



UNIVERSIDADE D
COIMBRA

Miguel Lopes de Figueiredo

COMPORTAMENTO TERMOFÍSICO DE ARGAMASSAS
DE PROTEÇÃO PASSIVA CONTRA O FOGO DE BASE
CIMENTÍCIA E GESSO

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, na área de Especialização em Mecânica Estrutural, orientada pela Professora Doutora Aldina Santiago e pelo Doutor Hugo Caetano e apresentada ao Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.

Outubro de 2020

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

Miguel Lopes de Figueiredo

COMPORTAMENTO TERMOFÍSICO DE ARGAMASSAS DE PROTEÇÃO PASSIVA CONTRA O FOGO DE BASE CIMENTÍCIA E GESSO

THERMOPHYSICAL BEHAVIOUR OF PASSIVE FIRE PROTECTION MORTARS WITH
CEMENTITIOUS AND GYPSUM BASE

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, na área de Especialização em Mecânica Estrutural,
orientada pela Professora Doutora Aldina Santiago e pelo Doutor Hugo Caetano.

Esta Dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor. O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC
declina qualquer responsabilidade, legal ou outra, em relação a erros ou omissões que possa conter.

Outubro de 2020



UNIVERSIDADE D
COIMBRA

AGRADECIMENTOS

Eu Te agradeço, Senhor, por me dares a força e a convicção para completar esta tarefa que me confiaste. Por me guiares, sem falhas, através dos muitos obstáculos no meu caminho. E por me manteres resoluto quando tudo em redor parecia perdido. Obrigado pela Tua proteção e pelos Teus muitos sinais ao longo do caminho.

Aos meus pais, Joaquim Manuel Dias da Fonseca e Figueiredo e Maria Clara de Oliveira Lopes, que nunca mediram esforços para me ajudarem, agradeço todo o apoio, amor e disponibilidade económica em todos os momentos e ao longo dos últimos cinco anos, e que possibilitaram a concretização deste percurso que agora finda.

Ao Engenheiro Filipe Santos agradeço a oportunidade de integração na indústria de construção metálica, por incutir em mim o “amor pelo aço” e pelo incentivo à conclusão dos estudos.

Agradeço à Professora Doutora Aldina Santiago a sua orientação, por ter possibilitado a minha participação neste projeto e concluir o curso, em tempo útil, com uma dissertação voltada para o meio experimental.

Ao Doutor Hugo Caetano agradeço a sua amizade, camaradagem, compreensão, palavras de apoio e toda a sua ajuda ao longo dos últimos oito meses no desenvolvimento desta dissertação. Durante o período em que trabalhamos juntos, foi notória a sua integridade, entrega, organização, disciplina e resiliência, valores que levo comigo para dias vindouros, porque “não é fácil, mas nós somos rijos”.

Agradeço ao Doutor Luís Pedroso e à Engenheira Carolina Curado o tempo e os recursos disponibilizados que viabilizaram a moagem da matéria-prima.

Um bem hajam aos meus colegas Telmo Ribeiro e Luís Pedro Reis, que estiveram presentes em vários momentos ao longo dos últimos anos e com os quais partilhei incontáveis horas de trabalho.

Por fim, um forte abraço ao André Robalo, meu amigo em muitas lutas que já vieram e tantas outras que estão por vir.

RESUMO

Atualmente existe um interesse crescente no desenvolvimento de materiais alternativos, sustentáveis e de propriedades melhoradas. No que se refere às estruturas metálicas, essa procura passa pelo desenvolvimento de aços de alta resistência, mas também pelo desenvolvimento de materiais que consigam proteger eficientemente estas estruturas em caso de incêndio. Durante a ocorrência de um incêndio, a estabilidade de um edifício constituído por elementos em aço pode ficar condicionada (podendo ocorrer colapsos estruturais), devido à perda da sua resistência mecânica associada à degradação das propriedades mecânicas do aço com o aumento da temperatura. Por conseguinte, é de significativa importância a proteção térmica destes elementos. Uma das soluções para esta proteção é o revestimento através de argamassas com resistência melhorada ao fogo, devido à introdução de agregados termicamente estáveis e porosos.

Atualmente, a vermiculite e/ou perlite têm sido incorporadas em argamassas à base de gesso ou cimento (como substituição de areia), com o objetivo de melhorar o seu desempenho térmico quando submetidas a altas temperaturas. Devido à sua estrutura altamente porosa, estes materiais absorvem humidade em graus variáveis, consoante o seu tipo, permitindo prolongar a sua durabilidade em situação de incêndio, até ao momento em que esta humidade evapora do material. Como se tratam de materiais não combustíveis e com boas propriedades térmicas, existe o potencial de serem usados no desenvolvimento de argamassas de gesso ou cimento como solução de proteção passiva ao fogo em edifícios de estruturas metálicas.

Neste sentido, o principal objetivo deste trabalho foi desenvolver argamassas de base em gesso ou cimento como proteção passiva ao fogo em elementos metálicos (adição ou substituição de vermiculite, perlite e fibras de polipropileno para melhorar a resistência da argamassa), avaliar o seu desempenho térmico e analisar o comportamento mecânico de colunas metálicas protegidas com estas argamassas, sujeitas a compressão axial e a elevadas temperaturas.

Esta investigação, maioritariamente de carácter experimental, está integrada no projeto de investigação *Nanofire* e foi realizada no Laboratório de Estruturas, Mecânica Estrutural e Construções (LEMEC) da Universidade de Coimbra.

Palavras-chave: vermiculite, perlite, fibras de polipropileno, argamassas, elevadas temperaturas, elementos estruturais metálicos, materiais de proteção passiva, fogo.

ABSTRACT

Currently there is a growing interest in the development of alternative, sustainable materials and improved properties. As far as metallic structures are concerned, this demand includes the development of high strength steels, but also the development of materials that can efficiently protect these structures in case of fire. During the occurrence of a fire, the stability of a building made of steel elements may be conditioned (structural collapse may occur), due to the loss of its mechanical resistance associated with the degradation of the mechanical properties of steel with the increase in temperature. Therefore, the thermal protection of these elements is of significant importance. One of the solutions to this protection is the coating with mortars with improved fire resistance due to the introduction of thermally stable and porous aggregates.

Currently, vermiculite and/or perlite have been incorporated in gypsum or cement-based mortars (as a substitution for sand), with the objective of improving their thermal performance when submitted to high temperatures. Due to their highly porous structure, these materials absorb moisture in varying degrees, depending on their type, allowing their durability to be prolonged in a fire situation, until the moment this moisture evaporates from the material. As they are non-combustible materials with good thermal properties, there is the potential to be used in the development of plaster or cement mortars as a passive fire protection solution in buildings of metallic structures.

In this sense, the main objective of this work was to develop gypsum or cement base mortars as passive fire protection in metallic elements (addition or substitution of vermiculite, perlite and polypropylene fibers to improve the mortar resistance), to evaluate their thermal performance and to analyze the mechanical behavior of metallic columns protected with these mortars, subject to axial compression and high temperatures.

This research, mostly of an experimental nature, is integrated in the *Nanofire* research project and was carried out at the Laboratory of Structures, Structural Mechanics and Constructions (LEMEC) of the University of Coimbra.

Keywords: vermiculite, perlite, polypropylene fibers, mortars, high temperatures, metallic structural elements, passive protection materials, fire.

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS.....	i
RESUMO	ii
ABSTRACT	iii
ÍNDICE	iv
ÍNDICE DE FIGURAS.....	vi
ÍNDICE DE QUADROS.....	viii
SIMBOLOGIA	ix
ABREVIATURAS.....	xi
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Considerações	1
1.2 Enquadramento	2
1.3 Objetivos e Metodologia	3
1.4 Estrutura da Dissertação	4
2 ESTADO DE ARTE	5
2.1 Proteção de Estruturas Metálicas ao Fogo.....	5
2.1.1 Dimensionamento da Proteção ao Fogo	5
2.1.2 Métodos de Proteção Passiva em Estruturas Metálicas	8
2.2 Matérias-Primas das Argamassas Estudadas	12
2.3 Estudos Experimentais já desenvolvidos por outros Autores.....	15
3 ANÁLISE EXPERIMENTAL DAS ARGAMASSAS TÉRMICAS	20
3.1 Materiais e Composições.....	20
3.2 Moldes dos Provetes.....	21
3.3 Provetes de Argamassa.....	21
3.4 Formulação das Argamassas.....	23
3.5 Programa Experimental	25
3.6 Procedimento Experimental.....	25
3.7 Análise e Discussão de Resultados	27

4 ANÁLISE EXPERIMENTAL DOS ELEMENTOS ESTRUTURAIS - COLUNAS.....	37
4.1 Composições Estudadas	37
4.2 Provetes	38
4.3 Betonagem dos Provetes.....	39
4.4 Sistema e Procedimento Experimental.....	41
4.5 Análise e Discussão de Resultados	47
4.6 Avaliação Analítica vs Avaliação Experimental	55
5 ANÁLISE DE CUSTOS	62
6 CONCLUSÕES	64
6.1 Considerações Finais.....	64
6.2 Propostas para Trabalhos Futuros	66
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	68
ANEXOS.....	73

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Compartimentação corta-fogo: a) Porta corta-fogo [57].....	9
Figura 2.2 – Envolvimento total: a) Proteção com recurso a betões leves [54]; b) Proteção por tijolo cerâmico maciço [55].....	9
Figura 2.3 – Placas pré-fabricadas: a) Proteção na envolvente dos elementos estruturais; b) Proteção através de paredes e tetos falsos [56].....	10
Figura 2.4 – Mantas fibrosas: a) Proteção de coluna e vigas [59].....	10
Figura 2.5 – Tintas intumescentes: a) Aplicação do intumescente em perfis metálicos [61] ..	11
Figura 2.6 – Argamassas projetadas: a) Proteção em vigas de piso [63].....	12
Figura 2.7 – Matérias-primas: a) Cimento Portland [65].....	13
Figura 2.8 – Matérias-primas: a) Gesso de construção [67].....	14
Figura 2.9 – Matérias-primas: a) Perlite expandida [69]	15
Figura 3.1 – Molde utilizado no fabrico dos provetes: a) Componentes do molde.....	21
Figura 3.2 – Composição dos provetes ensaiados	21
Figura 3.3 – Disposição e designação dos termopares nos provetes: a) Perspetiva isométrica	22
Figura 3.4 – Provede: a) Parafusos soldados na chapa metálica	22
Figura 3.5 – Utensílios utilizados: a) Balança; b) Provede; c) Misturadora; d) Espátula.....	23
Figura 3.6 – Fabricação dos provetes: a) Argamassa fresca no recipiente da misturadora; b) Chapa metálica com os termopares aplicados; c) Provede betonado em processo de cura ..	24
Figura 3.7 – Provedes fabricados em processo de cura	24
Figura 3.8 – Sistema experimental: a) Forno cilíndrico; b) Controlador do forno; c) Datalogger TDS-530; d) Provede de ensaio.....	26
Figura 3.9 – Provede tipo: a) Provede antes do ensaio; b) Provede após o ensaio; c) Fissuração do provede após o ensaio	26
Figura 3.10 – Evolução média de temperatura na composição A1 em função do tempo	27
Figura 3.11 – Evolução média de temperatura na composição A2_LA em função do tempo .	29
Figura 3.12 – Evolução média de temperatura na composição A3_LA em função do tempo .	29
Figura 3.13 – Evolução média de temperatura na composição A4_LA em função do tempo .	30
Figura 3.14 – Evolução média de temperatura na composição A5_LA em função do tempo .	31
Figura 3.15 – Evolução média de temperatura na composição A2_MI em função do tempo .	32

Figura 3.16 – Evolução média de temperatura na composição A3_MI em função do tempo .	33
Figura 3.17 – Evolução média de temperatura na composição A4_MI em função do tempo .	33
Figura 3.18 – Evolução média de temperatura na composição A5_MI em função do tempo .	34
Figura 4.1 – Provete e disposição dos termopares: a) Dimensões do provete, designação e posição dos termopares (mm).....	38
Figura 4.2 – Cofragem utilizada na betonagem dos provetes: a) Dimensões dos conjuntos das cofragens utilizadas (mm); b) Três conjuntos de cofragens utilizados nas betonagens.....	39
Figura 4.3 – Betonagem de um provete: a) Provete em processo de presa; b) Provete em processo de cura.....	40
Figura 4.4 – Representação esquemática do sistema experimental.....	41
Figura 4.5 – Layout experimental montado: a) Macaco hidráulico; b) Célula de carga; c) Provete; d) Forno; e) Transdutores (LVDT's).....	42
Figura 4.6 – Imagens de pormenor: a) Apoio metálico confinante com placas de téflon	43
Figura 4.7 – Posições dos transdutores: a) LVDT's verticais	43
Figura 4.8 – Imagens de pormenor: a) LVDT's verticais superiores (8-10); b) LVDT's verticais inferiores (1-4); c) Transdutor de fio horizontal (5)	44
Figura 4.9 – Imagens de pormenor: a) Forro superior do forno.....	44
Figura 4.10 – Imagens de pormenor: a) Central servo-controlada; b) Macaco hidráulico e célula de carga; c) Forno aberto com provete para ensaio	45
Figura 4.11 – a) Sistema de aquisição de dados (Datalogger); b) Provete depois de ensaiado	46
Figura 4.12 – Gráficos (provete PC): a) Deslocamentos em função do tempo; b) Deslocamentos verticais em função da temperatura	48
Figura 4.13 – Gráficos experimentais (provete PC_A1): a) Deslocamentos em função do tempo; b) Deslocamentos verticais em função da temperatura.....	49
Figura 4.14 – Gráficos (provete PC_A2): a) Deslocamentos em função do tempo; b) Deslocamentos verticais em função da temperatura.....	51
Figura 4.15 – Gráficos experimentais (provete PC_A4): a) Deslocamentos em função do tempo; b) Deslocamentos verticais em função da temperatura.....	52
Figura 4.16 – Comparação da evolução de temperatura no provete PC em função do tempo.	58
Figura 4.17 – Comparação da evolução de temperatura no provete PC_A1 em função do tempo	60
Figura 4.18 – Comparação da evolução de temperatura no provete PC_A2 em função do tempo	60
Figura 4.19 – Comparação da evolução de temperatura no provete PC_A4 em função do tempo	61

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 – Resistência ao fogo padrão mínima de elementos estruturais de edifícios, Regulamento Técnico de SCIE (Portaria n.º 1532/2008, de 29 de dezembro) [26]	6
Quadro 2.2 – Fator de massividade (A_m/V) para elementos de aço não protegidos, Eurocódigo 3 parte 1.2 (EN 1993-1-2:2010) [28]	7
Quadro 2.3 – Espessuras de solução protetora de um fabricante em função da massividade do perfil metálico e período de resistência ao fogo [53]	8
Quadro 3.1 – Constituintes e dosagens nas argamassas (kg/m^3)	20
Quadro 3.2 – Programa experimental	25
Quadro 3.3 – Valores máximos de temperatura, dos gradientes térmicos e da fissuração em cada provete (solução comercial A1)	27
Quadro 3.4 – Valores máximos de temperatura, dos gradientes térmicos e da fissuração em cada provete (matéria-prima obtida através do ensaio de Los Angeles)	28
Quadro 3.5 – Valores máximos de temperatura, dos gradientes térmicos e da fissuração em cada provete (matéria-prima obtida por moagem industrial)	31
Quadro 3.6 – Valores médios de temperatura máxima atingidos na FICM dos provetes	35
Quadro 4.1 – Valores experimentais das temperaturas críticas, temperaturas máximas e dos deslocamentos máximos registados	53
Quadro 4.2 – Valores médios de temperatura registados nos provetes	53
Quadro 4.3 – Classificação da resistência ao fogo padrão dos provetes	54
Quadro 4.4 – Valores experimentais e teórico da temperatura crítica/máxima dos provetes ..	56
Quadro 5.1 – Custo da argamassa comercial e dos constituintes utilizados para a formulação das argamassas ensaiadas	62
Quadro 5.2 – Custo de formulação das argamassas e diferenças de custo face à argamassa comercial A1	62

SIMBOLOGIA

A	–	Área elementar da seção transversal [m^2]
A_m	–	Perímetro de exposição ao fogo do perfil metálico [m]
A_m/V	–	Fator de massividade para elementos de aço não protegidos [1/m]
A_p/V	–	Fator de massividade para os elementos de aço isolados por meio de material de proteção contra incêndio [1/m]
c_a	–	Calor específico do aço [J/kgK]
c_p	–	Calor específico do material de proteção contra incêndio [J/kgK]
d_p	–	Espessura do material de proteção contra incêndio [m]
E	–	Módulo de elasticidade do aço [GPa]
f_y	–	Tensão de cedência do aço [MPa]
\dot{h}_{net}	–	Fluxo de calor efetivo por unidade de área [W/m^2]
$\dot{h}_{net,c}$	–	Fluxo de calor efetivo por convecção [W/m^2]
$\dot{h}_{net,r}$	–	Fluxo de calor efetivo por radiação [W/m^2]
I	–	Momento de inércia [cm^4]
$k_{E,\theta}$	–	Fator de redução para a inclinação da reta que representa o domínio elástico à temperatura do aço θ_a atingida no instante t [-]
k_{sh}	–	Fator de correção para o efeito de sombra [-]
$k_{y,\theta}$	–	Fator de redução para a tensão de cedência do aço à temperatura θ_a atingida no instante t [-]
L	–	Comprimento da coluna [m]
L_e	–	Comprimento de encurvadura da coluna [m]
$N_{b,fi,t,Rd}$	–	Valor de cálculo da resistência à encurvadura no instante t de um elemento comprimido com uma temperatura uniforme θ_a [kN]
N_{cr}	–	Carga crítica de Euler [kN]
T_{crit}	–	Temperatura crítica do elemento de aço [°C]
V	–	Área da seção transversal do perfil metálico [m^2]
α	–	Fator de imperfeição [-]
α_c	–	Coefficiente de transferência de calor por convecção [W/m^2K]

$\gamma_{M,fi}$	–	Coeficiente parcial para a propriedade considerada do material, em situação de incêndio [-]
ΔQ	–	Quantidade de calor transferida durante o período de tempo Δt [J]
ΔT	–	Diferença de temperatura entre as extremidades do material [K]
Δt	–	Intervalo de tempo [s]
$\Delta\theta_{a,t}$	–	Aumento de temperatura do aço durante um intervalo de tempo Δt [°C]
$\Delta\theta_{g,t}$	–	Aumento de temperatura ambiente dos gases durante um intervalo de tempo Δt [°C]
ε_f	–	Emissividade do fogo [-]
ε_m	–	Emissividade da superfície do elemento [-]
θ_a	–	Temperatura no aço [°C]
$\theta_{a,t}$	–	Temperatura do aço no instante t [°C]
θ_g	–	Temperatura dos gases na proximidade do elemento exposto ao fogo [°C]
$\theta_{g,t}$	–	Temperatura dos gases no instante t [°C]:
θ_m	–	Temperatura da superfície do elemento [°C]
θ_r	–	Temperatura de radiação efetiva do ambiente de incêndio [°C]
$\bar{\lambda}$	–	Esbelteza normalizada [-]
λ_p	–	Condutibilidade térmica do sistema de proteção contra incêndio [W/mK]
$\bar{\lambda}_\theta$	–	Esbelteza normalizada para a temperatura θ_a [-]
ρ_a	–	Massa específica do aço [kg/m ³]
ρ_p	–	Massa específica do material de proteção contra incêndio [kg/m ³]
σ	–	Constante de Stephan Boltzman [W/m ² K ⁴]
φ	–	Fator de vista [-]
χ_{fi}	–	Coeficiente de redução para a encurvadura por flexão em situação de incêndio [-]

ABREVIATURAS

A	–	Água
APPCI	–	Argamassas de proteção passiva contra incêndio
C	–	Cimento Portland
CR	–	Cimento refratário
FAEAT	–	Face da argamassa exposta a altas temperaturas
FANEAT	–	Face da argamassa não exposta a altas temperaturas
FECM	–	Face externa da chapa metálica
FICM	–	Face interna da chapa metálica
G	–	Gesso
GTINF	–	Grupo de termopares inferiores
GTINT	–	Grupo de termopares intermédios
GTSUP	–	Grupo de termopares superiores
LA	–	Los Angeles
MI	–	Moagem industrial
P	–	Perlite
PC	–	Provelte-coluna
PP	–	Fibras de polipropileno
SCPP	–	Solução comercial de proteção passiva
V	–	Vermiculite

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações

A presente dissertação incluiu-se no projeto “*NANOFIRE - Thermal and Mechanical behaviour of Nano Cements and their application in steel construction as fire protection*”, em curso no Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, liderado pelo ISISE (*Institute for Sustainability and Innovation in Structural Engineering*). O projeto tem como principal objetivo o desenvolvimento, e estudo do comportamento termofísico, de argamassas de proteção passiva ao fogo sem e com a introdução de nano partículas de sílica para melhoria do seu desempenho térmico.

A participação do autor na presente dissertação envolveu diferentes atividades, desde a revisão do estado de arte, a moagem de várias matérias-primas, contribuição no projeto das cofragens, passando pela idealização, instrumentação e betonagem dos provetes para ensaio, conceção/preparação do layout experimental, realização dos ensaios experimentais até ao tratamento dos dados e respetiva análise crítica.

Em contexto de projeto, mas fora do âmbito da tese, o autor colaborou na produção de nano e micro sílica no Departamento de Engenharia Química da Universidade de Coimbra, bem como na instrumentação e fabricação de provetes com estes aditivos para ensaios experimentais futuros.

1.2 Enquadramento

À escala global, a utilização de estruturas metálicas e mistas é uma das soluções mais importantes na construção das mais variadas obras de engenharia civil, tais como, edifícios comerciais e de habitação com grande desenvolvimento em altura, pavilhões industriais, coberturas de grandes espaços, pontes e viadutos, torres eólicas, entre outros. Devido às propriedades mecânicas e tecnológicas do aço, este tipo de solução construtiva apresenta características que a tornam competitiva, entre as quais, a elevada resistência mecânica e a ductilidade, a sustentabilidade e celeridade nos processos de execução.

Os componentes que constituem as estruturas metálicas são produzidos em metalomecânicas, com recurso a processos produtivos otimizados e sem interferências climáticas; posteriormente, estes componentes são montados em obra, segundo um programa pré-estabelecido e otimizado. O peso próprio destas estruturas é também minimizado, devido à excelente relação entre o peso específico e a resistência mecânica, traduzindo-se em custos de transporte e montagem reduzidos [1, 2].

Como os metais são infinitamente recicláveis, este tipo de construção insere-se num futuro de “construção verde”, contribuindo assim para um sector da economia com baixo impacto ambiental [3-6]. Devido à sua versatilidade e às propriedades já acima mencionadas, as estruturas metálicas possibilitam a construção de vãos amplos e o desenvolvimento de variadas soluções arquitetónicas, estando associadas à modernidade e inovação devido à sua qualidade estética.

No entanto, as estruturas metálicas também apresentam algumas fragilidades, por exemplo, quando se encontram desprotegidas face a uma situação de incêndio. Devido à alta condutibilidade térmica e aos elevados valores de massividade dos elementos estruturais de aço, a sua temperatura aumenta rapidamente, alterando consideravelmente a sua rigidez e resistência mecânica, podendo a estabilidade ficar comprometida e levar ao colapso de alguns elementos estruturais, ou mesmo de toda a estrutura [7-18]. Para retardar este efeito, são normalmente utilizados métodos de proteção ativos e passivos.

A proteção ativa pode incluir alarme, extintores, *sprinklers* ou sistemas de libertação de gás, que em situação de incêndio são ativados, permitindo extinguir ou minimizar a sua propagação antes da intervenção do corpo de bombeiros. Apesar de ser um sistema altamente eficaz é, no entanto, dispendioso e requer a instalação de equipamentos complexos e a manutenção contínua.

A proteção passiva tem como objetivo o isolamento térmico da estrutura face a temperaturas elevadas. Nos diversos métodos de proteção passiva, os materiais utilizados devem possuir propriedades resistentes ao fogo e conceder proteção térmica aos elementos estruturais, de forma a precaver as necessidades de segurança contra incêndio definidas em projeto [9, 19-21].

A aplicação de argamassas com elevado isolamento é uma das soluções utilizadas na proteção passiva contra incêndio em estruturas metálicas [22].

1.3 Objetivos e Metodologia

Nesta tese de dissertação pretendeu-se avaliar o comportamento térmico de cinco diferentes tipos de argamassas de proteção passiva contra incêndio de base cimentícia ou gesso, contendo agregados de vermiculite e/ou perlite e fibras de polipropileno.

A sua avaliação térmica foi realizada através da determinação experimental do gradiente térmico das argamassas sujeitas a elevadas temperaturas, bem como o registo da temperatura máxima na face da chapa metálica em contacto com a argamassa de proteção passiva.

Além disso, foi realizada uma campanha experimental para avaliar o comportamento mecânico de colunas de aço a elevadas temperaturas com e sem proteção térmica. Esta campanha contemplou quatro colunas de aço tubulares curtas, das quais uma sem proteção e três revestidas com argamassas de proteção passiva contra o fogo, sujeitas à compressão axial e segundo a evolução de temperatura da curva de incêndio padrão ISO 834.

O objetivo passou por determinar a resistência ao fogo das respetivas colunas, observar os modos de instabilidade associados a cada coluna e comparar o comportamento de isolamento e integridade das respetivas argamassas.

Por fim, os resultados experimentais foram comparados com os valores de cálculo de dimensionamento estimados pela EN 1993-1-2:2005 [28].

1.4 Estrutura da Dissertação

A presente dissertação encontra-se dividida em 6 capítulos.

O primeiro capítulo é introdutório e apresenta sucintamente o enquadramento do tema a desenvolver, bem como os objetivos e metodologias propostas.

O segundo capítulo é dedicado ao estado de arte e encontra-se dividido em três subcapítulos. O primeiro enuncia os critérios de dimensionamento da proteção ao fogo e descreve as soluções de proteção passiva existentes no mercado, as suas exigências de aplicabilidade, assim como as vantagens e desvantagens associadas a cada método. No segundo subcapítulo são apresentadas as características e propriedades das matérias-primas utilizadas na formulação das várias argamassas desenvolvidas. No último subcapítulo são enunciados estudos experimentais já desenvolvidos sobre a estabilidade e resistência ao fogo de argamassas térmicas.

O terceiro capítulo apresenta a caracterização dos materiais utilizados no desenvolvimento das várias composições, a metodologia seguida na preparação dos provetes, os procedimentos experimentais adotados, os resultados obtidos e a sua análise crítica.

O quarto capítulo diz respeito ao estudo experimental do comportamento mecânico de colunas de aço com e sem revestimento com argamassas de proteção passiva. Será apresentado o procedimento experimental adotado, os modos de instabilidade observados, bem como a análise e discussão de resultados. Por fim, é feita a comparação dos resultados experimentais com os valores de cálculo de dimensionamento estimados pela EN 1993-1-2:2005.

No quinto capítulo é realizada uma análise de custos para as argamassas desenvolvidas, bem como uma comparação entre o custo de cada argamassa formulada com uma argamassa de proteção passiva comercial de referência.

O sexto capítulo é referente às conclusões do trabalho desenvolvido. É realizada uma reflexão global sobre os tópicos abordados ao longo da tese de dissertação, são apresentadas considerações finais e, por fim, uma proposta para trabalhos futuros.

2 ESTADO DE ARTE

2.1 Proteção de Estruturas Metálicas ao Fogo

Como o aço não é inflamável, não contribui para a carga de incêndio de um edifício. No entanto, os elementos estruturais em aço perdem cerca de 50 % da sua resistência mecânica quando a sua temperatura se aproxima dos 550 °C [2, 23]. Este valor é designado por temperatura crítica (T_{crit}), para a grande parte dos elementos de aço, podendo variar de acordo com cada projeto.

Para dimensionar a espessura do material de proteção passiva a aplicar é necessário identificar a resistência ao fogo exigida pelo edifício, determinar o fator de massividade dos elementos estruturais a proteger e calcular a temperatura crítica [23, 24].

2.1.1 Dimensionamento da Proteção ao Fogo

A resistência ao fogo a impor aos elementos estruturais é definida na legislação em vigor, nomeadamente no regime jurídico de segurança contra incêndio em edifícios (RJ-SCIE) e tem em conta vários critérios, tais como, a utilização do edifício, a categoria de risco de incêndio, a altura e área construída, a compartimentação existente, carga combustível, taxa de ventilação, entre outros.

De acordo com o Artigo 8º do RJ-SCIE são definidas 12 utilizações-tipo de edifícios, recintos ou suas partes, de forma a cobrir a totalidade das construções realizadas ou a realizar no país [25]. São estas:

- U.T. I – Habitacionais;
- U.T. II – Estacionamentos;
- U.T. III – Administrativos;
- U.T. IV – Escolares;
- U.T. V – Hospitalares e lares de idosos;
- U.T. VI – Espetáculos e de reuniões públicas;
- U.T. VII – Hoteleiros e restauração;
- U.T. VIII – Comerciais e gares de transporte;
- U.T. IX – Desportivos e de lazer;
- U.T. X – Museus e galerias de arte;
- U.T. XI – Bibliotecas e arquivos;
- U.T. XII – Industriais, oficinas e armazéns.

Cada uma das 12 utilizações-tipo é classificada em termos de risco de incêndio, devido a vários fatores, numa de quatro categorias, sendo a 1ª menos gravosa e a 4ª mais gravosa.

O objetivo de estabelecer um período de resistência ao fogo é garantir que, em caso de incêndio, os elementos estruturais mantenham a sua capacidade de carga até que todos os ocupantes tenham sido evacuados. Este parâmetro, representado no quadro 2.1, define, em função das características do elemento estrutural, o tempo em minutos (15, 30, 45, 60, 75, 90, 120 ou 180 minutos) que este deve resistir ao fogo [26].

Quadro 2.1 – Resistência ao fogo padrão mínima de elementos estruturais de edifícios, Regulamento Técnico de SCIE (Portaria n.º 135/2020, de 2 de junho) [26].

