



Universidade de Aveiro Departamento de Civil
2010

**Carlos Miguel Oliveira
Costa e Silva**

**Avaliação da Resistência ao Fogo de Produtos de
Construção**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil realizada sob a orientação científica do Doutor Nuno Lopes, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro e co-orientação do Doutor Paulo Vila Real, Professor Catedrático do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro.

o júri

presidente

Prof. Doutor Paulo Barreto Cachim
professor associado da Universidade de Aveiro

Prof. Paulo Jorge de Melo Matias Faria de Vila Real
professor catedrático da Universidade de Aveiro

Prof. Doutor Miguel Jorge Chichorro Rodrigues Gonçalves
professor auxiliar da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Prof. Doutor Nuno Filipe Ferreira Soares Borges Lopes
professor auxiliar da Universidade de Aveiro

agradecimentos

Agradeço à minha família e aos meus amigos pelo apoio que sempre me deram para a elaboração deste trabalho.

Os meus sinceros agradecimentos aos Prof. Doutor Nuno Lopes e Prof. Doutor Paulo Vila Real pela motivação, empenho e dedicação com que orientaram este trabalho.

Ao Prof. Doutor Romeu Vicente pelos seus conhecimentos transmitidos para a modelação das propriedades térmicas dos materiais constituintes da parede em blocos solo-cimento e kraftterra

palavras-chave

Temperatura, condutividade térmica, calor específico, modelação numérica, resistência ao fogo.

resumo

Como se sabe, os elementos de compartimentação são um obstáculo à passagem do fogo, limitando a propagação do mesmo no interior de um edifício. O conhecimento da resistência ao fogo destes elementos permite avaliar o seu desempenho numa situação de incêndio. É importante que os elementos de compartimentação mantenham as suas funções durante um certo período de tempo para possibilitar a evacuação das pessoas e a intervenção dos bombeiros.

Esta dissertação encontra-se dividida em quatro partes. A primeira centra-se na regulamentação sobre resistência ao fogo. Na segunda parte é apresentado o comportamento térmico de alguns materiais e produtos de construção mais utilizados actualmente. Na terceira parte é descrito três dos ensaios realizados no LERF, Laboratório de Estruturas e Resistência ao Fogo da Universidade de Aveiro.

Por fim, na quarta parte, é descrito uma modelação numérica realizada a uma parede com blocos solo-cimento e kraftterra.

keywords

Temperature, thermal conductivity, specific heat, European standards, numerical modelling, fire resistance.

abstract

As we know, the separating element is an obstacle to the transition of fire, limiting the spread inside of a building. Knowledge of fire resistance of these elements allows evaluating their performance in a situation of fire. It is important that the separating elements keep their functions during a certain period to allow the evacuation of people and the intervention of firefighters. This dissertation was divided into four parts. The first one focuses on the regulation of fire resistance. In the second part, it is presented the thermal behaviour from some materials and construction products that are used presently. In the third part, it is described three of the fire resistance tests done by LERF, Laboratory of Structures and Fire Resistance of the University of Aveiro. Finally, in the fourth part, it is described one numerical modelling done to a wall of soil-cement and Kraftterra blocks.

Índice

Lista de acrónimos.....	XIII
Lista de símbolos.....	XV
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Considerações gerais.....	1
1.1.1. Motivação.....	1
1.1.2. Objectivos.....	1
1.1.3. Estrutura.....	2
1.2. Conceitos importantes.....	2
1.2.1. Parâmetros a avaliar na resistência ao fogo.....	2
1.2.2. Característica dos incêndios.....	4
1.2.3. Curvas nominais.....	4
1.2.4. Ensaios em laboratório.....	5
1.3. Regulamentação.....	6
1.3.1. Normalização Nacional.....	6
1.3.1.1. Regime Jurídico de Segurança contra Incêndios em Edifícios (Decreto Lei nº 220/2008).....	6
1.3.1.2. Anexos do DL nº 220/2008.....	7
1.3.1.3. Regulamento Técnico de Segurança contra Incêndio em Edifícios (Portaria nº1532/2008).....	8
1.3.2. Normalização europeia.....	9
1.3.2.1. Classificação segundo os ensaios de resistência ao fogo excluindo as instalações de ventilação (EN13501-2).....	10
1.3.2.2. Normalização europeia – Ensaios para resistência ao fogo – Requisitos gerais (EN1363-1).....	12
2. MATERIAIS E SOLUÇÕES CONSTRUTIVAS E SEU COMPORTAMENTO TÉRMICO.....	19

2.1.	Considerações gerais sobre as propriedades térmicas	19
2.1.1.	Processos de transmissão de calor.....	19
2.1.1.1.	Condução	20
2.1.1.2.	Convecção.....	21
2.1.1.3.	Radiação.....	22
2.1.2.	Definições teóricas de algumas propriedades térmicas.....	23
2.2.	Materiais com função de suporte ou compartimentação e respectivas propriedades térmicas pelos eurocódigos	24
2.2.1.	Aço de carbono e aço inoxidável	24
2.2.2.	Alumínio.....	26
2.2.3.	Betão.....	28
2.2.4.	Madeira.....	30
2.3.	Materiais de protecção ao fogo.....	34
2.3.1.	Argamassa Projectada	35
2.3.2.	Materiais intumescentes	35
2.3.3.	Placas de fibra compactadas (Lã de Rocha).....	36
2.3.4.	Placas de gesso	37
2.3.5.	Propriedades térmicas de alguns materiais de protecção	38
2.4.	Elementos usados em compartimentação resistente ao fogo.....	38
2.4.1.	Alvenaria	39
2.4.1.1.	Considerações iniciais.....	39
2.4.1.2.	Betão celular autoclavado	39
2.4.1.3.	Blocos solo-cimento.....	40
2.4.1.4.	Blocos Kraftterra.....	41
2.4.1.5.	Tijolo Cerâmico	42
2.4.1.6.	Comportamento Térmico pelo Eurocódigo 6 da Alvenaria	43

2.4.1.7.	Resistência ao fogo de paredes de alvenaria sem funções de suporte de cargas pelo Eurocódigo 6	44
2.4.1.8.	Propriedades térmicas de alguns tipos de alvenaria.....	44
2.4.2.	Exigências de resistência ao fogo de paredes de betão sem funções de suporte de cargas pelas tabelas técnicas	45
2.4.3.	Placas de Gesso Cartonado.....	45
2.4.4.	Painéis sandwich com lã de rocha para coberturas e fachadas.....	46
2.4.5.	Vidro resistente ao fogo.....	47
2.4.6.	Portas corta-fogo	49
3.	ENSAIOS EXPERIMENTAIS DE RESISTÊNCIA AO FOGO	51
3.1.	Descrição dos equipamentos e softwares do LERF.....	51
3.2.	Ensaio a portas	52
3.2.1.	Preparação dos ensaios	52
3.2.2.	Ensaio de resistência ao fogo a portas em aglomerado de madeira revestido com papel kraft	53
3.2.2.1.	Detalhe da amostra	53
3.2.2.2.	Observações do ensaio	54
3.2.2.3.	Resultados do ensaio	55
3.2.2.4.	Conclusão	56
3.2.3.	Ensaio de resistência ao fogo a portas em aço.....	56
3.2.3.1.	Detalhe da amostra	56
3.2.3.2.	Registo fotográfico.....	57
3.2.3.3.	Resultados do ensaio	60
3.2.3.4.	Conclusão	61
3.2.4.	Ensaio de resistência ao fogo a portas em madeira	61
3.2.4.1.	Detalhes da amostra	62
3.2.4.2.	Observações adicionais	63

3.2.4.3.	Resultados obtidos	64
3.2.4.4.	Conclusão.....	65
3.3.	Considerações finais	65
4.	MODELAÇÃO DE UMA PAREDE DE BLOCOS SOLO-CIMENTO E KRAFTERRA SUJEITA AO FOGO.....	67
4.1.	Introdução.....	67
4.2.	Ensaio de resistência ao fogo a uma parede solo-cimento e kraftterra.....	67
4.2.1.	Detalhes da amostra	67
4.2.2.	Observações adicionais	69
4.2.3.	Resultados obtidos.....	70
4.2.4.	Conclusão	71
4.3.	Obtenção da malha pelo GID	72
4.3.1.	Descrição geral	72
4.3.2.	Descrição da parede	72
4.3.3.	Modelo geométrico da parede pelo GID	73
4.3.3.1.	Modelo geométrico A da parede.....	73
4.3.3.2.	Modelo geométrico B da parede	73
4.3.4.	Malha de elementos finitos pelo GID	74
4.3.4.1.	Malha 1,2 e 3 de elementos finitos do modelo geométrico A	75
4.3.4.2.	Malha 4 de elementos finitos do modelo geométrico B	76
4.4.	Propriedades térmicas dos materiais usados na modelação numérica.....	77
4.4.1.	Valores retirados do RCCTE.....	77
4.4.2.	Valores retirados de bases de dados	78
4.4.3.	Propriedades térmicas	80
4.5.	Modelação numérica no SAFIR	81
4.5.1.	Descrição geral	81

4.5.2.	Modelo numérico no SAFIR	81
4.5.2.1.	Modelos numéricos da parede com a malha 1, 2 e 3.....	81
4.5.3.	Curva de aquecimento usada para a modelação numérica	82
4.5.4.	Resultados e análise da modelação numérica.....	83
4.5.4.1.	Resultados gráficos das temperaturas nas diferentes malhas	84
4.5.4.2.	Distribuição das temperaturas da parede com a malha 3	88
4.5.1.	Calibração do modelo numérico.....	91
4.5.1.1.	Calibração da face de blocos Kraftterra (P2)	92
4.5.1.2.	Calibração da face de blocos solo-cimento (P5)	96
4.6.	Considerações finais	99
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS.....	101
5.1.	Considerações finais	101
5.2.	Conclusões finais	101
5.3.	Desenvolvimentos futuros	102
	BIBLIOGRAFIA	103

Índice de Figuras

Figura 1-1 Curvas nominais temperatura-tempo.	5
Figura 1-2 Representação esquemática de um termopar (Jesus, 2008).....	14
Figura 1-3 Termopar de placa (Jesus, 2008).	14
Figura 1-4 Termopar exterior (Jesus, 2008).	15
Figura 1-5 Equipamento para medição da deformação (Jesus, 2008).....	15
Figura 1-6 Tampão de algodão (Jesus, 2008).....	15
Figura 2-1 Condução através de um sólido ou fluido estacionário (Vila Real, 2010).	21
Figura 2-2 Convecção de uma superfície para um fluido em movimento (Vila Real, 2010).	22
Figura 2-3 Trocas de calor por radiação entre duas superfícies(Vila Real, 2010).	23
Figura 2-4 Calor específico em função da temperatura. (CEN, 2004b).....	25
Figura 2-5 Relação entre a condutividade térmica e a temperatura.(CEN, 2004b).....	26
Figura 2-6 Calor específico de ligas de alumínio com a temperatura.(CEN, 2006).....	27
Figura 2-7 Condutividade térmica de ligas de alumínio com a temperatura.(CEN, 2006). 28	
Figura 2-8 Calor específico em função da temperatura para 3 tipos diferentes de teores de água por peso de betão (CEN, 2004a).	29
Figura 2-9 Limite superior e inferior da condutividade térmica em função da temperatura para betão normal (CEN, 2004a).....	30
Figura 2-10 Relação entre calor específico da madeira e a temperatura (CEN, 2004c).....	32
Figura 2-11 Condutividade térmica da madeira para diferentes temperaturas(CEN, 2004c).	33
Figura 2-12 Relação entre a massa volúmica e a temperatura para madeira com um teor de água inicial de 12% (CEN, 2004c).	33
Figura 2-13 Reacção da tinta intumescente (Mesquita, et al., 2006).....	36
Figura 2-14 Fita intumescente.	36
Figura 2-15 Placas de Lã de Rocha (Larocha, 2010).	37
Figura 2-16 Parede em blocos de betão celular autoclavado Ytong(Ytong, 2010)	40
Figura 2-17 Blocos Solo-cimento(Buson, 2009).....	41
Figura 2-18 Tipos de tijolos cerâmicos (APICER, 2000).	42
Figura 2-19 Valores de cálculo das propriedades térmicas de alvenaria cerâmica com massa volúmica entre 900-1200 kg/m ³ (CEN, 2005b).....	43
Figura 2-20 Colocação de placa de gesso cartonado(Viver, 2010).	46

Figura 2-21 Placa sandwich para cobertura(Mundiperfil, 2010).	46
Figura 2-22 Porta corta-fogo(Vicaima, 2010).	50
Figura 3-1 Sala de laboratório com os equipamentos informáticos e respectivos softwares a)Monitor com o sistema operativo MS-DOS b)Monitor com o programa em LabVIEW (Jesus, 2008).	51
Figura 3-2 Sistema de aquisição de dados onde estão ligados os termopares da face não exposta (Jesus, 2008).	52
Figura 3-3 Desenho de uma amostra a ensaiar de elementos de compartimentação.	53
Figura 3-4 Amostra antes da realização do ensaio a)face não exposta b)face exposta.	54
Figura 3-5 Destruição causada pelo fogo aos 10 minutos.	54
Figura 3-6 Amostra antes da realização do ensaio a)face não exposta b)face exposta.	55
Figura 3-7 Temperatura dos principais termopares durante o ensaio	55
Figura 3-8 Amostra da face exposta ao fogo antes da realização do ensaio	56
Figura 3-9 Presença de água com cola anteriormente ao ensaio.	57
Figura 3-10 Localização dos termopares e pontos de leitura da deformação.	57
Figura 3-11 Presença de fumo na porta A e deformação da porta B decorridos 3 minutos no ensaio.	58
Figura 3-12 Presença de fumo no laboratório aos 20 minutos.	58
Figura 3-13 Deformação das portas aos 46 minutos.	58
Figura 3-14 Zona da porta A por onde se observou a chama aos 58 minutos.	59
Figura 3-15 Registo final da amostra. a)Deformação final das portas b)Parte exposta ao fogo depois do ensaio.	59
Figura 3-16 Temperaturas nos termopares exteriores.	60
Figura 3-17 Evolução da deformação ao longo do ensaio.	61
Figura 3-18 Face não exposta da amostra a ensaiar.	62
Figura 3-19 Pormenor da face exposta da amostra a ensaiar.	62
Figura 3-20 Chama constante na base da porta B.	63
Figura 3-21 Registo final da amostra. a)Deformação final das portas b)Parte exposta ao fogo depois do ensaio.	63
Figura 3-22 Aumento da temperatura nos termopares exteriores.	64
Figura 3-23 Evolução da deformação ao longo do ensaio.	64
Figura 4-1 Esquema da amostra a ensaiar e distribuição de termopares (Vila Real, <i>et al.</i> , 2009).	68

Figura 4-2 Amostra antes do ensaio a)Face não exposta b)Face exposta (Vila Real, <i>et al.</i> , 2009).....	69
Figura 4-3 Face rebocada da parede não exposta ao fogo (Vila Real, <i>et al.</i> , 2009).....	69
Figura 4-4 Amostra após o ensaio a)Face não exposta b)Face exposta (Vila Real, <i>et al.</i> , 2009).....	70
Figura 4-5 Evolução da temperatura no centro dos painéis (Vila Real, Lopes, <i>et al.</i> , 2009).	71
Figura 4-6 Dimensões da parede (medidas em metros)	72
Figura 4-7 Modelo geométrico A no GID	73
Figura 4-8 Modelo geométrico B no GID	74
Figura 4-9 Malha 1 de elementos finitos da parede.....	75
Figura 4-10 Malha 2 de elementos finitos da parede.....	75
Figura 4-11 Malha 3 de elementos finitos da parede.....	76
Figura 4-12 Visão de diferentes perspectivas da malha 4	76
Figura 4-13 Modelos numéricos da parede com a malha 1,2 e 3.	81
Figura 4-14 Modelo numérico da parede com a malha 4.	82
Figura 4-15 Gráfico relativo à curva hot.fc.	82
Figura 4-16 Faces da parede sujeitas às curvas de aquecimento.....	83
Figura 4-17 Nós estudados na face não exposta das 4 malhas.	84
Figura 4-18 Evolução da temperatura na malha 1.	85
Figura 4-19 Evolução da temperatura na face P1.....	85
Figura 4-20 Evolução da temperatura na face P2.....	86
Figura 4-21 Evolução da temperatura na face P3.....	86
Figura 4-22 Evolução da temperatura na face P4.....	86
Figura 4-23 Evolução da temperatura na face P5.....	87
Figura 4-24 Evolução da temperatura na face P6.....	87
Figura 4-25 Distribuição de temperaturas na face não exposta da parede com a malha 3 aos a)2 b)60 e c)120 d)180 e)240 f)414 minutos.....	90
Figura 4-26 Valores da condutividade térmica usados na 1ª calibração.	92
Figura 4-27 Valores de calor específico usados na 1ª calibração.....	92
Figura 4-28 Comparação entre a evolução da temperatura no termopar t4 e 1ª calibração.	93
Figura 4-29 Valores da condutividade térmica usados na 2ª calibração.	94
Figura 4-30 Valores de calor específico usados na 2ª calibração.....	94

Figura 4-31 Comparação entre a evolução da temperatura no termopar t4 e 2ªcalibração.	95
Figura 4-32 Valores de calor específico usados na 3ª calibração.....	95
Figura 4-33 Comparação entre a evolução da temperatura no termopar t4 e 3ªcalibração.	96
Figura 4-34 Valores da condutividade térmica usados na 4ªcalibração	97
Figura 4-35 Valores de calor específico usados na 4ª calibração.....	97
Figura 4-36 Comparação entre a evolução da temperatura no termopar t16 e 4ª calibração.	98
Figura 4-37 Valores de calor específico usados na 5ª calibração.....	99
Figura 4-38 Comparação entre a evolução da temperatura no termopar t16 e 5ª calibração.	99

Índice de Tabelas

Tabela 1-1 Resistência ao fogo de produtos de construção.(Diário da República Portuguesa, 2008a)	8
Tabela 1-2 Resistência ao fogo padrão mínima de elementos estruturais de edifícios. (Diário da República Portuguesa, 2008b)	8
Tabela 1-3 Resistência ao fogo padrão mínima dos elementos de envolvente.(Diário da República Portuguesa, 2008b).....	9
Tabela 1-4 Denominação das características de resistência ao fogo.	9
Tabela 1-5 Elementos ou partes de obras sem funções de suporte de carga e produtos a eles destinados (1) (CEN, 2003).....	11
Tabela 1-6 Elementos ou partes de obras sem funções de suporte de carga e produtos a eles destinados (2) (CEN, 2003).....	12
Tabela 2-1 Classificação da EAA para as ligas de alumínio.....	27
Tabela 2-2 Relação entre Calor Específico, massa volúmica da madeira seca e a temperatura para classe de serviço 1 (CEN, 2004c).....	34
Tabela 2-3 Propriedades térmicas de alguns materiais de protecção ao fogo.	38
Tabela 2-4 Valores mínimos de espessura de paredes de alvenaria de tijolo cerâmico para resistência ao fogo (CEN, 2005b).....	44
Tabela 2-5 Valores mínimos de espessura de paredes de betão celular autoclavado para resistência ao fogo (CEN, 2005b).....	44
Tabela 2-6 Propriedades térmicas de alguns materiais de compartimentação ao fogo	45
Tabela 2-7 Valores mínimos da espessura paredes para resistência ao fogo (Reis, et al., 2006).....	45
Tabela 2-8 Vidros utilizados na protecção contra incêndios (1) (FEUP, 2010).....	48
Tabela 2-9 Vidros utilizados na protecção contra incêndios (2) (FEUP, 2010).....	49
Tabela 4-1 Resistências térmicas superficiais (Diário da República Portuguesa, 2006)	77
Tabela 4-2 Propriedades térmicas de materiais de construção mais comuns (Incropera & De Witt, 1990).....	79
Tabela 4-3 Emissividade de alguns materiais (Incropera & De Witt, 1990).	79
Tabela 4-4 Propriedades térmicas dos materiais.	80

LISTA DE ACRÓNIMOS

APICER	Associação Portuguesa da Indústria Cerâmica
ASTM	Sociedade Americana para Testes e Materiais
CEN	Comité Europeu de Normalização
EAA	Associação europeia do Alumínio
EN	Norma Europeia
ISO	Organização Internacional de Normalização
LERF	Laboratório de Estruturas e Resistência ao Fogo
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil

LISTA DE SÍMBOLOS

Letras do alfabeto latino

A	Área
C_p	Calor específico
\dot{E}_{in}	Energia térmica que entra num volume de controlo por unidade de tempo
\dot{E}_g	Energia térmica gerada internamente por unidade de tempo
\dot{E}_{out}	Energia térmica que sai desse volume na unidade de tempo
\dot{E}_{st}	Energia térmica armazenada no volume de controlo
h	Coeficiente de transmissão de calor por convecção
h_{hot}	Coeficiente de transmissão de calor por convecção na superfície quente
h_{cold}	Coeficiente de transmissão de calor por convecção na superfície fria
Q	Fluxo de calor
\dot{Q}	Fluxo de calor interno
Q_c	Fluxo de calor por convecção
Q_r	Fluxo de calor por radiação
q	Fluxo de calor por unidade de área
q_c	Fluxo de calor por convecção por unidade de área
q_r	Fluxo de calor por radiação por unidade de área
R_{si}	Resistência térmica superficial interior
R_{se}	Resistência térmica superficial exterior

t tempo

w Teor de água

Letras do alfabeto grego

Φ Factor de vista

ε Emissividade

λ Condutividade térmica

σ Constante de proporcionalidade de Stefan-Boltzmann

θ Temperatura

ρ Massa volúmica

1. INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta a introdução à dissertação, onde se define o tema desenvolvido enquadrando-o no contexto geral da engenharia civil e referindo alguma regulamentação em vigor. Apresentam-se ainda os objectivos genéricos, a estrutura da dissertação e conceitos necessários à realização deste trabalho.

