/02 – 16h57	<b>SDCAV.</b> Mobilização SAA. 24 de maio (Morro do Estado e Rua Nova).
15/02 – 17h04	<b>Cemaden RJ.</b> Recomendação de Mobilização. Vila Felipe – Campinho e Dr. Thouzet.
15/02 – 17h07	<b>SDCAV.</b> Envio de SMS com aviso de risco de inundações.
15/02 – 17h11	<b>SDCAV.</b> Mobilização SAA. João Xavier.
15/02 – 17h16	<b>SDCAV.</b> Mobilização SAA. Sargento Boening.
15/02 – 17h21	<b>SDCAV.</b> Mobilização SAA. Independência – Rua O.
15/02 – 17h22	<b>SDCAV.</b> Mobilização SAA. Todas as localidades do 1 <sup>o</sup> distrito.
15/02 – 17h26	<b>Cemaden RJ.</b> Recomendação de Mobilização. Independência-Taquara e João Xavier.
15/02 – 17h39	<b>Cemaden RJ.</b> Risco Geológico Muito Alto.
15/02 – 17h40	<b>INEA.</b> Registro de transbordo do Rio Palatinado na localidade Alto da Serra às 17h40.
15/02 – 17h44	<b>SDCAV.</b> Envio de SMS com aviso de risco de inundações.
15/02 – 17h48	<b>Cemaden RJ.</b> Risco hidrológico Alto
15/02 – 17h59	<b>INEA.</b> Registro de transbordo do Rio Piabanha na localidade Bingen/Vila Militar às 17h59.
15/02 – 18h49	<b>INEA.</b> Alerta subida do nível do Rio Piabanha acima do normal na localidade Corrêas.
15/02 – 18h51	<b>SDCAV.</b> Estágio Operacional de Crise.
15/02 – 21h47	<b>INEA.</b> Registro de transbordo do Rio Piabanha na localidade Nogueira às 20h15.
15/02 – 21h57	<b>INEA.</b> Registro de transbordo do Rio Piabanha na localidade Corrêas às 21h56
15/02 – 23h26	<b>INEA.</b> Estágio de Alerta. Subida do nível do Rio Palatinado na localidade Alto da Serra.

Tabela 1 - Tabela do Relatório da Prefeitura de Petrópolis da Secretaria de Defesa Civil e Ações voluntárias (SDCAV), Alerta de Cheias – INEA e Cemaden RJ.

A estação pluviométrica São Sebastião Geo, pertencente ao CEMADEN Nacional, apurou o maior volume acumulado entre as 15h30 e as 18h50, atingindo 260 mm/h, Na Figura 12, as colunas em azul indicam a chuva horária e linha preta, o acumulado de chuva, no evento.

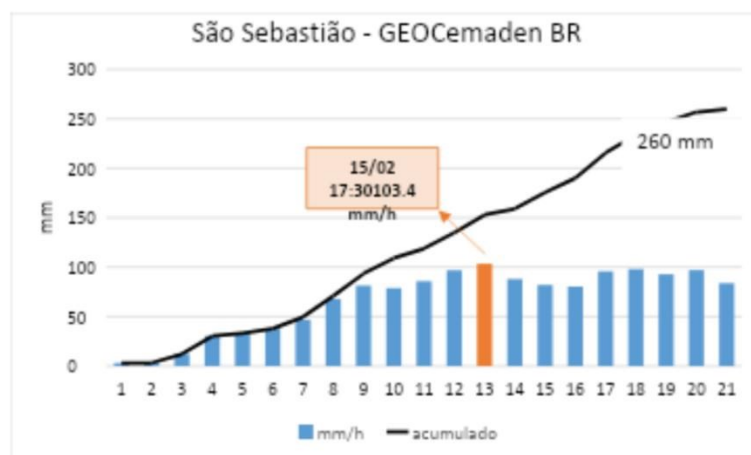


Figura 12 - Registro pluviométrico da estação São Sebastião - Geo, Cemaden BR.

Paralelamente, conforme a Figura 13 demonstra, a estação Coronel Veiga, do Alerta de Cheias – INEA, que também monitoriza o rio Quitandinha, registrou o seu nível máximo de 5.01m às 18h30, tendo a cota de transbordamento de 2,3 m sido ultrapassada aproximadamente às 16h15.

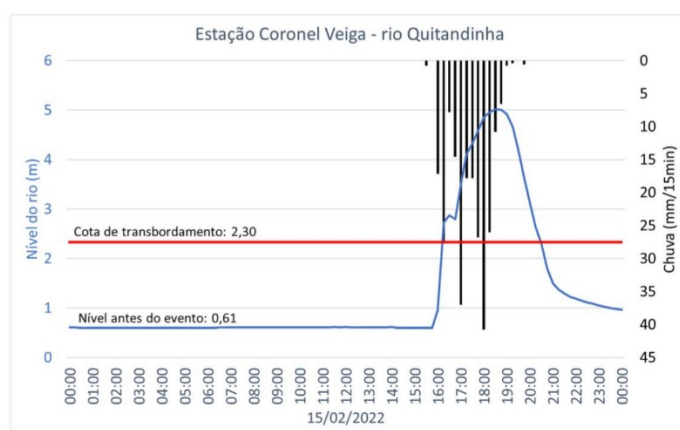


Figura 13 - Estação Cel Veiga. Fonte: Alerta de Cheias – INEA

Face à dimensão do desastre, foi confirmada a insuficiência da capacidade de resposta do Município para fazer face ao cenário estabelecido. Tendo em consideração a necessidade de suporte técnico especializado e de infraestrutura de resposta, o Município formalizou o Estado de Calamidade Pública ainda no dia 15 de fevereiro, por intermédio do Decreto n.º 033/2022 [7]

#### 4. ESTRUTURA COMUNITÁRIA E ARTICULAÇÃO LOCAL

A intervenção dos Núcleos de Defesa Civil Comunitária (NUDECs) e das respetivas Equipas de Acolhimento revelou-se fundamental para traduzir os alertas emitidos em ações concretas no terreno. Em 2022, Petrópolis contava com um efetivo de aproximadamente 160 membros dos NUDECs e 120 agentes de acolhimento, distribuídos por 30 comunidades. Estes grupos mantinham um canal de comunicação direto e ativo com a Defesa Civil, utilizando para o efeito rádio e a plataforma WhatsApp (conforme estipulado pela LEI MUNICIPAL N.º 8.544/2023) [8].

Após o acionamento do Sistema de Alerta e Alarme (SAA) às 16h41, as lideranças comunitárias procederam à abertura imediata de pontos de apoio nomeadamente escolas, igrejas e centros comunitários e à orientação da



evacuação imediata dos agregados familiares em risco. O registro desta comunicação em tempo real ocorreu através de mensagens trocadas nos grupos de NUDEC e de Pontos de Apoio, facto que, juntamente com a divulgação nas redes sociais (como Instagram e Facebook), permitiu salvar vidas antes da escalada da calamidade [1].

Rede de Comunicação Comunitária NUDEC /  
Defesa Civil

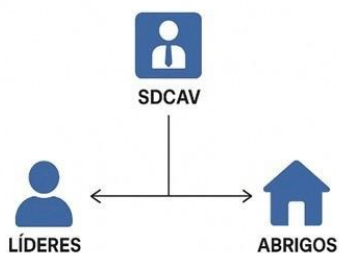


Figura - 14 Ilustrativa da Rede Comunicação NUDEC |SDCAV |ABRIGOS

Face à dimensão do desastre, foram mobilizadas equipes municipais, estaduais e federais com o propósito de se apresentarem ao Superintendente de Defesa Civil do Estado e ao Secretário Municipal de Defesa Civil de Petrópolis. O objetivo desta deslocação era compreender as necessidades urgentes de suporte técnico solicitadas pelo Município ao Governo do Estado do Rio de Janeiro, que se centravam em três eixos principais: como a realização de avaliações técnicas para aferir o risco de novos deslizamentos durante as operações de busca e salvamento; a delimitação rigorosa do risco remanescente; e o reconhecimento exaustivo da área afetada pelos movimentos de vertente [3].

Estas operações foram conduzidas em articulação com dezenas de profissionais voluntários provenientes de diversos organismos públicos das esferas municipal, estadual e federal, bem como de instituições parceiras. Entre os principais colaboradores encontravam-se:

- Águas do Rio;
- Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais – Serviço Geológico do Brasil (CPRM);
- Corpo de Bombeiros;
- DRM-RJ
- Defesa Civil de Blumenau;
- Defesa Civil de Guapimirim;
- Defesa Civil de Maricá;
- Defesa Civil de Niterói;
- Defesa Civil de Nova Friburgo;
- Defesa Civil de São João de Meriti;
- Departamento de Planeamento Urbano de Petrópolis;
- Enel;
- Exército Brasileiro;
- Guarda Civil Municipal (GCM);
- Instituto Nacional de Metrologia (Inmetro);
- Marinha do Brasil;
- NADE;
- Polícia Civil;
- Polícia Militar;
- Polícia Rodoviária Federal;
- e outros parceiros.

Todos estes organismos atuaram de forma integrada na resposta de emergência, procurando suprir as exigentes necessidades apresentadas pelo Município.



## 6. PLANEAMENTO TERRITORIAL E PREVENÇÃO ESTRUTURAL

A prevenção estrutural constitui o pilar menos visível, mas inegavelmente o mais crítico na estratégia de mitigação de riscos.

### 6.1. Instrumentos de Planeamento e Risco Conhecido

O Plano Municipal de Redução de Riscos (PMRR) cumpre o papel de identificar as zonas de risco elevado e muito elevado, preconizando a adoção de medidas integradas que englobam o ordenamento urbano e a engenharia baseada em soluções naturais.

Entre as principais recomendações avançadas por este plano, destacam-se:

- A delimitação de áreas *non aedificandi* nas vertentes e nas margens fluviais;
- O reforço do controlo e da fiscalização urbanística;
- O desenvolvimento de programas de reassentamento seguro e digno para as populações em perigo;
- A implementação de Soluções Baseadas na Natureza (SBN), como a reflorestação, a otimização da drenagem natural e o aumento da permeabilidade do solo.

É crucial sublinhar que a autarquia de Petrópolis detinha conhecimento, pelo menos desde maio de 2017, de um estudo exaustivo incluído no PMRR. Este estudo, realizado pela Theopratique Obras e Serviços de Engenharia e Arquitetura, identificou 15.240 habitações no 1.º Distrito da cidade classificadas com risco "alto" ou "muito alto" de destruição devido a fenómenos pluviométricos. No universo dos cinco distritos do município, foram cartografados 27.704 imóveis em situação de risco, os quais, na data do levantamento, ocupavam cerca de 10% da área total urbanizada de Petrópolis [9].

### 6.2. O Custo da Inércia e a Sustentabilidade

A tragédia ocorrida em 2022 confirmou, de forma clara, que prevenir é sempre uma opção economicamente mais favorável do que empreender a reconstrução. O planeamento territorial eficaz deve ser encarado como um processo contínuo, que exige participação e uma sustentabilidade financeira duradoura [10].

Este princípio torna-se ainda mais evidente ao analisar o impacto económico direto do desastre:

- Um inquérito do Instituto de Pesquisas e Análises da Fecomércio, divulgado a 17 de fevereiro, estimou um prejuízo superior a 78 milhões de reais apenas nos setores do comércio, serviços e turismo do município [11].
- A Federação das Indústrias do Estado do Rio de Janeiro (Firjan) divulgou, a 21 de fevereiro, uma pesquisa que avaliou a perda direta em 665 milhões de reais, o que equivale a 2% do Produto Interno Bruto (PIB) municipal. Os prejuízos totais ultrapassaram 1 bilhão de reais, uma vez incluídos os custos inerentes à reconstrução. A mesma instituição reportou que a chuva afetou 65% das empresas da cidade, das quais 85% não haviam retomado as suas atividades na data de divulgação do estudo [12].