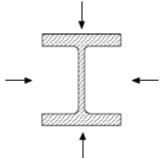
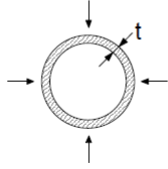
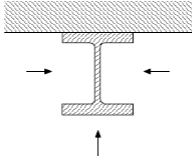
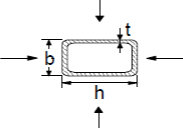
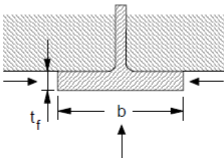
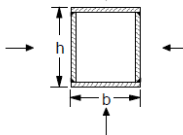
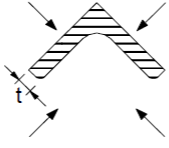
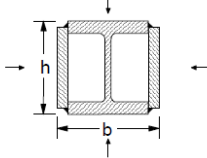
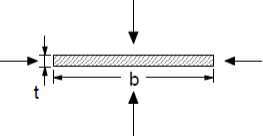
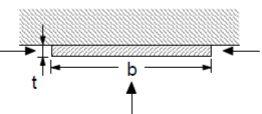
Utilizações-tipo	Categorias de risco				Função do elemento estrutural
	1ª	2ª	3ª	4ª	
I, III, IV, V, VI, VII, VIII, IX, e X	R 30	R 60	R 90	R 120	Apenas suporte (R).
	REI 30	REI 60	REI 90	REI 120	Suporte (R) e compartimentação (E, I).
II, XI e XII	R 60	R 90	R 120	R 180	Apenas suporte (R).
	REI 60	REI 90	REI 120	REI 180	Suporte (R) e compartimentação (E, I).

Sendo: R – suporte estrutural; E – estanquidade; I – isolamento térmico.

O cumprimento da resistência ao fogo padrão mínima depende, entre outros fatores, do fator de massividade (quadro 2.2). Este fator, é dado pela relação entre o perímetro de exposição ao fogo do perfil (A_m) e a área da sua secção transversal (V) [23, 27].

Quanto maior for a exposição ao fogo (A_m) e incidência de energia térmica no aço, mais rapidamente a estrutura aquecerá. A área da secção transversal (V) do perfil está diretamente relacionada com a sua massa. Quanto maior a área da secção ou a sua massa, mais tempo o perfil demorará a atingir a temperatura crítica (T_{crit}) [23, 27].

Quadro 2.2 – Fator de massividade (A_m/V) para elementos de aço não protegidos, Eurocódigo 3 parte 1-2 (EN 1993-1-2:2010) [28].

<p><i>Secção aberta exposta ao fogo em todos os lados:</i></p> $\frac{A_m}{V} = \frac{\text{perímetro}}{\text{área da secção transversal}}$ 	<p><i>Tubo exposto ao fogo em todos os lados:</i></p> $\frac{A_m}{V} = \frac{l}{t}$ 
<p><i>Secção aberta exposta ao fogo em três lados:</i></p> $\frac{A_m}{V} = \frac{\text{superfície exposta ao fogo}}{\text{área da secção transversal}}$ 	<p><i>Secção tubular (ou secção em caixão soldada de espessura uniforme) exposta ao fogo em todos os lados:</i></p> <p>Se $t \ll b$: $\frac{A_m}{V} \approx \frac{l}{t}$</p> 
<p><i>Banzo de secção em I exposto ao fogo em três lados:</i></p> $A_m/V = (b + 2t_f) / (bt_f)$ <p>Se $t \ll b$: $A_m/V \approx 1/t_f$</p> 	<p><i>Secção em caixão soldada exposta ao fogo em todos os lados:</i></p> $\frac{A_m}{V} = \frac{2(b+h)}{\text{área da secção transversal}}$ <p>Se $t \ll b$: $A_m/V \approx 1/t$</p> 
<p><i>Cantoneira exposta ao fogo em todos os lados:</i></p> $A_m/V = 2/t$ 	<p><i>Secção em I com reforço em caixão, exposta ao fogo em todos os lados:</i></p> $\frac{A_m}{V} = \frac{2(b+h)}{\text{área da secção transversal}}$ 
<p><i>Barra plana exposta ao fogo em todos os lados:</i></p> $A_m/V = 2(b+t) / (bt)$ <p>Se $t \ll b$: $A_m/V \approx 2/t$</p> 	<p><i>Barra plana exposta ao fogo em três lados:</i></p> $A_m/V = (b + 2t) / (bt)$ <p>Se $t \ll b$: $A_m/V \approx 1/t$</p> 

Com base no tempo de resistência ao fogo, no fator de massividade e na temperatura crítica, é calculada a espessura adequada do material de proteção com recurso a métodos analíticos, em função das propriedades do aço, mas também das propriedades do material de proteção (densidade, condutibilidade térmica e calor específico) [23, 27].

Uma alternativa simples (mas mais conservadora e por vezes mais dispendiosa) consiste na utilização de tabelas fornecidas pelos fabricantes de soluções de proteção, resultantes de ensaios reais de resistência ao fogo, como exemplificado no quadro 2.3, onde para vários valores de temperatura de ensaio, são indicadas as massividades e respetivas espessuras da solução protetora para resistir ao fogo durante um período pré-estabelecido [23, 27].

Quadro 2.3 – Espessuras de solução protetora de um fabricante em função da massividade do perfil metálico e período de resistência ao fogo [53].

Tabela de espessura (em mm) de PROMATECT® H para pilares e vigas conforme a Norma EN 13381-4																											
Hp/A(M ⁻¹)		45	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210	220	230	240	250	260	265		
Resistência ao Fogo	R 15	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	
	R 30	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14
	R 45	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	15	15	16	16	16	17	17	17	17	17	17	18	18	18
	R 60	14	14	14	14	14	15	16	17	17	18	19	19	20	20	21	21	21	21	22	22	22	22	22	23	23	23
	R 90	14	15	17	20	21	23	24	25	26	27	28	28	29	29	30	30	31	31	31	32	32	32	32	32	32	32
	R 120	20	21	25	27	29	31	32	34	35	36	36	37	38	38	39	39	40	40	41	41	41	41	42	42	42	42
	R 180	33	35	39	42	45	47	49	51	52	53	54	55	56	57	57	58	59	59	60	60	61	61	61	61	61	61
	R 240	46	49	54	58	61	63	66	68																		

Temperatura crítica: 500°C

2.1.2 Métodos de Proteção Passiva em Estruturas Metálicas

A proteção passiva tem como objetivo impedir a propagação do fogo em edifícios, através da aplicação de elementos de compartimentação e materiais de construção com bom comportamento ao fogo, bem como retardar a subida da temperatura nos elementos estruturais, por meio de material de proteção a aplicar na envolvente dos mesmos, de modo a manter a estabilidade estrutural por um certo período de tempo e assim viabilizar a evacuação das pessoas que se encontrem no interior do edifício [2, 51].

A escolha entre os vários métodos de proteção passiva deve ser realizada tendo em conta os requisitos de segurança contra incêndio em vigor, a estabilidade estrutural requerida ao fogo, as imposições estéticas do projeto e as particularidades dos elementos a proteger, ou seja, o tipo de aço e de secção de perfil [23, 29, 51].

A compartimentação corta-fogo (figura 2.1) baseia-se na subdivisão de um edifício em vários compartimentos, com recurso a paredes e portas, que para além da resistência estrutural (R), têm que ser estanques às chamas (E) e com bom isolamento térmico (I) por um período de tempo previamente estabelecido. Em caso de incêndio, estes elementos têm como objetivo a contenção das chamas, gases quentes e fumos para os compartimentos adjacentes, e, caso isto não seja possível, atenuar a sua propagação, minimizando o risco de comprometer a integridade estrutural da edificação. Assim, são criadas áreas de evacuação seguras para os seus ocupantes e entrada para o corpo de bombeiros, permitindo a salvaguarda de vidas humanas [26, 30, 32, 33, 51].

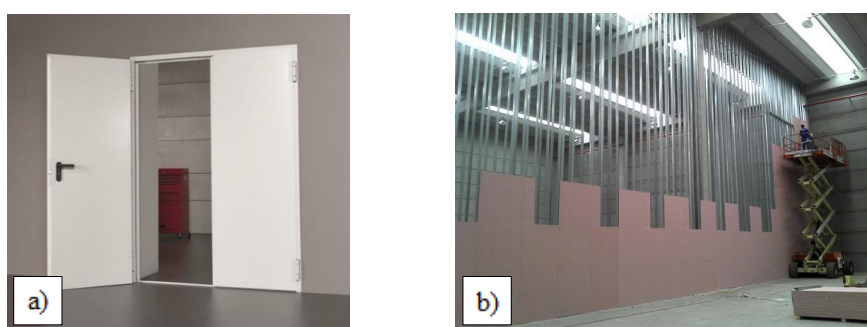


Figura 2.1 – Compartimentação corta-fogo: a) Porta corta-fogo [57]; b) Parede corta-fogo em execução [58].

No que se refere ao tipo de proteção, existe a proteção no contorno da seção e a proteção em caixão. O envolvimento de contorno é obtido quando se aplica um material resistente ao fogo, que contorne a totalidade do elemento metálico, pilar ou viga. Geralmente são utilizados betões leves ou tijolos cerâmicos maciços (figura 2.2), de forma a não aumentar substancialmente o peso próprio da estrutura, sendo dada preferência a elementos que não interfiram na estabilidade estrutural, por exemplo, os pilares dos pisos inferiores [9, 23, 30, 31, 52].

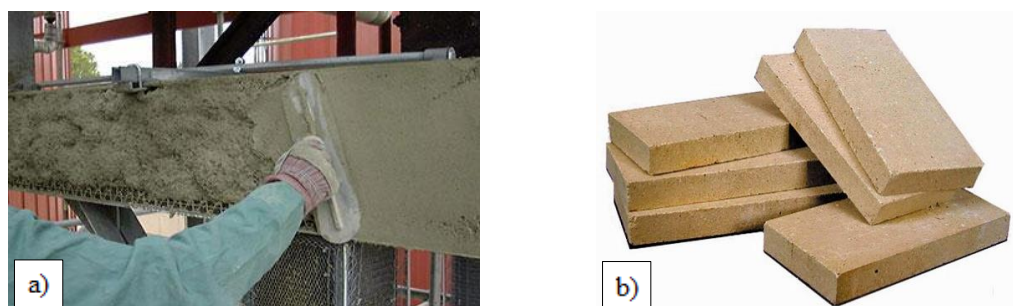


Figura 2.2 – Envolvimento total: a) Proteção com recurso a betões leves [54]; b) Proteção por tijolo cerâmico maciço [55].

A proteção ao incêndio em caixão faz-se através de painéis pré-fabricados com propriedades resistentes ao fogo (figura 2.3), como envolvente dos elementos estruturais, ou como paredes e tetos falsos. Gesso, perlite, vermiculite, fibrocimento, betão e silicato fibroso ou de cálcio, são alguns dos materiais utilizados na fabricação desses painéis. A espessura da placa varia consoante a sua tipologia e resistência ao fogo pretendida, e também em função da massividade e temperatura crítica do elemento a proteger. Apresentando boa resistência ao impacto, funcionam como isolante acústico, a sua instalação produz poucos resíduos e é possível a sua aplicação em edifícios em fase de utilização. No entanto, a instalação é demorada, as placas possuem pouca flexibilidade e em função da sua espessura e material integrante, adicionam cargas desfavoráveis à estabilidade da estrutura [9, 23, 30, 31, 51, 52].

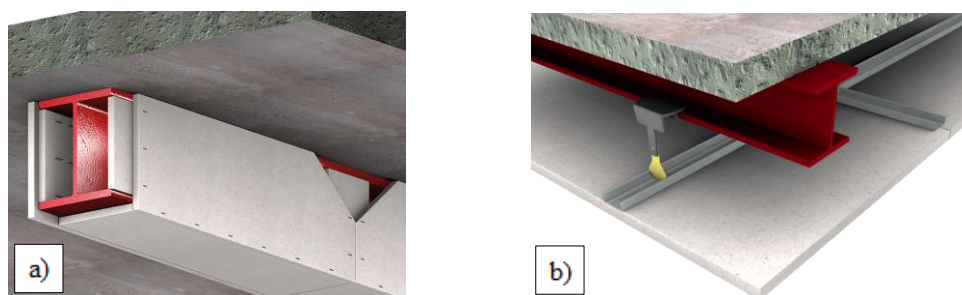


Figura 2.3 – Placas pré-fabricadas: a) Proteção na envolvente dos elementos estruturais; b) Proteção através de paredes e tetos falsos [56].

Outra opção para proteção passiva de estruturas metálicas são as mantas fibrosas resistentes ao fogo (figura 2.4). Com recurso a pinos metálicos soldados aos elementos estruturais, as mantas são aplicadas na sua envolvente e de forma idêntica a outras alternativas, apresentam baixa condutibilidade térmica, sendo os materiais utilizados as fibras cerâmicas e as fibras minerais, nomeadamente, a lã de vidro e a lã de rocha. Esta opção apresenta uma instalação limpa, permite o isolamento acústico, adicionam valores reduzidos de carga à estrutura e possibilita a aplicação em fase de utilização do edifício [2, 9, 30, 52].

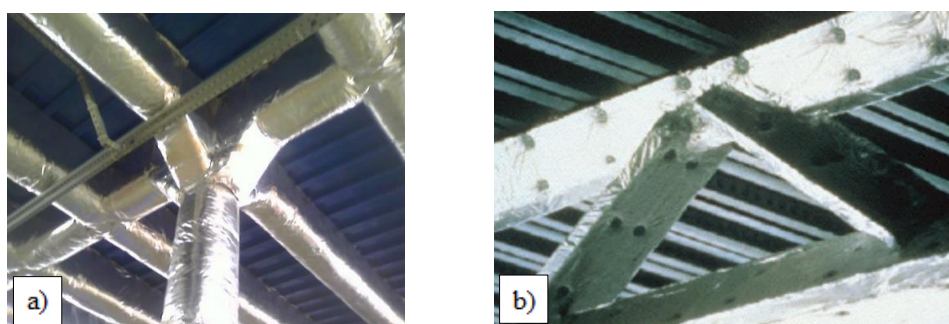


Figura 2.4 – Mantas fibrosas: a) Proteção de coluna e vigas [59]; b) Proteção de treliça [60].

A aplicação de tintas intumescentes nos elementos metálicos consiste na aplicação de um elemento primário, um revestimento intumescente e uma pintura de acabamento (figura 2.5). Este sistema, sob a atuação do calor originado por um incêndio, e a partir dos 200 °C, aumenta de volume e cria um revestimento térmico com uma espessura de até 40 vezes a sua espessura original, protegendo a estrutura e retardando a temperatura crítica nos elementos estruturais. A qualidade de proteção depende do produto aplicado e da sua espessura. Esta alternativa de proteção é uma boa solução estética, não produz resíduos consideráveis, as cargas introduzidas na estrutura são reduzidas e é de fácil manutenção em fase de utilização do edifício. Contudo, este método é dispendioso ($\approx 20 \text{ €/m}^2$ para resistência ao fogo padrão de R 60) e requer mão-de-obra especializada de forma a executar corretamente todo o procedimento de aplicação, como por exemplo, garantir espessuras mínimas e uniformidade na aplicação nos elementos metálicos, para assim cumprir os requisitos de proteção ao fogo [2, 8, 9, 19, 24, 30, 31, 34-36, 51, 52].

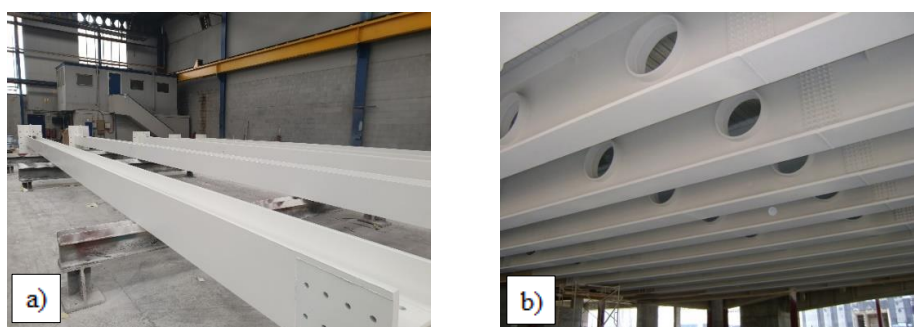


Figura 2.5 – Tintas intumescentes: a) Aplicação do intumescente em perfis metálicos [61]; b) Proteção em vigas de piso [62].

As argamassas de proteção passiva contra incêndio (APPCI) contêm propriedades de resistência ao fogo que possibilitam o retardamento dos efeitos prejudiciais das altas temperaturas no aço, através da baixa condutibilidade térmica (figura 2.6). São geralmente aplicadas por projeção com recurso a equipamentos próprios, ou, menos frequentemente, aplicadas manualmente. Os diversos materiais constituintes são de base cimentícia ou gesso, agregados de vermiculite e/ou perlite, fibras de polipropileno e também aditivos com capacidade de absorção térmica. A espessura mínima de argamassa que deve ser aplicada na envolvente dos elementos estruturais, ou em caixão, varia em função do tipo de produto aplicado e da temperatura crítica dos perfis a proteger. A projeção destas argamassas é uma solução muito económica comparativamente a outras alternativas de proteção contra incêndio, têm um bom comportamento acústico e a aplicação no contorno dos perfis é de fácil execução. Contudo, esta solução é preferida quando a estrutura requer baixa exigência estética e onde o ambiente envolvente possua níveis baixos de humidade, corrosividade e ausência de agentes químicos.

Esta solução de proteção é aplicável em obra após a estrutura estar concluída, produz alguns resíduos durante a sua aplicação e requer que em projeto se considere o peso adicional das argamassas na estrutura [7-9, 19, 23, 30, 31, 37-39, 51, 52].

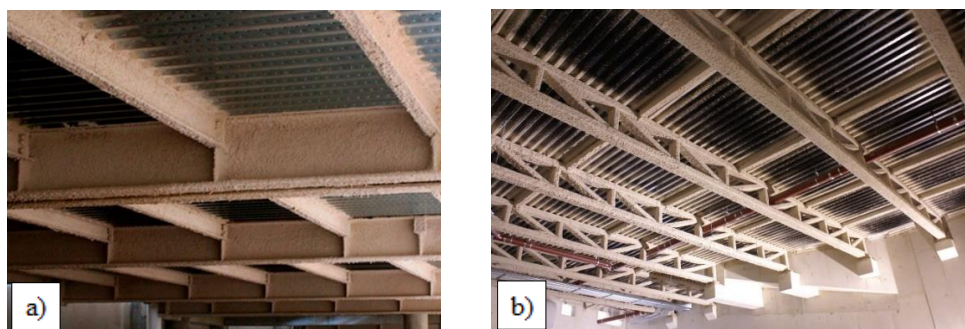


Figura 2.6 – Argamassas projetadas: a) Proteção em vigas de piso [63]; b) Proteção em vigas de piso treliçadas [64].

Por fim, é necessário referir que é essencial que todas as soluções de proteção passiva contra incêndio sejam sujeitas a manutenções anuais preventivas de forma a assegurar o desempenho expectável de resistência ao fogo do perfil protegido. Em Portugal, os procedimentos mínimos a realizar são fornecidos pela norma de segurança contra incêndios (NP 4513) [49].

2.2 Matérias-Primas das Argamassas Estudadas

Aos materiais utilizados em métodos de proteção passiva, entre os quais, os utilizados na formulação das argamassas com propriedades resistentes ao fogo, devem ser exigidas as seguintes características:

- Incombustível;
- Elevada temperatura de fusão;
- Baixa condutibilidade térmica;
- Boa capacidade para se deformarem sob a ação do calor;
- Condições de perfeita aderência e isolamento às estruturas em que são aplicados;
- Resistência no tempo aos agentes atmosféricos, químicos, choques, etc.;
- Custo compatível com a natureza e importância da obra.

A fabricação das diferentes soluções das argamassas que aqui foram estudadas tiveram como base o cimento Portland, cimento refratário e gesso, sendo adicionados à mistura agregados de vermiculite e/ou perlite e fibras de polipropileno.

O cimento é um material inorgânico que combinado com água forma uma pasta e ganha presa, imerso ou ao ar, e endurece devido às reações de hidratação. Após o endurecimento, este ligante hidráulico mantém a sua resistência e estabilidade mesmo sob água [40]. É usado no sector da construção civil na produção de betão, estuques e caldas de injeção, sendo o cimento Portland o mais utilizado em Portugal. A composição do cimento Portland (figura 2.7) é caracterizada por quatro componentes fundamentais que compõem mais de 90 % da sua constituição: o silicato tricálcico (C_3S), o silicato bicálcico (C_2S), o aluminato tricálcico (C_3A) e o aluminoferrato tetracálcico (C_4AF). Os cimentos comercializados são certificados pela norma portuguesa NP EN 197-1 [50], que indica as composições, especificações e critérios de conformidade para os diferentes tipos de cimento [41-43].

O cimento Portland só deve ser utilizado para suportar temperaturas não superiores a 400 °C, sendo comum, para temperaturas mais elevadas a utilização de cimento refratário (figura 2.7) [40]. O cimento refratário é um ligante composto por cimento Portland, gesso e óxido de alumínio com excelentes propriedades mecânicas e termomecânicas, apresenta alta resistência à corrosão e atua como um supressor de calor entre as paredes da superfície em contacto e a própria fonte de calor. Este tipo de cimento é utilizado para temperaturas até 1200 °C, sendo que, para temperaturas mais elevadas é necessário fazer aumentar o teor de óxido de alumínio no cimento [44].



Figura 2.7 – Matérias-primas: a) Cimento Portland [65]; b) Cimento Refratário [66].

O gesso natural ou pedra de gesso é um sulfato de cálcio bi-hidratado que contém, em estado seco, 20 % de água de constituição. Na sua preparação, a pedra de gesso é cozida em forno entre 130 e 150 °C, dando lugar ao sulfato de cálcio hemi-hidratado, conhecido como gesso de construção (figura 2.8). Ao misturar o gesso de construção com água dá-se uma reação expansiva, com aumento de volume e libertação de calor, sendo que este ganha presa ao fim de 10 a 15 minutos [23, 40]. Quando submetido a temperaturas elevadas, o gesso absorve calor de forma a vaporizar a sua água de constituição. Assim, como material de proteção, o gesso tem a capacidade de atrasar a passagem do fluxo térmico, uma vez que possui a capacidade de absorver uma grande quantidade de calor. Apresenta também como vantagens o seu custo reduzido, a disponibilidade e facilidade de produção. No entanto, é um material frágil à

temperatura ambiente e quando sujeito a situação de incêndio apresenta baixa resistência mecânica, ficando suscetível à abertura e propagação de fissuras. É, portanto, necessário introduzir outros aditivos que, conjuntamente com o gesso, melhorem o seu desempenho e aumentem a sua resistência ao fogo [37].

A vermiculite é um mineral que resulta da esfoliação de rochas vulcânicas da família dos filossilicatos, entre os quais, os silicatos hidratados com ferro, alumínio e magnésio. Apresenta-se sob a forma de lâminas finas, de estrutura lamelar, separadas entre si por partículas microscópicas de água e contém uma grande quantidade de ar, com uma porosidade de cerca de 90 % [23, 37]. A vermiculite expandida (figura 2.8) é obtida quando a vermiculite é sujeita a altas temperaturas, entre os 700 a 1000 °C, ocorrendo a evaporação das partículas de água e afastando as lamelas entre si, fazendo com que ocorra o processo de esfoliação. Após a ocorrência deste processo, sucede-se um aumento da dimensão dos grãos de 20 a 30 vezes, enclausurando o ar no interior das paredes, o que torna a vermiculite expandida um bom isolante térmico e acústico, com uma temperatura de fusão de 1350 °C. Além disso, contribui também para a redução do peso unitário da argamassa de proteção, devido à sua natureza leve e porosa, bem como para o aumento da absorção de água, sendo a sua principal desvantagem a baixa resistência mecânica [23, 37, 38].



Figura 2.8 – Matérias-primas: a) Gesso de construção [67]; b) Vermiculite expandida [68].

A perlite é uma rocha vulcânica amorfa de aluminossilicato, formada devido ao arrefecimento rápido de lava ou magma. Os seus principais componentes são o dióxido de silício (SiO_2), o óxido de alumínio (Al_2O_3) e quantidades inferiores de óxido de potássio (K_2O) e óxido de sódio (Na_2O). Possui um teor de água relativamente alto de 2 a 5 % em peso e, que quando rapidamente aquecida à temperatura de 760 a 980 °C expande e aumenta entre 4 a 20 vezes o seu volume inicial, passando a ser denominada por perlite expandida (figura 2.9) [37, 45, 46]. A perlite expandida possui uma porosidade elevada, o que lhe confere boa qualidade como isolamento térmico, assim como uma temperatura de fusão de 1100 °C, o que permite o seu uso a altas temperaturas, característica relevante para o uso na proteção contra incêndio [37].

As fibras de polipropileno são fibras sintéticas que ao ser misturadas com a argamassa, controlam e reduzem a deformação plástica no seu estabelecimento, melhorando a sua resistência mecânica (figura 2.9) [39]. As fibras de polipropileno possuem baixa densidade, alta resistência, ductilidade e durabilidade, baixo módulo de elasticidade e são cortadas de forma extremamente fina de forma a facilitar a sua dispersão na argamassa [47]. A uma temperatura entre 160 e 170 °C, as fibras de polipropileno derretem e os polímeros misturam-se na matriz da argamassa. A sua utilização faz diminuir a formação de fissuras, dificulta a propagação de fendas e aumenta ligeiramente a resistência ao desgaste e ao impacto, aumentando assim a energia de deformação necessária para atingir a fratura [19].



Figura 2.9 – Matérias-primas: a) Perlite expandida [69]; b) Fibras de Polipropileno [70].

2.3 Estudos Experimentais já desenvolvidos por outros Autores

Em 2010, Sengul et al. [48] estudou experimentalmente os efeitos da perlite expandida nas propriedades mecânicas e na condutibilidade térmica de betões leves. Neste estudo, foram preparadas 6 misturas com recurso a cimento Portland, areia natural, perlite expandida, superplastificante e um aditivo para a introdução de ar, de forma a reduzir o peso unitário das misturas. Foram realizados ensaios experimentais para determinar a resistência à compressão, a condutibilidade térmica, a absorção de água, entre outras propriedades.

A substituição da areia pela perlite expandida foi realizada com base na igualdade de volume, onde a taxa de substituição foi aumentada de 0 a 100 % em incrementos de 20 %. A perlite expandida foi mantida em água durante 30 minutos, de forma a absorver água e não afetar posteriormente na mistura a relação efetiva de água/cimento. A razão água/cimento efetiva foi de 0,55 tendo sido mantida constante em todas as misturas.

Devido à introdução de perlite expandida verificou-se uma redução dos pesos unitários das misturas. Para a mistura que apenas continha areia, o peso seco foi apenas 4 % inferior ao peso no estado fresco. Esta redução de peso foi de 9 % para a mistura que incluía 40 % de perlite. Contudo, para teores mais elevados de perlite, a relação do peso seco e o peso no estado fresco

não acompanhou esta tendência, sendo que as reduções foram de 28 e 44 %, para as misturas produzidas com 80 e 100 % de perlite, respetivamente.

Nos ensaios de resistência à compressão foi notória a redução acentuada da sua resistência com a diminuição do peso unitário das misturas. A mistura de referência, produzida apenas com areia, teve um peso unitário de 1937 kg/m^3 e a resistência à compressão do provete foi de 28,8 MPa. No entanto, o peso unitário da mistura em que 40 % da areia foi substituída pela perlite expandida foi de 1402 kg/m^3 e apresentou uma resistência à compressão de 10,9 MPa, o que é aproximadamente 62 % inferior ao da mistura de referência. Os autores verificaram que a resistência à compressão dos provetes é mais afetada nos rácios de substituição até 40 % de perlite expandida.

É também referido que durante a produção das misturas se os agregados de perlite expandida fossem introduzidos em condições secas, poderiam ter sido obtidas maiores resistências à compressão devido ao facto de os agregados de perlite absorverem água da mistura, reduzindo assim a relação água/cimento efetiva. No entanto, com este procedimento a trabalhabilidade das misturas seria afetado.

Nos ensaios para a determinação da condutibilidade térmica dos compósitos, os autores comprovaram que a substituição da areia pela perlite expandida reduziu a condutibilidade térmica das misturas em resultado da estrutura porosa da perlite. Esta redução foi relativamente pequena para rácios de substituição de 20 e 40 %, tendo sido registadas reduções mais substanciais para rácios de substituição mais elevados. A condutibilidade térmica da mistura contendo 40 % de perlite expandida é de $0,53 \text{ W/mK}$, o que é 12 % inferior à da mistura de referência com $0,6 \text{ W/mK}$, mas esta relação é de 65 % para a mistura com 80 % de perlite com $0,21 \text{ W/mK}$. A substituição da areia pela perlite expandida aumenta a porosidade da mistura, que por sua vez, afeta positivamente a condutibilidade térmica.

À medida que o teor de perlite expandida aumentou, verificou-se uma redução no peso unitário das misturas e foram obtidas absorções de água muito mais elevadas, devido à estrutura porosa da perlite expandida. Até um peso unitário de aproximadamente 1000 kg/m^3 , o aumento da absorção de água pareceu constante, no entanto, para teores de perlite mais elevados, obtiveram-se aumentos mais substanciais. A absorção de água da mistura contendo 80 % de perlite expandida foi de 33,9 %, mais de duas vezes superior em comparação com a mistura com 40 % de perlite com 13,3 %. Tanto a absorção como a adsorção de água aumentam com a maior quantidade de perlite expandida. No entanto, os autores observaram que a adsorção é menos afetada pela substituição de perlite.

Em 2013, Gencil et al. [39] realizou uma pesquisa sobre compósitos de gesso contendo vermiculite expandida e fibras de polipropileno, de forma a analisar as propriedades térmicas e mecânicas destes compósitos.

A vermiculite foi adicionada às misturas de gesso em proporções de 10 e 20 % e as fibras de polipropileno foram introduzidas nas proporções de 0,5 e 1,0 %, com 22 μm de diâmetro e 12 mm de comprimento, sendo ambas as quantidades dadas em relação à massa seca total do compósito. Para as várias formulações desenvolvidas do compósito, com variações nas concentrações de gesso, vermiculite e fibras de polipropileno, foram determinados os pesos unitários secos, a condutibilidade térmica e propriedades mecânicas como resistência à compressão e à flexão.

No decorrer da campanha experimental, foi verificado que tanto a vermiculite como as fibras de polipropileno reduzem o peso unitário, contudo, o efeito da vermiculite é maior devido à sua concentração na mistura, bem como, pela sua baixa densidade. O provete com menor peso unitário foi de 0,89 g/cm^3 , pertencente a uma mistura contendo 20 % de vermiculite e 1,0 % de fibras de polipropileno, sendo que o provete com maior peso unitário pertenceu ao gesso puro com 1,01 g/cm^3 .

Nos ensaios de resistência à compressão, foi observado uma variação de resistência entre os 1,98 e 3,56 MPa, correspondente ao provete com as proporções de 20 % de vermiculite e 0 % de fibras de polipropileno e ao provete com as proporções de 0 % de vermiculite e 1 % de fibras de polipropileno, respetivamente. Constatou-se que a vermiculite aumentou a porosidade do compósito e por isso fez reduzir a sua resistência à compressão. Por outro lado, as fibras de polipropileno adicionadas à mistura aumentaram ligeiramente a resistência à compressão.