1.1. Considerações gerais

O fogo é uma acção (considerada normalmente como acidental) com grande influência nos materiais de construção, os quais apresentam comportamentos diferentes à sua acção. Alguns materiais, como por exemplo a madeira, sofrem uma perda de secção ao longo do desenvolvimento do incêndio, o aço perde a sua rigidez e resistência, outros como o betão despedaçam-se (Spalling) quando expostos a altas temperaturas. Esta alteração das características materiais e das suas capacidades de isolamento são os factores a considerar no projecto e execução de edifícios resistentes ao fogo.

1.1.1. Motivação

Um incêndio pode ter consequências graves tais como o colapso da estrutura, a perda de vidas humanas e perdas económicas. Assim, é fulcral analisar o comportamento dos materiais ao fogo, em especial os mais usados habitualmente na construção.

É importante salientar que em Portugal tem havido um interesse crescente por parte dos legisladores, sobre a segurança de edifícios contra incêndios, sendo a regulamentação existente relativamente recente.

1.1.2. Objectivos

Esta dissertação foca-se sobretudo no estudo do comportamento ao fogo e da condutividade térmica de materiais e produtos de construção, tais como madeira, aço, blocos de solo-cimento e kraftterra, incidindo também no estudo da importância dos materiais de protecção ao fogo, tais como tintas intumescentes, placas de gesso ou lã de rocha.

1.1.3. Estrutura

Esta dissertação está organizada em 5 capítulos. Neste primeiro capítulo é feito um enquadramento do trabalho, apresentando uma introdução geral ao tema desta tese e expondo os objectivos. Será também feita uma abordagem à regulamentação de resistência ao fogo. Inclui uma breve exposição ao DL n.º220/2008, de 12 de Novembro que estabelece o Regime Jurídico de Segurança Contra Incêndio em Edifícios. A nível europeu existem normas que regem os ensaios de resistência ao fogo, que permitiram a elaboração dos ensaios apresentados como caso de estudo no capítulo 3 deste trabalho.

O capítulo 2 é dedicado à apresentação de alguns materiais e soluções construtivas habitualmente usadas na construção civil e comportamento térmico respectivo.

No capítulo 3, dá-se ênfase aos ensaios realizados, disponibilizando a informação relevante sobre as amostras a ensaiar, sobre a instrumentação utilizada e os resultados obtidos, assim como, conclusões retiradas.

No capítulo 4 refere-se sucintamente um ensaio experimental a uma parede de blocos solo-cimento e Kraftterra e, de maneira mais detalhada, a respectiva modelação numérica.

Por fim, no capítulo 5 são expostas as conclusões sobre o trabalho elaborado e são apresentados possíveis desenvolvimentos futuros.

1.2. Conceitos importantes

Neste subcapítulo abordam-se conceitos importantes para a melhor compreensão do trabalho efectuado.

1.2.1. Parâmetros a avaliar na resistência ao fogo

Nos regulamentos a exigência de resistência ao fogo de elementos estruturais ou de compartimentação, é avaliada pelo tempo que decorre desde o início de um processo térmico normalizado (por exemplo a curva de incêndio padrão ISO 834) a que o elemento é submetido, até ao momento em que ele deixa de satisfazer as funções para que foi projectado (Vila Real, 2003).

Logo, é importante referir os seguintes parâmetros, apresentados:

- Estável ao fogo (R) – o elemento é qualificado de estável ao fogo durante o tempo em que a sua capacidade resistente às acções de dimensionamento não se esgota (exigência de estabilidade);
- Pára-Chamas (E) – o elemento é qualificado de pára-chamas, durante o tempo em que não se verifique a passagem de chamas ou gases para o lado não exposto ao fogo (exigência de estanquidade);
- Corta-Fogo (EI) – o elemento é qualificado de corta-fogo, durante o tempo em que, além de ser pára-chamas, a temperatura durante o processo térmico atinge certos limiares na face não exposta ao fogo (exigência de isolamento térmico);
- Para elementos a que se exijam simultaneamente funções de suporte e de compartimentação (REI), admite-se que estas funções deixam de ser cumpridas, quando, no decurso do processo térmico referido, deixem de ser satisfeitas, ou apenas as exigências de estabilidade e estanquidade, ou o conjunto das exigências de estabilidade, de estanquidade e de isolamento térmico referidas anteriormente.

A classificação dos elementos estruturais ou de compartimentação do ponto de vista da sua resistência ao fogo compreende, para cada uma das três qualificações consideradas – estável ao fogo, pára-chamas e corta-fogo, nove classes, correspondentes aos escalões de tempo a seguir indicados, em minutos, pelo limite inferior de cada escalão:

15 30 45 60 90 120 180 240 360

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

Nesta dissertação será dada importância ao estudo da resistência ao fogo dos produtos de construção, relativamente aos parâmetros corta-fogo e pára-chamas negligenciando-se o comportamento estrutural, isto é, o parâmetro relativo à estabilidade ao fogo (R).

1.2.2. Característica dos incêndios

Para que possa ocorrer um incêndio torna-se necessária a existência simultânea de três factores: (i) uma fonte de calor, (ii) o combustível e (iii) o comburente (o oxigénio). O início do incêndio dá-se quando a mistura combustível/oxigénio está suficientemente quente para que ocorra a combustão (Vila Real, 2003).

O desenvolvimento do incêndio depende de certos parâmetros físicos, tais como:

- A densidade de carga de incêndio (quanto maior a carga de incêndio maior a duração do incêndio);
- As condições de arejamento, dependentes principalmente da geometria, dimensões e distribuição das aberturas do compartimento (grandes aberturas de ventilação conduzem a incêndios rápidos mas mais severos);
- Propriedades das paredes envolventes do compartimento de incêndio (paredes que absorvem energia limitam a temperatura do incêndio).

1.2.3. Curvas nominais

Para a classificação dos elementos pela normalização é necessário usar curvas de aquecimento padronizado. As curvas nominais são curvas convencionais definidas por uma fórmula simples e que não dependem da dimensão ou tipo dos edifícios. Os incêndios simulados por estas curvas têm pouca realidade física, mas proporcionam uma plataforma de entendimento e comparação de resultados experimentais efectuados num mesmo país, ou em países diferentes. As curvas usadas para os ensaios são apresentadas a seguir.

A curva de incêndio padrão ISO 834 é a curva padrão utilizada nos ensaios experimentais para a determinação da resistência ao fogo dos elementos estruturais. É dada pela seguinte equação:

$$\theta = 20 + 345 \log_{10}(8t + 1) \quad \text{°C (t em minutos)} \quad (1.1)$$

A curva de incêndio de hidrocarbonetos apresenta um aquecimento mais gravoso nos 90 minutos iniciais comparado com o da curva ISO 834. É dada pela seguinte equação:

$$\theta = 1080(1 - 0,325e^{-0,167t} - 0,675e^{-2,5t}) + 20 \quad ^\circ\text{C} \text{ (t em minutos)} \quad (1.2)$$

A ASTM 119 é a curva usada na América (American Society for Testing and Materials) para ensaios e apresenta um comportamento similar à ISO 834 (Franssen, et al., 2009).

$$\theta = 750(1 - e^{(-3,79553\sqrt{t})}) + 170,41\sqrt{t} + 20 \quad ^\circ\text{C} \text{ (t em minutos)} \quad (1.3)$$

Na Figura 1-1 são apresentadas as curvas de temperatura conforme a equação usada.

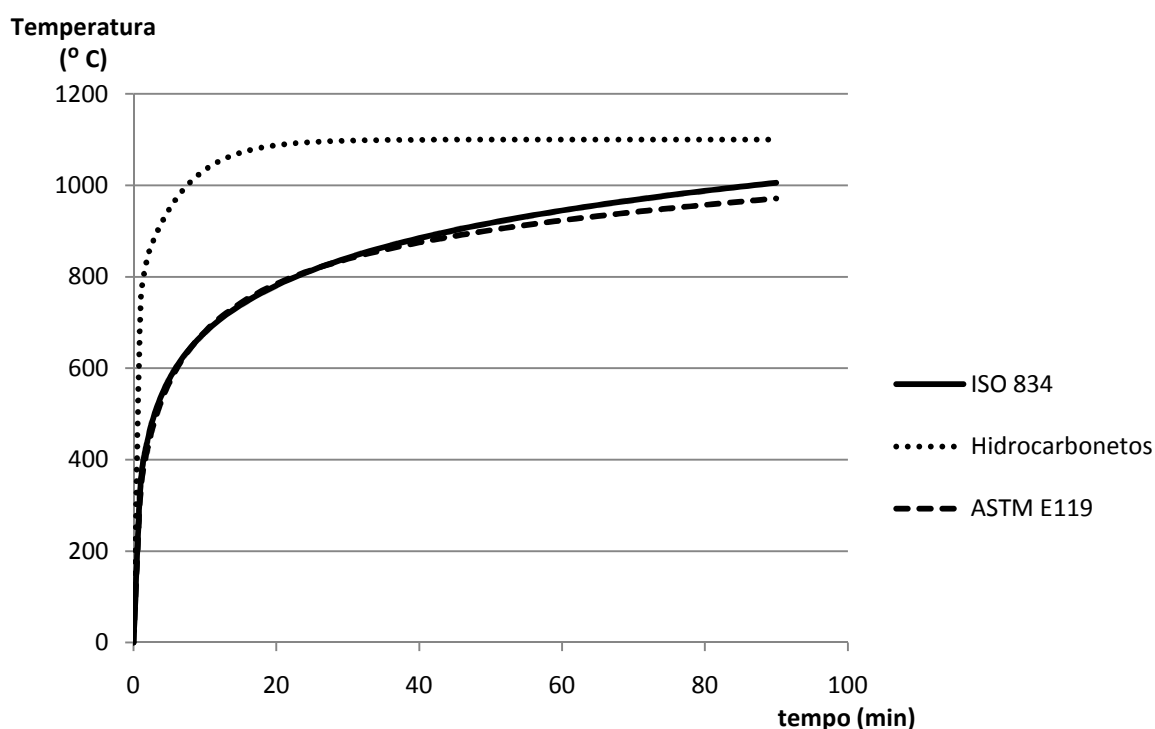


Figura 1-1 Curvas nominais temperatura-tempo.

1.2.4. Ensaio em laboratório

Esta dissertação basear-se-á em Ensaio Experimentais realizados no LERF (Laboratório de Estruturas e Resistência ao Fogo) da Universidade de Aveiro. Este laboratório possui um forno vertical capaz de definir a resistência ao fogo, de elementos de compartimentação e outros produtos da construção, de acordo com as normas europeias. Os equipamentos presentes neste Laboratório serão apresentados mais à frente no capítulo dedicado à regulamentação europeia.

1.3. Regulamentação

Neste capítulo é apresentada alguma da regulamentação em vigor no nosso País, tal como o Regime Jurídico de Segurança contra Incêndio em Edifícios, que é relativamente recente (2008). Será também feita referência às normas Europeias criadas pelo Comité Europeu de Normalização (CEN) necessárias para a avaliação da resistência ao fogo.

1.3.1. Normalização Nacional

1.3.1.1. Regime Jurídico de Segurança contra Incêndios em Edifícios (Decreto Lei nº 220/2008)

O actual diploma deste Decreto de Lei (DL) possui disposições regulamentares de segurança contra incêndios aplicáveis em edifícios e recintos, os quais se inserem numa ou mais das doze utilizações tipo criadas (Artigo 6.º):

- Tipo I - «habitacionais»
- Tipo II - «estacionamento»
- Tipo III - «administrativos»
- Tipo IV - «escolares»
- Tipo V - «hospitalares e lares de idosos»
- Tipo VI - «espectáculos e reuniões públicas»
- Tipo VII - «hoteleiros e restauração»
- Tipo VIII - «comerciais e gares de transportes»
- Tipo IX - «desportivos e de lazer»
- Tipo X - «museus e galerias de arte»
- Tipo XI - «bibliotecas e arquivos»
- Tipo XII - «industriais, oficinas e armazéns»

No artigo 10º é descrita a definição de locais de riscos integrados em edifícios e recintos. Estes locais, à excepção dos fogos de habitação e dos espaços de circulação, são organizados de acordo com a natureza do risco:

- a) O local de risco A é um espaço com a presença dominante de pessoal afecto ao estabelecimento, em pequena quantidade;
- b) O local de risco B possui uma presença dominante de pessoas (pessoal e público), em razoável ou grande quantidade;
- c) O local de risco C apresenta risco agravado de incêndio devido às actividades nele exercidas, equipamentos ou materiais existentes (elevada carga de incêndio);
- d) O local de risco D é um local onde existem pessoas de mobilidade ou percepção reduzida;
- e) O local de risco E engloba locais de dormida em estabelecimentos que não se insiram na definição de local de risco D;
- f) Por fim, o local de risco F é um espaço que possui meios essenciais à continuidade de actividades sociais relevantes.

O documento actual adopta categorias de risco, 1.^a, 2.^a, 3.^a e 4.^a categorias, aplicáveis a todas as utilizações-tipo. O grau de risco das categorias aumenta segundo a ordem como estão apresentadas anteriormente.

O presente Decreto-Lei baseia-se nos seguintes factores de classificação do risco: a altura da utilização-tipo; efectivo número máximo de pessoas presentes; efectivo em locais de tipo D ou E; área bruta; número de pisos abaixo do plano de referência; espaço coberto ou ao ar livre; saída independente de locais do tipo D ou E (directa ao exterior, ao nível do plano de referência) e densidade ou carga de incêndio modificada. (Jesus, 2008)

1.3.1.2. Anexos do DL nº 220/2008

O DL n.º 220/2008 apresenta em anexo tabelas que definem as classes de desempenho de resistência ao fogo padrão dos elementos de construção de acordo com as normas comunitárias. A resistência ao fogo é o indicador do comportamento face ao fogo dos elementos de construção, em termos da manutenção das funções que devem desempenhar em caso de incêndio. Avalia-se pelo tempo que decorre desde o início de um processo térmico normalizado a que o elemento é submetido, até ao momento em que ele deixa de satisfazer determinadas exigências relacionadas com as referidas funções. (Jesus, 2008)

A Tabela 1-1 refere a equivalência entre as especificações do LNEC e as constantes do sistema europeu para a resistência ao fogo padrão de produtos de construção.

Tabela 1-1 Resistência ao fogo de produtos de construção.(Diário da República Portuguesa, 2008a)

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

1.3.1.3. Regulamento Técnico de Segurança contra Incêndio em Edifícios (Portaria nº1532/2008)

Consoante o seu tipo, os elementos estruturais de edifícios devem possuir uma resistência ao fogo que garanta as suas funções de suporte de cargas, de isolamento térmico e de estanquidade durante todas as fases de combate ao incêndio, incluindo o rescaldo, ou, em alternativa, devem possuir a resistência ao fogo padrão mínima indicada na Tabela 1-2.

Tabela 1-2 Resistência ao fogo padrão mínima de elementos estruturais de edifícios. (Diário da República Portuguesa, 2008b)

Utilizações-tipo	Categorias de risco				Função do elemento estrutural
	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	
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	R120	R 180	Apenas suporte
	REI 60	REI 90	REI 120	REI 180	Suporte e compartimentação

Os diferentes locais de risco devem ser separados entre eles por elementos que garantam, pelo menos, as classes de resistência ao fogo padrão indicadas na Tabela 1-3:

Tabela 1-3 Resistência ao fogo padrão mínima dos elementos de envolvente.(Diário da República Portuguesa, 2008b)

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 resistentes.....	REI 30	REI 60	REI 60	REI 30	REI 90
Portas.....	E 15 C	E 30 C	E 30 C	E 15 C	E 45 C

1.3.2. Normalização europeia

Para a realização dos ensaios é importante referir as normas europeias usadas. Estas vão ser a EN 13501-2, relativa à classificação segundo os ensaios de resistência ao fogo excluindo instalações de ventilação, e a EN 1363-1, relativa aos requisitos gerais para ensaio à resistência ao fogo.

Na Tabela 1-4 é apresentado a denominação dos parâmetros usados na resistência ao fogo padrão pela normalização europeia.

Tabela 1-4 Denominação das características de resistência ao fogo.

