



## **Comportamento ao Fogo de Paredes em Tabique**

**Alexandre Gomes Araújo**

Relatório Final de Projeto apresentado à  
**Escola Superior de Tecnologia e de Gestão**  
**Instituto Politécnico de Bragança**

para obtenção do grau de Mestre em  
**Engenharia da Construção**

**Dezembro de 2014**

# **Comportamento ao Fogo de Paredes em Tabique**

**Alexandre Gomes Araújo**

Relatório Final de Projeto apresentado à  
**Escola Superior de Tecnologia e de Gestão**  
**Instituto Politécnico de Bragança**

para obtenção do grau de Mestre em  
**Engenharia da Construção**

Orientado por:

**Débora Rodrigues de Sousa Macanjo Ferreira**

**Elza Maria Morais Fonseca**

**Dezembro de 2014**

*À minha irmã.  
Aos meus pais.*

*“The most incomprehensible thing about the world  
is that it is at all comprehensible”*

-Albert Einstein

## AGRADECIMENTOS

A todos quantos me acompanharam no decorrer desta etapa que, com sua compreensão, disponibilidade, contribuíram para a realização deste trabalho, manifesto o meu profundo agradecimento. Tenho, no entanto, de agradecer de uma forma distinta:

À minha orientadora científica, Professora Doutora Débora Macanjo Ferreira, expresso a minha profunda gratidão, pelos seus ensinamentos, pelo seu incentivo, pela sua supervisão, e pela sua inexcedível disponibilidade.

À minha coorientadora científica, Professora Doutora Elza Maria Morais Fonseca, pela crítica doura e sábia, pelos seus valiosos ensinamentos na área de simulação numérica, sem os quais a tarefa de modelação teria certamente sido mais difícil.

Ao Professor Doutor Paulo Piloto, pela disponibilidade, pelo incentivo, pela entrega incondicional, pela sua exigência, pela ajuda prestada em laboratório, e pelas sábias sugestões com que gentilmente me dadiu.

Aos técnicos, Sr. João Pires e Sr. Octávio Pereira, e ao Sr. Vitor Gomes, pelo empenho, pelo excelente espírito de equipa, dedicação e incansável ajuda prestada nos trabalhos experimentais realizados no laboratório de Geotecnia e Materiais de Construção da ESTIG.

À Mestre Luísa Maria da Silva Barreira, pela disponibilidade, pelo apoio, pelo precioso contributo prestado nas tarefas elaboradas no Laboratório de Estruturas e Resistência dos Materiais da ESTIG.

Ao Mestre Jorge Manuel Meireles, técnico do Laboratório de Tecnologia Mecânica, pelo valioso apoio prestado na execução da estrutura metálica.

À direção da ESTIG do Instituto Politécnico de Bragança, por ceder as suas instalações, equipamentos, e pelo seu contributo monetário na compra dos materiais para o ensaio.

À minha família, e em particular aos meus pais e irmã que, da mesma forma e desde sempre, me encorajaram e apoiaram incondicionalmente para esta chegada a bom porto.

A todos o meu muito obrigado, bem hajam!

## RESUMO

O presente trabalho pretende dar um contributo no estudo do comportamento de paredes em tabique, nomeadamente na quantificação e qualificação da sua resistência ao fogo. Este estudo baseia-se, fundamentalmente, na análise experimental e numérica de modelos de parede à escala real, em madeira de pinho nacional com preenchimento e acabamento à base de uma argamassa terrosa bastarda de terra e cal. Para a elaboração do modelo experimental à escala real procedeu-se à análise e avaliação em laboratório da argamassa a utilizar. A estrutura em madeira foi construída com base nas construções em tabique existentes na Associação de Municípios do Alto Tâmega. O modelo experimental possui a geometria apropriada e foi ensaiado num forno de ensaio de resistência ao fogo, preparado para trabalhar com a curva de incêndio normalizada ISO 834. As temperaturas foram registadas utilizando dois sistemas de aquisição de dados (medição pontual e medição de campo). Foi também desenvolvido um modelo numérico, validado experimentalmente, utilizando uma análise não linear material em regime transiente e com recurso a um programa de elementos finitos.

### **Palavras – Chave**

Tabique; Construção sustentável; Resistência ao fogo; Análise experimental; Modelação numérica.

## ABSTRACT

The aim of this work is to contribute to the study of the *tabique* walls, namely in what concerns quantification and qualification of its fire resistance. This study is based on experimental and numerical analysis of partition walls at real scale, made of national pine wood with filling and finishing based on a bastard earthy mortar of earth. For making experimental model at real scale, in laboratory, the mortar in use was evaluated. The wooden structure was built on the basis of *tabique* constructions existing in the Association of Counties of Alto Tâmega. The experimental models have the appropriate geometry and they were tested in a furnace for fire resistance assessment, prepared to work with the standard fire curve ISO 834. The temperatures were measured using two data systems (local and field measuring). Also a numerical model was developed, experimentally validated, using nonlinear material in transient analysis, based on finite element program.

### Key – words

*Tabique*; Sustainable construction; Fire resistance; Experimental analysis; Numerical modelling.

# Índice Geral

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO.....	1
1.1    CONCEITOS GERAIS .....	1
1.2    OBJETIVOS .....	1
1.3    ESTRUTURAÇÃO DA TESE.....	2
CAPÍTULO 2 - ENQUADRAMENTO GERAL .....	4
2.1    ESTADO DO CONHECIMENTO .....	4
2.2    NORMAS E REGULAMENTOS .....	11
2.2.1    Legislação e Normas envolvidas no estudo da reação ao fogo .....	11
2.2.2    Classificação segundo os ensaios de resistência ao fogo (EN 13501-2).....	12
2.2.3    Parâmetros a avaliar na resistência ao fogo.....	13
2.2.4    Segurança contra Incêndios em Edifícios (Decreto-Lei nº 220/2008). .....	14
2.2.5    Portaria nº 1532/2008.....	15
2.2.6    EN 1363-1 – Ensaios de Resistência ao Fogo: Requisitos Gerais.....	16
2.2.7    Características dos incêndios.....	24
2.2.8    Curvas nominais.....	25
2.2.9    Materiais e seu comportamento térmico .....	27
CAPÍTULO 3 - CARATERIZAÇÃO E REALIZAÇÃO DAS PAREDES DE TABIQUE .....	32
3.1    ESTUDO PRÉVIO DA COMPOSIÇÃO DA ARGAMASSA .....	32
3.1.1    Mistura de solo argiloso .....	32
3.2    ENSAIOS PERLIMINARES .....	34
3.3    EXECUÇÃO DAS PAREDES EM TABIQUE .....	42
3.4    INSTRUMENTAÇÃO DAS PAREDES DE TABIQUE .....	44
CAPÍTULO 4 - ENSAIOS EXPERIMENTAIS .....	50
4.1    SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS .....	50
4.2    PROCEDIMENTOS DE ENSAIO .....	51
4.2.1    Ensaio da Parede Teste.....	52
4.2.2    Ensaio da Parede I.....	53
4.2.3    Ensaio da Parede II.....	55
CAPÍTULO 5 - ANÁLISE NUMÉRICA.....	58
CAPÍTULO 6 - ANÁLISE DE RESULTADOS.....	63
6.1    RESULTADOS EXPERIMENTAIS .....	63

6.1.1 Parede Teste .....	63
6.1.2 Parede I.....	67
6.1.3 Parede II .....	70
6.2 TERMOGRAFIA .....	73
6.2.1 Termografia da parede teste .....	73
6.2.2 Termografia da Parede I.....	76
6.2.3 Termografia da Parede II.....	78
6.3 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS E NUMÉRICOS .....	80
6.3.1 Comparação dos resultados da Parede Teste.....	80
6.3.2 Comparação dos resultados da Parede I.....	83
6.3.3 Comparação dos resultados da Parede II.....	85
CAPÍTULO 7 - CONCLUSÕES.....	90
7.1 TRABALHOS FUTUROS.....	91
REFERÊNCIAS .....	93
ANEXO A .....	97
ANEXO B .....	102
ANEXO C .....	103
ANEXO D .....	104

## Índice de Figuras

Figura 1- Distribuição do tabique em Portugal [6].....	6
Figura 2 – Construções em tabique do Alto-Duriense. ....	7
Figura 3 - Parede de tabique após exposição ao fogo [11].....	10
Figura 4 - Representação esquemática de um termopar [17]. ....	18
Figura 5 – Pormenor da placa de um termopar [17].....	19
Figura 6 – Exemplo de união de um termopar de superfície e a placa de isolamento [17]. .....	20
Figura 7 – Sensor de pressão [17] .....	20
Figura 8 – Tampão de algodão [17].....	21
Figura 9 – Curvas nominais da temperatura em relação ao tempo.....	26
Figura 10 - Calor específico da madeira em função da temperatura [12]. ....	28
Figura 11 - Condutividade térmica da madeira em função da temperatura [12].....	28

Figura 12 - Massa volúmica da madeira em função da temperatura, teor de água inicial de 12% [12].	29
Figura 13 – Propriedades térmicas da argamassa terrosa.	31
Figura 14 – Parede de tabique preenchida com argamassa argilosa.	33
Figura 15 – Fissuração após 1 dia de aplicação da mistura argilosa.	33
Figura 16 – Fissuração da parede após 3 dias de secagem.	34
Figura 17 - Curva granulométrica do solo extraído de Vila Real [22].	35
Figura 18 – Valores da curva granulométrica do solo extraído em Chaves.	36
Figura 19 - Valores da curva Granulométrica do solo de Vila Real e do solo de Chaves.	37
Figura 20 – Fotogrametria do local de extração do solo (fonte: Google-maps).	37
Figura 21 – Peneiração do solo.	38
Figura 22 – Provetes após 28 dias de secagem.	39
Figura 23 – Resultado da argamassa após a amassadura.	40
Figura 24 – Provetes de argamassa terrosa.	40
Figura 25 - a) Ensaio à flexão; b) Ensaio à compressão.	41
Figura 26 – Esquema cotado do modelo da parede de tabique.	42
Figura 27 – Construção da estrutura de madeira da parede em tabique.	43
Figura 28 – a) Enchimento com argamassa bastarda; b) Recobrimento e acabamento com argamassa bastarda.	43
Figura 29 – Posicionamento dos termopares.	44
Figura 30 – Instrumentação dos modelos de parede em tabique.	45
Figura 31 – a) Proteção do termopar de superfície; b) Colocação dos termopares de superfície.	46
Figura 32- Ligação dos termopares às fichas e verificação de funcionamento.	46
Figura 33 - Modelos de parede em tabique instrumentados.	47
Figura 34 – Esquema cotado do aro de fixação.	47
Figura 35 – Isolamento nos contornos do modelo de parede.	48
Figura 36 – Parede instalada no aro de fixação.	48
Figura 37 – Acoplamento do modelo de parede em tabique ao forno de ensaio.	49
Figura 38 – Ligação das fichas às extensões do MGC Plus.	50
Figura 39 – Câmara Termográfica.	51
Figura 40 – Teste do algodão.	51
Figura 41 – Libertação de fumo durante o ensaio.	52

Figura 42 – Término do ensaio ao fogo da Parede Teste. ....	52
Figura 43 – Resultado da Parede Teste, face exposta ao fogo após o ensaio. ....	53
Figura 44 – Libertação de fumo durante o ensaio de resistência ao fogo. ....	54
Figura 45 – Chama resultante da combustão da madeira (vista da janela do forno). ....	54
Figura 46 – Libertação da chama proveniente da combustão da madeira. ....	55
Figura 47 – Resultado da Parede I após o ensaio. ....	55
Figura 48 – Resultado da Parede II após o ensaio. ....	56
Figura 49 – Estrutura de madeira da Parede II após o ensaio. ....	57
Figura 50 – Propriedades térmicas da madeira [11]. ....	59
Figura 51 – Propriedades térmicas da argamassa terrosa. ....	59
Figura 52 – Resultado numérico para o instante 2100s no corte AA da Parede Teste... 60	60
Figura 53 – Resultado numérico para o instante 2100s no corte BB da Parede Teste... 60	60
Figura 54 - Resultado numérico para o instante 3600s no corte AA da Parede I. ....	61
Figura 55 - Resultado numérico para o instante 3600s no corte BB da Parede I. ....	61
Figura 56 - Resultado numérico para o instante 900s no corte AA da Parede II. ....	61
Figura 57 - Resultado numérico para o instante 900s no corte BB da Parede II. ....	61
Figura 58 - Temperatura prevista e real no interior do forno. ....	64
Figura 59 - Temperaturas nos termopares inseridos na madeira. ....	64
Figura 60 - Temperaturas nos termopares da argamassa. ....	65
Figura 61 - Temperaturas nos termopares de disco. ....	66
Figura 62 - Curva de temperatura prevista e real do forno. ....	67
Figura 63 - Temperaturas dos termopares inseridos na madeira. ....	68
Figura 64 - Temperaturas nos termopares da argamassa. ....	69
Figura 65 - Temperaturas nos termopares de disco. ....	70
Figura 66 - Curva de temperatura prevista e real do forno. ....	71
Figura 67 - Temperaturas nos termopares inseridos na madeira. ....	71
Figura 68 - Temperaturas nos termopares da argamassa. ....	72
Figura 69 - Temperaturas nos termopares de disco. ....	73
Figura 70 – Medição de termografia IR (Escala 10 - 100). ....	74
Figura 71 - Temperaturas registadas através da captura termográfica. ....	74
Figura 72 - Temperaturas termográficas e termopares de disco da face não exposta. ...	75
Figura 73 – Medição de termografia IR (Escala 10 – 100). ....	76
Figura 74 – Temperaturas captadas através da câmara termográfica. ....	77
Figura 75 – Temperaturas termográficas e termopares de disco da face não exposta....	77

Figura 76 – Medição de termografia IR (Escala automática).....	78
Figura 77 – Temperaturas captadas através da câmara termográfica.....	79
Figura 78 – Temperaturas termográficas e termopares de disco da face não exposta....	79
Figura 79 - Resultados obtidos nos termopares aplicados na argamassa de enchimento. .....	80
Figura 80 - Resultados obtidos nos termopares aplicados na madeira estrutural.....	81
Figura 81 - Resultados obtidos nos termopares de disco aplicados na face não exposta. .....	82
Figura 82 – Resultado final numérico e experimental dos danos no material ensaiado.	82
Figura 83 - Resultados obtidos nos termopares aplicados na argamassa de enchimento. .....	83
Figura 84 - Resultados obtidos nos termopares aplicados na madeira estrutural.....	84
Figura 85 - Resultados obtidos nos termopares de disco aplicados na face não exposta. .....	84
Figura 86 – Resultado final numérico e experimental dos danos no material ensaiado.	85
Figura 87 - Resultados obtidos nos termopares aplicados na argamassa de enchimento. .....	86
Figura 88 - Resultados obtidos nos termopares aplicados na madeira estrutural.....	86
Figura 89 - Resultados obtidos nos termopares de disco aplicados na face não exposta. .....	87
Figura 90 - Resultado final numérico e experimental dos danos no material ensaiado.	88
Figura 91 - Resultado numérico da Parede Teste (15mm) aos 900s. ....	88
Figura 92 - Resultado numérico da Parede I (10mm) aos 900s.....	88
Figura 93 - Resultado numérico da Parede II (5mm) aos 900s. ....	88

## Índice de Tabelas

Tabela 1 – Denominação das características da resistência ao fogo. ....	12
Tabela 2 - Elementos ou partes de obras sem funções de suporte de carga e produtos [16]. .....	13
Tabela 3 – Resistência ao fogo de produtos de construção [16]. ....	15

Tabela 4 – Resistência ao fogo padrão mínima de elementos estruturais de edifícios [16]. .....	15
Tabela 5 – Resistência ao fogo padrão mínima dos elementos de envolvente [16]......	16
Tabela 6 – Termopares mais usuais [17]......	18
Tabela 7 – Características do termopar do tipo K. ....	19
Tabela 8 – Curvas de incêndio. ....	27
Tabela 9 - Calor Específico e Massa Volúmica da madeira seca [12]. ....	30
Tabela 10 – Valores da curva granulométrica do solo extraído em Vila Real [22]. ....	35
Tabela 11 – Valores da curva granulométrica do solo extraído em Chaves.....	36
Tabela 12 – Quantidade dos constituintes para a mistura da argamassa terrosa [22]. ...	38
Tabela 13 – Mistura da argamassa terrosa.....	39
Tabela 14 – Tensão de rotura à compressão e à flexão. ....	41



# CAPÍTULO 1

---

## INTRODUÇÃO

### 1.1 CONCEITOS GERAIS

As construções antigas presentes nos centros históricos de Trás-os-Montes e Alto Douro, tal como noutros centros históricos de centros urbanos, enfrentam uma realidade marcada pelo abandono e degradação das estruturas, associada à inexistência de processos de manutenção recorrentes. Assim, é imperativo a reabilitação e conservação deste património, pois trata-se de uma tipologia construtiva marcada como um Património de grande valor histórico e cultural, em estado avançado de degradação e ruína.

Com a preocupação de preservar as estruturas em tabique, nos últimos anos, tem-se vindo a desenvolver estudos direcionados para a recolha de informação de construções existentes, tais como, características gerais dos edifícios, materiais aplicados, anomalias encontradas, e patologias inerentes ao processo construtivo. O desenvolvimento destas investigações, focam-se essencialmente no Nordeste Transmontano, detentor desta preciosa herança de paredes em tabique, que tão bem caracterizam a região.

O presente estudo, pretende-se aprofundar o conhecimento das paredes em tabique, aduzindo novos elementos no âmbito da resistência do material sobre a ação do fogo. Contudo, tenciona-se reforçar o leque de argumentos, conduzindo ao incentivo de preservar estas estruturas, e retirar a ideia errada imposta na sociedade atual, de construções muito antigas que devem ser demolidas e substituídas por construção de tecnologia mais avançada.

### 1.2 OBJETIVOS

O presente trabalho de dissertação pretende dar um contributo na compreensão do comportamento das paredes de tabique sob ação do fogo. Pela falta de investigação nesta área, pretende-se contribuir com novos elementos que ajudem a compreender estas estruturas.

De forma mais pormenorizada, os objetivos que levam ao desenvolvimento deste trabalho, são apresentados pela seguinte ordem:

- Fazer referência a regulamentações respeitantes aos materiais inerentes às paredes de tabique;
- Identificar e caracterizar o tipo de solo a utilizar na argamassa terrosa aplicada na parede de tabique;
- Descrever o tipo de argamassa a ensaiar;
- Descrever detalhadamente o trabalho de laboratório realizado;
- Construir modelos de parede em tabique a utilizar no estudo do comportamento ao fogo;
- Modelo experimental para resistência ao fogo;
- Modelo numérico de análise ao fogo, com recurso ao método de elementos finitos;
- Comparação e discussão de resultados dos modelos da parede em tabique.

### **1.3 ESTRUTURAÇÃO DA TESE**

Este trabalho encontra-se organizado em 7 capítulos. O Capítulo 1 dedica-se ao enquadramento geral do trabalho concretizado, fazendo-se referência aos objetivos que se pretendem atingir, e aos motivos que desencadeiam a problemática em questão.

O Capítulo 2 refere o estado do conhecimento das paredes em tabique, passando-se em revista o enquadramento histórico geral deste tipo de construção, das suas características e potencialidades em variadas vertentes, bem como a sua principal área de incidência. Serão ainda focados os principais pontos regulamentares referentes à ação do fogo.

O Capítulo 3 incide no estudo e caracterização do tipo de solo, na mistura a aplicar nas paredes, a definição geométrica e a construção dos modelos de parede à escala real, com a respetiva instrumentação.

Relativamente ao Capítulo 4, apresentam-se os ensaios de resistência ao fogo, os procedimentos de ensaio e os equipamentos utilizados na aquisição de dados.

No Capítulo 5 apresenta-se a modelação numérica, realizada com recurso ao método dos elementos finitos (MEF), conforme os ensaios experimentais descritos no capítulo 4.

No Capítulo 6 são apresentados os resultados experimentais e numéricos dos ensaios, com uma comparação desses mesmos resultados, apresentando-se uma análise crítica. O objetivo desta análise é verificar a possibilidade de reproduzir realisticamente o comportamento estrutural observado experimentalmente.

Finalmente, apresenta-se no Capítulo 7, as principais conclusões a reter do presente trabalho e sugerem-se futuros desenvolvimentos de construções em tabique.

# CAPÍTULO 2

---

## ENQUADRAMENTO GERAL

### 2.1 ESTADO DO CONHECIMENTO

O tabique, também designado de “taipa de fasquio”, “taipa de rodízio”, “taipa de sopapo”, “taipa de chapada”, “pau a pique”, “terra sobre engradado” ou “barro armado”, define-se como uma técnica tradicional construtiva que emprega como material, a terra, a madeira ou a cana. É formada por tábuas verticais, ligadas entre si por um ripado de madeira. As ligações entre os elementos de madeira (ligação dos elementos verticais com o fasquio) são geralmente feitas através de pregos, com comprimentos de 30 a 50 [mm], e as ligações das extremidades (ligação da estrutura de madeira com os elementos estruturais), com pregos de 65 [mm] a 105 [mm] de comprimento. Os pregos aplicados nas estruturas devem ser antioxidantes, evitando patologias que possam advir no material de enchimento, assim como manchas amarelas devido à oxidação dos pregos [1]. As paredes são preenchidas por um solo argiloso ou por uma argamassa terrosa bastarda. Na mistura é usual a inclusão de cal apagada, por ser uma solução económica, por proporcionar melhor resistência mecânica, maior deformabilidade, melhor adesão ao suporte, melhor dispersão do solo, e maior permeabilidade da parede.

A aplicação do material terroso deve-se, essencialmente, ao facto de existir em abundância na natureza, e por comprovar excelentes qualidades de trabalhabilidade quando misturado com água [2]. Este material é aplicado de forma a proteger e preencher as lacunas da estrutura de madeira. Da qualidade do enchimento dependem os seguintes aspetos: durabilidade dos elementos estruturais, o desempenho térmico, acústico e resistência ao fogo. A qualidade da mistura provém do tipo de constituintes, das proporções em que são misturados, e da capacidade de aderência ao suporte [1].

O tabique é uma das técnicas de construção que deve ser investigada, pela falta de informação na sociedade atual, por haver muito património degradado em Portugal (a precisar de intervenção), por ser um material de baixo custo, e pelo seu potencial enquanto material ecológico, que vai de encontro às necessidades ambientais atuais, e o que se enquadra perfeitamente no âmbito da sustentabilidade, aspeto que nos dias de hoje tem

importante destaque, devido aos níveis altos de poluição e dificuldades económicas mundiais. Para além do referenciado, a terra é um material que não é poluente e não precisa de processos de transformação de matéria-prima que recorram a meios energéticos dispendiosos. Quanto ao fim-de-vida do material, quando utilizado sem qualquer aditivo, tem a vantagem de se poder reutilizar sem criar qualquer resíduo prejudicial ao meio ambiente após a sua demolição. Caso este solo seja misturado com cal ou cimento, poderá, mesmo assim, voltar a ser empregado neste tipo de construção [3].

De notar, que historicamente, a argila aparece como material, aplicado na construção de abrigos utilizados para a sobrevivência da espécie humana. Surge a nível mundial, entre 14.600 a 4.500 a.C. [4], e prevalece até aos primórdios do século XX.

É importante referir que esta técnica construtiva teve principal ênfase em paredes divisórias interiores, nos pisos superiores das paredes de fachada (salvo algumas exceções que se estendia à totalidade dos panos de fachada exterior). Nas paredes exteriores, o recurso ao tabique não era tão comum pelo facto de haver sempre o risco de degradação das paredes causado pela infiltração da água das chuvas. Para preservar o material exposto ao ambiente exterior, colocavam-se algumas proteções, tais como chapas metálicas ou soletos de ardósia [5].

A construção de paredes em tabique, por ser uma técnica aplicada há muitos anos, é vista aos olhos de muitos como uma técnica rudimentar, o que levou ao seu desuso.

Em Portugal, o tabique tem como pontos de referência as regiões do interior, tais como o Alentejo e parte de Trás-os-Montes e Alto Douro (Figura 1), por serem aquelas que se apresentam com um clima mais adequado a este tipo de construção, devido aos níveis reduzidos de precipitação e humidade.

Atendendo à pouca informação do material aplicado neste tipo de construção, surge a necessidade de analisar os edifícios já existentes, e desse levantamento resulta que:

- A madeira, enquanto material estrutural aplicado em paredes de tabique, em Portugal notou-se a predominância de 65% de construção em madeiras leves, e de 25 % de utilização de madeiras pesadas [1].

- O material de enchimento, com incidência na região de Trás-os-Montes, em 60 amostras deste material, verifica-se em cerca de 70% uma aplicação de argamassa de cal terrosa, e os restantes 30% atribuídos à aplicação de terra [1].

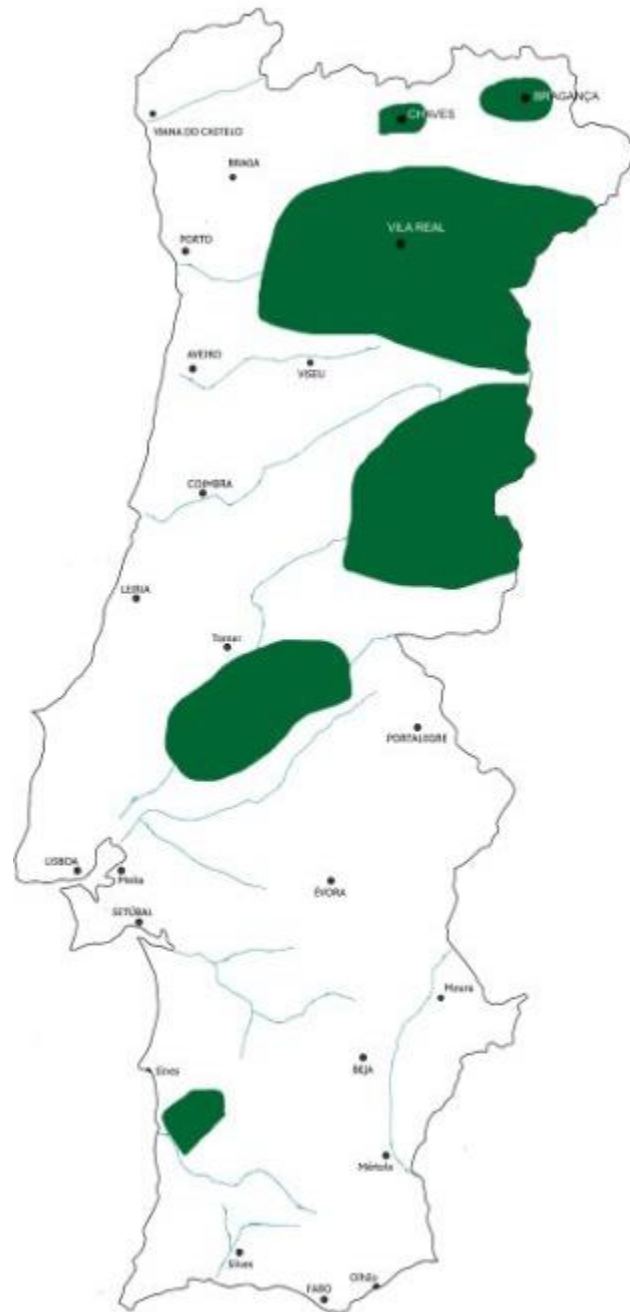


Figura 1- Distribuição do tabique em Portugal [6]

O tabique é reconhecido como um marco do património arquitetónico do Alto-Duriense, adapta-se à paisagem, ao clima, ao terreno, à cultura e realça a identidade local. A preservação deste material é realmente importante para a preservação da diversidade e

singularidade regional, notórios em locais como: São Romão – Armamar (Figura 2 a); Salzedas – Tarouca (Figura 2 b); Ucanha – Arouca (Figura 2 c); Cambres – Lamego (Figura 2 d); Granja do Tedo – Tabuaço (Figura 2 e); Santa Cruz – Armamar (Figura 2 f).