Relativamente à condutibilidade térmica, foi verificada uma redução com o aumento da concentração de vermiculite expandida nos compósitos. O aumento da adição de fibras de polipropileno nas misturas resultou numa diminuição da deformação e num aumento da plasticidade dos compósitos. A adição de vermiculite e de fibras de polipropileno diminui a tensão principal máxima devido ao comportamento elasto-plástico do compósito de gesso.

Com base neste estudo, as proporções aconselhadas pelos autores de forma a obter a melhor resistência à compressão de compósitos de gesso, com valores economicamente aceitáveis, são de 0,1 a 0,54 % na relação de vermiculite/gesso e de 0,1 a 0,14 % na relação de fibras de polipropileno/gesso.

Em 2014, Abidi et al. [37] estudou o impacto da perlite, vermiculite e cimento na condutibilidade térmica de um material compósito com base em gesso. Neste estudo foi avaliada a influência da microestrutura de diferentes compósitos na condutibilidade térmica efetiva, com níveis de porosidade entre 45 e 75 %, através de medições experimentais, cálculos numéricos e analíticos.

Foram preparados três compósitos bifásicos de gesso/vermiculite, gesso/perlite e gesso/cimento, onde a quantidade de água foi ajustada em cada formulação de forma a ter a mesma trabalhabilidade em todos os compósitos.

Para uma taxa de substituição de 5 % em volume na matriz de gesso, a razão de água/gesso foi de 0,56 para a vermiculite, 0,60 para a perlite e de 0,50 para o cimento. Para uma taxa de substituição de 25 % em volume na matriz de gesso, a razão de água/gesso foi de 1,42 para a vermiculite, 1,76 para a perlite e 0,64 para o cimento. Os autores concluíram que a quantidade de cimento não tem impacto na quantidade de água necessária para mistura. No entanto, a vermiculite requer um volume de água superior durante a preparação, uma vez que absorve muita água devido à sua estrutura esfoliada. Porém, a perlite requer mais água do que a vermiculite para a elaboração dos compósitos bifásicos.

Na campanha experimental e para várias formulações de compósitos, a porosidade foi medida através de um picnómetro de hélio e a condutibilidade térmica foi determinada através do método do disco quente. Através dos resultados dos ensaios, a premissa relativa à diminuição do valor da condutibilidade térmica com o aumento da percentagem de porosidade foi verificada.

Quando a matriz de gesso foi reforçada com 5 e 25 % em peso de vermiculite, a condutibilidade térmica diminuiu de 0,50 W/mK para 0,45 e 0,23 W/mK, sendo as percentagens de porosidade de 47, 51 e 74 %, respetivamente. No caso do reforço com 5 e 25 % em peso de perlite, a condutibilidade térmica foi de 0,35 e 0,16 W/mK para percentagens de porosidade de 57 e 76 %, respetivamente. Quando a matriz de gesso foi reforçada com 5 e 25 % em peso de cimento, a condutibilidade térmica foi de 0,53 e 0,52 W/mK e a percentagem de porosidade permaneceu constante em cerca de 42 %.

Com base nos resultados de condutibilidade térmica deste estudo, os autores concluíram que apenas a vermiculite e a perlite aumentaram a percentagem de porosidade da matriz de gesso, sendo a perlite a que apresentou melhor características para melhorar o isolamento térmico do compósito.

Em 2018, Mo, H. K., et al. [38] realizou uma investigação experimental com o intuito de avaliar as propriedades de argamassas de base cimentícia contendo vermiculite expandida como substituto parcial da areia. Neste estudo, foi avaliado o desempenho mecânico das argamassas quando sujeitas a temperaturas elevadas.

Foram preparados quatro provetes, dois sem a adição de vermiculite com teores de água distintos e outros dois provetes com a substituição parcial de areia por vermiculite a 30 e 60 % em volume.

Os autores concluíram que o peso unitário das argamassas reduziu em 12 e 27 % nos provetes com a adição de 30 e 60 % de vermiculite, respetivamente. Esta redução advém da natureza leve e porosa da vermiculite expandida causada pelo processo de esfoliação durante a produção do material.

Relativamente aos ensaios térmicos, verificou-se que a diferença de perda de peso entre os provetes, com e sem a incorporação de vermiculite, aumentou à medida que a temperatura foi aumentando (5 °C/min), sendo menor o peso final dos provetes contendo vermiculite.

Neste estudo foi verificada uma redução de resistência à compressão de cerca de 50 e 63 % quando a vermiculite expandida foi incorporada em substituição da areia em volume de 30 e 60 %, respetivamente. Esta diminuição de resistência pode ser atribuída à estrutura macia e porosa da vermiculite, onde o menor teor de finos presentes pode resultar num reajuste matricial menos favorável das partículas e afetar negativamente a resistência mecânica das argamassas.

Com base nos resultados experimentais obtidos nesta investigação os autores puderam concluir que a incorporação de vermiculite expandida como substituição parcial da areia proporcionou um aumento da resistência térmica e reduziu a resistência à compressão das argamassas.

3 ANÁLISE EXPERIMENTAL DAS ARGAMASSAS TÉRMICAS

Numa fase preliminar, foram testadas duas soluções comerciais de proteção passiva, que permitiu identificar a solução comercial que proporcionava o melhor isolamento térmico (composição de referência). Após a realização destes ensaios térmicos, foram desenvolvidas argamassas à base de cimento ou de gesso, com diferentes dosagens de matérias-primas, de onde foram selecionadas aquelas que, em comparação com a composição de referência, conferiam um melhor isolamento térmico. As quantidades finais das matérias-primas de cada composição foram fixadas através da avaliação da trabalhabilidade e tempos de presa das diferentes argamassas.

3.1 Materiais e Composições

O programa experimental reuniu um total de 5 argamassas de base cimentícia ou gesso, designadas por A1, A2, A3, A4 e A5 (quadro 3.1), em que os provetes térmicos advindos de cada composição foram designados por P_A1, P_A2, P_A3, P_A4 e P_A5, respetivamente. Na composição das diferentes argamassas foram utilizados os seguintes materiais:

- Solução comercial de proteção passiva (SCPP);
- Cimento Portland CEM II/B-L 32,5 – Cimpor (C);
- Cimento Refratário – Electroland (CR);
- Gesso de projetar de alto rendimento – Pt Fixplus (G);
- Vermiculite expandida com dimensões entre 0,5 e 3 mm – Projar (V);
- Perlite expandida com dimensões entre 1 e 5 mm – Projar (P);
- Fibras de polipropileno com 31 μm de diâmetro médio e 6 mm de comprimento médio – Duro-Fabril (PP);
- Água (A).

Quadro 3.1 – Constituintes e dosagens nas argamassas (kg/m^3).

Designação da argamassa	SCPP	C	CR	G	V	P	PP	A
A1	1000,00	-	-	-	-	-	-	700,00
A2	-	233,33	-	-	354,67	-	1,33	560,00
A3	-	-	-	533,33	-	311,11	-	555,56
A4	-	-	-	653,13	62,50	-	-	456,25
A5	-	-	437,50	-	332,50	231,25	-	1018,75

3.2 Moldes dos Provetes

Para a fabricação dos provetes, foram desenvolvidos moldes em contraplacado marítimo (reutilizáveis) (figura 3.1), com forma e dimensões que permitissem atribuir a geometria pretendida ao provete para a realização dos ensaios no forno e facilitassem devido ao elevado número de ensaios experimentais, o seu manuseamento, transporte e limpeza.

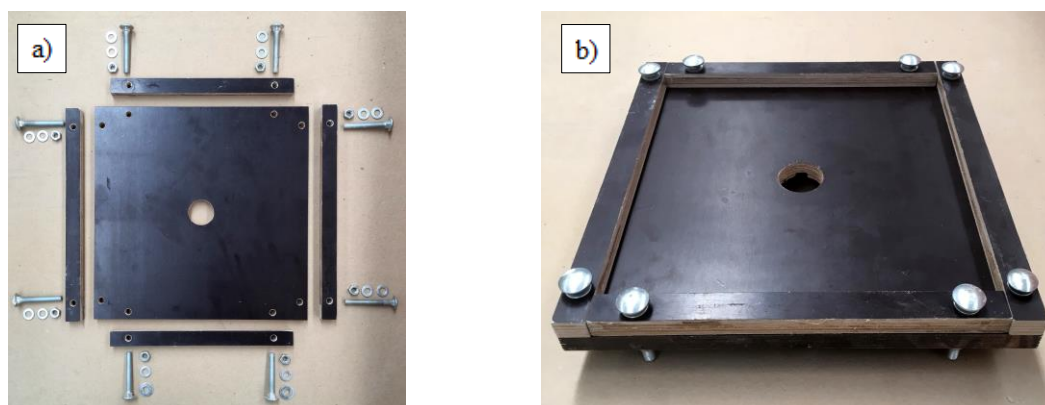


Figura 3.1 – Molde utilizado no fabrico dos provetes: a) Componentes do molde; b) Molde montado.

3.3 Provetes de Argamassa

Os provetes ensaiados consistiram num revestimento térmico de argamassa com secção quadrangular de 250 mm de aresta e uma espessura de 10 mm, em que numa das suas faces se encontrava fixa uma chapa metálica, de forma a simular um perfil metálico em situação real, também com secção quadrangular de 250 mm de aresta e uma espessura de 5 mm (figura 3.2).

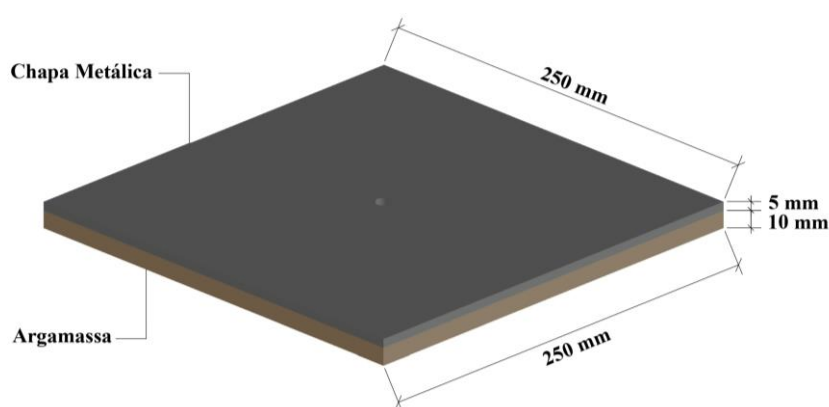


Figura 3.2 – Composição dos provetes ensaiados.

No decorrer do ensaio, a avaliação da variação de temperaturas ao longo da espessura do provete foi realizada através da colocação de 4 termopares do tipo K, dispostos com diferentes profundidades (figura 3.3), de forma a determinar o gradiente térmico entre a face da argamassa exposta a altas temperaturas (FAEAT) e a face da argamassa não exposta (FANEAT), bem como a temperatura na face interna da chapa metálica (FICM) e na face externa (FECM).

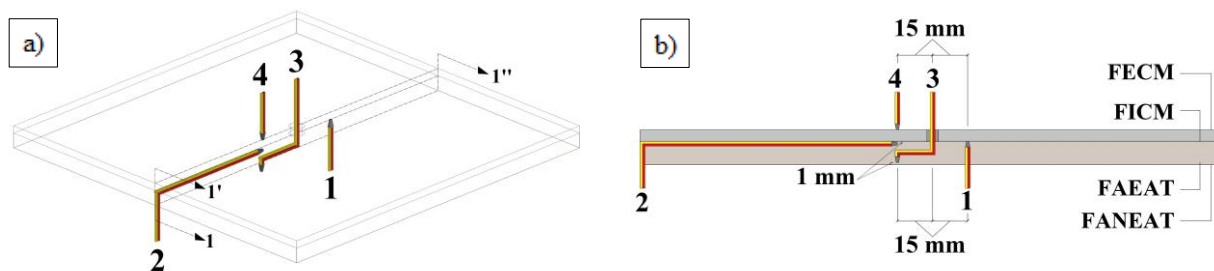


Figura 3.3 – Disposição e designação dos termopares nos provetes: a) Perspetiva isométrica; b) Corte 1-1'-1''.

De forma a garantir aderência entre a argamassa e a chapa metálica, foram soldados oito parafusos na vertical no contorno da chapa metálica, e com apenas parte da rosca, de forma a assegurar área de contacto que permitisse a soldadura e que o comprimento do parafuso fosse inferior à altura da argamassa (10 mm) (figura 3.4).

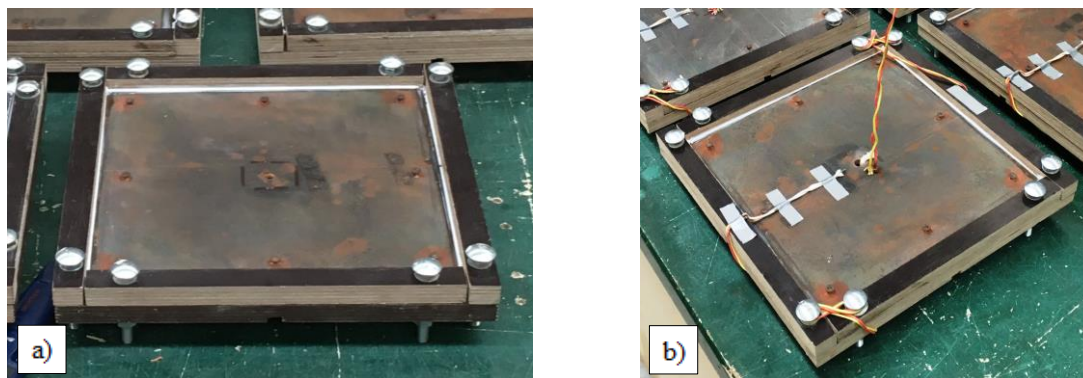


Figura 3.4 – Provede: a) Parafusos soldados na chapa metálica; b) Provede instrumentado com os termopares.

3.4 Formulação das Argamassas

De forma a garantir que a dimensão dos grãos de perlite e vermiculite possuíam o mesmo tamanho entre composições, ambas as matérias primas foram moídas com recurso a dois métodos distintos: um primeiro método foi executado através do ensaio de Los Angeles que fragmentou o agregado por abrasão e choque com recurso a esferas de aço em movimento solidário com a rotação do tambor do equipamento; e outro método através de um moinho industrial que por fricção do agregado com o tambor reduziu significativamente a dimensão das suas partículas, quando comparado com o ensaio de Los Angeles. Através de uma análise granulométrica por peneiração húmida (especificação LNEC E 195-1966) foram identificados os intervalos de variação das dimensões das partículas destas matérias-primas: dimensões entre 0,075 a 0,85 mm (Los Angeles); dimensões entre 0,025 a 0,40 mm (Moagem Industrial).

Os utensílios utilizados para a fabricação das argamassas foram uma balança com precisão de 0,1 g, uma proveta graduada, uma misturadora Hobart N50 com capacidade de 5 litros e uma espátula de inóx (figura 3.5).

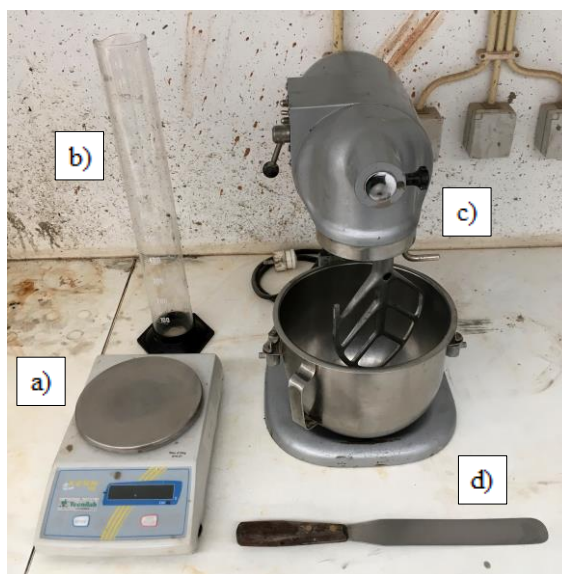


Figura 3.5 – Utensílios utilizados: a) Balança; b) Proveta; c) Misturadora; d) Espátula.

Para cada argamassa, as matérias-primas eram pesadas e colocadas no interior do recipiente da misturadora. De seguida colocava-se a misturadora em funcionamento durante 5 minutos, a uma velocidade lenta (136 rotações por minuto), e em simultâneo, adicionava-se a quantidade de água correspondente, com vazão constante de forma a garantir a adição homogénea de água em toda a argamassa.

Após este procedimento, amassava-se a mistura manualmente com a espátula, de forma a remover partes da argamassa que se encontrasse nas paredes do recipiente e assim homogeneizar a mistura, voltando depois a colocar o recipiente na misturadora durante mais 2 minutos. Após a mistura apresentar a trabalhabilidade desejada, a argamassa era colocada no interior do molde dos provetes (figura 3.6).

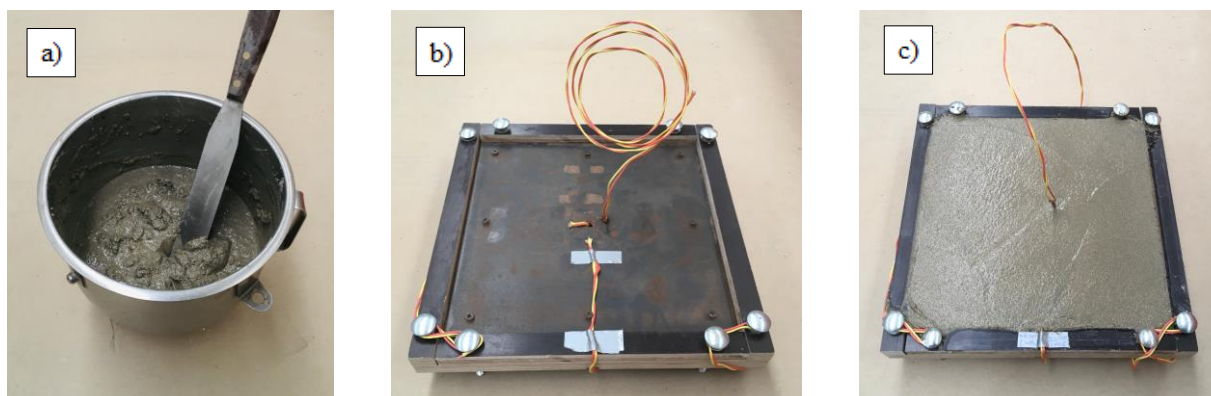


Figura 3.6 – Fabricação dos provetes: a) Argamassa fresca no recipiente da misturadora; b) Chapa metálica com os termopares aplicados; c) Provete betonado em processo de cura.

Na produção das argamassas, existiu o cuidado de seguir o mesmo procedimento para todas as composições realizadas, de forma a garantir que a única influência nas propriedades das argamassas se encontrasse associada apenas à sua constituição.

Passadas 48 horas após a betonagem dos provetes nos moldes, estes eram desmoldados e colocados em processo de cura (figura 3.7) por um período de 28 dias num ambiente controlado, com uma temperatura de 25 °C e humidade relativa de 55 %.

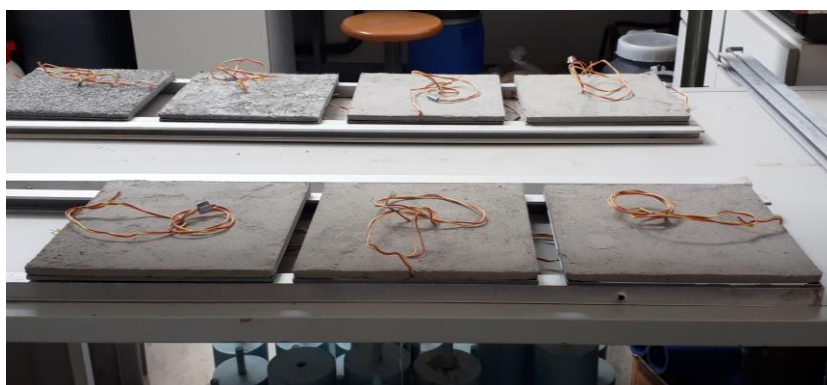


Figura 3.7 – Provetes fabricados em processo de cura.

3.5 Programa Experimental

Para cada composição de argamassa e para os dois graus de finura, foram produzidos 3 provetes de forma a estudar o desvio padrão relativo ao comportamento térmico de cada solução estudada (quadro 3.2).

Quadro 3.2 – Programa experimental.

Composição	Solução comercial de proteção passiva	Matéria-prima obtida pelo ensaio de Los Angeles (LA)	Matéria-prima obtida pela moagem industrial (MI)
A1	3 provetes	-	-
A2	-	3 provetes	3 provetes
A3	-	3 provetes	3 provetes
A4	-	3 provetes	3 provetes
A5	-	3 provetes	3 provetes
Total		27 provetes	

O programa experimental contemplou a fabricação de 27 provetes térmicos, no entanto, um destes provetes fabricados (P_A4_2_LA) não foi ensaiado porque se danificou. Entre os 26 provetes ensaiados, o resultado de ensaio de um dos provetes (P_A2_2_LA) foi parcialmente admissível para análise devido à posição incorreta de um termopar.

3.6 Procedimento Experimental

Os ensaios foram realizados com recurso a um forno cilíndrico, aberto nas suas extremidades, com capacidade para atingir uma temperatura máxima de 1200 °C e com dimensões interiores de 400 mm de altura e 250 mm de diâmetro. As leituras de temperatura nos termopares foram registadas através do equipamento de aquisição de dados, Datalogger TDS-530.

Para cada provete fabricado, o procedimento de ensaio iniciava-se com a vedação da base do forno com lã cerâmica de forma a manter o calor no seu interior, bem como, a colocação de uma manta de lã cerâmica no topo do forno, com 8 cm de espessura e uma abertura circular de 210 mm de diâmetro, centrada com o eixo do forno, permitindo a passagem de calor até à argamassa do provete.

De seguida, o provete era colocado sobre a manta de lã cerâmica, em perfeita acomodação para evitar perdas de calor durante o ensaio e com a face de argamassa voltada para o interior do forno. Posteriormente, eram feitas as ligações dos termopares ao sistema de aquisição de dados,

fechavam-se todas as uniões do forno e era dado o início ao registo de temperaturas no provete e forno, com intervalos de medição de 5 em 5 segundos. Encontrando-se todo o sistema experimental montado (figura 3.8), o forno era ligado a uma taxa de aquecimento de 15 °C/minuto até ser atingida uma temperatura de 900 °C.



Figura 3.8 – Sistema experimental: a) Forno cilíndrico; b) Controlador do forno; c) Datalogger TDS-530; d) Provete de ensaio; e) Manta de lã cerâmica.

Este processo demorava cerca de 3 horas e, uma vez estabilizada a temperatura no provete, o ensaio era dado por concluído. Por fim, eram desligadas as ligações dos termopares ao sistema de aquisição de dados, o provete era removido do topo do forno e era medida a sua largura de fissuração com recurso a uma régua de medição (figura 3.9).

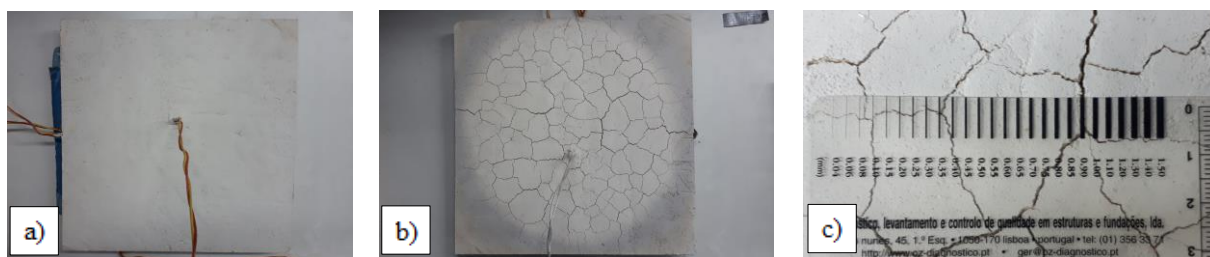


Figura 3.9 – Provete tipo: a) Provete antes do ensaio; b) Provete após o ensaio; c) Fissuração do provete após o ensaio.

3.7 Análise e Discussão de Resultados

Para cada argamassa ensaiada foram gerados gráficos com a evolução de temperatura em função do tempo, referentes à média dos valores obtidos nos provetes ensaiados de cada composição, de forma a permitir a comparação entre as argamassas de proteção passiva desenvolvidas. As fotografias dos provetes ensaiados referentes ao ensaio de transferência de calor encontram-se no anexo A.

No quadro 3.3 são apresentados os valores máximos de temperatura nos provetes referente à composição A1 (SCPP), dos gradientes térmicos e da fissuração após o ensaio térmico.

Quadro 3.3 – Valores máximos de temperatura, dos gradientes térmicos e da fissuração em cada provete (solução comercial A1).

Composição	Provete	FAEAT (°C)	FANEAT (°C)	Gradiente Térmico (°C)	FICM (°C)	Fissuração (mm)
A1	P_A1_1	536	406	131	307	0,65
	P_A1_2	551	425	126	330	0,90
	P_A1_3	566	412	155	301	0,75
	Valor médio	551	414	137	313	0,77

O gráfico da figura 3.10 expressa a curva de aquecimento teórico do ensaio, a temperatura real no forno e a temperatura média registada nos provetes referente à solução comercial A1.

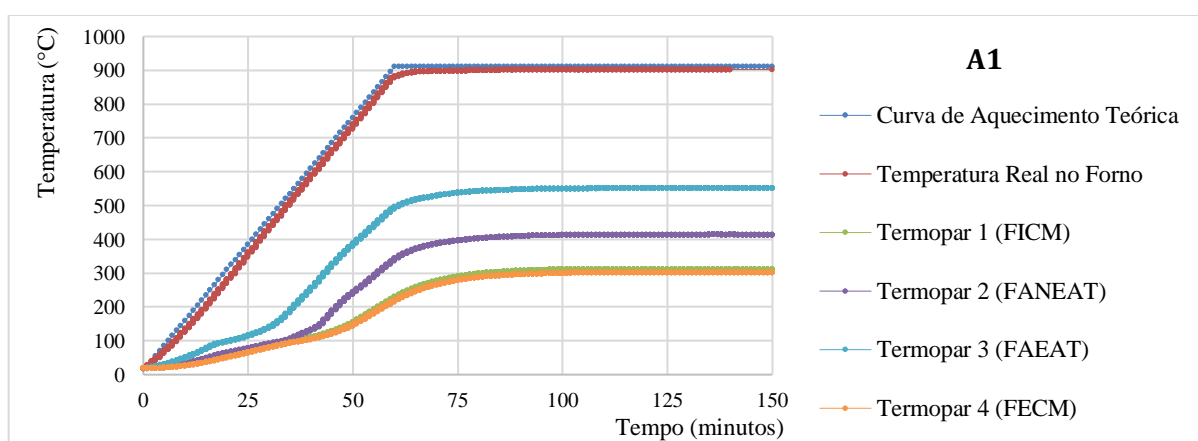


Figura 3.10 – Evolução média de temperatura na composição A1 em função do tempo.

A partir do gráfico da figura 3.10, verifica-se um aumento gradual da temperatura na FAEAT e na FANEAT entre os 0 e 35 minutos. Este tipo de evolução de temperatura deve-se ao facto da energia sob a forma de calor estar a ser consumida no aquecimento da água existente na argamassa e no processo de evaporação da mesma. Após este processo, deu-se um acréscimo acentuado da temperatura entre os 35 e 75 minutos e, por fim, até ao fim do ensaio verificou-se um ligeiro aumento de temperatura no provete até ocorrer a sua estabilização. Este desenvolvimento térmico no provete ao longo do ensaio foi comum para todas as composições. No final dos três ensaios, verificou-se que o valor da temperatura média no interior do forno era de 900 °C, na FAEAT era de 551 °C e na FANEAT era de 414 °C. O gradiente térmico gerado entre as duas faces da argamassa foi de 137 °C, a temperatura na FICM foi de 313 °C e a fissuração foi de 0,77 mm. Estes valores serviram de referência para comparação com as restantes argamassas desenvolvidas, a fim de averiguar o seu desempenho térmico.

No quadro 3.4 são apresentados os resultados dos ensaios referentes às composições A2, A3, A4 e A5, todas elas com matéria-prima proveniente do ensaio de Los Angeles (LA).

Quadro 3.4 – Valores máximos de temperatura, dos gradientes térmicos e da fissuração em cada provete (matéria-prima obtida através do ensaio de Los Angeles).

Composição	Provete	FAEAT (°C)	FANEAT (°C)	Gradiente Térmico (°C)	FICM (°C)	Fissuração (mm)
A2_LA	P_A2_1_LA	491	427	64	275	0,15
	P_A2_2_LA	629	342	287	298	0,25
	P_A2_3_LA	492	399	93	308	0,55
	Valor médio*	491	389	102	294	0,32
A3_LA	P_A3_1_LA	595	412	183	309	0,06
	P_A3_2_LA	528	378	150	302	0,25
	P_A3_3_LA	514	393	121	320	0,15
	Valor médio	546	394	151	311	0,15
A4_LA	P_A4_1_LA	476	418	58	285	0,25
	P_A4_2_LA	462	376	86	260	0,20
	Valor médio	469	397	72	272	0,23
A5_LA	P_A5_1_LA	546	436	111	289	0,20
	P_A5_2_LA	545	411	134	360	0,25
	P_A5_3_LA	534	425	109	322	0,08
	Valor médio	542	424	118	323	0,18

(*) Parte dos resultados do ensaio referente ao provete P_A2_2_LA foram desconsiderados para a média da composição A2_LA devido à posição incorreta do termopar 3 (FAEAT) do provete.

O gráfico da figura 3.11 traduz a evolução média de temperatura dos provetes da composição A2_LA, constituída por cimento, vermiculite (LA) e fibras de polipropileno.

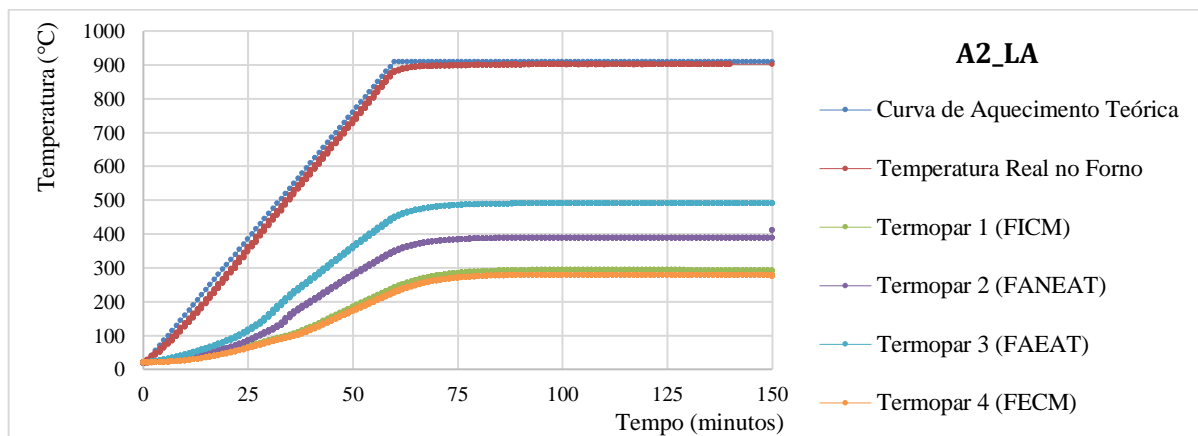


Figura 3.11 – Evolução média de temperatura na composição A2_LA em função do tempo.