## 8. CONCLUSÃO

A tragédia que assolou o município de Petrópolis em 2022 não pode ser vista como uma mera fatalidade climática. Este artigo demonstrou que a severidade do desastre resultou da junção crítica entre uma vulnerabilidade estrutural e crónica imposta pela topografia acentuada e pela ocupação urbana em zonas de perigo, além da intensificação dos eventos pluviométricos extremos, um reflexo inequívoco das alterações climáticas.

### 8.1. Balanço da Resposta: Entre a Eficácia Operacional e a Inércia Estrutural

A análise da intervenção municipal revela um balanço com claros acertos e erros:



- **Acertos Operacionais (Resposta):** A capacidade de resposta imediata foi notável. A ativação multicanal dos alertas (SMS, NUDECs), foi crucial para a evacuação. A mobilização dos NUDECs e das Equipes de Acolhimento, traduzindo o alerta em ação comunitária, provou ser o pilar mais robusto do sistema. No pós-evento, a articulação multiescalar de entidades e a produção técnica qualificada (delimitação de risco remanescente e cartas de risco) geraram um acervo fundamental para a recuperação e o futuro planeamento.
- **Erros e Falhas Estruturais (Prevenção):** O maior erro reside na inércia histórica na gestão do risco conhecido. A autarquia detinha, desde 2017, o Plano Municipal de Redução de Riscos (PMRR), que identificava mais de 15 mil habitações em risco "alto" ou "muito alto" no 1.º Distrito. A falha na efetivação das medidas estruturais do PMRR, nomeadamente o controlo urbanístico e os programas de realojamento, foi o fator que mais impactou a dimensão da catástrofe humana e material.

O principal fator que elevou a tragédia a um desastre de magnitude recorde não foi o volume de chuva, mas sim a exposição do tecido social em áreas onde o risco geológico era não só conhecido, mas formalmente mapeado.

As consequências desta inércia têm um preço inequívoco: para além das 241 vítimas mortais, o prejuízo económico ultrapassou 1 bilião de reais, confirmando cabalmente que a prevenção é sempre mais sustentável e menos onerosa do que a reconstrução.

## 8.2 Perspetivas para a Mitigação de Futuros Desastres

Para que Petrópolis possa atenuar o impacto de futuras tragédias hidro-climáticas e inundações, são necessárias reformas estruturais e contínuas:

1. Implementação Rigorosa do PMRR: É imperativa a execução imediata e inegociável das diretrizes do Plano, incluindo a fiscalização severa para evitar novas ocupações e a delimitação efetiva de zonas *non aedificandi*.
2. Soluções Estruturais e Sustentáveis: O investimento deve ser direcionado para a engenharia natural, nomeadamente o uso de Soluções Baseadas na Natureza (SBN), como a reflorestação de encostas e projetos de aumento da permeabilidade do solo. Paralelamente, os programas de reassentamento digno devem ser priorizados e financeiramente garantidos.
3. Sustentabilidade Política e Financeira: A resiliência do município depende da continuidade das políticas de risco e da garantia de uma fonte de financiamento estável para a manutenção das infraestruturas e dos sistemas de alerta.

Em suma, a experiência de Petrópolis em 2022 demonstra que, num cenário de alterações climáticas, a capacidade de resposta imediata salva vidas, mas é o compromisso político com o planeamento territorial que efetivamente salva o futuro da cidade.

## 9. REFERÊNCIAS

[1] RELATÓRIO TÉCNICO, EMERGENCIAL PETRÓPOLIS, GOVERNO DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO (09/2022) <https://www.rj.gov.br>

[2] ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS 2014 IMPACTOS, ADAPTAÇÃO E VULNERABILIDADE, IPCC <https://www.ipcc.ch>

[3] GOVERNO FEDERAL RECONHECE ESTADO DE CALAMIDADE PÚBLICA EM PETRÓPOLIS, NO RIO DE JANEIRO (17/02/2022) <https://www.gov.br>



[4] SILVA, WL; DEREZYNSKI, CP Caracterização climatológica e tendências observadas em extremos climáticos no estado do Rio de Janeiro. Anuário do Instituto de Geociências, v. 2, pág. 123-138, 2014. [https://doi.org/10.11137/2014\\_2\\_123\\_138](https://doi.org/10.11137/2014_2_123_138)

[5] RELATÓRIO - EVENTOS CHUVOSOS DE 15 DE FEVEREIRO DE 2022, PREFEITURA DE PETRÓPOLIS. <https://www.petropolis.rj.gov.br>

[6] AVALIAÇÃO DAS PRECIPITAÇÕES EXTREMAS OCORRIDAS NO DIA 15 DE FEVEREIRO DE 2022 NA CIDADE DE PETRÓPOLIS/RJ. <https://files.abrhidro.org.br>

[7] DIÁRIO OFICIAL XXVII Nº6365 (15/02/2022) PREFEITURA DE PETRÓPOLIS. <https://www.petropolis.rj.gov.br>

[8] NÚCLEOS COMUNITÁRIOS DE DEFESA CIVIL (NUDECS) – SITE PREFEITURA DE PETRÓPOLIS <https://www.petropolis.rj.gov.br>

[9] PMRR - 6A ETAPA REFLEXÃO E PROPOSIÇÃO DE ESTRATÉGIAS DE INTERVENÇÕES NÃO ESTRUTURAIS PARA A REDUÇÃO DO RISCO <https://www.petropolis.rj.gov.br>

[10] EDUARDO, J. P. A. *Análise da dinâmica urbana e das inundações em Petrópolis (RJ)*. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), Rio de Janeiro, 2022.

[11] Reportagem Sou Petrópolis – Pesquisa da FECOMÉRCIO RJ <https://soupetropolis.com/2022/02/17>

[12] Reportagem CNN Brasil - Petrópolis perdeu pelo menos R\$ 665 milhões no PIB com tragédia, diz Firjan <https://www.cnnbrasil.com.br>



**9JORNINC-4JORPROCIV**

9<sup>ª</sup> Jornadas de Segurança aos Incêndios Urbanos  
4<sup>ª</sup> Jornadas de Proteção Civil

Coimbra, 7 de novembro de 2025



# A VULNERABILIDADE DA PAMPILHOSA DA SERRA: ANÁLISE DA RECORRÊNCIA DE GRANDES INCÊNDIOS E AS IMPLICAÇÕES NA GESTÃO DO RISCO

4<sup>as</sup> JORNADAS DE PROTEÇÃO CIVIL

**Duarte  
Chamiça**  
Aluno  
LGSC,  
SUSCITA-  
COIMBRA  
Portugal

**Dinis Costa**  
Aluno  
LGSC,  
ISEC/IPC-  
COIMBRA  
Portugal

**João P. M.  
Gouveia**  
Professor  
ISEC/IPC-  
COIMBRA,  
SUSCITA-  
COIMBRA  
Portugal

**Aurea V.  
Andrade**  
Professor  
UNESPAR  
SUSCITA-  
COIMBRA  
Brasil

**António  
Correia**  
Professor  
ISEC/IPC-  
COIMBRA,  
SUSCITA-  
COIMBRA  
Portugal

## Resumo

Este artigo analisa a gestão do risco de incêndio rural na Pampilhosa da Serra, concelho de Portugal Continental particularmente vulnerável a incêndios de grande escala, potenciados por condições climáticas extremas, abandono rural e continuidade da mancha florestal. O estudo centra-se nas características do coberto vegetal e na morfologia do território, integrando o histórico de incêndios, com destaque para os eventos de 2017 e 2025 (Piódão/Arganil), que provocaram danos socioambientais significativos e evidenciaram lacunas estruturais na prevenção e resposta. A vegetação predominante, constituída por espécies pirófilas como pinheiro-bravo (*Pinus pinaster*) e eucalipto (*Eucalyptus globulus*), associada a um modelo de gestão florestal fragmentado e descoordenado, aumenta a perigosidade estrutural do concelho. O abandono agrícola, o envelhecimento populacional e a topografia acidentada dificultam a implementação de infraestruturas eficazes de defesa da floresta. A metodologia baseia-se num Estudo de Caso Múltiplo, abrangendo o período de 2017 a 2025, permitindo uma análise detalhada das dinâmicas de vulnerabilidade territorial, das práticas de gestão e da eficácia das políticas públicas. Os resultados indicam que a resiliência territorial exige gestão integrada e modelos de cogestão, suportados por tecnologias geoespaciais e pela reorganização da paisagem em mosaico agroflorestal. O caso da Pampilhosa da Serra ilustra a necessidade de políticas públicas estruturadas, sustentáveis e territorializadas, fundamentadas em evidência científica e operacional.

**PALAVRAS-CHAVE:** Pampilhosa da Serra; Incêndios Rurais; Gestão do Risco; Resiliência Territorial; Desafios Territoriais.

## 1. INTRODUÇÃO

Portugal tem sido, nas últimas décadas, palco de incêndios rurais de grande magnitude, com impactos devastadores sobre o território, o ambiente e as comunidades locais. Estes eventos não apenas provocam



perdas materiais e ecológicas significativas, mas também evidenciam fragilidades estruturais e institucionais no ordenamento territorial e na gestão florestal.

A conjugação de fatores como despovoamento, envelhecimento demográfico, fragmentação fundiária e abandono das práticas agrícolas e florestais tradicionais tornou vastas áreas do interior particularmente vulneráveis ao fogo. Tal vulnerabilidade é exacerbada pela predominância de espécies pirófilas, como o pinheiro-bravo (*Pinus pinaster*) e o eucalipto (*Eucalyptus globulus*), associada a mosaicos florestais homogêneos e gestão fragmentada, que elevam a probabilidade de ignição e propagação rápida dos incêndios.

A Pampilhosa da Serra, situada no distrito de Coimbra, constitui um exemplo paradigmático desta vulnerabilidade estrutural. Inserida na transição entre as serras do Açor e da Lousã, caracteriza-se por relevo montanhoso acentuado (Figura 1), povoamento florestal denso e uma rede viária limitada, condições que dificultam a prevenção e a resposta operacional ao fogo. Grandes incêndios, como os ocorridos em 2003, 2005, 2017 e 2025, evidenciaram fragilidades na gestão territorial, lacunas na coordenação interinstitucional e limitações nos recursos de combate, afetando profundamente as comunidades locais e a sustentabilidade dos ecossistemas.

O presente estudo analisa de forma integrada a vulnerabilidade da Pampilhosa da Serra à recorrência de incêndios rurais, considerando fatores naturais, estruturais e socioeconómicos, bem como as implicações para a gestão do risco e a governança territorial. O enquadramento teórico integra os conceitos de gestão integrada do risco, resiliência territorial e governança multiescalar, permitindo compreender como a interação entre atores institucionais e comunitários pode reforçar a capacidade adaptativa do território face a eventos extremos.



Figura 1 – Paisagem da Pampilhosa da Serra

Reconhecendo que a vulnerabilidade territorial é multidimensional, resultante da conjugação entre características físicas (clima, relevo, vegetação), estruturais (fragmentação fundiária, padrão de ocupação do solo) e socioeconómicas (envelhecimento populacional, abandono rural, dependência económica da floresta), o estudo tem como objetivo central compreender de que forma a configuração física, social e institucional da Pampilhosa da Serra condiciona a vulnerabilidade do território e identificar estratégias para reforçar a sua resiliência. Para tal, recorreu-se a um Estudo de Caso Múltiplo, abrangendo o período de



2017 a 2025, que possibilita analisar a evolução dos incêndios, as práticas de gestão territorial e a eficácia das políticas públicas implementadas.