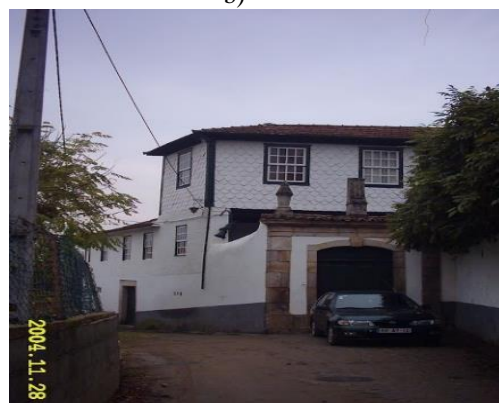
a)



b)



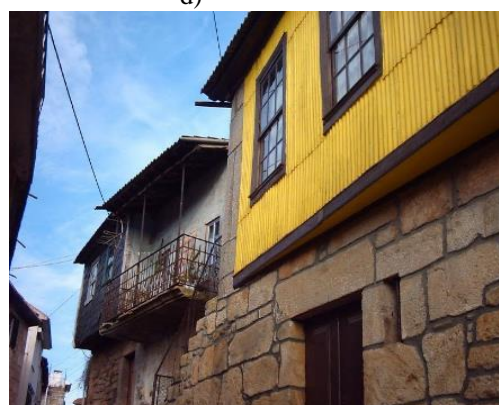
c)



d)



e)



f)

Figura 2 – Construções em tabique do Alto-Duriense.

A constituição das paredes de tabique desempenha funções estruturais importantes no travamento geral das estruturas, devido à organização especial dos seus elementos. Este facto é relevante na interligação entre pavimentos, paredes e coberturas, decisório na

capacidade resistente global do edifício durante a ocorrência de um sismo, devido à forma como dissipa a energia. As casas construídas com paredes em tabique foram as que melhor resistiram ao terramoto de 1755 [7], pois estas estruturas evidenciam um bom comportamento sob ação sísmica, quando comparadas com paredes de alvenaria. Como suprarreferido, a capacidade resistente da parede em tabique deve-se à estrutura de madeira, constituída por tábuas verticais e ligadas entre si por um fasquio através de pregos metálicos, conferindo à estrutura um sistema sólido, e de grande estabilidade.

Devido à disposição dos elementos de madeira, a parede possui a capacidade de absorver cargas nas duas direções (vertical e horizontal), cargas estas que podem resultar da descarga de energia de um sismo na estrutura. Outras características relevantes que a estrutura de madeira apresenta, são a leveza do seu material, a sua boa resistência a forças de tração e de compressão, a capacidade de se deformar (material dúctil) e de dissipar energia. Com esta técnica construtiva, o edifício funciona como se os seus elementos estruturais estivessem todos encadeados entre si.

A nível ambiental é importante frisar que a construção em terra não tem qualquer efeito nocivo, muito pelo contrário. A terra tem a capacidade de regular o nível de humidade relativa do ar interior. Alguns autores [8], afirmam que níveis de humidade relativa acima de 70% são responsáveis pelo aparecimento de bolores, o que pode desencadear reações alérgicas. No mesmo contexto, valores acima de 60% associam-se à presença de ácaros e doenças do foro asmático [8]. Níveis de humidade relativa abaixo de 40% estão associados à síndrome dos “edifícios doentes”, próprio dos ambientes muito secos. A exposição prolongada a estes ambientes leva a uma secagem da mucosa respiratória, dando origem ao aparecimento de doenças do foro respiratório, tais como amigdalites, faringites e bronquites [8].

Dos valores apresentados no parágrafo anterior, depreende-se que valores de humidade relativa do ar interior devem manter-se compreendidos entre 40% e 60%, de modo a não comprometerem a saúde humana [8], valores estes que as paredes em tabique sustentam perfeitamente.

Relativamente à reação e resistência ao fogo pouco ou nada se sabe de construção em tabique, apenas se dispõe de alguma informação dos materiais embutidos nas paredes.

Referente ao solo, e com base em estudos realizados, revela-se um material incombustível.

A madeira apresenta-se como um material cuja reação ao fogo não é muito boa, ainda que a sua resistência perante este elemento seja bastante melhor. Nas madeiras normais a combustão dá-se com temperaturas superficiais na ordem dos 300 °C, quando haja presença de chama, caso isto não aconteça a combustão dá-se com temperaturas superiores a 400 °C. No que respeita à reação ao fogo, a madeira é normalmente classificada como pertencente à classe D, E ou F de acordo com a especificação NP EN 13501-1 [9].

Quando comparada com estruturas em betão ou aço, as estruturas de madeira apresenta melhor comportamento estrutural [10].

Num incêndio até 1000 °C a madeira conserva uma boa resistência mecânica durante algum tempo devido ao efeito isolante das camadas externas carbonizadas, o contrário do que sucede em peças metálicas, cuja resistência diminui drasticamente quando atingidas temperaturas na ordem dos 300 °C, o material entra em regime plástico, o que pode levar ao colapso da estrutura [10].

Inicialmente, a superfície exterior da madeira entra facilmente em combustão, mas cria imediatamente uma capa carbonizada que isola cerca de seis vezes mais do que a própria madeira, atrasando assim o processo de combustão e permitindo que a madeira no interior da peça não seja lesada pela ação do fogo. Este material sob ação do fogo não é degradado pela perda das suas propriedades mecânicas devido à ação da temperatura, mas sim pela diminuição devido à perda de secção resistente [10].

Numa situação de incêndio, para além do comportamento da madeira anteriormente referido, o facto de haver presença de chama, é visto como um sinal de alerta para um colapso iminente, o que não sucede em estruturas de betão-armado ou de aço, que em situação idêntica, o seu colapso sobrevém sem pré-aviso, uma vez que a resistência deste material diminui drasticamente, em virtude da total alteração das suas propriedades físico-mecânicas.

Nas estruturas em tabique sob condições de incêndio, é desconhecido qualquer tipo de documento que nos permita avaliar o seu comportamento. Contudo, pode-se fazer uma primeira avaliação a cada material, de forma individual, com auxílio dos seus respectivos regulamentos e documentos que regem o comportamento ao fogo destes materiais.

Não se sabe quantificar o quanto estas estruturas suportam a exposição ao fogo, mas sabe-se que tem um bom comportamento, fica o exemplo, na Figura 3, do aspecto de uma parede de tabique após a ocorrência de um incêndio. Pela observação da figura, conclui-se que apesar dos danos causados pelo fogo, a estrutura não colapsa.



Figura 3 - Parede de tabique após exposição ao fogo [11].

Como nota final, prevê-se que paredes interiores construídas em tabique não deixem que as chamas se propaguem de uns compartimentos para outros, visto que a terra é, neste contexto, um material praticamente estanque, e incombustível.

## **2.2 NORMAS E REGULAMENTOS**

### **2.2.1 Legislação e Normas envolvidas no estudo da reação ao fogo**

As estruturas expostas ao fogo em Portugal são estudadas, fundamentalmente, com base na Regulamentação Nacional de Segurança contra Incêndios em Edifícios (SCEI) e a NP EN 1995-1-2 [12]. A norma em questão destina-se a projetos estruturais em edifícios expostos ao fogo. Com estes regulamentos, são avaliadas e quantificadas a capacidade resistente de ações mecânicas e térmicas de estruturas, em condição de incêndio. A finalidade desta norma e toda a legislação referente a estruturas expostas ao fogo é de salvaguarda de bens e pessoas, limitando a propagação de riscos na ocorrência de um incêndio.

Os ensaios são elaborados com base em normas europeias que permitem a caracterização dos elementos expostos ao fogo. Neste âmbito normativo, fazem parte integrante a EN 1363-1 [13], relativa aos requisitos gerais para ensaio à resistência ao fogo, a EN 1364 - 1 [14] referente aos ensaios de resistência ao fogo de paredes não estruturais, e a EN 13501-2 [15], inerente à classificação segundo os ensaios de reação ao fogo, excluindo instalações de ventilação.

Antes da análise do conteúdo envolvido nas normas referidas no parágrafo anterior, convém referir alguns parâmetros aplicados na caracterização da resistência ao fogo.

A tabela 1 apresenta, de uma forma resumida, as características da resistência ao fogo dos elementos.

Tabela 1 – Denominação das características da resistência ao fogo.

R	Capacidade de suporte de carga
E	Estanquidade a chamas e gases quentes
I	Isolamento térmico
W	Radiação
M	Ação mecânica
C	Fecho automático
S	Passagem de fumo
P ou PH	Continuidade de fornecimento de energia e/ou de sinal
G	Resistência ao fogo de fuligem
K	Capacidade de proteção contra incêndios

### 2.2.2 Classificação segundo os ensaios de resistência ao fogo (EN 13501–2)

A norma europeia (EN 13501-2) especifica o procedimento para a classificação dos produtos e elementos de construção, no que respeita à resistência ao fogo, com base nos testes de estanquidade às chamas e isolamento térmico.

No seguimento desta norma, a classificação dos elementos de construção, resulta de uma combinação de letras, seguida de números que representam o tempo (minutos completos) em que o material cumpre com os requisitos regulamentares no âmbito da exposição ao fogo. Ao apresentar o tempo resultante do ensaio, o valor indicado será aquele que na tabela lhe corresponde por defeito (por ex.: se o valor do ensaio corresponder a 35 minutos, o valor indicado será de 30, de acordo com as especificações que constam nos quadros do anexo II do decreto-lei 220/2008).

No anexo II do referido decreto-lei, também estão incluídos quadros que representam as classes de resistência ao fogo padrão para produtos de construção. A Tabela 2 apresenta a classificação em que se podem enquadrar as paredes em tabique.

Tabela 2 - Elementos ou partes de obras sem funções de suporte de carga e produtos [16].

Aplicável a divisórias (incluindo divisórias com porções não isoladas).									
Norma(s)	EN 13501-2; EN 1364-1; EN 1992-1.2; EN 1993-1.2; EN1995-1.2; EN 1996-1.2; EN 1999-1.2								
Classificação	Duração em (minutos)								
E.....	15	20	30	45	60	90	120	180	240
EI.....		20	30		60	90	120		
EI-M.....			30	60	90	120			
EW.....		20	30	60	90	120			
Aplicável a fachadas e paredes exteriores (incluindo elementos envidraçados).									
Norma(s)	EN 13501-2; EN 1364-3,4,5,6; EN 1992-1.2; EN 1993-1.2; EN1995-1.2; EN 1996-1.2; EN 1999-1.2								
Classificação	Duração em (minutos)								
E.....	15		30		60	90	120		
EI.....	15		30		60	90	120		
EW.....		20	30		60				

### 2.2.3 Parâmetros a avaliar na resistência ao fogo

A resistência ao fogo de um elemento é avaliada pelo tempo que decorre um processo térmico normalizado a que este é submetido (curva de incêndio padrão ISO 834), até ao instante em que ele deixa de satisfazer as funções para o qual foi projetado. Este processo é parte integrante dos regulamentos de resistência ao fogo de elementos estruturais ou de compartimentação [16].

As estruturas sob ação do fogo podem ser classificadas da seguinte forma:

- Para-chamas (**E**) – As estruturas devem ser concebidas e executadas para que não permitam nenhuma falha de estanquidade, a fim de prevenir a passagem de chamas e de gases no elemento, assim como o aparecimento de chamas na face não exposta.
- Estável ao fogo (**R**) – As estruturas devem ser concebidas e executadas para que mantenham as suas funções de capacidade de carga durante a exposição ao fogo.
- Isolamento térmico (**I**) – As estruturas devem ser concebidas e executadas para que não haja perda de isolamento, a fim de limitar a subida de temperatura na face exposta, dentro dos limites especificados.

- Corta-fogo (**EI**) – As estruturas denominadas de corta-fogo resultam da combinação das classificações de para-chamas e isolamento térmico.
- Elementos a que se exige simultaneamente funções de suporte e de compartimentação (**REI**) – Para um elemento a que se impõem, simultâneamente, funções de suporte e de compartimentação, admite-se que estas funções deixam de ser cumpridas, quando no decurso do processo térmico deixam de reunir as exigências de estabilidade, de estanquidade e de isolamento térmico.

São contabilizadas 10 classes que classificam os elementos expostos ao fogo, correspondentes aos escalões de tempo a seguir indicados, em minutos, pelo limite inferior de cada escalão [16]:

**15    20    30    45    60    90    120    180    240    360**

A representação da classe de resistência ao fogo de um elemento de construção é estabelecida pela indicação do símbolo que designa a qualificação do elemento, seguida da indicação do escalão de tempo em que é válida a qualificação atribuída.

#### **2.2.4 Segurança contra Incêndios em Edifícios (Decreto-Lei nº 220/2008).**

O DL nº 220/2008 apresenta, em anexo, tabelas que definem as classes de resistência ao fogo padrão dos elementos de construção, em concordância com as leis comunitárias. A resistência ao fogo é um indicador do comportamento dos elementos, e avalia-se pelo tempo que decorre desde o início de um processo térmico normalizado a que um elemento é submetido até ao momento em que deixa de satisfazer as exigências relacionadas com as suas referidas funções [16].

A tabela 3 apresenta a resistência ao fogo de produtos de construção com a relação das especificações do LNEC e as constantes do Sistema Europeu.

Tabela 3 – Resistência ao fogo de produtos de construção [16].

Função do elemento	Classificação de acordo com o Sistema Europeu
Suporte de cargas	R
Suporte de cargas e estanquidade a chamas e gases quentes	RE
Suporte de cargas e estanquidade a chamas e gases quentes e isolamento térmico	REI
Estanquidade a chamas e gases quentes	E
Estanquidade a chamas e gases quentes e isolamento térmico	EI

### 2.2.5 Portaria nº 1532/2008

Ao abrigo desta portaria, são tidos em conta elementos estruturais de edifícios. Estes devem conter uma resistência ao fogo que garanta as funções de suporte de cargas, de isolamento térmico e de estanquidade durante a fase de combate ao incêndio, assim sendo, devem possuir a resistência ao fogo padrão mínima indicada na Tabela 4.

No que respeita a elementos de compartimentação, devem funcionar como separadores de locais de risco e garantir as classes de resistência ao fogo padrão indicadas na Tabela 5. As paredes em tabique terão que garantir a resistência ao fogo padrão mínima presente na Tabela 5, conforme a função para a qual elas forem projetadas.

Tabela 4 – Resistência ao fogo padrão mínima de elementos estruturais de edifícios [16].

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

Tabela 5 – Resistência ao fogo padrão mínima dos elementos de envolvente [16].

Elementos de construção	Resistência ao fogo padrão mínima dos elementos de envolvente de diferentes locais de risco:				
	B	C	D	E	F
Paredes não resistentes.....	EI 30	EI 60	EI 60	EI 30	EI 90
Pavimentos e paredes resistente.....	REI 30	REI 60	REI 60	REI 60	REI 90
Portas.....	E 15 C	E 30 C	E 30 C	E 15 C	E 45 C

## 2.2.6 EN 1363-1 – Ensaios de Resistência ao Fogo: Requisitos Gerais

A EN 1363-1 [13] estabelece os princípios gerais, que determina a resistência ao fogo de elementos de construção quando submetidos a um aquecimento padronizado. Este documento incide na metodologia comum aos vários ensaios específicos, relativos aos diversos elementos a ensaiar.

Os resultados de ensaio podem ser diretamente aplicados aos elementos de construção com características semelhantes aos ensaiados. Na aplicação direta, consideram-se as variações obtidas no ensaio, de modo a que este continue cumprindo com os requisitos de resistência ao fogo. As regras, para cada tipo de ensaio, são parte integrante da presente norma. As variações que se encontram fora do campo de aplicação direta da norma determinar-se-ão por extrapolação de resultados. Da aplicação direta ou extrapolações de resultados do teste, advém a classificação do elemento, [13].

### 2.2.6.1 Equipamentos de ensaio

Em conformidade com a Norma EN 1363-1 [13], os equipamentos necessários à realização dos ensaios de resistência ao fogo, são:

- Um forno adequado à avaliação da resistência ao fogo dos elementos de construção à temperatura e pressão exigidos pela norma;

- Um equipamento capaz de regular a temperatura no interior do forno, de acordo com as especificações normativas;
- Um equipamento para controlar e monitorizar a pressão dos gases dentro do forno;
- Um bastidor, no qual seja possível construir o elemento a testar, onde se verifiquem as condições de adaptação ao forno, de modo a que as condições de aquecimento, pressão e suporte de amostras sejam apropriadas;
- Equipamento para a medição da temperatura no interior do forno e na face não exposta da amostra;
- Equipamento para a medição da deformação da amostra a testar;
- Equipamento para avaliar o isolamento às chamas e gases, e o cumprimento dos critérios de comportamento;
- Aparelho para a medição do tempo decorrido;
- Equipamento de medição da concentração de oxigénio e de gases no interior do forno.

#### **2.2.6.2 Forno**

O forno de ensaio deve desempenhar as condições normalizadas para a exposição ao fogo. Deve ser constituído por um revestimento com uma densidade inferior a  $1000 \text{ Kg/m}^3$ , uma espessura mínima de 50 mm, e deve constituir menos de 70% da superfície interna exposta ao fogo.

#### **2.2.6.3 Termopares**

Os termopares são sensores utilizados para a medição de temperaturas. Eles cobrem um intervalo de temperaturas bastante extenso, que vai de  $-200$  a  $2300 \text{ }^\circ\text{C}$  aproximadamente, com boa precisão. Como representado na Figura 4, são compostos por dois filamentos de metais de natureza diferente, soldados numa extremidade, denominada por junta de medição, e na outra, onde fecha o circuito, por junta de referência.

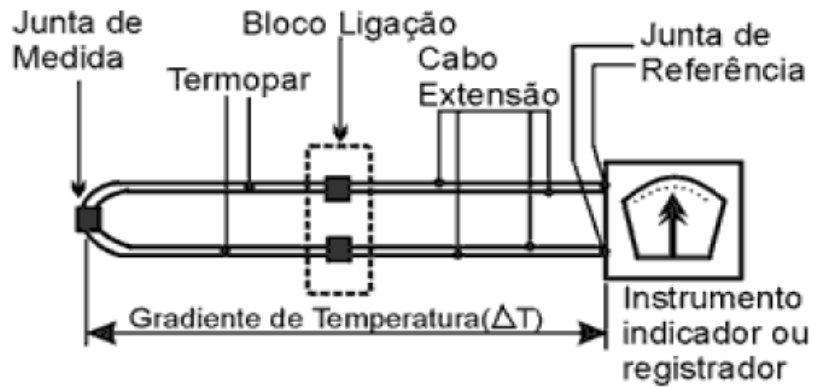


Figura 4 - Representação esquemática de um termopar [17].

Dos diversos termopares existentes no mercado, são apresentados na Tabela 6 alguns dos mais usuais neste tipo de ensaios.

Tabela 6 – Termopares mais usuais [17].

<b>Tipo de termopar</b>	<b>Termoelemento positivo</b>	<b>Termoelemento negativo</b>
T	Cobre	Cobre-Níquel
J	Ferro	Níquel-Alumínio
E	Níquel-Crômio	Cobre-Níquel
K	Níquel-Crômio	Níquel-Alumínio
N	Nicrosil *	Nisil **
R	13% Ródio / Platina 87%	Platina

\* Nicrosil-liga de 84,5%Ni (Níquel) 14 % Cr (Crômio) e 1,5%Si (Silício).  
 \*\* Nisil-liga de 95,4%Ni (Níquel), 4,4%Si (Silício) e 0,1 %Mg (Magnésio).

De todos os termopares apresentados na Tabela 6, o do tipo “K” é o mais usual nos ensaios de resistência ao fogo dos elementos de construção, por ser recomendável em atmosfera oxidante ou inertes. A sua capacidade de leitura máxima ronda os 1100 °C. As características do termopar do tipo K são apresentadas na Tabela 7.

Tabela 7 – Características do termopar do tipo K.

Características	Termopar tipo K
Temperatura mínima	-200
Temperatura máxima	+1100
Temperatura máxima no ponto	+1300
Exatidão	$\pm 2,5 \text{ } ^\circ\text{C}$ ou $0,0075 \times T$ ( T - temperatura medida em $^\circ\text{C}$ )
Escala de temperatura	-40 até +200

#### 2.2.6.4 Termopares do forno

Os termopares do forno são termômetros de placa, compostos por uma chapa grossa em aço especial, dobrada com um material isolante, e nela encontra-se fixo um par termoelétrico, conforme apresentado na Figura 5.



Figura 5 – Pormenor da placa de um termopar [17].

#### 2.2.6.5 Termopares da face não exposta

Os termopares de face não exposta, como o próprio nome indica, são utilizados para medir as temperaturas da face não exposta. Os fios do termopar são soldados a um disco de cobre segundo os critérios da norma CEI 584-1. Cada termopar deve ser coberto com uma placa de material inorgânico (Figura 6).



Figura 6 – Exemplo de união de um termopar de superfície e a placa de isolamento [17].

#### **2.2.6.6 Pressão no forno**

A pressão no interior do forno deve ser controlada por um sensor (Figura 7), de modo a que o gradiente de pressão não exceda os 8,5 Pa por metro de altura. O sistema de medição de pressão não considera as flutuações rápidas presentes no interior do forno.



Figura 7 – Sensor de pressão [17]

#### **2.2.6.7 Estanquidade e isolamento às chamas**

Num elemento de compartimentação, o critério de estanquidade deve ser avaliada por um tampão de algodão (Figura 8), realizando também observações sobre a amostra a ensaiar e fazendo o registo da presença de chamas constantes (caso a chama prevaleça mais que 10 segundos na face não exposta, considera-se o ensaio por terminado). O tampão de

algodão deve ser colocado dentro de um suporte contra a superfície da amostra com um espaçamento de 30 mm. Este permanece dentro do suporte durante 30 segundos, ou até que se produza ignição. Caso haja carbonização do algodão sem ocorrência de combustão, este fenómeno não será tido em conta. Pode-se fazer pequenos ajustes na posição do algodão para que se consiga alcançar o máximo efeito dos gases. O operador de ensaio também pode realizar ensaios para avaliar o isolamento às chamas e gases da amostra de ensaio. Tal ocorrência verifica-se através da aplicação do algodão na região onde possa ser localizada uma potencial falha. A carbonização do tampão pode evidenciar uma falha iminente, pelo que deverá ser feita a substituição do tampão de algodão, a fim de confirmar a falha ao isolamento às chamas e gases. Tem que ser feito o registo do tempo em que se origina a ignição e o local onde ocorre [17]. Caso se verifique a presença de gases na face não exposta, o operador deverá aproximar uma chama, e se arder num período de 20 segundos após a retirada da mesma, dar-se-á por terminado o ensaio devido ao não cumprimento do critério de estanquidade e isolamento às chamas e/ou gases.



Figura 8 – Tampão de algodão [17].

No caso de se utilizarem calibres de abertura, o tamanho de abertura na superfície da amostra deverá ser controlado em função do ritmo de deterioração da mesma [17]. São utilizados dois tipos de calibres de abertura de forma alternativa, de modo a que:

- O calibre de abertura de 6 mm passe através da amostra de ensaio, de maneira a que esta penetre no interior do forno e possa ser deslocado numa distância de 150 mm ao longo da abertura;

- O calibre de abertura de 25 mm possa passar através da amostra de maneira a penetrar no forno.

#### 2.2.6.8 Condições de ensaio

Segundo as normas internacionais que regem o controlo de temperatura em função do tempo no ensaio dos elementos expostos ao fogo, deve ser feita a análise às diferenças admissíveis entre os valores da evolução da temperatura padronizada e a que resulta do próprio ensaio.

Segundo a ISO 834, dispõe-se das seguintes tolerâncias:

- 15 % para tempos entre 5 min e 10 min;
- $[15 - 5(t - 10)]$  % para tempos entre 10 min e 30 min;
- $[5 - 0,083(t - 30)]$  % para tempos entre 30 min e 60 min;
- 2,5 % para tempos maiores que 60 min.

A mesma norma exige ainda que a temperatura medida em qualquer dos termopares do forno, após decorridos os primeiros 10 min, não difira mais que 100 °C da curva de incêndio padrão.

Segundo a ASTM E119, tolera-se:

- 10 % até o tempo de 1 h;
- 7,5 % entre os tempos de 1 h e 2 h;
- 5 % para tempos superiores a 2 h.

A equação que traduz os desvios de forma percentual entre a curva de incêndio obtida no ensaio e a padronizada é dada pela seguinte equação:

$$d_e = \frac{A - A_s}{A_s} \times 100 \quad [1.0]$$

Em que:

$d_e$  é o desvio (em %);  $A$  a área situada abaixo da curva de temperatura/tempo obtida no forno;  $A_s$  é a área situada abaixo da curva de temperatura/tempo normalizada.

### **2.2.6.9 Procedimentos de Segurança**

Os ensaios dos elementos expostos ao fogo devem respeitar alguns critérios de segurança, devem cumprir com os seguintes requisitos:

- No local de ensaio, devem ser verificadas temperaturas de  $20\text{ °C} \pm 10\text{ °C}$  antes do seu início. Durante este, a temperatura não deve aumentar mais que  $20\text{ °C}$ , nem baixar mais que  $5\text{ °C}$ . A leitura é feita por um termopar colocado a uma distância de 1 a 3 metros da face não exposta da amostra de ensaio, de modo a que não seja afetada pela radiação térmica vinda do forno de ensaio;
- O ensaio é iniciado quando são registadas temperaturas superiores a  $50\text{ °C}$  no interior do forno. Nesse preciso instante, inicia a contagem da duração do ensaio, e todos os sistemas (automáticos e manuais) devem entrar em funcionamento;
- Cinco minutos após iniciado o ensaio, as temperaturas registadas pelos termopares, devem assegurar a correta relação entre si;
- A pressão do forno deve continuamente ser registada ou em intervalos não superiores a um minuto;
- Durante o período de exposição ao fogo, as leituras feitas pelos termopares devem ser registadas em intervalos não superiores a um minuto;
- A deformação produzida na amostra a ensaiar deve ser feita por um equipamento laser e deve ser registada ao longo de todo o ensaio.

O ensaio pode ser finalizado quando se verificar um ou mais dos seguintes critérios:

- A obtenção dos critérios selecionados;
- A segurança dos técnicos e dos equipamentos presentes no laboratório;
- Petição do requerente do ensaio.

### **2.2.6.10 Critérios de comportamento**

Nos ensaios de elementos expostos ao fogo, podem ser avaliados os seguintes comportamentos:

- Capacidade de resistência;

- Estanquidade às chamas e gases;
- Isolamento térmico.

A capacidade de resistência define-se como o tempo em minutos, durante o qual, a amostra ensaiada mantém a sua capacidade de carga, sem exceder os limites de deformação e a respetiva velocidade de deformação, pré-estabelecidos pela norma EN 1363-1 [13]. O critério de velocidade de deformação só será aplicado quando a deformação da amostra ultrapassar o valor de  $L/30$ , em que  $L$  é o valor do vão do elemento a ensaiar.

A estanquidade às chamas e gases é avaliada pelo tempo em minutos, no qual a amostra mantém a sua função de compartimentação, sem verificar a presença de ignição do tampão de algodão, de penetração do calibre de abertura ou de chamas contantes.

Quanto ao isolamento térmico, é avaliado pelo tempo em minutos, no qual a amostra mantém as suas funções de separadora, sem desencadear temperaturas elevadas na face não exposta, de acordo com:

- O aumento da temperatura média sobre a temperatura média da face da amostra no início do ensaio não seja superior a 140 °C;
- O aumento da temperatura em qualquer ponto não ultrapasse a temperatura média inicial de 180 °C.

O critério de isolamento térmico não é verificado sempre que seja violado um dos critérios acima referidos.

## **2.2.7 Características dos incêndios**

Para que se torne possível a eclosão de um incêndio, é necessária a ação de três fatores em simultâneo: uma fonte de calor (que provoca a reação), o combustível (que arde) e o comburente (que permite a combustão, por ex.: o oxigénio). O início do incêndio só acontece quando o combustível e o comburente estão suficientemente quentes [18]. O incêndio depende de certos parâmetros físicos, assim como:

- Densidade de carga de incêndio;
- Propriedades das paredes envolventes do compartimento de incêndio;
- Condições de arejamento (grandes aberturas de ventilação levam a incêndios rápidos e severos).

### 2.2.8 Curvas nominais

Para a classificação dos elementos pela normalização, é necessária a utilização de curvas padronizadas de aquecimento. Estas curvas são convencionais, representadas por uma fórmula simplificada, das quais não dependem o tipo de edifícios ou a sua dimensão. Simulam uma situação de incêndio, porém, com pouca realidade física. São utilizadas em qualquer país, como uma plataforma de entendimento e comparação de resultados experimentais.