Os resultados dos ensaios mostraram que a temperatura média na FAEAT foi de 491 °C e na FANEAT foi de 413 °C, ao que correspondeu um gradiente térmico de 79 °C. Enquanto que a temperatura média na FANEAT foi sensivelmente a mesma obtida para a composição A1, a temperatura média na FICM obtida de 292 °C nesta argamassa foi 6,7 % inferior à solução comercial, traduzindo-se numa maior proteção térmica dos elementos de aço. Também foi observado que a fissuração foi reduzida em 54,3 % face à composição A1.

No gráfico da figura 3.12 observa-se a evolução média de temperatura dos provetes da composição A3_LA, composta por gesso e perlite (LA).

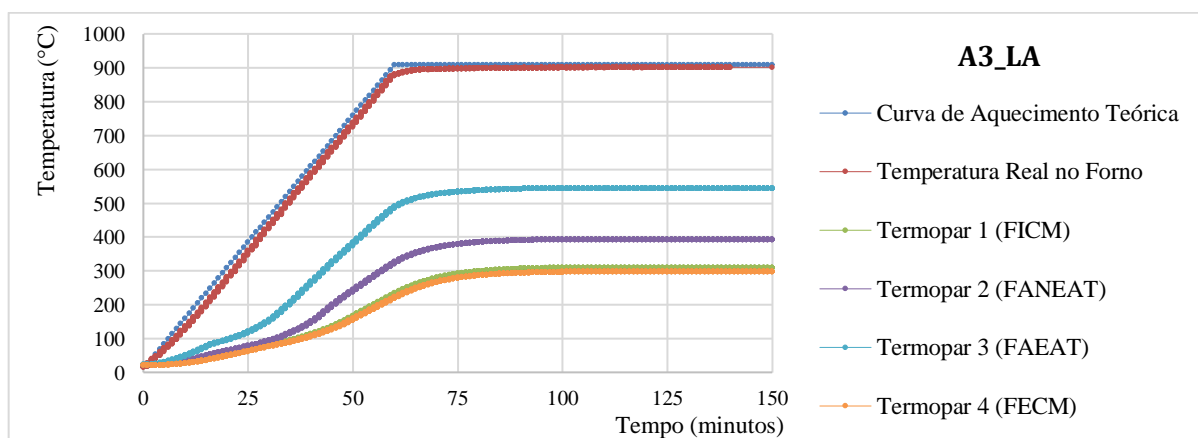


Figura 3.12 – Evolução média de temperatura na composição A3_LA em função do tempo.

As temperaturas máximas registadas na FAEAT e na FANEAT foram de 546 e 394 °C, respetivamente. O gradiente térmico foi de 151 °C, a temperatura na FICM atingiu os 311 °C e a fissuração média dos provetes foi de 0,15 mm. Face à composição A1, de referir que a temperatura média na FANEAT foi reduzida em 4,8 %, o gradiente térmico aumentou na ordem dos 10,5 %, a temperatura na FICM foi sensivelmente idêntica e a fissuração diminuiu em cerca de 80 %.

Em relação aos provetes da composição A4_LA, constituída por gesso e vermiculite (LA), é apresentada no gráfico da figura 3.13 a informação relativa ao seu desempenho térmico.

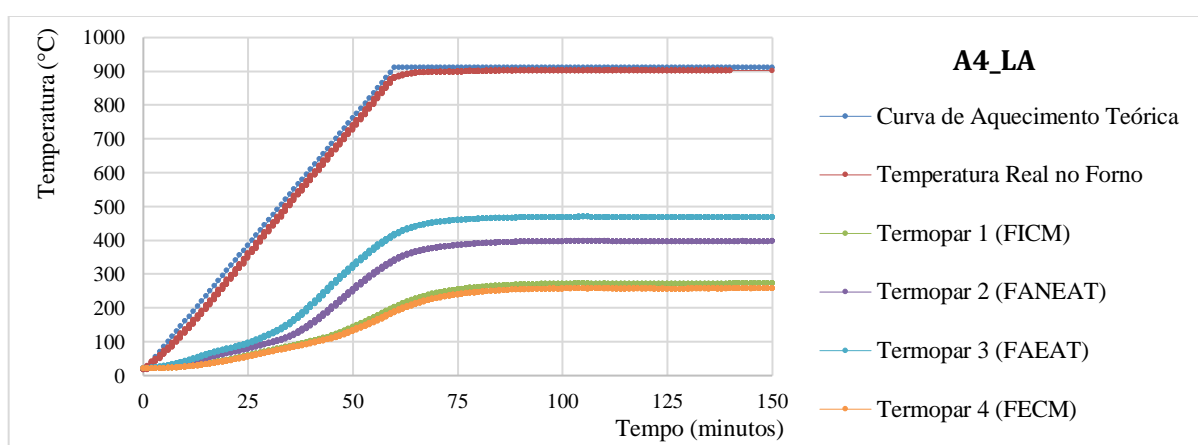


Figura 3.13 – Evolução média de temperatura na composição A4_LA em função do tempo.

Ao fim dos 150 minutos de ensaio, os valores médios de temperatura máxima registados foram de 469 °C na FAEAT e 397 °C na FANEAT, gerando-se um gradiente térmico de 72 °C. Apesar do valor do gradiente térmico ser reduzido, a temperatura na FICM foi de 272 °C, o que corresponde a uma redução de temperatura de 12,9 % face à composição A1. A fissuração média foi de 0,23 mm, sendo também bastante inferior à composição A1 (70,7 %).

O gráfico da figura 3.14 expõe a evolução média de temperatura dos provetes da composição A5_LA, composta por cimento refratário, vermiculite (LA) e perlite (LA).

A temperatura máxima atingida na FAEAT e na FANEAT foi de 542 e 424 °C, respetivamente. Em função destes valores, o gradiente térmico registado foi de 118 °C. No fim do ensaio, o valor médio de temperatura na FICM foi de 323 °C, encontrando-se um pouco acima do valor correspondente da composição A1. No entanto, a fissuração média observada foi de 0,18 mm (77 % inferior à solução comercial).

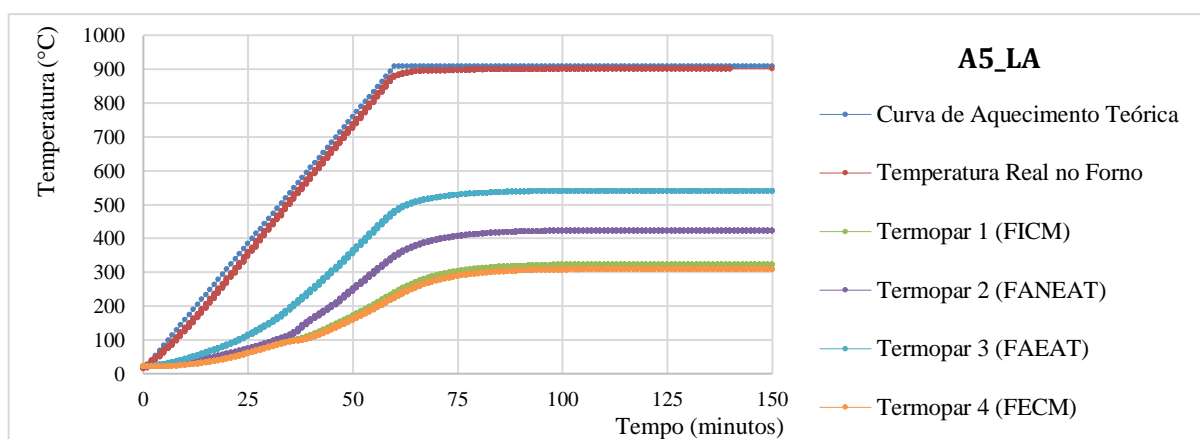


Figura 3.14 – Evolução média de temperatura na composição A5_LA em função do tempo.

No quadro 3.5 são apresentados os resultados dos ensaios referentes às composições A2, A3, A4 e A5, todas elas com matéria-prima proveniente de moagem industrial (MI).

Quadro 3.5 – Valores máximos de temperatura, dos gradientes térmicos e da fissuração em cada provete (matéria-prima obtida por moagem industrial).

Composição	Provete	FAEAT (°C)	FANEAT (°C)	Gradiente Térmico (°C)	FICM (°C)	Fissuração (mm)
A2_MI	P_A2_1_MI	512	389	123	303	0,25
	P_A2_2_MI	514	445	69	301	1,40
	P_A2_3_MI	575	442	133	333	-
	Valor médio	534	425	108	312	0,83
A3_MI	P_A3_1_MI	550	413	137	343	0,15
	P_A3_2_MI	548	348	201	300	0,15
	P_A3_3_MI	561	407	154	331	0,50
	Valor médio	553	389	164	325	0,27
A4_MI	P_A4_1_MI	491	334	158	279	0,40
	P_A4_2_MI	462	348	114	273	0,40
	P_A4_3_MI	468	341	127	274	0,70
	Valor médio	474	341	133	275	0,50
A5_MI	P_A5_1_MI	667	501	166	372	1,50
	P_A5_2_MI	658	533	125	375	1,50
	P_A5_3_MI	623	482	141	357	-
	Valor médio	649	505	144	368	1,50

A evolução média de temperatura dos provetes da composição A2_MI, composta por cimento, vermiculite (MI) e fibras de polipropileno é apresentada no gráfico da figura 3.15.

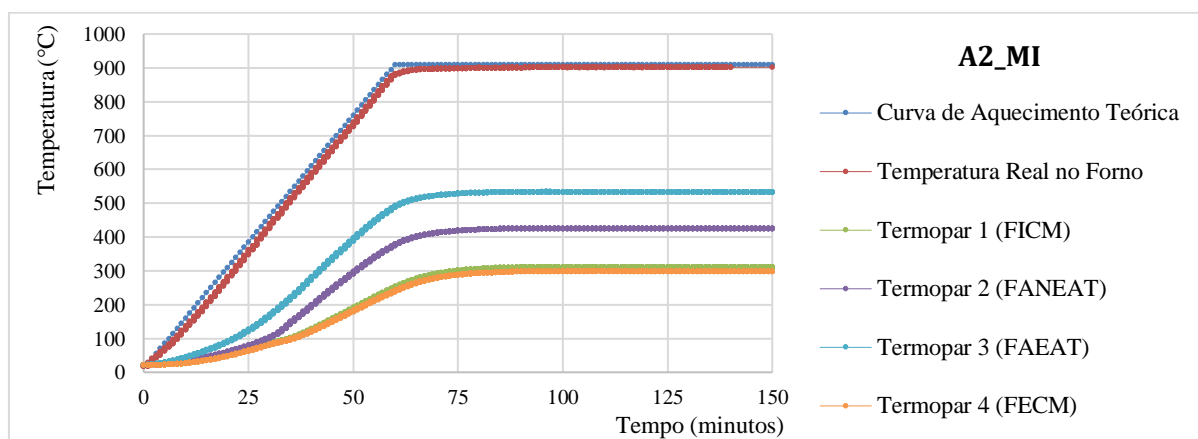


Figura 3.15 – Evolução média de temperatura na composição A2_MI em função do tempo.

Após a temperatura nos termopares ter estabilizado e se ter dado o ensaio por terminado foram registados os seguintes valores médios: 534 °C na FAEAT; 425 °C na FANEAT; gradiente térmico de 108 °C; 312 °C na FICM e uma fissuração média de 0,83 mm.

Comparando a composição A2_MI com a composição A1, de referir que apenas o valor da temperatura na FICM foi idêntico, enquanto os restantes parâmetros avaliados na composição A2_MI apresentaram valores com desempenho inferior. Equiparando a composição A2_MI e a composição A2_LA, apenas o desempenho do gradiente térmico da composição A2_MI foi superior à composição A2_LA, em cerca de 38,1 %.

O gráfico da figura 3.16 apresenta a evolução média de temperatura dos provetes da composição A3_MI, composta por gesso e perlite (MI).

A temperatura máxima atingida na FAEAT e na FANEAT foi de 553 e 389 °C, respetivamente. O gradiente térmico registado foi de 164 °C, a temperatura na FICM foi de 325 °C e a fissuração média tomou o valor de 0,27 mm.

A composição A3_MI apresenta melhor desempenho na temperatura da FANEAT (6 %), no gradiente térmico (19,4 %) e na fissuração (65,2 %), quando comparada com a composição A1. Analisado os resultados da composição A3_MI face à composição A3_LA, no geral o desempenho da composição A3_LA é superior.

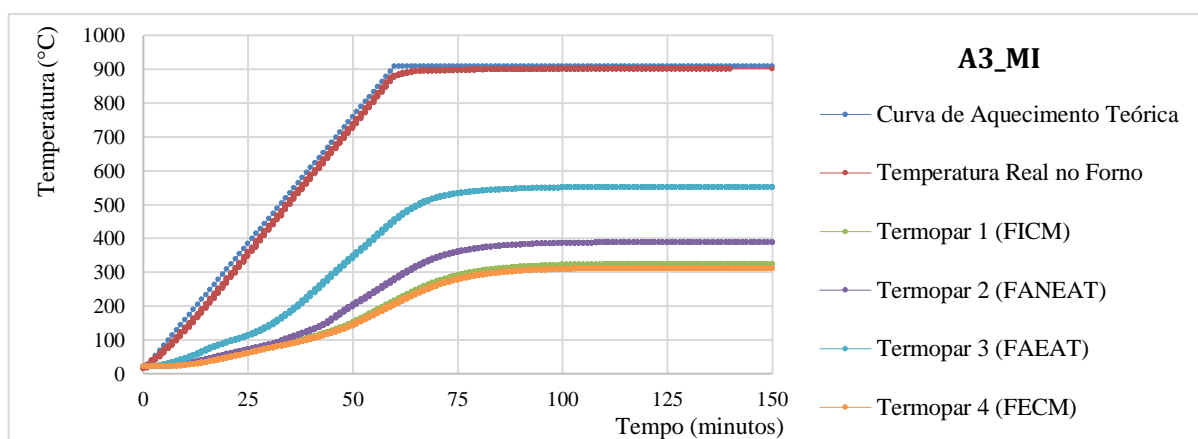


Figura 3.16 – Evolução média de temperatura na composição A3_MI em função do tempo.

Em relação aos provetes da composição A4_MI, constituída por gesso e vermiculite (MI), é apresentada no gráfico da figura 3.17 a informação relativa ao seu desempenho térmico.

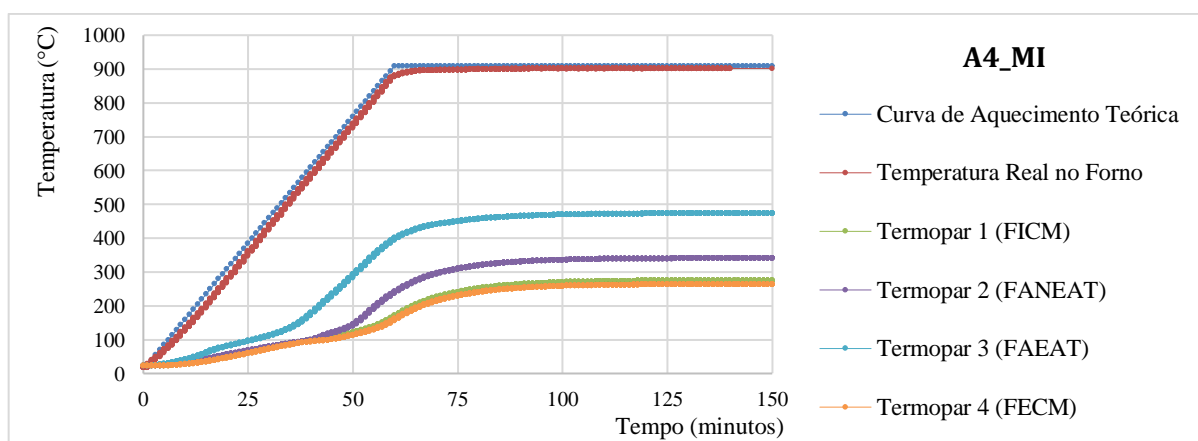


Figura 3.17 – Evolução média de temperatura na composição A4_MI em função do tempo.

Os resultados dos ensaios mostraram que a temperatura máxima na FAEAT foi de 474 °C e a temperatura na FANEAT foi de 341 °C, gerando-se um gradiente térmico de 133 °C. A fissuração média observada foi de 0,50 mm. Em comparação com a composição A1, a temperatura máxima da argamassa A4_MI na FANEAT foi 17,7 % inferior, na FICM foi 12 % inferior e a fissuração foi reduzida em 34,8 %. Relativamente aos resultados da composição A4_MI face à composição A4_LA, no geral o desempenho da composição A4_LA é superior.

No gráfico da figura 3.18 observa-se a evolução média de temperatura dos provetes da composição A5_MI, composta por cimento refratário, vermiculite (MI) e perlite (MI).

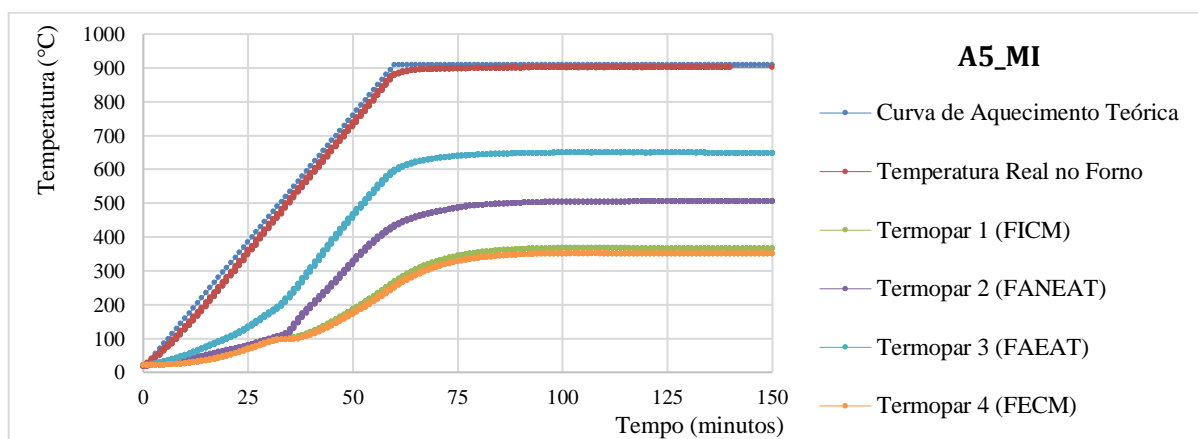


Figura 3.18 – Evolução média de temperatura na composição A5_MI em função do tempo.

A temperatura máxima atingida na FAEAT e na FANEAT foi de 649 e 505 °C, respetivamente. O gradiente térmico registado foi de 144 °C, a temperatura na FICM foi de 368 °C e a fissuração média tomou o valor de 1,50 mm. Em geral o desempenho térmico da composição A5_MI é inferior ao desempenho da composição A1 e da composição A5_LA.

Em última análise, o principal interesse das argamassas de proteção passiva face a situação de incêndio é adiar no tempo a perda de resistência mecânica dos elementos estruturais. Assim, e em função dos resultados obtidos na campanha experimental, o critério mais preponderante para permitir a comparação entre o desempenho térmico das argamassas é dado pela temperatura máxima atingida na face interna da chapa metálica dos provetes (FICM).

No quadro 3.6, em resumo, são apresentados para cada composição, os valores médios de temperatura máxima atingidos na face interna das chapas metálicas dos provetes (FICM) e o seu desempenho térmico relativamente à argamassa comercial.

Tendo como referência para comparação a temperatura máxima de 313 °C na FICM da composição A1 podemos concluir que: o desempenho foi inferior em 17,6; 3,8 e 3,4 % para as composições A5_MI, A3_MI e A5_LA, respetivamente; o desempenho foi idêntico em 0,2 e 0,7 % para as composições A2_MI e A3_LA, respetivamente; o desempenho foi superior em 6,7; 12,0 e 12,9 % para as composições A2_LA, A4_MI e A4_LA, respetivamente.

Quadro 3.6 – Valores médios de temperatura máxima atingidos na FICM dos provetes e desempenho térmico.

Composição	FICM (°C)			Desempenho térmico	
	SCPP	LA	MI	LA	MI
A1	313	-	-	-	-
A2	-	294	312	6,7%	0,2%
A3	-	311	325	0,7%	-3,8%
A4	-	272	275	12,9%	12,0%
A5	-	323	368	-3,4%	-17,6%

Os resultados da argamassa de base cimentícia, contendo vermiculite e fibras de polipropileno (A2) variaram, consoante os graus de finura ensaiados. Enquanto que, com a matéria-prima (vermiculite) proveniente do ensaio de Los Angeles, obteve um desempenho térmico um pouco superior ao da SCPP (6,7 %), o isolamento térmico proporcionado com a matéria-prima advinda da moagem industrial foi idêntico à SCPP (0,2 %). No processo de cura desta argamassa verificou-se a ocorrência de fissuração em alguns provetes.

A argamassa constituída por gesso e perlite (A3) apresentou um comportamento térmico idêntico à SCPP (0,7 %), com a matéria-prima (perlite) resultante do ensaio de Los Angeles. Contudo, o desempenho térmico desta argamassa com o grau de finura proveniente da moagem industrial foi inferior à SCPP (-3,8 %). Após a fabricação desta composição era notória a celeridade no tempo de início de presa, dificultando por vezes a betonagem dos provetes.

A composição composta por gesso e vermiculite (A4) foi aquela que apresentou melhorias mais significativas na proteção térmica, face à SCPP (\approx 12,5 %). No entanto, verificou-se a ocorrência de retração (diminuição de volume) no processo de cura desta argamassa e, devido à existência de tensões internas surgiram fissuras em alguns provetes.

A argamassa com base em cimento refratário (A5) apresentou resultados díspares relativamente aos graus de finura ensaiados. Enquanto que com a matéria-prima (vermiculite e perlite) proveniente do ensaio de Los Angeles, obteve um desempenho térmico um pouco inferior ao da SCPP (-3,4 %), o comportamento de isolamento térmico proporcionado com a matéria-prima advinda da moagem industrial foi insuficiente quando comparada com a SCPP (-17,6 %).

Relativamente aos dois graus de finura das composições desenvolvidas, constatou-se que com a matéria-prima (vermiculite e perlite) obtida pelo ensaio de Los Angeles obteve-se resultados térmicos mais satisfatórios face à matéria-prima obtida pela moagem industrial. Isto pode dever-se ao facto de existir um índice de vazios considerável na matriz das argamassas de cimento ou de gesso, pelo que a adição de vermiculite e perlite com partículas de maior dimensão diminui os pontos/área de contato para a transferência de calor.

4 ANÁLISE EXPERIMENTAL DOS ELEMENTOS ESTRUTURAIS - COLUNAS

A eficiência do isolamento térmico proporcionado pelas argamassas desenvolvidas foi avaliada através da realização de uma campanha experimental para determinação da resistência à compressão em colunas de aço quando sujeitas a elevadas temperaturas. Nesse sentido, foram ensaiadas 4 colunas de aço, das quais 1 sem proteção passiva e 3 revestidas com argamassas de proteção passiva contra o fogo.

Deste modo, procurou-se determinar a resistência ao fogo das respectivas colunas, observar os modos de instabilidade associados a cada coluna e comparar o comportamento de isolamento térmico e integridade das respectivas argamassas.

4.1 Composições Estudadas

As composições estudadas no programa experimental das colunas metálicas foram as argamassas designadas por A1, A2 e A4, perfazendo um total de 3 provetes-colunas (PC) com correspondência à respectiva argamassa, designados por: PC_A1, PC_A2 e PC_A4. Estas argamassas foram aquelas que apresentaram o melhor desempenho térmico.

Apesar do provete revestido com argamassa constituída por gesso e perlite (A3) se encontrar betonado, não foi ensaiado de forma a concluir a campanha experimental em tempo útil. A argamassa composta por cimento refratário, vermiculite e perlite (A5) não foi admitida neste programa experimental devido ao custo relativamente elevado do cimento refratário face aos ligantes das outras composições e apresentar o pior desempenho térmico quando comparado com as outras argamassas.

Foi também ensaiado um provete sem revestimento térmico, designado por PC, de forma a ter resultados que servissem de referência para comparação com os provetes com revestimento e, assim, avaliar o isolamento térmico proporcionado pelas diferentes argamassas estudadas.

O método de moagem utilizado para obter perlite e vermiculite, utilizadas na produção das argamassas, foi a moagem industrial (MI) porque permitiu a produção destas matérias-primas em maior quantidade e uma maior fiabilidade na sua obtenção com a mesma dimensão entre diferentes moagens.

4.2 Provetes

Os provetes ensaiados eram constituídos por colunas de aço de classe S355, de secção quadrada oca 150 x 150 x 8 mm, com uma altura de 1250 mm e por chapas de aço centradas e soldadas nos topos com secção 300 x 300 x 20 mm com 4 furos cilíndricos de 26 mm de diâmetro.

De forma a avaliar a variação de temperatura nas faces da coluna no decorrer do ensaio, foram soldados 12 termopares do tipo K, equidistantes entre si em todas as faces do provete, aplicados em 3 grupos de 4 termopares (figura 4.1).

O valor da temperatura indicada como referente a estes três grupos, resulta do valor médio da temperatura obtida nos quatro termopares. Cada grupo de termopares terá a seguinte designação: grupo de termopares superiores (GTSUP), grupo de termopares intermédios (GTINT) e grupo de termopares inferiores (GTINF).

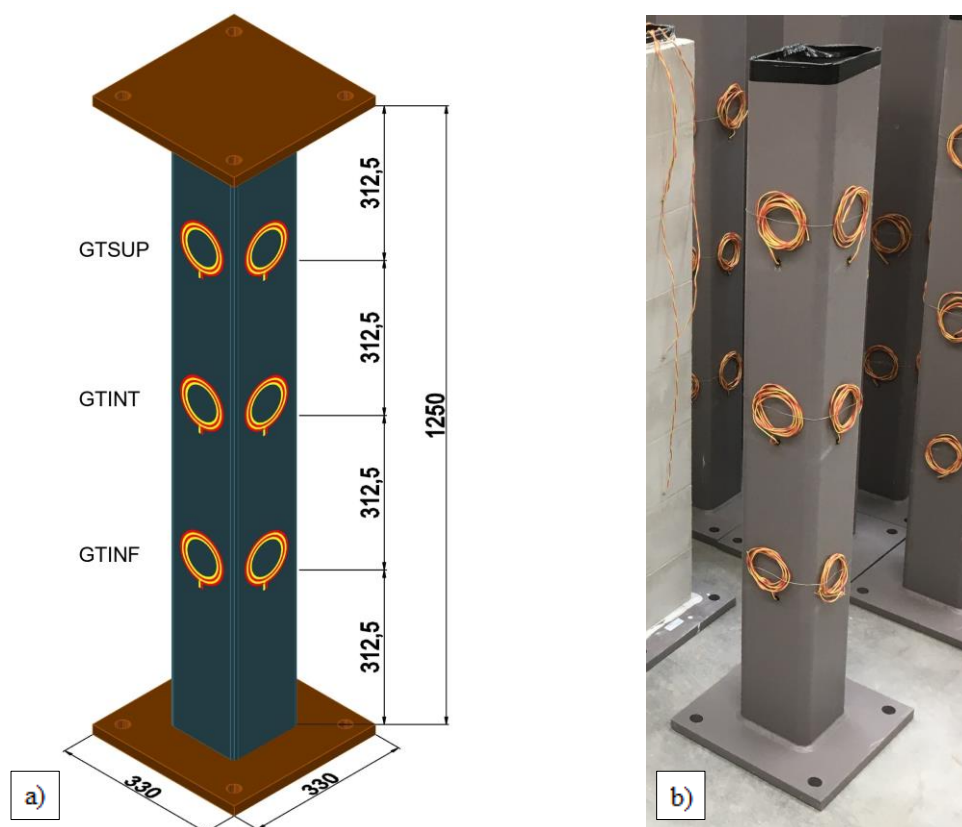


Figura 4.1 – Provetes e disposição dos termopares: a) Dimensões do provete, designação e posição dos termopares (mm); b) Provetes instrumentados com termopares prontos a ser betonados.

4.3 Betonagem dos Provetes

O procedimento de fabricação das argamassas para a betonagem das colunas foi idêntico ao referido anteriormente no capítulo 3. A espessura de recobrimento da argamassa de proteção passiva na betonagem das colunas, foi de 2 cm.

De forma a estabelecer uniformidade na espessura de argamassa ao longo da coluna, recorreu-se a uma cofragem em contraplacado marítimo com 21 mm de espessura. As faces deste tipo de cofragem são revestidas com filme fenólico, permitindo uma fácil descofragem (devido à baixa aderência entre a cofragem e a argamassa), um bom acabamento nas faces da argamassa e um elevado número de reutilizações nas betonagens das colunas.

A cofragem (figura 4.2) foi concebida em vários módulos ao longo do seu desenvolvimento devido à misturadora usada na preparação das composições ser de pequenas dimensões, não permitindo produzir um volume considerável de argamassa, bem como, duas das argamassas desenvolvidas nesta campanha experimental ganharem presa rapidamente por ter o gesso como ligante, exigindo assim uma betonagem faseada.



Figura 4.2 – Cofragem utilizada na betonagem dos provetes: a) Dimensões dos conjuntos das cofragens utilizadas (mm); b) Três conjuntos de cofragens utilizados nas betonagens.

A cofragem foi composta por 7 módulos com 150 mm de altura e 1 módulo com 170 mm de altura, perfazendo uma altura de 1220 mm. Cada módulo era constituído por 4 elementos em contraplacado que encaixavam entre si e permaneciam fixos através de 2 varões roscados com porcas de orelhas.

A cofragem não se desenvolveu até os últimos 30 mm da coluna, de forma a permitir a soldadura entre a coluna e a chapa metálica de topo, posteriormente à betonagem. O contorno do topo superior das colunas foi rebarbado e aplicou-se fita adesiva, de forma a evitar o acumular de argamassa e impurezas durante a betonagem e facilitar o processo de soldadura à posteriori.