O estudo organiza-se em seis secções, iniciando com a caracterização física e socioambiental do concelho e o histórico de incêndios, seguindo-se a análise das infraestruturas e do planeamento da defesa florestal, depois a apresentação das estratégias de gestão integrada do risco e a avaliação da governança territorial, e culminando nas conclusões, que sintetizam os resultados e apresentam recomendações para políticas públicas de prevenção e adaptação, estruturando-se assim: (i) caracterização física e socioambiental do concelho e evolução histórica dos incêndios; (ii) análise das infraestruturas e do planeamento da defesa florestal; (iii) estratégias de gestão integrada do risco; (iv) desafios e oportunidades da governança territorial; (v) avaliação das políticas públicas implementadas e recomendações; (vi) conclusões, evidenciando implicações para a gestão territorial.

Este artigo sistematiza o conhecimento sobre a vulnerabilidade da Pampilhosa da Serra face aos incêndios rurais, oferecendo uma base analítica para avaliar a eficácia das estratégias de gestão do risco e da governança territorial implementadas, bem como para promover uma reflexão crítica sobre políticas de prevenção e adaptação.

## **2. CARACTERIZAÇÃO TERRITORIAL E HISTÓRICO DOS INCÊNDIOS**

A análise da gestão do risco de incêndio na Pampilhosa da Serra requer uma compreensão aprofundada da sua matriz física e biológica, uma vez que estas características estruturais determinam a elevada vulnerabilidade do concelho ao fogo (ICNF, 2022). As zonas de maior perigo (tons de laranja e vermelho, classes 6 e 7) coincidem com áreas de elevada carga de combustível, onde os incêndios podem atingir intensidade máxima e propagar-se rapidamente.

O concelho localiza-se no distrito de Coimbra, enquadrado na região das Beiras e no Maciço Central Português, constituindo uma transição paisagística e climática entre as Serras do Açor e da Lousã. Esta posição confere-lhe uma orografia particularmente complexa: o relevo é acidentado, marcado por altitudes que superam os 1000 metros e por vertentes de declive acentuado, o que impõe sérias limitações logísticas à resposta e operações de combate, dificultando a progressão de veículos terrestres e exigindo o recurso intensivo a meios aéreos.

Do ponto de vista da hidrografia, o território é atravessado por uma rede densa de afluentes que deságuam na bacia do Mondego, nomeadamente os rios Ceira e Unhais. Apesar desta riqueza hídrica superficial (Figura 3), o aproveitamento da água é, do ponto de vista operacional, severamente limitado (ICNF, 2022).

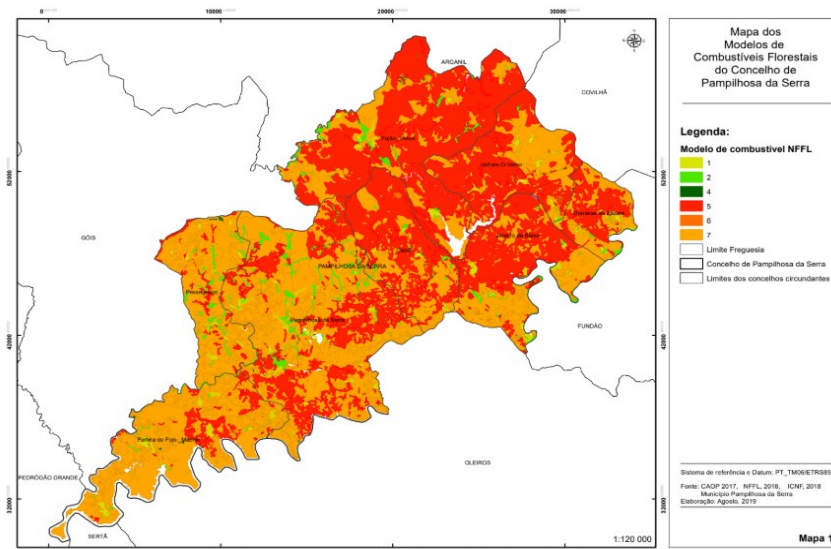


Figura 2 –  
Mapa dos  
Modelos de

Combustível Florestais do Concelho de Pampilhosa da Serra

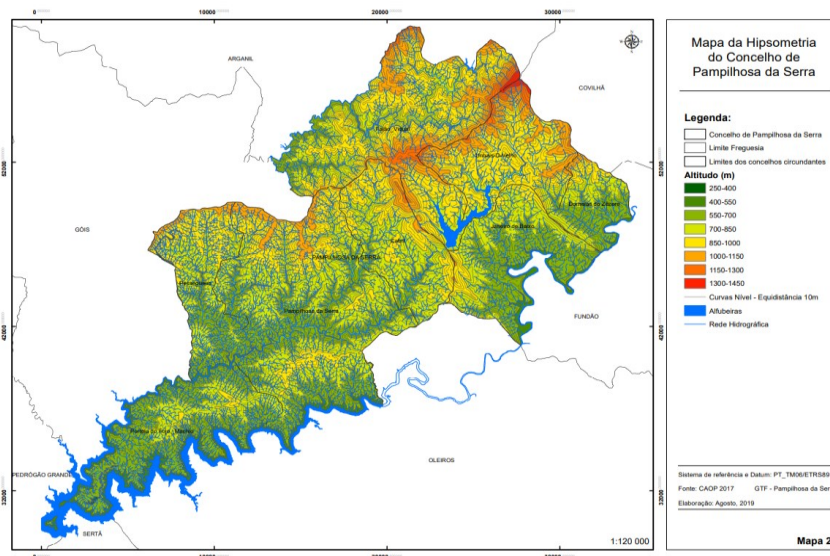


Figura 3 – Mapa da Hipsometria do Concelho de Pampilhosa da Serra

A Figura 3 ilustra a complexidade orográfica do concelho da Pampilhosa da Serra, com altitudes que variam entre o vale do Rio Zêzere (a sul) e as zonas serranas a norte e leste (atingindo mais de 1450 m - tons vermelhos). As curvas de nível e a rede hidrográfica densa, mas encaixada, demonstram visualmente a topografia acidentada, que dificulta o acesso dos meios de combate e contribui para o comportamento extremo do fogo, apesar da aparente abundância de água. Isto complica a criação e manutenção de pontos de água de captação acessíveis e eficientes para o reabastecimento rápido dos meios aéreos e terrestres de combate.

No que concerne ao clima, o concelho apresenta características mediterrânicas com forte influência continental, com verões muito quentes e secos e invernos frios. Esta acentuada sazonalidade define um



período crítico de incêndios entre junho e outubro, quando altas temperaturas, baixa humidade relativa e a seca da vegetação criam condições favoráveis à ignição e propagação rápida do fogo. A tendência de agravamento das condições climatéricas extremas, alertada pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2021), aumenta a probabilidade de ocorrência de incêndios de grande intensidade (Pereira, Oliveira & Vasconcelos, 2022). Neste contexto, a mitigação do risco depende também de uma infraestrutura operacional robusta. A Pampilhosa da Serra dispõe de pontos de água estratégicos, rede viária e sistemas de vigilância, elementos essenciais para a prevenção, deteção precoce e resposta eficiente a incêndios (ICNF, 2022).

### **3. INFRAESTRUTURAS E PLANEAMENTO DA DEFESA FLORESTAL**

A gestão operacional do risco de incêndios na Pampilhosa da Serra depende de uma rede estruturada de infraestruturas e do planeamento técnico adequado, que articula pontos de água, redes viárias e sistemas de vigilância. Estes elementos constituem a base para a prevenção, deteção precoce e resposta eficiente a eventos críticos (ICNF, 2022).

Os pontos de água, essenciais para o reabastecimento rápido de meios terrestres e aéreos, estão distribuídos de forma desigual pelo concelho, sendo muitos de difícil acesso devido à topografia acidentada (Figura 4). A limitação de abastecimento compromete a eficácia das operações e evidencia a necessidade de reforço e modernização destes recursos.

A rede viária apresenta-se restrita e fragmentada, especialmente nas zonas montanhosas, dificultando o deslocamento de veículos de combate e a logística de evacuação. Este fator, aliado à complexidade orográfica, aumenta a vulnerabilidade operacional e torna imprescindível a utilização de meios aéreos e a coordenação precisa entre equipas locais e regionais.

Os sistemas de vigilância e deteção precoce, incluindo torres, câmaras de monitorização e patrulhas programadas, constituem instrumentos fundamentais para reduzir o tempo de reação e a propagação dos incêndios. A sua integração com plataformas digitais de monitorização em tempo real permite uma gestão mais eficiente da informação e apoio à decisão (Pereira, Oliveira & Vasconcelos, 2022).

O planeamento municipal enquadra-se no âmbito do PMDFCI (Plano Municipal de Defesa da Floresta Contra Incêndios), DECIR 2025 e SGIFR (Sistema de Gestão Integrada de Florestas e Riscos), instrumentos que orientam a organização territorial, a definição de áreas prioritárias e as medidas preventivas e de recuperação. Estes documentos estabelecem responsabilidades, protocolos de atuação e mecanismos de coordenação interinstitucional, promovendo a coerência entre ações locais, regionais e nacionais (ICNF, 2022; UNDRR, 2019).



Figura 4 - Ressalta de fundo a quantidade que combustível existente no território da Pampilhosa da serra

Apesar destes instrumentos, a coordenação institucional e operacional enfrenta desafios significativos: limitação de meios humanos e materiais, sobreposição de competências e falhas na comunicação interinstitucional durante eventos críticos. A complexidade da resposta exige a articulação entre autoridades nacionais, entidades intermunicipais e forças locais, integrando ações preventivas, reativas e de recuperação de forma eficiente (ICNF, 2022). A complexidade da resposta exige a articulação entre autoridades nacionais, entidades intermunicipais e forças locais, refletindo a necessidade de estratégias integradas para enfrentar o risco de incêndio.

#### **4. GESTÃO INTEGRADA DO RISCO: PREVENÇÃO, RESPOSTA E RECUPERAÇÃO**

A gestão integrada do risco de incêndio rural constitui um processo contínuo que articula medidas de prevenção, preparação, resposta e recuperação, de forma a reduzir a probabilidade de ignição e a mitigar as consequências do fogo (FAO, 2020). Na Pampilhosa da Serra, a implementação desta abordagem é determinante, dada a elevada vulnerabilidade do território, resultado da conjugação de fatores naturais, estruturais e socioeconómicos (ICNF, 2022; Pereira, Oliveira & Vasconcelos, 2022).

##### **4.1 Gestão de combustíveis e silvicultura preventiva**

A gestão de combustíveis é uma das medidas mais eficazes para reduzir a intensidade e propagação dos incêndios. Engloba práticas mecânicas, pastorícia controlada e manutenção de mosaicos agroflorestais, essenciais para evitar a erosão e degradação do solo em áreas de declive acentuado (DGT, 2022).

A silvicultura preventiva aumenta a resiliência dos povoamentos florestais por meio da escolha de espécies menos inflamáveis, da redução da densidade arbórea e da remoção de material combustível acumulado. Destacam-se a introdução e promoção de espécies autóctones, como carvalho-negral, sobreiro e castanheiro, que contribuem para reduzir a continuidade de combustível e melhorar a biodiversidade (Fernandes et al., 2021).



A integração de práticas agrícolas tradicionais e da pastorícia extensiva contribui para restaurar o mosaico agroflorestal, funcionando como barreira natural à propagação do fogo, em consonância com as recomendações do UNDRR para resiliência rural (UNDRR, 2019).

#### **4.2 Modelos de prevenção estrutural e comportamental**

A prevenção estrutural foca-se na manutenção de acessos florestais funcionais e na criação de zonas de descontinuidade de combustível, permitindo compartimentar a paisagem e facilitar o rápido apoio às operações de combate (ICNF, 2022).

A prevenção comportamental envolve sensibilização, educação e capacitação das comunidades locais, reforçando a autoproteção e a responsabilidade coletiva perante o risco de incêndio (AGIF, 2020). Programas nacionais, como Aldeia Segura – Pessoas Seguras, exemplificam esta articulação entre prevenção estrutural e comportamental, promovendo a organização comunitária, a manutenção de faixas de segurança e a preparação para situações de emergência.