As curvas de incêndio padrão, aplicadas neste tipo de ensaios, são respetivamente a ISO 834, a de Hidrocarbonetos, a ASTM E119 e a curva exterior.

A curva de incêndio padrão ISO 834 é utilizada para a determinação da resistência ao fogo de elementos estruturais e é dada pela seguinte equação:

$$\theta = 20 + 345 \log_{10}(8t + 1)$$

[1.1]

Onde:  $\theta$  é a temperatura média do forno em Graus Celsius;  $t$  o tempo em minutos.

A curva ASTM 119 é a curva usada nos Estados Unidos da América para ensaios, e apresentam um comportamento idêntico à ISO 834 [16]. Nota-se alguma discrepância, quando atingidas temperaturas superiores a 900 °C. Esta curva é dada pela equação:

$$\theta = 750(1 - e^{(-3,79553\sqrt{t})} + 170,41\sqrt{t} + 20 \text{ °C}$$
 [1.2]

Onde:  $\theta$  é a temperatura média do forno em Graus Celsius;  $t$  o tempo em minutos.

A curva de incêndio de hidrocarbonetos, em relação às outras duas, é a única que apresenta uma subida abrupta nos primeiros minutos, quando atingidas temperaturas superiores a 400 °C. Esta curva é dada pela seguinte equação:

$$\theta = 1080(1 - 0,325e^{-0,167t} - 0,675e^{-2,5t}) + 20$$
 [1.3]

Onde:  $\theta$  representa a temperatura média do forno em Graus Celsius;  $t$  o tempo em minutos.

Por último, apresenta-se a curva de incêndio referente à face exterior do compartimento exposto ao fogo. Esta curva é traduzida pela seguinte equação:

$$\theta = 660(1 - 0,687e^{-0,32t} - 0,313e^{-3,8t}) + 20 \quad [1.4]$$

Onde:  $\theta$  a temperatura média do forno em Graus Celsius;  $t$  o tempo em minutos.

Na Figura 9, são apresentadas as curvas descritas.

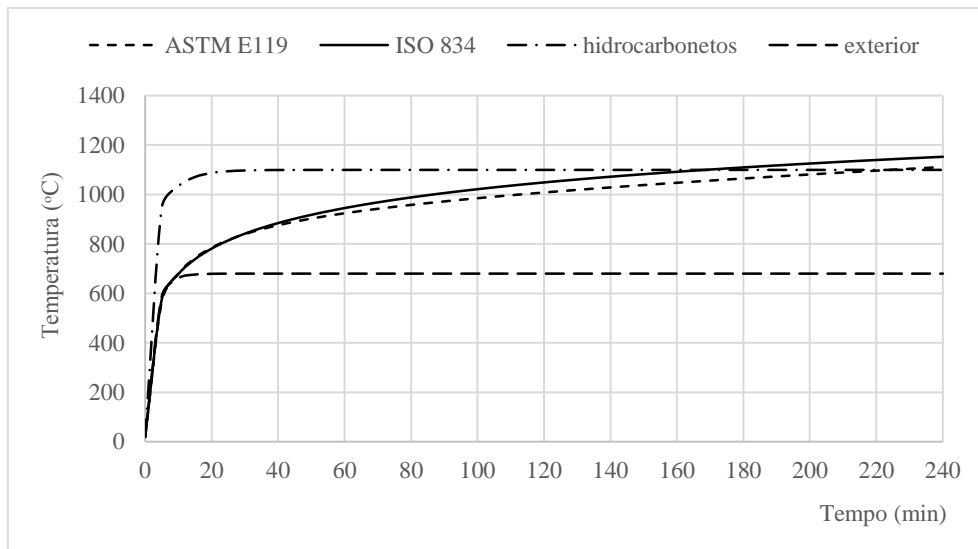


Figura 9 – Curvas nominais da temperatura em relação ao tempo.

Os valores apresentados na Figura 9 são transpostos para a Tabela 8, de forma a obter uma melhor percepção da evolução das curvas de incêndio.

Dos valores da Tabela 8, conclui-se que, a partir dos 180 minutos, as três curvas correspondentes à face exposta ao fogo, convergem para valores de temperatura muito aproximados.

Tabela 8 – Curvas de incêndio.

Tempo (min)	ISO 834 temperatura (° C)	ASTM E119 temperatura (° C)	Hidrocarbonetos temperatura (° C)	Exterior temperatura (° C)
0	20	20	20	20
5	576	568	948	588
10	678	680	1034	662
30	842	839	1098	680
60	945	924	1100	680
120	1049	1007	1100	680
240	1153	1110	1100	680

### 2.2.9 Materiais e seu comportamento térmico

Neste capítulo, são referenciados alguns aspetos sobre o comportamento ao fogo e propriedades térmicas dos materiais aplicados na construção de paredes em tabique. Este estudo será elaborado com recurso a normas europeias aplicadas neste contexto.

#### 2.2.9.1 Madeira

Na parte 1-2 do Eurocódigo 5 [12], referente ao cálculo da exposição da madeira ao fogo, define os procedimentos para determinação dos valores de cálculo da madeira em situação de incêndio. São apresentados alguns gráficos que caracterizam o comportamento da madeira sob ação do fogo.

Na Figura 10, apresenta-se a evolução do calor específico da madeira com o aumento da temperatura.

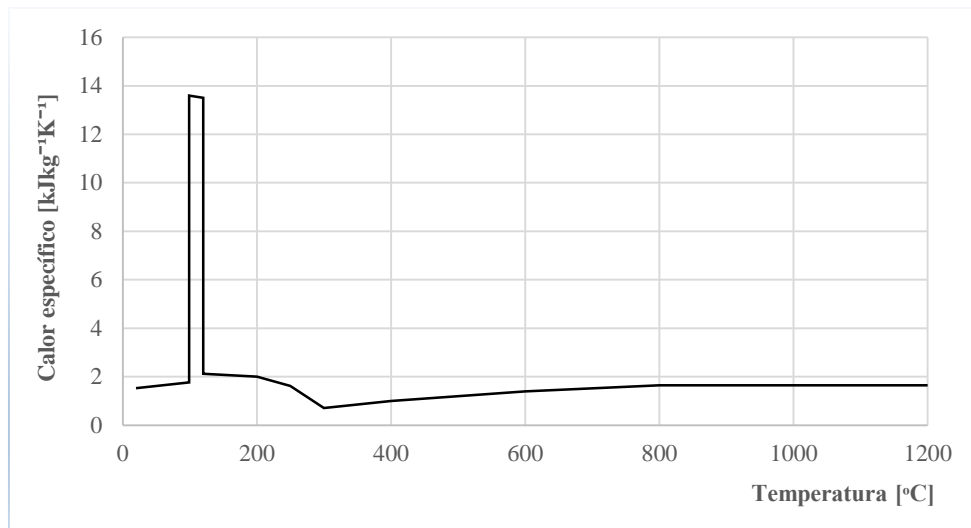


Figura 10 - Calor específico da madeira em função da temperatura [12].

Do gráfico da Figura 10, conclui-se que a madeira apresenta valores de calor específico baixos. Nota-se uma subida instantânea, seguida de uma descida acentuada na zona dos 100 °C. Este facto deve-se à libertação da água na madeira.

A evolução da condutividade térmica em função da temperatura é caracterizada no gráfico da Figura 11, que descreve este processo térmico.

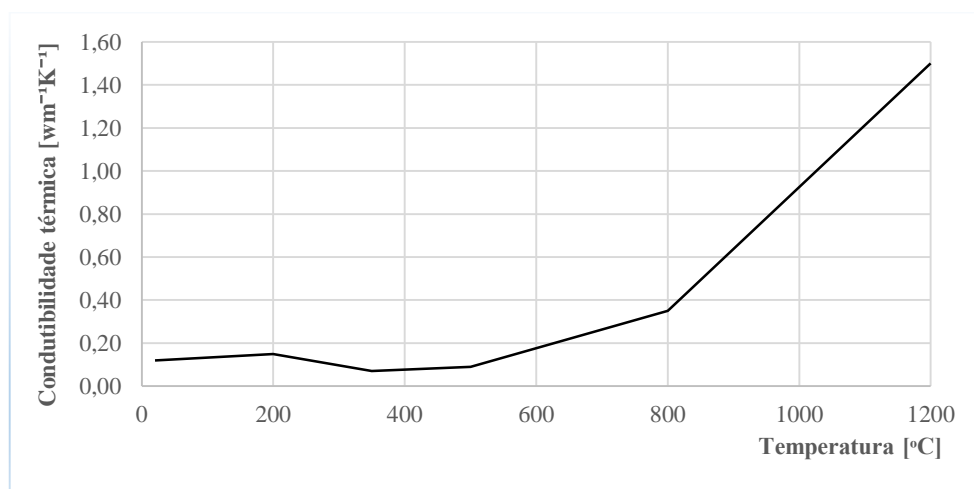


Figura 11 - Condutividade térmica da madeira em função da temperatura [12].

A trajetória descrita pela função da condutividade térmica em relação à temperatura justifica a baixa condutividade térmica sob a ação de elevadas temperaturas. Da avaliação do gráfico da Figura 11, ainda se pode concluir que no intervalo de 500 °C a 800 °C a condutividade térmica mantém uma evolução linear.

As propriedades da madeira sob ação do fogo também podem ser avaliadas pelo gráfico retirado do Eurocódigo 5, que relaciona a evolução da massa volúmica da madeira com o aumento de temperatura, Figura 12.

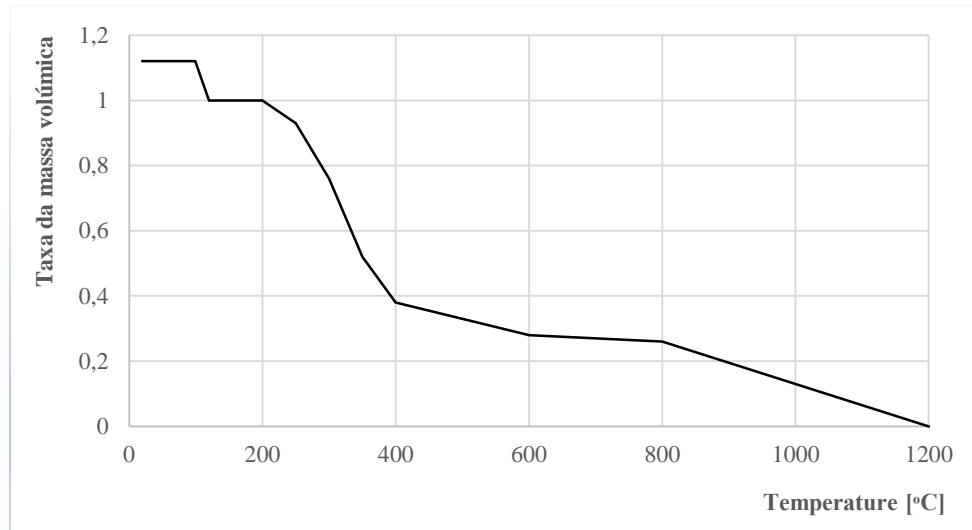


Figura 12 - Massa volúmica da madeira em função da temperatura, teor de água inicial de 12% [12].

Do gráfico da Figura 12, verifica-se que a massa volúmica vai diminuindo com o aumento de temperatura. Na zona dos 100 °C nota-se uma descida devido à perda da água contida no interior do material. Este gráfico foi elaborado para um teor de água de 12%, para outros teores, no mesmo contexto, a norma propõe uma tabela transversal a todos os teores de água, conforme a Tabela 9.

Tabela 9 - Calor Específico e Massa Volúmica da madeira seca [12].

Temperatura [°C]	Calor específico [kJ/kg K]	Massa Volúmica
20	1,53	1+w
99	1,77	1+w
99	13,60	1+w
120	13,50	1
120	2,12	1
200	2,00	1
250	1,62	0,93
300	0,71	0,76
350	0,85	0,52
400	1,00	0,38
600	1,40	0,28
800	1,65	0,26
1200	1,65	0
w - teor de água		

### 2.2.9.2 Solo

Dada a inexistência de regulamentação sob ação do fogo no solo em estudo, as propriedades do material serão estimadas conforme o Eurocódigo 6 [19] e Nguyen [20], tendo como referência o solo do tipo terra-cotta. A massa volúmica é considerada, igual a  $1290 \text{ kg/m}^3$  e a emissividade igual 0,85. A Figura 13 representa as propriedades adotadas neste trabalho para o calor específico e para a condutividade térmica da argamassa.

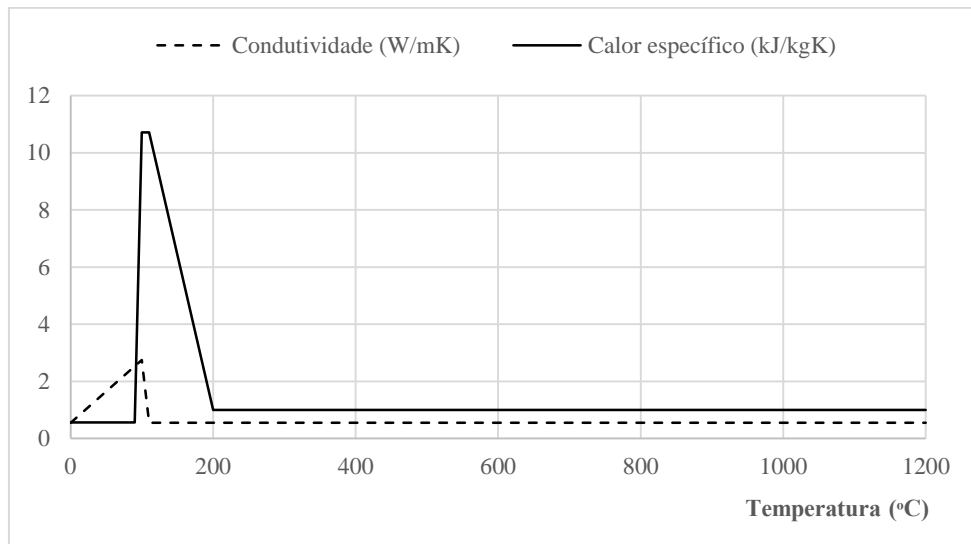


Figura 13 – Propriedades térmicas da argamassa terrosa.

As propriedades da argamassa terrosa apresentadas foram obtidas após a calibração do modelo numérico com os resultados experimentais. No Anexo A apresentam-se, em forma de tabelas, os valores considerados nas diferentes simulações realizadas deste estudo.

## **CAPÍTULO 3**

---

### **CARATERIZAÇÃO E REALIZAÇÃO DAS PAREDES DE TABIQUE**

#### **3.1 ESTUDO PRÉVIO DA COMPOSIÇÃO DA ARGAMASSA**

Inicialmente, todas as misturas foram elaboradas à base de solo e cal, tendo-se sempre o cuidado de tentar reproduzir o que realmente era aplicado neste tipo de paredes. Ao longo da construção dos modelos, algumas complicações surgiram, devido ao tipo de composição da argamassa. As paredes exigiam um longo tempo de secagem, o que não foi possível pela exigência de prazos a cumprir. Com a necessidade de acelerar o processo de execução, recorreu-se à inclusão de um ligante de cimento na mistura, isto porque a cal é um produto que endurece muito lentamente, pouco poroso e pouco permeável, com difícil e lenta recarbonatação que pode durar mais de 6 semanas a secar [21]. As referidas dificuldades existiram ao manusear as paredes para as tarefas de instrumentação. Devido à baixa resistência e à precária aderência ao suporte, sucederam alguns destacamentos do material de recobrimento. Para colmatar o sucedido, houve, então, a necessidade de adicionar cimento à mistura, de modo a garantir maior resistência e estabilidade.

##### **3.1.1 Mistura de solo argiloso**

No seguimento do estudo de argamassa, também se concebeu uma mistura constituída única e exclusivamente por solo argiloso misturado com água. No ato da aplicação da argamassa argilosa, o material exibiu excelentes propriedades, tanto a nível de trabalhabilidade como de plasticidade (Figura 14), dando um acabamento perfeito à parede.



Figura 14 – Parede de tabique preenchida com argamassa argilosa.

No entanto, o material apresenta fissuras durante o tempo de presa (1 dia após a aplicação). Como se pode comprovar na Figura 15, a fissuração desenvolve-se de forma notável num período curto de tempo. Foram várias as tentativas de fechar novamente as fissuras na parede, surgindo muitas novamente.



Figura 15 – Fissuração após 1 dia de aplicação da mistura argilosa.

O fenómeno de fissuração agrava-se com o tempo. Concluído o tempo de presa, e já em fase de endurecimento (3 dias após aplicação), a parede apresenta-se toda fissurada, Figura 16.



Figura 16 – Fissuração da parede após 3 dias de secagem.

Quanto à patologia que sucede nas paredes, deve-se à retração da argila, que poderá ser eliminada com a adição de ligantes na mistura. Dando ênfase ao que já foi dito em capítulos anteriores, o solo de eleição será o saibro, ficando só aqui a ressalva para estudos que possam advir no mesmo âmbito deste trabalho.

### **3.2 ENSAIOS PERLIMINARES**

O estudo da composição do material de enchimento surge da necessidade de encontrar uma mistura apropriada à parede de tabique, como tal, e em primeira instância, as propriedades do material serão estudadas e fundamentadas com valores já aferidos em trabalhos de investigação, desenvolvidos na Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro [22]. As misturas serão elaboradas à base de um solo de saibro com o tipo de granulometria representada na Figura 17.

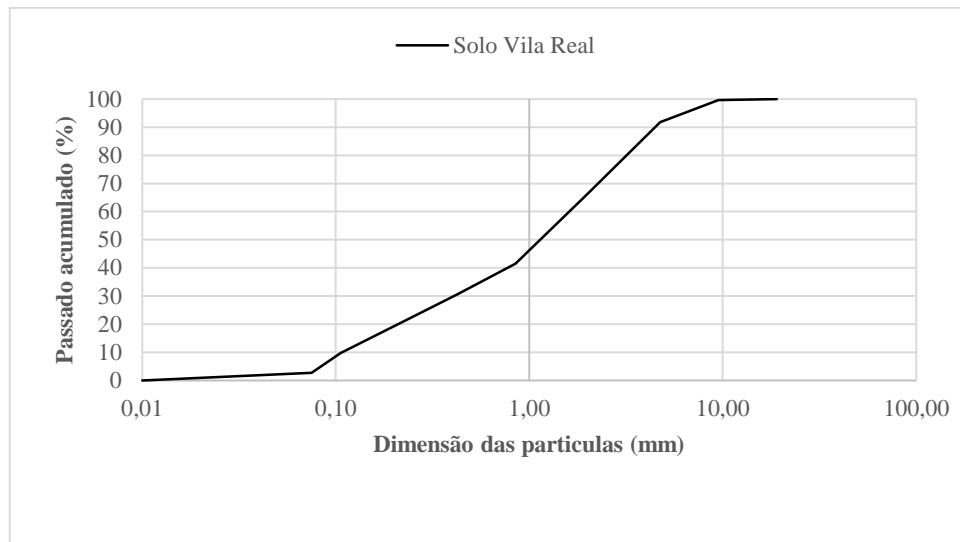


Figura 17 - Curva granulométrica do solo extraído de Vila Real [22].

Para uma melhor percepção do traçado da curva granulométrica, é construída a Tabela 10 com os valores da granulometria do solo.

Tabela 10 – Valores da curva granulométrica do solo extraído em Vila Real [22].

Nº Peneiro	Abertura da malha (mm)	Retido		Retido Acumulado (%)	Passado acumulado (%)
		(g)	(%)		
3/4"	19	0,00	0,00	0,00	100
3/8"	9,51	9,00	0,36	0,36	99,64
4	4,76	195,70	7,83	8,19	91,81
10	2,00	636,30	25,45	33,64	66,36
20	0,85	622,58	24,90	58,54	41,46
40	0,43	271,59	10,86	69,40	30,60
60	0,25	199,90	8,00	77,40	22,60
140	0,11	320,40	12,82	90,22	9,78
200	0,08	177,90	7,12	97,33	2,67

Como já referenciado, pretende-se obter um solo com granulometria equivalente ao material utilizado por outros investigadores [22], para tal, foi necessário realizar diversas argamassas segundo a composição e a curva granulométrica por eles encontrada. Na Figura 18 propõe-se o traçado da curva granulométrica do solo empregado na mistura de argamassa terrosa.

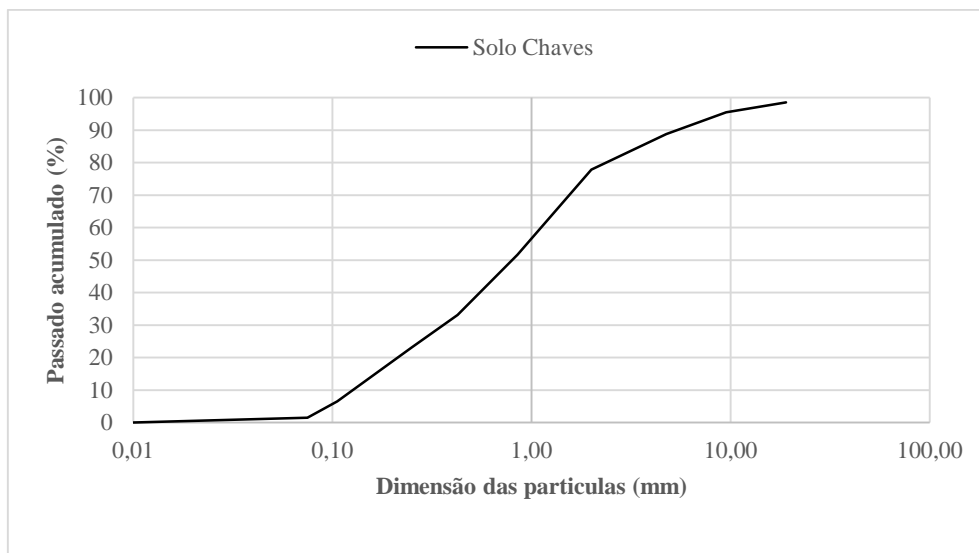


Figura 18 – Valores da curva granulométrica do solo extraído em Chaves.

Estabelecendo a analogia com o solo de Vila Real, na Tabela 11, apresentam-se os valores que regem o traçado da curva granulométrica do solo de Chaves.

Tabela 11 – Valores da curva granulométrica do solo extraído em Chaves.

Nº Peneiro	Abertura da malha (mm)	Retido		Retido Acumulado (%)	Passado acumulado (%)
		(g)	(%)		
3/4"	19,00	13,60	1,43	1,43	98,57
3/8"	9,51	29,50	3,11	4,54	95,46
4	4,76	63,60	6,70	11,24	88,77
10	2,00	103,50	10,90	22,14	77,87
20	0,85	221,80	26,21	48,35	51,66
40	0,43	156,50	18,49	66,84	33,17
60	0,25	85,60	10,11	76,95	23,05
140	0,11	140,20	16,59	93,54	6,49
200	0,08	42,60	5,03	98,57	1,45

Na Figura 19 apresentam-se as curvas granulométricas do solo recolhido pelos investigadores da UTAD e o solo recolhido para a realização deste estudo.

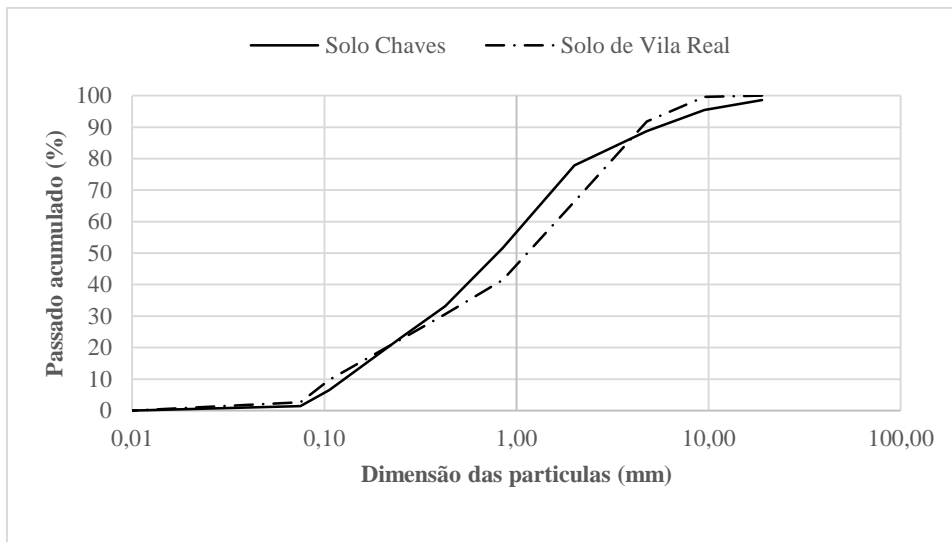


Figura 19 - Valores da curva Granulométrica do solo de Vila Real e do solo de Chaves.

Na Figura 19, verifica-se que o resultado da sobreposição dos dois traçados é muito semelhante, pelo que, fica validado o solo para a elaboração da argamassa.

A Figura 20 representa o local da extração do solo adquirido para a mistura.



Figura 20 – Fotogrametria do local de extração do solo (fonte: *Google-maps*).

Feita a recolha do solo e a respetiva análise granulométrica, o material segue para um processo de peneiração, passando por um peneiro de 2 [mm] de malha quadrada (peneiro nº10 da série ASTM). A escolha do peneiro é feita tendo em conta a dimensão máxima do agregado adaptado à composição das argamassas, Figura21.



Figura 21 – Peneiração do solo.

Terminado o processo de peneiração, prossegue-se para a composição da mistura da argamassa.

Tabela 12 – Quantidade dos constituintes para a mistura da argamassa terrosa [22].

Mistura	Quantidade dos constituintes			
	Solo (g)	Água (ml)	Cal apagada (g)	Cimento Portland (g)
1	6000 (100 %)	1200	0	0
2	6000 (100 %)	1050	0	0
3	6000 (100 %)	900	0	0
4	6000 (100 %)	975	0	150 (2,4%)
5	6000 (100 %)	1150	300 (4,8%)	0
6	6000 (100 %)	1200	480 (7,4%)	0

Em concordância com os critérios da EN 196 -1 [23], após a mistura, a argamassa é colocada em provetes prismáticos num período de secagem de 28 dias (Figura 22).



Figura 22 – Provete após 28 dias de secagem.

Da Figura 22, comprova-se que o resultado da mistura não é aceitável, os provetes carecem de resistência mecânica, pelo que não será possível validar as misturas apresentadas na Tabela 12. De notar que não foram avaliadas as propriedades mecânicas dos provetes devido à sua fragilidade. Em alternativa, é feito um estudo da composição da argamassa em laboratório, de forma empírica. Após algumas tentativas de ajuste, entende-se que a composição adequada deve conter a percentagem em massa dos seguintes materiais:

- 80 % solo do tipo saibro;
- 8% cimento Portland de calcário CEM II/ B-L classe 32,5N;
- 12% cal hidratada.

Em conclusão, a argamassa é constituída por um traço em massa de 1:1,5:10 (CIMENTO +CAL HIDRATADA + SOLO).

Na Tabela 13 descrevem-se as proporções de todos os constituintes envolvidos na mistura da argamassa terrosa.

Tabela 13 – Mistura da argamassa terrosa.

Mistura	Quantidade dos constituintes			
	Solo (g)	Cal Hidratada (g)	Cimento Portland (g)	Água (ml)
1	6000	900	600	1350

**Nota:** Cal apagada, também pode ser designada por cal hidratada.

Com esta mistura, pretende-se elaborar uma argamassa apropriada à estrutura de madeira da parede em tabique, que contenha uma boa trabalhabilidade, boa resistência mecânica e uma boa aderência. A Figura 23 apresenta o resultado da argamassa após a amassadura.



Figura 23 – Resultado da argamassa após a amassadura.

Feita a amassadura, a argamassa é colocada em 6 moldes prismáticos para a elaboração dos provetes de ensaio, Figura 24 a). A argamassa permanece em moldes por um período de 24 horas. Terminado esse intervalo de tempo, os provetes são desmoldados e expostos à temperatura ambiente até completar o seu tempo de secagem, Figura 24 b).



a) Moldagem e compactação



b) Desmoldagem dos provetes

Figura 24 – Provetes de argamassa terrosa.