Durante os ensaios de compressão a elevadas temperaturas, a zona da coluna desprovida de argamassa de proteção foi colmatada por lã cerâmica, reduzindo assim o diferencial de temperatura provocado pela ausência de argamassa de proteção.

Dependendo da argamassa betonada, as colunas foram descofradas entre 24 a 72 horas, após a finalização da betonagem e ensaiadas após 4 meses de cura (figura 4.3).

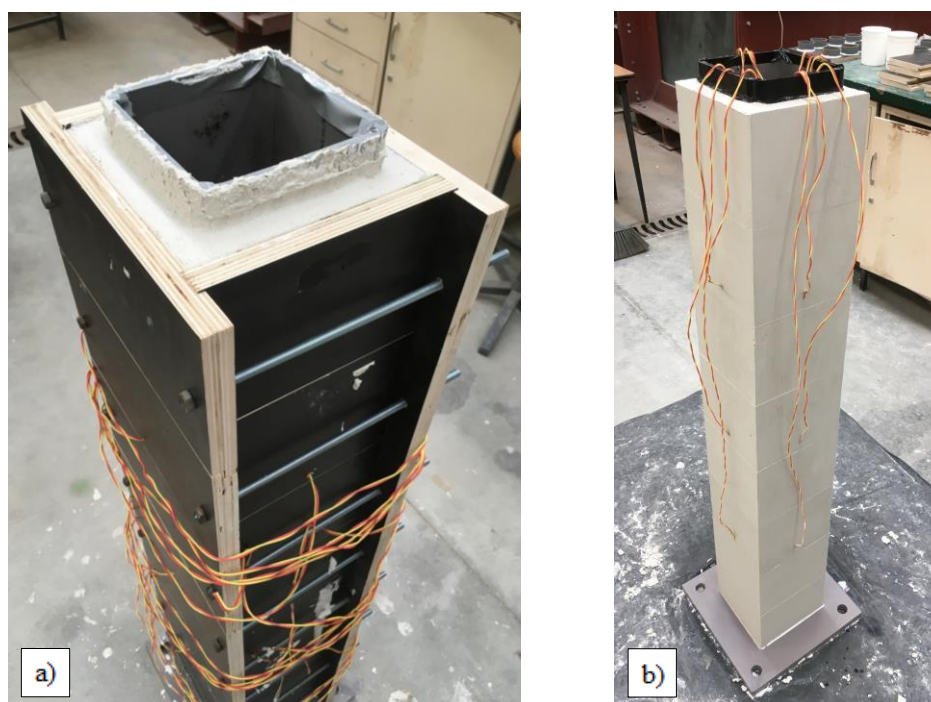


Figura 4.3 – Betonagem de um provete: a) Provete em processo de presa; b) Provete em processo de cura.

4.4 Sistema e Procedimento Experimental

O layout experimental era constituído por um pórtico metálico com a função de reação à carga aplicada no provete durante o ensaio, composto por colunas HEB 500 e viga HEB 600 (cor verde), com uma rigidez capaz de minimizar possíveis deslocamentos desta estrutura metálica aquando da realização destes ensaios e uma segunda estrutura de suporte constituída por dois pórticos (cor vermelha), com a função de transmissão de carga ao provete, constituídos por colunas HEB 300 e vigas HEB 400.

Além disso, foi utilizado um macaco hidráulico de 3 MN (cor cinzenta) e respetivo controlador, uma célula de carga de 3 MN (cor amarela) e uma célula de carga de 1 MN (cor bordô), 10 transdutores para a medição de deslocamentos lineares, um Datalogger TDS-530 para aquisição de dados (força, deslocamentos e temperatura) durante o decorrer dos ensaios e, por fim, um forno da marca Termolab (cor azul) de dimensões 1,92 x 1,92 x 1,43 m, para proceder ao aquecimento dos referidos provetes metálicos (cor azul cyan). Na figura 4.4 apresenta-se uma representação esquemática do sistema experimental.

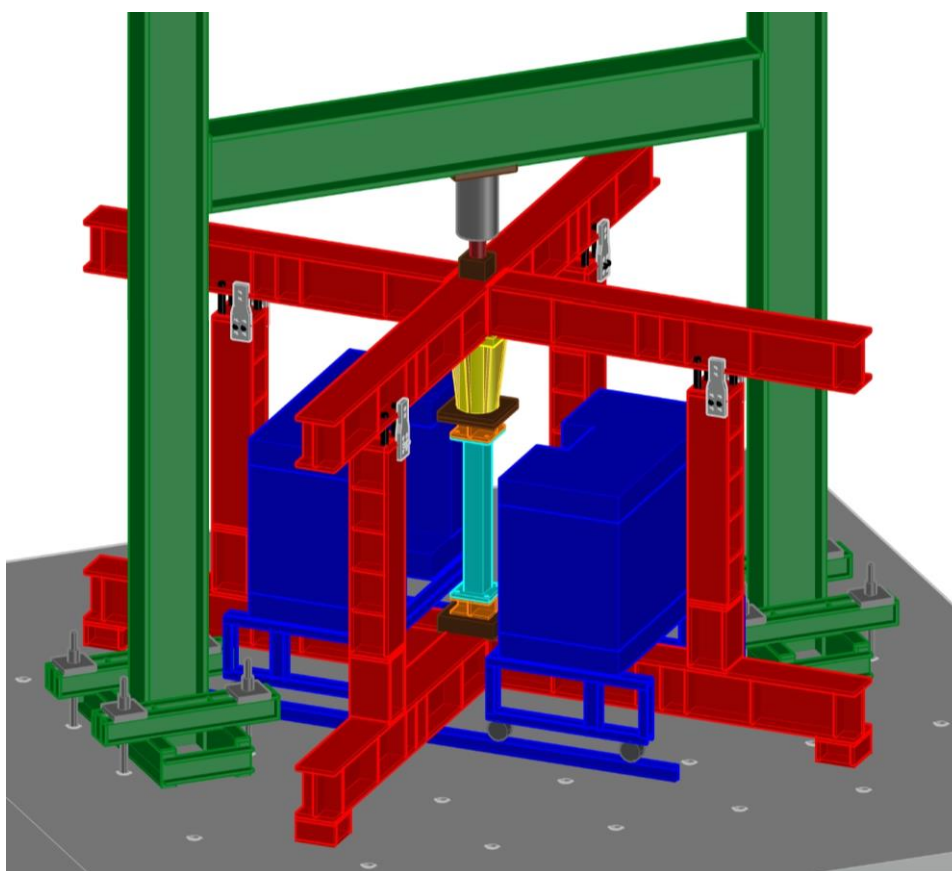


Figura 4.4 – Representação esquemática do sistema experimental.

A ligação na base dos provetes foi conseguida por meio de 4 parafusos M24 da classe 8.8, que fixaram a chapa de base a um conjunto de chapas metálicas (cor laranja e castanha) soldadas às vigas inferiores dos pórticos vermelhos. A chapa de topo dos provetes foi igualmente fixa através de 4 parafusos M24 da classe 8.8 a um conjunto de chapas metálicas (cor laranja e castanha). Estas chapas metálicas (cor laranja e castanha) estavam fixas à célula de carga inferior (cor amarela) e às vigas vermelhas superiores. Desta forma, as chapas metálicas, a célula de carga inferior e as vigas superiores dos pórticos vermelhos apoiavam-se directamente no provete. Além disso, as vigas superiores dos pórticos vermelhos encontravam-se restringidas lateralmente a deslocamentos horizontais nas duas direcções devido à existência de varões roscados e de apoios metálicos confinantes na parte superior das colunas metálicas. A estes apoios confinantes (slides) foram acopladas placas de téflon, que permitiram diminuir o atrito gerado entre os apoios metálicos e as vigas vermelhas aquando da elevação das mesmas devido à dilatação térmica dos provetes no decorrer dos ensaios. Na figura 4.5 é possível visualizar o sistema experimental montado no laboratório.

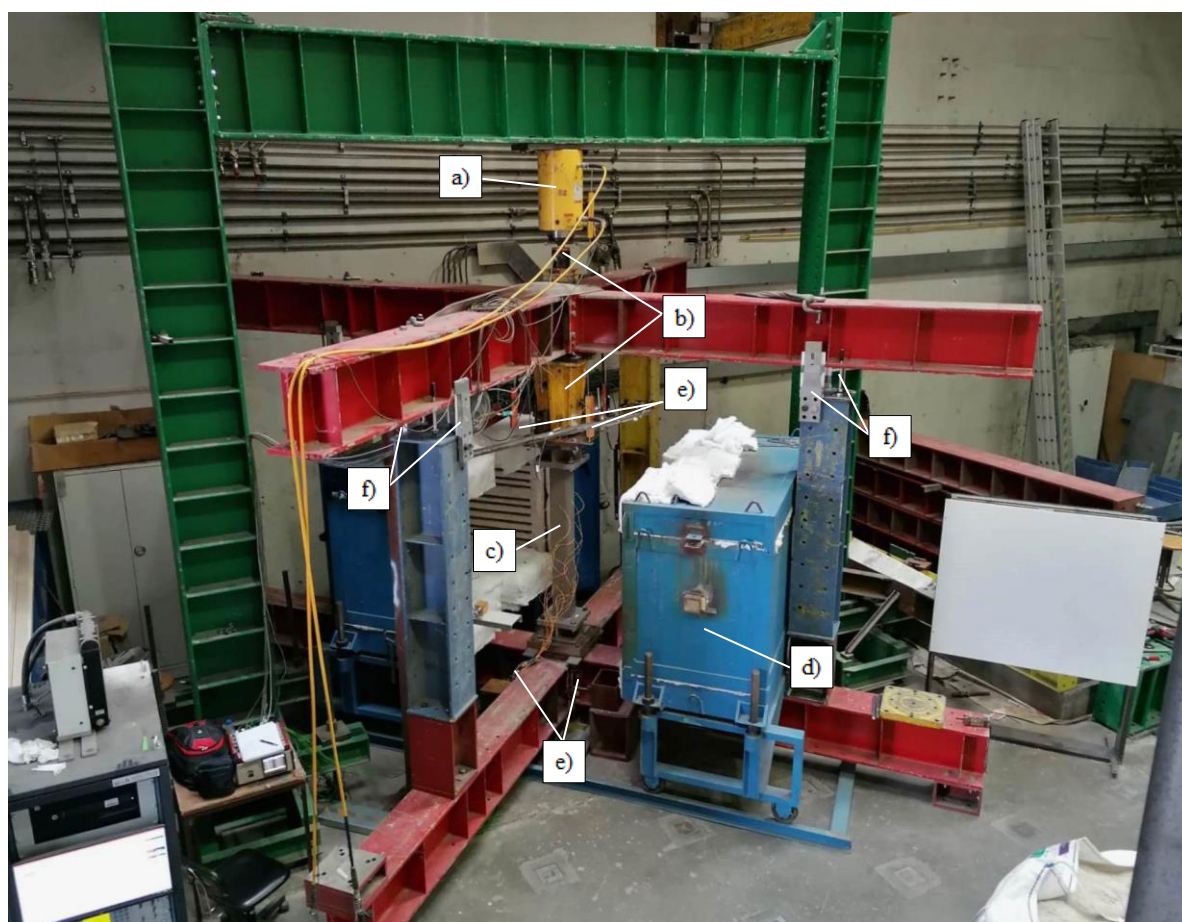


Figura 4.5 – Layout experimental montado: a) Macaco hidráulico; b) Célula de carga; c) Provede; d) Forno; e) Transdutores (LVDT's); f) Apoios metálicos confinantes com téflon.

Na figura 4.6 são apresentadas imagens de pormenor dos apoios metálicos confinantes com placas de teflon, bem como as guias (varões parcialmente roscados) das vigas superiores.

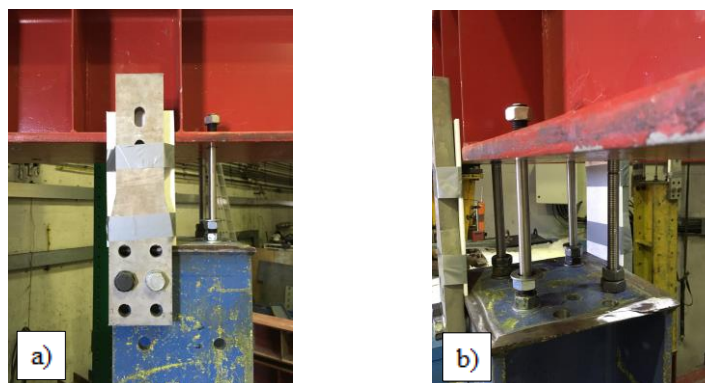


Figura 4.6 – Imagens de pormenor: a) Apoio metálico confinante com placa de teflon; b) Guias.

A disposição dos transdutores adotada para a medição de deslocamentos lineares permitiu ter uma leitura qualitativa da deformação horizontal dos provetes em relação ao seu eixo baricêntrico e uma leitura quantitativa da deformação vertical relativamente à sua configuração indeformada. Os 10 transdutores para a medição da deformação dos provetes no decorrer dos ensaios foram colocados de acordo com a ilustração da figura 4.7.

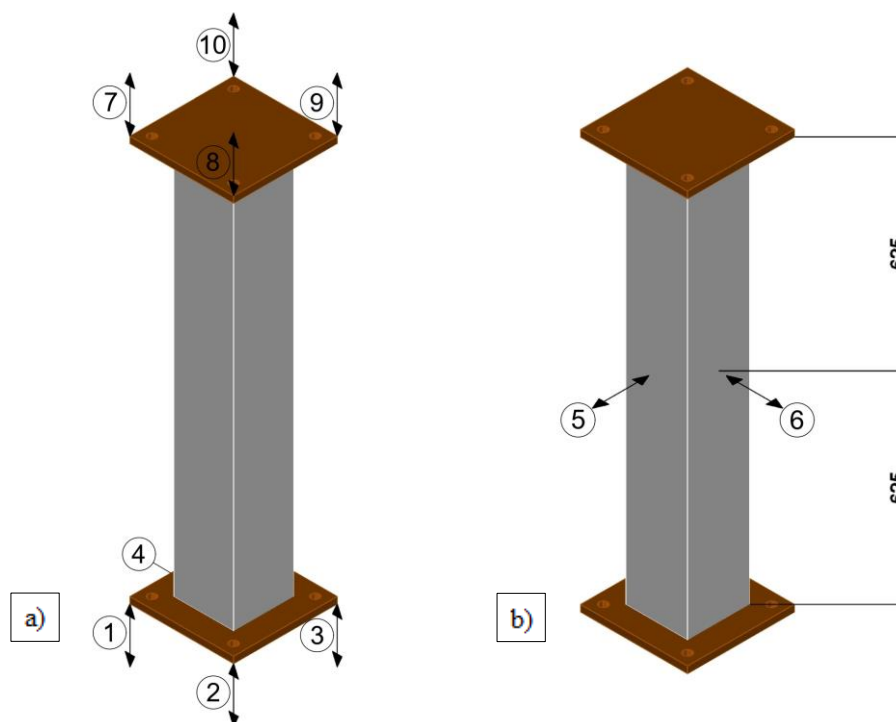


Figura 4.7 – Posições dos transdutores: a) LVDT's verticais; b) Transdutores de fio horizontais (mm).

Na base do provete, o carregamento é transmitido deste às vigas inferiores dos pórticos vermelhos e de forma a verificar a ausência de deslocamentos verticais nesta zona, foram colocados quatro transdutores (1-4) na chapa de base dos provetes. Com isto, pretendeu-se que a leitura quantitativa dos quatro transdutores superiores (7-10) relativa à deformação vertical dos provetes fosse absoluta e não relativa. A medição da deformação horizontal qualitativa dos provetes foi assegurada por dois transdutores de fio (5 e 6), um em cada direção. Na figura 4.8 são apresentados em detalhe os transdutores utilizados na campanha experimental.

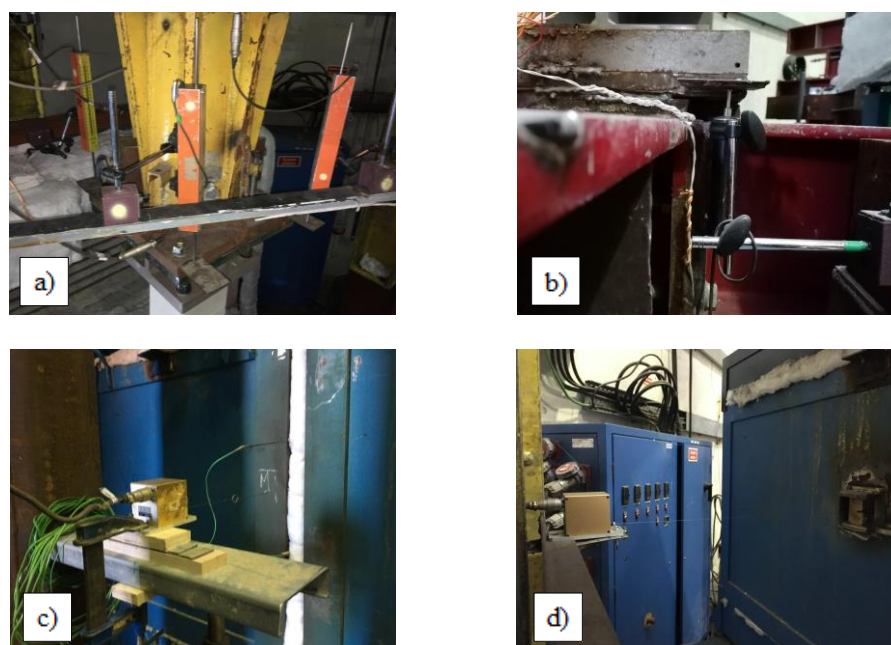


Figura 4.8 – Imagens de pormenor: a) LVDT's verticais superiores (8-10); b) LVDT's verticais inferiores (1-4); c) Transdutor de fio horizontal (5); d) Transdutor de fio horizontal (6).

Na figura 4.9 é apresentada a lã cerâmica utilizada, em perfeita acomodação com o forno para evitar perdas de calor durante o ensaio.

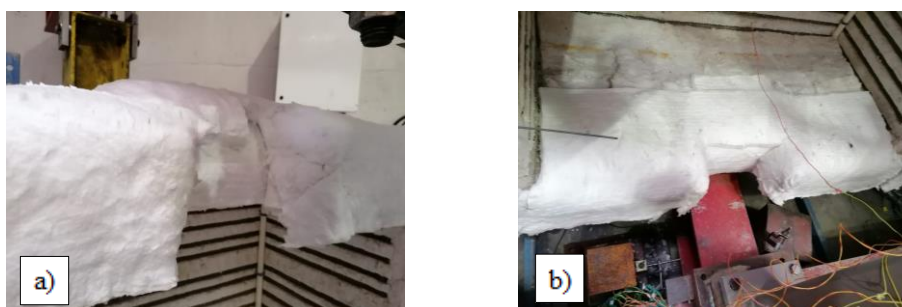


Figura 4.9 – Imagens de pormenor: a) Forro superior do forno; b) Forro inferior do forno.

De forma a simular a solicitação do provete em serviço e com recurso ao macaco hidráulico, controlado por uma central servo-controlada, foi aplicada uma pré-carga de 50 % do valor de cálculo do esforço axial resistente à encurvadura do elemento comprimido sujeito a temperatura uniforme ($N_{b,fi,t,Rd}$), correspondente a 727,8 kN (74,2 ton), com uma estimativa para a temperatura crítica de 586,7 °C (EN 1993-1-2:2005) [28].

Após aplicação deste carregamento (figura 4.10), o forno foi ligado e o provete aquecido segundo a evolução de temperatura prevista pela curva de incêndio padrão ISO 834 [28].



Figura 4.10 – Imagens de pormenor: a) Central servo-controlada; b) Macaco hidráulico e célula de carga; c) Forno aberto com provete para ensaio; d) Forno fechado e ensaio em curso.

Devido ao aumento de temperatura no decorrer do ensaio, geraram-se forças térmicas significativas no provete provocadas pela dilatação térmica do aço. O efeito destas forças internas de origem térmica foi absorvido pelo recolhimento do êmbolo do macaco hidráulico, mas o carregamento inicial imposto ao provete manteve-se no decorrer de todo o ensaio.

Com recurso ao sistema de aquisição de dados (figura 4.11), foi registado o valor de carga aplicado ao provete (células de carga), bem como a evolução da temperatura no aço (termopares) e a deformação a que este esteve sujeito durante o ensaio experimental (transdutores).

O ensaio era dado por concluído com base no critério de contração axial definido pela norma ISO 834-1:1999 [71], que define um encurtamento limite do provete em função do seu comprimento inicial, a partir do qual é notória a incapacidade de suporte do provete sujeito a elevadas temperaturas e face ao carregamento aplicado. Assim, o valor de deformação vertical considerado, relativo à configuração indeformada dos provetes para o qual os ensaios eram consumados, foi de 12,5 mm.

Por fim, era observado o grau de destacamento da argamassa de proteção, eram removidos os seus detritos e era analisado o modo de instabilidade ocorrido no provete (figura 4.11).

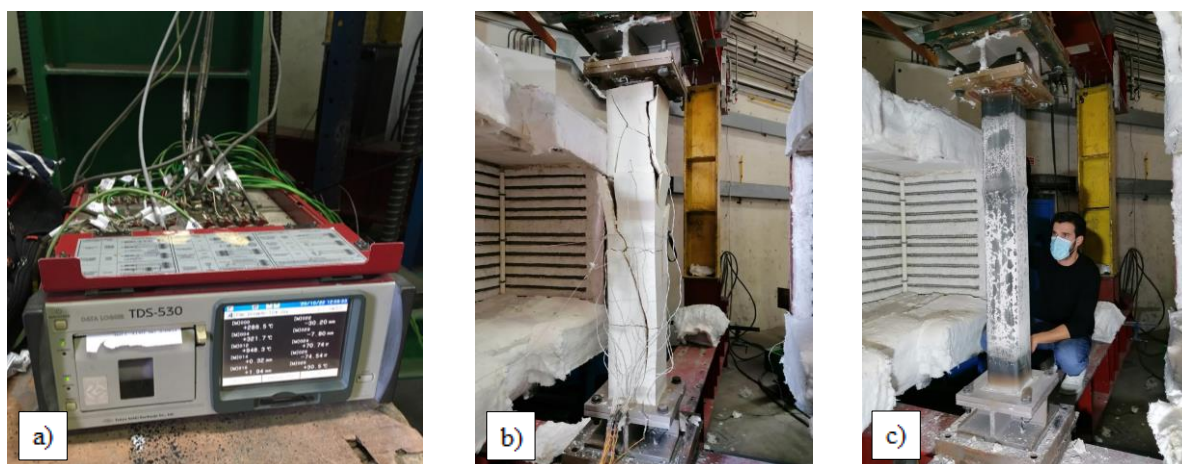


Figura 4.11 – a) Sistema de aquisição de dados (Datalogger); b) Provede depois de ensaiado; c) Verificação do modo de instabilidade ocorrido no provede.

4.5 Análise e Discussão de Resultados

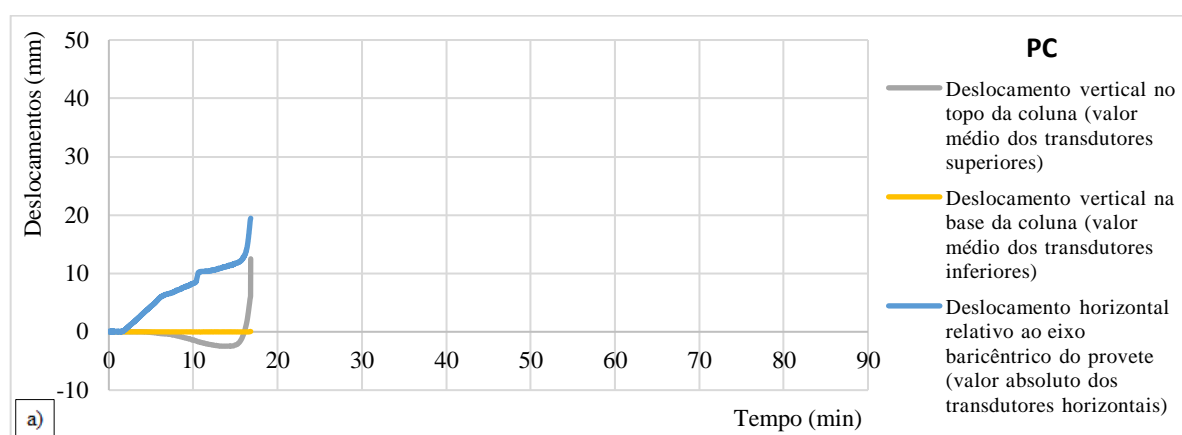
Para cada provete ensaiado foram gerados gráficos com a evolução de deformação do provete em função do tempo e da sua temperatura, de forma identificar a temperatura crítica experimental, bem como gráficos de evolução de temperatura em função do tempo, para possibilitar a classificação dos provetes quanto à resistência ao fogo padrão.

As fotografias dos provetes ensaiados referentes à campanha experimental do comportamento mecânico das colunas metálicas revestidas com as argamassas de proteção passiva contra incêndio encontram-se no anexo B.

Na análise das temperaturas associadas ao instante de instabilização dos provetes, foi considerado para o provete PC, a temperatura média registada nesse referido instante, uma vez que o provete era desprovido de proteção passiva e a sua evolução de temperatura durante o decorrer do ensaio foi aproximadamente uniforme.

No caso dos provetes revestidos com argamassa de proteção passiva, consideraram-se as temperaturas máximas registadas para o instante de tempo em que verificou instabilidade, devido à ocorrência de destacamento de argamassa de proteção no decorrer do ensaio e, por isso, existirem zonas dos provetes em que as temperaturas eram mais elevadas.

A figura 4.12 apresenta os resultados da primeira coluna ensaiada - provete PC (sem proteção).



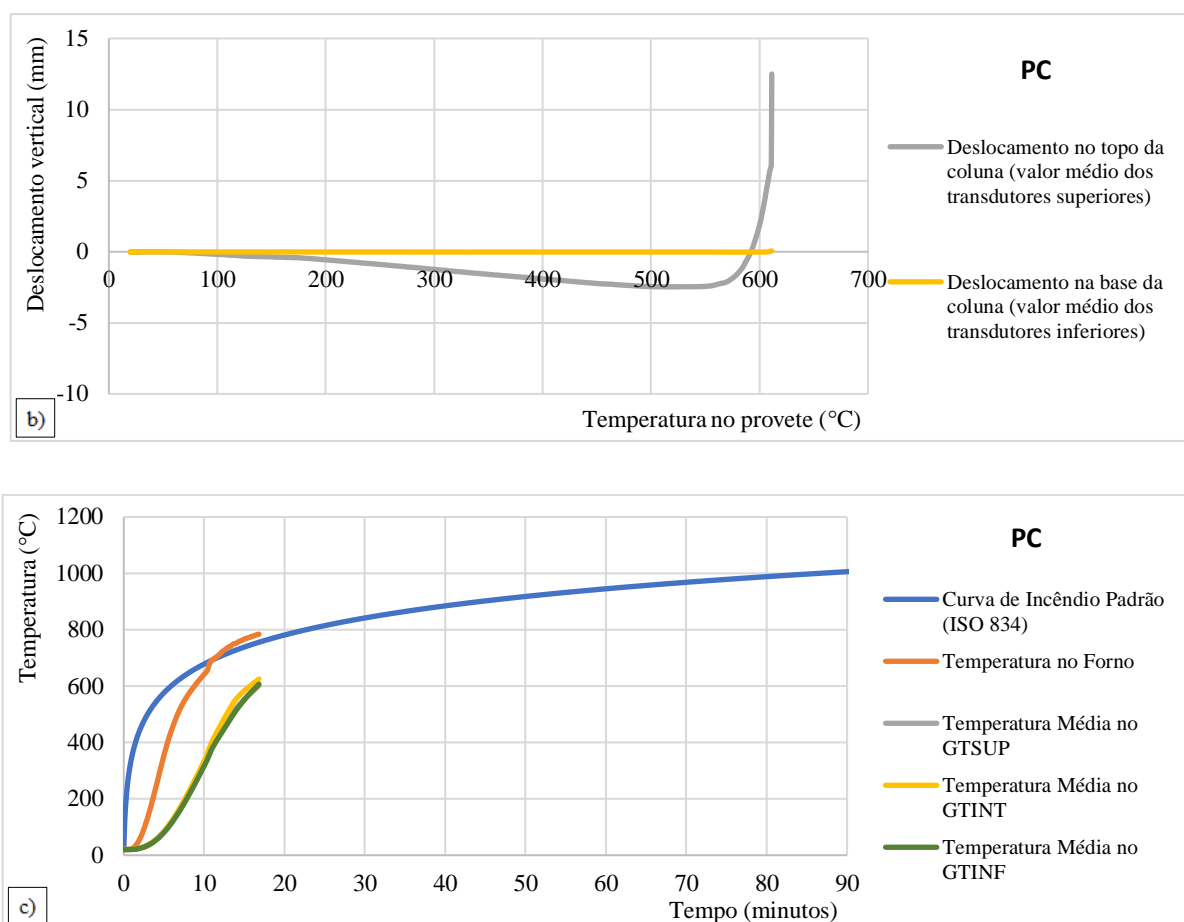


Figura 4.12 – Gráficos (provete PC): a) Deslocamentos em função do tempo; b) Deslocamentos verticais em função da temperatura; c) Temperatura em função do tempo.

Os resultados deste ensaio mostraram que a evolução inicial de temperatura no provete PC foi acentuada, com tendência a aproximar-se da temperatura estabelecida no forno. Foi observado que apenas ao fim de 10 minutos de ensaio o desenvolvimento da temperatura no forno tendeu a acompanhar a evolução de temperatura da curva de incêndio ISO 834. As temperaturas médias instaladas no provete foram de 83,0; 326,0 e 563,0 °C para os instantes de 5, 10 e 15 minutos, respetivamente. O provete PC começou a instabilizar ao fim de 16,8 minutos [71], para uma temperatura média de 611,3 °C. Esta temperatura passará a ser designada como a temperatura crítica experimental do provete PC.

O deslocamento absoluto horizontal máximo registado em relação ao eixo baricêntrico do provete foi de 19,5 mm, enquanto o deslocamento máximo vertical relativo à sua configuração indeformada foi de 12,5 mm. Foi verificada a ocorrência de instabilidade local em duas secções (46 cm e 77 cm da base), seguida de instabilidade global no plano perpendicular à parede tubular com deformação local de semi-onda côncava (figura B.2 no anexo B).

A figura 4.13 apresenta os resultados da segunda coluna ensaiada - provete PC_A1 (solução comercial de proteção passiva).