#### **4.3 Vigilância e deteção precoce**

A vigilância e deteção precoce são cruciais para a eficácia do combate aos incêndios. A redução do tempo de resposta aumenta a probabilidade de contenção de focos iniciais e diminui os danos ambientais e socioeconómicos (AGIF, 2020).

A rede de postos de vigia, complementada com câmaras térmicas, drones e sistemas de monitorização remota, permite um acompanhamento contínuo e coordenado do território. Estas ferramentas alinham-se com as recomendações internacionais para a utilização de tecnologias de monitorização no aumento da resiliência territorial (UNDRR, 2019).

#### **4.4 Resposta operacional e gestão pós-fogo**

A resposta operacional é coordenada pelo Sistema Integrado de Operações de Proteção e Socorro (SIOPS), assegurando o comando unificado e a articulação entre bombeiros, GIPS, sapadores florestais e outras forças de proteção civil (AGIF, 2020).

A gestão pós-fogo inclui a recuperação dos solos, das linhas de água e a reflorestação com espécies resilientes, seguindo o princípio build back better do UNDRR (UNDRR, 2019). Esta abordagem reforça a estrutura territorial e prepara o concelho para uma coordenação eficaz no enfrentamento de futuros incêndios.

### **5. GOVERNANÇA TERRITORIAL, DESAFIOS E OPORTUNIDADES**

A gestão do risco de incêndios rurais na Pampilhosa da Serra baseia-se numa governança multinível, envolvendo diferentes escalas de decisão, nacional, regional e local, e a participação da comunidade. A coordenação entre atores públicos, privados e sociedade civil permite implementar políticas de prevenção e reforçar a resiliência territorial (ICNF, 2022; UNDRR, 2019).

No nível nacional, o ICNF define a legislação florestal e os programas de prevenção e combate a incêndios. A nível regional e intermunicipal, a AIGP e outras entidades promovem ações coordenadas entre municípios, com enfoque na gestão de áreas florestais e vigilância contra incêndios. No nível local, destacam-se os ZIF, os Baldios e o programa Aldeia Segura - Pessoas Seguras, que envolvem proprietários e a comunidade na proteção do território.



Quadro 1 – Governança Territorial, Desafios e Oportunidades na Pampilhosa da Serra

Nível de Governança	Atores principais	Funções/intervenções	Desafios estruturais	Oportunidades estratégicas
Nacional	ICNF	Definição de legislação florestal; programas de prevenção e combate a incêndios	Pressão climática crescente; dependência de espécies de crescimento rápido	Desenvolvimento de políticas integradas; apoio técnico e científico
Regional/ Intermunicipal	AIGP e entidades intermunicipais	Coordenação de ações entre municípios; gestão de áreas florestais; vigilância contra incêndios	Fragmentação fundiária; limitações logísticas	Monitorização avançada da floresta; cooperação intermunicipal
Local	Zonas de Intervenção Florestal (ZIF), Baldios, programa Aldeia Segura - Pessoas Seguras	Mobilização comunitária; manutenção do território; medidas preventivas locais	Despovoamento rural; envelhecimento da população	Educação ambiental; participação ativa da comunidade; fortalecimento da resiliência local

Fonte: ICNF, 2022; UNDRR, 2019; elaboração dos autores.

Os desafios estruturais identificados incluem o despovoamento rural, o envelhecimento da população, a fragmentação fundiária, a dependência de espécies de crescimento rápido e a crescente pressão climática (Pereira, Oliveira & Vasconcelos, 2022). Estes fatores dificultam a implementação de medidas preventivas e condicionam a resposta operacional em situações de risco elevado.

As oportunidades estratégicas passam pela reorganização fundiária, monitorização avançada, silvicultura adaptativa, desenvolvimento de cadeias de valor sustentáveis, participação comunitária e educação ambiental. Estes instrumentos contribuem para reduzir o risco de incêndios e reforçar a resiliência socioecológica do concelho (ICNF, 2022; UNDRR, 2019).

No horizonte futuro, a Pampilhosa da Serra poderá beneficiar da integração tecnológica, da bioeconomia e da inovação territorial, em articulação com a cooperação entre os diferentes níveis de governação e a participação comunitária, reforçando assim a capacidade de prevenção, resposta e recuperação face a incêndios florestais (Pereira, Oliveira & Vasconcelos, 2022).

## 6. CONCLUSÕES

O presente estudo evidenciou que a Pampilhosa da Serra apresenta elevada vulnerabilidade aos incêndios rurais, condicionada pela sua matriz física e biológica, clima mediterrânico com forte influência continental, relevo acidentado e densidade florestal significativa (ICNF, 2022; Pereira, Oliveira & Vasconcelos, 2022). A análise histórica revelou a recorrência de grandes incêndios entre 2000 e 2024, com impactos significativos a nível humano, ambiental e económico, reforçando a necessidade de uma gestão integrada e multinível do risco.

A investigação demonstrou que a governança multinível, envolvendo o ICNF, a AIGP, ZIF, Baldios e o programa Aldeia Segura, Pessoas Seguras, é central para a coordenação de políticas e ações preventivas, mas enfrenta desafios estruturais como despovoamento, envelhecimento, fragmentação fundiária, dependência de espécies de crescimento rápido e pressão climática crescente (UNDRR, 2019).



As recomendações estratégicas incluem reorganização fundiária, monitorização avançada, silvicultura adaptativa, desenvolvimento de cadeias de valor sustentáveis, educação ambiental e participação ativa da comunidade. Estas medidas podem reduzir a vulnerabilidade e fortalecer a resiliência socioecológica do concelho e de regiões análogas (ICNF, 2022).

O estudo contribui para o debate sobre políticas públicas de prevenção e adaptação ao fogo em Portugal, destacando a importância de integrar abordagens científicas, tecnologias digitais e planeamento adaptativo no desenho de estratégias de mitigação.

Para investigação futura, recomenda-se aprofundar a implementação de planeamento adaptativo e sistemas de monitorização digital do risco, capazes de antecipar eventos críticos e apoiar decisões em tempo real, promovendo respostas mais eficientes e sustentáveis frente aos incêndios rurais.

## REFERÊNCIAS

AGIF. (2020). *Estratégia Nacional para uma Gestão Integrada dos Fogos Rurais 2020–2030*. Lisboa: Agência para a Gestão Integrada de Fogos Rurais.

AGIF. (2020). *Relatório anual sobre incêndios rurais em Portugal*. Lisboa: Agência para a Gestão Integrada de Fogos Rurais.

Agência para a Gestão Integrada de Fogos Rurais. (2023). *Relatório de Monitorização do Sistema de Gestão Integrada de Fogos Rurais*. AGIF.

Agência Portuguesa do Ambiente (APA). (2020). *Relatório do Estado do Ordenamento do Território*. Lisboa: APA.

Agência Portuguesa do Ambiente (APA). (2021). *Relatório do Estado do Ambiente 2021*. Lisboa: APA.

Agência Portuguesa do Ambiente (APA). (2022). *RNA2100 – Rede Nacional de Adaptação: Alterações Climáticas em Portugal Continental*. Lisboa: APA.

ANEPC. (2025). *Diretiva Operacional Nacional n.º 2 – DECIR 2025*. Autoridade Nacional de Emergência e Proteção Civil. Recuperado de <https://prociv.gov.pt>

Autoridade Nacional de Emergência e Proteção Civil. (2023). *Programa Aldeia Segura – Pessoas Seguras: Relatório de Implementação 2023*. ANEPC.

Benali, A., Fernandes, P. M., Silva, J., Pereira, J. M. C., & Sá, A. C. L. (2021). *Modelação da propagação do fogo sob diferentes cenários de gestão da paisagem em Portugal*. *International Journal of Wildland Fire*, 30(8), 632–647. <https://doi.org/10.1071/WF20147>

Câmara Municipal de Pampilhosa da Serra. (2024). *Diagnóstico Social 2024–2028*. CMPS.

Câmara Municipal de Pampilhosa da Serra. (2024). *Plano Municipal de Defesa da Floresta Contra Incêndios 2024–2033*. CMPS.

DG Território. (2022). *Plano Regional de Ordenamento Florestal da Beira Interior Norte*. Lisboa: Direção-Geral do Território.

DGT. (2022). *Carta de Uso e Ocupação do Solo (COS 2021)*. Lisboa: DGT.

DGT. (2022). *Plano Municipal de Defesa da Floresta Contra Incêndios 2019–2028*. Câmara Municipal da Pampilhosa da Serra.

Direção-Geral do Território. (2022). *Fragmentação fundiária e gestão integrada da paisagem*. Lisboa: DGT.

Direção-Geral do Território. (2022). *Relatório do Estado do Ordenamento do Território*. Lisboa: DGT.

Direção-Geral do Território. (2022). *Relatório Técnico sobre Operações Integradas de Gestão da Paisagem*. Lisboa: DGT.

Direção-Geral do Território. (2023). *Manual de Apoio às AIGP e ZIF*. Lisboa: DGT.



Domingos, T., Fernandes, P. M., & Carvalho, R. (2025). Gestão florestal sustentável e adaptação às alterações climáticas em Portugal. *Revista Florestal Portuguesa*, 25(1), 15–33.

European Space Agency (ESA). (2022). Programa Copernicus: Ferramentas de monitorização e deteção precoce de incêndios. ESA.

Fernandes, P. M. (2021). Fire-smart management of Mediterranean forests under climate change. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 19(1), 36–45. <https://doi.org/10.1002/fee.2287>

Fernandes, P. M., & Botelho, H. S. (2003). A review of prescribed burning effectiveness in fire hazard reduction. *International Journal of Wildland Fire*, 12(2), 117–128. <https://doi.org/10.1071/WF03018>

Fernandes, P. M., Botelho, H. S., Rego, F. C., & Loureiro, C. (2021). Silvicultura adaptativa: estratégias para a redução do risco de incêndio florestal. Lisboa: ICNF.

Fernandes, P. M., Silva, J., & Loureiro, C. (2021). Resilience of mixed-species forests to fire in Mediterranean landscapes. *Forest Ecology and Management*, 489, 118963. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.118963>

Instituto da Conservação da Natureza e das Florestas (ICNF). (2022). Plano Municipal de Defesa da Floresta Contra Incêndios – Pampilhosa da Serra. Coimbra: ICNF.

Instituto da Conservação da Natureza e das Florestas (ICNF). (2023). 5.º Relatório Nacional de Incêndios Rurais – 2022. Lisboa: ICNF.

Instituto Nacional de Estatística (INE). (2022). Censos 2021 — Resultados definitivos: Pampilhosa da Serra. Lisboa: INE.

Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA). (2023). Relatório anual do perigo de incêndio rural em Portugal continental. Lisboa: IPMA.

IPCC. (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Cambridge: Cambridge University Press.

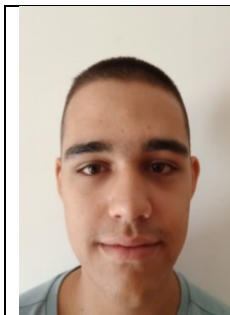
Oliveira, S., Dias, M., & Fernandes, P. (2018). Extreme wildfires in Portugal: Towards a new paradigm of risk governance. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 18(3), 641–660. <https://doi.org/10.5194/nhess-18-641-2018>

Pereira, J. M. C., Oliveira, S., & Vasconcelos, M. J. (2022). Fire behavior modeling for central Portugal under changing climate conditions. *International Journal of Wildland Fire*, 31(4), 445–459. <https://doi.org/10.1071/WF20219>

Silva, J. S., Oliveira, S., & Fernandes, P. (2020). Gestão da paisagem e prevenção de incêndios: Uma visão integrada para o Pinhal Interior. Lisboa: Caderno do Observatório Técnico Independente, Assembleia da República.