R	Capacidade de suporte de carga
E	Estanquidade a chamas e gases quentes
I	Isolamento térmico
W	Radiação
M	Acção 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 protecção contra incêndios

Visto já terem sido explicadas as primeiras três características anteriormente, de seguida, só se fará uma breve descrição das restantes:

- A radiação, W, é a capacidade de um elemento de construção resistir à exposição ao fogo numa face, reduzindo a possibilidade de transmissão de fogo da face não exposta aos materiais adjacentes. Um elemento que cumpra os critérios de isolamento também se considera que cumpre o critério W para o mesmo período de tempo;
- A acção mecânica, M, é a capacidade de suportar impactos, representa uma falha estrutural ou um impacto sobre o elemento durante o incêndio;
- O fecho automático, C, é a capacidade de uma porta fechar automaticamente. Aplica-se a elementos accionados automaticamente que normalmente estão abertos e que, em caso de incêndio devem estar fechados. O fecho automático deve funcionar em todos os casos, sem o funcionamento da energia primária;
- Estanquidade ao fumo, S, é a capacidade de um elemento reduzir ou eliminar a passagem de gases ou fumo;
- Resistência ao fogo de fuligem, G, é a capacidade das chaminés e produtos associados resistirem ao fogo de fuligem. Inclui aspectos de isolamento térmico e de estanquidade;
- A capacidade de protecção contra incêndios, K, é a protecção que um revestimento de parede ou tecto oferece frente a uma situação de incêndio.

1.3.2.1. Classificação segundo os ensaios de resistência ao fogo excluindo as instalações de ventilação (EN13501-2)

Na norma EN 13501-2 é designada a classificação adequada segundo os ensaios de resistência ao fogo para diferentes tipos de elementos ou produtos de construções.

As tabelas apresentadas a seguir são só relativas a alguns elementos ou partes de obras sem função de suporte de carga e produtos a eles destinados, relevantes para a realização desta dissertação. Assim conclui-se que a classificação mais adequada envolve a estanquidade a chamas e isolamento térmico e não o parâmetro da estabilidade.

Parte da classificação do comportamento de resistência ao fogo é dada através da combinação das letras presentes nas tabelas seguintes e complementada pelo tempo durante o qual se cumprem os requisitos de comportamento, expresso em minutos e conforme a classe imediatamente inferior ao tempo obtido no ensaio. A título de exemplo, se depois de decorrido um ensaio a uma divisória, esta apresenta os seguintes resultados:

- Estanquidade a chamas e gases inflamáveis: 121 minutos
- Radiação: 38 minutos
- Isolamento térmico: 18 minutos

Pela EN 13501-2 a divisória pode ser classificada como E120 / EW30 / EI15

Tabela 1-5 Elementos ou partes de obras sem funções de suporte de carga e produtos a eles destinados (1) (CEN, 2003).

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; EN 1995-1.2; EN 1996-1.2; EN 1999-1.2									
Classificação	Duração em «minutos»									
E.....		20	30		60	90	120			
EI.....	15	20	30	45	60	90	120	180	240	
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; EN 1995-1.2; 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					
Nota -A classificação é complementada por «i→o, o→i ou i↔o» consoante cumpram os critérios para o fogo interior, exterior ou para ambos.										
Onde aplicável, estabilidade mecânica significa que não há partes em colapso passíveis de causar danos pessoais durante o período da classificação E ou EI.										

Tabela 1-6 Elementos ou partes de obras sem funções de suporte de carga e produtos a eles destinados (2) (CEN, 2003).

Aplicável a	Portas e portadas corta-fogo e respectivos dispositivos de fecho «incluindo as que comportem envidraçados e ferragens».									
Norma(s)	EN 13501-2; EN 1634-1.									
Classificação	Duração em «em minutos»									
E.....	15		30	45	60	90	120	180	240	
EI.....	15	20	30	45	60	90	120	180	240	
EW.....		20	30		60					
Nota. - A classificação I é complementada pela adição dos sufixos «1» ou «2» consoante a definição do isolamento utilizada. A adição do símbolo «C» indica que o produto satisfaz também o critério de fecho automático «ensaio pass/fail» ⁽¹⁾ .										
Aplicável a	Revestimentos para paredes e coberturas.									
Norma(s)	EN 13501-2; EN 13381-8.									
Classificação	K.									
Nota. - Ensaio pass/fail.										

(1) A classificação «C» deve ser complementada pelos dígitos 0 a 5, de acordo com a categoria utilizada; os pormenores devem ser incluídos na especificação técnica relevante do produto.

1.3.2.2. Normalização europeia – Ensaio para resistência ao fogo – Requisitos gerais (EN1363-1)

Nesta norma (CEN, EN 1363-1: Fire resistance tests - General requirements, 1999) são descritos os princípios gerais necessários para determinar a resistência ao fogo de elementos de construção, experimentalmente sujeitando-os a um aquecimento padronizado.

Esta norma contém informação relacionada com a ciência e metodologia de teste à resistência ao fogo. Quando os princípios gerais são comuns a muitos testes específicos, mas os detalhes variam de acordo com o elemento que está a ser testado, então o princípio é dado na EN1363-1 e o detalhe é dado no método de teste específico.

A curva de aquecimento usada para os testes nesta norma é designada como ISO-834, referida anteriormente neste capítulo.

A temperatura no forno é controlada por termopares. Estes asseguram que a curva de aquecimento, ao longo do ensaio, respeite a regulamentação, para uma harmonização da exposição térmica entre os vários fornos usados na União Europeia.

1.3.2.2.1. Equipamentos de ensaio

De acordo com a norma EN 1363-1, os equipamentos necessários à realização de um ensaio de resistência ao fogo são, essencialmente:

- Um forno adequado à avaliação da resistência de elementos de construção quando expostos às condições de temperatura e pressão exigidos pela norma;
- Equipamento de controlo, que permita regular a temperatura dentro do forno, de acordo com as especificações contidas na presente norma;
- Equipamento para controlar e monitorizar a pressão dos gases dentro do forno;
- Um bastidor no qual seja possível construir o elemento a testar e onde se verifiquem as condições de adaptação ao forno, para que os requisitos de aquecimento, pressão e suporte da amostra sejam os apropriados;
- Equipamento para a medição da temperatura no interior do forno e na face não exposta da amostra e, para os casos em que haja necessidade, no interior da amostra;
- Equipamento para a medição da deformação da amostra em teste;
- Equipamento capaz de 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.

1.3.2.2.2. Termopares

Os termopares são dispositivos electrónicos cuja função consiste na medição da temperatura. São, fundamentalmente, compostos por dois filamentos de metais de natureza distinta ou ligas de composição diferentes. Estes filamentos são soldados numa extremidade, designada de junta quente ou junta de medição, e na outra extremidade é fechado o circuito, de acordo com a Figura 1-2.

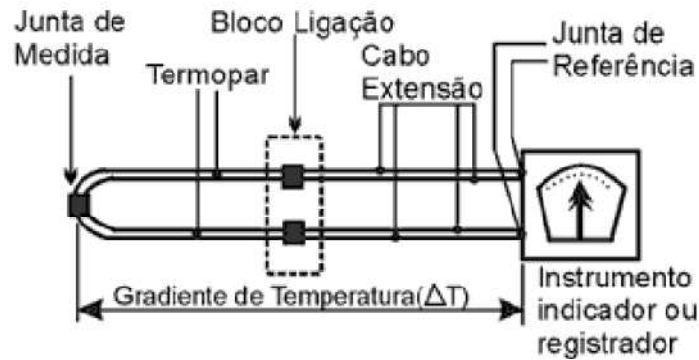


Figura 1-2 Representação esquemática de um termopar (Jesus, 2008).

1.3.2.2.3. Termopares do forno

Os termopares do forno são termómetros de placa. A placa é composta por uma chapa grossa em aço dobrado, que contém material isolante, e nesta encontra-se fixado um par termoelétrico (Figura 1-3).

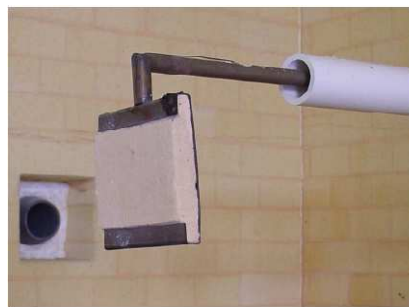


Figura 1-3 Termopar de placa (Jesus, 2008).

1.3.2.2.4. Termopares de face não exposta

Termopares de face não exposta são usados para medir as temperaturas, tal como o nome indica, no exterior da amostra a estudar; são também designados por termopares exteriores. Para permitir um bom contacto térmico, os fios do termopar são soldados ou unidos fortemente a um disco de cobre. Na altura de colocação na amostra são cobertos com uma placa de material isolante (Figura 1-4).



Figura 1-4 Termopar exterior (Jesus, 2008).

1.3.2.2.5. Equipamento para medição da deformação

A deformação produzida na amostra a ensaiar deve ser medida e registada ao longo de todo o ensaio. Esta medição é efectuada através de um equipamento laser, como se demonstra na Figura 1-5. No respectivo equipamento informático procede-se ao registo dos valores obtidos.



Figura 1-5 Equipamento para medição da deformação (Jesus, 2008).

1.3.2.2.6. Tampão de algodão

A estanquidade de um elemento de compartimentação deve ser avaliada ao longo do ensaio por um tampão de algodão (Figura 1-6), realizando observações sobre a amostra de ensaio para registar a presença de chamas constantes. A menos que no respectivo método de ensaio não seja sugerida outra especificação.



Figura 1-6 Tampão de algodão (Jesus, 2008).

1.3.2.2.7. Procedimentos e Segurança

Relativamente ao procedimento de ensaio é importante verificar os seguintes requisitos:

- A temperatura ambiente deve ser de $20\text{ °C} \pm 10\text{ °C}$ no início do ensaio e durante este não deve diminuir mais do que 5 °C ou aumentar mais do que 20 °C . Esta temperatura é lida por um termopar a uma distância entre 1 e 3 metros da face não exposta da amostra de ensaio, para não ser afectada pela radiação térmica proveniente do forno de ensaio;
- Cinco minutos depois do início do ensaio, as temperaturas registadas em todos os termopares asseguram a correcta relação entre si;
- Assim que qualquer um dos termopares, no interior do forno, registre uma temperatura superior a 50 °C , dá-se início ao ensaio. A contagem da duração do ensaio é iniciada nesse instante, e todos os sistemas, tanto automáticos como manuais, devem entrar em funcionamento nesse preciso momento;
- Durante o período de exposição ao fogo as temperaturas obtidas através dos termopares devem ser registadas em intervalos não superiores a um minuto;
- A pressão no forno deve ser medida e registada continuamente ou em intervalos não superiores a um minuto;
- A deformação produzida na amostra a ensaiar deve ser medida e registada ao longo de todo o ensaio. Esta medição é feita através de equipamento laser.

O ensaio poderá ser finalizado quando se verificar um ou mais dos seguintes aspectos:

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

A amostra ao ser ensaiada pode ser avaliada em relação aos seguintes comportamentos:

- Capacidade de resistência – tempo, em minutos, durante o qual a amostra continua a manter a sua capacidade de suporte de carga de ensaio. Esta será determinada através da deformação da amostra e a velocidade da mesma;
- Estanquidade às chamas e gases – tempo, em minutos, durante o qual a amostra continua a manter a sua função de compartimentação, sem se verificar a presença

da ignição do tampão de algodão, da penetração do calibre de abertura ou de chamas constantes;

- Isolamento térmico - tempo, em minutos, durante o qual a amostra continua a manter a sua função separadora durante o ensaio, sem desenvolver 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; ou
 - O aumento da temperatura em qualquer ponto não ultrapasse a temperatura inicial de 180 °C;

A norma EN 1636-1 define também que quando o critério de capacidade resistente falha, os critérios de isolamento térmico e estanquidade são considerados automaticamente sem cumprimento. Se o critério de estanquidade não é satisfeito então exclui-se o cumprimento do critério de isolamento térmico automaticamente.

2. MATERIAIS E SOLUÇÕES CONSTRUTIVAS E SEU COMPORTAMENTO TÉRMICO

Neste capítulo são apresentadas algumas considerações sobre comportamento ao fogo de sólidos, as propriedades térmicas de vários materiais relevantes para a realização da dissertação e por fim são apresentadas algumas soluções construtivas recentes com vista a melhorar o comportamento ao fogo.

Este capítulo encontra-se dividido entre materiais com função de suporte ou compartimentação, representado pelo aço, alumínio, betão e madeira, com importância relevante numa estrutura e que constituem a parte mais significativa do elemento em termos de peso. Nos materiais de protecção referem-se alguns materiais com a função principal de protecção térmica, aplicados nos elementos a proteger. Por fim apresentam-se algumas soluções construtivas para melhor comportamento ao fogo, onde se aborda a alvenaria como elemento de compartimentação e não de suporte.

2.1. Considerações gerais sobre as propriedades térmicas

O objectivo desta tese é a análise do comportamento térmico de vários materiais sujeitos ao fogo, logo para melhor compreensão deste fenómeno, torna-se necessário conhecer os vários processos de transferência de calor.

2.1.1. Processos de transmissão de calor

A transmissão de calor pode ser definida como a propagação de energia de uma região para outra de um meio (sólido, líquido ou gasoso), como resultado da diferença de temperaturas entre elas. A energia transmitida pelo fluxo de calor não pode ser medida directamente, mas o seu conceito tem significado físico pois está relacionado com uma quantidade mensurável, a *temperatura*. Sempre que existem diferenças de temperatura num dado sistema, o calor flui da região à temperatura mais elevada para a de temperatura mais baixa, pelo que o conhecimento da distribuição de temperaturas no sistema é essencial no estudo da transmissão de calor.

Habitualmente consideram-se três modos de transmissão de calor, que podem ocorrer em simultâneo ou não:

Condução – forma típica de transmissão nos corpos sólidos, na qual o calor se propaga através da própria substância;

Convecção – forma de transmissão no interior de um fluído ou entre este e uma superfície sólida, na qual o calor é transmitido pelo movimento do fluído;

Radiação – diferente das anteriores por não necessitar de qualquer suporte material e na qual o calor é transmitido por radiação.

2.1.1.1. Condução

A condução é o processo pelo qual o calor é transmitido de uma região a elevada temperatura para outra a uma temperatura mais baixa no interior de um meio (sólido, líquido ou gasoso) ou, entre meios diferentes em contacto físico directo. A transmissão de calor por condução é particularmente importante nos sólidos onde a energia é transmitida por meio da comunicação molecular directa sem apreciável deslocamento das moléculas.

A lei fundamental que rege a transmissão de calor por condução foi proposta por J. B. Fourier em 1822. Segundo esta lei, também conhecida por lei de Fourier, o fluxo de calor que passa através de uma superfície de área A , normal à direcção de fluxo, na unidade de tempo é proporcional ao gradiente térmico nessa direcção. Para distribuição unidimensional de temperaturas, $\theta(x)$, que ocorre, por exemplo, na parede representada pela figura 2-1, o fluxo de calor por condução $q_x(\text{W/m}^2)$ na direcção x , por unidade de área, é dado por:

$$q_x = -\lambda \frac{d\theta}{dx} \quad (2.1)$$

A constante de proporcionalidade, λ é uma propriedade térmica do material designado por condutibilidade térmica ($\text{W/m}\cdot\text{K}$). O fluxo de calor total Q_x (W) que atravessa a área A vem dado por:

$$Q_x = q_x \cdot A = -A\lambda \frac{d\theta}{dx} \quad (2.2)$$

O sinal negativo nas equações (2.1) e (2.2) serve para assegurar que q (ou Q) seja uma quantidade positiva quando o fluxo de calor tem o sentido positivo do eixo dos xx , ou dito de outra maneira, é uma consequência do facto do calor se transmitir na direcção das temperaturas decrescentes.

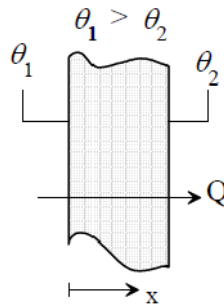


Figura 2-1 Condução através de um sólido ou fluido estacionário (Vila Real, 2010).

2.1.1.2. Convecção

A convecção processa-se por uma troca de energia calorífica entre partes em movimento de um fluido (líquido ou gasoso) ou entre este e superfícies sólidas a diferentes temperaturas. Uma vez que o campo de temperaturas num fluido é influenciado pelo seu movimento, a determinação do fluxo de calor por convecção, em muitas situações, não é tarefa fácil. Nas aplicações de engenharia, para facilitar os cálculos da transmissão de calor entre uma superfície de área A à temperatura θ_m e o fluido que a rodeia à temperatura θ_g , é definido um coeficiente de transmissão de calor por convecção, h ($\text{W}/\text{m}^2 \text{K}$), para definição do fluxo:

$$q_c = h(\theta_m - \theta_g) \quad (2.3)$$

ou

$$Q_c = hA(\theta_m - \theta_g) \quad (2.4)$$

Esta relação, que traduz, ser o fluxo de calor por convecção proporcional à diferença de temperaturas entre a superfície e o fluido, foi originalmente proposta por Isaac Newton em 1701 e é conhecida por *lei de arrefecimento de Newton*. O coeficiente de transmissão de calor por convecção depende de vários factores, nomeadamente, da forma e dimensões da superfície do sólido, do regime da convecção (natural ou forçada), do tipo de fluido ou da diferença de temperaturas existentes.

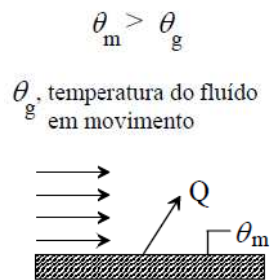


Figura 2-2 Convecção de uma superfície para um fluido em movimento (Vila Real, 2010).

2.1.1.3. Radiação

A radiação térmica é o processo de transmissão de calor entre corpos por emissão ou absorção de radiações electromagnéticas. Ao contrário da condução e da convecção, a radiação não requer a presença de um meio material para ocorrer. De facto, a transmissão de calor por radiação processa-se mais eficientemente no vácuo. O fluxo máximo que pode ser emitido de uma superfície por radiação é dado pela lei de Stefan-Boltzmann,

$$q_r = \sigma \theta_m^4 \quad (2.5)$$

onde θ_m é a temperatura absoluta em graus Kelvin (K) da superfície e σ é a constante de Stefan-Boltzmann ($5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$). A equação (2.5) é válida para os chamados irradiadores perfeitos ou corpos negros. Os corpos reais não preenchem os requisitos de um irradiador perfeito, pelo que o fluxo de calor emitido por uma superfície real é menor do que nos corpos negros e é dado por

$$q_r = \sigma \varepsilon \theta_m^4 \quad (2.6)$$

em que ε é a emissividade da superfície que traduz a eficiência com que a superfície emite calor por radiação.