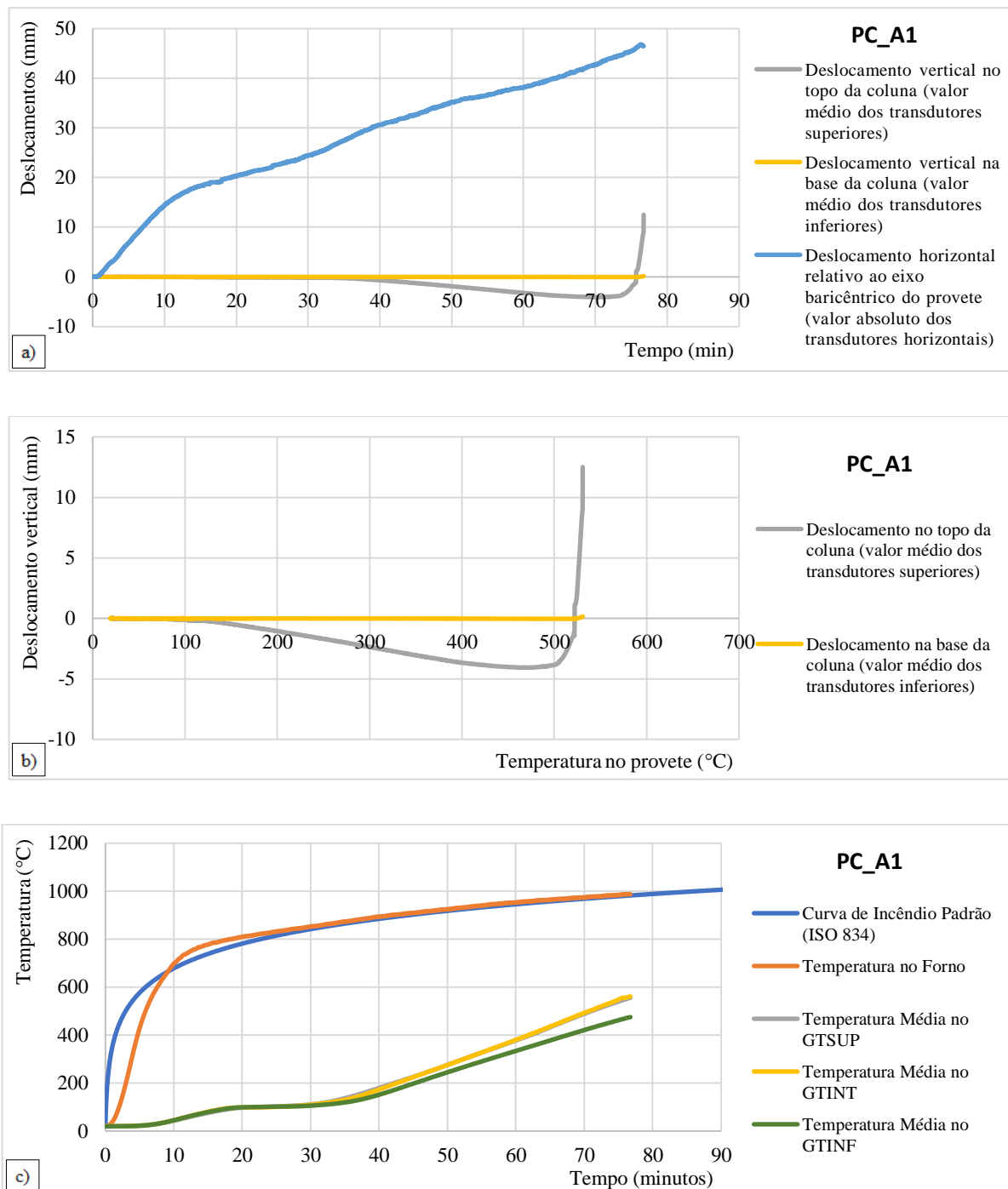
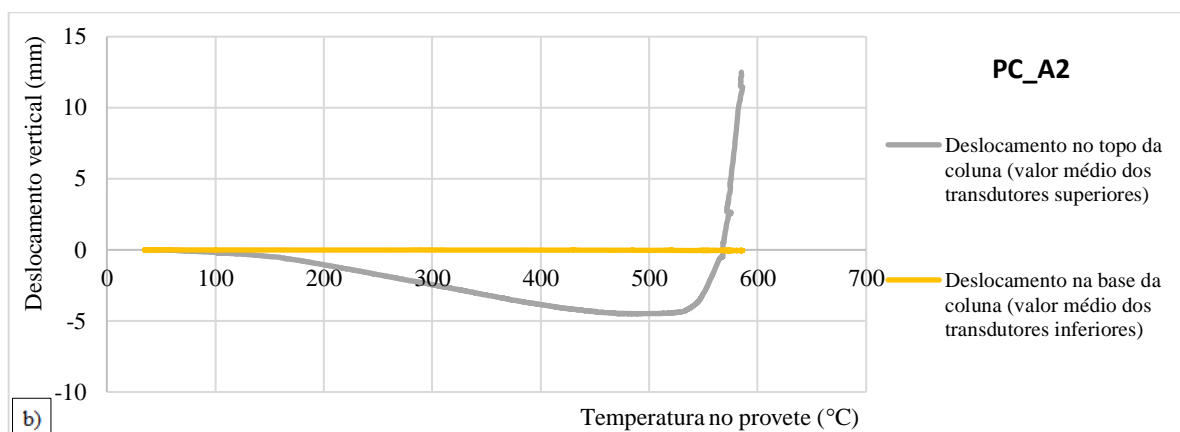
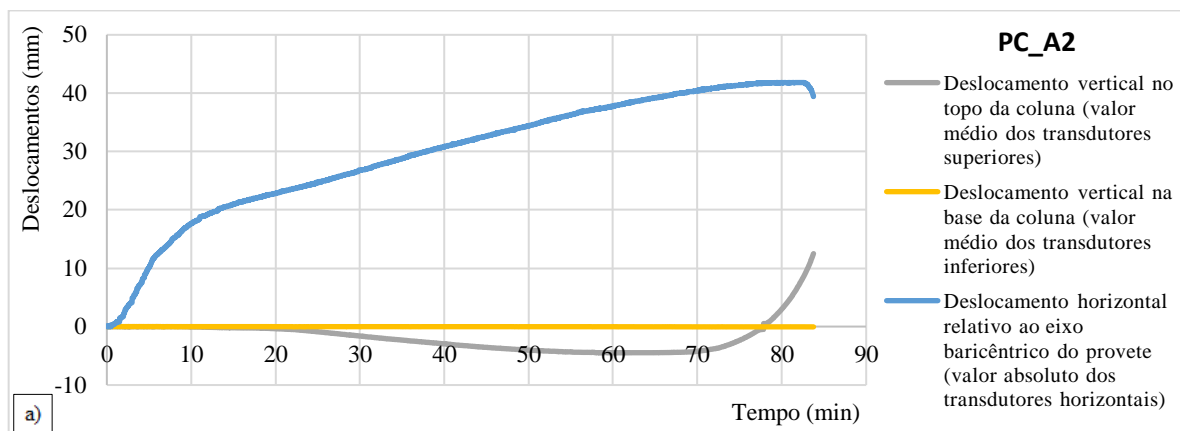


Figura 4.13 – Gráficos experimentais (provetes PC_A1): a) Deslocamentos em função do tempo; b) Deslocamentos verticais em função da temperatura; c) Temperatura em função do tempo.

A evolução inicial de temperatura no provete PC_A1 foi gradual devido à evaporação da água de constituição da argamassa de proteção (100 °C), como se pode observar entre os 20 e os 30 minutos. A partir dos 30 minutos observou-se um aumento mais acentuado de temperatura até à conclusão do ensaio, tendo-se registado os valores de temperatura média na coluna ao fim de 15, 30 e 60 minutos de 78,7; 108,9 e 365,0 °C, respetivamente. A ocorrência de instabilidade no provete PC_A1 deu-se ao fim de 76,7 minutos, para a temperatura experimental máxima de 573,5 °C.

O deslocamento horizontal máximo em relação ao eixo baricêntrico do provete foi de 46,8 mm enquanto o deslocamento máximo vertical foi de 12,5 mm. No decorrer do ensaio, devido à ocorrência de maior fissuração da argamassa de proteção na zona superior do provete, sucedeu-se um aumento de temperatura localizado, tendo-se no fim verificado um acentuamento de instabilidade local no provete em detrimento de instabilidade global. O modo de instabilidade local observado foi de semi-onda convexa, a 83 cm da base do provete (figura B.3 no anexo B).

A figura 4.14 apresenta os resultados da terceira coluna ensaiada - provete PC_A2 (cimento, vermiculite e fibras de polipropileno).



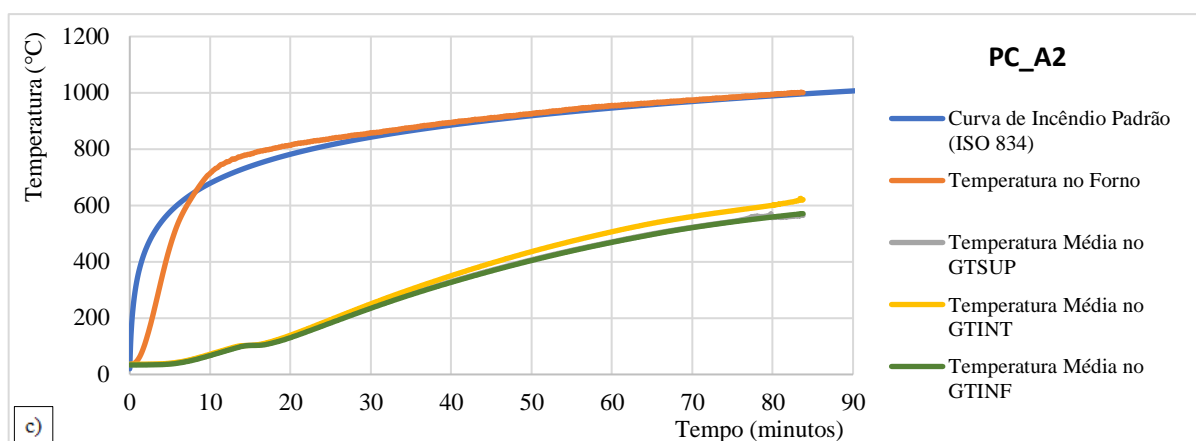
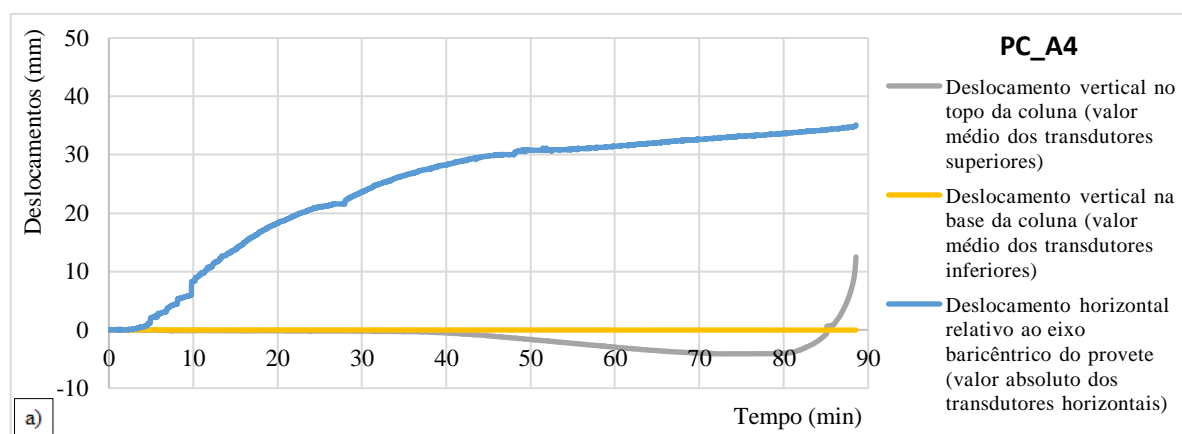


Figura 4.14 – Gráficos (provetes PC_A2): a) Deslocamentos em função do tempo; b) Deslocamentos verticais em função da temperatura; c) Temperatura em função do tempo.

A evolução inicial de temperatura no provete PC_A2 foi um pouco mais acentuada visto que esta argamassa possui menos água na sua constituição. A partir dos 17 minutos observou-se um acréscimo proeminente de temperatura até à conclusão do ensaio, tendo-se registado os valores de temperatura média ao fim de 15, 30 e 60 minutos de 103,1; 241,4 e 481,8 °C, respetivamente. A ocorrência de instabilidade no provete PC_A2 deu-se ao fim de 83,7 minutos, para a temperatura experimental máxima de 631,6 °C.

O deslocamento horizontal máximo em relação ao eixo baricêntrico do provete foi de 41,8 mm, enquanto o deslocamento máximo vertical foi de 12,5 mm. De forma análoga ao provete PC_A1, o modo de instabilidade local observado no provete PC_A2 foi de semi-onda convexa, a 54 cm da base do provete (figura B.4 no anexo B).

A figura 4.15 apresenta os resultados da quarta coluna ensaiada - provete PC_A4 (gesso e vermiculite).



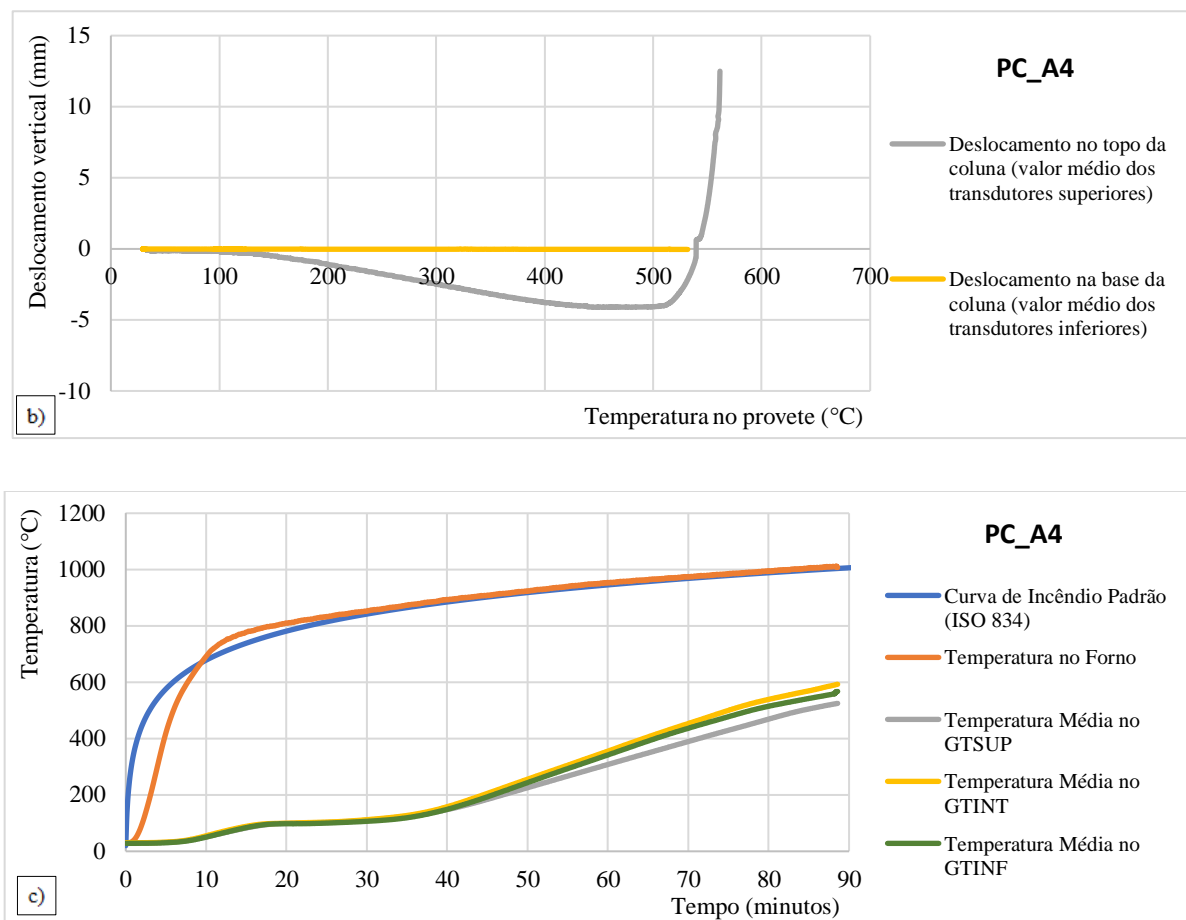


Figura 4.15 – Gráficos experimentais (provete PC_A4): a) Deslocamentos em função do tempo; b) Deslocamentos verticais em função da temperatura; c) Temperatura em função do tempo.

Foi verificada uma evolução gradual de temperatura no provete PC_A4 devido à evaporação da água (100 °C) de constituição da argamassa de proteção, como se observa entre os 20 e 30 minutos. A partir dos 30 minutos observou-se um acréscimo mais acentuado de temperatura até à conclusão do ensaio, tendo-se registado os valores de temperatura média ao fim de 15, 30 e 60 minutos de 85,2; 109,7 e 335,3 °C, respetivamente. Ao fim de 88,6 minutos, o provete PC_A4 apresentou perda significativa de resistência mecânica para uma temperatura experimental máxima de 602,9 °C.

O deslocamento horizontal máximo em relação ao eixo baricêntrico do provete foi de 35,1 mm enquanto o deslocamento máximo vertical foi de 12,5 mm. A instabilidade do provete ocorreu localmente em duas secções (39 cm e 68 cm da base) seguido de instabilidade global no plano perpendicular à parede tubular com deformação local de semi-onda côncava (figura B.5 no anexo B).

No quadro 4.1, em resumo, são apresentados os valores experimentais obtidos das temperaturas críticas experimentais, das temperaturas máximas e as seções onde estas se verificaram, bem como, os valores dos deslocamentos máximos registados no decorrer dos ensaios. Refere-se que as leituras dos deslocamentos horizontais poderão apresentar uma margem de erro, gerado pelo destacamento da argamassa dos provetes, no decorrer dos ensaios.

Quadro 4.1 – Valores experimentais das temperaturas críticas, temperaturas máximas e dos deslocamentos máximos registados.

Designação dos provetes	$N_{b,fi,t,Rd}$ (kN)	T_{crit} (°C)	$T_{máx}$ (°C)	Seção $T_{máx}$	$d_{horizontal}$ (mm)	$d_{vertical}$ (mm)
PC	727,8	611,3	-	GTINT	19,5	12,5
PC_A1		-	573,5	GTSUP	46,8	12,5
PC_A2		-	631,6	GTINT	41,8	12,5
PC_A4		-	602,9	GTINT	35,1	12,5

No quadro 4.2 são apresentados os valores médios de temperatura registados nos provetes ao fim de 15, 30 e 60 minutos, bem como, para os valores médios de temperatura para os instantes de instabilização de cada provete ensaiado.

Quadro 4.2 – Valores médios de temperatura registados nos provetes.

Designação dos provetes	Temperatura média nos provetes (°C)						
	15 min	16,8 min	30 min	60 min	76,7 min	83,7 min	88,6 min
PC	563,0	611,3	-	-	-	-	-
PC_A1	78,7	88,7	108,9	365,0	530,8	-	-
PC_A2	103,1	108,2	241,4	481,8	562,2	585,2	-
PC_A4	85,2	93,8	109,7	335,3	483,2	531,5	561,7

Com base na informação relativa à evolução de deformação nos provetes ensaiados e o tempo correspondente ao início da ocorrência de deformações acentuadas, indicativo da perda significativa de resistência mecânica, foi possível estabelecer a resistência ao fogo padrão dos provetes, de acordo com o Regulamento Técnico de Segurança contra Incêndio em Edifícios (quadro 4.3) [26].

Quadro 4.3 – Classificação da resistência ao fogo padrão dos provetes.

Designação dos provetes	Tempo de ensaio até à ocorrência de deformações significativas (min)	Resistência ao fogo padrão
PC	16,8	R 15
PC_A1	76,7	R 60
PC_A2	83,7	R 60
PC_A4	88,6	R 60

Refere-se que a temperatura do forno tendeu a acompanhar a evolução de temperatura segundo a curva de incêndio padrão ISO 834 apenas ao fim de 10 minutos.

Como esperado, o provete sem proteção passiva (PC) apresentou uma resistência reduzida a temperaturas elevadas, sendo a sua classe de resistência ao fogo de R 15.

Apesar dos restantes provetes apresentarem a classe de resistência padrão ao fogo de R 60, os provetes com proteção relativa às argamassas desenvolvidas (PC_A2 e PC_A4) apresentaram maior tempo de resistência ao fogo, quando comparados com o provete com a solução comercial de proteção passiva (PC_A1). O isolamento térmico proporcionado pelas argamassas desenvolvidas em laboratório (A2 e A4) é melhor que o da solução comercial de proteção passiva (A1) em 9,1 e 15,5 %, relativamente ao tempo de resistência ao fogo. Estes resultados mostram claramente que as argamassas desenvolvidas apresentam melhores resultados de isolamento térmico que a solução comercial (ver quadro 4.2).

Ainda que, nos provetes protegidos com as argamassas desenvolvidas (PC_A2 e PC_A4), não tenha sido atingida a classe de resistência imediatamente acima (R 90), os resultados experimentais demonstraram que se encontra muito próximo o alcance desta classificação.

Um afinamento nas dosagens das matérias-primas constituintes destas argamassas poderia surtir o efeito necessário que permitisse então, obter uma classificação de resistência ao fogo padrão superior à observada na campanha experimental. Além disso, num futuro próximo, serão realizados mais ensaios em provetes nas mesmas condições, que poderão fornecer resultados que ajudem a definir qual a classificação da resistência padrão final de cada tipo de proteção passiva, com base numa média de resultados.

4.6 Avaliação Analítica vs Avaliação Experimental

Após decorrida a campanha de ensaios, os resultados provenientes da via experimental da resistência ao fogo dos provetes e do comportamento de isolamento térmico das argamassas foram comparados com os valores de cálculo estimados pela EN 1993-1-2:2005 [28].

O propósito da confrontação entre estes dados foi de averiguar se a norma EN 1993-1-2:2005 [28] fornecia valores de cálculo de temperatura crítica conservadores e avaliar o diferencial entre os tempos experimentais e teóricos necessários para os provetes atingirem a temperatura crítica, tendo em conta a proteção conferida pelas argamassas de proteção passiva.

Segundo o EN 1993-1-2:2005 [28], para uma seção de classe 1, 2 ou 3, o valor de cálculo da resistência à encurvadura no instante t de um elemento comprimido com uma temperatura uniforme θ_a é dado pela equação (1):

$$N_{b,fi,t,Rd} = \frac{\chi_{fi} * A * k_{y,\theta} * f_y}{\gamma_{M,fi}} \quad (1)$$

onde:

- χ_{fi} – Coeficiente de redução para a encurvadura por flexão em situação de incêndio;
- A – Área elementar da seção transversal [m²];
- $k_{y,\theta}$ – Fator de redução para a tensão de cedência do aço à temperatura θ_a atingida no instante t ;
- f_y – Tensão de cedência a 20 °C [kPa];
- $\gamma_{M,fi}$ – Coeficiente parcial para a propriedade considerada do material, em situação de incêndio;
- θ_a – Temperatura do aço [°C].

O valor de χ_{fi} deverá ser considerado igual ao menor dos valores de $\chi_{y,fi}$ e de $\chi_{z,fi}$, determinado de acordo com a equação (2):

$$\chi_{fi} = \frac{1}{\varphi_{\theta} + \sqrt{\varphi_{\theta}^2 - \bar{\lambda}_{\theta}^2}} \quad (2)$$

onde:

$$\varphi_{\theta} = 1/2 * [1 + \alpha * \bar{\lambda}_{\theta} + \bar{\lambda}_{\theta}^2];$$

α	–	Fator de imperfeição: $\alpha = 0,65 * \sqrt{235/f_y}$;
$\bar{\lambda}_\theta$	–	Esbelteza normalizada para a temperatura θ_a : $\bar{\lambda}_\theta = \bar{\lambda} * \sqrt{k_{y,\theta}/k_{E,\theta}}$;
$k_{E,\theta}$	–	Fator de redução para a inclinação da reta que representa o domínio elástico à temperatura do aço θ_a atingida no instante t;
$\bar{\lambda}$	–	Esbelteza normalizada: $\bar{\lambda} = \sqrt{A * f_y/N_{cr}}$;
N_{cr}	–	Carga crítica de Euler: $N_{cr} = \frac{\pi^2 * E * I}{L_e^2}$ [kN];
E	–	Módulo de elasticidade do aço [kPa];
I	–	Momento de inércia da coluna [m ⁴];
L_e	–	Comprimento de encurvadura (coluna encastrada na base e apoiada no topo): $L_e = 0,7 * L$ [m];
L	–	Comprimento da coluna [m].

Os cálculos analíticos para a determinação da temperatura crítica e o respetivo valor de carga aplicada nos provetes que simula a solicitação em serviço, correspondente a 50 % do esforço axial resistente à encurvadura dos provetes a 20 °C, encontram-se no anexo B.

No quadro 4.4 são apresentados os valores experimentais e teórico da temperatura crítica/máxima para o valor do esforço axial resistente à encurvadura.

Quadro 4.4 – Valores experimentais e teórico da temperatura crítica/máxima dos provetes.

Designação dos provetes	$N_{b,fi,t,Rd}$ (kN)	EN 1993-1-2:2005	Experimental	
		T_{crit} (°C)	T_{crit} (°C)	$T_{máx}$ (°C)
PC	727,8	586,7	611,3	-
PC_A1			-	573,5
PC_A2			-	631,6
PC_A4			-	602,9

Segundo a EN 1993-1-2:2005, para uma distribuição de temperatura uniforme na seção transversal de elementos de aço não protegidos, o aumento de temperatura $\Delta\theta_{a,t}$ durante um intervalo de tempo Δt é determinado a partir da equação (3):

$$\Delta\theta_{a,t} = k_{sh} * \frac{A_m/V}{c_a * \rho_a} * \dot{h}_{net,d} * \Delta t \quad (3)$$

em que:

k_{sh} – Fator de correção para o efeito de sombra;

A_m/V – Fator de massividade para o elemento de aço não protegido [1/m]:

$$A_m/V = \frac{\text{perímetro exposto ao fogo}}{\text{área da seção transversal}};$$

c_a – Calor específico do aço [J/kgK]:

- Para $20\text{ °C} \leq \theta_a < 600\text{ °C}$:

$$c_a = 425 + 0,773 * \theta_a - 1,69 * 10^{-3} * \theta_a^2 + 2,22 * 10^{-6} * \theta_a^3;$$

- Para $600\text{ °C} \leq \theta_a < 735\text{ °C}$:

$$c_a = 666 + \frac{13002}{738 - \theta_a};$$

- Para $735\text{ °C} \leq \theta_a < 900\text{ °C}$:

$$c_a = 545 + \frac{17820}{\theta_a - 731};$$

- Para $900\text{ °C} \leq \theta_a \leq 1200\text{ °C}$:

$$c_a = 650.$$

ρ_a – Massa específica do aço [kg/m³];

\dot{h}_{net} – Valor de cálculo do fluxo de calor efetivo por unidade de área [W/m²]:

$$\dot{h}_{net} = \dot{h}_{net,c} + \dot{h}_{net,r} = [\alpha_c * (\theta_g - \theta_m)] + [\phi * \varepsilon_m * \varepsilon_f * \sigma[(\theta_r + 273)^4 - (\theta_m + 273)^4]]$$

onde:

α_c – Coeficiente de transferência de calor por convecção [W/m²K]

θ_g – Temperatura dos gases na proximidade do elemento exposto ao fogo [°C]:

$$\theta_g = 20 + 345 * \log_{10}(8 * t + 1) \quad \text{Curva de incêndio padrão ISO 834;}$$

t – Tempo [min].

θ_m	–	Temperatura da superfície do elemento [°C]: $\theta_m = \theta_a$;
ϕ	–	Fator de vista;
ε_m	–	Emissividade da superfície do elemento;
ε_f	–	Emissividade do fogo;
σ	–	Constante de Stephan Boltzman [W/m ² K ⁴];
θ_r	–	Temperatura de radiação efetiva do ambiente de incêndio [°C]: $\theta_r = \theta_g$;
Δt	–	Intervalo de tempo [s].

Refere-se que a evolução de temperatura analítica foi obtida com base na evolução de temperatura da curva de incêndio padrão ISO 834.

O gráfico da figura 4.16 apresenta a comparação entre a curva experimental e teórica da evolução de temperatura no provete PC (sem proteção) em função do tempo.

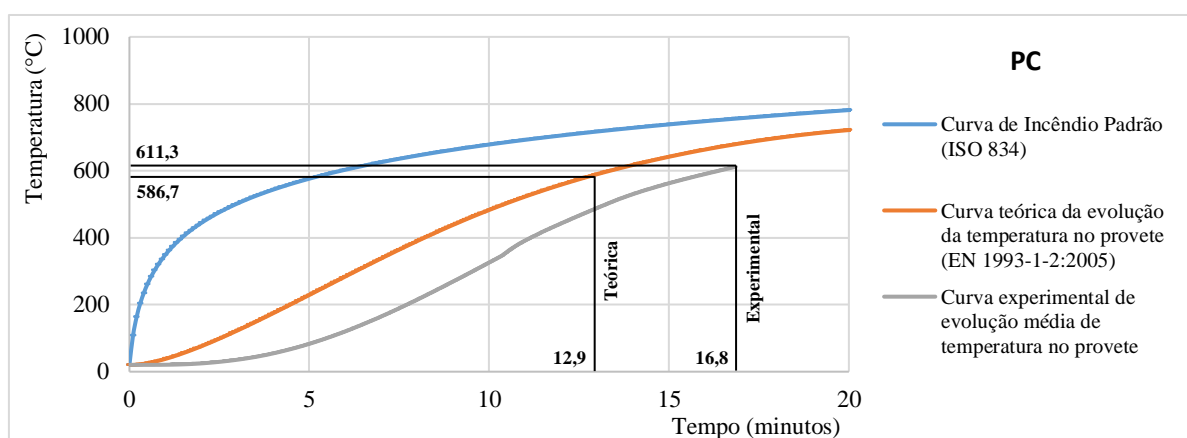


Figura 4.16 – Comparação da evolução de temperatura no provete PC em função do tempo.

Como a curva teórica da evolução de temperatura no aço do provete PC desenvolve-se sobre a curva experimental, pode-se afirmar que a equação fornecida pela norma EN 1993-1-2:2005 para o cálculo do aumento de temperatura em elementos de aço não protegidos facultava valores que se encontram do lado da segurança.

Com base na estimativa da temperatura crítica de 586,7 °C proveniente dos cálculos analíticos e na curva teórica temperatura-tempo, o instante no tempo para o qual o provete PC começaria a instabilizar seria de 12,9 minutos. Associado ao valor de temperatura crítica de 611,3 °C

proveniente da campanha experimental, o tempo de ensaio decorrente até à ocorrência de deformações significativas foi de 16,8 minutos.