Finalizado o período de secagem, os provetes são submetidos a ensaios de compressão e flexão, para avaliar as propriedades mecânicas da argamassa (NP EN 196-1). O material é inicialmente submetido ao ensaio de flexão (Figura 25 a), seguido do ensaio de compressão, Figura 25 b).



a)

b)

Figura 25 - a) Ensaio à flexão; b) Ensaio à compressão.

Efetuosos os ensaios dos provetes, registam-se na Tabela 14 os respetivos resultados.

Tabela 14 – Tensão de rotura à compressão e à flexão.

Argamassa	Ensaio à flexão	Ensaio à compressão	
		1	2
Proвете	Força (N)	Força (N)	Força (N)
1	752	7.030	6824
2	732	6.524	6788
3	732	7.018	7018
4	660	6.800	6752
5	752	7.330	7004
6	684	5.800	5644
Média	<b>732</b>	<b>6909</b>	<b>6806</b>
Tensão média de resistência à compressão (MPa)	<b>4,29</b>		
Tensão média de resistência à flexão (MPa)	<b>0,46</b>		

A Tabela 14 permite verificar que nos 6 provetes ensaiados, a argamassa caracteriza-se com uma tensão média de resistência à flexão de 0,46 MPa e uma tensão média de resistência à compressão de 4,29 MPa.

### 3.3 EXECUÇÃO DAS PAREDES EM TABIQUE

A estrutura de parede em tabique é construída em madeira de Pinho nacional, com medidas adaptadas tendo em atenção as construções em tabique existentes na Associação de Municípios do Alto Tâmega, Figura 26, [22].

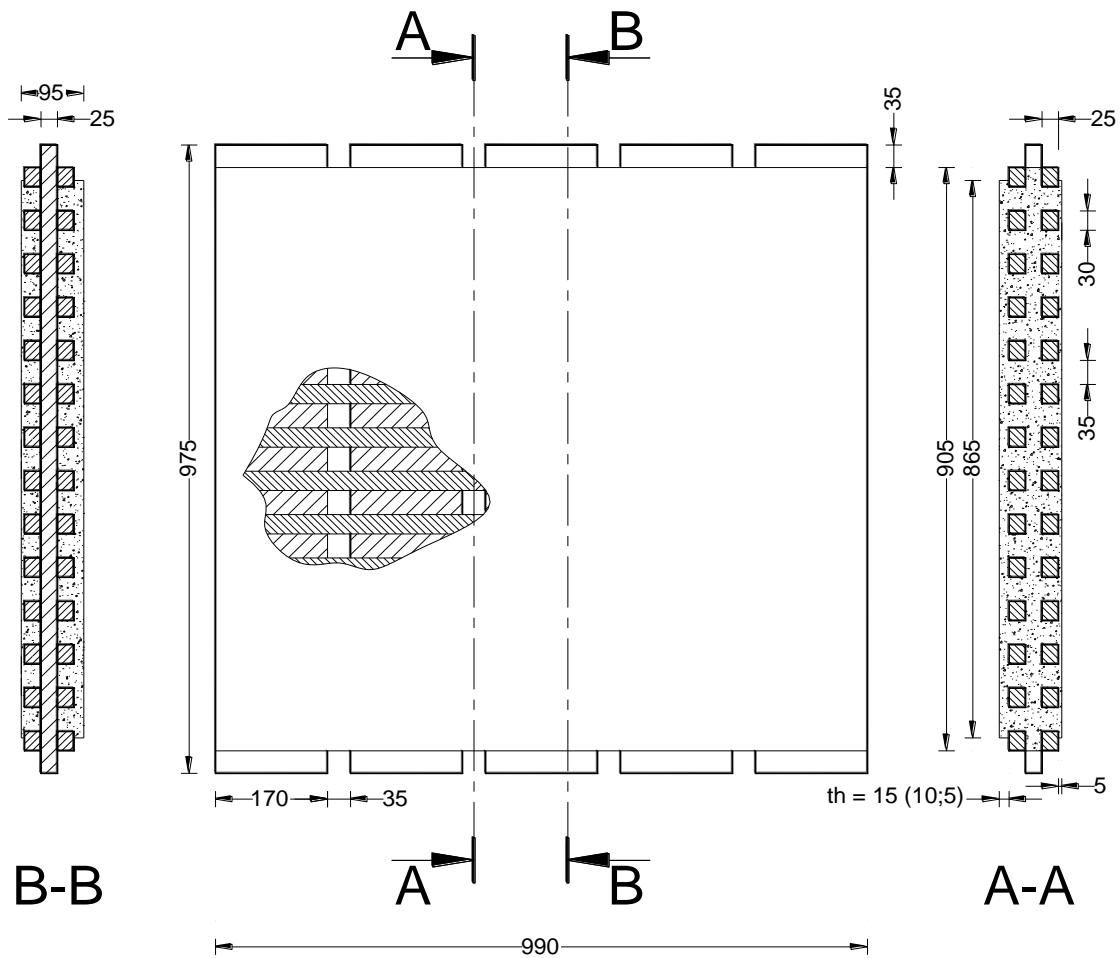


Figura 26 – Esquema cotado do modelo da parede de tabique.

Idealizado e projetado o modelo da parede em tabique, segue-se a elaboração da estrutura de madeira à escala real (Figura 27). Constroem-se três modelos de parede (Parede Teste, Parede I e Parede II) diferindo entre eles o recobrimento da face interior, respetivamente de 15 [mm]; 10 [mm]; 5 [mm], com 5 [mm] na face exterior em todos os modelos de parede.



Figura 27 – Construção da estrutura de madeira da parede em tabique.

Construída a estrutura de madeira, é aplicado o enchimento com argamassa bastarda, concebida para o efeito. O enchimento é feito em duas fases:

- 1º - Preenchimento de todos os espaços vazios da estrutura de madeira com argamassa bastarda até à superfície do ripado de madeira (Figura 28 a);
- 2º - Recobrimento da parede com o respetivo acabamento (Figura 28 b);



a)



b)

Figura 28 – a) Enchimento com argamassa bastarda; b) Recobrimento e acabamento com argamassa bastarda.

### 3.4 INSTRUMENTAÇÃO DAS PAREDES DE TABIQUE

A parede é instrumentada com termopares, respeitando as regras de disposição imposta pela EN 1364-1 [14], referente à resistência ao fogo de paredes não estruturais. A disposição dos termopares na face não exposta é feita segundo o ponto 9.1.2.2 a) da presente norma, que estabelece a colocação de cinco termopares de disco para leitura da temperatura média na face não exposta da parede, dispendo de um ao centro da parede, e os quatro restantes, a cada metade das quatro partes da face. Para a leitura e avaliação do comportamento ao fogo da parede, são colocados a diferentes profundidades da secção transversal, termopares do tipo K, com os filamentos unidos nos pontos onde são feitas as leituras. A localização dos termopares da parede é esquematizada na Figura 29.

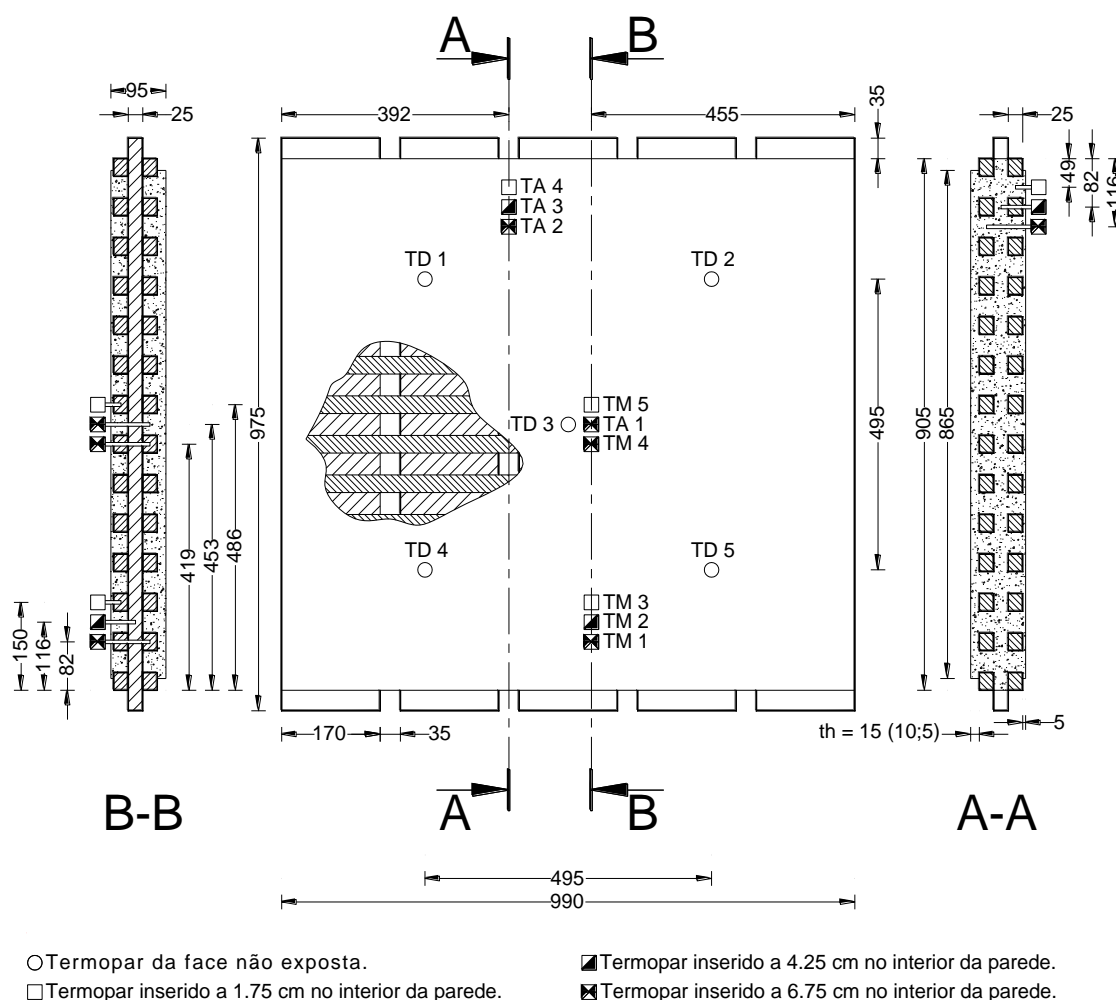


Figura 29 – Posicionamento dos termopares.

Numa primeira fase, são feitos os furos a diferentes profundidades para a introdução dos termopares internos do tipo K, utilizados para registo das temperaturas na argamassa (TA)

e na madeira (TM), de acordo com o esquematizado na Figura 29. De forma a garantir a posição e a qualidade no ponto em que se quer fazer a leitura, os espaços vazios entre o fio termopar e o orifício são preenchidos com massa térmica (thermocouple putty), evitando o contacto com temperaturas do ambiente da envolvente. O processo de instrumentação é feito de igual modo para os três modelos de parede, Figura 30.

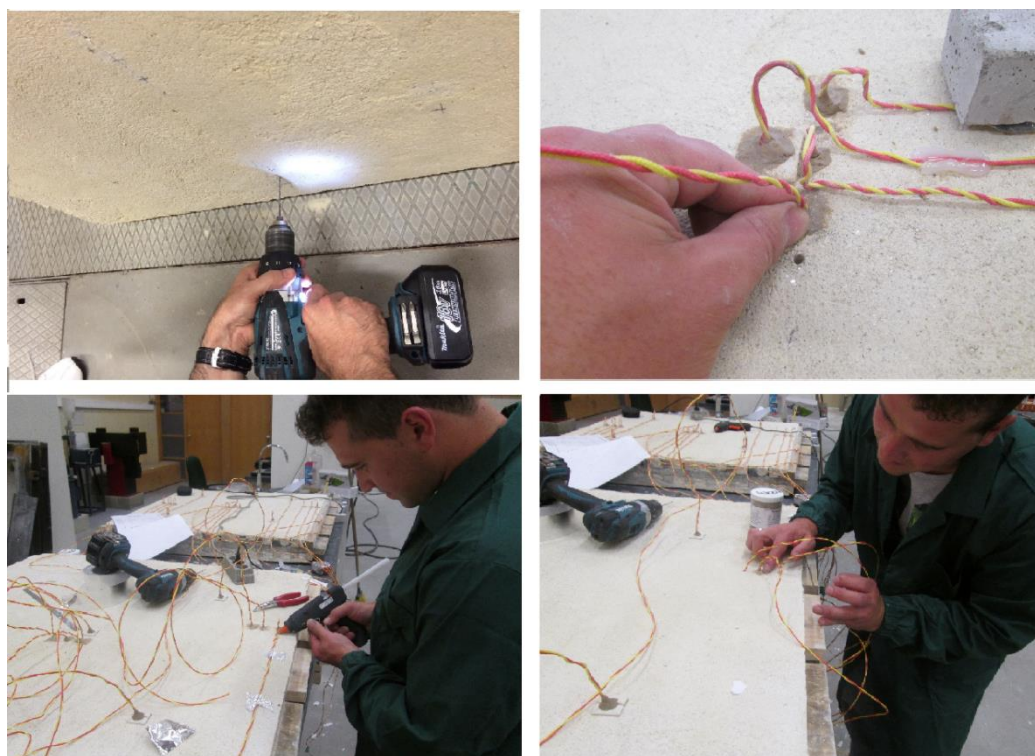


Figura 30 – Instrumentação dos modelos de parede em tabique.

Os termopares colocados na superfície da face não exposta ao fogo são designados por termopares de superfície ou termopares de disco (TD), aplicados e utilizados para medir temperaturas em pontos específicos da parede, a fim de avaliar e verificar o critério de isolamento, bem como as temperaturas atingidas na superfície da parede. De modo a permitir um bom contacto térmico, os fios do termopar do tipo K com 0,5 [mm] de diâmetro são soldados a um disco de cobre de 12 [mm] de diâmetro e 0,2 [mm] de espessura [25].

Cada termopar é coberto com uma placa de material inorgânico (gesso cartonado), Figura 31 a). A placa é feita com dimensões de 30 [mm] por 30 [mm] com 2 [mm] de espessura. Para eliminar o risco da leitura de temperaturas ser influenciada por outros ambientes, é colocada massa térmica nos fios, a montante da placa de gesso cartonado (devido à falta

de isolamento dos fios nesse local). Os termopares de superfície são fixados à parede com cola adesiva, tendo sempre o cuidado de não haver cola entre o disco de cobre e a superfície, Figura 31 b).

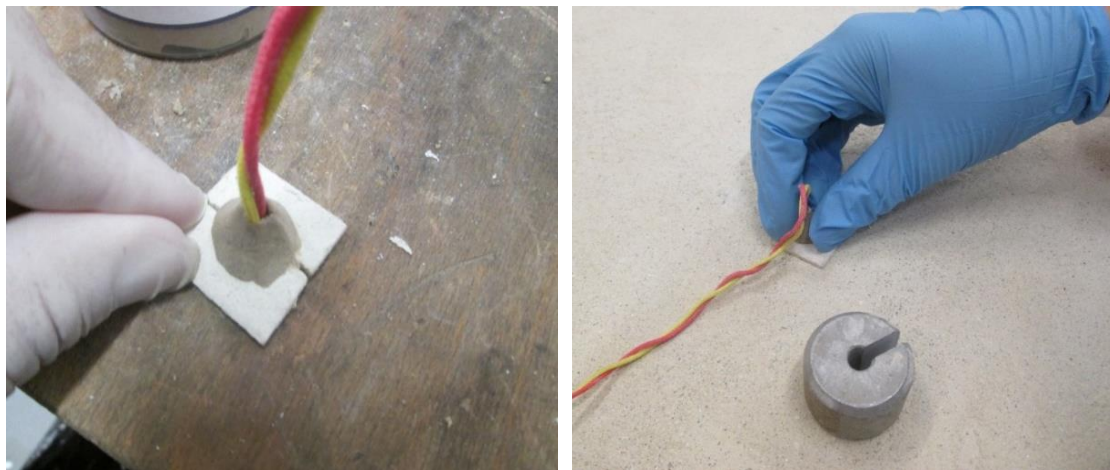


Figura 31 – a) Proteção do termopar de superfície; b) Colocação dos termopares de superfície.

Feita a colocação, são introduzidas as fichas e testados todos os termopares (Figura 32), garantindo que no ato de ensaio todos estejam a fazer a leitura de temperaturas.



Figura 32- Ligação dos termopares às fichas e verificação de funcionamento.

Concluído o procedimento de instrumentação, os modelos de parede encontram-se prontos para passar à fase seguinte. Na imagem que se segue (Figura 33), apresentam-se os três modelos de parede instrumentados.



Figura 33 - Modelos de parede em tabique instrumentados.

Realizadas as operações de instrumentação, é necessário criar um suporte capaz de sustentar os modelos de parede. Tendo em consideração esta necessidade, idealizou-se um suporte com as dimensões necessárias para acoplar a parede ao forno de ensaio. A Figura 34 esquematiza o aro concebido para os modelos de parede. Fica a nota que para fazer junção entre a parede e o aro, é utilizado uma cantoneira de abas desiguais de chapa quinada, aparafusada aos elementos (parede e aro). Todos os materiais aplicados foram previamente dimensionados para fazer face às necessidades exigidas na junção das partes.

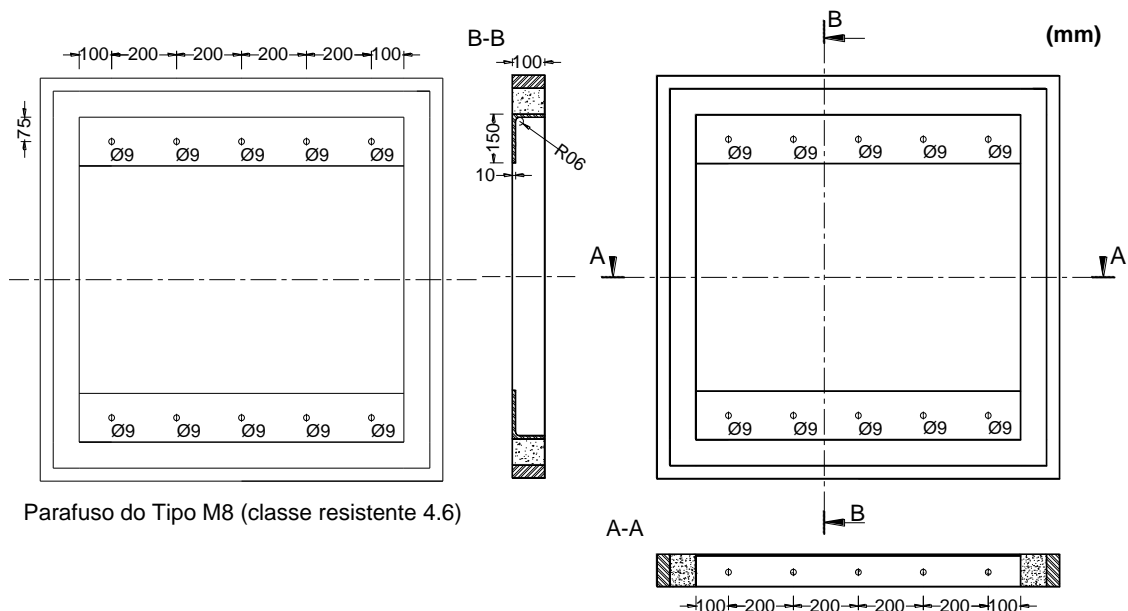


Figura 34 – Esquema cotado do aro de fixação.

Previamente à colocação da parede no aro, é cravado no perímetro da parede lã de rocha de 50 [mm] de espessura (Figura 35), com o intuito de, na fase de ensaio, não haver fuga de gases ou chamas, nos espaços vazios que existam entre o modelo de parede e o aro de fixação.



Figura 35 – Isolamento nos contornos do modelo de parede.

Aplicado o isolamento, a parede fica pronta a ser colocada no aro, Figura 36.



Figura 36 – Parede instalada no aro de fixação.

Os ensaios experimentais dos modelos de parede em tabique são executados no forno de resistência ao fogo existente no Laboratório de Estruturas e Resistências dos Materiais da ESTIG, com o acoplamento do aro feito pela parte frontal do forno, Figura 37.



Figura 37 – Acoplamento do modelo de parede em tabique ao forno de ensaio.

# CAPÍTULO 4

---

## ENSAIOS EXPERIMENTAIS

O ensaio experimental das paredes em tabique é realizado conforme os requisitos e procedimentos regulamentares expostos no Capítulo 2. Como referido anteriormente, só serão avaliados os critérios de isolamento e estanquidade do material.

### 4.1 SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

O Laboratório de Estruturas e Resistência dos Materiais é munido de um sistema de aquisição multicanal MGC Plus, com 23 canais de leitura disponíveis, dos quais serão utilizados 14, referentes ao número de termopares aplicados em cada amostra, Figura 38.



Figura 38 – Ligação das fichas às extensões do MGC Plus.

Para além dos termopares, é utilizada uma câmara termográfica dotada de um detetor de infra vermelho (*infrared detector – FLIR – Picture – in –picture*) para uma medição de campo feita na face não exposta da parede, Figura 39.



Figura 39 – Câmara Termográfica.

## 4.2 PROCEDIMENTOS DE ENSAIO

Os ensaios são realizados no forno de ensaio seguindo a curva de aquecimento padrão ISO 834. As paredes de tabique encontram-se a uma temperatura ambiente inicial média de 21 °C. Durante os ensaios, são verificados os critérios de isolamento e de estanquidade. Quanto à verificação do último, é feito através de uma bola em algodão embebida em álcool etílico registando-se no decorrer do ensaio se há presença de chama ou de ignição no algodão, para averiguar de forma sistemática se o critério de estanquidade é violado, Figura 40. De notar que, ao longo dos respetivos ensaios, há libertação de fumo devido aos vazios existentes entre o aro de fixação e o modelo de parede.

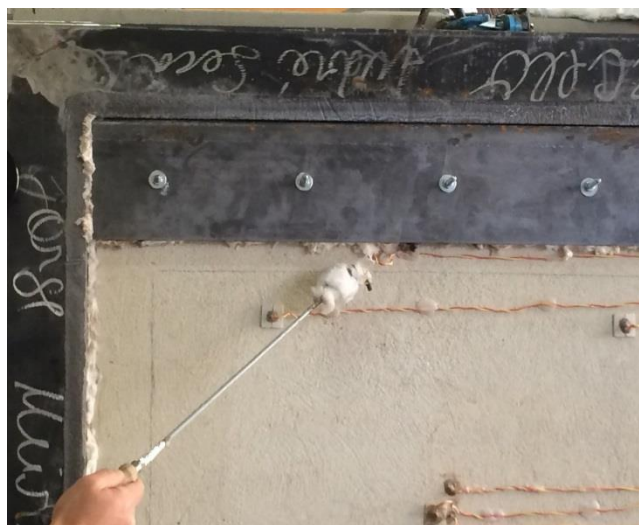


Figura 40 – Teste do algodão.

#### 4.2.1 Ensaio da Parede Teste

A parede de teste é ensaiada durante um período de 35 min. Este intervalo de tempo justifica por não se saber qual o comportamento deste material quando submetido ao fogo. A libertação de fumo proveniente da combustão do ripado de madeira da face exposta ao fogo (Figura 41), também leva a um certo receio da possibilidade do colapso da estrutura, daí a interrupção do ensaio. Como se pode verificar na Figura 42, no instante da abertura da porta do fogo, verifica-se que a exposição ao fogo durante o ensaio danificou parte do ripado da face interior, sem lesar a restante estrutura. A argamassa da face interior não ruiu, permaneceu quase intacta, ficando-se apenas, pela ocorrência de algumas fissuras.



Figura 41 – Libertação de fumo durante o ensaio.



Figura 42 – Término do ensaio ao fogo da Parede Teste.

A eclosão da chama na madeira deve-se a pequenos espaços vazios gerados no ato da colocação dos parafusos que sustentam a parede ao suporte, isto porque, a combustão da madeira é iniciada devido à presença de oxigénio (comburente), combustível (madeira), e calor ou chama proveniente das chamas do forno de ensaio.

Para uma melhor perceção do resultado da queima do ripado de madeira, apresenta-se na Figura 43 a parede após retirar a argamassa da face exposta.



Figura 43 – Resultado da Parede Teste, face exposta ao fogo após o ensaio.

Observando a Figura 43, percebe-se que o ripado não sofreu grandes danos, a não ser uma camada de carbonização criada à volta do material.

#### **4.2.2 Ensaio da Parede I**

No ensaio da Parede I, o término do ensaio deu-se ao minuto 60, sem que fossem esgotados os critérios de isolamento e de estanquidade. O ensaio poderia ser alargado por mais alguns minutos, o que não sucedeu por razões de segurança. Por outro lado, a quantidade de fumo presente no laboratório era desconfortável (Figura 44), o que levou a que o ensaio fosse interrompido.



Figura 44 – Liberação de fumo durante o ensaio de resistência ao fogo.

Como se pode comprovar, a liberação de fumo presente era considerável, não havendo condições para continuar com o ensaio (decorridos 60 minutos de ensaio). De notar que ao longo do ensaio não foram registadas temperaturas acima dos 90 °C na face não exposta (leitura feita pela câmara Infra - Red), afastando a hipótese de violar o critério de isolamento.

Na Figura 45, apresenta-se o instante em que a chama resultante da combustão da madeira é libertada atravessando a argamassa.



Figura 45 – Chama resultante da combustão da madeira (vista da janela do forno).

No momento em que o ensaio é terminado e aberta a porta do forno, ainda se pode constatar a presença de chama na parede, na face exposta ao fogo, Figura 46.



Figura 46 – Libertação da chama proveniente da combustão da madeira.

Após algum tempo de arrefecimento da parede, são extintas as chamas, e o resultado da combustão da madeira danificada, é exposto na figura que se segue.



Figura 47 – Resultado da Parede I após o ensaio.

Analisando a parede, identifica-se a integral carbonização do ripado de madeira da face exposta, com algumas lesões nas tábuas verticais da estrutura de madeira.

#### **4.2.3 Ensaio da Parede II**

A Parede II é ensaiada por um período de 15 minutos. Este intervalo de tempo curto, justifica-se pelo facto de já se ter ensaiado a Parede I ao patamar máximo da sua resistência ao fogo, e visto que as condições de ensaio ao chegar a esse nível não são as mais favoráveis, optou-se pelo término do ensaio nesse intervalo de tempo. Na abertura

do forno aquando das pulverizações de água na parede para arrefecer a superfície de contacto com o fogo, dá-se um fenómeno curioso designado por “*spalling*”, gerando-se salpicos da argamassa de recobrimento devido ao choque térmico entre as partículas de água e a superfície quente (Figura 48). Os constituintes da argamassa desagregam com facilidade, pela falta de cimento na mistura.



Figura 48 – Resultado da Parede II após o ensaio.

Constatam-se as manchas na parede devido aos salpicos do recobrimento. No 1º quadrante da parede (canto superior direito) o mesmo não sucede, devido à quebra inicial da parede nesse local e sua reconstituição com uma argamassa privilegiada da adição de cimento. Retirado o material de enchimento da parede, averiguam-se os danos causados pelo fogo à estrutura de madeira, Figura 49.



Figura 49 – Estrutura de madeira da Parede II após o ensaio.

Verifica-se que a estrutura de madeira ficou intacta, apenas com algumas manchas de carbonização, o que significa que o ensaio poderia ter sido prolongado por mais alguns minutos.

# CAPÍTULO 5

---

## ANÁLISE NUMÉRICA

Neste Capítulo, pretende-se avaliar numericamente a resistência ao fogo de modelos de parede em tabique, dos quais se dispõe dos seus resultados experimentais próprios. Os ensaios numéricos são obtidos através de um programa de elementos finitos [24]. O objetivo desta análise é verificar a possibilidade de reproduzir numericamente o comportamento do material observado experimentalmente. A aplicação do modelo numérico justifica-se também pelo facto de ser desconhecido um dos materiais aplicados na construção das paredes, nomeadamente o solo. Com o posterior ajuste e calibração do modelo numérico pretende-se dar resposta, e ir de encontro às propriedades térmicas que caracterizaram o material utilizado.