No caso de ser, como frequentemente acontece na prática, uma superfície de dimensões reduzidas, de área A , completamente envolvida por outra substancialmente maior (por exemplo as paredes envolventes do compartimento de incêndio), tendo a separá-las um gás que não interfere na transferência de calor por radiação, o fluxo de calor trocado entre a superfície e a sua envolvente à temperatura θ_s é dado por

$$Q_r = \sigma \varepsilon A (\theta_m^4 - \theta_s^4) \quad (2.7)$$

E o fluxo por radiação, por unidade de área, no caso particular de ser $\theta_s = \theta_g$ dado por

$$q_r = \sigma \varepsilon A (\theta_m^4 - \theta_g^4) \quad (2.8)$$

A intensidade da energia que chega a uma superfície receptora vinda da superfície emissora, obtém-se introduzindo na equação (2.8) um factor, designado por “factor de vista”, Φ , que tem em consideração a relação geométrica entre aquelas duas superfícies e a sua orientação relativa:

$$q_r = \Phi \sigma \varepsilon (\theta_m^4 - \theta_g^4) \quad (2.9)$$

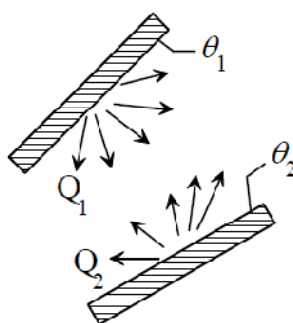


Figura 2-3 Trocas de calor por radiação entre duas superfícies(Vila Real, 2010).

2.1.2. Definições teóricas de algumas propriedades térmicas

Para o melhor entendimento de certos parâmetros usados ao longo deste trabalho é apresentada uma breve definição dos mais relevantes:

λ (Condutividade térmica) - A condutividade térmica consiste numa grandeza física que mede a capacidade de uma substância conduzir o calor. Permite distinguir os bons dos maus condutores de calor. A condutividade térmica representa a taxa temporal de transmissão de energia, sob a forma de calor, através de um material. Exprime-se no Sistema Internacional (SI) em watt por metro e por Kelvin ($W/(m \cdot K)$). Quanto maior for a condutividade térmica de um material, melhor condutor ele é.

C_p (Calor específico) - O calor específico consiste na quantidade de calor que é necessário fornecer à unidade de massa de uma substância para elevar a sua temperatura em um grau e expressa-se em Joule por quilograma e por Kelvin ($J/(kg \cdot K)$).

Emissividade (ϵ) – A emissividade é relação entre o poder emissivo de um corpo qualquer e a de um corpo negro. Pode ter um máximo igual a 1, que é correspondente à de um corpo negro, e um mínimo igual a zero. A emissividade representa a maior ou menor tendência que determinado corpo tem em emitir radiação. O poder de emissividade está associado à natureza do corpo, à área exposta e à temperatura absoluta a que se encontra.

2.2. Materiais com função de suporte ou compartimentação e respectivas propriedades térmicas pelos eurocódigos

2.2.1. Aço de carbono e aço inoxidável

O aço é uma liga metálica constituída essencialmente por ferro e carbono. É actualmente a mais importante liga metálica, sendo empregue de forma intensiva em numerosas aplicações tais como máquinas, ferramentas, em construção, etc. Entretanto, a sua utilização está condicionada a determinadas aplicações devido a vantagens técnicas que oferecem outros materiais como o alumínio no transporte por sua maior leveza e na construção por sua maior resistência a corrosão, o cimento (mesmo combinado com o aço) pela sua maior resistência ao fogo e a cerâmica em aplicações que necessitem de elevadas temperaturas.

Em termos de resistência ao fogo o aço é um material que apresenta uma elevada condutividade térmica, que faz com que a temperatura se propague rapidamente e perca substancialmente a sua resistência com a temperatura.

Apesar de um uso muito mais limitado, principalmente devido ao custo, o aço inoxidável apresenta melhores propriedades térmicas que o aço de carbono, como se poderá ver pelo gráfico da Figura 2-5.

A parte 1-2 do Eurocódigo 3 (EN1993-1-2 2004) relativa ao cálculo ao fogo, define para cada tipo de aço os procedimentos relativos à determinação dos valores de cálculo para a

situação de incêndio, para propriedades dos aços e resistências, e para métodos de verificação.

Na Figura 2-4 apresenta-se a evolução do valor de calor específico, do aço de carbono e aço inoxidável, com a temperatura retirados do eurocódigo 3

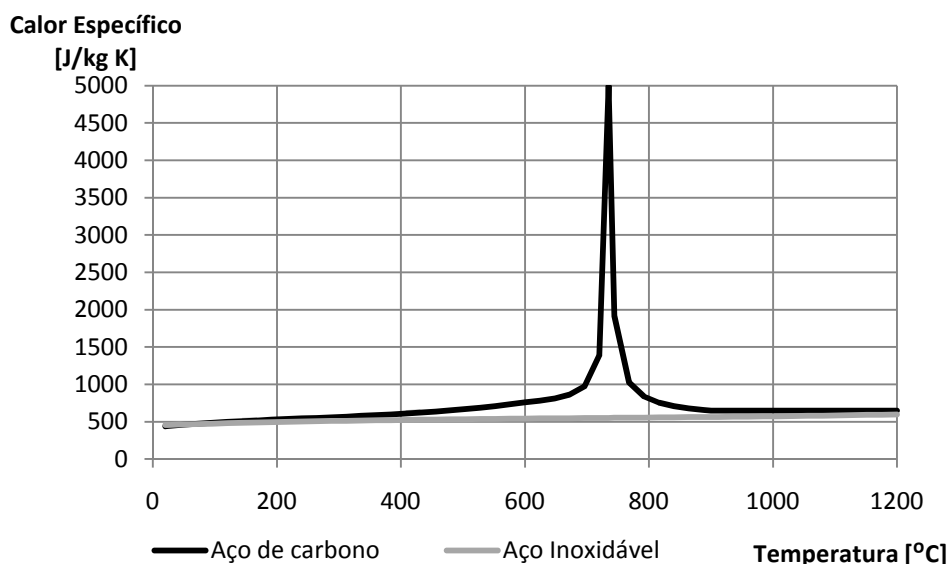


Figura 2-4 Calor específico em função da temperatura. (CEN, 2004b).

Pela Figura 2-4 conclui-se que a evolução do calor específico dos dois tipos de aço, relativamente à temperatura, é parecida mas com a ausência do pico no aço inoxidável.

Caso haja um aquecimento do aço de carbono, este vai apresentar um patamar entre os 700 e 800 °C em que a temperatura não sobe por determinado tempo e para simular esse comportamento o aço de carbono apresenta esse pico de calor específico. O aço inoxidável não apresenta esse patamar; logo, tendo um curva constante e com pouca alteração do valor de calor específico.

Na Figura 2-5 apresenta-se a evolução do valor de condutividade térmica do aço de carbono e aço inoxidável, com a temperatura retirados do eurocódigo 3

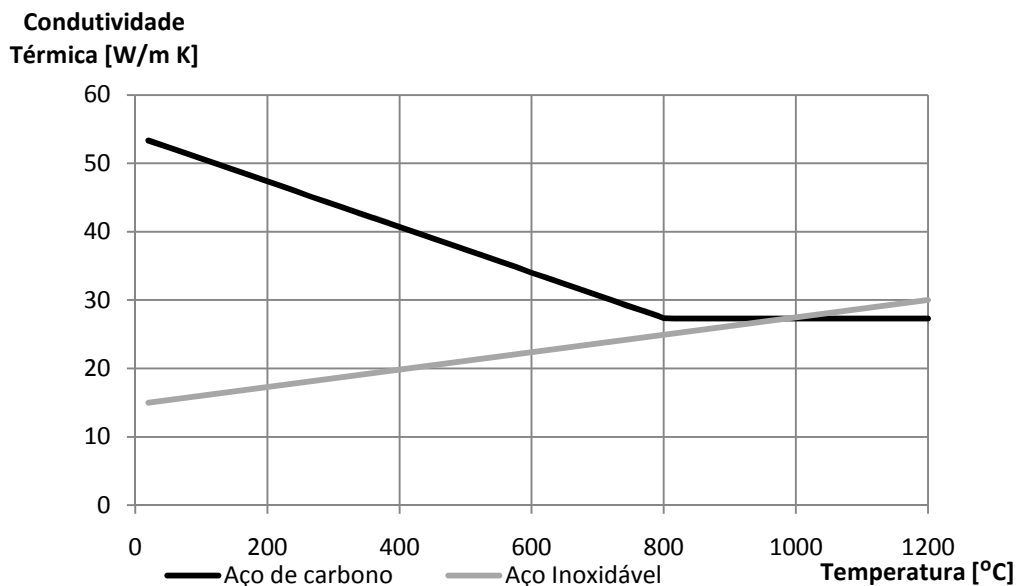


Figura 2-5 Relação entre a condutividade térmica e a temperatura.(CEN, 2004b).

Pela Figura 2-5 conclui-se que o aço inoxidável tem uma condutividade térmica mais baixa que o aço de carbono, até aos 1000 °C, logo mais vantajoso no comportamento ao fogo. No aço de carbono a condutividade desce com a temperatura, no aço inoxidável ocorre o contrário.

2.2.2. Alumínio

O alumínio é um material leve, macio e resistente. Possui um aspecto cinza prateado e fosco.

As ligas de alumínio com pequenas quantidades de cobre, manganês, silício, magnésio e outros elementos apresentam grande quantidade de características adequadas às mais diversas aplicações. Na construção civil o alumínio é aplicado geralmente em janelas, portas, divisórias, grades.

As ligas de alumínio podem dividir-se em dois grupos:

- Ligas de fundição: a forma final dos produtos é a que resulta da solidificação;
- Ligas de trabalho mecânico: após o vazamento as ligas são sujeitas a conformação plástica.

Há vários tipos de designações para as ligas de alumínio. Devido à sua grande utilização apresenta-se a seguir a classificação da EAA (*European Aluminium Association*) para as ligas de trabalho mecânico. A designação das ligas é feita por quatro dígitos, o primeiro dos quais correspondente ao principal elemento que entra na composição das ligas (Tabela 2-1).

Tabela 2-1 Classificação da EAA para as ligas de alumínio.

Designação	Elemento de liga
1XXX	Nenhum
2XXX	Cobre
3XXX	Manganês
4XXX	Silício
5XXX	Magnésio
6XXX	Magnésio e Silício
7XXX	Zinco

A parte 1-2 do Eurocódigo 9 (EN1999-1-2 2006) relativa ao cálculo ao fogo define para cada tipo de liga de alumínio os procedimentos relativos à determinação dos valores de cálculo para a situação de incêndio, para propriedades das ligas de alumínio e resistências, e para métodos de verificação.

Na Figura 2-6 apresenta-se a evolução do valor de calor específico, do alumínio, com a temperatura retirado do eurocódigo 9.

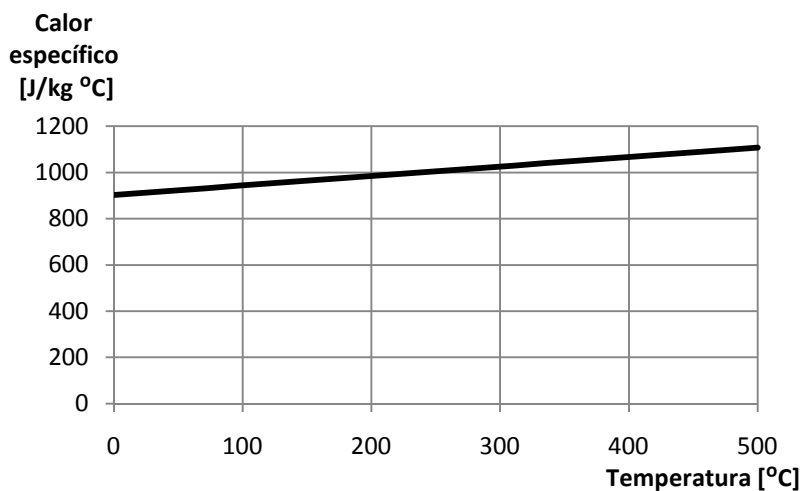


Figura 2-6 Calor específico de ligas de alumínio com a temperatura.(CEN, 2006)

Da Figura 2-6 conclui-se que o calor específico do alumínio sofre um pequeno aumento de maneira constante, com a evolução da temperatura.

De acordo com o eurocódigo as ligas de alumínio apresentam diferentes propriedades térmicas conforme a série. Na Figura 2-7 apresenta-se a evolução do valor de condutividade térmica de diferentes séries de ligas de alumínio, com a temperatura retirado do eurocódigo 3.

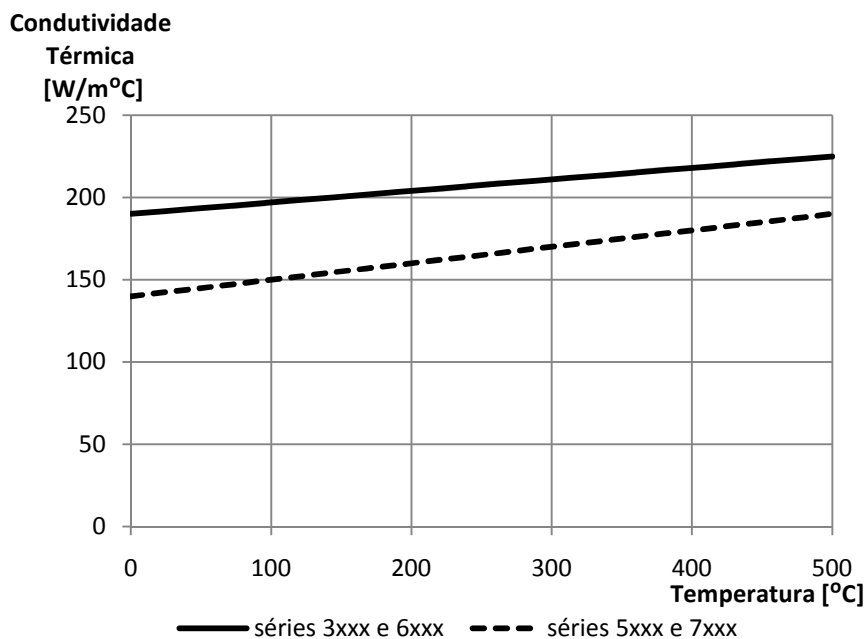


Figura 2-7 Condutividade térmica de ligas de alumínio com a temperatura.(CEN, 2006)

Da Figura 2-7 conclui-se que as ligas de alumínio da série 3xxx e 6xxx apresentam uma maior condutividade térmica. Conclui-se que a condutividade térmica do alumínio é significativamente maior do que a condutividade térmica do aço.

2.2.3. Betão

O betão é o material de construção mais utilizado nos nossos dias. Um dos factores que justificam esta ampla utilização é a sua durabilidade. Contudo, um grande número de projectos de investigação e alguns incêndios em estruturas reais evidenciaram que a exposição a temperaturas elevadas origina uma degradação das propriedades mecânicas e químicas do betão, bem como níveis significativos de destacamento explosivo da sua superfície (*Spalling*) (Kusterle, et al., 2005).

O *Spalling* depende de parâmetros como o teor de água no betão, as condições de aquecimento e/ou arrefecimento, o estado de tensão, a espessura do elemento, o tipo de armaduras, o tipo de agregados, a existência ou não de fibras e a proporção da mistura entre o cimento, os agregados e a água (Rodrigues, 1994).

A acção das temperaturas elevadas no betão conduz a alterações químicas que se traduzem numa perda de resistência irreversível, podendo dizer-se que nem os aços nem os betões são os mesmos após terem sido sujeitos à acção de um incêndio e que o aumento da temperatura causa uma redução da resistência mecânica e do módulo de elasticidade, podendo levar a estrutura a uma considerável perda de rigidez.

A parte 1-2 do Eurocódigo 2 (EN1992-1-2, 2004) relativa ao cálculo ao fogo define para cada tipo de betão os procedimentos relativos à determinação dos valores de cálculo para a situação de incêndio e apresenta as propriedades térmicas do betão com diferentes agregados.

Na Figura 2-8 é apresentada a evolução do calor específico do betão para diferentes teores de água.

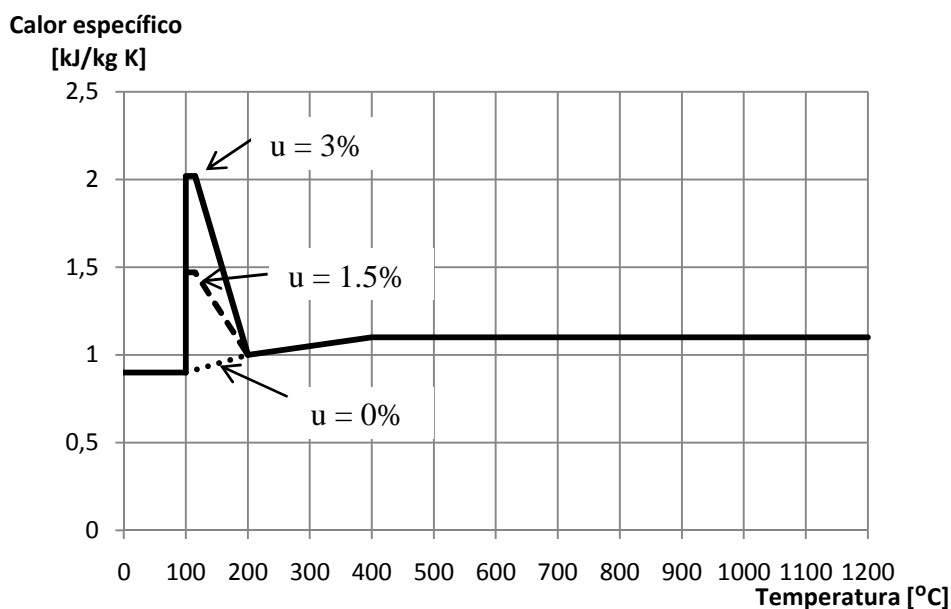


Figura 2-8 Calor específico em função da temperatura para 3 tipos diferentes de teores de água por peso de betão (CEN, 2004a).

Da Figura 2-8 conclui-se que para diferentes teores de água, a evolução do calor específico com a temperatura é igual, exceptuando na zona entre os 100 °C e os 200°C. Nesta fase um maior teor de água corresponde a um calor específico maior.

Quando o betão é sujeito a um aquecimento apresenta um patamar, na zona entre os 100°C e 200 °C, em que a temperatura não sobe num determinado tempo (que será maior quanto maior o teor de água), logo para simular este patamar o calor específico apresenta diferentes valores.

Na Figura 2-9 é apresentado o limite superior e inferior do valor da condutividade térmica do betão com a evolução da temperatura.

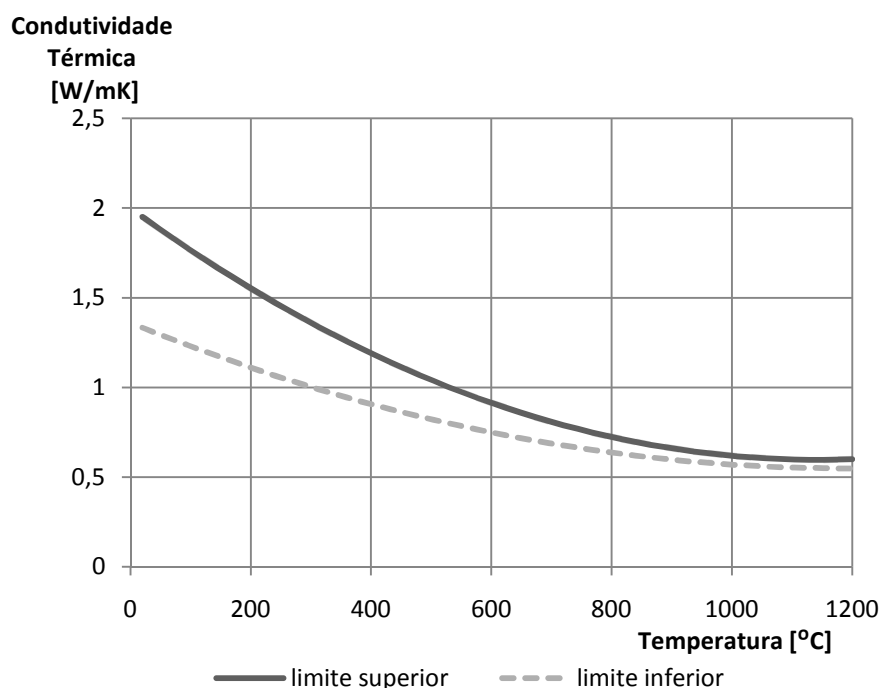


Figura 2-9 Limite superior e inferior da condutividade térmica em função da temperatura para betão normal (CEN, 2004a).