O diferencial entre o tempo experimental e o tempo teórico a partir do qual se verificou perda significativa de resistência mecânica da coluna foi de 3,9 minutos, o que corresponde a uma margem de segurança de 30,2 % relativa à duração de resistência ao fogo.

Segundo a EN 1993-1-2:2005, para uma distribuição de temperatura uniforme na seção transversal de elementos de aço isolado por meio de material de proteção contra incêndio, o aumento de temperatura $\Delta\theta_{a,t}$ durante um intervalo de tempo Δt é determinado a partir da equação (4):

$$\Delta\theta_{a,t} = \frac{\lambda_p * A_p/V}{d_p * c_a * \rho_a} * \frac{(\theta_{g,t} - \theta_{a,t})}{(1 + \phi/3)} * \Delta t - (e^{\phi/10} - 1) * \Delta\theta_{g,t} \quad (4)$$

$$(\text{mas } \Delta\theta_{a,t} \geq 0 \text{ se } \Delta\theta_{g,t} > 0) \quad \text{com: } \phi = \frac{c_p * \rho_p}{c_a * \rho_a} * d_p * A_p/V$$

em que:

λ_p – Condutibilidade térmica do sistema de proteção contra incêndio [W/mK];
 A_p/V – Fator de massividade para os elementos de aço isolados por meio de material de proteção contra incêndio:

$$A_p/V = \frac{\text{perímetro exposto ao fogo}}{\text{área da seção transversal}};$$

d_p – Espessura do material de proteção contra incêndio [m];

$\theta_{g,t}$ – Temperatura dos gases no instante t [°C]: $\theta_{g,t} = \theta_g$;

$\theta_{a,t}$ – Temperatura do aço no instante t [°C]: $\theta_{a,t} = \theta_a$;

c_p – Calor específico do material de proteção contra incêndio
(independente da temperatura) [J/kgK];

ρ_p – Massa específica do material de proteção contra incêndio [kg/m³];

$\Delta\theta_{g,t}$ – Aumento da temperatura ambiente dos gases durante o intervalo de tempo Δt [°C].

O gráfico da figura 4.17 apresenta a comparação da evolução de temperatura em função do tempo no provete PC_A1 (solução comercial de proteção passiva).

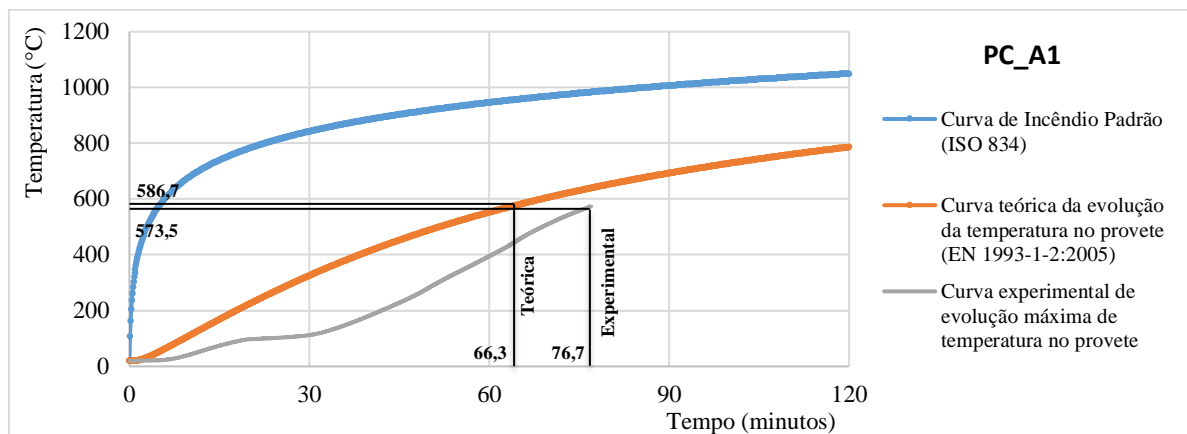


Figura 4.17 – Comparação da evolução de temperatura no provete PC_A1 em função do tempo.

Como a curva teórica de temperatura no aço do provete PC_A1 desenvolve-se sobre a curva experimental, a abordagem analítica forneceu valores de cálculo conservadores. A estimativa teórica do instante no tempo para o qual o provete PC_A1 apresentaria deformações significativas seria ao fim de 66,3 minutos (586,7 °C). No entanto, os ensaios experimentais mostraram que o provete começou a instabilizar apenas ao fim de 76,7 minutos, para uma temperatura máxima de 573,5 °C. O diferencial entre os intervalos de tempo foi de 10,4 minutos, pelo que existiu uma margem de segurança de 15,7 % relativa à duração de resistência ao fogo.

O gráfico da figura 4.18 apresenta a comparação da evolução de temperatura em função do tempo no provete PC_A2 (cimento, vermiculite e fibras de polipropileno).

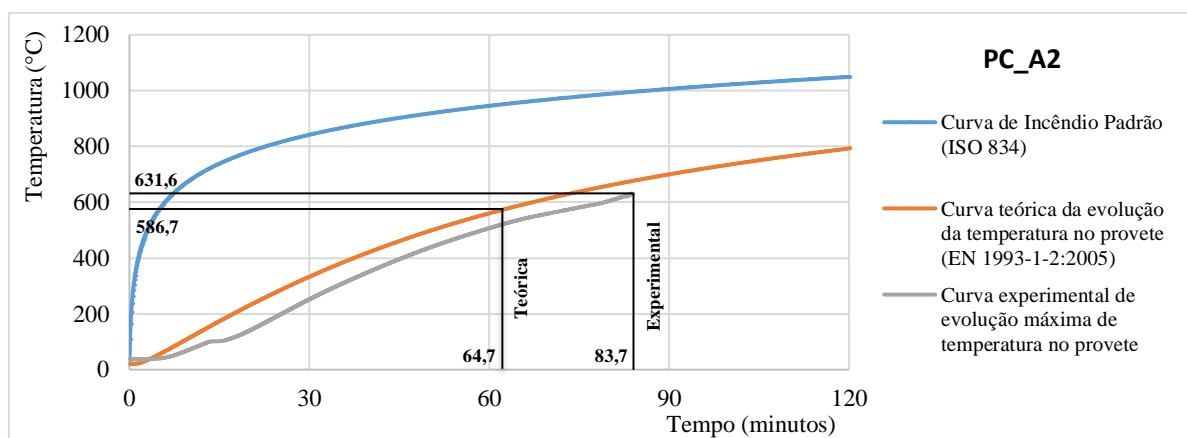


Figura 4.18 – Comparação da evolução de temperatura no provete PC_A2 em função do tempo.

Relativamente ao provete PC_A2 e em função da estimativa da temperatura crítica de 586,7 °C, o instante de tempo proveniente da curva de evolução teórica de temperatura para o qual o provete apresentaria fenómenos de instabilidade seria de 64,7 minutos. No entanto, a duração de tempo observada até à ocorrência de deformações consideráveis em laboratório foi de 83,7 minutos, para uma temperatura máxima de 631,6 °C. Devido à variação temporal entre estes valores ser 19,0 minutos, a margem de segurança relativa à duração de resistência ao fogo verificada foi de 29,4 %, pelo que, também foi verificada a disponibilização de valores de cálculo que se encontram do lado da segurança.

O gráfico da figura 4.19 apresenta a comparação da evolução de temperatura em função do tempo no provete PC_A4 (gesso e vermiculite).

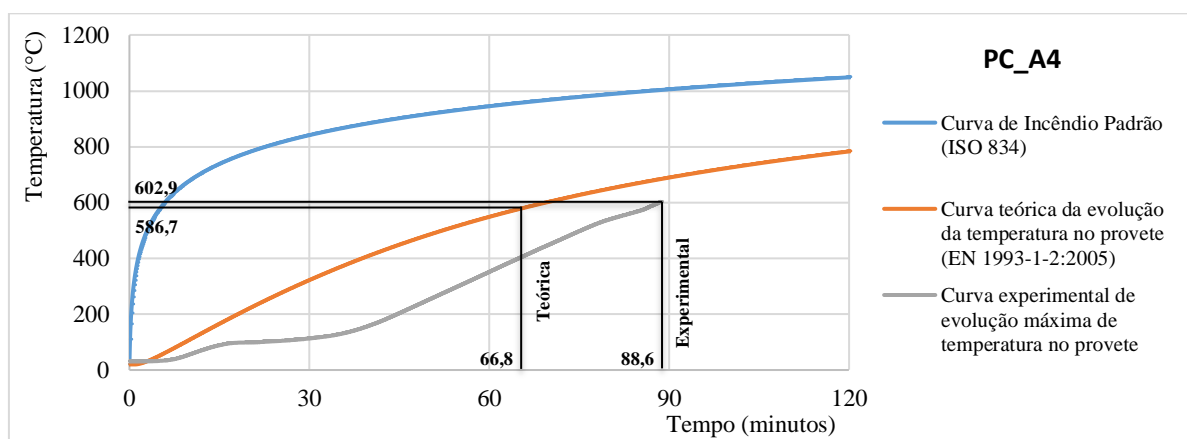


Figura 4.19 – Comparação da evolução de temperatura no provete PC_A4 em função do tempo.

Com base nos cálculos analíticos, o provete PC_A4 começaria a instabilizar ao fim de 66,8 minutos (586,7 °C). Contudo, os ensaios demonstraram que esse processo se deu apenas ao fim de 88,6 minutos, para uma temperatura máxima de 602,9 °C. Assim, a avaliação analítica facultou valores de cálculo conservadores, uma vez que a margem de segurança de resistência ao fogo proporcionada pelo desfasamento entre estes instantes de tempo (21,8 min) foi de 32,6 %.

Em suma, a comparação entre a avaliação analítica com a avaliação experimental permitiu constatar que a Norma Europeia EN 1993-1-2:2005 providencia estimativas conservadoras para os valores de cálculo do aumento de temperatura em elementos de aço não protegidos ($\Delta\theta_{a,t}$) e do aumento de temperatura em elementos de aço isolado por meio de material de proteção contra incêndio ($\Delta\theta_{a,t}$).

5 ANÁLISE DE CUSTOS

Concluída a avaliação do comportamento térmico das argamassas de proteção passiva e do comportamento mecânico das colunas de aço com as respetivas argamassas, foi realizada uma análise de custos de forma a averiguar a viabilidade de utilização das argamassas aqui desenvolvidas, em obra. Além disso, pretendeu-se comparar o custo de aplicação por m² de proteção passiva por pintura intumescente ($\approx 20 \text{ €/m}^2$), uma vez que é uma solução de protecção passiva ao fogo bastante utilizada em estruturas metálicas.

No quadro 5.1 são apresentados os custos inerentes a todos os materiais utilizados na elaboração das argamassas, bem como o custo da argamassa comercial ensaiada e no quadro 5.2 são apresentados os valores de custo das argamassas por unidade de volume e de área (revestimento de 2 cm), bem como, a diferença de custos face à argamassa comercial A1.

Quadro 5.1 – Custo da argamassa comercial e dos constituintes utilizados para a formulação das argamassas ensaiadas.

Material	Custo
Argamassa Comercial (SPPC)	9,40 € / 20 kg
Cimento Portland CEM II/B-L 32,5 – Cimpor (C)	3,55 € / 25 kg
Cimento Refratário – Electroland (CR)	20,76 € / 25 kg
Geso de projetar de alto rendimento – Pt Fixplus (G)	4,40 € / 20kg
Vermiculite expandida – Projar (V)	21,95 € / 10 kg
Perlite expandida – Projar (P)	18,95 € / 11,5 kg
Fibras de polipropileno – Duro-Fabril (PP)	7,93 € / kg
Água (A)	0,00162 € / kg

Quadro 5.2 – Custo de formulação das argamassas e diferenças de custo face à argamassa comercial A1.

Designação da argamassa	€/ m ³	Δ€/ m ³	€/ m ²	Δ€/ m ²
A1	471,13	-	9,42	-
A2	823,09	351,96	16,46	7,04
A3	630,89	159,75	12,62	3,20
A4	281,61	-189,52	5,63	-3,79
A5	1475,85	1004,71	29,52	20,09

Como a SCPP (A1) é produzida em grande escala (quantidades industriais), os seus componentes são adquiridos com custos otimizados, traduzindo-se num preço de venda acessível.

Para a fabricação das argamassas (A2, A3, A4 e A5), os materiais foram comprados em pequenas quantidades e adquiridos ao custo de mercado (consumidor final), pelo que, como se verifica no quadro 5.2, apenas o custo de formulação da argamassa A4 acaba por ser inferior ao custo da argamassa A1.

Além disso, verifica-se também que as soluções de proteção passiva das composições A2, A3 e A4 possuem valores de custo inferiores à da tinta intumescente, sendo que a solução de proteção passiva A5 apresenta um custo muito semelhante ao da tinta intumescente.

6 CONCLUSÕES

6.1 Considerações Finais

O objetivo principal da presente dissertação foi desenvolver e avaliar o comportamento térmico de cinco diferentes tipos de argamassas de proteção passiva contra incêndio de base cimentícia ou de gesso (com agregados de vermiculite e/ou perlite e fibras de polipropileno), e estudar o comportamento mecânico de colunas de aço a elevadas temperaturas com e sem a proteção térmica proporcionada pelas argamassas desenvolvidas.

Com base nos resultados obtidos nos ensaios experimentais sobre o desempenho térmico das argamassas, concluiu-se o seguinte:

- As composições com ligante de gesso apresentaram melhores resultados de isolamento térmico do que a composição que usa o cimento Portland como ligante e esta última apresenta melhores resultados do que a composição que utiliza o ligante de cimento refratário;
- Relativamente aos dois graus de finura utilizados (LA e MI), os resultados mostram que composições fabricadas com a matéria-prima (vermiculite e perlite) obtida através do ensaio de Los Angeles proporcionam resultados térmicos mais satisfatórios face às composições fabricadas com matéria-prima obtida pela moagem industrial;
- Com base nos resultados obtidos nos ensaios das colunas metálicas a elevadas temperaturas, conclui-se que o isolamento térmico proporcionado pelas argamassas desenvolvidas em laboratório (A2 e A4) é melhor que o da solução comercial de proteção passiva (A1) em 9,1 e 15,5 %, relativamente ao tempo de resistência ao fogo;
- A composição A4 é a solução de proteção passiva ao fogo mais eficaz e a mais barata quando comparada com todas as outras soluções de proteção passiva estudadas neste trabalho experimental, sendo a composição A5 a menos eficaz e, simultaneamente, a mais onerosa;
- As argamassas desenvolvidas e aplicadas nas colunas de aço como proteção passiva ao fogo revelaram-se uma solução eficaz na proteção das mesmas uma vez que a classe de resistência ao fogo padrão de uma coluna sem proteção térmica passou de R 15 para R 60, sendo que a solução A4 ainda poderá vir a permitir que a classe de resistência ao fogo padrão passe para R 90;

- Com base nos custos estimados e apresentados, a decisão de se optar por uma solução de proteção passiva ao fogo em colunas de aço por meio de tinta intumescente revela-se mais onerosa do que optar-se por uma solução que preveja a aplicação de argamassas de proteção passiva ao fogo;
- Em relação aos modos de instabilidade das colunas de aço, observaram-se isoladamente fenómenos de instabilidade global e local, bem como o efeito da interação entre estes modos no comportamento de pós-encurvadura dos provetes de aço;
- Por último, constata-se que as estimativas dos valores de cálculo fornecidas pela norma EN 1993-1-2:2005 conduziram a evoluções conservadoras de temperatura em elementos de aço não protegidos e em elementos de aço protegidos por material de proteção.

Em suma, a elaboração desta dissertação mostrou que as argamassas de proteção passiva concebidas, à base de gesso e cimento com a incorporação de vermiculite e/ou perlite e fibras de polipropileno, protegeram eficientemente os elementos metálicos estruturais quando submetidas a altas temperaturas e apresentaram um custo de formulação reduzido.

6.2 Propostas para Trabalhos Futuros

No seguimento do tema estudado na presente dissertação, são enumerados em seguida possíveis tópicos a abordar, de forma a dar sequência ao trabalho elaborado, com o intuito de complementar e aprofundar o conhecimento sobre as argamassas de proteção desenvolvidas.

Como referido anteriormente, entre as argamassas térmicas analisadas, as argamassas à base de gesso apresentaram o desempenho térmico mais promissor. No entanto, mantêm-se ainda algumas questões que propõem-se ser resolvidas, como a ocorrência de retração na composição composta por gesso e vermiculite, ou a trabalhabilidade reduzida na composição constituída por gesso e perlite. Com isto, sugere-se nova análise ao comportamento exibido por estas argamassas com a incorporação de adjuvantes redutores de retração (gesso e vermiculite) e superplastificantes (gesso e perlite).

Como averiguado na análise experimental das argamassas térmicas, o desempenho das argamassas com vermiculite e perlite proveniente do ensaio de Los Angeles foi superior às argamassas com estas matérias-primas provenientes da moagem industrial. Seria proveitoso repetir os ensaios de comportamento mecânico das colunas com matéria-prima (vermiculite e perlite) proveniente do ensaio de Los Angeles e verificar se as argamassas de proteção conferiam classes de resistência ao fogo padrão superiores ao elemento estrutural, face às verificadas na campanha experimental.

Durante o decorrer de um incêndio, a integridade das argamassas térmicas pode ficar comprometida devido à possível ocorrência de desagregação da sua camada superficial. Devido a isto, a espessura protetora da argamassa torna-se insuficiente para fazer cumprir o tempo de resistência ao fogo para o respetivo elemento estrutural. Posto isto, seria relevante realizar ensaios para melhorar a coesão e integridade destas argamassas quando sujeitas a elevadas temperaturas, como por exemplo a adição de fibras de vidro ou a colocação de uma rede metálica embebida na argamassa.

As estruturas metálicas protegidas à ação do fogo por argamassas de proteção passiva, quando são sujeitas a ações acidentais, tais como, o impacto de veículos, explosões de gás, ataques terroristas, etc., pode ocorrer a danificação da proteção conferida pelas argamassas térmicas. Este tipo de eventos pode provocar desde o destacamento parcial da argamassa de proteção ou, em caso extremo, comprometer por completo a resistência da estrutura à ação do fogo, devido à danificação do sistema de proteção passiva. Portanto, seria importante estudar o comportamento de aderência das argamassas térmicas ao suporte (elemento metálico) quando a estrutura é sujeita a este tipo de ações.

Por fim, referem-se outros estudos pertinentes que se encontram em análise no contexto do projeto:

- A avaliação das características mecânicas de desempenho das argamassas em serviço (capacidade de deformação) pela determinação do módulo de elasticidade dinâmico e resistência à aderência entre o material de proteção e o material estrutural;
- A avaliação do comportamento termomecânico das argamassas térmicas desenvolvidas, com a incorporação de partículas de nano e micro sílica. Devido à alta reatividade pozolânica e ao efeito de preenchimento dos poros, as partículas de nano e micro sílica têm potencial para melhorar a durabilidade e propriedades mecânicas, bem como aumentar a resistência térmica das argamassas;
- Por último, deveriam ser feitos estudos para caracterização das propriedades térmicas das argamassas, nomeadamente, determinação da condutibilidade térmica e calor específico.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Simões, Rui A. D., (2014). “Manual de Dimensionamento de Estruturas Metálicas” CMM, Coimbra.
- [2] Santos, F., Simões da Silva, L. (2014). “Manual de Execução de Estruturas Metálicas em África”. CMM, Coimbra.
- [3] Gervásio, H. e Simões da Silva, L. (2005). "A sustentabilidade do aço", Construção Metálica e Mista V, CMM, Lisboa, pp. 719-730.
- [4] European Commission (1997). “Communication from the European Commission: The competitiveness of the Construction Industry”. COM (97) 539 final, Brussels.
- [5] Gervásio, H., Simões da Silva, L. e Bragança, L. (2005). “Sustainability assessment of new construction technologies: a comparative case study”. COST C12 Final Conference Proceedings, Balkema, Leiden, pp. 527-536.
- [6] Gervásio, H., Simões da Silva, L. (2008). “Comparative life-cycle analysis of steel-concrete composite bridges”, Structure and Infrastructure Engineering, Vol 4, Issue 4, pp. 251-269.
- [7] Devine, J, W. (2018). “Improving Ductility Fire Resistant Materials”. Major Qualifying Project, Worcester Polytechnic Institute, Massachusetts.
- [8] Ravindra, G, Puri., A. S. Khanna. (2017). “Intumescent Coatings: A review on recent progress”, Journal of Coatings Technology and Research, Vol. 14, Issue 1, pp. 1-20.
- [9] Mofizul Islam, Md., Rubieyat, Bin Ali. (2018). “Fire Protection of Steel Structure: An Overall Review”. World Scientific News, Vol. 102, pp. 131-145.
- [10] Outinen, J., & Mäkeläinen, P. (2004). “Mechanical properties of structural steel at elevated temperatures and after cooling down”. Fire and Materials, Vol. 28, pp. 237-251.
- [11] Wald, F., da Silva, L.S., Moore, D.B., Lennon, T., Chladna, M., Santiago, A., Beneš, M. and Borges, L., (2006). “Experimental behaviour of a steel structure under natural fire.” Fire Safety Journal, Vol. 41, Issue 7, pp. 509-522.
- [12] Wald, F., Chlouba, J., Uhlíř, A., Kallerova, P. and Štujberová, M., (2009). “Temperatures during fire tests on structure and its prediction according to Eurocodes”. Fire safety journal, Vol. 44, Issue 1, pp. 135-146.
- [13] Lamont, S., Usmani, A.S. and Gillie, M., (2004). “Behaviour of a small composite steel frame structure in a “long-cool” and a “short-hot” fire”. Fire safety journal, Vol. 39, Issue 5, pp. 327-357.

-
- [14] Rodrigues, C.P. J. (2004). “Studies on the Behaviour of Restrained Steel Columns Exposed to Fire”. The Seventh International Conference on Computational Structures Technology, paper 148, Lisboa.
- [15] Franssen, J.M., Cooke, G.M.E. and Latham, D.J., (1993). “Numerical simulation of a Full Scale Fire Test on a Loaded Steel Framework”. *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 35, Issue 3, pp. 377-408.
- [16] Wang, Y.C., Dai, X.H. and Bailey, C.G., (2011). “An experimental study of relative structural fire behaviour and robustness of different types of steel joint in restrained steel frames”. *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 6, Issue 7, pp. 1149-1163.
- [17] Usmani, A.S., Rotter, J.M., Lamont, S., Sanad, A.M. and Gillie, M., (2001). “Fundamental principles of structural behaviour under thermal effects”. *Fire Safety Journal*, Vol. 36, Issue 8, pp. 721-744.
- [18] Wang, Y.C., Lennon, T. and Moore, D.B., (1995). “The behaviour of steel frames subject to fire”. *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 35, Issue 3, pp. 291-322.
- [19] Mróz, K., Hager, I., Korniejenko, K. (2016). “Material Solutions for Passive Fire Protection of Building and Structures and Their Performances Testing”. *Procedia Engineering*, Vol. 151, pp 284-291.
- [20] Mariappan, T. (2015). “Recent developments of intumescent fire protection coatings for structural steel: A review”. *Journal of Fire Sciences*, Vol. 34, Issue 2, pp. 120-163.
- [21] Mather P. (2006). “Saving lives with coatings”. *European Coating Journal*, Vol. 48, Issue 6, pp. 50–52.
- [22] Caetano, H., Vaz-Ramos, J., Santiago, A., Durães, L., Portugal, A. (2019). “Desenvolvimento de argamassas cimentícias com nanosílica como protecção passiva para elementos metálicos”. XII Congresso de Construção Metálica e Mista.
- [23] Anabela, M. (2011). “Protecção de Estruturas Metálicas”. Apontamentos da disciplina de Física das Construções da Licenciatura em Engenharia Civil, Instituto Politécnico de Tomar.
- [24] Song, Q-Y., Han, L-H., Zhou, K. (2018). “Fire resistance of circular concrete-filled steel tubular (CFST) column protected by intumescent coating”. *Journal of Construction Steel Research*, Vol. 147, pp. 154-170.
- [25] Regime Jurídico de Segurança contra Incêndio em Edifícios, Decreto-Lei n.º 224/2015, de 9 de outubro.
- [26] Regulamento Técnico de Segurança contra Incêndio em Edifícios, Portaria n.º 135/2020, de 2 de junho.
- [27] Tata Steel & BCSA, (2013). “Steel Construction: Fire Protection”, Tata Steel & British Constructional Steel Association (BCSA), United Kingdom.
-

-
- [28] EN 1993-1-2, (2005). Eurocódigo 3 – Projecto de estruturas de aço – Parte 1-2: Regras gerais, Verificação da resistência ao fogo, Comité Europeu de Normalização, Bruxelas.
- [29] Regulamentos de Segurança Contra Incêndio em Edifícios de Habitação, Dec.-Lei n.º 64/90, de 21 de fevereiro.
- [30] Gavina, R. (2014). “Desenvolvimento de ferramentas BIM no âmbito do cálculo estrutural em situação de incêndio”. Dissertação de Mestrado, Instituto Superior de Engenharia do Porto.
- [31] Pinto, T. (2008). “Estudo de tintas intumescentes na protecção de elementos estruturais em condições de incêndio”. Dissertação de Mestrado, Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Bragança.
- [32] Botma, A. (2013). “Research to the performance and adequacy of fire compartmentation”. Thesis Report, Delft University of Technology, Delft.
- [33] Tyldesley, A., Rew, P. J., Houlding, C. (2004). “Benefits of fire compartmentation in chemical warehouses”, *Process Safety and Environmental Protection*, Vol. 82, pp. 331-340.
- [34] Ullah, S., Ahmad, F., Shariff, A. M., Bustam, M. A., (2014). “Synergistic effects of kaolin clay on intumescent fire retardant coating composition for fire protection of structural steel substrate”, *Polymer Degradation and Stability*, Vol. 110, pp. 91-103.
- [35] Billota, A., Silva, D., Nigro, E. (2016). “Test on intumescent paints for fire protection of existing steel”, *Construction and Building Material*, vol. 121, pp. 410-422.
- [36] Inerhunwa, I., Wang, Y., Su, M. (2019). “Reliability analysis of intumescent coating protected steel members under the standard fire condition”, *Fire Safety Journal*, Vol. 104, pp. 43-56.
- [37] Abidi, S., Nait-Ali, B., Joliff, Y., Favotto, C. (2015). “Impact of perlite, vermiculite and cement on the thermal conductivity of a plaster composite material: Experimental and numerical approaches”, *Composites: Part B*, Vol. 68, pp. 392-400.
- [38] Mo, H. K., Lee, J. H., Liu, M., Thung-Chai, L. (2018). “Incorporation of expanded vermiculite lightweight aggregate in cement mortar”, *Construction and Building Material*, Vol. 179, pp. 302-306.
- [39] Gencel, O., del Coz Diaz, JJ., Sutcu, M., Koksall, F., Rabanal, F., Martinez-Barrera, G., Brotsow, W. (2014) “Properties of gypsum composites containing vermiculite and polypropylene fibers: numerical and experimental results”. *Energy and Buildings*, Vol. 70, pp. 135–144.
- [40] Branco, F. (2012). “Ligantes – Materiais de Construção”. Apontamentos da disciplina de Materiais de Construção do Mestrado Integrado em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Coimbra.
-

-
- [41] Encyclopedia of Materials: Science and Technology (Second Edition), (2001), Pages 7768-7773.
- [42] Abbas, Z., Madji, H. (2017). "Study of heat of hydration of Portland cement used in Iraq", Case Studies in Construction Material, Vol 7, pp. 154-162.
- [43] Martins, A. (2008). "Estudo da influência da dosagem de cimento no desempenho de argamassas de reboco". Tese de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa.
- [44] Garbers-Craig, A. M., (2008) "Presidential address: How cool are refractory materials?" The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy. Vol 108, pp. 1–16.
- [45] Reka, A., Pavloski, B., Lisichkov, K., Jashari, A., Boev, B., Boev, I., Lazarova, M., Eskizeybek, V., Oral, A., Jovanovski, G., Makreski, P. (2019) "Chemical, mineralogical and structural features of native and expanded perlite from Macedonia", Journal of the Croatian Geological Survey and the Croatian Geological Society, Vol 72, pp 215-221.
- [46] Daniel Maxin, L., Niebo, R., McConnell, E. (2014). "Perlite toxicology and epidemiology – a review" Inhalation Toxicology, Vol 26, Issue 5, pp 259-270.
- [47] Atea, R. (2019) "A case study on concrete column strength improvement with different steel fibers and polypropylene fibers", Journal of Materials Research and Technology, Vol 8, Issue 6, pp. 6106-6114.
- [48] Sengul, O., Azizi, S., Karaosmanoglu, F., Tasdemir, M. (2011) "Effect of expanded perlite on the mechanical properties and thermal conductivity of lightweight concrete", Energy and Building, Vol. 43, pp 671-676.
- [49] NP 4513, (2012). Segurança contra incêndios, Requisitos do serviço de comercialização, instalação e manutenção de produtos, equipamentos e sistemas de segurança contra incêndio.
- [50] NP EN 197-1, (2012). Cimento. Parte 1: Composição, especificações e critérios de conformidade para cimentos correntes.
- [51] Autoridade Nacional de Emergência e Proteção Civil - "Nota Técnica n.º 09 - Sistemas de proteção passiva – Selagem de vãos, aberturas para passagem de cablagens e condutas", retirada a 11 de abril de 2020 de <http://www.prociv.pt/pt-pt/Paginas/default.aspx>.
- [52] Associação Portuguesa de Segurança – "Segurança Contra Incêndios – Protecção de Estruturas Metálicas", retirada a 7 de maio de 2020 de <https://www.apsei.org.pt/>.
- [53] Serc Evolução, Tratamentos Acústicos - "Placas de Silicatos de Cálcio Resistentes ao Fogo – Protecção de estruturas metálicas Promatect H ou 200", retirada a 30 de abril de 2020 de <http://www.sercevolucao.com>.
-

-
- [54] Structural Technologies – “Fireproofing application”, retirada a 30 de abril de 2020 de <https://structuraltechnologies.com/>.
- [55] The Home Depot – “Fireplace & Stove Parts”, retirada a 30 de abril de 2020 de <https://www.homedepot.com/>.
- [56] Promat – “Deciding what type of fire protection to use with steel structures”, retirada a 30 de abril de 2020 de <https://www.promat-see.com/>.
- [57] Somapil – “Porta corta-fogo”, retirada a 30 de abril de 2020 de <https://www.somapil.com/>.
- [58] H.G.F – “Paredes de compartimentação”, retirada a 30 de abril de 2020 de <http://www.hgf.com.br/>.
- [59] Termocom Engenharia – “Pintura Intumescente”, retirada a 30 de abril de 2020 de <https://www.termocom.com.br/>.
- [60] Felipe Schmitzhaus – “Mantas Cerâmicas”, retirada a 30 de abril de 2020 de <http://felipeschmitzhaus.blogspot.com/>.
- [61] Portal Incêndio – “Revestimento Intumescente”, retirada a 30 de abril de 2020 de <https://portalincendio.com.br/>.
- [62] Fussey Engineering – “What Is Intumescent Paint And When Should You Apply It To Your Steel?”, retirada a 30 de Abril de 2020 de <https://www.fusseyengineering.com/>.
- [63] Tratamento Acústico – “Projeto Jateamento Acústico Anti-Chamas”, retirada a 30 de abril de 2020 de <https://www.tratamentoacustico.com.br/>.
- [64] Tria, Passive Fire Protection Systems – “EDP new head office with passive fire protection system installed by TRIA”, retirada a 30 de Abril de 2020 de <https://www.tria.pt/>.
- [65] Cimento Mauá - “Cimento Portland: o que é e como aplicá-lo em sua obra”, retirada a 30 de abril de 2020 de <https://cimentomaua.com.br/>.
- [66] Zhengzhou Dongxin Refractories – “Refractory Cement”, retirada a 30 de abril de 2020 de <http://www.zzdxnc.com/>.
- [67] Saint-Gobain Formula – “Gypsum and plaster”, retirada a 30 de abril de 2020 de <https://www.saintgobainformula.com/>.
- [68] Alibaba Supplier – “Vermiculite for Friction Dust Expanded Vermiculite Granules”, retirada a 30 de Abril de 2020 de <https://www.alibaba.com/>.
- [69] Cal Blend Soils – “The Lite at the End of the Tunnel: Exploring the Uses and Benefits of Using Perlite in Your Garden”, retirada a 30 de Abril de 2020 de <https://www.calblendsoils.com/>.
- [70] Azichem – “Fibra multifilamento de 6 mm para rebocos a base de cal, cimento ou mistos”, retirada a 30 de abril de 2020 de <https://www.azichem.pt/>.
- [71] ISO 834-1, (1999). Ensaios de resistência ao fogo - Elementos de construção de edifícios - Parte 1: Requisitos gerais.
-

ANEXOS

ANEXO A

Figura A.1 – Provete P_A1_1: a) Provete antes do ensaio; b) Provete após o ensaio; c) Fissuração do provete após o ensaio.