## COMPORTAMENTO DO BETÃO ARMADO EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO: PROPRIEDADES, NORMAS E ESTRATÉGIAS DE PROTEÇÃO



**Dinis Costa**<sup>1</sup>  
Estudante  
LGSC, ISEC/IPC  
Coimbra/Portugal



**João Paulo  
Gouveia**  
Professor Adjunto,  
ISEC-SUScita-  
IPC,  
Coimbra/Portugal

### SUMÁRIO

Este artigo aborda o comportamento do betão armado quando exposto a temperaturas elevadas, com foco nas suas propriedades térmicas, nas suas vulnerabilidades estruturais e as estratégias de proteção contra incêndios. Baseado numa metodologia de revisão e pesquisa científica, este artigo destaca a importância da prevenção estrutural face a incêndios urbanos, explora a evolução do betão e as suas limitações, especialmente o fenómeno de *spalling* e a perda de resistência mecânica a altas temperaturas. É apresentada uma análise das normas técnicas, com destaque para o Eurocódigo 2, e são discutidas soluções de proteção passiva, como revestimentos intumescentes, aditivos retardantes de chama e fibras incorporadas.

**PALAVRAS-CHAVE:** Incêndios Urbanos; Betão Armado; Resistência ao Fogo; Proteção Passiva; Eurocódigo 2.

### 1. INTRODUÇÃO

O betão, é amplamente utilizado na engenharia civil pela sua resistência mecânica, durabilidade e versatilidade. A sua composição integra, essencialmente, agregados finos e grossos, cimento e água, podendo incluir adições e adjuvantes para otimizar propriedades específicas conforme as exigências do projeto. Apesar da sua elevada resistência ao fogo em comparação com materiais como a madeira ou o aço, a exposição prolongada a altas temperaturas pode comprometer significativamente o seu desempenho estrutural. As alterações químicas induzidas pelo calor, como a evaporação da água, livre e quimicamente ligada, a desidratação da pasta de cimento e as transformações nos agregados, contribuem para a fissuração, perda de resistência e fenómenos como o *spalling* (fragmentação explosiva), que pode expor as armaduras e acelerar o colapso estrutural. A compreensão do comportamento térmico do betão é essencial para o desenvolvimento de estratégias de mitigação, incluindo o uso de agregados mais resistentes, revestimentos protetores e dimensionamentos adequados.

### 2. INCÊNDIOS URBANOS: RISCO; RESISTÊNCIA ESTRUTURAL E SENSIBILIZAÇÃO DA POPULAÇÃO

Os incêndios urbanos representam uma das principais ameaças à segurança de pessoas e bens em ambientes construídos, sendo mais frequentes em zonas densamente povoadas e industrializadas, embora também possam ocorrer em contextos rurais. Este tipo de incêndios afeta uma vasta gama de edifícios, como habitações,

<sup>1</sup> Autor correspondente – Dinis Branco Costa, Estudante, Gestão Sustentável das Cidades, ISEC/IPC, Coimbra, Portugal; email: [dinis.branco.costa@gmail.com](mailto:dinis.branco.costa@gmail.com), <https://www.isec.pt>.



escritórios, estabelecimentos comerciais, unidades fabris, infraestruturas públicas e serviços de saúde, como hospitais (Soares, 2021; Lopes & Cunha, 2016; Carvalho, 2012).

A elevada concentração de materiais combustíveis, a constante presença de pessoas e a complexidade das infraestruturas tornam os incêndios urbanos particularmente perigosos, tanto pela sua rápida propagação como pelas consequências estruturais e humanas (Araújo, 2024; Costa, 2017). Assim, torna-se essencial implementar medidas preventivas desde a fase de projeto, durante a construção e ao longo de toda a vida útil dos edifícios. Entre estas medidas incluem-se a utilização de materiais com elevada resistência ao fogo, a correta compartimentação dos espaços, e a manutenção regular dos sistemas de segurança, como alarmes, *sprinklers* e vias de evacuação (LNEC, 2009). Para além da prevenção passiva, é igualmente fundamental garantir uma capacidade de resposta eficaz, assegurada por corporações de bombeiros bem equipadas e treinadas, capazes de atuar de forma rápida na contenção do incêndio (ANEPC, 2020).

A resistência ao fogo é um fator determinante na segurança estrutural dos edifícios. Esta resistência é definida pelo Índice de Resistência ao Fogo (*Fire Resistance Rating – FRR*), que representa o tempo durante o qual um elemento construtivo mantém a sua integridade estrutural, estanqueidade e isolamento térmico sob a ação do fogo (Silva, 2021). O FRR depende de várias variáveis, incluindo o tipo de material, a sua espessura e geometria, a carga aplicada, as condições ambientais e a eventual presença de sistemas de proteção passiva (Pinto, 2018). A avaliação da resistência é realizada por ensaios normalizados em ambiente laboratorial, conforme especificado em normas europeias como a EN 1363-1:2020 e a EN 1992-1-2:2004, esta última aplicável especificamente a estruturas de betão.

A identificação correta da classe de fogo é essencial para uma intervenção eficaz e segura. Além das medidas técnicas e estruturais, a sensibilização da população assume um papel crucial na redução do risco de incêndio urbano. A educação das comunidades deve integrar ações formativas em escolas, locais de trabalho e instituições públicas, recorrendo a simuladores, vídeos, folhetos e exercícios práticos (Patel & Hastak, 2021). Estas ações devem ser complementadas com campanhas de comunicação social, com mensagens claras e acessíveis a diferentes faixas etárias, promovidas por televisão, rádio, redes sociais e ações de proximidade (Lindell & Perry, 2012).

Importa ainda destacar que existem períodos críticos em que o risco de incêndio urbano aumenta consideravelmente, exigindo reforço da vigilância e da sensibilização. Durante o inverno, especialmente entre dezembro e fevereiro, regista-se um maior uso de sistemas de aquecimento (lareiras, aquecedores, caldeiras), sobrecarga das instalações elétricas, e uso intensivo de velas e decorações natalícias, o que eleva o risco de ignição acidental e de propagação do fogo. A adoção de medidas preventivas sazonais e campanhas específicas nestes períodos pode reduzir significativamente a incidência de incêndios.

Em suma, a abordagem aos incêndios urbanos deve ser multidisciplinar e integrada, aliando soluções técnicas na construção e reabilitação dos edifícios, sistemas de segurança ativos e passivos, capacitação dos agentes de proteção civil, e educação e envolvimento ativo da população. Só assim se garante uma verdadeira cultura de segurança urbana e uma resposta eficiente às ameaças crescentes em contextos urbanos e periurbanos.

### **3. NORMAS TÉCNICAS**

A segurança estrutural de elementos de betão em situação de incêndio é regulada por um sistema normativo robusto e harmonizado, que tem nos Eurocódigos a sua principal referência europeia. Estes documentos normativos estabelecem critérios e métodos de verificação para garantir que as estruturas de betão armado conservem a sua função resistente durante um período mínimo em caso de exposição ao fogo. Para além dos Eurocódigos, existem normas ISO e EN específicas que complementam os requisitos de ensaio e classificação.

#### **3.1 Eurocódigo 2 – Parte 1-2 (EN 1992-1-2)**

O Eurocódigo 2 – Parte 1-2: Regras gerais – Projeto estrutural em situação de incêndio (CEN, 2004a) define os princípios e métodos para o dimensionamento de elementos de betão sujeitos a temperaturas elevadas. Esta



norma considera os efeitos térmicos diretos na resistência dos materiais e fornece dois métodos principais de verificação: os métodos simplificados, com base em tabelas e dimensões mínimas, e os métodos avançados, baseados em modelos térmicos e mecânicos de cálculo.

De acordo com a EN 1992-1-2, o comportamento do betão em situação de incêndio é avaliado através da sua resistência residual, que depende da temperatura interna da secção transversal e da degradação das propriedades do material com o aumento da temperatura. A norma fornece tabelas que indicam, por exemplo, que a resistência à compressão do betão C30/37 reduz-se para cerca de 60% do valor original aos 500 °C. A condutividade térmica, o calor específico e o módulo de elasticidade também estão tabelados para várias faixas de temperatura.

Além disso, define os tempos de resistência normalizados (30, 60, 90, 120 minutos, etc.) e as correspondentes espessuras mínimas de recobrimento das armaduras, permitindo o dimensionamento por via prescritiva de lajes, vigas, pilares e paredes de betão armado (CEN, 2004a).

### **3.2 Eurocódigo 1 – Parte 1-2 (EN 1992-1-2)**

Complementando a abordagem do Eurocódigo 2, a parte 1.2 do Eurocódigo 1 (CEN, 2002) apresenta a modelação da ação térmica sobre as estruturas. Esta norma fornece as curvas de temperatura-tempo normalizadas, como a curva ISO 834 (ISO, 1999), utilizada em ensaios padrão, bem como modelos paramétricos para incêndios naturais que consideram variáveis como a carga térmica, a ventilação do compartimento e a geometria dos espaços interiores.

A norma também define métodos para estimar a distribuição da temperatura nas secções transversais dos elementos estruturais, tendo em conta a transferência de calor por condução, radiação e convecção, sendo necessário modelar a interação térmica entre os gases quentes e a superfície do betão.

Adicionalmente, estabelece as combinações de ações específicas para o estado-limite último em situação de incêndio, reduzindo os coeficientes parciais de segurança e eliminando as ações acidentais não relacionadas com o fogo, conforme definido também no Eurocódigo 0 (EN 1990) (CEN, 2002a).

### **3.3 EN 13501-2: Classificação da Resistência ao Fogo**

A EN 13501-2 (CEN, 2016) estabelece o sistema europeu de classificação de resistência ao fogo para elementos de construção. Os elementos de betão são classificados de acordo com três critérios principais:

- R – Capacidade de carga;
- E – Estanquidade (prevenção da passagem de chamas e gases);
- I – Isolamento térmico.

A classificação assume a forma de REI t, sendo "t" o tempo (em minutos) durante o qual os critérios são satisfeitos. Por exemplo, uma laje classificada como REI 120 deve manter a capacidade estrutural, a estanquidade e o isolamento térmico durante pelo menos 120 minutos sob ação térmica padronizada.

### **3.4 EN 1363-1: Métodos Gerais de Ensaio de Resistência ao Fogo**

Esta norma (CEN, 2020) define os procedimentos normalizados de ensaio para avaliar a resistência ao fogo de elementos estruturais. Os corpos de prova são expostos à curva ISO 834 e observam-se os seus comportamentos segundo os critérios REI.



Durante os ensaios, a deformação, a vulnerabilidade ao colapso e a temperatura nas superfícies não expostas, são monitorizadas. A norma especifica também os dispositivos de medição, a taxa de aquecimento e os critérios de falha.

### **3.5 EN 13381-3: Avaliação de Sistemas de Proteção**

A EN 13381-3 (CEN, 2015) aplica-se à avaliação da contribuição de materiais de proteção passiva – como argamassas projetadas ou revestimentos intumescentes – aplicados a elementos de betão. Permite verificar a eficácia destes sistemas em melhorar o desempenho ao fogo de lajes, vigas e pilares.

Esta norma é particularmente relevante quando se pretende reduzir a secção resistente de um elemento estrutural sem comprometer a sua resistência ao fogo, através da aplicação de uma proteção térmica adicional.

### **3.6 EN 1994-1-2: Estruturas Mistas Aço-Betão em Situação de Incêndio**

Embora não trate exclusivamente de elementos de betão, a norma EN 1994-1-2 (CEN, 2005) é pertinente em estruturas mistas onde o comportamento do betão influencia significativamente a estabilidade global. O documento define critérios para a interação térmica e mecânica entre os materiais e fornece métodos para o dimensionamento de elementos mistos em incêndio.