Pela Figura 2-9 conclui-se que a condutividade térmica do betão desce com a temperatura, apresentando valores reduzidos.

2.2.4. Madeira

A madeira não tem uma boa reacção ao fogo mas apresenta uma boa resistência ao mesmo. São necessárias temperaturas superficiais superiores a 400 °C para que se possa efectuar a

ignição da madeira maciça a médio ou curto prazo sem a existência de uma chama piloto. Mesmo quando uma chama piloto se encontra presente é necessário que a superfície se encontre a mais de 300 °C durante um período de tempo significativo antes da ignição acontecer (Cachim, 2007).

Até se dar a combustão, o processo é endotérmico, sendo que nesta fase a madeira utiliza a energia absorvida para libertar a água que contém. A partir da temperatura de 100 °C, o processo passa a ser exotérmico, sendo visível o desprendimento de gases e de calor.

Em relação à resistência ao fogo, a madeira apresenta um bom comportamento, situação aparentemente contraditória e que não é do conhecimento comum de vários agentes da construção. A verdade é que uma estrutura de madeira tem melhor comportamento, quando exposta ao fogo, do que estruturas equivalentes em betão ou aço (ainda que as estruturas de madeira encontrem nas suas uniões, pontos de debilidade). Tal deve-se ao facto de que ainda que a temperatura ultrapasse largamente o nível de 280°C, não sofre uma rotura súbita, pois mesmo num incêndio em que se atinjam 1000°C, ela conserva durante algum tempo uma boa resistência mecânica (devido ao efeito isolante das camadas externas carbonizadas), ao contrário do que se verifica numa peça metálica, cuja resistência diminui drasticamente quando se atingem temperaturas da ordem dos 300°C, em virtude da total alteração das suas propriedades físico mecânicas (plastificação). Para tal contribui a forma de combustão das madeiras, sendo que inicialmente a sua superfície exterior entra facilmente em combustão, mas logo cria uma capa carbonizada que é 6 vezes mais isolante que a própria madeira, atrasando o processo e permitindo que a madeira no interior da peça não seja afectada pela acção do fogo (Negrão, 2005).

Verifica-se, pois, que o fogo degrada o material madeira, não pela diminuição das propriedades mecânicas devido à acção da temperatura (como para materiais como o aço), mas sim, por esta mesma diminuição devido à perda de secção da peça estrutural.

A massa volúmica interfere na reacção da madeira ao fogo, verificando-se que quanto maior é esta, menor é a facilidade e velocidade de combustão. O teor em água da madeira influencia também este processo, atrasando-o, não sendo porém de grande relevância em estruturas em serviço, pois o teor em água é, nesses casos, normalmente, baixo.

O fogo reduz as dimensões da secção transversal das peças de madeira tal como a capacidade de resistir aos esforços e a rigidez da zona próxima da parte carbonizada. Para o cálculo da resistência de peças de madeira sujeitas a cargas é importante saber a velocidade de degradação da madeira e a distribuição de temperaturas nessa mesma peça exposta ao fogo.

A parte 1-2 do Eurocódigo 5 (EN1995-1-2, 2004) relativa ao cálculo ao fogo define para cada tipo de madeira os procedimentos relativos à determinação dos valores de cálculo para a situação de incêndio, para propriedades dos materiais e resistências, e para métodos de verificação. A seguir encontram-se alguns gráficos e tabelas relativos às propriedades térmicas da madeira.

Na Figura 2-10 apresenta-se o valor do calor específico da madeira com o aumento da temperatura, retirado do eurocódigo 5.

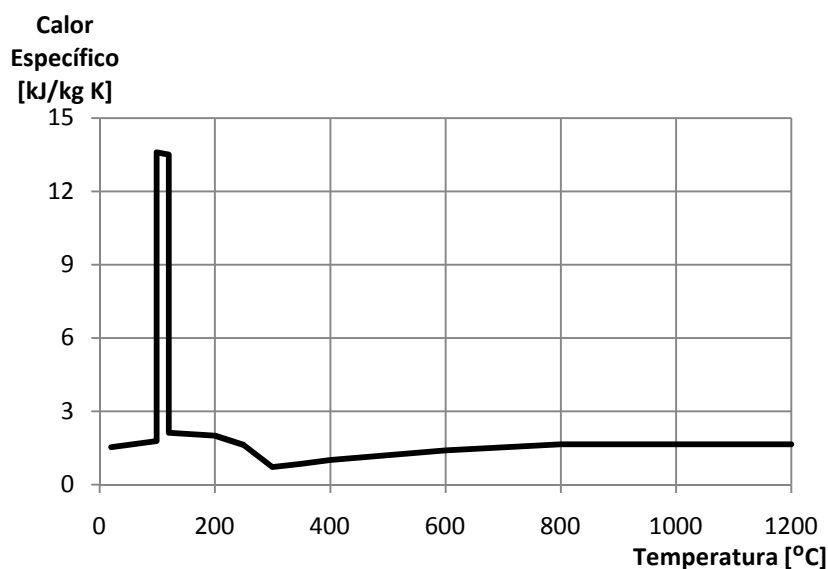


Figura 2-10 Relação entre calor específico da madeira e a temperatura (CEN, 2004c).

Conclui-se que a madeira apresenta valores de calor específico baixos. Na zona dos 100°C existe uma subida instantânea do valor de calor específico seguido de uma descida instantânea. Quando a madeira se encontra sujeita a um aquecimento, na zona dos 100 °C vai-se formar um patamar em que a temperatura não sobe por determinado tempo relacionado com a presença da água. Por isso, surge este pico no gráfico do calor específico para simular esse patamar.

Na Figura 2-11 define-se o valor da condutividade térmica com a evolução da temperatura como se encontra no eurocódigo 5.

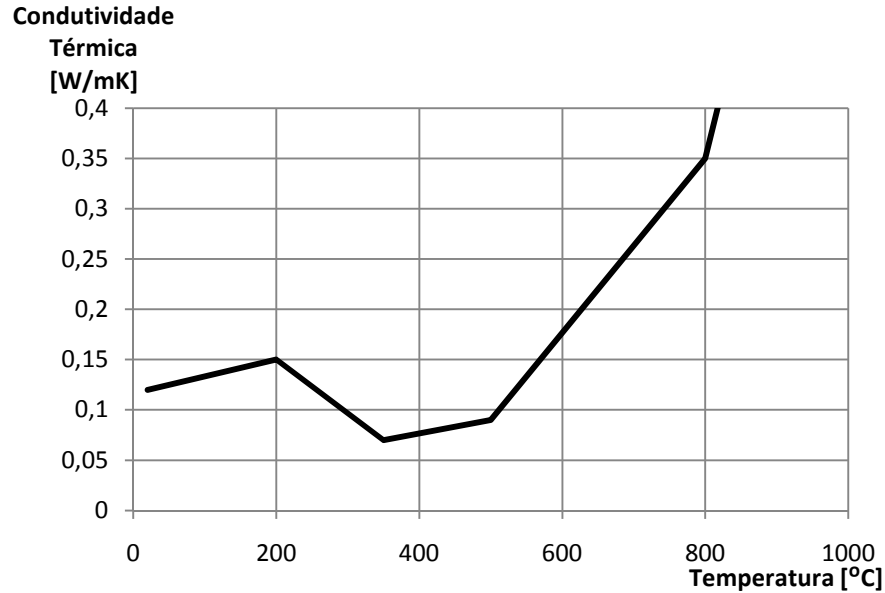


Figura 2-11 Condutividade térmica da madeira para diferentes temperaturas(CEN, 2004c).

Da Figura 2-11 conclui-se que a madeira tem baixa condutividade térmica e esta sobe com o aumento da temperatura.

No Eurocódigo 5 é apresentado também um gráfico, relacionando a massa volúmica com a temperatura na madeira, transcrito na Figura 2-12.

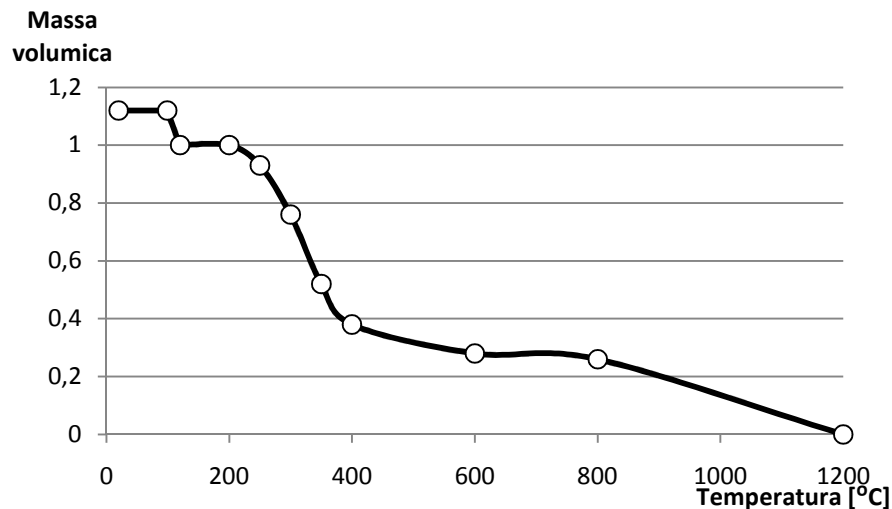


Figura 2-12 Relação entre a massa volúmica e a temperatura para madeira com um teor de água inicial de 12% (CEN, 2004c).

Conclui-se, como era previsto, que a massa volúmica diminui com a temperatura, tendo uma descida mais abrupta na zona dos 100 °C devido a perda de água. Importante referir que este gráfico é só para um teor de água inicial de 12 %. Para outros teores tem que se usar a Tabela 2-2 para obter novo gráfico.

Tabela 2-2 Relação entre Calor Específico, massa volúmica da madeira seca e a temperatura para classe de serviço 1 (CEN, 2004c).

Temperatura	Calor específico	Massa
[°C]	[J/kg K]	Volúmica
20	1,53	1+w
99	1,77	1+w
99	13,6	1+w
120	13,5	1
120	2,12	1
200	2	1
250	1,62	0,93
300	0,71	0,76
350	0,85	0,52
400	1	0,38
600	1,4	0,28
800	1,65	0,26
1200	1,65	0
w- teor de água		

Da Tabela 2-2 conclui-se que o teor de água vai alterar os valores da massa volúmica da madeira só na zona entre os 0 °C e 100°C, pois para temperaturas maiores a massa volúmica já não varia pela presença de água.

2.3.Materiais de protecção ao fogo

Para que os produtos de construção obedeçam às exigências de resistência de fogo regulamentares, é, na maior parte das vezes, necessário proteger estes produtos com material isolante.

Neste capítulo serão referidos alguns dos materiais de isolamento térmico usados em soluções construtivas, em que alguns deles foram sujeitos aos ensaios de resistência ao fogo.

2.3.1. Argamassa Projectada

A argamassa projectada é um produto com alto conteúdo de aglomerantes que quando são misturados com água gera-se uma massa fluida que poderá ser facilmente bombeada. Normalmente são apresentados como produtos de alta, média ou baixa densidade e são construídos basicamente de gesso, aproximadamente 80% do peso seco, cimento, principalmente em materiais de alta e média densidade, cargas inertes tais como poliestireno expandido, celulose e preservantes.

Materiais de baixa densidade são aplicados de um modo geral em obras internas. Os de média densidade são utilizados em obras internas com requisitos de alguma resistência ao impacto e à humidade, enquanto os de alta densidade são geralmente utilizados em obras externas onde o risco de impacto é muito elevado, assim como a humidade.

Os aços não pintados apresentam uma melhor condição de aderência dos materiais, podendo dispensar a utilização de elementos de ancoragem, salvo peças de excessiva altura. No caso de peças de excessiva altura poderá ser necessário algum tipo de ancoragem mecânica, como por exemplo a utilização de telas de fixação.

Quando a temperatura ambiente atinge 90°C – 150°C, as ligações químicas existentes no gesso hidratado sofrem algumas alterações, liberando água de hidratação. Esta reacção absorve a energia do fogo, que seria conduzida ao aço. Este processo permite ao aço manter uma temperatura relativamente baixa entre 20 a 30 minutos durante a primeira hora crítica do incêndio. A mesma consideração é aplicada para placas de gesso cartonado(Vila Real, 2003).

2.3.2. Materiais intumescentes

Um material intumescente é um material que reage com a acção de um incêndio, originando uma camada protectora que pode atingir várias dezenas de vezes a espessura inicial e que protege o elemento do aumento da temperatura devido ao fogo. Os tempos de

protecção podem ser maiores dependendo da espessura da camada, correspondendo uma maior espessura a um maior tempo de protecção. São normalmente aplicadas como protecção passiva em estruturas metálicas para protecção dos perfis metálicos em aço, também são usadas em elementos de compartimentação, tais como portas de aço.

As tintas intumescentes são mais adequadas para protecção de contorno de perfis metálicos tal como se pode ver na Figura 2-13 onde se apresenta um perfil com tinta intumescente e a sua reacção ao fogo



Figura 2-13 Reacção da tinta intumescente (Mesquita, et al., 2006).

Outro material usado são as fitas intumescentes, material flexível em que o material intumescente se encontra protegido por uma membrana plástica, que são o mais adequado para a isolamento térmico entre o aro e a porta (Figura 2-14).

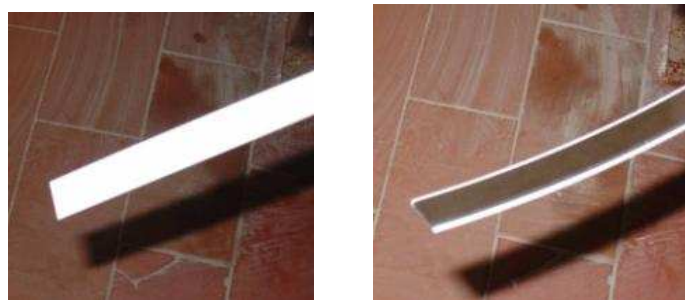


Figura 2-14 Fita intumescente.

2.3.3. Placas de fibra compactadas (Lã de Rocha)

A lã de rocha provém de fibras minerais de rochas vulcânicas, entre elas o basalto e o calcário. É muito resistente à acção do fogo e com excelentes propriedades de isolamento térmico e acústico. A lã de rocha é produzida a partir da lã mineral. Depois de se aquecer as rochas basálticas e outros minerais a cerca de 1500 °C, estes são transformados em

filamentos que, aglomerados com soluções de resinas orgânicas, permitem a fabricação de produtos leves e flexíveis ou até muito rígidos, dependendo do grau de compactação (Ecocasa, 2009).

A lã de rocha é um dos poucos materiais que pode ser usado em grandes variações de temperaturas. Um dos principais problemas que pode surgir é o aumento do factor de condutividade térmica com a temperatura e, mais drasticamente, com o nível de humidade devido à capacidade de absorção de água da lã de rocha (Karamanos, et al., 2008).

A lã de rocha é geralmente aplicada em placas para isolamento térmico e acústico de portas, coberturas e paredes (Figura 2-15).



Figura 2-15 Placas de Lã de Rocha (Larocha, 2010).

Os valores da condutividade térmica e calor específico da lã de rocha são expostos na Tabela 2-3.

2.3.4. Placas de gesso

O gesso é produzido a partir da pedra de gesso, e é composto basicamente por sulfato de cálcio di-hidratado. É muito utilizado na construção civil na produção de placas de gesso cartonado, conhecido como Pladur® (marca de comercialização). Estas são constituídas pelo gesso no interior e por uma camada fina de papel na superfície.

As placas de gesso são usadas como protecção contra o fogo devido ao facto de terem uma baixa condutividade térmica e terem um teor de água significativo que atrasa a evolução da temperatura.

Os valores da condutividade térmica e calor específico de placas de gesso são expostos na Tabela 2-3 sobre propriedades térmicas de alguns materiais de compartimentação ao fogo.

2.3.5. Propriedades térmicas de alguns materiais de protecção

Neste subcapítulo é apresentada uma tabela com propriedades térmicas de alguns materiais usados normalmente na construção civil para melhorar o comportamento de elementos de compartimentação ao fogo, tais como portas ou paredes, mencionados anteriormente. Como era esperado, os materiais usados para isolamento como a lã de rocha e lã de vidro apresentam valores muito baixos de condutividade tornando-os ideais na protecção contra o fogo.

Tabela 2-3 Propriedades térmicas de alguns materiais de protecção ao fogo.

Material	Massa volúmica, ρ kg/m^3	Condutividade Térmica, λ [W/(m K)]	Calor Específico, C_p [J/(kg K)]
Gesso			
• Placas de gesso	900	0.25	1000
• Acessórios de gesso	1150	0.485	1000
Lã			
• Lã de vidro	60	0.037	1030
• Lã de rocha	60	0.037	1030

2.4. Elementos usados em compartimentação resistente ao fogo

Neste subcapítulo abordar-se-ão sucintamente algumas soluções construtivas usadas actualmente, com vista a um melhor comportamento destas ao fogo.

2.4.1. Alvenaria

2.4.1.1. Considerações iniciais

Actualmente as alvenarias são o processo construtivo mais frequente para a realização de paredes. Estas destinam-se a separar o espaço exterior do interior, assim como, a efectuar a compartimentação dos espaços interiores.

As paredes de alvenaria constituem um subsistema onde são englobados elementos de custo elevado tais como, revestimentos e esquadrias. Representam o maior volume de materiais, cerca de $0.3 \text{ m}^3/\text{m}^2$ de área em planta e correspondem a cerca de 35 % do peso do edifício.

Actualmente, em Portugal, para a construção das paredes dos edifícios, podemos verificar a existência de vários tipos de elementos para alvenaria. Os elementos, objecto de produção industrial e de aplicação mais generalizada, são: os tijolos cerâmicos de furação horizontal, os tijolos cerâmicos para aplicação à vista, os blocos de betão de agregados correntes e leves e, mais recentemente, os tijolos de furação vertical. Os tijolos cerâmicos de furação horizontal são os elementos mais utilizados na realização das paredes, devendo a sua cota, no conjunto dos vários elementos para alvenaria representar cerca de 90 %.(Pereira, 2005)

A parede de alvenaria tem correntemente um bom desempenho funcional, nomeadamente em termos de isolamento térmico e acústico, estanquidade à água, resistência ao fogo e resistência mecânica.