A simulação numérica é efetuada numa análise térmica bidimensional em regime transiente utilizando um elemento plano (Plane77) com um grau de liberdade por nó. Os modelos bidimensionais requerem um menor esforço computacional, e atendendo às características do modelo da parede de tabique (Figura 29) foram considerados dois cortes transversais ao longo da espessura da parede (Corte AA e Corte BB da Figura 29) para a elaboração dos respetivos modelos numéricos de simulação.

No decorrer da análise é dada particular atenção ao comportamento não linear a altas temperaturas dos materiais utilizados no modelo, nomeadamente a madeira, e a argamassa terrosa utilizada no enchimento.

Quanto à análise das propriedades térmicas dos materiais, a madeira tem um comportamento não linear dependente da evolução de temperatura, cujas propriedades térmicas se encontram definidas no anexo B do Eurocódigo 5 [12]. As propriedades térmicas a considerar, são respetivamente, a condutividade térmica, o calor específico e a massa volúmica, conforme representado na Figura 50. A massa volúmica da madeira considera um valor igual a  $450 \text{ kg/m}^3$  e a emissividade igual a 0,8.

As propriedades da argamassa são determinadas segundo a resultante da conjugação de vários documentos que caracterizam o comportamento térmico dos solos, como tal, são consideradas as propriedades conforme enunciado no Eurocódigo 6 [19] e por Nguyen

[20]. O ajuste e a calibração das propriedades térmicas do solo, como anteriormente mencionado, determinam-se após várias tentativas numéricas de ajuste aos resultados experimentais, Figura 51. A massa volúmica é considerada constante, igual a  $1290 \text{ kg/m}^3$  e a emissividade igual 0,85.

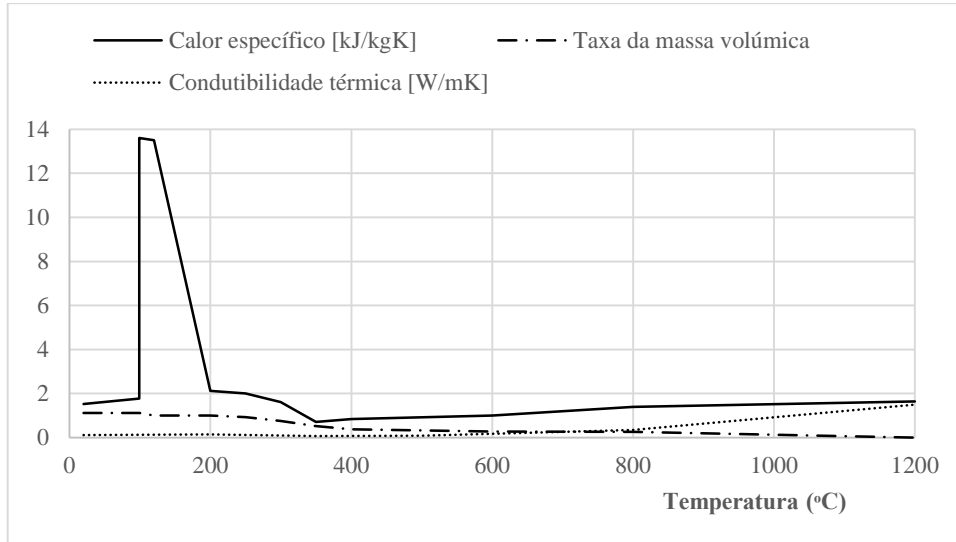


Figura 50 – Propriedades térmicas da madeira [11].

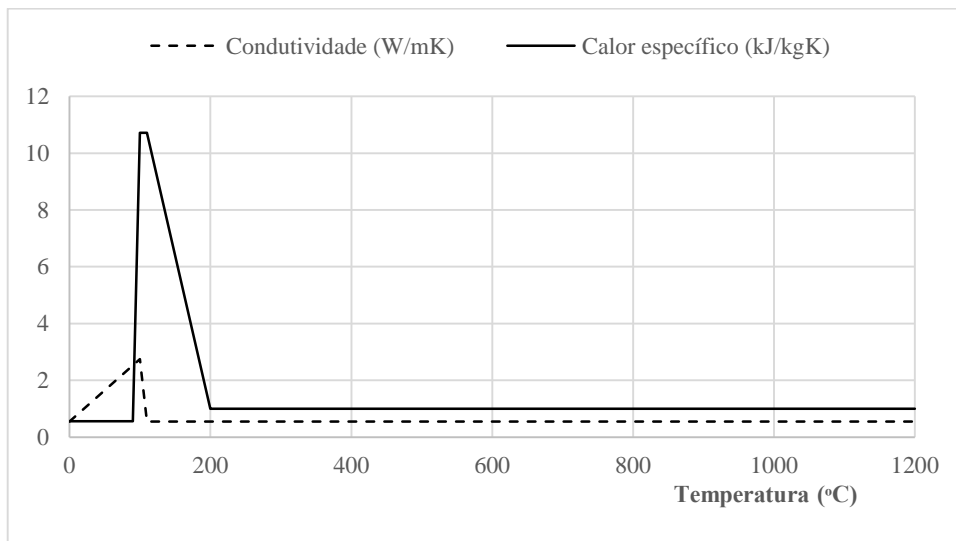


Figura 51 – Propriedades térmicas da argamassa terrosa.

A variação do calor específico da argamassa e da madeira permitem simular o fenómeno relativo à libertação da humidade.

As condições fronteiras admitidas no problema numérico são de convecção e radiação, e a evolução da temperatura ambiente na face da parede exposta ao fogo é regida pela curva

ISO 834 [25]. No instante inicial, o modelo da parede de tabique é exposto a uma temperatura ambiente de 21 °C. São utilizados um coeficiente de convecção igual a 25 W/m<sup>2</sup>K na superfície exposta ao fogo e 4 W/m<sup>2</sup>K na superfície não exposta. O fator de emissividade em ambas as superfícies do modelo considera-se igual a 0,9 [20].

O comportamento térmico da madeira pode ser descrito através dos processos de aplicação da pirólise, resultantes da carbonização da madeira. O processo de pirólise faz com que a matéria orgânica do material se decomponha após ser submetido a condições de altas temperaturas e em presença de quantidades de oxigênio muito reduzidas (ex.: massa volúmica da madeira). No modelo numérico, para o último instante de tempo, é aplicado o critério em que a camada carbonizada na madeira ocorre aos 300 °C, Eurocódigo 5 [12].

As figuras que se seguem, representam o campo de temperaturas para cada secção (A e B) no instante final da análise da Parede Teste. No modelo numérico, a zona correspondente à cor cinza permite verificar a camada da madeira carbonizada, uma vez ultrapassa o critério de temperatura imposto de 300 °C.

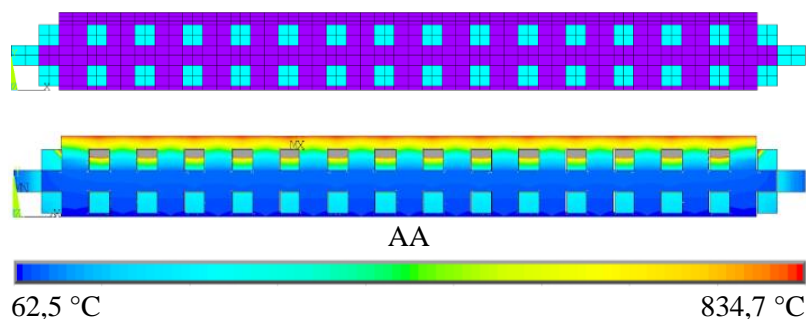


Figura 52 – Resultado numérico para o instante 2100s no corte AA da Parede Teste.

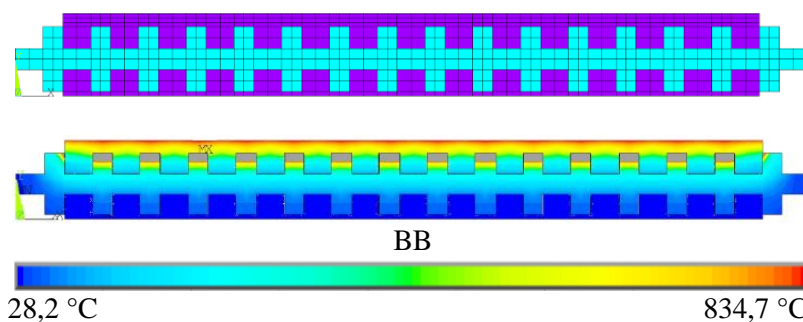


Figura 53 – Resultado numérico para o instante 2100s no corte BB da Parede Teste.

Fazendo a analogia à Parede Teste, segue o resultado do campo de temperaturas para cada secção (A e B) da Parede I.

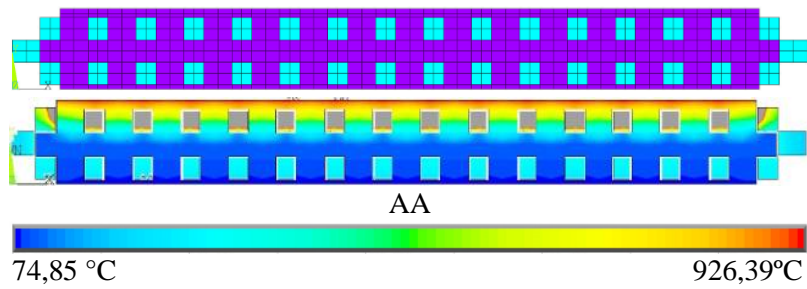


Figura 54 - Resultado numérico para o instante 3600s no corte AA da Parede I.

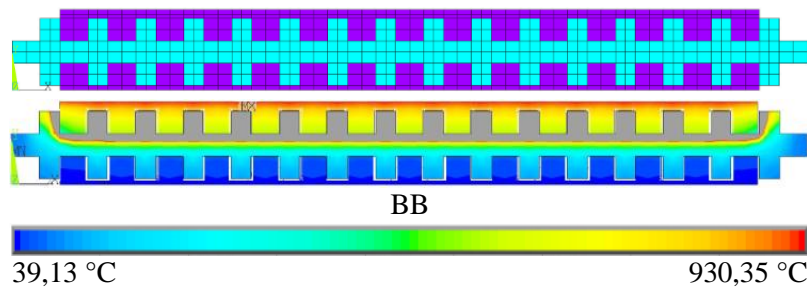


Figura 55 - Resultado numérico para o instante 3600s no corte BB da Parede I.

Finaliza-se a apresentação dos resultados numéricos para o campo de temperaturas das secções A e B referentes à Parede II.

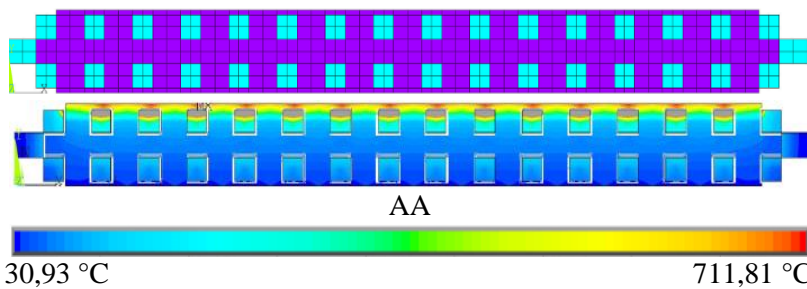


Figura 56 - Resultado numérico para o instante 900s no corte AA da Parede II.

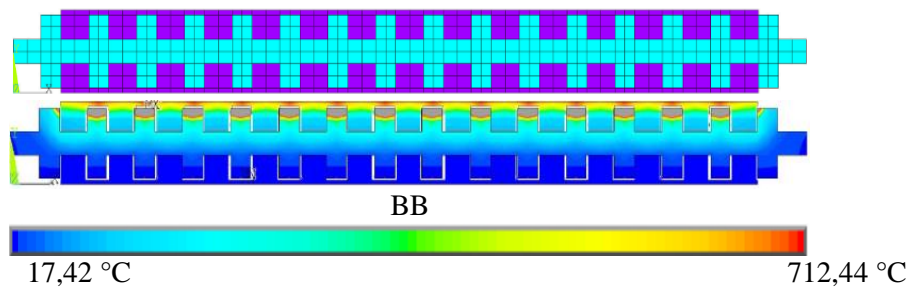


Figura 57 - Resultado numérico para o instante 900s no corte BB da Parede II.

Os gráficos referentes à evolução de temperaturas ao longo do ensaio serão apresentados no Capítulo dedicado à comparação de resultados.

# CAPÍTULO 6

---

## ANÁLISE DE RESULTADOS

A interpretação e a avaliação da resistência ao fogo das paredes será elaborada considerando as mesmas características e dimensões para todos os modelos, diferindo entre eles o recobrimento da face exposta. As paredes têm os seguintes recobrimentos:

- Parede Teste – 15 [mm];
- Parede I – 10 [mm];
- Parede II – 5 [mm].

### 6.1 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

No início do ensaio, os modelos de parede encontram-se a uma temperatura ambiente de laboratório com aproximadamente 21 °C, e a temperatura do forno segue o aquecimento padronizado pela curva ISO 834. A avaliação das temperaturas ao longo dos ensaios é monitorizada por gráficos que regem a evolução nos pontos de leitura pré-estabelecidos no capítulo de instrumentação.

#### 6.1.1 Parede Teste

O ensaio da Parede Teste é feito por um período de 35 minutos, com uma temperatura real máxima no forno de 863 °C. A Figura 58 ilustra o registo da evolução de temperatura do forno ao longo do ensaio.

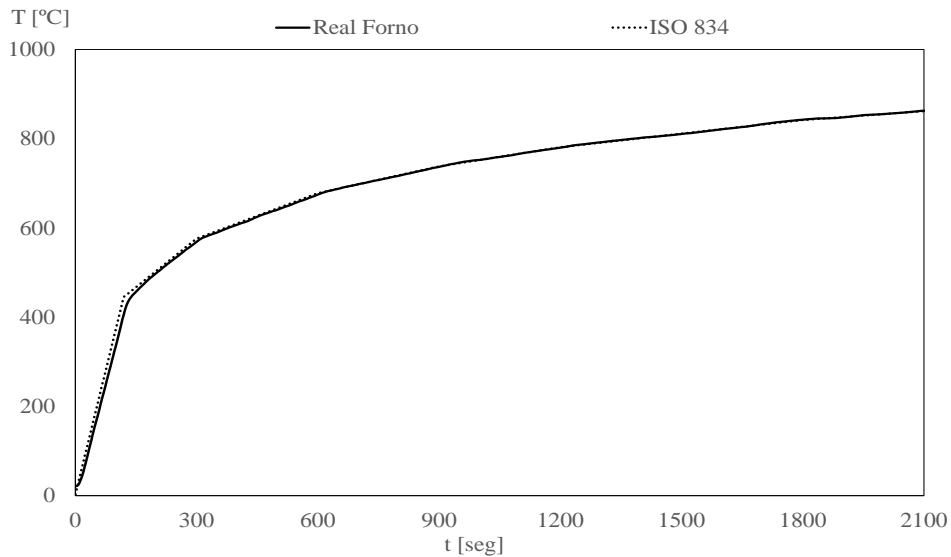


Figura 58 - Temperatura prevista e real no interior do forno.

Da observação do Gráfico da Figura 58 resulta evidente a calibração da curva de aquecimento do forno com a curva prevista pela ISO 834. Tal evidência é somente contrariada nos primeiros 300 [s], pela discrepância mínima do traçado das duas curvas, o que se revela insignificante no resultado final do ensaio.

A avaliação da evolução das temperaturas na parede de teste, apresenta-se na Figura 59, com a relação entre os termopares inseridos na madeira a diferentes profundidades.

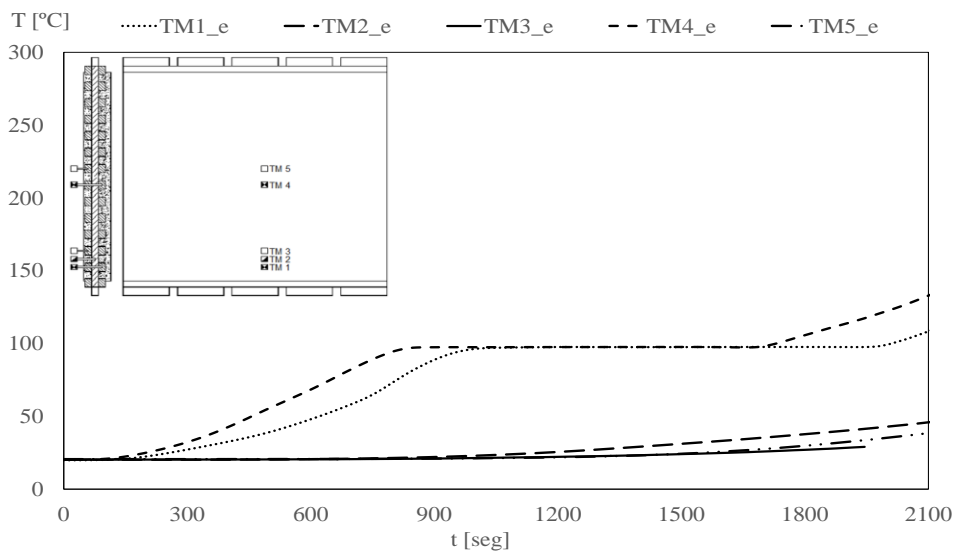


Figura 59 - Temperaturas nos termopares inseridos na madeira.

Do estudo e avaliação da Figura 59, várias conclusões podem ser retiradas. Partindo do início do ensaio, a camada de recobrimento de 15 [mm] isola o calor proveniente do forno

de ensaio durante um período de aproximadamente, 140 [s] até atingir o ripado de madeira da face exposta (temperatura do forno de 448 °C aos 140 [s]). Nesse instante dá-se a subida de temperatura nos termopares TM4 e TM1 de uma forma sensivelmente linear até atingir 97 °C. Este patamar é atingido pelo termopar TM4 aos 845 [s], seguindo o termopar TM1 aos 1040 [s], com o forno a uma temperatura média de 758 °C. No momento em que TM4 e TM1 igualam as temperaturas a 97 °C, o termopar inserido nas tabuas verticais (TM2), e no ripado de madeira da face não exposta (TM5 e TM3) começam a reagir e é iniciado um período de subida de temperatura progredindo de uma forma lenta. O patamar reproduzido à temperatura de 97 °C deve-se à vaporização da água existente no combustível (madeira) e é libertado na forma de vapor de água. Nesse intervalo de tempo, a madeira acumula energia num processo endotérmico. Todo este processo de secagem do ripado da face exposta é quebrado numa média de 895 [s] segundos. Finda a evaporação de água, as temperaturas em TM4 e TM1 voltam a subir, seguindo o traçado da evolução da curva do início do ensaio até aos 97 °C. No final do ensaio (após 2100 [s]), regista-se uma temperatura máxima de 132°C no termopar TM4, e uma temperatura mínima de 29 °C no termopar TM3.

A evolução do registo das temperaturas na argamassa é apresentado na Figura 60.

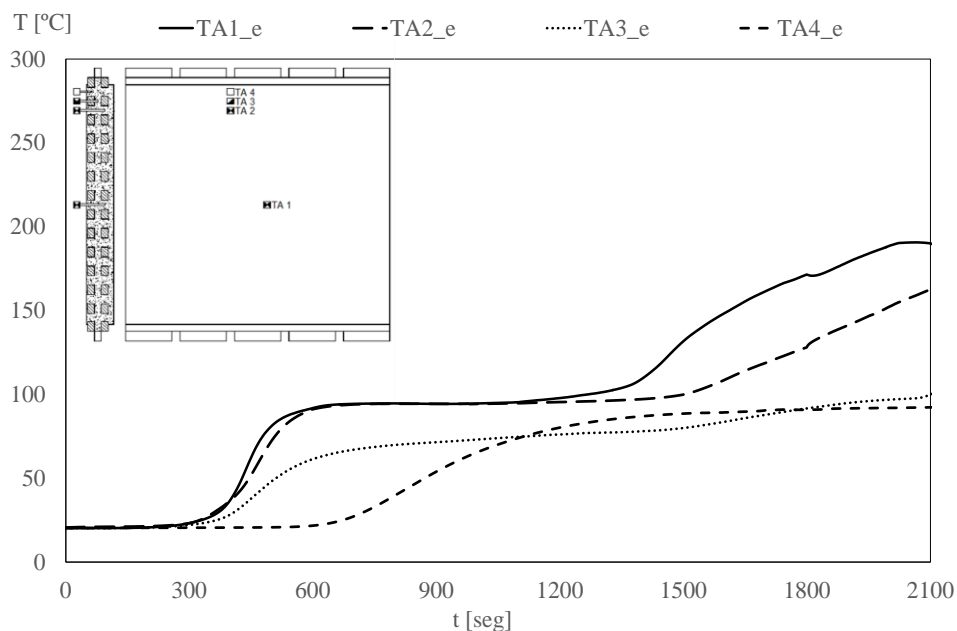


Figura 60 - Temperaturas nos termopares da argamassa.

Fazendo a interpretação da Figura 60, verifica-se que os termopares colocados na face interior de recobrimento (TA1 e TA2) começam a elevar a temperatura decorridos

aproximadamente 260 [s] de ensaio, até atingir o patamar da perda de humidade ao segundo 600. Este patamar estende-se por um período de 670 [s], variando a temperatura compreendida entre 90 e 100 °C, seguindo com uma subida de temperatura aproximadamente linear até o final do ensaio. Quanto aos termopares inseridos a meio da estrutura e no recobrimento da face exterior (TA4 e TA3), da mesma forma que os antecedentes, têm uma subida de temperatura inicial até ao patamar de perda de humidade, com temperaturas um pouco mais baixas e com algum atraso em relação a TA1 e TA2, devido à barreira de argamassa que dista dos pontos em que são colocados os termopares. Quanto ao aquecimento prematuro de TA3 pode dever-se ao risco de, no processo de secagem serem gerados espaços vazios pela perda de água ou até mesmo pela retração da argamassa, e este termopar ser afetado por estas patologias, levando a uma evolução de temperatura mais acentuada. No final do ensaio regista-se uma temperatura máxima de 190 °C em TA1 e uma temperatura mínima de 92 °C registada em TA4.

Analisando os gráficos dos termopares da madeira e da argamassa, verifica-se que o aumento de temperaturas iniciais é muito aproximado, havendo um atraso na subida de temperaturas ( $\pm 120$  [s]) no ripado de madeira da face exposta em relação à argamassa de recobrimento. A evolução de temperaturas da face não exposta é avaliada segundo o registo dos termopares de discos expostos na Figura 61.

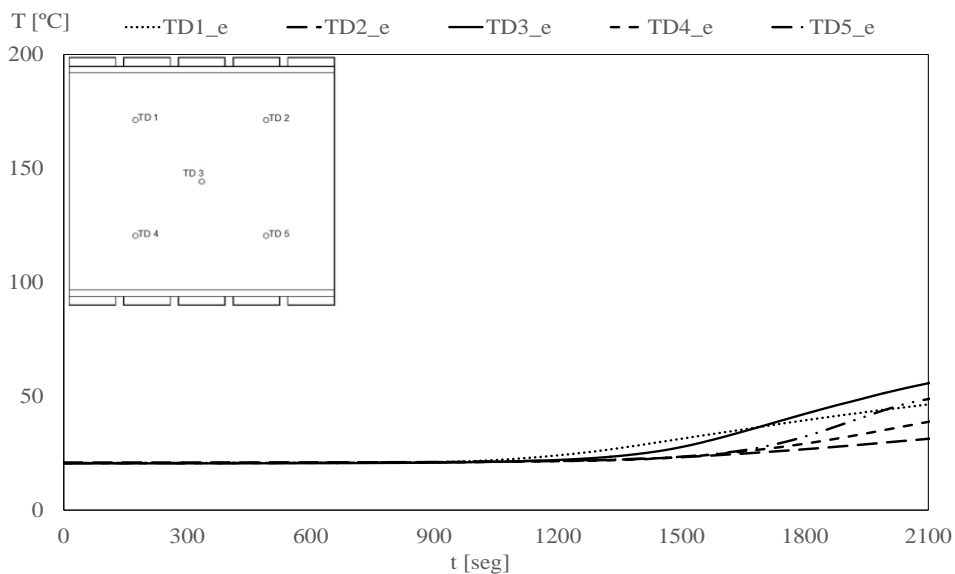


Figura 61 - Temperaturas nos termopares de disco.

Da leitura da Figura 61, retira-se que não houve evolução de temperaturas durante os primeiros 1050 [s]. Nesse instante, as temperaturas começam a subir, terminando o ensaio

a uma temperatura máxima de 55 °C, registada no termopar TD3. De notar que o segundo 1050 [s] é em média o patamar de perda de humidade do ripado da madeira da face exposta.

### 6.1.2 Parede I

A parede I é avaliada por um período de 1 hora com uma temperatura real máxima no forno de 947 °C, Figura 62.

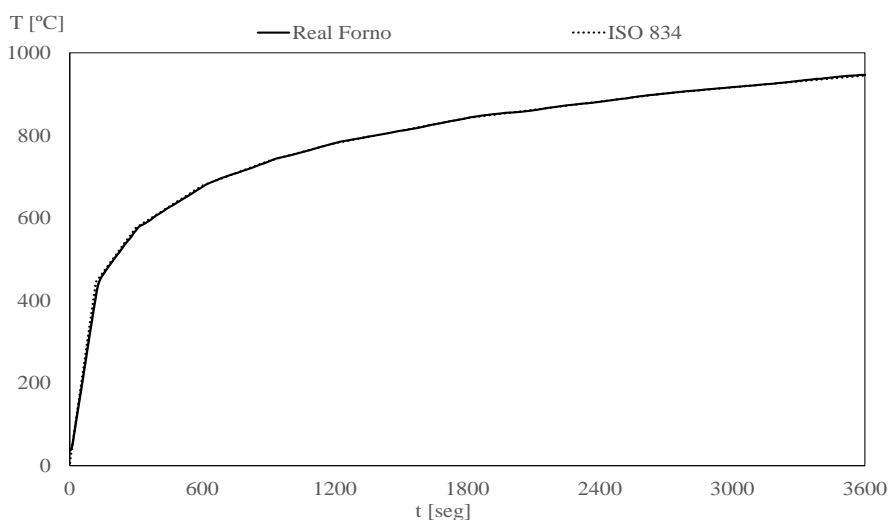


Figura 62 - Curva de temperatura prevista e real do forno.

Da avaliação do gráfico da Figura 62, denota-se a total concordância entre a curva ISO 834 e a temperatura real do forno. A discrepância entre as duas curvas não é tão acentuada como na Parede Teste, devido ao efeito de escala inerente ao aumento do tempo de ensaio.

Para a avaliação das temperaturas na madeira, são registadas no gráfico da Figura 63, a sua evolução ao longo do ensaio.

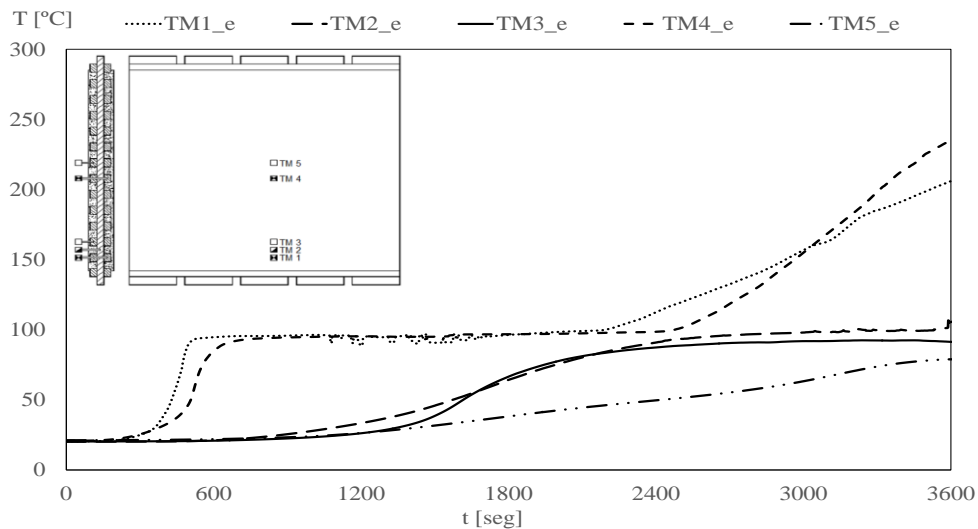


Figura 63 - Temperaturas dos termopares inseridos na madeira.