### **3.7 Normas ISO e Complementares**

- ISO 834 – Fire Resistance Tests (ISO, 1999): A ISO 834 define a curva padrão de incêndio, usada em todo o mundo para ensaios laboratoriais de resistência ao fogo. A curva estabelece uma progressão de temperatura controlada, com 945 °C atingidos aos 60 minutos e cerca de 1150 °C aos 120 minutos. Apesar de simplificada, serve como base comparativa internacional.
- EN 206:2013+A1:2016 – Betão – Especificação e Conformidade: A norma EN 206 (CEN, 2016a) trata da formulação do betão e especifica requisitos para a durabilidade em diferentes classes de exposição, incluindo situações com risco de incêndio. Embora não trate diretamente da resistência ao fogo, a escolha adequada dos agregados e da relação água/cimento influencia significativamente o comportamento térmico do betão (Phan & Carino, 2001).
- EN 1365-1 – Ensaio de resistência ao fogo de elementos estruturais (CEN, 2012): Este documento trata do ensaio específico de elementos portantes horizontais e verticais (lajes, vigas e pilares), complementando a EN 1363-1. Aplica-se especialmente a ensaios de elementos de grandes dimensões com betão armado ou pré-esforçado.

## **4. ENTIDADES DE CERTIFICAÇÃO E VALIDAÇÃO DE PÂRAMETROS DOS MATERIAIS (BETÃO; AÇO E BETÃO ARMADO)**

A fiabilidade estrutural de qualquer sistema construtivo depende da qualidade dos materiais utilizados, da sua rastreabilidade e da conformidade com os parâmetros normalizados. Em contexto europeu, a validação e certificação dos materiais estruturais, como o betão, o aço e os sistemas de betão armado, é assegurada por um conjunto de entidades normativas, laboratórios acreditados, organismos notificados e institutos de normalização.

Estas entidades desempenham um papel essencial no controlo de qualidade, na homologação dos produtos e na garantia da conformidade com os regulamentos técnicos, incluindo os requisitos de resistência ao fogo definidos nas normas europeias harmonizadas.



#### 4.1 Marcação CE e Regulamento dos Produtos de Construção (RPC – UE 305/2011)

A colocação de materiais de construção no mercado europeu exige o cumprimento do Regulamento (UE) n.º 305/2011, conhecido como o Regulamento dos Produtos de Construção (RPC). Este diploma obriga à Declaração de Desempenho (DoP) dos produtos e à respetiva marcação CE, sempre que exista uma norma europeia harmonizada (hEN) ou uma Avaliação Técnica Europeia (ETA) aplicável.

Os sistemas de betão armado, por exemplo, devem cumprir as normas:

- EN 206: Betão – Especificação, desempenho, produção e conformidade (CEN, 2016a),
- EN 10080: Aço para armaduras de betão – Barras soldáveis de aço com nervuras (CEN, 2005a).

A marcação CE assegura que o produto cumpre os requisitos essenciais, incluindo resistência mecânica, segurança em caso de incêndio e durabilidade. Esta verificação é realizada por organismos notificados (*Notified Bodies*) independentes e imparciais.

#### 4.2 Organismos Notificados e Avaliação da Conformidade

Os organismos notificados (ON) são entidades autorizadas pelos Estados-Membros da UE para realizar tarefas de avaliação da conformidade no âmbito do RPC. Estes organismos podem realizar:

- Ensaio iniciais de tipo (ITT – Initial Type Testing),
- Inspeções de fábrica,
- Auditorias de controlo de produção (FPC – Factory Production Control),
- Certificação do sistema 1, 2+ ou 3, dependendo do produto.

Alguns exemplos de organismos notificados com reconhecimento internacional:

- LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil (Portugal): Autoridade técnica nacional, participa na normalização do betão e realiza certificação voluntária e ensaios de desempenho, incluindo resistência ao fogo.
- DIBt – Deutsches Institut für Bautechnik (Alemanha): Emite Avaliações Técnicas Europeias (ETA) e valida sistemas construtivos inovadores.
- CSTB – Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (França): Realiza ensaios de resistência ao fogo e desempenha funções de organismo notificado.
- BRE Global (Reino Unido): Apesar do Brexit, continua com acordos técnicos para produtos com marcação CE. Realiza ensaios de fogo e certificação de materiais.
- Applus+ Laboratories (Espanha): Laboratório acreditado para ensaios segundo a norma EN 1363-1 e EN 13501-2, em betão e aço.

#### 4.3 Entidades Normativas e de Acreditação

- CEN – Comité Europeu de Normalização: Responsável pela elaboração dos Eurocódigos e das normas europeias harmonizadas (EN) para materiais de construção. O CEN/TC 104 trata especificamente do betão, enquanto o CEN/TC 250 é responsável pelos Eurocódigos estruturais.
- EOTA – Organização Europeia para Avaliações Técnicas: Coordena a emissão das ETA – Avaliações Técnicas Europeias, destinadas a produtos não abrangidos por normas harmonizadas. Um sistema de betão projetado com adições ou fibras inovadoras, por exemplo, pode requerer uma ETA validada por um organismo técnico como o LNEC ou DIBt.



- IPQ – Instituto Português da Qualidade: Autoridade portuguesa de normalização e metrologia. Representa Portugal no CEN e coordena os Organismos de Certificação acreditados a nível nacional.
- IPAC – Instituto Português de Acreditação: Acredita laboratórios (segundo ISO/IEC 17025) e organismos de certificação (segundo ISO/IEC 17065), assegurando a sua competência técnica para validação de propriedades de materiais como resistência à compressão, módulo de elasticidade, comportamento ao fogo, entre outros.

#### 4.4 Laboratórios de Ensaio Acreditados

Os ensaios laboratoriais sobre materiais de construção, incluindo os de resistência ao fogo, devem ser realizados em laboratórios acreditados para garantir a rastreabilidade e fiabilidade dos resultados. Estes ensaios seguem normas como:

- EN 12390-3: Resistência à compressão do betão endurecido,
- EN 1363-1: Ensaio de resistência ao fogo – Procedimentos gerais,
- EN ISO 834-1: Curva padrão de fogo,
- EN 10080: Verificação dimensional e resistência de varões de aço para armaduras.

Alguns laboratórios reconhecidos:

- LNEC – Lisboa: Com laboratórios de fogo e estruturas, é uma referência nacional e europeia em ensaios normalizados.
- Applus+ – Bellaterra (Espanha): Ensaio de desempenho ao fogo em elementos estruturais e produtos de proteção passiva.
- Laboratório FiReLab – Itália: Especializado em fogo e ensaios termomecânicos em estruturas de betão.
- VTT Technical Research Centre – Finlândia: Participa em programas de investigação e certificação europeia.

#### 4.5 Certificação de Produtos de Proteção Contra Incêndios em Betão

Produtos como argamassas projetadas, rebocos refratários ou sistemas de proteção intumescente aplicados a elementos de betão devem ser ensaiados e certificados segundo a norma EN 13381-3, e classificados segundo a EN 13501-2. A sua eficácia depende da aderência ao betão, condutividade térmica e espessura aplicada.

A validação de tais sistemas é feita por laboratórios notificados e certificados que emitem relatórios de ensaio (*Test Reports*) e certificados de conformidade, que devem acompanhar a documentação técnica da obra.

### 5. PROPRIEDADES TÉRMICAS E COMPORTAMENTO DO BETÃO AO FOGO

O comportamento do betão em situação de incêndio depende essencialmente das suas propriedades térmicas e das transformações físico-químicas que ocorrem com o aumento da temperatura e com a alteração do teor de humidade. Entre as propriedades mais relevantes, destaca-se a condutividade térmica ( $\lambda$ ), o calor específico ( $\rho c$ ) e a difusividade térmica ( $\alpha$ ), que determinam a capacidade do betão de resistir ao fogo (Rezaei et al., 2020).

A condutividade térmica varia entre 1,4 e 2,5 W/m·K, dependendo da sua composição, porosidade e do teor de humidade. A presença de humidade aumenta significativamente a transferência de calor devido à condução pela água nos poros (Kodur, 2014). O calor específico situa-se entre 0,75 e 1,3 kJ/kg·K, aumentando ligeiramente até 200 °C e diminuindo em temperaturas superiores (Khoury, 2000). A difusividade térmica típica é de 0,2–1,5 mm<sup>2</sup>/s (Phan & Carino, 2000).

A exposição a temperaturas elevadas provoca alterações estruturais e perda de resistência:



- A partir dos 300 °C, ocorre desidratação da pasta de cimento e tensões internas;
- 400–500 °C: decomposição do hidróxido de cálcio e início de fissuração;
- Acima dos 600 °C: perda significativa da resistência da armadura e risco de colapso (Kodur, 2014; Eurocódigo 2, 2004).

O *spalling*, expulsão de fragmentos de betão, é crítico, podendo ser explosivo, progressivo ou térmico, e expõe rapidamente a armadura ao calor, acelerando a degradação da secção estrutural (Khoury, 2000; Kodur & Phan, 2007). A densidade e a capacidade calorífica influenciam a resposta térmica: betões mais densos armazenam calor, aumentando a inércia térmica, mas podem ser mais suscetíveis ao spalling; betões com ar incorporado mitigam fissuração por congelação (Mehta & Monteiro, 2014; Neville, 2011).

A mitigação dos efeitos do fogo inclui: maior recobrimento da armadura, incorporação de fibras refratárias, adições pozolânicas, escolha de agregados resistentes ao calor e aplicação de revestimentos protetores, cumprindo normas como o Eurocódigo 2 para garantir a segurança estrutural (Khoury, 2000; Castillo & Durrani, 1990).

### 5.1 Fibras refratárias e o seu papel na resistência ao fogo do betão

A incorporação de fibras no betão tem sido amplamente estudada como uma medida eficaz para melhorar o seu comportamento em situação de incêndio, reduzindo o spalling e mitigando a perda de resistência. As fibras refratárias distinguem-se pela sua capacidade de manter estabilidade térmica e integridade estrutural a temperaturas elevadas, resistindo à degradação físico-química. São aplicadas em betões refratários e compósitos cimentícios sujeitos a altas temperaturas, como túneis, fornos e elementos estruturais críticos (Kalifa et al., 2001; Kodur & Phan, 2007).

Definidas como materiais fibrosos que mantêm as suas propriedades acima de 1000 °C (EN 1094-1:2008), as fibras refratárias atuam como reforço mecânico e barreira térmica, reduzindo tensões internas e fissuração induzida por gradientes térmicos (Pimienta & Hager, 2018). Entre os principais tipos encontram-se as fibras metálicas, que mantêm resistência até cerca de 1500 °C e melhoram a ductilidade, embora a sua alta condutividade térmica possa acelerar a transmissão de calor (Khoury, 2000; Kodur, 2014). As fibras de vidro resistentes a álcalis (AR-glass) apresentam bom desempenho até 600–800 °C, mas perdem rigidez devido à fusão parcial da sílica (Mehta & Monteiro, 2014).

As fibras cerâmicas, compostas por alumina e sílica, são as mais refratárias, mantendo estabilidade entre 1260 °C e 1600 °C e oferecendo baixa condutividade térmica e resistência química superior (Neville, 2011; Mindeguia et al., 2010). As fibras de carbono resistem até cerca de 1500 °C em atmosferas inertes e ajudam a redistribuir tensões e a controlar fissuração (Chung, 2002). Já as fibras poliméricas, como as de polipropileno (PP), fundem-se entre 160 °C e 170 °C, criando microcanais que permitem a libertação de vapor, reduzindo a pressão interna e prevenindo o spalling explosivo (Kalifa et al., 2001; Zeiml et al., 2006).

De modo geral, as fibras atuam em três níveis: micromecânico, reforçando a matriz e limitando fissuras; termohidráulico, promovendo a saída do vapor de água; e térmico, atuando como barreira de condução e aumentando a inércia térmica (Hager, 2013). O Eurocódigo 2 (EN 1992-1-2, 2004) recomenda o uso de fibras de PP em estruturas expostas ao fogo, com dosagens típicas entre 1 e 3 kg/m<sup>3</sup> para PP e 10 a 30 kg/m<sup>3</sup> para fibras metálicas (Kodur, 2014).