2.4.1.2. Betão celular autoclavado

O betão celular autoclavado é um material de construção, inteiramente natural e não poluente, composto por areia, cal, cimento e água. Na fase final do fabrico é adicionado pó de alumínio que actua como gerador de bolhas de hidrogénio no seio da mistura dos restantes constituintes, e que são responsáveis pela formação da estrutura celular deste material.

A cura deste betão é feita em autoclave sob a acção de vapor de água em condições de pressão e temperatura controladas.

Os blocos de betão celular autoclavado apresentam todas as propriedades e características para a construção de alvenarias de alta qualidade, nomeadamente: isolamento térmico excelente, elevada resistência à compressão, incombustibilidade e resistência ao fogo, bom isolamento acústico e facilidade de manuseamento



Figura 2-16 Parede em blocos de betão celular autoclavado Ytong(Ytong, 2010) .

O peso reduzido e a estabilidade dimensional do betão celular autoclavado são características ideais para a construção de alvenarias. A sua utilização em paredes exteriores e interiores permite uma menor transmissão de carga, a todos os elementos estruturais (lajes, vigas e pilares) do que outros materiais de construção, para além de toda a qualidade e bem-estar oferecidos.

Em construções industriais, devido à existência de grandes painéis de alvenaria corrida, o betão celular autoclavado permite rendimentos de assentamento de blocos ainda mais elevados, possibilitando um encurtamento significativo dos prazos de execução das obras.

2.4.1.3. Blocos solo-cimento

A maior parte dos solos na condição natural não apresenta resistência, estabilidade dimensional e durabilidade para construção de edifícios. Estas deficiências podem ser ultrapassadas através de um processo de estabilização mecânica por compactação e a adição de ligantes químicos ao solo, como cimento ou betume. Em comparação com os materiais mais comuns usados na construção os blocos solo-cimento oferecem um

conjunto de vantagens de baixo custo para construção residencial. O uso de materiais locais é maximizado, requerem métodos de construção simples e oferecem boa resistência ao fogo e bom isolamento acústico

Normalmente, o uso de blocos solo-cimento requer menos de 10 % da energia usada para fabricar tijolos cerâmicos e de betão. Apesar destas vantagens o uso de blocos solo-cimento é limitado devido à falta de critérios de avaliação e guias para fabrico e uso (Walker, 1995).



Figura 2-17 Blocos Solo-cimento(Buson, 2009).

2.4.1.4. Blocos Kraftterra

Os blocos Kraftterra provêm de um projecto experimental de Doutoramento em desenvolvimento na Universidade de Brasília e na Universidade de Aveiro. O tema envolve o processo de produção e a análise de desempenho de blocos de terra compactada - BTCs - com a incorporação de fibras de papel kraft proveniente da reciclagem de sacos de cimento.

A Indústria da Construção Civil gera uma grande quantidade de resíduos sólidos, o que proporciona um enorme impacto ambiental pelo facto desse entulho de obra ser em grande parte descartado na natureza sem qualquer aproveitamento ou tratamento. O estudo incide sobre o papel kraft oriundo dos sacos de cimento, os quais na sua grande maioria não são reciclados por se encontrarem "contaminados" pelo cimento (Buson, 2009).

No LERF foi estudado o desempenho destes ao fogo comparativamente aos blocos solocimento e serão apresentados os resultados no capítulo 4 relativo aos ensaios experimentais.

2.4.1.5. Tijolo Cerâmico

Os tijolos cerâmicos são dos materiais de construção mais antigos, logo a seguir à pedra e à madeira. Historicamente, o tijolo foi utilizado em regiões onde a pedra natural e a madeira não abundavam.

No século XIX, com o início da revolução industrial, o tijolo cerâmico surge como produto industrializado para construção. As virtudes que se foram detectando no uso deste material para o conforto da habitação permitiram uma expansão notável da alvenaria de tijolo cerâmico.

Os tijolos cerâmicos podem ser classificados consoante as suas características e quanto ao fim em vista (APICER, 2000):

Maciço: tijolo cujo volume de argila cozida não é inferior a 85 % do seu volume total aparente;

Furado: tijolo com furos ou canais de qualquer forma e dimensões, paralelos às suas maiores arestas e tais que a sua área não é inferior a 30% da área da face correspondente nem superior a 75% da mesma área;

Perfurado: tijolo com furos perpendiculares ao seu leito e tais que a sua área não é inferior a 15% da área da face correspondente nem superior a 50% da mesma área

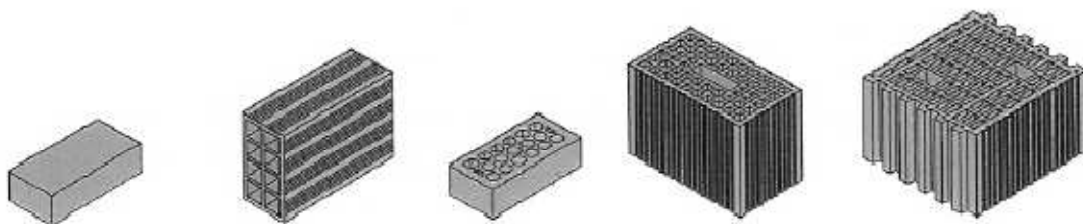


Figura 2-18 Tipos de tijolos cerâmicos (APICER, 2000).

2.4.1.6. Comportamento Térmico pelo Eurocódigo 6 da Alvenaria

A parte 1-2 do Eurocódigo 6 (EN1996-1-2) relativa ao cálculo ao fogo define para cada tipo de alvenaria os procedimentos relativos à determinação dos valores de cálculo para a situação de incêndio.

Devido ao grande número de diferentes tipos de alvenaria, o eurocódigo 6 remete o estudo da condutividade térmica e do calor específico para a realização de testes ou base de dados, fornecendo também métodos de cálculos avançados, para determinação do comportamento. Como exemplo apresenta-se um dos gráficos dos anexos do eurocódigo na Figura 2-19.

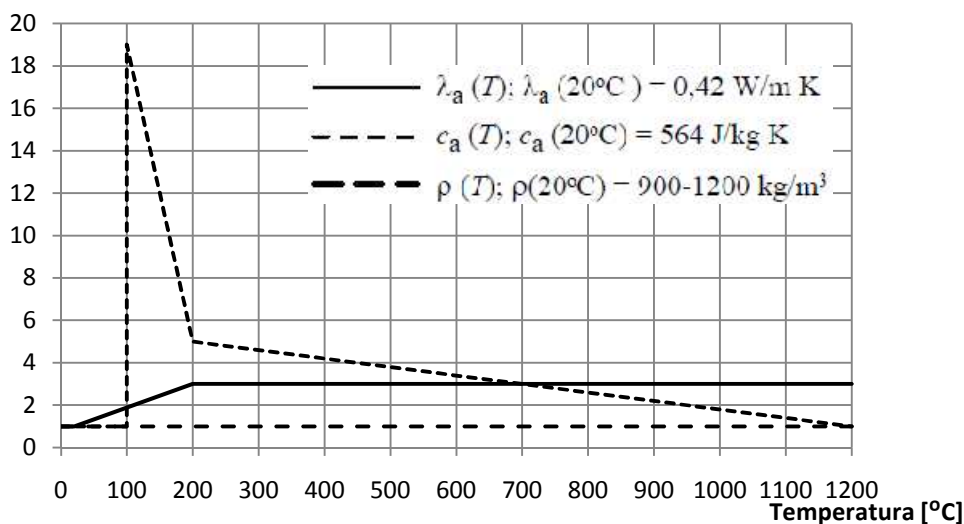


Figura 2-19 Valores de cálculo das propriedades térmicas de alvenaria cerâmica com massa volúmica entre 900-1200 kg/m³ (CEN, 2005b).

As propriedades térmicas são calculadas através da multiplicação dos valores iniciais dados aos 20 °C pelo valor obtido no eixo y da Figura 2-19, na temperatura que se quer estudar.

O calor específico, pela análise da Figura 2-19, apresenta o seu valor máximo na ordem dos 100 °C devido à formação do patamar no caso da presença de humidade, quando sujeito à mesma temperatura.

Na Tabela 2-3 são apresentados alguns valores constantes das propriedades térmicas mais relevantes, normalmente usados para alvenaria de tijolo cerâmico, betão ou pedra granítica.

2.4.1.7. Resistência ao fogo de paredes de alvenaria sem funções de suporte de cargas pelo Eurocódigo 6

Apesar dos variados tipos de alvenaria existentes, o eurocódigo 6 define para alguns tipos os valores mínimos de espessura para resistência ao fogo. Devido ao número extenso de tabelas existentes no eurocódigo apresenta-se como exemplo uma relativa a alvenaria de tijolo cerâmico (Tabela 2-4) e betão celular autoclavado (Tabela 2-5).

Tabela 2-4 Valores mínimos de espessura de paredes de alvenaria de tijolo cerâmico para resistência ao fogo (CEN, 2005b).

Massa volúmica ρ (kg/m ³)	Espessura mínima (mm) para resistência ao fogo (minutos)						
	30	45	60	90	120	180	240
$500 \leq \rho \leq 2400$	60/100	90/100	90/100	100/140	100/170	160/190	190/210

Os valores são apresentados de maneira a que haja um intervalo de tolerância. Como por exemplo, o valor de 60/100 corresponde a um espessura recomendada entre 60 e 100 mm para obter uma resistência (EI) ao fogo de 30 minutos.

Tabela 2-5 Valores mínimos de espessura de paredes de betão celular autoclavado para resistência ao fogo (CEN, 2005b).

Massa volúmica ρ (kg/m ³)	Espessura mínima (mm) para resistência ao fogo (minutos)						
	30	45	60	90	120	180	240
$350 \leq \rho \leq 500$	50/70	60/65	60/75	60/100	70/100	90/150	100/190
$500 \leq \rho \leq 1000$	50/70	60	60	60/100	60/100	90/150	100/190

Assim pode-se concluir que as paredes de betão celular autoclavado apresentam melhor comportamento ao fogo, pois a menor espessura desta conduz aos mesmos tempos de resistência das paredes de tijolo cerâmico.

2.4.1.8. Propriedades térmicas de alguns tipos de alvenaria

De seguida são apresentados alguns valores típicos de propriedades térmicas que se podem considerar para diferentes tipos de alvenaria.

Tabela 2-6 Propriedades térmicas de alguns materiais de compartimentação ao fogo

Material	Massa volúmica, ρ kg/m ³	Condutividade Térmica, λ [W/(m·K)]	Calor Específico, Cp [J/(kg·K)]
Tijolo			
• Tijolo de betão	550	0.14	840
• Tijolo pesado	2000	1.2	1000
• Tijolo furado leve	700	0.15	840
• Tijolo normal	1600	0.7	840

2.4.2. Exigências de resistência ao fogo de paredes de betão sem funções de suporte de cargas pelas tabelas técnicas

As paredes apresentadas nesta secção são paredes de betão (armado ou não armado) destinadas, fundamentalmente, a funções de compartimentação, embora possam também servir como elementos de contraventamento.

As exigências de resistência ao fogo atribuídas a estas paredes reduzem-se às que são específicas daquelas funções – estanquidade às chamas e isolamento térmico – e são satisfeitas, essencialmente, condicionando a sua espessura. Na Tabela 2-7 apresentam-se, em função da classe de resistência ao fogo, as espessuras mínimas requeridas.

Tabela 2-7 Valores mínimos da espessura paredes para resistência ao fogo (Reis, et al., 2006).

Classes de resistência ao fogo	EI 30	EI 60	EI 90	EI 120	EI 180	EI 240
Espessura da parede (mm)	60	80	100	120	150	180

2.4.3. Placas de Gesso Cartonado

Tal como foi dito anteriormente no subcapítulo 2.3.4, a placa de gesso é fabricada essencialmente a partir de gesso, água e alguns aditivos. Esta pasta húmida é despejada

continuamente sobre papel, recebendo uma nova camada na superfície superior. Assim, é fabricada uma espécie de sanduíche de papel e gesso que, após secagem é cortada numa grande variedade de formatos. O gesso cartonado está também disponível em diversas espessuras e, conforme os aditivos que recebe, pode destinar-se a locais diferentes numa construção, tais como ambientes húmidos ou onde se necessita resistência adicional ao fogo.

As placas de gesso são aparafusadas directamente sobre a estrutura metálica ou coladas a paredes de alvenaria através de massa própria. As juntas são tratadas pela aplicação de pasta de acabamento reforçada com uma tira de papel ou rede.



Figura 2-20 Colocação de placa de gesso cartonado(Viver, 2010).

2.4.4. Painéis sandwich com lã de rocha para coberturas e fachadas

Os painéis sandwich são essencialmente constituídos por lã de rocha no interior revestida por placas metálicas, estas podem ser lisas se forem para fachadas ou onduladas para coberturas e apresentam um grande número de tamanhos e espessuras para usos variados. Na Figura 2-21 apresenta-se como exemplo uma placa sandwich da empresa Mundiperfil para cobertura.

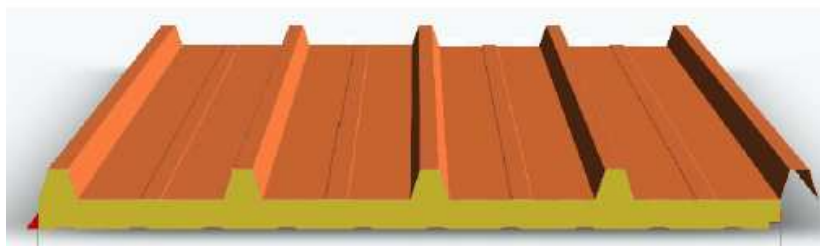


Figura 2-21 Placa sandwich para cobertura(Mundiperfil, 2010).

2.4.5. Vidro resistente ao fogo

Habitualmente, o vidro resistente ao fogo é um vidro laminado composto por várias camadas incolor unidas por lâminas intercalares ou gel intumescentes, que reagem em caso de incêndio. No momento em que uma das faces alcança uma temperatura próxima a 120 °C, activa-se o processo de intumescência, criando-se uma barreira opaca contra o fogo. Durante um incêndio, o gel é capaz de absorver a radiação térmica, detendo a energia libertada pelo incêndio, e mantendo um incremento da temperatura sobre a face do vidro oposta ao fogo. Dependendo da espessura do gel, os intervalos de tempo de resistência ao fogo podem variar (Vitro Chaves, 2010).

Na Tabela 2-8 e Tabela 2-9 destacam-se vidros de protecção contra o incêndio existentes actualmente.

Tabela 2-8 Vidros utilizados na protecção contra incêndios (1) (FEUP, 2010).

Função dos vidros na protecção contra incêndios	Tipo de vidro	Exemplos e suas características
Pára-Chamas	<p>Vidro aramado</p> <p>Vidro temperado</p> <p>Vidro laminado</p>	<p>SGGDravel – Vidro à prova de chamas e de gases quentes durante 30 minutos, E30</p> <p>SGGFIVESTAR – Vidro monolítico que pode ser utilizado no interior, mesmo próximo de zonas de calor. Vidro à prova de chamas e de gases quentes durante 30 minutos, E30</p> <p>SGGPYROSWISS – Vidro que satisfaz os critérios relativamente à prova de chamas e de gases quentes durante o incêndio, E 30, E 60 e mais.</p> <p>SGGSWISSFLAM – Vidro multilaminado intercalar intumescente incolor e transparente, de espessura de 10mm, para classificações E30 e E60, ou EW30 à 60 (limitação de fluxo calorífico máximo, critério opcional W)</p> <p>SGGVETROFLAM – Vidro destinado às obras devendo satisfazer durante 30 a 60 minutos os critérios à prova de chamas e gases quentes durante o incêndio. Classificados E30 e E60.</p>

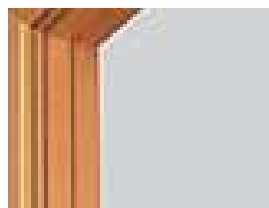
Tabela 2-9 Vidros utilizados na protecção contra incêndios (2) (FEUP, 2010).

Corta-fogo	Vidro Composto Vidro laminado	<p>SGGCONTRAFLAM – É um vidro resistente ao fogo, por classificações EI 30 a EI 120, composto por vidros separados por um ou mais intercalares.</p> <p>SGGSWISSFLAM – É um vidro incolor multilaminado com intercalar intumescente para obras EI 30 e EI60. À partida, a espessura intercalar totalmente sem cor é mínima. Expande-se e opacifica-se na presença de fogo, desenvolvendo uma “substância” isolante.</p>
------------	--------------------------------------	--

2.4.6. Portas corta-fogo

Hoje em dia, no mercado, existe um número elevado de materiais usados no fabrico de portas. Estas podem ser em madeira ou aço simultaneamente com diversos outros materiais (gesso, lã de rocha, etc.), mas, muitas vezes, para uma maior exigência de comportamento e segurança ao fogo é preciso encontrar um equilíbrio entre o uso de vários materiais. No mercado têm surgido cada vez mais soluções com o uso de dois ou mais materiais com propriedades térmicas diferentes para o fabrico de portas com uma boa resistência ao fogo.

A título de exemplo refere-se aqui as portas corta-fogo da empresa Vicaima (EI60), havendo também modelos EI30 e EI 20, sendo esta resistente ao fogo durante 60 minutos e constituída por madeira, fitas intumescentes e vidro corta-fogo para protecção.



a) Dupla fita intumescente



b) Vidro corta-fogo

Figura 2-22 Porta corta-fogo(Vicaima, 2010).

3. ENSAIOS EXPERIMENTAIS DE RESISTÊNCIA AO FOGO

O programa experimental envolve a realização de alguns ensaios no LERF a elementos de compartimentação.

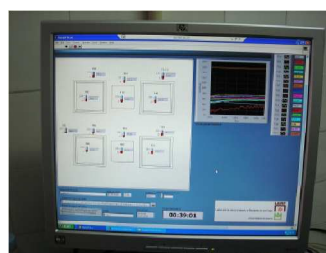
3.1. Descrição dos equipamentos e softwares do LERF

O Laboratório de Estruturas de Resistência ao Fogo, LERF, está dotado de um forno vertical com uma dimensão no plano vertical de $3,1 \times 3,1 \text{ m}^2$, capaz de definir a resistência ao fogo de elementos e produtos de construção de acordo com a regulamentação europeia, mencionada no capítulo 1. Podem submeter-se ao aquecimento padronizados elementos de compartimentação verticais numa só face.

Todos os dados necessários à avaliação da amostra em estudo são acompanhados numa sala do laboratório com os devidos equipamentos e *softwares* fundamentais (ver Figura 3-1). Na sala existe um equipamento que regista e fornece a leitura das temperaturas interiores do forno, bem como a variação da pressão. Neste equipamento é possível inserir a curva padronizada que se pretende para o aquecimento do forno, permitindo ligar/desligar os termopares do forno de acordo com o pretendido para cada ensaio, e estabelecer a pressão no interior do mesmo. Na Figura 3-1 é possível visualizar o *hardware* descrito, anteriormente, no canto direito da sala.



a)



b)

Figura 3-1 Sala de laboratório com os equipamentos informáticos e respectivos softwares
a) Monitor com o sistema operativo MS-DOS b) Monitor com o programa em LabVIEW (Jesus, 2008).

