

9^{as} Jornadas de Segurança aos Incêndios Urbanos

4^{as} Jornadas de Proteção Civil



INSTITUTO POLITÉCNICO DE COIMBRA

07 de novembro de 2025

LIVRO DE ATAS

AUTORES

António José Pedroso de Moura Correia

Susana Catarina Neves Meneses

Teresa Cristina Melo Fragoso



9JORNINC-4JORPROCIV

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

Coimbra, 7 de novembro de 2025

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

ISBN: 978-989-8331-21-2

Tiragem:

USB Flash Drive

1^ª edição: novembro de 2025

Editado por:

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



PREFÁCIO

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

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

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

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

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

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

Prof.^a Doutora Susana Catarina Neves Meneses

Presidente do Departamento de Engenharia Civil



COMISSÃO ORGANIZADORA

Alexandra Maria Galvão Ribeiro (ISEC, Politécnico de Coimbra)

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

Cristina Calmeiro dos Santos (IPCB, Politécnico Castelo Branco)

Gilberto Cordeiro Vaz (ISEC, Politécnico de Coimbra)

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

Luís Manuel Araújo Santos ISEC, Politécnico de Coimbra)

Susana Catarina Neves Meneses (ISEC, Politécnico Coimbra)

Teresa Cristina Melo Fragoso (ISEC, Politécnico de Coimbra)

COMISSÃO EXECUTIVA

Ana Matias (Técnica Superior da Câmara Municipal da Mealhada)

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

Gilberto Cordeiro Vaz (ISEC, Politécnico de Coimbra)

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

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

José Carlos Marques (Câmara Municipal de Oliveira do Hospital)



COMISSÃO CIENTÍFICA

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



ÍNDICE

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

PALESTRAS

SUSTENTABILIDADE E SEGURANÇA CONTRA INCÊNDIOS: EQUILÍBRIOS NECESSÁRIOS

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

.....13

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

Paulo Prata Ramos

.....17

O USO DO FOGO NA GESTÃO DA PAISAGEM

Emanuel de Oliveira

.....29

A INTERFACE URBANO-FLORESTAL EM PORTUGAL

Luís Mário Ribeiro

.....37

ARTIGOS

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

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

.....47

A CAPACIDADE DE CARGA EM LIGAÇÕES DE MADEIRA AO FOGO

João Aguiar; Elza M.M. Fonseca

.....61

COMPORTAMENTO AO FOGO DE VIGAS ALVEOLARES COM ABERTURAS CIRCULARES

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

.....67



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



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



9JORNINC-4JORPROCIV

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

Coimbra, 7 de novembro de 2025

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



9JORNINC-4JORPROCIV

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

Coimbra, 7 de novembro de 2025



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



**Mónica Fernandes
Gomes^{SS}**
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 (CO₂) 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

^{SS} Autor correspondente – Gicos, Instituto Politécnico de Bragança, Campus de Santa Apolónia 5300-253 Bragança, Portugal
email: a13466@alunos.ipb.pt <https://gicos.ipb.pt/>



de 8 % das emissões globais de CO₂ [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 compactidade 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 ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³
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)

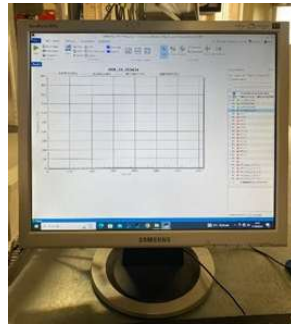


(b)

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 Ensaios 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.

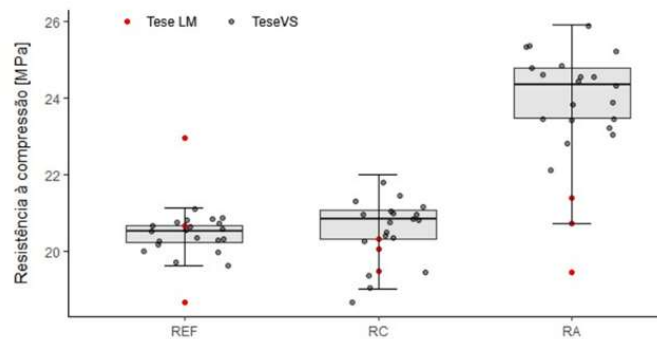


Figura 8: Comparação por Boxplot dos resultados da literatura com os obtidos neste estudo (6).

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.