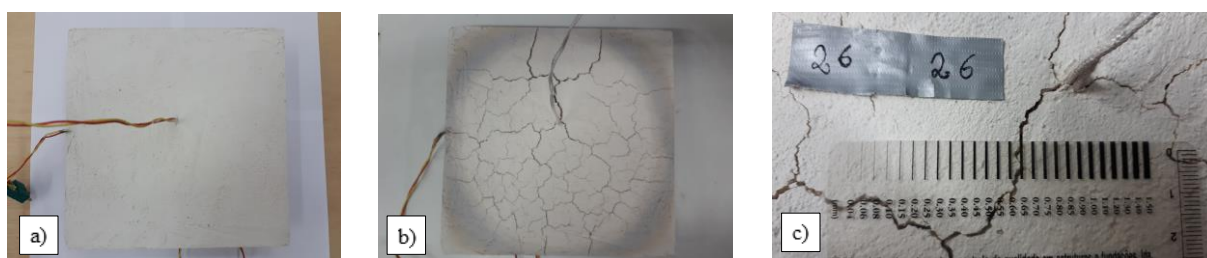


Figura A.2 – Provete P_A1_2: a) Provete antes do ensaio; b) Provete após o ensaio; c) Fissuração do provete após o ensaio.

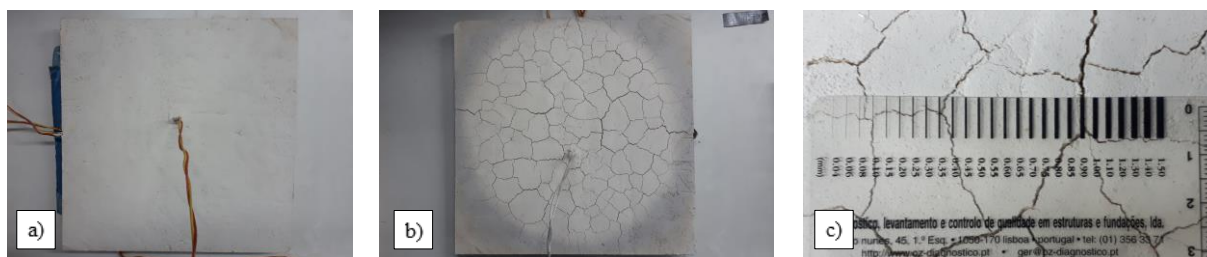


Figura A.3 – Provete P_A1_3: a) Provete antes do ensaio; b) Provete após o ensaio; c) Fissuração do provete após o ensaio.

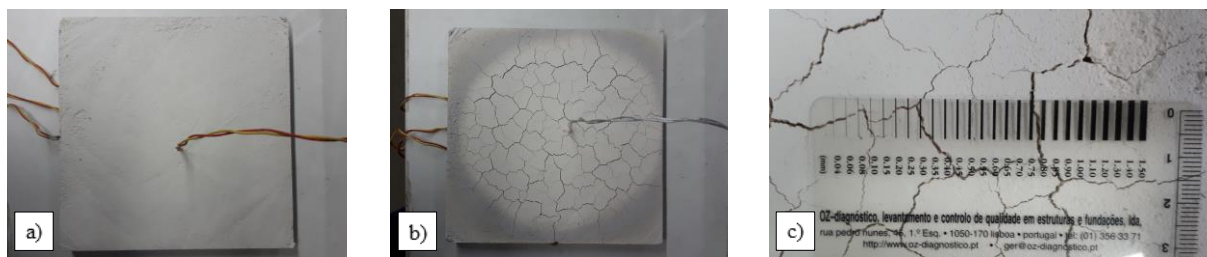


Figura A.4 – Provete P_A2_1_LA: a) Provete antes do ensaio; b) Provete após o ensaio; c) Fissuração do provete após o ensaio.



Figura A.5 – Provete P_A2_2_LA: a) Provete antes do ensaio; b) Provete após o ensaio; c) Fissuração do provete após o ensaio.



Figura A.6 – Provete P_A2_3_LA: a) Provete antes do ensaio; b) Provete após o ensaio; c) Fissuração do provete após o ensaio.



Figura A.7 – Provete P_A2_1_MI: a) Provete antes do ensaio; b) Provete após o ensaio; c) Fissuração do provete após o ensaio.

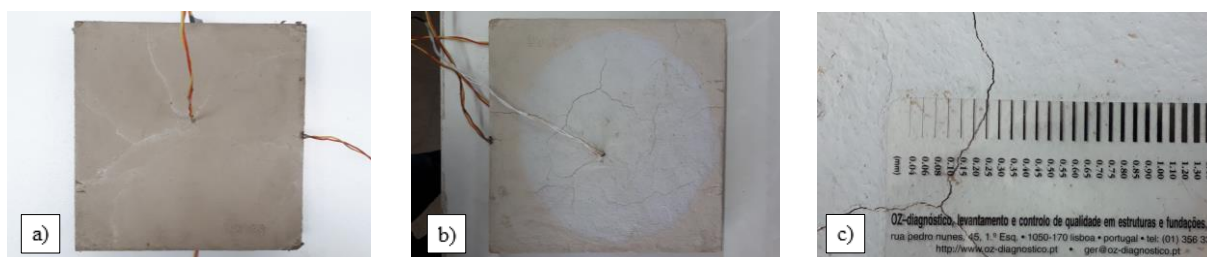


Figura A.8 – Provete P_A2_2_MI: a) Provete antes do ensaio; b) Provete após o ensaio; c) Fissuração do provete após o ensaio.



Figura A.9 – Provete P_A2_3_MI: a) Provete antes do ensaio; b) Provete após o ensaio; c) Fissuração do provete após o ensaio.

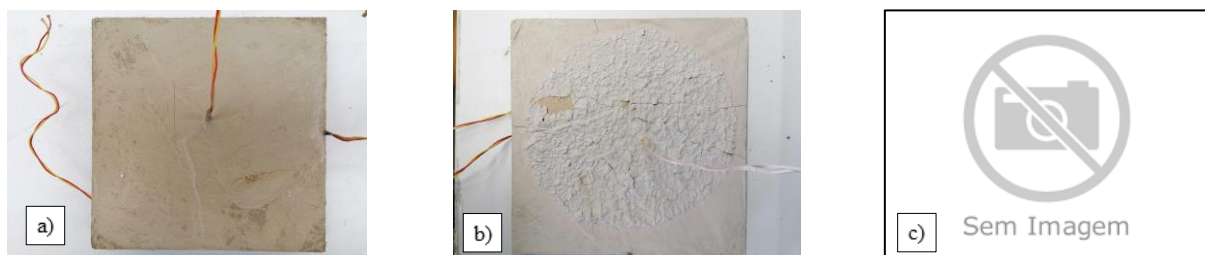


Figura A.10 – Provete P_A3_1_LA: a) Provete antes do ensaio; b) Provete após o ensaio; c) Fissuração do provete após o ensaio.

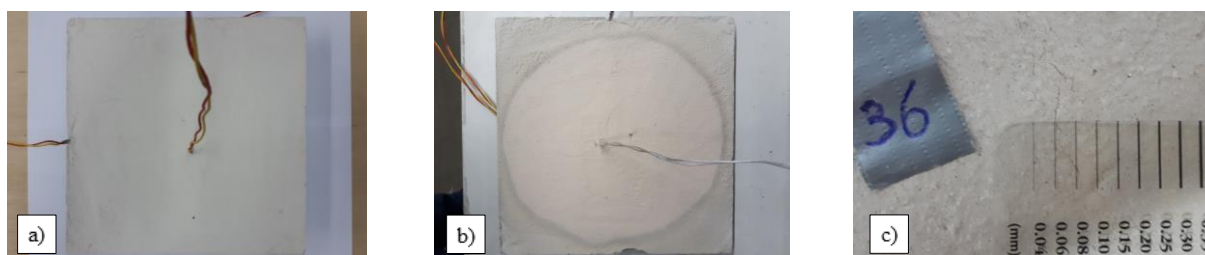


Figura A.11 – Provete P_A3_2_LA: a) Provete antes do ensaio; b) Provete após o ensaio; c) Fissuração do provete após o ensaio.



Figura A.12 – Provete P_A3_3_LA: a) Provete antes do ensaio; b) Provete após o ensaio; c) Fissuração do provete após o ensaio.

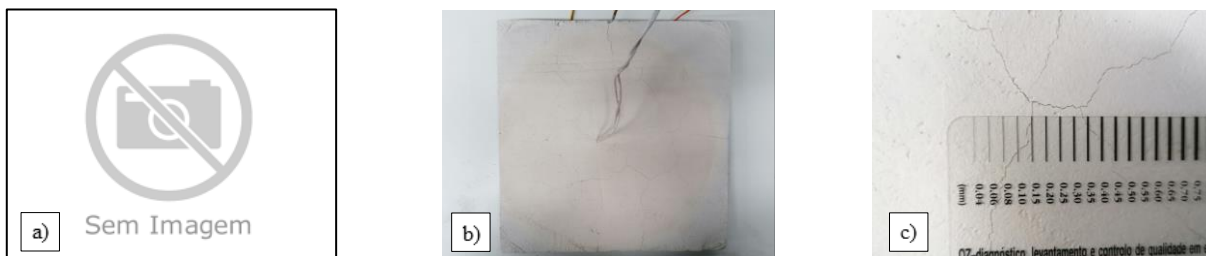


Figura A.13 – Provete P_A3_1_MI: a) Provete antes do ensaio; b) Provete após o ensaio; c) Fissuração do provete após o ensaio.

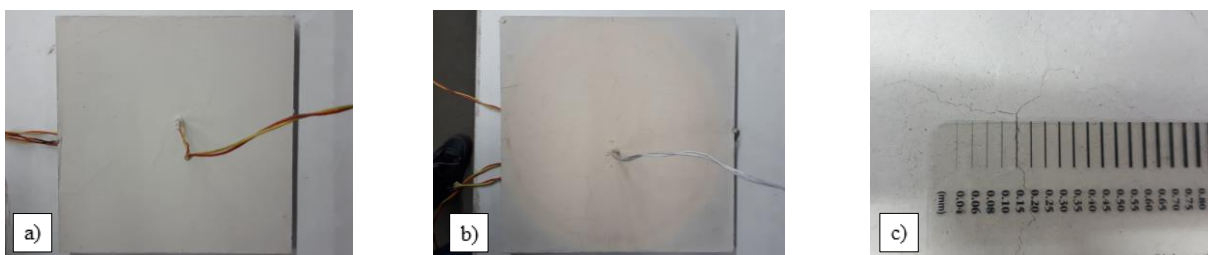


Figura A.14 – Provete P_A3_2_MI: a) Provete antes do ensaio; b) Provete após o ensaio; c) Fissuração do provete após o ensaio.

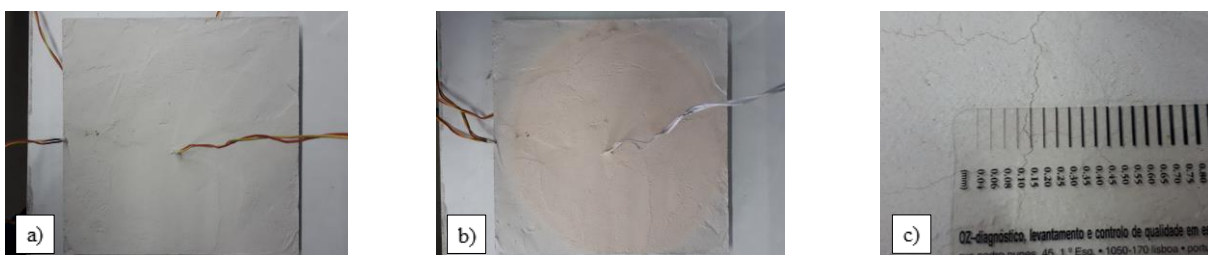


Figura A.15 – Provete P_A3_3_MI: a) Provete antes do ensaio; b) Provete após o ensaio; c) Fissuração do provete após o ensaio.

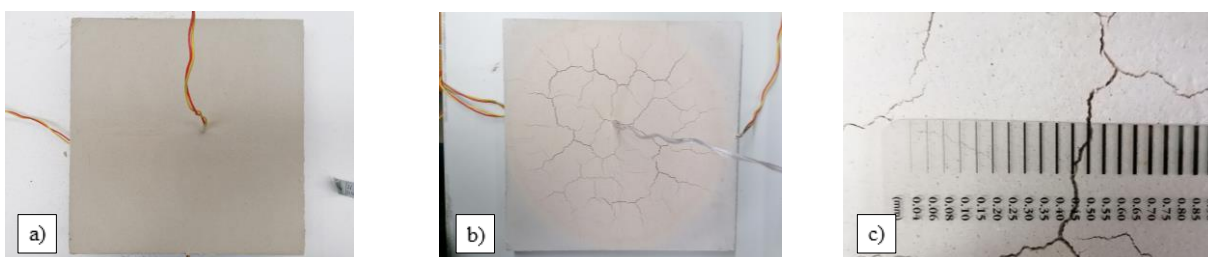


Figura A.16 – Provete P_A4_1_LA: a) Provete antes do ensaio; b) Provete após o ensaio; c) Fissuração do provete após o ensaio.

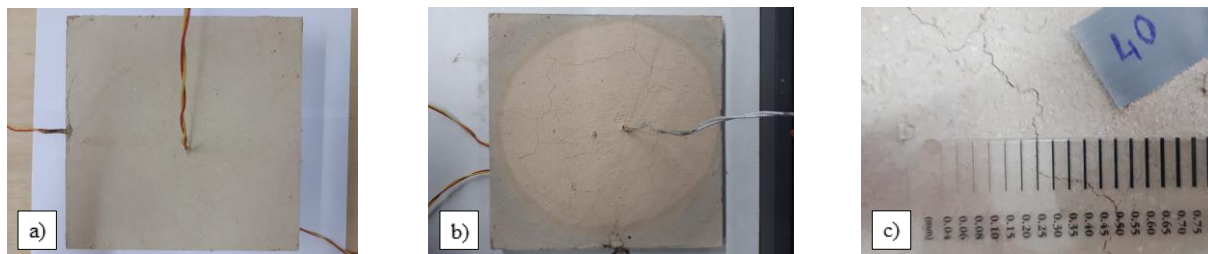


Figura A.17 – Provete P_A4_2_LA: a) Provete antes do ensaio; b) Provete após o ensaio; c) Fissuração do provete após o ensaio.

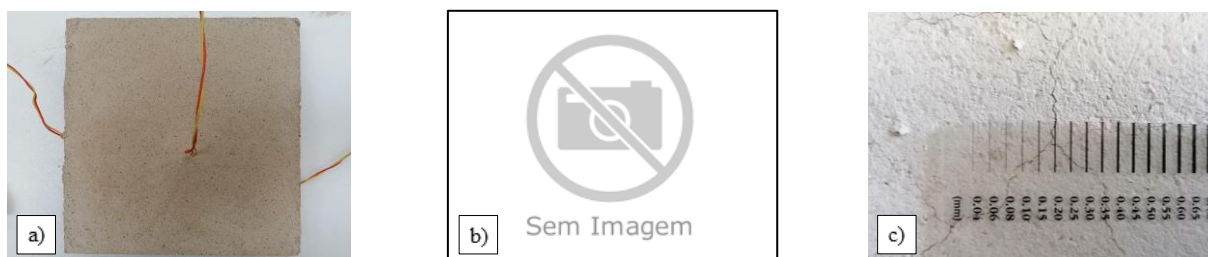


Figura A.18 – Provete P_A4_1_MI: a) Provete antes do ensaio; b) Provete após o ensaio; c) Fissuração do provete após o ensaio.



Figura A.19 – Provete P_A4_2_MI: a) Provete antes do ensaio; b) Provete após o ensaio; c) Fissuração do provete após o ensaio.

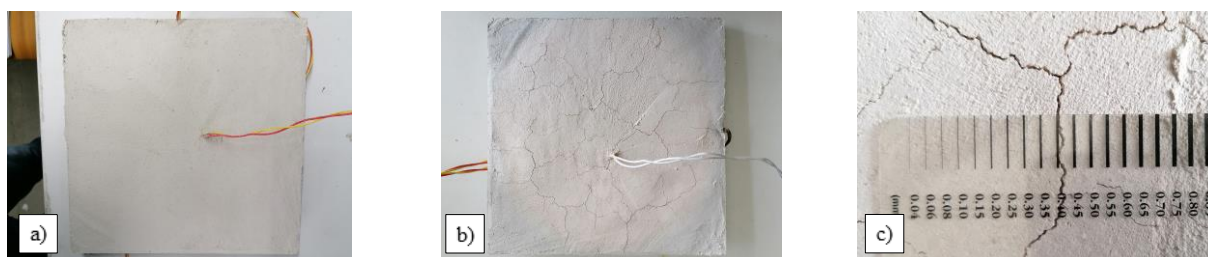


Figura A.20 – Provete P_A4_3_MI: a) Provete antes do ensaio; b) Provete após o ensaio; c) Fissuração do provete após o ensaio.

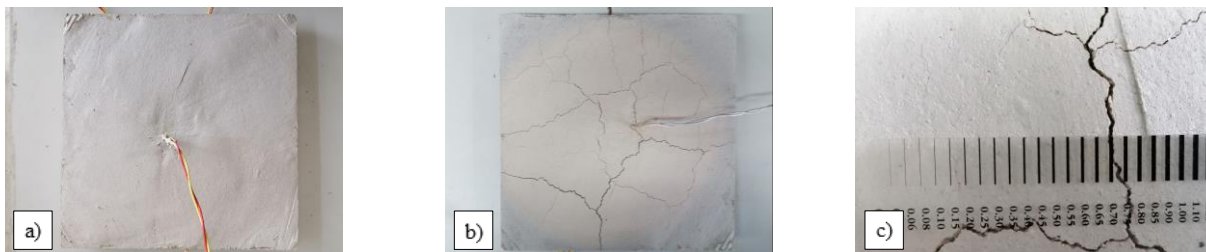


Figura A.21 – Provete P_A5_1_LA: a) Provete antes do ensaio; b) Provete após o ensaio; c) Fissuração do provete após o ensaio.

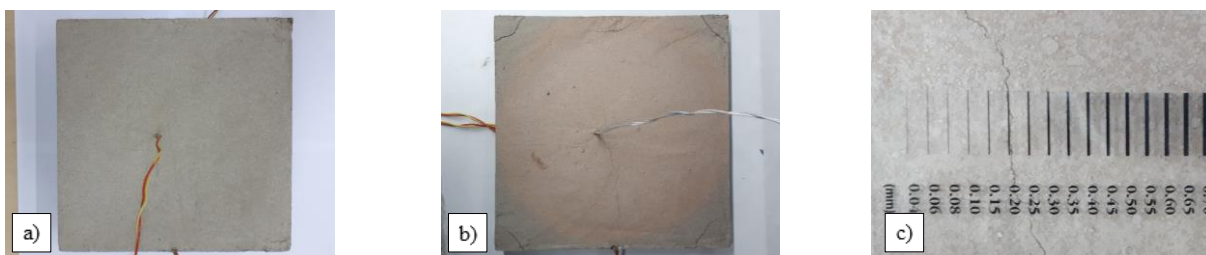


Figura A.22 – Provete P_A5_2_LA: a) Provete antes do ensaio; b) Provete após o ensaio; c) Fissuração do provete após o ensaio.



Figura A.23 – Provete P_A5_3_LA: a) Provete antes do ensaio; b) Provete após o ensaio; c) Fissuração do provete após o ensaio.

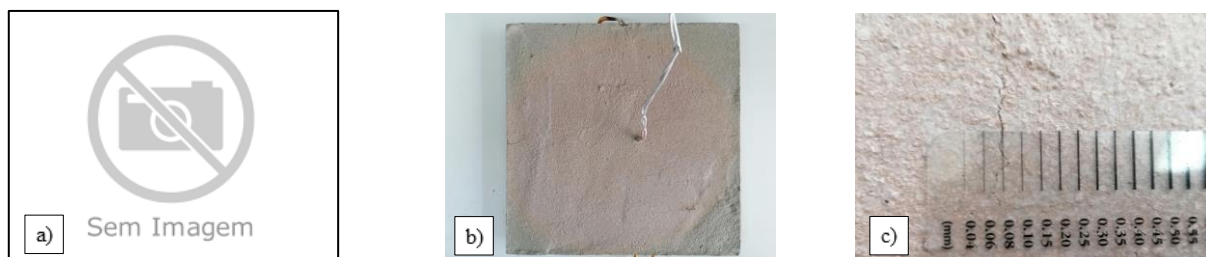


Figura A.24 – Provete P_A5_1_MI: a) Provete antes do ensaio; b) Provete após o ensaio; c) Fissuração do provete após o ensaio.

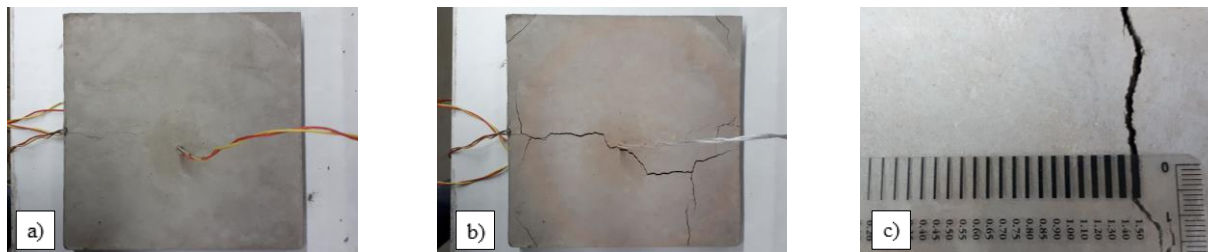
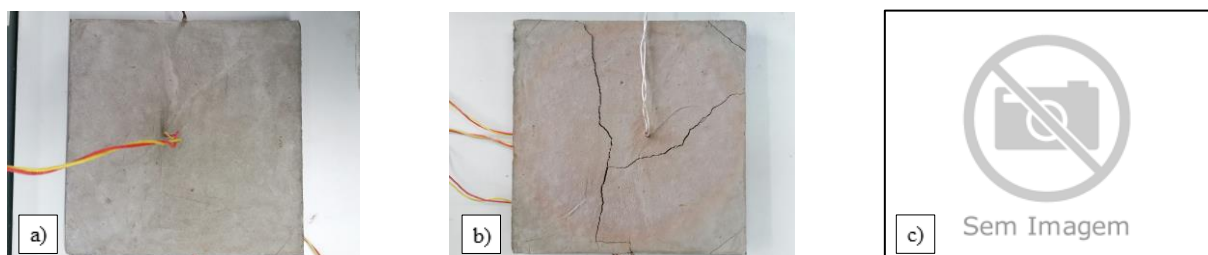


Figura A.25 – Provete P_A5_2_MI: a) Provete antes do ensaio; b) Provete após o ensaio; c) Fissuração do provete após o ensaio.



Figura A.26 – Provete P_A5_3_MI: a) Provete antes do ensaio; b) Provete após o ensaio; c) Fissuração do provete após o ensaio.



ANEXO B

Quadro B.1 – Dados admitidos para cálculo do esforço axial resistente à encurvadura ($N_{b,Rd}$): Propriedades geométricas do perfil SHS 150 x 150 x 8 mm; Classe de resistência e módulo de elasticidade; Comprimento de encurvadura; Carga crítica de Euler; Esbelteza normalizada e Fator de imperfeição.

L (m)	A (cm ²)	I (cm ⁴)	f_y (MPa)	E (GPa)	L_e (m)	N_{cr} (kN)	$\bar{\lambda}$	α
1,25	45,44	1528,30	355,00	210,00	0,88	41372,4	0,197	0,529

Quadro B.2 – Esforço axial resistente à encurvadura do elemento comprimido sujeito temperatura uniforme ($N_{b,fi,t,Rd}$) e respetiva temperatura crítica.

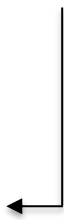

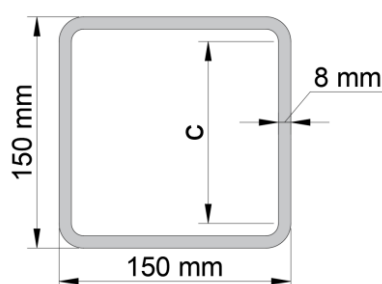
θ_a (°C)	$k_{y,\theta}$	$k_{E,\theta}$	λ_θ	φ_θ	χ_{fi}	$N_{b,fi,t,Rd}$ (kN)	0,50 * $N_{b,Rd}$ (kN)	0,50 * $N_{b,Rd}$ (ton)
20	1,000	1,000	0,197	0,572	0,902	1455,6		
200	1,000	0,900	0,208	0,577	0,897	1447,4		
400	1,000	0,700	0,236	0,590	0,884	1425,9		
500	0,780	0,600	0,225	0,585	0,889	1118,7		
586	0,513	0,351	0,239	0,592	0,883	730,9		
586,7	0,511	0,349	0,239	0,592	0,882	727,8		
587	0,510	0,348	0,239	0,592	0,882	726,4		
600	0,470	0,310	0,243	0,594	0,881	667,6		
700	0,230	0,130	0,263	0,604	0,871	323,2		

Figura B.1 – Dimensões da seção transversal do perfil SHS 150 x 150 x 8 mm.



Quadro B.3 – Classe da seção SHS 150 x 150 x 8 mm solicitada à compressão.

Componente solicitado à compressão						
b (mm)	t (mm)	c ≈ b - 3t (mm)	c/t	$\epsilon = \sqrt{235/f_y}$	33ε	c/t ≤ 33ε
150	8	126	15,75	0,814	26,85	Verifica ✓
						Classe 1

Quadro B.4 – Parâmetros considerados para a determinação da evolução da temperatura $\Delta\theta_{a,t}$ em elementos de aço não protegidos.

k_{sh}	A_m (m)	V (m ²)	A_m/V (1/m)	ρ_a (kg/m ³)	α_c (W/m ² K)	Φ	ε_m	ε_t	σ (W/m ² K ⁴)	Δt (seg)
1,0	0,60	4,54E-03	132,04	7850	25	1,0	0,8	1,0	5,67E-08	5

Quadro B.5 – Parâmetros considerados para a determinação da evolução da temperatura $\Delta\theta_{a,t}$ em elementos de aço isolado por meio de material de proteção contra incêndio (Argamassa A1).

λ_p (W/mK)	A_p (m)	V (m ²)	A_p/V (1/m)	d_p (m)	ρ_a (kg/m ³)	c_p (J/kgK)	ρ_p (kg/m ³)	Δt (seg)
0,25	0,60	4,54E-03	132,04	0,02	7850	1100	603,91	5

Quadro B.6 – Parâmetros considerados para a determinação da evolução da temperatura $\Delta\theta_{a,t}$ em elementos de aço isolado por meio de material de proteção contra incêndio (Argamassa A2).

λ_p (W/mK)	A_p (m)	V (m ²)	A_p/V (1/m)	d_p (m)	ρ_a (kg/m ³)	c_p (J/kgK)	ρ_p (kg/m ³)	Δt (seg)
0,25	0,60	4,54E-03	132,04	0,02	7850	1100	498,79	5

Quadro B.7 – Parâmetros considerados para a determinação da evolução da temperatura $\Delta\theta_{a,t}$ em elementos de aço isolado por meio de material de proteção contra incêndio (Argamassa A4).

λ_p (W/mK)	A_p (m)	V (m ²)	A_p/V (1/m)	d_p (m)	ρ_a (kg/m ³)	c_p (J/kgK)	ρ_p (kg/m ³)	Δt (seg)
0,25	0,60	4,54E-03	132,04	0,02	7850	1100	638,28	5

Figura B.2 – Provete PC: a) Provete antes do ensaio; b) Provete após o ensaio (direção 1);
c) Provete após o ensaio (direção 2).



Figura B.3 – Provete PC_A1: a) Provete antes do ensaio; b) Destacamento da argamassa após
o ensaio; c) Provete após o ensaio (direção 1); d) Provete após o ensaio (direção 2).



Figura B.4 – Provete PC_A2: a) Provete antes do ensaio; b) Destacamento da argamassa após o ensaio; c) Provete após o ensaio (direção 1); d) Provete após o ensaio (direção 2).



Figura B.5 – Provete PC_A4: a) Provete antes do ensaio; b) Destacamento da argamassa após o ensaio; c) Provete após o ensaio (direção 1); d) Provete após o ensaio (direção 2).