Os termopares da face não exposta estão ligados a um sistema de aquisição de dados, (Figura 3-2). Este adquire os valores de temperatura e através do monitor é possível visualizar e vigiar a evolução da temperatura na face não exposta. Para este efeito é utilizado um *software* específico, designado LabVIEW e tem como funções: a aquisição de dados, o controlo de instrumentos, automatização de testes, processamento de sinal e controlo industrial.



Figura 3-2 Sistema de aquisição de dados onde estão ligados os termopares da face não exposta (Jesus, 2008).

3.2. Ensaios a portas

Neste capítulo são abordados três dos ensaios efectuados pelo LERF relativos a elementos de compartimentação, requeridos por diferentes empresas, para avaliar o comportamento de resistência ao fogo. Os ensaios elaborados no LERF permitiram classificar o produto testado de acordo com os critérios de estanquidade a chamas e gases (E) ou isolamento térmico (I) e para verificar o comportamento de vários materiais sujeitos ao fogo.

3.2.1. Preparação dos ensaios

Para a realização destes ensaios é necessário um estudo e preparação prévio. É importante verificar se os equipamentos necessários funcionam adequadamente, preparar o *software* de acordo com o ensaio a realizar.

A amostra é montada no laboratório pela empresa requerente e a sua montagem deve ser executada da mesma forma como se aplica em obra. Após a sua finalização, é fundamental analisar o correcto funcionamento da amostra.

Anteriormente ao dia do ensaio, são efectuados os últimos pormenores, tais como, a colocação dos termopares e a marcação dos pontos de medição da deformação (Figura 3-3), entre outros.

Nos ensaios realizados os pontos de colocação dos termopares exteriores, e os pontos de medição da deformação estão representados na figura seguinte.

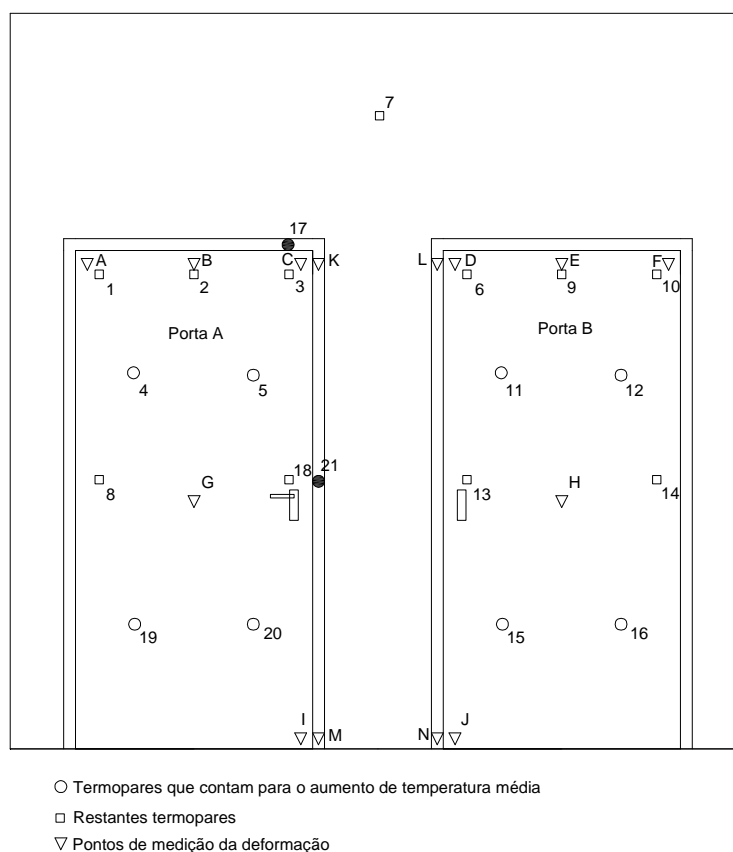


Figura 3-3 Desenho de uma amostra a ensaiar de elementos de compartimentação.

3.2.2. Ensaio de resistência ao fogo a portas em aglomerado de madeira revestido com papel kraft

Neste subcapítulo é apresentada uma descrição do ensaio relativo a portas em madeira com resinas fenólicas realizado pelo LERF. São apresentados os resultados obtidos e as conclusões retiradas.

3.2.2.1. Detalhe da amostra

As duas portas ensaiadas eram constituídas pelo mesmo material em madeira com encabeços de madeira maciça revestida em ambas as faces por papel kraft impregnado em resinas fenólicas. Foram instaladas numa construção flexível, elaborada com estrutura

metálica leve e placas de gesso cartonado. A Figura 3-4 apresenta a amostra antes do início do ensaio



Figura 3-4 Amostra antes da realização do ensaio a)face não exposta b)face exposta.

3.2.2.2. Observações do ensaio

Ao fim de 6 minutos do início do ensaio observou-se a ocorrência de chama constante no topo da porta B. Pouco tempo após esta observação tanto a porta A com a porta B foram completamente consumidas pelo fogo.

Na Figura 3-5 é apresentada a destruição das portas depois de desligado o forno aproximadamente aos 10 minutos após o início do ensaio.



Figura 3-5 Destruição causada pelo fogo aos 10 minutos

O forno foi desligado ao fim de 7 minutos, dando-se assim por terminado o ensaio de resistência ao fogo. A Figura 3-6 apresenta a amostra, após o ensaio, nas suas faces não exposta e exposta ao fogo.

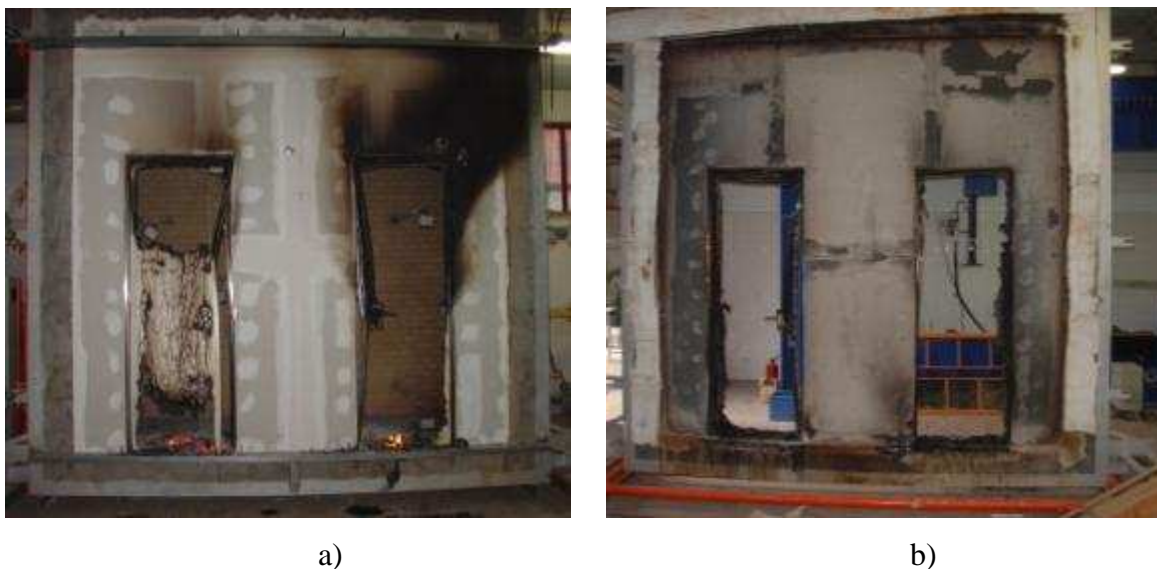


Figura 3-6 Amostra antes da realização do ensaio a)face não exposta b)face exposta

3.2.2.3. Resultados do ensaio

O gráfico da Figura 3-7 expõe as temperaturas nos vários termopares durante o ensaio.

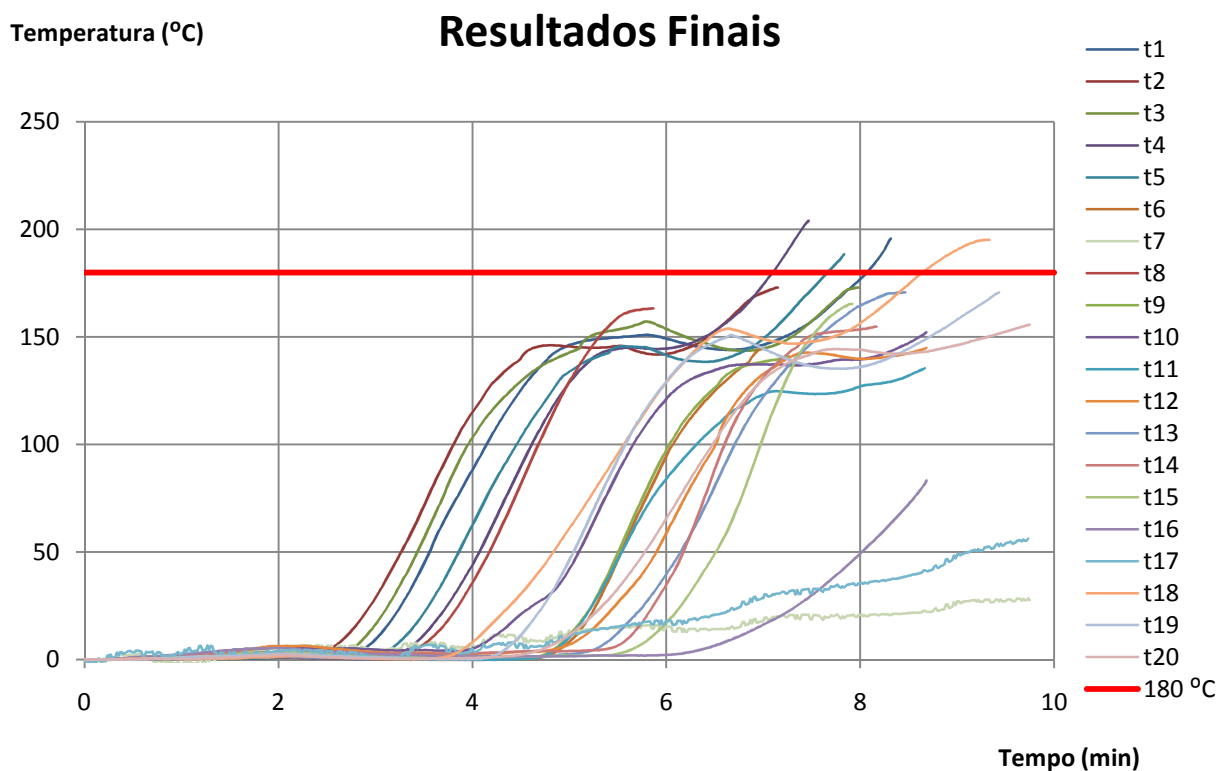


Figura 3-7 Temperatura dos principais termopares durante o ensaio

A monitorização no ensaio foi feita em menos de 10 minutos devido à rápida destruição das portas. A temperatura mais elevada foi registada no termopar t4, este encontrava-se localizado na porta A. A temperatura mais baixa foi registada no termopar t7, na parede em gesso cartonado.

3.2.2.4. Conclusão

Do ensaio conclui-se que a conjugação da madeira com resinas fenólicas resulta num mau comportamento ao fogo. Regista-se um aumento de temperatura muito rápido e uma destruição total das portas em pouco tempo. Também se conclui um bom comportamento ao fogo inicial, da parede de gesso cartonado

3.2.3. Ensaio de resistência ao fogo a portas em aço

Neste subcapítulo é apresentado uma descrição do ensaio relativo a portas em aço realizado pelo LERF. São apresentados os resultados obtidos e a classificação atribuída à amostra.

3.2.3.1. Detalhe da amostra

Como se pode ver pela Figura 3-8, a amostra é constituída por duas portas em aço com uma parede realizada em alvenaria simples. As portas eram constituídas por fitas intumescentes no respectivo aro.



Figura 3-8 Amostra da face exposta ao fogo antes da realização do ensaio

Importante referir que as portas apresentavam alguma humidade pois escorria água misturada com cola na zona inferior destas, como se pode ver na Figura 3-9.



Figura 3-9 Presença de água com cola anteriormente ao ensaio

Relativamente à instrumentação de ensaio, para avaliar o critério de isolamento térmico na amostra, procedeu-se à aplicação de termopares na face não exposta da amostra. Os termopares foram posicionados de acordo com a Figura 3-10.



Figura 3-10 Localização dos termopares e pontos de leitura da deformação.

3.2.3.2. Registo fotográfico

Neste subcapítulo apresenta-se a evolução do comportamento das portas ao fogo, visualmente, através do registo fotográfico. Na Figura 3-11, tirada aos 3 minutos depois do início do ensaio, na primeira vê-se a saída de algum fumo pelo cimo das portas e na segunda regista-se a deformação mais acentuada da porta B.



Figura 3-11 Presença de fumo na porta A e deformação da porta B decorridos 3 minutos no ensaio.

Na Figura 3-12 observa-se a presença de muito fumo no laboratório aos 20 minutos de duração do ensaio. Este fumo foi-se tornando mais intenso desde o início do ensaio, sendo necessário abrir todas as portas para uma maior dissipação.



Figura 3-12 Presença de fumo no laboratório aos 20 minutos.

Na Figura 3-13 regista-se visualmente uma acentuada deformação das portas, principalmente da porta B, devido á facilidade de dilatação do aço com o aumento da temperatura.



Figura 3-13 Deformação das portas aos 46 minutos.

Aos 58 minutos dá-se por concluído o ensaio, pois observa-se a presença de chama no lado não exposto da porta A, no canto superior esquerdo, assim, visto já não respeitar o critério de estanquidade termina-se o ensaio. Na Figura 3-14 mostra-se a zona da porta por onde se registou a presença de chama.



Figura 3-14 Zona da porta A por onde se observou a chama aos 58 minutos.

Depois de concluído o ensaio, tiraram-se algumas fotos às portas, tal como se vê na Figura 3-15, para se registar a deformação final e o dano causado pelo fogo.



Figura 3-15 Registo final da amostra. a) Deformação final das portas b) Parte exposta ao fogo depois do ensaio.

3.2.3.3. Resultados do ensaio

Na Figura 3-16 apresenta-se a evolução das temperaturas ao longo do ensaio.

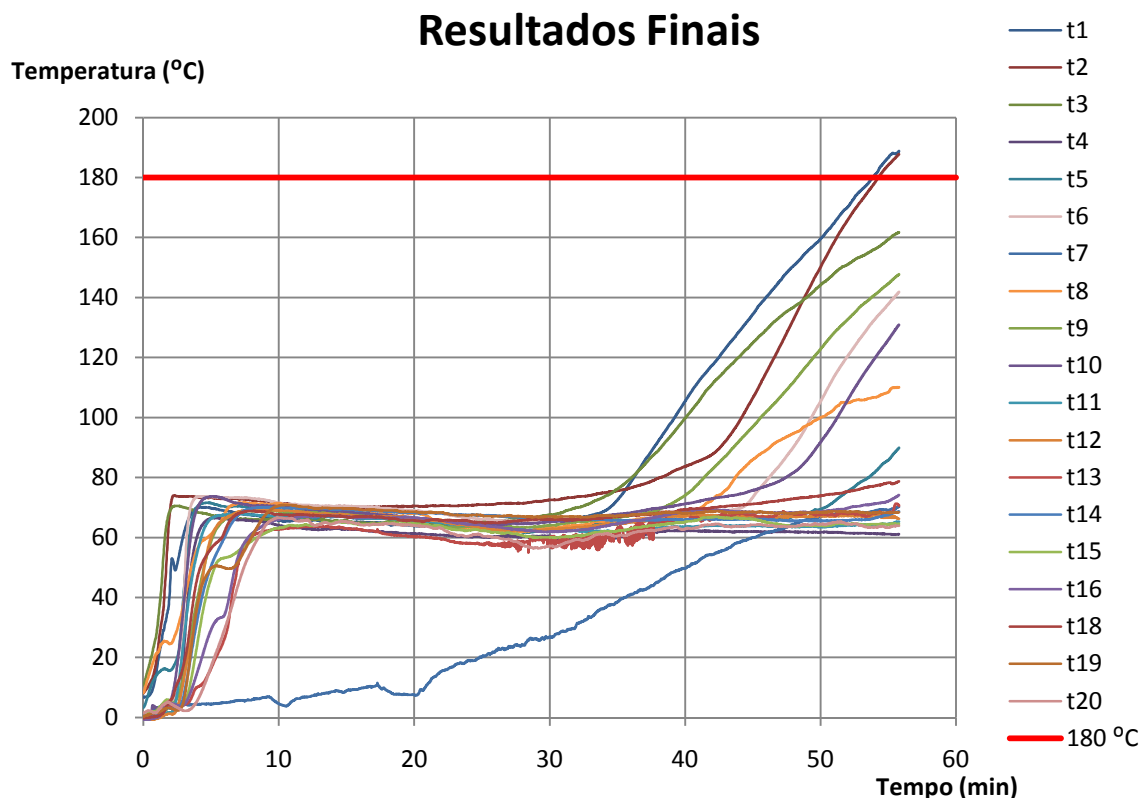


Figura 3-16 Temperaturas nos termopares exteriores.

Durante o ensaio houve um aumento lento das temperaturas na parte não exposta das portas. O maior valor de temperaturas foi registado nos termopares t1 a t3 correspondente ao cimo da porta A. Em termos do critério de isolamento térmico o t1 e t2 foram os únicos a ultrapassar os 180 °C.

Devido ao gráfico representar o aumento de temperatura é importante referir que os termopares começam em 0 °C, mas na realidade, encontram-se sujeitos a temperatura ambiente, logo, o patamar presente próximo dos 80 °C corresponde aos 100 °C na realidade. Assim, a presença deste durante 30 minutos na temperatura de evaporação da água deve-se provavelmente à presença de uma quantidade considerável de água nas portas.

Como observação adicional, pode-se registar que a parede de alvenaria de tijolo cerâmico comporta-se bem ao fogo em termos de condutividade térmica, pois o termopar t7 sofre um

aumento de temperatura baixo ao longo do tempo chegando a um máximo de, aproximadamente, 90 °C durante o ensaio.

Na Figura 3-17 é apresentada a deformação medida durante o ensaio.