## 6. TÉCNICAS DE PROTEÇÃO DO BETÃO CONTRA O FOGO

Existem algumas estratégias principais como a proteção passiva (incluem o uso de revestimentos intumescentes, retardantes de chama e fibras incorporadas no centro do betão), todas elas com o principal objetivo de minimizar os efeitos térmicos e diminuir a ocorrência como fenómenos como o *spalling*. Os revestimentos intumescentes são aplicados principalmente diretamente sobre a superfície do betão e assim expandem significativamente quando expostos a temperaturas superiores a 250/300 °C. Acabam por formar uma camada carbonizada de baixa



condutividade térmica que vai atuar como barreira isolante. É fácil aplicação, é eficaz na redução da transferência de calor e na proteção estrutural durante incêndios prolongados (LNEC, 2021; Kodur, 2014).

Retardantes de chama, como hidróxidos metálicos ( $\text{Al}(\text{OH})_3$  e  $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ) e compostos de fósforo, podem ser integrados na mistura do betão para assim melhorar a resistência do betão ao fogo. Também atuam absorvendo calor, libertando vapor de água e promovendo a formação de camadas carbonizadas protetoras. Para além disso, a incorporação de nanopartículas (como sílica, grafeno ou nanotubos de carbono) tem mostrado benefícios tanto na resistência térmica como nas propriedades mecânicas do material (Mehta & Monteiro, 2006; CEB, 1982).

A colocação de fibras é particularmente eficaz na prevenção do *spalling* térmico. As fibras de polipropileno (PP) fundem-se quando colocadas sob calor intenso, criando assim microcanais que permitem a libertação de vapor de água e reduzem a pressão interna do betão. Já as fibras metálicas, como as de aço, vão reforçar a coesão da matriz do betão e aumentam a resistência ao impacto térmico. Podemos também utilizar fibras híbridas (PP + aço) que potenciam os efeitos positivos de ambas, acabando por melhorar a ductilidade e a estabilidade térmica do betão (Khoury, 2000; Brito et al., 2015).

## 7. EXEMPLOS DE PESQUISAS EXPERIMENTAIS SOBRE O COMPORTAMENTO AO FOGO

A caracterização do comportamento do betão e das estruturas de betão armado sob ação do fogo tem sido amplamente estudada por via experimental, com o objetivo de compreender os mecanismos de degradação térmica, a progressão de danos estruturais e a eficácia de soluções de mitigação. Os ensaios laboratoriais constituem uma base fundamental para o desenvolvimento de modelos normativos e para a validação de estratégias de proteção passiva e ativa.

Um dos estudos experimentais de referência é o realizado por Kodur e Phan (2007), que analisaram o comportamento de pilares de betão de alta resistência sujeitos a temperaturas elevadas. Os autores demonstraram que a combinação entre temperatura e carga axial elevada conduz a reduções drásticas da capacidade resistente, verificando perdas superiores a 50% da resistência à compressão a 600 °C. Estes resultados contribuíram para a definição de critérios de dimensionamento térmico no Eurocódigo 2 – Parte 1-2.

Outro estudo relevante foi conduzido por Khoury (2000), que testou colunas e lajes de betão armado em condições normalizadas de aquecimento segundo a curva ISO 834. O autor documentou a sequência de fenómenos térmicos – desidratação, fissuração, perda de aderência da armadura e *spalling* – e propôs correlações entre os parâmetros térmicos e a degradação mecânica. Os resultados experimentais reforçaram a necessidade de considerar o tipo de agregados e a humidade interna como fatores críticos.

Ensaio realizado por Hertz (2003) na Dinamarca focaram-se na medição da perda de rigidez de elementos estruturais expostos ao fogo. O estudo confirmou a redução significativa do módulo de elasticidade com a temperatura: cerca de 50% aos 300 °C e 90% aos 900 °C. Este dado é especialmente importante para a análise da estabilidade de pilares e lajes sob carregamentos sustentados.

No domínio da prevenção do *spalling*, Kalifa et al. (2001) conduziram uma série de ensaios em betões de alta performance, com e sem fibras de polipropileno. Os ensaios mostraram que as fibras reduzem significativamente a pressão interna de poros e evitam a fragmentação explosiva da superfície. Estes trabalhos experimentais foram determinantes para a introdução de fibras PP como recomendação em túneis e estruturas críticas expostas ao fogo. Mais recentemente, Mindeguia et al. (2013) realizaram ensaios instrumentados em painéis de UHPC submetidos a aquecimento unidirecional. As temperaturas, pressões de vapor e perda de massa foram medidas em tempo real. Os resultados indicaram que, mesmo com elevada resistência mecânica, o UHPC sem fibras é altamente vulnerável ao *spalling*, sublinhando a importância de estratégias combinadas de mitigação térmica.

Adicionalmente, têm sido realizados ensaios em estruturas em escala real, como os promovidos pelo instituto *SP Technical Research* (Suécia) e pelo centro *EMPA* (Suíça), que testaram compartimentos completos e estruturas



mistas de betão e aço em incêndios simulados. Estes estudos demonstraram a complexidade da resposta térmica global de edifícios e reforçaram a importância de considerar interações entre materiais, compartimentações e cargas variáveis.

O laboratório *Technical Research Centre (VTT* na Finlândia) em também contribuído com testes experimentais sobre resistência residual pós-incêndio. Verificou-se que elementos que não ultrapassaram os 500 °C podem recuperar parcialmente a sua resistência ao fim de 6 a 12 meses, sobretudo em ambientes húmidos que favorecem a reidratação da matriz de cimento.

Em síntese, os trabalhos experimentais têm permitido validar modelos computacionais, definir limites de temperatura crítica, identificar materiais mais adequados e desenvolver soluções construtivas com melhor desempenho ao fogo. A continuidade da investigação nesta área é fundamental para assegurar a fiabilidade dos métodos de dimensionamento, especialmente face à crescente exigência de segurança em edifícios urbanos e infraestruturas estratégicas.

## 8. CONCLUSÕES

A resistência ao fogo do betão armado é um factor determinante para a segurança estrutural de edifícios e infraestruturas, especialmente em meio urbano. Ao longo deste artigo, demonstrou-se que, embora o betão possua uma boa inércia térmica, a sua exposição a temperaturas elevadas pode comprometer gravemente o seu desempenho, devido à perda de resistência mecânica, à fissuração e ao fenómeno de *spalling*.

As inovações tecnológicas mais recentes, nomeadamente a incorporação de fibras de polipropileno, o desenvolvimento de betões de ultra alto desempenho (UHPC) e de betões geopoliméricos, revelaram-se estratégias eficazes para mitigar os efeitos térmicos adversos e melhorar o comportamento global do betão em situação de incêndio. Estas soluções contribuem significativamente para prolongar o tempo de resistência ao fogo e preservar a integridade estrutural. A aplicação prática destas tecnologias em obras como túneis, edifícios de grande altura e infraestruturas críticas comprova o seu valor em contextos reais. Contudo, a sua eficácia depende fortemente de uma produção cuidada, de uma execução controlada — seja em obra ou em pré-fabricação — e do cumprimento rigoroso das normas técnicas em vigor, como o Eurocódigo 2 e as normas EN e ISO aplicáveis.

Em síntese, conclui-se que a evolução técnico-científica, aliada à regulamentação e à adoção de boas práticas construtivas, é essencial para reforçar a resiliência das estruturas de betão armado face ao fogo. A incorporação de soluções inovadoras e sustentáveis deverá continuar a ser uma prioridade para garantir construções mais seguras, duráveis e preparadas para enfrentar cenários de incêndio urbano.

## AGRADECIMENTOS

Os autores salientam a formação oferecida pelos docentes do Departamento do Instituto Superior de Engenharia do Politécnico de Coimbra e aos docentes que definiram o plano curricular da licenciatura que contribui para a aquisição de conhecimentos práticos sempre alicerçados nos conceitos teóricos pelos estudantes, e que incentivam estes a participar em eventos de divulgação do saber adquirido.

## REFERÊNCIAS

- ANEPC – Autoridade Nacional de Emergência e Proteção Civil. (2020). Manual de apoio à elaboração de planos de emergência de proteção civil. Lisboa: ANEPC.
- Aitcin, P.-C. (2000). High-Performance Concrete. E & FN Spon.
- Aitcin, P.-C. (2003). High-Performance Concrete. CRC Press.
- Alexander, M. G., & Mindess, S. (2010). Durability of Concrete: Design and Construction. CRC Press.
- Araújo, G. (2024). Arquitetura segura: Uma proposta de melhores práticas em projetos de combate a incêndio centrada no ser humano [Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia]. Minas Gerais, Brasil.
- Arioz, O. (2007). Effects of elevated temperatures on properties of concrete. *Fire Safety Journal*, 42(8), 516–522.



- Bentz, D. P., et al. (2001). Influence of air voids on durability of cement-based materials. *Cement and Concrete Research*, 31(5), 767–771.
- Brito, J., & Branco, F., Neves, C., & Baptista, A. (2015). Comportamento do Betão Armado Sob a Ação do Fogo – Estudo de um Caso. Universidade de Lisboa.
- Brito, J., Silva, R., & Correia, J. R. (2015). *Fire Effects on Concrete Structures*. Springer.
- Brito, J., et al. (2015). Behaviour of concrete at high temperatures and the use of fibres to mitigate spalling.
- Brito, J., et al. (2015). *Durabilidade do Betão*. IST Press.
- Cabrita Neves, I. (1985). *Comportamento do Betão a Altas Temperaturas*. Lisboa: LNEC.
- Carvalho, A. (2012). *Segurança Contra Incêndio em Edifícios – Conceitos e Aplicações*. Lisboa: LNEC.
- Carvalho, J. M. (2012). *Segurança contra incêndios em edifícios urbanos: Princípios, regulamentação e casos práticos*. Lisboa: IST Press.
- Castillo, C., & Durrani, A. J. (1990). Effect of transient high temperature on high-strength concrete. *ACI Materials Journal*, 87(1), 47–53.
- C.E.B. (1982). *Design of Concrete Structures for Fire Resistance. Preliminary Draft of an Appendix to the C.E.B. – F.I.P. Model Code*.
- CEN – Comité Européen de Normalização. (1999). EN 1363-1: Fire resistance tests – Part 1: General requirements. Bruxelas: CEN.
- CEN – Comité Européen de Normalização. (1999). EN 1363-2: Fire resistance tests – Part 2: Alternative and additional procedures. Bruxelas: CEN.
- CEN. (2002). EN 1991-1-2: Eurocode 1 – Actions on structures – Part 1-2: General actions – Actions on structures exposed to fire. Brussels: CEN.
- CEN. (2004a). EN 1992-1-2: Eurocode 2 – Design of concrete structures – Part 1-2: General rules – Structural fire design. Brussels: CEN.
- CEN. (2005). EN 1994-1-2: Eurocode 4 – Design of composite steel and concrete structures – Part 1-2: General rules – Structural fire design. Brussels: CEN.
- CEN. (2005a). EN 10080: Steel for the reinforcement of concrete – Weldable reinforcing steel – General. Brussels: CEN.
- CEN. (2012). EN 1365-1: Fire resistance tests for loadbearing elements – Part 1: Walls. Brussels: CEN.
- CEN. (2014). EN 1365-2: Fire resistance tests for loadbearing elements – Part 2: Floors and roofs. Brussels: CEN.
- CEN. (2015). EN 13381-3: Test methods for determining the contribution to the fire resistance of structural members – Part 3: Applied protection to concrete members. Brussels: CEN.
- CEN. (2016). EN 13501-2: Fire classification of construction products and building elements – Part 2: Classification using data from fire resistance tests. Brussels: CEN.
- CEN. (2016a). EN 206:2013+A1:2016: Concrete – Specification, performance, production and conformity. Brussels: CEN.
- CEN. (2020). EN 1363-1: Fire resistance tests – Part 1: General Requirements. Brussels: CEN.
- Chung, D. D. L. (2002). Cement reinforced with short carbon fibers: a multifunctional material. *Composites Part B*, 33(6), 479–485.
- Costa, M. (2017). *Análise do Risco de Incêndio em Contextos Urbanos*. Universidade do Porto.
- Costa, M. A. (2017). *Comportamento ao fogo das estruturas de betão armado*. Coimbra: Imprensa da Universidade de Coimbra.
- De Larrard, F. (1999). *Concrete Mixture Proportioning: A Scientific Approach*. CRC Press.
- Decreto-Lei n.º 220/2008, de 12 de novembro. Regulamento de Segurança contra Incêndios em Edifícios. *Diário da República*, 1.ª série, n.º 220.
- Domone, P. (2010). Self-compacting concrete: An analysis of 11 years of case studies. *Cement and Concrete Composites*, 32(2), 92–99.
- EN 1094-1:2008. *Insulating refractory products – Part 1: Terminology, classification and test methods*. CEN, Brussels.
- European Fire Safety Alliance. (2021). *European Fire Safety Action Plan*.
- European Fire Safety Alliance. (2021). *Fire Safety in Europe: Towards a Fire Safe Future*.
- European Parliament and Council. (2011). Regulation (EU) No 305/2011 laying down harmonised conditions for the marketing of construction products. Brussels.