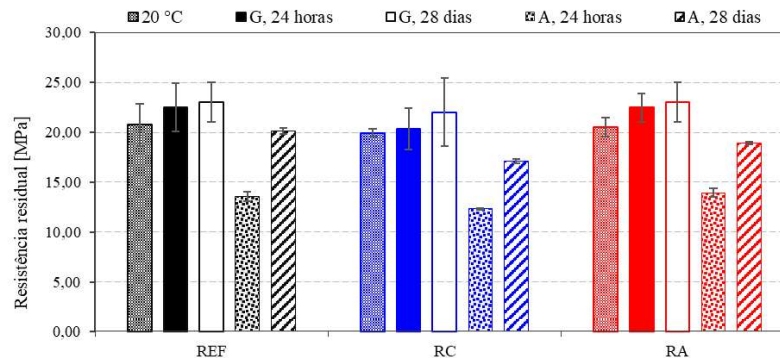


Figura 9: Resistência residual à compressão após exposição a 250 °C.



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.

<i>Fonte de variação</i>	<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 ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) 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].

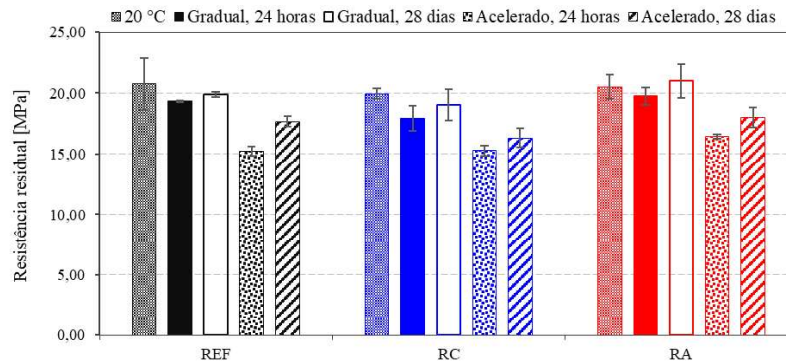


Figura 10: Resistência residual à compressão após exposição a 350 °C.

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.

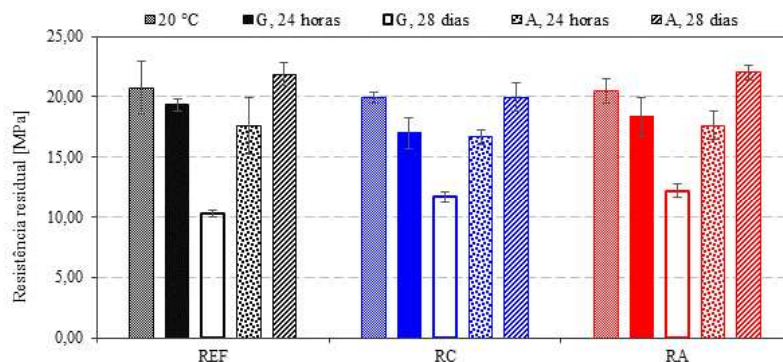


Figura 11: Resistência residual à compressão após exposição a 500 °C.



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.

Fonte de variação	<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.

Idade	Composição	Shapiro-Wilk		Levene	
		<i>W</i>	<i>Valor-p</i>	<i>F</i>	<i>Valor-p</i>
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.

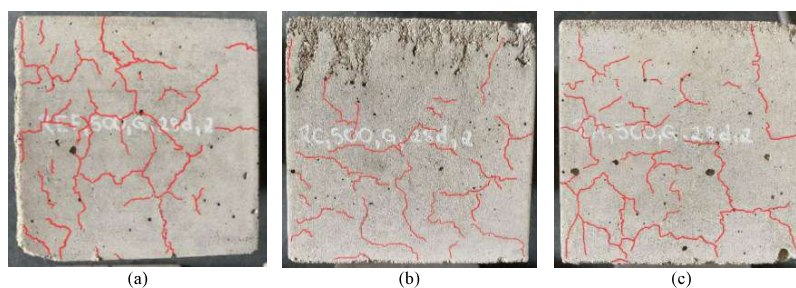


Figura 12: Fissuração dos provetes após aquecimento a 500 °C com taxa de aquecimento de 5 °C/min. (a) Referência; (b) Redução de cimento; (c) Redução de areia.

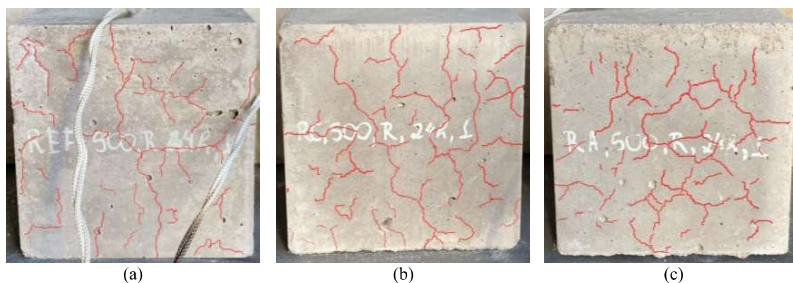


Figura 13: Fissuração dos provetes após aquecimento a 500 °C com taxa de aquecimento de 2 °C/min. (a) Referência; (b) Redução de cimento; (c) Redução de areia.

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 CO₂ 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, Pederneras 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 Khouadjia 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>