Da leitura do gráfico da Figura 63, verifica-se que os termopares colocados no ripado de madeira da face exposta (TM 1 e TM 4), 195 [s] após começar o ensaio, registam subidas de temperaturas até atingir o patamar de evaporação da humidade da madeira. O início do patamar dá-se em média aos 675 [s], seguindo um percurso médio de 1660 [s]. Fica a nota que o processo de evaporação da humidade apresenta-se mais perlongado que na Parede Teste, talvez pelo facto de a face exposta da Parede I, ter sido refeita (devido a fragilidade do material por falta de ligante à base de cimento), o que levou a um tempo de secagem mais reduzido (3 dias ao invés de 31 dias). Ultrapassado o patamar de evaporação, o ripado segue uma evolução de temperatura praticamente linear por um período médio de 1265 [s], tempo em que o ensaio é terminado. Neste instante o termopar mais afetado pela exposição ao fogo (TM4) encontra-se a uma temperatura máxima de 235 °C. A combustão da madeira é normalmente tabelada com um valor médio de 280 °C na fase de carbonização, o que parece contraditório quando são atingidos os 235 °C e a madeira iniciar um processo de combustão. A justificação para este comportamento pode estar no facto de o termopar estar a fazer a leitura no interior do ripado de madeira, e devido à camada de carbonização é retardado o aumento de temperatura. A subida de temperaturas nos termopares inseridos na tábua vertical da estrutura de madeira (TM2) e nos termopares do ripado da face exterior (TM3 e TM5) é iniciado em média, 700 [s] após o arranque do ensaio, prolongando-se até estabelecer um patamar de libertação de água na ordem dos 90 a 100 °C, ao segundo 2540. O termopar TM5, desde o início do registo de subida de temperaturas até ao final do ensaio, apresenta uma evolução regular, terminando o ensaio com uma temperatura média de 79 °C. Nesse mesmo instante, os



A leitura das temperaturas da face não exposta é efetuada através dos termopares de disco representados na Figura 65.

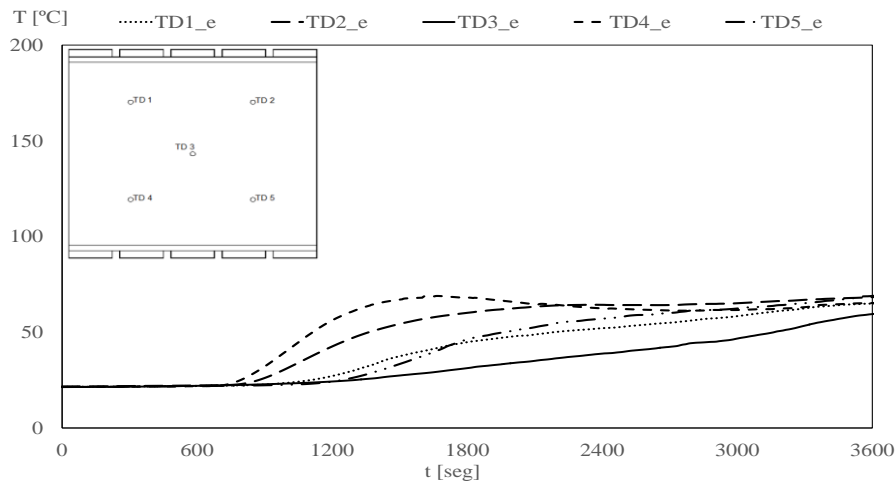


Figura 65 - Temperaturas nos termopares de disco.

Da leitura da Figura 65 nota-se um aumento de temperatura passados os 600 [s] iniciais do ensaio. Quanto à discrepância nos traçados, pode ser interpretada pela influência de temperaturas nos materiais adjacentes aos pontos de leitura. Como se pode observar nos gráficos das figuras anteriores, pontos de leitura inserido à mesma profundidade, nos mesmos materiais, mas localizados em diferentes áreas da parede, exibem diferenças de temperaturas consideráveis. No final do ensaio regista-se uma temperatura máxima de 69 °C no termopar TD5.

### 6.1.3 Parede II

A parede II é avaliada por um período de 15 minutos com uma temperatura real máxima no forno de 727 °C.

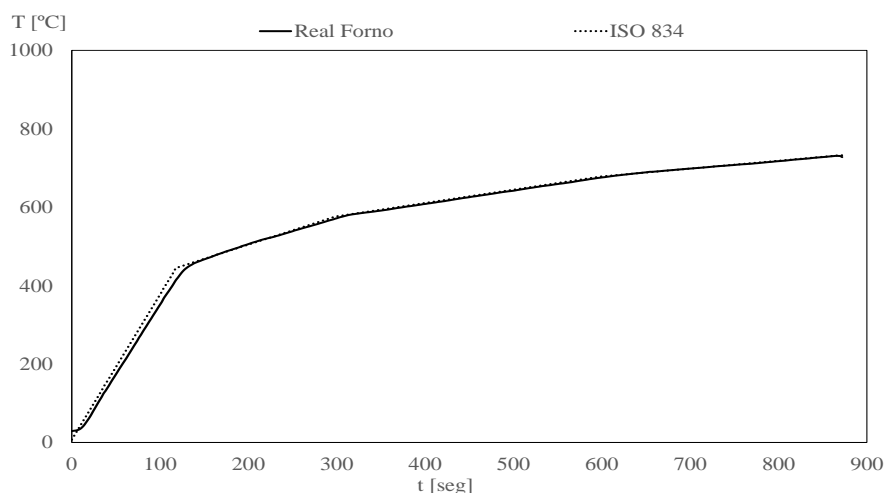


Figura 66 - Curva de temperatura prevista e real do forno.

Nota-se uma concordância da curva de aquecimento ISO 834 com a curva de aquecimento do forno, apesar de uma ligeira discrepância nos traçados, nos primeiros 100 [s] de ensaio. Para os termopares inseridos na madeira, o registo de temperaturas é ilustrado na Figura 67.

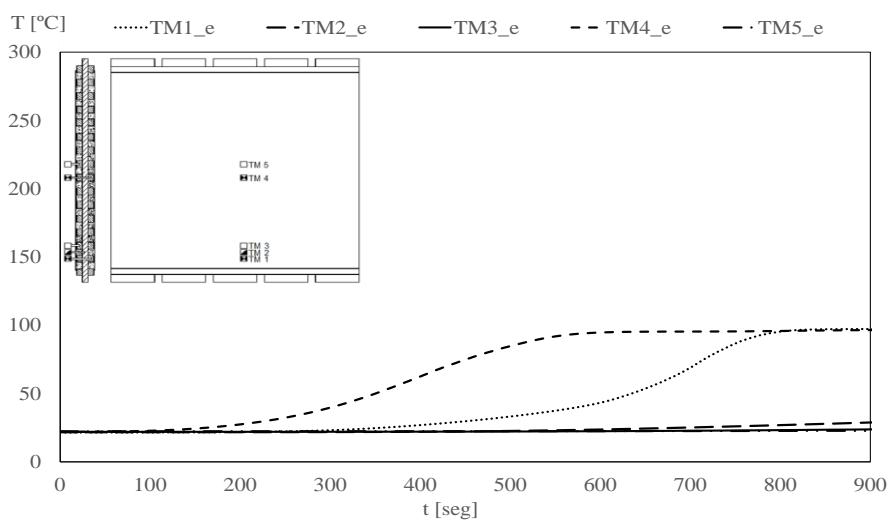


Figura 67 - Temperaturas nos termopares inseridos na madeira.

Do gráfico da Figura 67, pode concluir-se que os termopares inseridos no ripado de madeira da face exposta (TM1 e TM4) não chegam a concluir o patamar de libertação da humidade. No termopar TM4 ocorre a subida de temperatura aos 160 [s], seguindo o termopar TM1 aos 360 [s]. O patamar de libertação de água é atingido aos 580 [s] em TM4, e aos 800 [s] no termopar TM1. A temperatura máxima regista-se em TM1 com uma temperatura de 97 °C. Quanto aos restantes termopares, mantém as temperaturas

próximas da inicial, finalizando o ensaio com 29 °C em TM2, 24 °C em TM3 e 23 °C em TM5.

As temperaturas registadas nos termopares inseridos na argamassa são apresentados na Figura que se segue.

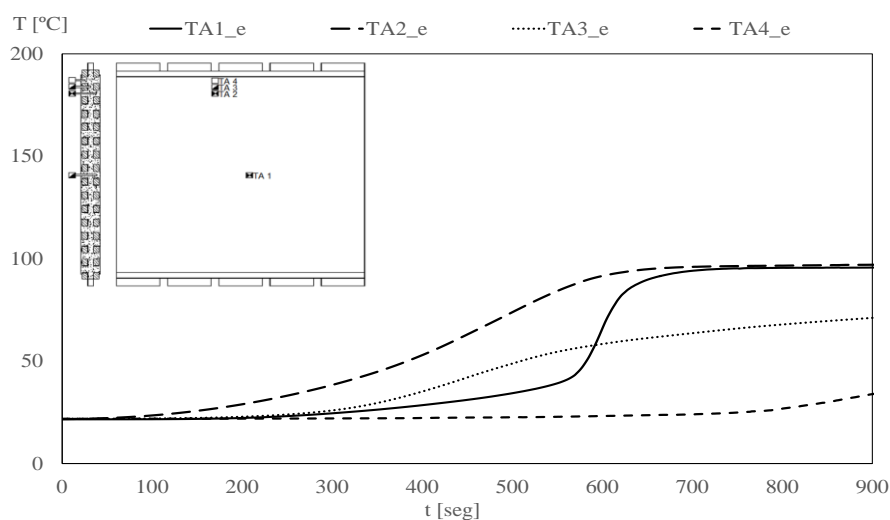


Figura 68 - Temperaturas nos termopares da argamassa.

A análise da Figura 68 permite comprovar que TA2 tem uma subida de temperatura inicial média de 35 [s], seguindo o termopar TA1 aos 180 [s]. Nesses dois termopares, o patamar de libertação de água estabiliza em média aos 700 [s], prolongando-se até ao final do ensaio. Quanto a TA3, segue a mesma evolução que TA2 com uma discrepância média de 30 °C. O termopar TA4 reage em média aos 700 [s] de ensaio. No final do ensaio, regista-se uma temperatura mínima de 34 °C em TA4 e uma temperatura máxima de 97 °C em TA2.

As temperaturas da face não exposta são apresentadas na Figura 69.

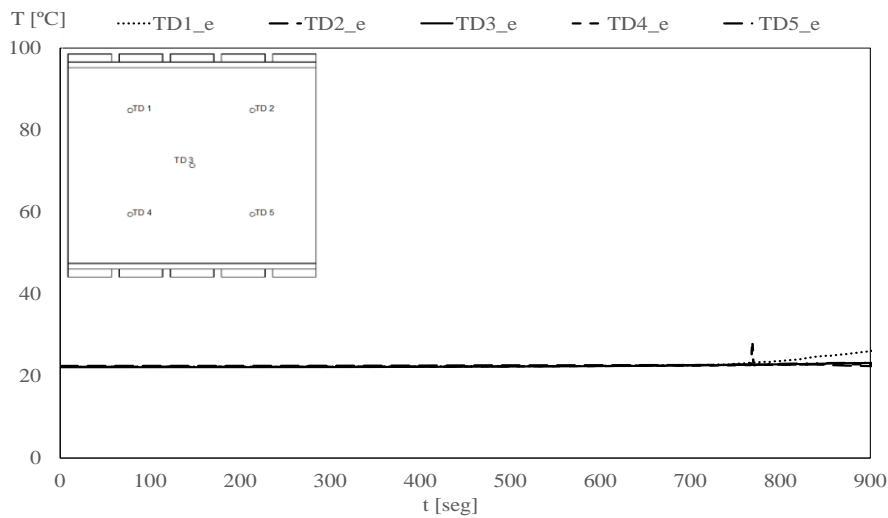


Figura 69 - Temperaturas nos termopares de disco.

Da avaliação ao gráfico da Figura 69, verifica-se que no decorrer do ensaio não se registam alterações de temperaturas significativas. Em todos os termopares as temperaturas mantêm o seu valor médio inicial.

## 6.2 TERMOGRAFIA

A termografia é feita com base na medição da distribuição da temperatura superficial dos modelos de parede a ensaiar. É objetivo dos subcapítulos seguintes a análise comparativa entre os resultados de temperaturas obtidos na câmara termográfica e as leituras feitas nos termopares de disco da face não exposta para a cada parede de ensaio.

### 6.2.1 Termografia da parede teste

Para a avaliação termográfica das paredes de ensaio, são utilizados 2 ilustrações de resultados, registo termográfico (Figura 70) e um gráfico da evolução de temperaturas médias, máximas e mínimas.

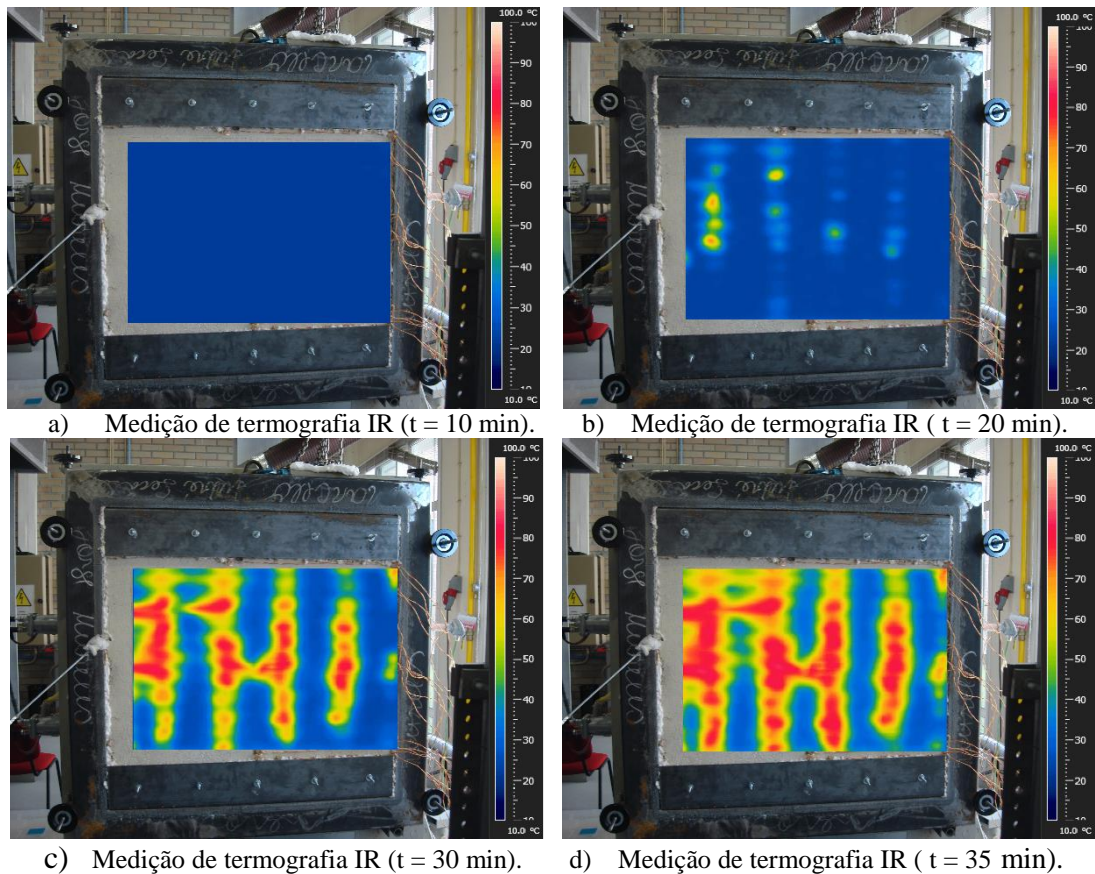


Figura 70 – Medição de termografia IR (Escala 10 – 100).

Estes resultados permitem verificar o efeito de isolamento da madeira em relação ao solo e o comportamento térmico não uniforme em toda parede, pelo que o resultado da termografia IR se revela importante neste tipo de ensaio.

A evolução das temperaturas ao longo do ensaio, é registada na Figura 71.

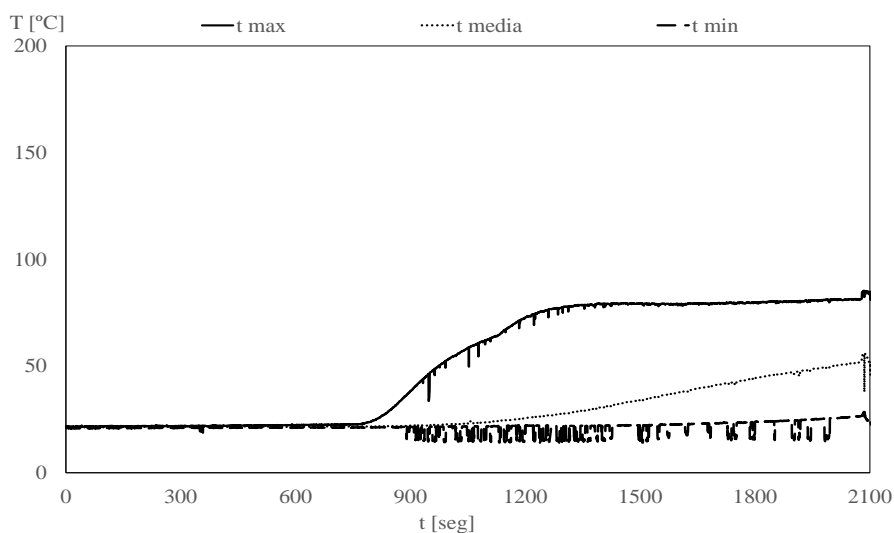


Figura 71 - Temperaturas registadas através da captura termográfica.

Como se pode comprovar na Figura 71, as temperaturas começam a subir em média aos 770 [s], e atingem uma temperatura máxima de 84,7 °C. Quanto à temperatura média, no final do ensaio são atingidas temperatura na ordem dos 52 °C. A temperatura mínima mais alta registada em todo o ensaio é de 22,6 °C. Quanto às oscilações pontuais presentes no gráfico, resultam da passagem do algodão embebido em álcool utilizado para a verificação sistemática do critério de estanquidade, uma vez que o material utilizado regista temperaturas mais baixa que a superfície da parede.

O registo das temperaturas captadas pela câmara termográfica IR é agora comparado (Figura 72) com a leitura feita pelos termopares da face não exposta.

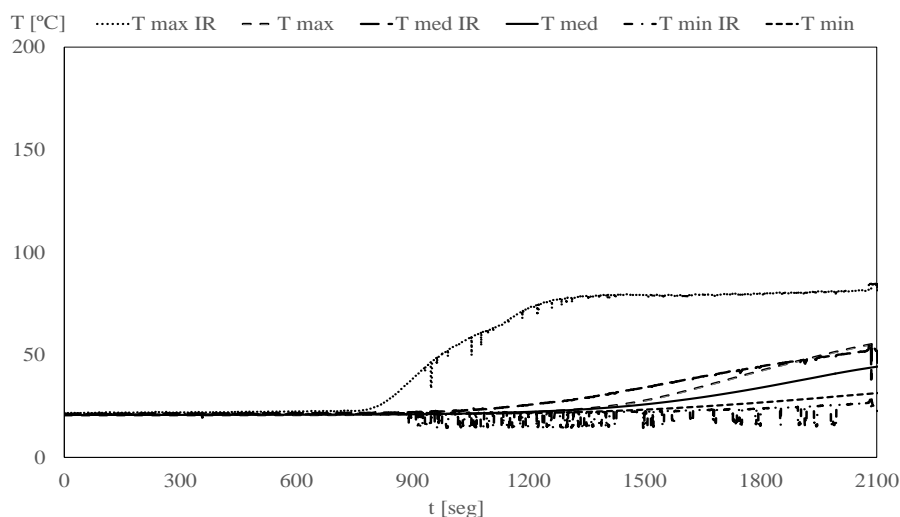


Figura 72 - Temperaturas termográficas e termopares de disco da face não exposta.

Como se pode comprovar no gráfico da Figura 72, nota-se uma diferença significativa nas temperaturas máximas registadas nos dois equipamentos de aquisição de dados, o que se deve à leitura pontual feita nos termopares de disco e ao registo feito pela câmara termográfica, que ao contrário dos termopares de disco, abrange de uma forma geral a totalidade da área da superfície da parede. Quanto às temperaturas máximas, a câmara termográfica, no final do ensaio regista um acréscimo médio de 30°C em relação à leitura feita nos termopares de disco. Para as temperaturas médias, tem-se um acréscimo de 8° C em relação à leitura dos termopares de disco. Nas temperaturas mínimas, ao contrário do antecedido, no final do ensaio verifica-se um acréscimo de 9 °C em relação à captura IR. Expostas as temperaturas da face não exposta, resulta evidente que em todos os instantes do ensaio, nunca foi violado o critério de isolamento.

## 6.2.2 Termografia da Parede I

A avaliação termográfica feita na Parede I é realizada de igual modo ao que foi para a parede de teste, sendo assim, apresenta-se na Figura 73 imagens captadas pela câmara termográfica IR a diferentes instantes.

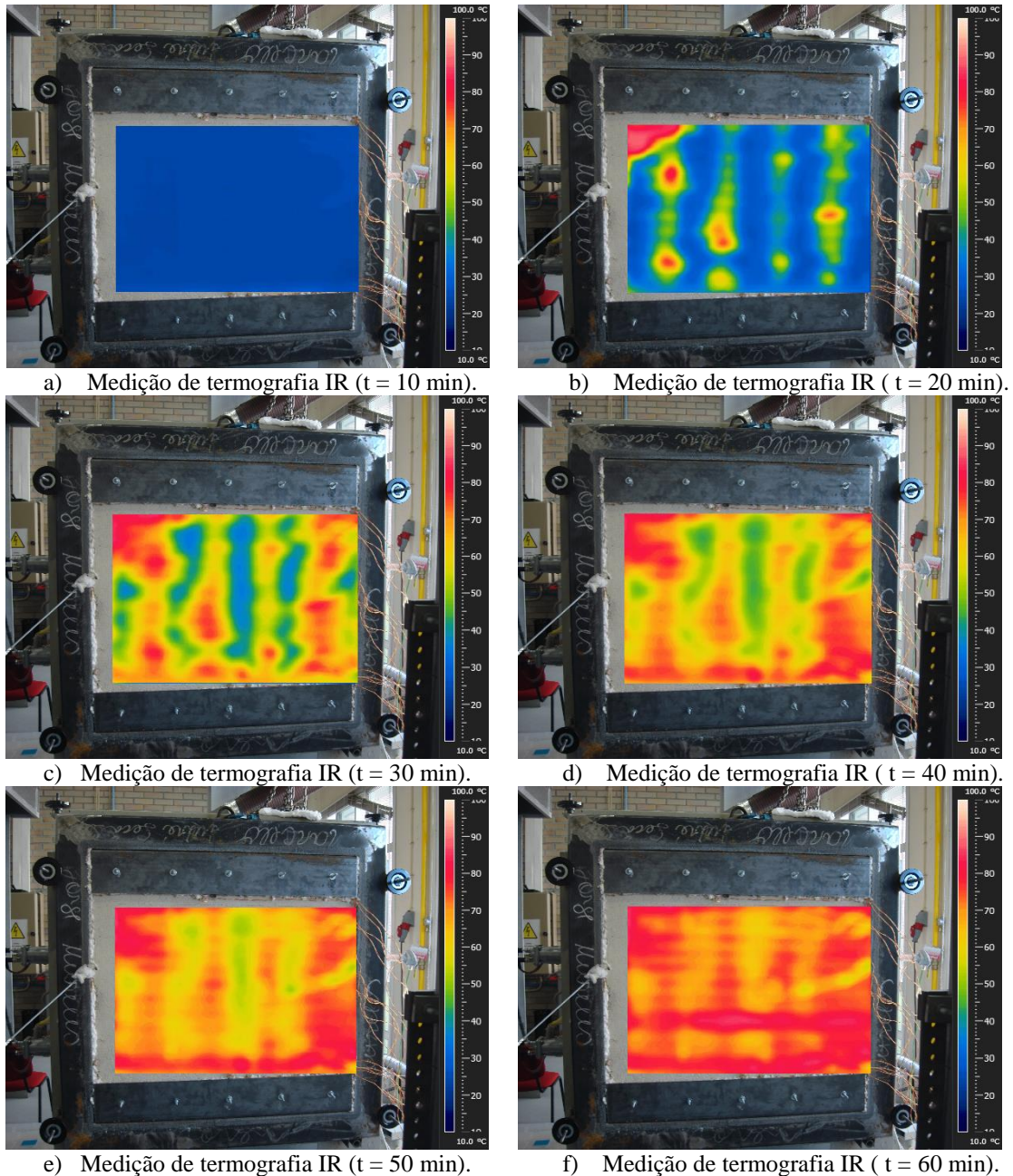


Figura 73 – Medição de termografia IR (Escala: 10 - 100) .

Fazendo a análise em comparação à parede de teste, nota-se uma evolução mais acentuada nos instantes de 20 [min] e 35 [min] respetivamente, o que é perfeitamente espectável

pelo facto da parede I apresentar um menor recobrimento em relação à parede de teste. Na Figura 74 ilustra-se a evolução da temperatura mínima, média e máxima no decorrer do ensaio.

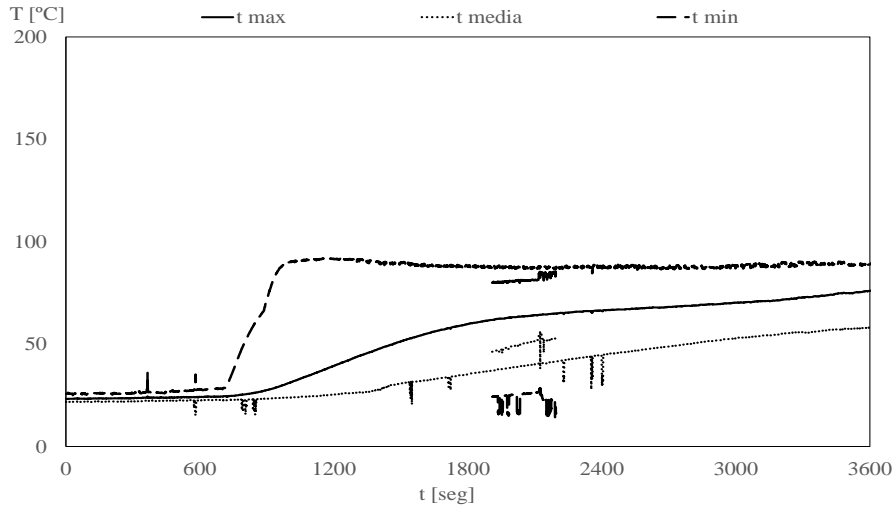


Figura 74 – Temperaturas captadas através da câmara termográfica.

Da leitura do gráfico da figura 74 evidencia-se uma subida inicial de temperatura máxima, numa média de 400 [s], atingindo um pico de 90 °C em média aos 980 [s]. No final do ensaio obtém-se uma temperatura máxima de 88,9 °C, média de 76 °C, e mínima de 58 °C.

Estabelecendo a comparação da leitura efetuada nos termopares de disco, apresenta-se na Figura 75 a sobreposição das curvas que definem as temperaturas da face não exposta referente aos dois tipos de equipamentos de aquisição de dados.