- EOTA. (2022). Guideline for European Technical Assessment – Fire performance of construction products. Brussels: EOTA.
- Fernández Cánovás, M. (2006). Hormigón: Materiales, fabricación y control de calidad. Editorial Munilla-Lería.
- Fernández Cánovás, M. (2006). Patología y Terapéutica del Hormigón Armado (2ª ed.). Editorial Dossat.
- Felicetti, R., Gambarova, P., & Meda, A. (2001). Color changes of concrete exposed to high temperature: Experimental data and practical significance. *Cement and Concrete Composites*.
- García-Arroyo, J., Pizarro, A., & Maldonado, J. (2020). Urban fire prevention strategies: A global perspective. *Fire Safety Journal*, 116, 103–120.
- Gartner, E., & Hirao, H. (2015). A review of alternative approaches to the reduction of CO<sub>2</sub> emissions. *Cement and Concrete Research*, 78, 126–142.
- Giorgi, R., Khoury, G. A., & Anderberg, Y. (2000). Mechanical properties of high-performance concrete at high temperature. *Cement and Concrete Research*, 30(7), 1139–1149.
- Gong, F., et al. (2023). An overview on spalling behavior, mechanism, residual properties and mitigation strategies of concrete exposed to fire. *Frontiers in Materials*.
- Hager, I. (2013). Behaviour of cement concrete at high temperature. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences*, 61(1), 145–154.
- Hager, I., et al. (2019). Role of polypropylene fibres in concrete spalling risk: experimental study and mechanisms. *International Journal of Civil Engineering and Technology*.
- Habert, G., & Roussel, N. (2009). How to reduce the environmental impact of concrete production? *Cement and Concrete Research*, 38(2), 115–122.
- Hertz, K. D. (2003). Limits of spalling of fire-exposed concrete. *Fire Safety Journal*, 38(2), 103–116.
- Hertz, K. D. (2005). Concrete strength for fire safety design. *Magazine of Concrete Research*, 57(8), 445–453.
- ISO. (1999). ISO 834-1: Fire-resistance tests — Elements of building construction — Part 1: General requirements. Geneva: ISO.
- Jiang, Y., Li, J., & Liu, C. (2019). Community resilience to urban fire disasters. *International Journal of Disaster Risk Reduction*.
- Jiang, Y., Wong, J. S., & Cheng, T. (2019). Community-based fire prevention and mitigation. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 36, 101–113.
- Kalifa, P., Chéné, G., & Galle, C. (2001). High-temperature behaviour of HPC with polypropylene fibres. *Cement and Concrete Research*, 31(10), 1487–1499.
- Khoury, G. A. (2000). Effect of fire on concrete and concrete structures. *Progress in Structural Engineering and Materials*, 2(4), 429–447.
- Klingsch, W., & Bretschneider, C. (1980). Mechanical properties of concrete at high temperatures. *Materials and Structures*, 13(75), 263–271.
- Kodur, V. K. R. (2014). Properties of concrete at elevated temperatures. *ISRN Civil Engineering*, 2014, 1–15.
- Kodur, V. K. R., & Phan, L. T. (2007). Critical factors governing the fire performance of high strength concrete systems. *Fire Safety Journal*, 42(6–7), 482–488.
- Kodur, V. K. R., & Sultan, M. A. (2003). Structural behavior of high-strength concrete columns exposed to fire. *Journal of Structural Engineering*.
- Kosmatka, S. H., Kerkhoff, B., & Panarese, W. C. (2003). Design and Control of Concrete Mixtures. Portland Cement Association.
- Kosmatka, S. H., Wilson, M. L., & Panarese, W. C. (2011). Design and Control of Concrete Mixtures. Portland Cement Association.
- Leonhardt, F. (2001). Prestressed Concrete: Design and Construction. Wilhelm Ernst & Sohn.
- Lindell, M. K., & Perry, R. W. (2012). The Protective Action Decision Model: Theoretical modifications and additional evidence. *Risk Analysis*.
- LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil. (2009). Manual de Segurança Contra Incêndios em Edifícios. Lisboa: LNEC.
- LNEC. (2021). Soluções de proteção passiva contra incêndios para estruturas de betão. Lisboa: LNEC.
- Lopes, J., & Cunha, L. (2016). Incêndios urbanos na zona antiga da Figueira da Foz: uma contribuição para avaliação da suscetibilidade, da vulnerabilidade e do risco.
- Mehta, P. K. (2001). Reducing the environmental impact of concrete. *Concrete International*, 23(10), 61–66.
- Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M. (2006). Concrete: Microstructure, Properties, and Materials. McGraw-Hill.



- Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M. (2014). *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials* (4th ed.). McGraw-Hill Education.
- Mindeguia, J. C., Pimenta, P., Noumowé, A., & Kanema, M. (2010). Temperature, pore pressure and mass variation of concrete subjected to high temperature. *Cement and Concrete Research*, 40(3), 477–487.
- Neville, A. M. (2011). *Properties of Concrete* (5th ed.). Pearson Education.
- NFPA – National Fire Protection Association. (2022). *Firewise USA: A Community-Based Approach to Wildfire Risk Reduction*. <https://www.nfpa.org>
- Pacheco-Torgal, F., Cabeza, L. F., Labrincha, J., & de Magalhães, A. G. (2013). *Eco-efficient Construction and Building Materials*. Woodhead Publishing.
- Phan, L. T., & Carino, N. J. (2001). *Fire Performance of High-Strength Concrete: A Report of the State-of-the-Art*. NIST IR 5934. Gaithersburg, MD: National Institute of Standards and Technology.
- Pimenta, P., & Hager, I. (2018). High-performance concrete at high temperature – An overview. *RILEM Technical Letters*, 3, 47–58.
- Pinto, A. (2018). *Comportamento ao Fogo de Estruturas de Betão Armado*. IST – Instituto Superior Técnico.
- Pinto, J. (2018). *Segurança contra incêndios em edifícios: Princípios e práticas*. Lisboa: IST Press.
- Rezaei, H., Kayan, B. A., Asadi, I., & Abu Hassan, Z. F. (2020). Investigation of thermal properties of normal weight concrete for different strength classes. *Materials Today: Proceedings*, 27, 1226–1231.
- Sadkovyi, V. (2020). *Fire resistance of reinforced concrete and steel structures: ensuring fire resistance of building structures*. Monograph.
- Schneider, U. (2006). *Behaviour of concrete at high temperatures*. RILEM Publications.
- Scrivener, K. L., John, V. M., & Gartner, E. M. (2018). Eco-efficient cements. *Cement and Concrete Research*, 114, 2–26.
- Sharma, A., & Bhowmik, B. (2024). When fire attacks: How does concrete stand up to heat? arXiv preprint.
- Silva, F. (2021). *Resistência ao Fogo de Elementos Estruturais: Fundamentos e Ensaios*. Coimbra: Universidade de Coimbra.
- Silva, M. A. (2021). *Comportamento ao fogo de materiais e estruturas de construção*. Porto: FEUP Edições.
- Soares, M. B. B. (2021). *Avaliação do risco de incêndio do centro urbano de Amarante com o modelo CHICHORRO* [Dissertação de Mestrado, Universidade do Porto].
- VTT Technical Research Centre of Finland. (2019). *Fire performance and post-fire assessment of concrete structures*. VTT Reports.
- Xiong, M., et al. (2015). Spalling behavior and residual resistance of fibre reinforced concrete exposed to fire. *Materiais de Construção*.
- Zeiml, M., Leithner, D., Lackner, R., & Mang, H. A. (2006). How do polypropylene fibers improve the spalling behavior of in-situ concrete? *Cement and Concrete Research*, 36(5), 929–942.
- Ziegler, M., Sanjayan, J., Mendis, P., & van Riessen, A. (2017). Thermal behavior of geopolymer concrete. *Materials and Structures*, 50(2), 1–11
- Spiegel (n.d.). *London: The Shard eröffnet Aussichtsplattform*. Disponível em: <https://www.spiegel.de/reise/staedte/london-the-shard-eroeffnet-aussichtsplattform-a-880708.html>
- OpenAI (2025). *Imagens criadas por inteligência artificial para representação de processos de produção e formulações de betão*. Geradas em julho de 2025 através da plataforma ChatGPT.
- Sea Soluções (n.d.). *Segurança contra Incêndios*. Disponível em: <https://sea-solucoes.com/site/servicos-seguranca-contra-incendios/>



## Índice remissivo de autores

A. Virgílio Oliveira, 125  
Alexandra Ribeiro, 225  
Ana Matias, 263  
André Rodrigues, 149  
Andrew Starnes, 209  
António Bicelli, 135  
António Correia, 95, 159, 167, 225, 269, 283  
António Leça Coelho, 13, 105  
António Raimundo, 125  
Artur Costa, 149  
Aurea Andrade, 283  
Aurélio Pereira, 245  
Carlos Couto, 47, 67, 177  
Carlos Rodrigues, 77  
Cidália Worm, 189  
Cristina Calmeiro, 209, 225  
Debora Ferreira, 67, 85  
Dinis Costa, 283, 293  
Diogo Teixeira, 237  
Duarte Chamiça, 283  
Elisabete Cordeiro, 13, 105  
Elza Fonseca, 61  
Emanuel de Oliveira, 29  
Fernando Branco, 135  
Gilberto Vaz, 125, 225  
Giovanna Frizzera, 47  
Hugo Raposo, 149  
João Aguiar, 61  
João Almeida, 13, 105  
João C. G. Lanzinha, 115  
João Gouveia, 225, 283, 293  
João Murta, 77  
João Paulo Rodrigues, 95, 159  
Jorge Raposo, 149  
José Gois, 245  
José Pedro Lopes, 197  
Leonardo Torres, 47  
Luana da Silva, 67  
Luciane Miscovicz, 85  
Lucínia Aires, 263



Luís Araújo Santos, 77, 225  
Luís Mário Ribeiro, 37  
Luís Mesquita, 47, 67  
Luís Moreira, 115, 209  
Luís Reis, 149  
Luísa Barreira, 67  
Mário Arruda, 135  
Miguel Almeida, 125  
Miguel Cejudo, 255  
Mohamed Zitouni, 135  
Mónica Gomes, 85  
Nuno Lopes, 47, 67  
Paulo Piloto, 47, 67  
Paulo Prata Ramos, 17  
Paulo Prata Ramos, 189, 215, 237  
Paulo Vila Real, 47, 67  
Renata Silva, 47  
Ruben Lopes, 95  
Ruben Santo, 177  
Sérgio Braga, 159  
Susana Meneses, 167, 225  
Teresa Fragoso, 225, 269  
Torres Farinha, 149,  
Vanessa Corrêa, 167, 269  
Verónica Oliveira, 77  
Vilarim Reis, 215