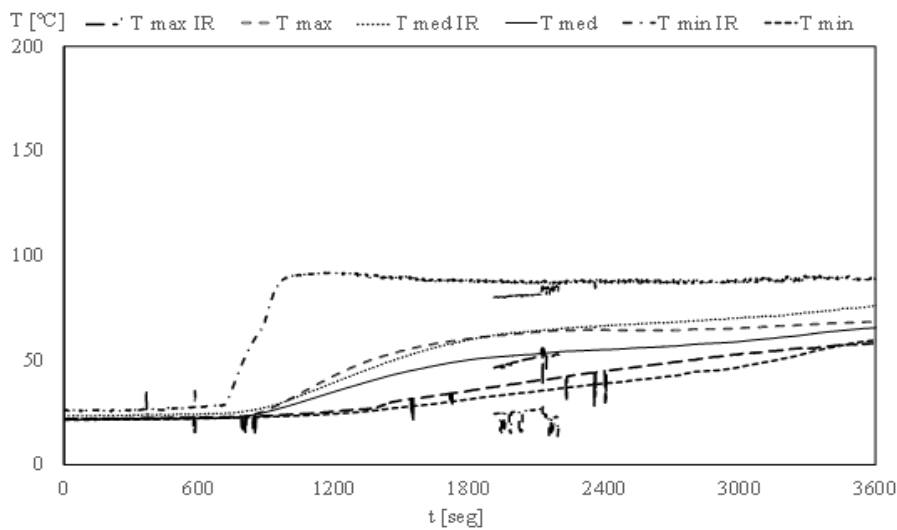


Figura 75 – Temperaturas termográficas e termopares de disco da face não exposta.

Da avaliação do gráfico da Figura 75, no que respeita a temperaturas mínimas a termografia aproxima-se bastante da leitura feita nos termopares de disco. Nas temperaturas máximas, nota-se uma subida mais suave e mais baixa nos termopares de disco, finalizando com uma diferença de temperaturas igual 20 °C. Para as temperaturas médias, tem-se uma evolução coincidente nos dois traçados diferindo entre eles uma média de 10 °C no final do ensaio. As temperaturas mínimas tem praticamente a mesma evolução e terminam o ensaio com a mesma temperatura (diferença de 1,5 °C).

### 6.2.3 Termografia da Parede II

Para análise de temperaturas feita com recurso à câmara termográfica IR na face não exposta, ilustra-se na Figura 76, o registo termográfico a diferentes instantes do ensaio.

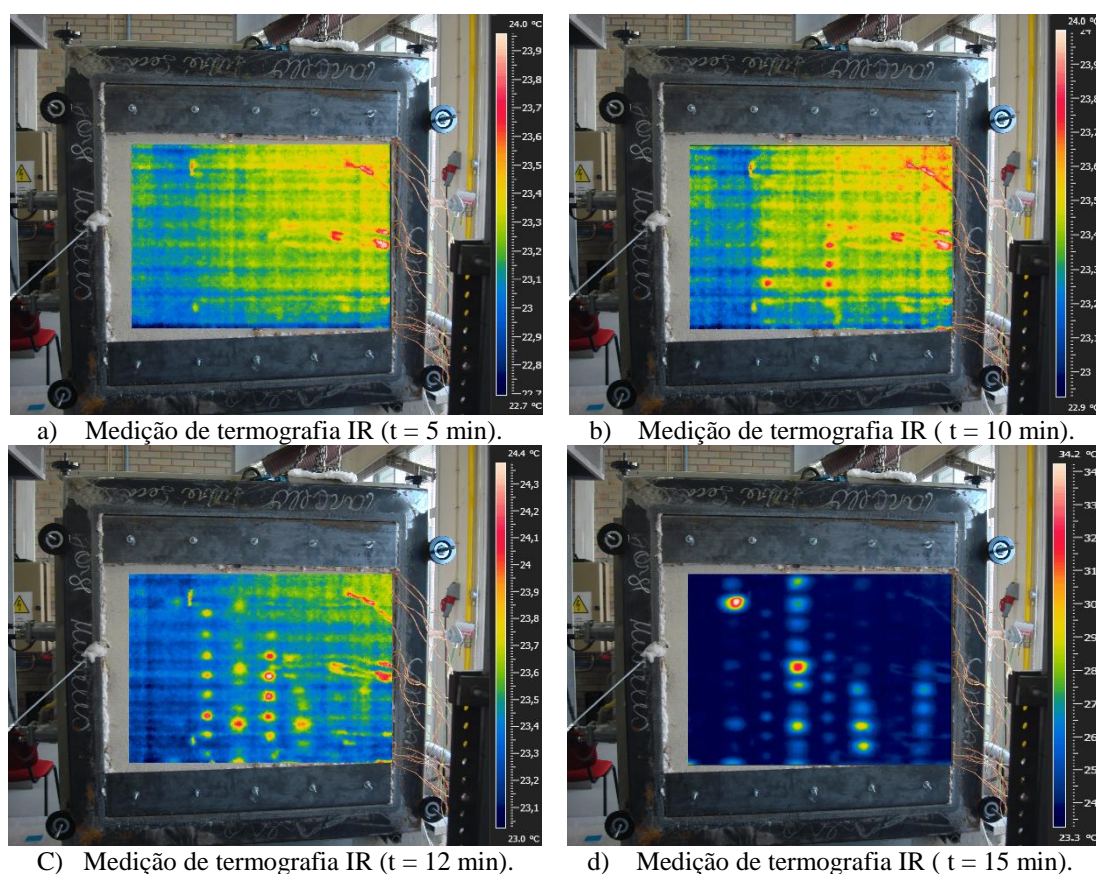


Figura 76 – Medição de termografia IR (Escala automática).

Como se pode comprovar nas imagens da Figura 76, a subida de temperatura na face não exposta (ao contrário das outras amostras de parede), faz-se logo sentir a partir dos 10 [min] de ensaio. Quanto à evolução da temperatura, progride de forma mais acentuada neste modelo de parede, pelo facto da camada de recobrimento ter menor espessura que

a das restantes paredes. O registo das temperaturas efetuado ao longo do ensaio apresenta-se no gráfico da Figura 77.

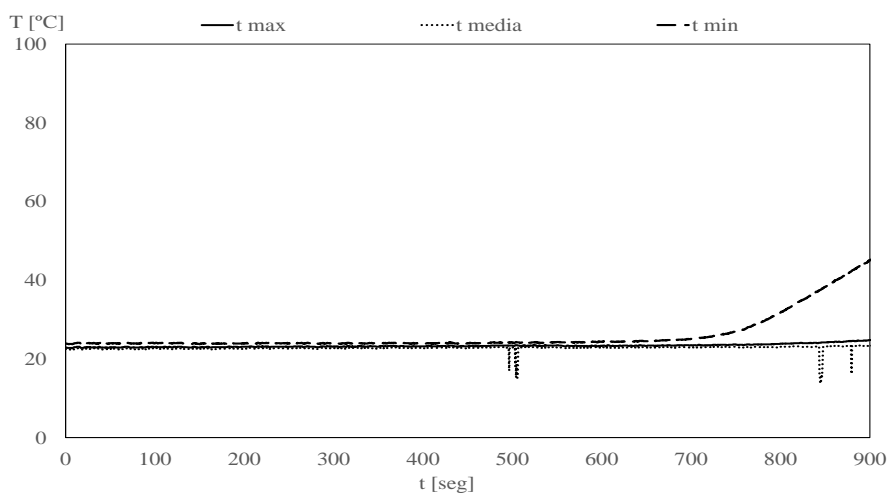


Figura 77 – Temperaturas captadas através da câmara termográfica.

Do gráfico da Figura 77, faz-se a leitura de uma subida de temperatura numa média de 700 [s] (correspondente a temperaturas máximas), progredindo até atingir uma temperatura final de 45 °C. As temperaturas médias e mínimas mantêm o seu valor médio inicial ao longo do ensaio.

De forma a comparar os resultados dos termopares de disco e dos resultados obtidos pela câmara termográfica IR, ilustra-se a Figura 78 com a sobreposição dos traçados correspondentes a cada sistema de aquisição de dados.

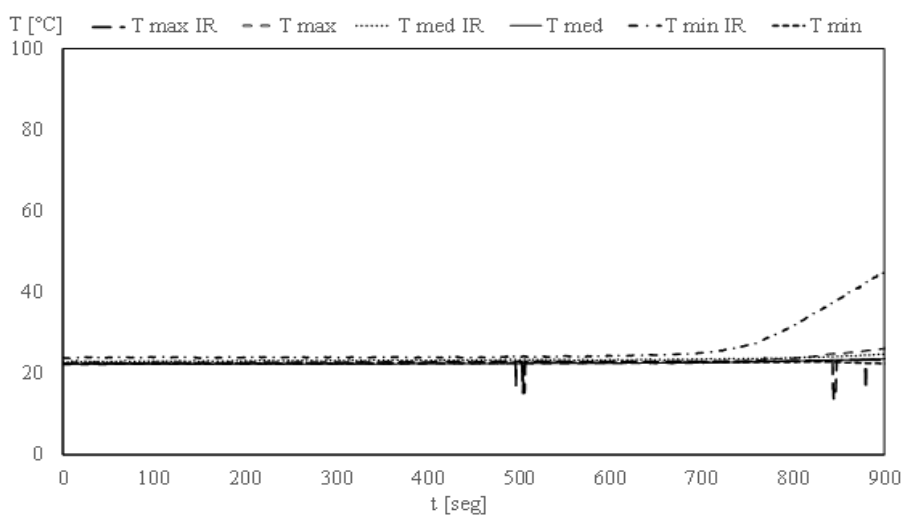


Figura 78 – Temperaturas termográficas e termopares de disco da face não exposta.

Das temperaturas registadas, não se evidencia qualquer subida significativa nas leituras feitas nos termopares de disco. As temperaturas médias e mínimas aproximam-se bastante nos dois sistemas, havendo uma discrepância acentuada nas temperaturas máximas, com um incremento de temperatura de 19 °C no registo termográfico da temperatura final.

### 6.3 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS E NUMÉRICOS

No presente subcapítulo avaliam-se os resultados das simulações numéricas em comparação com os resultados experimentais. Os resultados obtidos e que a seguir se apresentam evidenciam uma escolha adequada dos parâmetros térmicos e das opções de modelação.

#### 6.3.1 Comparação dos resultados da Parede Teste

A comparação de resultados na Parede Teste, assim como nos restantes elementos de parede ensaiados, é feita com referência aos gráficos resultantes das leituras feitas nos pontos pré-definidos no Capítulo 2. O gráfico que se segue ilustra a evolução das temperaturas na argamassa.

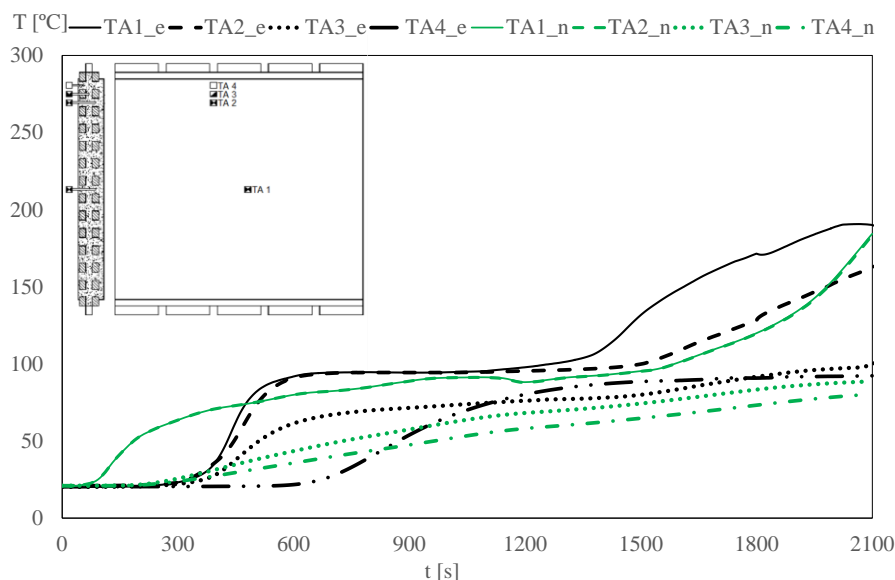


Figura 79 - Resultados obtidos nos termopares aplicados na argamassa de enchimento.

Da observação da Figura 79, percebe-se que a modelação numérica consegue reproduzir de forma aceitável, a leitura feita nos termopares utilizados no ensaio experimental. O

comportamento reproduzido numericamente é capaz de seguir o alinhamento da evolução das temperaturas ao longo do ensaio.

A comparação dos resultados nos pontos de leitura, efetuada nos termopares da madeira, faz-se com referência à Figura 80, a seguir apresentado.

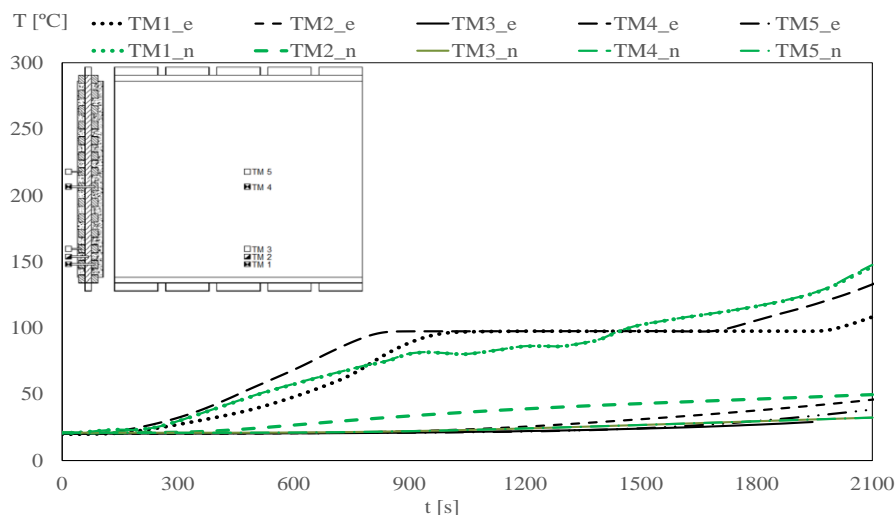


Figura 80 - Resultados obtidos nos termopares aplicados na madeira estrutural.

Da análise ao gráfico da Figura 80, observa-se uma boa convergência entre os resultados numéricos e experimentais. Verifica-se a possibilidade de reproduzir numericamente o patamar de libertação de humidade do material avaliado pelos termopares TM1 e TM4. Algumas discrepâncias entre os resultados experimentais e numéricos podem ser originadas devido à execução das paredes e da sua instrumentação, condicionados por alguma fissura interna, pelo deslocamento de algum termopar, ou até mesmo por falta de homogeneidade do material. De um modo geral, o resultado numérico segue os padrões da leitura experimental, havendo entre eles uma boa concordância e um resultado final muito próximo.

As temperaturas da face não exposta são ilustradas na Figura 81.

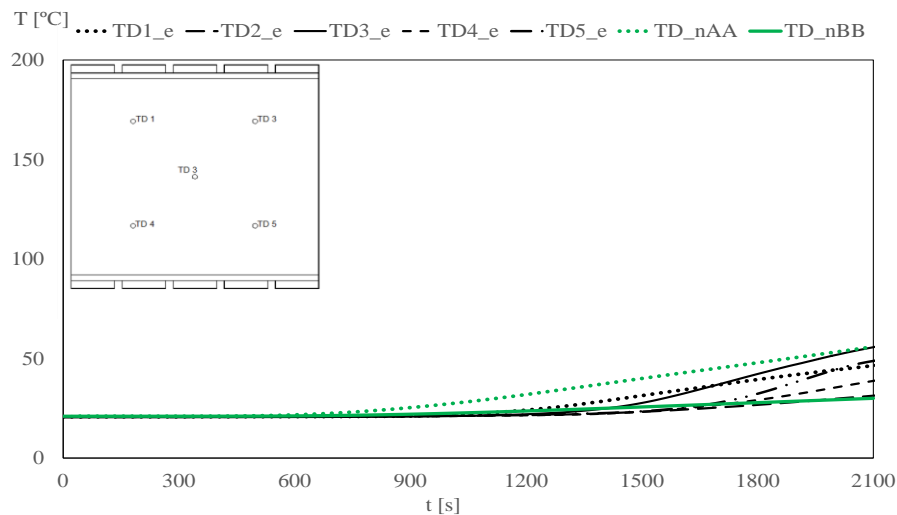


Figura 81 - Resultados obtidos nos termopares de disco aplicados na face não exposta.

Como se pode constatar na evolução das temperaturas, o resultado final nos dois métodos é aproximado, apesar de no decorrer do percurso haver algum desfasamento nas leituras registadas. Deve ser dada particular importância às leituras feitas na secção B (Corte AA e Corte BB da Figura 29), visto os termopares da face não exposta estarem localizados em secções idênticas à referida, resultando assim, uma boa concordância entre os dois métodos.

Apresenta-se na Figura 82 uma comparação do resultado final dos danos do material, na modelação numérica e no ensaio experimental.



Figura 82 – Resultado final numérico e experimental dos danos no material ensaiado.

Como se pode comprovar na Figura 82, na simulação numérica, é expectável a queima de aproximadamente metade do ripado na face exposta ao fogo, o que experimentalmente se vem a confirmar, desta forma, conclui-se e reforça-se a ideia que há uma boa concordância no resultado final entre o modelo numérico e o ensaio experimental.

### 6.3.2 Comparação dos resultados da Parede I

A avaliação dos resultados na Parede I, é de certa forma mais complexa de ser reproduzida numericamente, devido ao seu alto teor em humidade, pelo facto de se ter reconstruído umas das faces da parede num intervalo de tempo muito curto antecedente ao ensaio. Na Figura 83 apresenta-se o resultado numérico e experimental das leituras feitas nos termopares da argamassa.

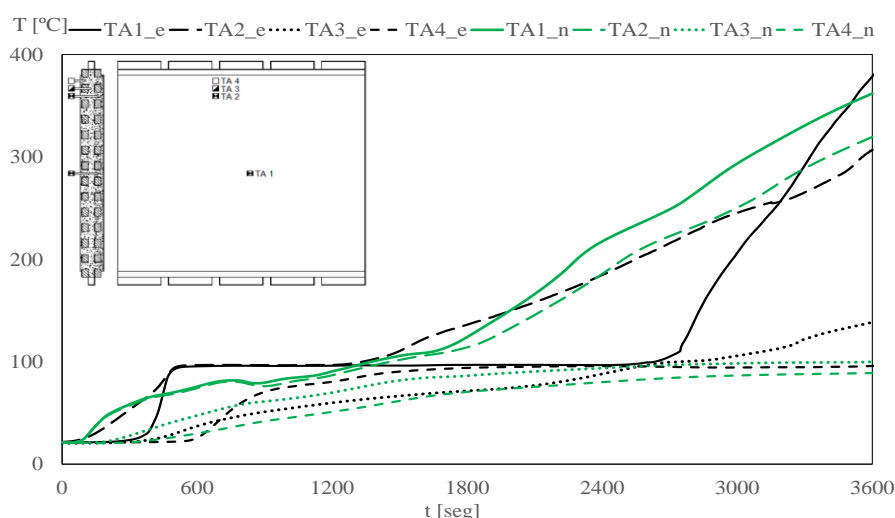


Figura 83 - Resultados obtidos nos termopares aplicados na argamassa de enchimento.

Da avaliação ao registo de temperaturas a maiores profundidades (TA1 e TA2), nota-se uma certa dificuldade em reproduzir numericamente os patamares alongados, resultantes do alto teor de humidade do material. No final do ensaio o registo numérico e experimental convergem para os mesmos valores. Quanto aos restantes termopares, a representação numérica é muito semelhante à evolução experimental, divergindo em alguns instantes pelas razões já anteriormente apresentadas.

Para avaliação do registo de temperaturas feito na madeira, segue a Figura 84 com as leituras do ensaio numérico e experimental.

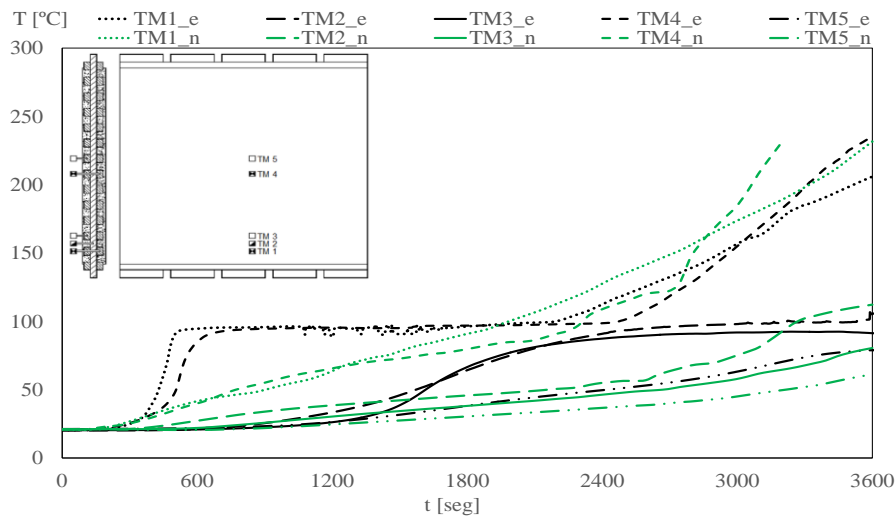


Figura 84 - Resultados obtidos nos termopares aplicados na madeira estrutural.

Da análise ao gráfico da Figura 84, a situação mais flagrante continua a ser o patamar formado para a libertação de humidade (TM1 e TM4), o que é perfeitamente espectável, atendendo ao que já foi referido para a argamassa terrosa. Quando às leituras feitas junto à superfície da face não exposta (TM2, TM3 e TM5), as curvas representadas numericamente acompanham de forma mais regular o desenvolvimento das curvas experimentais. No final, o ensaio termina com resultados numéricos próximos dos experimentais, com exceção no termopar TM4 com um pico final numérico mais acentuado.

Por último, apresenta-se na Figura 85, o registo das temperaturas da face não exposta.

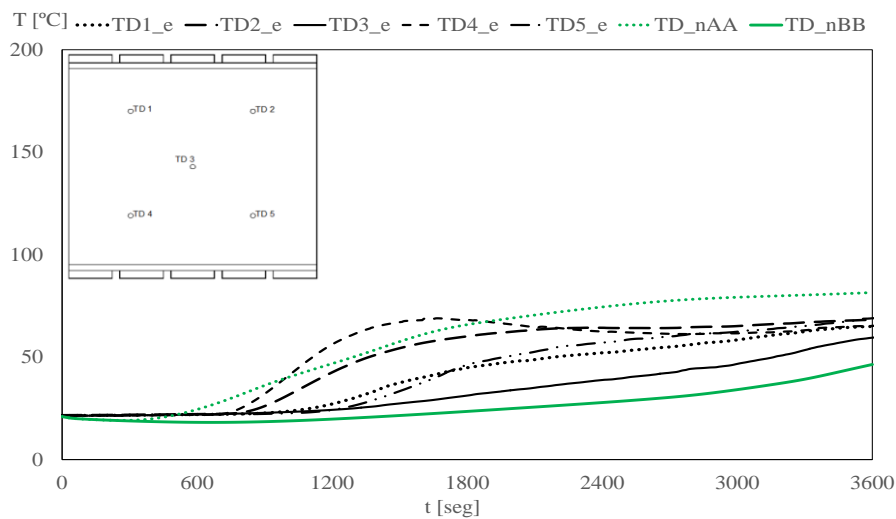


Figura 85 - Resultados obtidos nos termopares de disco aplicados na face não exposta.

Como se pode constatar, o registo numérico dá uma ideia do comportamento esperado do ensaio experimental, seguindo aproximadamente a mesma evolução nos dois modelos de leitura. Reforçando o que anteriormente já foi dito, a diferença acentuada nalgumas leituras ao longo do ensaio, pode dever-se ao facto de amostra não cumprir com o seu tempo de secagem antes do ensaio.

Segue o registo fotográfico do resultado final numérico confrontado com o resultado real.



Figura 86 – Resultado final numérico e experimental dos danos no material ensaiado.

Analisando a Figura 86, verifica-se que a previsão feita no modelo numérico corresponde aos danos que realmente sucederam na estrutura. Como se pode comprovar, o ripado de madeira é totalmente queimado. As tábuas verticais foram minimamente afetadas, verificando-se uma taxa reduzida de carbonização. De notar que apesar de algumas diferenças entre as leituras numéricas e experimentais, o resultado final é bastante satisfatório.

### 6.3.3 Comparação dos resultados da Parede II

No seguimento do que já foi feito nos modelos de parede anteriores, apresenta-se da mesma forma o estudo elaborado para a comparação de leituras feitas numérica e experimentalmente na parede II. Apresenta-se na Figura 87 os resultados referentes às leituras nos termopares aplicados na argamassa de enchimento.

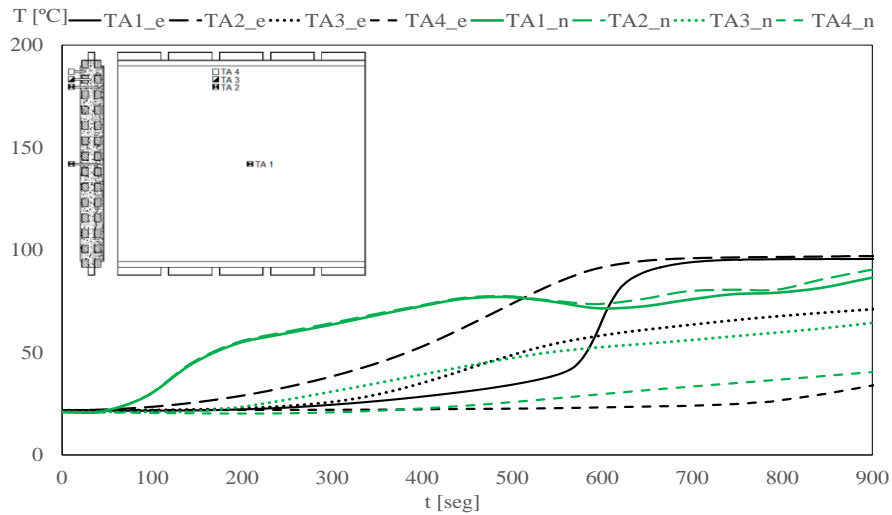


Figura 87 - Resultados obtidos nos termopares aplicados na argamassa de enchimento.

Da observação do gráfico da Figura 87, pode verificar-se que a leitura da simulação numérica, nos termopares a maior profundidade (TA1 e TA2), têm uma subida inicial antecipada em relação à leitura feita experimentalmente, mas de uma forma geral e atendendo a possíveis anomalias no ato de instrumentação da parede, o percurso de leitura nesses pontos é de certa forma aproximado. Nos restantes pontos de leitura, verifica-se uma boa concordância entre os dois sistemas (numérico e experimental).

Apresenta-se em seguida o registo gráfico das leituras feitas nos termopares da madeira.

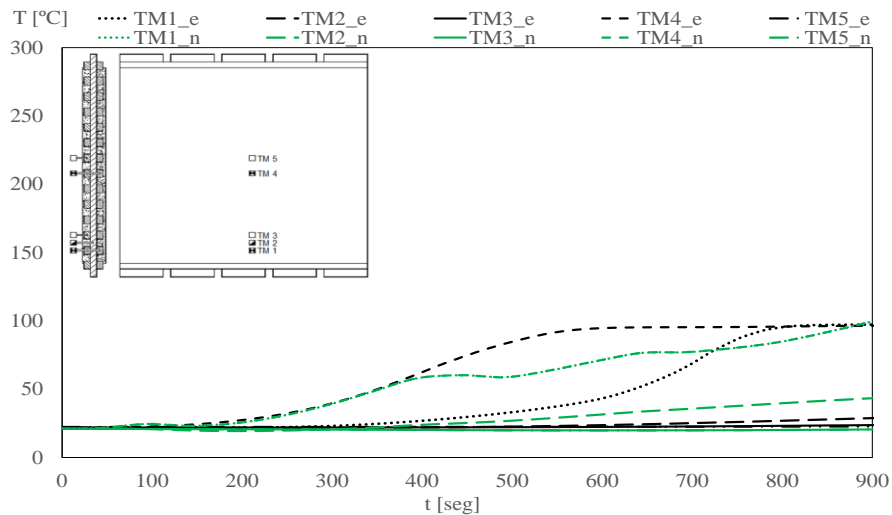


Figura 88 - Resultados obtidos nos termopares aplicados na madeira estrutural.

Da observação da Figura 88, conclui-se que os termopares mais próximos da face exposta ao fogo (TM1 e TM4), apesar de haver alguma discrepância no registo numérico em relação ao experimental, em média o modelo numérico traduz uma boa concordância na

evolução de temperaturas. Os termopares TM5 e TM3 têm um percurso idêntico nos dois sistemas de leitura. Quanto às leituras feitas em TM2, apresentam uma evolução semelhante, apesar de haver um acréscimo médio de 15 °C na leitura numérica.

De seguida, apresentam-se as temperaturas lidas nos termopares da face não exposta.

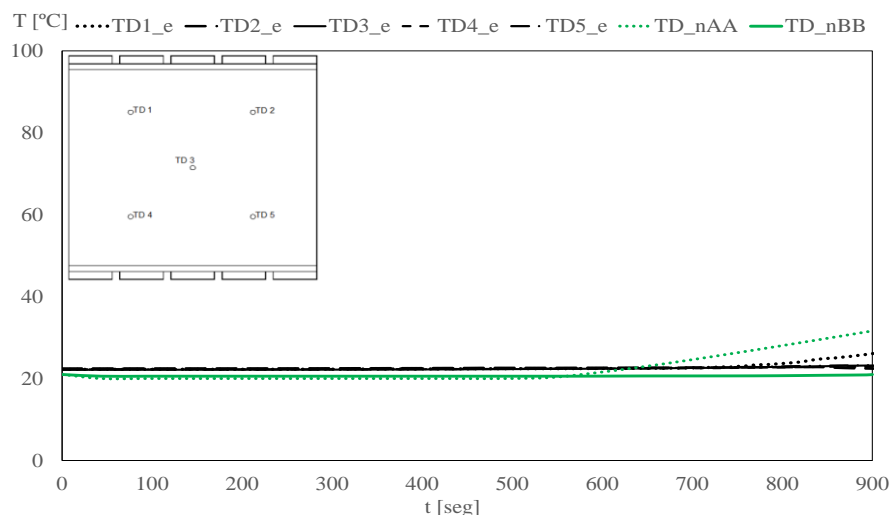


Figura 89 - Resultados obtidos nos termopares de disco aplicados na face não exposta.

Da leitura do gráfico da Figura 89, percebe-se que o modelo numérico representa uma boa convergência em relação ao experimental. Nota-se uma descida mínima de temperatura no modelo numérico devido ao efeito da convecção na face não exposta. De notar que as leituras experimentais se aproximam mais das leituras da secção B, por este ser o material adjacente aos pontos de leitura.

Apresenta-se na Figura 90 o registo fotográfico numérico e experimental do resultado final da parede.



Figura 90 - Resultado final numérico e experimental dos danos no material ensaiado.

O modelo numérico apresenta aproximadamente 1/3 do ripado queimado na face exposta ao fogo, sendo que experimentalmente há a carbonização superficial do ripado de madeira. No entanto, o modelo numérico representa bem o resultado do ensaio experimental.

Encerrando o capítulo de comparação de resultados, apresenta-se nas figuras seguintes, o registo numérico das paredes no instante igual a 900 s.

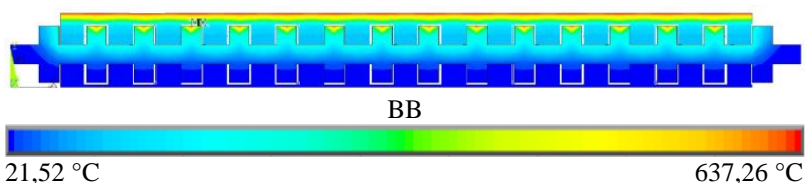


Figura 91 - Resultado numérico da Parede Teste (15mm) aos 900s.

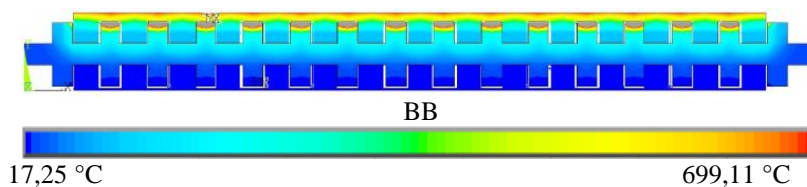


Figura 92 - Resultado numérico da Parede I (10mm) aos 900s.

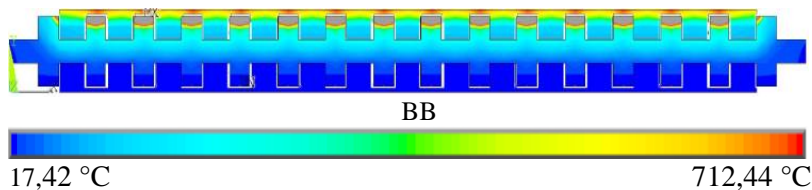


Figura 93 - Resultado numérico da Parede II (5mm) aos 900s.

Da observação das figuras, conclui-se que, camadas de revestimento com espessuras menores que 10 [mm] convergem todas para o mesmo resultado, com danos estruturais muito semelhantes, Figura 92 e 93. Esta constatação evidencia que revestimentos com espessura superiores a 10 [mm] começam a ser relevantes no incremento de resistência ao fogo do material cerâmico, para o instante de tempo de 900 [s] de exposição ao fogo.

# CAPÍTULO 7

---

## CONCLUSÕES

Apresenta-se, neste Capítulo, um resumo das principais conclusões, assim como um sumário dos principais aspetos desenvolvidos. Referem-se, também, alguns temas que poderão ser objeto de futuros desenvolvimentos.

No capítulo 1, procedeu-se a uma revisão do estado de arte, passando em revista o enquadramento histórico das paredes em tabique. Deu-se a conhecer o potencial da técnica construtiva, vantagens, desvantagens, e o seu campo de aplicação. São também analisadas as diferentes abordagens regulamentares inerentes à resistência ao fogo, nomeadamente, a EN 1363-1 [13], referente aos requisitos gerais para ensaios de resistência ao fogo, a EN 1364-1 [14] para os ensaios de resistência ao fogo de paredes não estruturais, e a EN 13501-2 [15], respeitante à classificação dos elementos segundo os ensaios de resistência ao fogo.

No capítulo 2, dedicado essencialmente ao estudo do material de enchimento e recobrimento, mais concretamente de uma argamassa terrosa, conclui-se que se revela de extrema importância a avaliação dos constituintes e das respetivas dosagens embebidas na mistura, pois isto reflete-se no resultado final da parede, desde a aderência ao suporte às patologias inerentes ao processo de secagem, e à sua resistência mecânica final. Uma conclusão particularmente relevante na elaboração da argamassa terrosa, foca-se na inclusão de ligantes cimentícios na mistura, o que deve ser executado de forma cuidada e percentualmente correta de modo a não afetar a capacidade reguladora de humidades da parede, e de igual modo a sua resistência mecânica.

Os ensaios ao fogo realizados nos modelos de parede em tabique procuram evidenciar o bom comportamento da resistência ao fogo do material e o cumprimento de estanqueidade, e de isolamento. Verifica-se que as paredes construídas apresentam boas características de isolamento e estanqueidade, e que ambas cumprem com os critérios impostos pela norma de ensaios da EN 1363 –1 [13], para a duração de ensaio a que foram previstos. A verificação do isolamento foi analisada tendo em conta que o incremento médio de temperatura em relação à temperatura média inicial não excedesse os 140 °C ou que o incremento máximo de temperatura em qualquer ponto da face não exposta, não

superasse a temperatura inicial em 180 °C. O critério de estanquidade foi igualmente verificado ao longo de todo o ensaio, com o auxílio de uma bola em algodão embebida em álcool etílico, tendo-se registado a ausência de chama e de ignição do algodão.

As simulações numéricas com elementos finitos constituem uma ferramenta de análise e previsão do comportamento global das estruturas. Dado que nem sempre se justifica o custo dos ensaios experimentais, e que os resultados obtidos são apenas referentes aos pontos instrumentados, se bem ajustados, permitem a reprodução real do ensaio de forma rápida e extensível à totalidade da estrutura a ensaiar. Houve concordância entre os resultados numéricos e experimentais, traduzindo-se numa modelação válida e ajustada para o ensaio em estudo. Os modelos numéricos foram validados experimentalmente, tendo sido possível calibrar e ajustar as propriedades dos materiais. A validação do modelo numérico é importante, pois permite avaliar, ainda em fase de projeto, a segurança de estruturas quando sujeitas a situações de incêndio e o tempo de resistência antes do colapso. Os resultados obtidos revelam-se persuasores, tanto a nível experimental, como a nível numérico, pois dão a conhecer, mais pormenorizadamente, o comportamento das paredes de tabique em situação de incêndio, podendo prever-se o tempo de resistência antes do seu colapso e, assim, aumentar a segurança das pessoas e dos bens.

## **7.1 TRABALHOS FUTUROS**

A continuação da investigação neste domínio torna-se indispensável, pela precariedade de informação respeitante a construções antigas no âmbito de aplicação de paredes em tabique, que hoje se revelam como património histórico nacional em fase terminal.

Em termos de trabalhos experimentais, a superfície do suporte de madeira deve ser trabalhada de maneira a melhorar a aderência na união dos dois materiais.

Sugere-se, ainda, a investigação mais profunda e coerente de todos os constituintes intervenientes na mistura terrosa, reforçando as suas propriedades mecânicas, sem que com isso, não seja comprometido o seu poder de absorção e regulador dos teores de humidade das habitações, que merecem lugar de destaque e que tão bem caracterizam este tipo de construção.

Ainda no campo de trabalhos experimentais, propõe-se prolongar os ensaios ao fogo até que os critérios de isolamento e estanqueidade sejam violados.

Considera-se ainda de interesse a realização de ensaios, aumentando as espessuras de recobrimento dos modelos de parede.

Em termos de trabalhos numéricos, sugere-se a análise para outros recobrimentos, acrescentando o número de pontos de leitura noutras locais da parede.

## REFERÊNCIAS

---

- [1] J. Pinto, R. Cardoso, A. Paiva, S. Cunha, D. Cruz, J. Vieira, J. Louzada, H. Varum (2011). Caracterização de paredes tradicionais em tabique. Paredes Divisórias 2011. Passado, presente e futuro. Editado: Paulo B. Lourenço, Graça Vasconcelos, Paulo Mendonça, Aires Camões, Ricardo Mateus, Luís Bragança, Luís Ramos. Livro de Atas. Chapa 5 - Guimarães. ISBN: 978-972-8692-60-5. pp. 25-35.
- [2] Gomes, M. V. (2005). Arqueologia da arquitectura de terra em Portugal. In Arquitectura de terra em Portugal (pp.125-131). Lisboa: Argumentum.
- [3] Neves, Sara da Cunha de Morais, Estudo da aplicabilidade de sistemas construtivos no desempenho da sustentabilidade na Engenharia Civil. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. IST, Lisboa, 2011.
- [4] Navarro, R. F. (2006). A Evolução dos Materiais, Parte1: da Pré-história ao Início da Era Moderna. Revista Electrónica de Materiais e Processos, 1, 1-11.
- [5] Sandra Cunha, Jorge Pinto, Anabela Paiva, Ana Briga – Sá, Nuno Soares, Humberto Varum and Débora Ferreira (2014). A contribution for the improvement in thermal insulation of tabique walls coated with metal corrugated sheets. The chartered Institution of Building Services Engineers.
- [6] Arquitectura de Terra em Portugal, ARGUMENTUM, 1ª Edição, ISBN: 972-8479-36-0 Setembro de 2005.
- [7] Informações de interesse geral, edifícios com estrutura de alvenaria (< 1755) [on-line], disponível:  
[http://www-ext.lnec.pt/LNEC/DE/NESDE/divulgacao/Edif\\_ant\\_1755.html](http://www-ext.lnec.pt/LNEC/DE/NESDE/divulgacao/Edif_ant_1755.html)
- [8] Arundel, A., et al. Indirect health effects of relative humidity in indoor environments. Environmental Health Perspectives. 1986, Vol. 65, pp. 351-361.

- [9] EN 13501-1:1999 “Fire classification of construction products and building elements – Part 1: Classification using test data from reaction to fire tests”. Ed. Novembro 1999, CEN, Bruxelas.
- [10] FARIA, J. Amorim (2009); NEGRÃO, João. Projecto de Estruturas de Madeira. Publindústria, Edições Técnicas, 2009.
- [11] Kenneth Reid, *Panel Infillings to Timber-framed Buildings*, SPAB technical pamphlet No 11, SPAB.
- [12] CEN, European Committee for Standardization (November 2004) – “*Eurocode 5: Design of timber structures - Part 1-2: General - Structural fire design*”, Brussels.
- [13] CEN, European Committee for Standardization (August 1999) – “*EN 1363-1, Fire resistance tests - Part 1: General Requirements*”, Brussels.
- [14] CEN, European Committee for Standardization (February 2000) – “*EN 1634-1, Fire resistance tests for door and shutter assemblies - Part 1: Fire door and shutters*”, Brussels.
- [15] CEN, Comité Europeo de Normalización (Agosto 2003) – “*EN 13501-2, Clasificación de los productos de construcción y de los elementos constructivos en función de su comportamiento ante el fuego - Parte 2: Clasificación a partir de datos obtenidos de los ensayos de resistencia al fuego excluidas las instalaciones de ventilación*”, Bruxelles.
- [16] Diário da República Portuguesa. Decreto-Lei n.º 220/2008, D.R. n.º 220, Série I de 2008-11-12. Estabelece o regime jurídico da segurança contra incêndios em edifícios.

- [17] Jesus, Arlete S. Costa, Ensaios de resistência ao fogo de elementos de compartimentação. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. U.A, Aveiro, 2008.
- [18] Vila Real, P. (2003). Incêndio em estruturas metálicas: cálculo estrutural. Lisboa, Orion.
- [19] EN1996-1-2: 2005. Eurocode 6: Design of masonry structures - Part 1-2: General rules – structural fire design. CEN - Comité Euron. CEN - Comité Européen de Normalisation, 2005.
- [20] Thê - Nguyen D., Meftah F. - Behavior of hollow clay brick masonry walls during fire. Part2: 3D finite element modeling and spalling assessment, Fire Safety Journal, 66, 35-45, 2014.
- [21] Sampaio, J.C., Materiais de Construção, AEFEUP, Universidade do Porto, 1978.
- [22] Soares, Nuno G. Lobo, Soluções construtivas tradicionais de revestimento de paredes exteriores em tabique. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. UTAD, Vila Real, 2012.
- [23] Norma Portuguesa EN 196-1 – “Métodos de cimentos, Parte 1: Determinação das resistências mecânicas”, 1996.
- [24] ANSYS. Academic Research, release 12, Help System, Element reference. s.l.: ANSYS.
- [25] Silva, Carlos M. Oliveira Costa, Avaliação da resistência ao fogo de produtos de construção. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. U.A, Aveiro, 2010.
- [26] Sunday E. Etuk, Idara O. Akpabio. E. M. Udoh, Comparison of the thermal properties of clay samples as potential walling material for naturally cooled building design, Journal of Environmental Sciences, 15 (1), 65-68, 2003.



## Calibração das propriedades da terra

### PAREDE de TESTE – simulação 2D (corte AA e corte BB)

As propriedades da madeira seguem o EC5 [12]. Emissividade da madeira igual a 0,8.

A calibração das propriedades da (terra-cotta) foi efetuada após várias simulações numéricas para cada uma das seguintes tentativas. Emissividade igual 0,85. Massa específica 1290 kg/m<sup>3</sup>.

Tentativa # 1, [26]				
Temp, °C	Condutividade, W/mK		Temp, °C	Calor específico, J/kg K
-	0,383		-	2190

Tentativa # 2, [19]				
Temp, °C	Condutividade, W/mK		Temp, °C	Calor específico, J/kg K
0	0,2		0	564
200	0,6		90	564
1200	0,6		100	10716
			200	2820
			1200	564

Tentativa # 3, [20]				
Temp, °C	Condutividade, W/mK		Temp, °C	Calor específico, J/kg K
0	0,383		0	2190
100	0,383		90	2190
200	0,306		100	32850
300	0,306		200	5475
400	0,23		1200	3285
1200	0,038			

Tentativa # 4, [25]				
Temp, °C	Condutividade, W/mK		Temp, °C	Calor específico, J/kg K
0	0,6		0	1000
1200	0,6		90	1000
			100	2000
			110	2000
			200	1000
			1200	1000

Tentativa # 5, [25]				
Temp, °C	Condutividade, W/mK		Temp, °C	Calor específico, J/kg K
0	0,55		0	1000
100	2,75		90	1000
110	0,55		100	2000
1200	0,55		110	2000
			200	1750
			1200	1750

Tentativa # 6, [25]				
Temp, °C	Condutividade, W/mK		Temp, °C	Calor específico, J/kg K
0	0,55		0	1000
100	2,75		90	1000
110	0,55		100	10000
1200	0,55		110	10000
			130	1500
			1200	1500

Tentativa # 7 (própria)				
Temp, °C	Condutividade, W/mK		Temp, °C	Calor específico, J/kg K
0	0,55		0	564
100	2,75		90	564
110	0,55		100	10716
1200	0,55		200	2820
			1200	564

Tentativa # 8 (própria)				
Temp, °C	Condutividade, W/mK		Temp, °C	Calor específico, J/kg K
0	0,55		0	500
100	2,75		80	500
110	0,55		100	10716
1200	0,55		110	10716
			200	1000
			1200	1000

Tentativa # 9, [25]				
Temp, °C	Condutividade, W/mK		Temp, °C	Calor específico, J/kg K
0	0,6		0	1000
100	2,2		90	1000
110	0,6		100	2000
1200	0,6		110	2000
			120	750
			1200	750

Tentativa # 10, [25]				
Temp, °C	Condutividade, W/mK		Temp, °C	Calor específico, J/kg K
0	0,6		0	1000
100	2,2		90	1000
110	0,6		100	6000
1200	0,6		110	6000
			120	1000
			1200	1000

Tentativa # 11 (própria)				
Temp, °C	Condutividade, W/mK		Temp, °C	Calor específico, J/kg K
0	0,55		0	1000
100	2,75		90	1000
110	0,55		100	10000
1200	0,55		110	10000
			130	1000
			1200	1000

Tentativa # 12 (própria)				
Temp, °C	Condutividade, W/mK		Temp, °C	Calor específico, J/kg K
0	0,55		0	1000
100	3,75		90	1000
110	0,55		100	10000
1200	0,55		110	10000
			130	1500
			1200	1500

Tentativa # 13 (própria)				
Temp, °C	Condutividade, W/mK		Temp, °C	Calor específico, J/kg K
0	0,55		0	564
100	2,75		90	564
110	0,55		100	10716
1200	0,55		120	10716
			200	1000
			800	1000
			1200	564

Tentativa # 14 (própria)				
Temp, °C	Condutividade, W/mK		Temp, °C	Calor específico, J/kg K
0	0,55		0	564
100	2,75		90	564
120	0,55		100	10716
1200	0,55		120	10716
			200	1000
			1200	1000

Tentativa # 15 (própria)				
Temp, °C	Condutividade, W/mK		Temp, °C	Calor específico, J/kg K
0	0,55		0	564
80	2,75		70	564
100	0,55		80	10716
1200	0,55		90	10716
			200	1000
			1200	1000

Tentativa # 16 (própria)				
Temp, °C	Condutividade, W/mK		Temp, °C	Calor específico, J/kg K
0	0,55		0	564
120	2,75		110	564
130	0,55		120	10716
1200	0,55		130	10716
			220	1000
			1200	1000

Tentativa # 17 (própria)				
Temp, °C	Condutividade, W/mK		Temp, °C	Calor específico, J/kg K
0	0,55		0	564
120	2,75		110	564
130	0,55		120	10716
1200	0,55		130	10716
			220	1200
			1200	1200

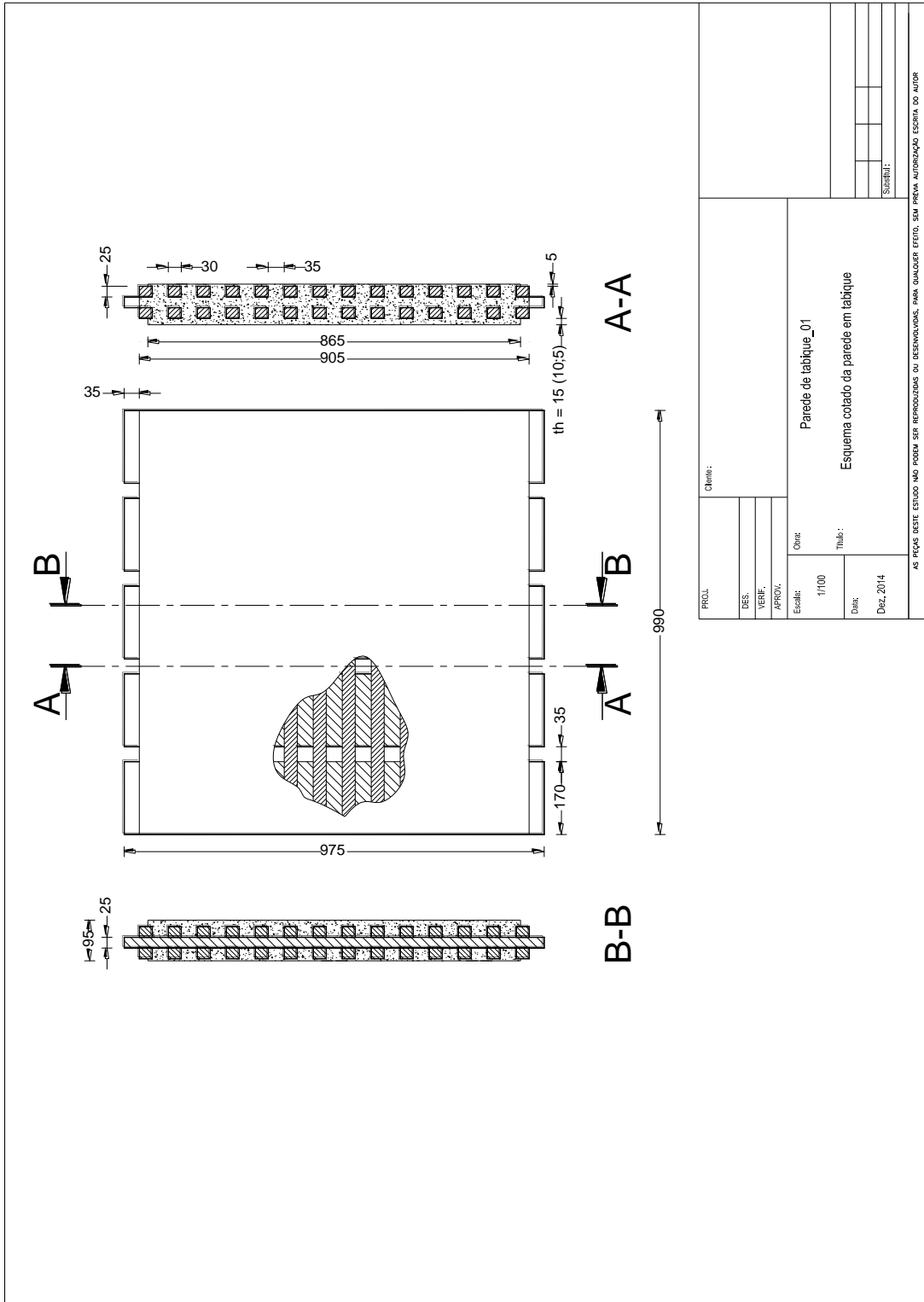
Tentativa # 18 (própria)				
Temp, °C	Condutividade, W/mK		Temp, °C	Calor específico, J/kg K
0	0,55		0	564
150	2,75		140	564
160	0,55		150	10716
1200	0,55		160	10716
			250	1000
			1200	1000

Tentativa # 19 (própria)				
Temp, °C	Condutividade, W/mK		Temp, °C	Calor específico, J/kg K
0	0,55		0	400
150	2,75		140	400
130	0,55		150	10000
1200	0,55		160	10000
			250	800
			1200	800

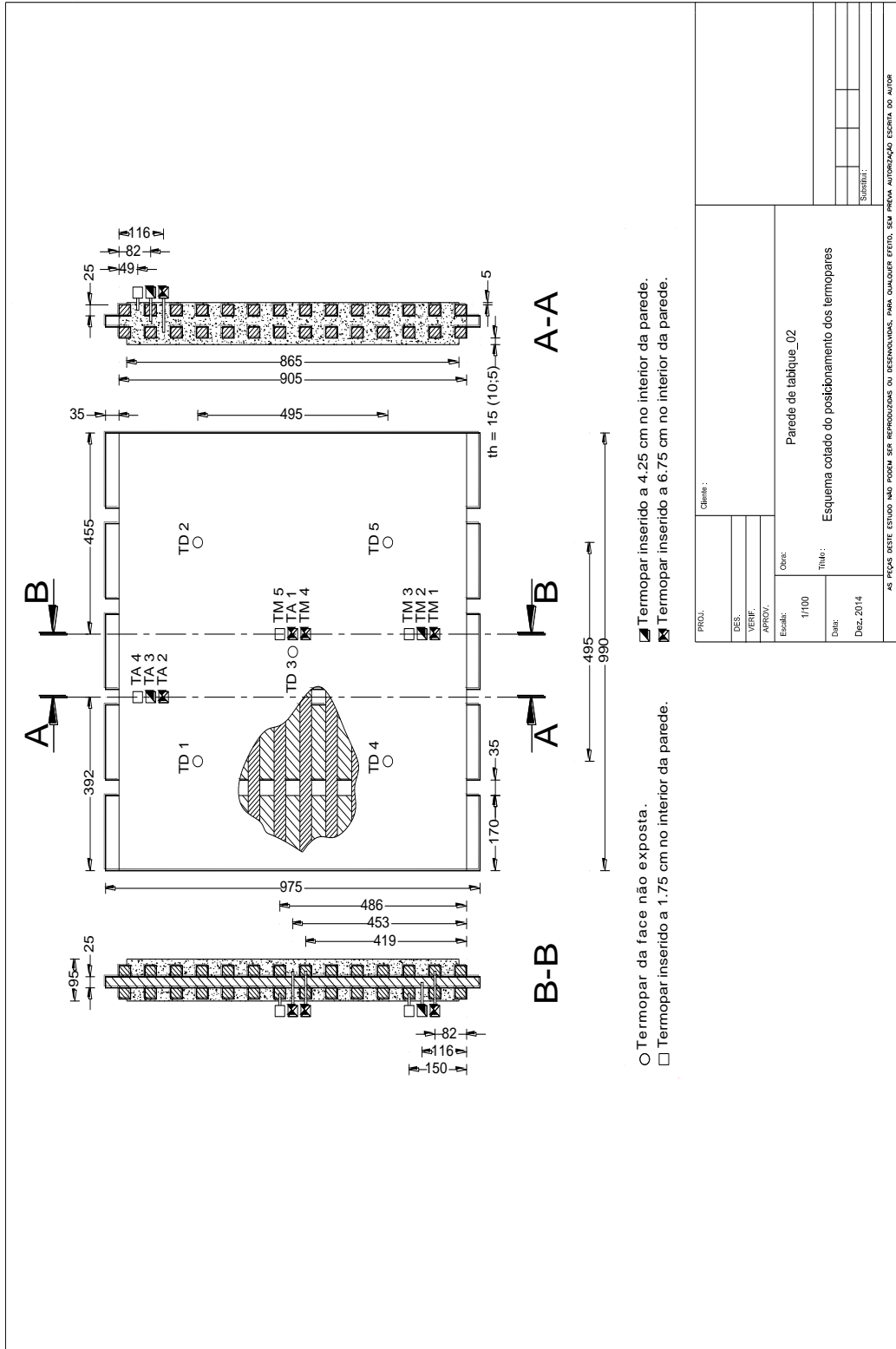
<b>Tentativa # 20 (própria) – utilizada para 2D</b>				
Temp, °C	Condutividade, W/mK		Temp, °C	Calor específico, J/kg K
0	0,55		0	564
100	2,75		90	564
110	0,55		100	10716
1200	0,55		110	10716
			200	1000
			1200	1000

# ANEXO B

## Esquema cotado da parede em tabique



## Esquema cotado do posicionamento dos termopares



PROJ.	Cliente:
DES.	
VERIF.	
APROV.	
Escala:	17/100
Outro:	Parede de tabique_02
Título:	Esquema cotado do posicionamento dos termopares
Data:	Dez. 2014
Substitui:	
AS PEÇAS DESTA ESTUDO NÃO PODEM SER REPRODUZIDAS OU DESSEMIADAS PARA QUALQUER EFEITO, SEM PERMISSÃO ESCRITA DO AUTOR	

Esquema cotado do aro de fixação