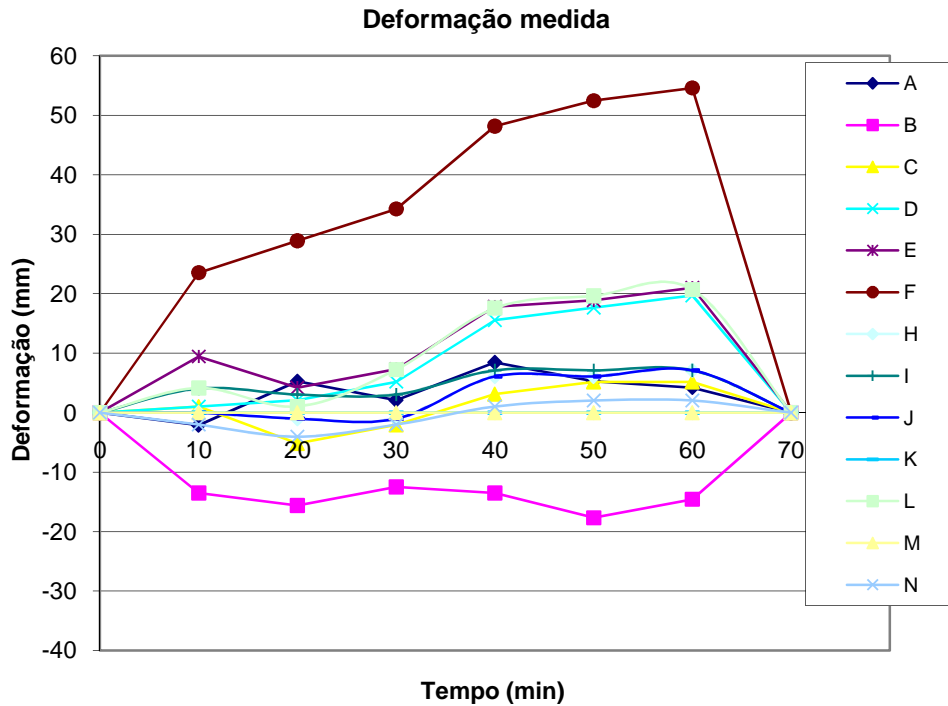


Figura 3-17 Evolução da deformação ao longo do ensaio.

Como se pode observar na Figura 3-13 e pelo gráfico da Figura 3-17, a deformação mais acentuada ocorreu na porta B no topo na localização do ponto de medição F, esta deformação atingiu o valor máximo de aproximadamente 55 mm

3.2.3.4. Conclusão

Pelo ensaio realizado pode-se concluir que as portas em aço resistem algum tempo ao fogo, apesar de sofrerem uma deformação acentuada rapidamente. As tintas intumescentes e a presença de água provavelmente influenciaram o bom comportamento ao fogo.

3.2.4. Ensaio de resistência ao fogo a portas em madeira

Neste subcapítulo aborda-se sucintamente o ensaio realizado a portas maciças em madeira.

3.2.4.1. Detalhes da amostra

Foram ensaiadas 2 unidades da mesma porta, com folha de 900x2100 mm² em aglomerado de partículas de madeira. Uma das portas abria para o lado de dentro do forno (porta A – porta à esquerda na Figura 3-18) e a outra para o lado contrário (porta B – porta à direita na Figura 3-18).

As portas foram instaladas numa construção de suporte rígida devido a ser elaborada com tijolos cerâmicos com 11 cm de largura.

A Figura 3-18 apresenta o posicionamento dos termopares e dos pontos de medição da deformação da amostra.



Figura 3-18 Face não exposta da amostra a ensaiar.



Figura 3-19 Pormenor da face exposta da amostra a ensaiar.

3.2.4.2. Observações adicionais

Aos 7 minutos após o início do ensaio observou-se a ocorrência de chama constante na base de ambas as portas A e B, que se manteve durante todo o ensaio, comprovada com a utilização do tampão de algodão (a Figura 3-20 ilustra a ocorrência de chama na porta B).



Figura 3-20 Chama constante na base da porta B.

Apesar da presença de chama aos 7 minutos, o forno só foi desligado ao fim de 20 minutos, para se retirar melhores resultados do comportamento das portas ao fogo. A Figura 3-21 apresenta a amostra, após o ensaio, nas suas faces não exposta e exposta ao fogo.

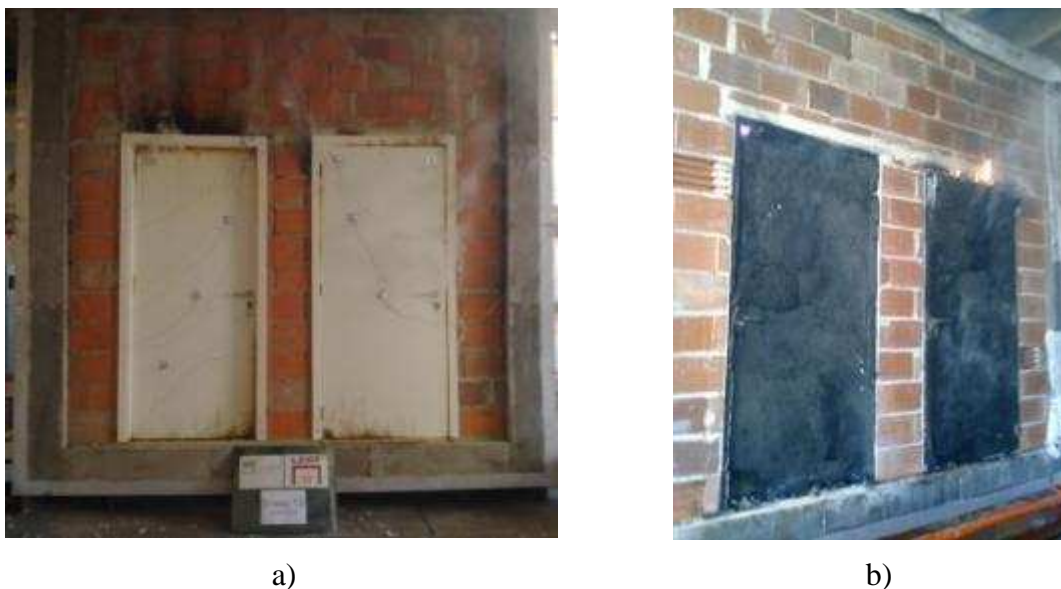


Figura 3-21 Registo final da amostra. a) Deformação final das portas b) Parte exposta ao fogo depois do ensaio

3.2.4.3. Resultados obtidos

Na Figura 3-22 é apresentada a evolução das temperaturas na amostra de ensaio ao longo do tempo.

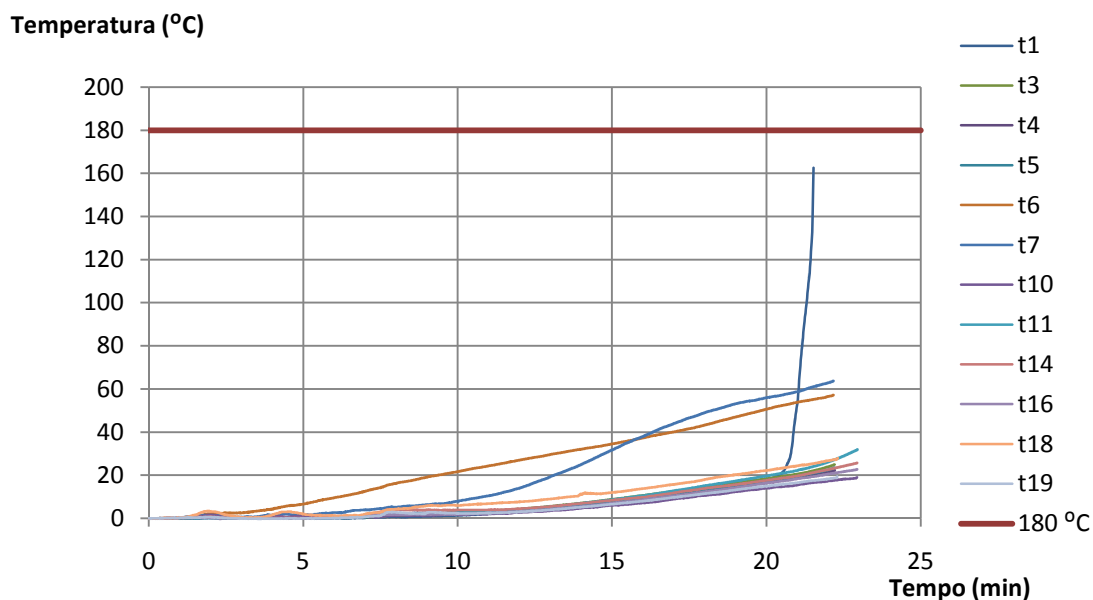


Figura 3-22 Aumento da temperatura nos termopares exteriores.

A temperatura mais alta foi registada pelo termopar T1 que se encontra no topo da porta A e pelo termopar T6 presente na ombreira da mesma porta. O termopar T7 que se encontrava na parede de alvenaria também registou um aumento significativo em comparação com o resto dos termopares.

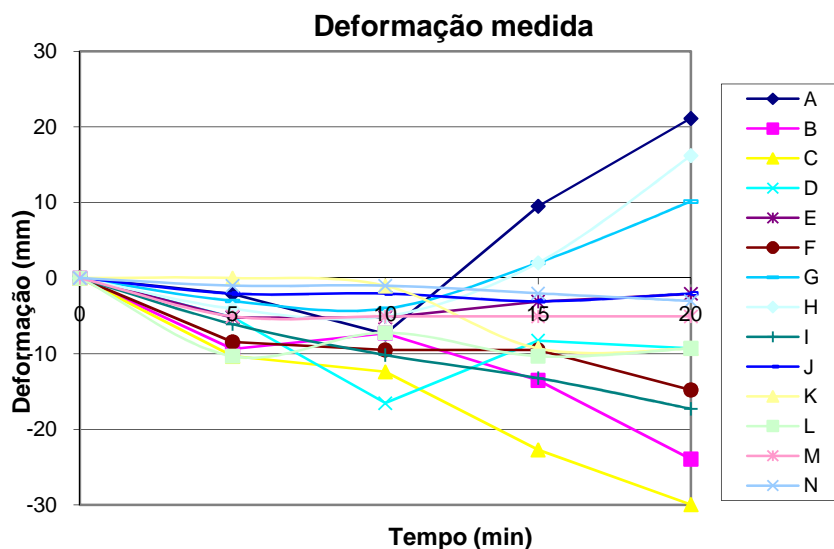


Figura 3-23 Evolução da deformação ao longo do ensaio.

Na Figura 3-23 relativamente à evolução da deformação das portas regista-se que o topo da porta A correspondente aos termopares A, B e C foi a que alcançou valores maiores, estes entre os 20 e 30 mm.

3.2.4.4. Conclusão

Apesar da presença de chama aos 7 minutos, registou-se um aumento de temperatura lento, só tendo o termopar T1 um aumento anormal devido à presença de chama perto deste. Comprova-se que em termos de comportamento ao fogo, apesar da reacção ao fogo ser má, devido à destruição rápida das portas, a condutividade térmica da madeira é menor do que a dos outros materiais ensaiados, pois a maior parte dos termopares registou um aumento de temperatura lento menor do que a registada na alvenaria e menor que a registada no ensaio relativo às portas de aço.

3.3. Considerações finais

O programa experimental envolveu a realização de alguns ensaios no LERF a elementos de compartimentação. Destes ensaios pode-se concluir que os comportamento das portas varia de maneira significativa conforme os materiais. As portas em aglomerado de madeira com resinas fenólicas comportam-se muito mal ao fogo. As portas de aço apresentaram uma resistência ao fogo considerável devido ao uso de fitas intumescentes e à presença de água nestas. Nas portas em madeira maciça a subida de temperaturas lenta sem o uso de nenhum material de protecção comprova o bom comportamento ao fogo da madeira.

4. MODELAÇÃO DE UMA PAREDE DE BLOCOS SOLO-CIMENTO E KRAFTTERRA SUJEITA AO FOGO

4.1. Introdução

Este capítulo é maioritariamente dedicado à descrição da análise numérica de comportamento ao fogo, de uma parede de tijolo solo-cimento e Kraftterra, e comparação com o ensaio experimental realizado no LERF em Julho de 2009 apresentado a seguir.

A análise numérica do comportamento ao fogo pode ser realizada através de programas de cálculo de elementos finitos. Os programas utilizados para efectuar o estudo numérico foram o GID e o SAFIR. O programa GID, desenvolvido pelo CIMNE (Centro Internacional de Métodos Numéricos em Engenharia de Barcelona, Espanha), utilizou-se para a obtenção da malha de elementos finitos e o programa SAFIR, desenvolvido na Universidade de Liège na Bélgica, utilizou-se para efectuar os estudos numéricos.

4.2. Ensaio de resistência ao fogo a uma parede solo-cimento e kraftterra

Neste subcapítulo apresenta-se em detalhe o ensaio realizado no dia 30/07/2009 (Vila Real, et al., 2009), com o intuito de efectuar a comparação com o estudo numérico feito à parede de solo-cimento e kraftterra.

4.2.1. Detalhes da amostra

Foi ensaiada uma parede realizada em blocos de kraftterra e de solo-cimento, com dimensões globais de 3100x3100 mm². A parede é constituída por 6 painéis com constituições diferentes:

- P1 painel realizado em kraftterra com reboco na face exposta;
- P2 painel realizado em kraftterra sem reboco;
- P3 painel realizado em kraftterra com reboco nas 2 faces;
- P4 painel realizado em solo-cimento com reboco na face exposta;
- P5 painel realizado em solo-cimento sem reboco;
- P6 painel realizado em solo-cimento com reboco nas 2 faces.

A Figura 4-1 representa a disposição dos 6 painéis que compõem a parede a ensaiar ao fogo, bem como o posicionamento dos termopares e pontos adotados para medição da deformação da parede.

Uma fiada de aperto, de aproximadamente 15 cm de altura, também foi realizada com blocos e argamassa de Kraftterra. Os blocos foram dispostos na diagonal sendo pressionados uns contra os outros para dar o aperto da parede no bastidor.

A instrumentação colocada foi a que se esquematiza na Figura 4-1, tendo sido realizada com 32 termopares, em que dois deles se situavam a 6 cm de profundidade dentro da parede, outros dois a 3 cm de profundidade e os restantes na face não exposta ao fogo. Foram medidas as deformações em 16 pontos da parede (de A a P).

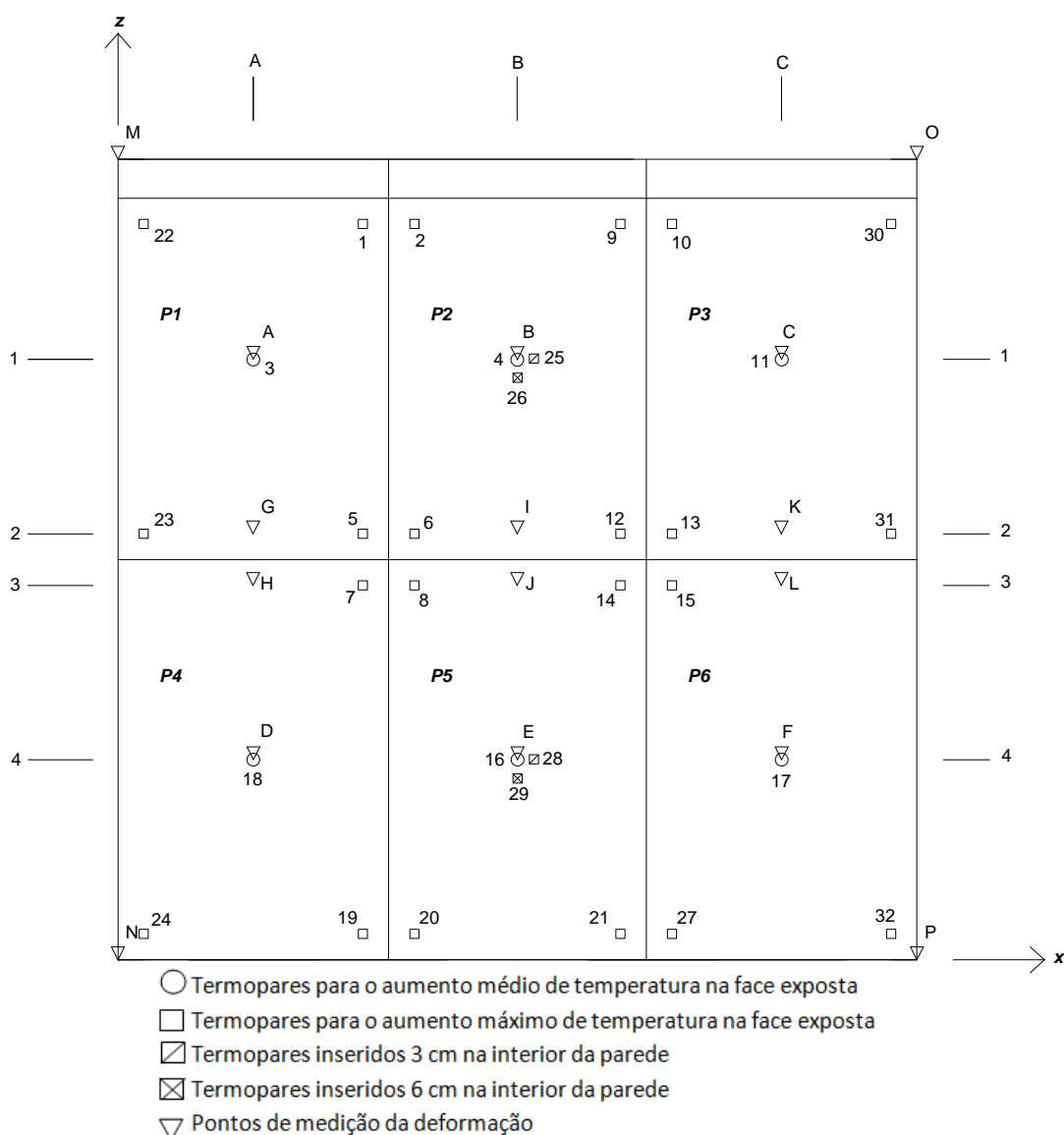


Figura 4-1 Esquema da amostra a ensaiar e distribuição de termopares (Vila Real, *et al.*, 2009).

A Figura 4-2 apresenta as duas faces da amostra de parede (exposta e não exposta) antes do ensaio.



Figura 4-2 Amostra antes do ensaio a)Face não exposta b)Face exposta (Vila Real, *et al.*, 2009).

4.2.2. Observações adicionais

Devido a avaria o termopar 28, localizado no centro do painel P5, não registou a temperatura durante todo o ensaio.

Durante toda a fase de aquecimento, e de uma forma uniforme, observou-se o aparecimento de humidade em diversas fissuras pré-existentes de retracção das argamassas, provocada pela evaporação da água/humidade existente no interior dos blocos e conseqüentemente pela condensação na face da parede não exposta ao fogo (ver Figura 4-3).



Figura 4-3 Face rebocada da parede não exposta ao fogo (Vila Real, *et al.*, 2009).

Após 1 hora e 53 minutos do início do ensaio observou-se a ocorrência de uma fissura vertical, na face não exposta ao fogo, a meio do painel P2 (como se pode observar na Figura 4-3).

O forno desligou-se ao fim de 2 horas, tendo-se prolongado a monitorização da variação de temperatura durante a fase de arrefecimento. A Figura 4-4 representa a parede, após o ensaio, nas suas faces não exposta e exposta ao fogo, respectivamente.



Figura 4-4 Amostra após o ensaio a)Face não exposta b)Face exposta (Vila Real, *et al.*, 2009).

4.2.3. Resultados obtidos

De seguida na Figura 4-5 é apresentada a evolução de temperaturas na face exterior da parede nos pontos centrais de cada das 6 placas, visto serem estes os relevantes para a comparação com a modelação numérica.

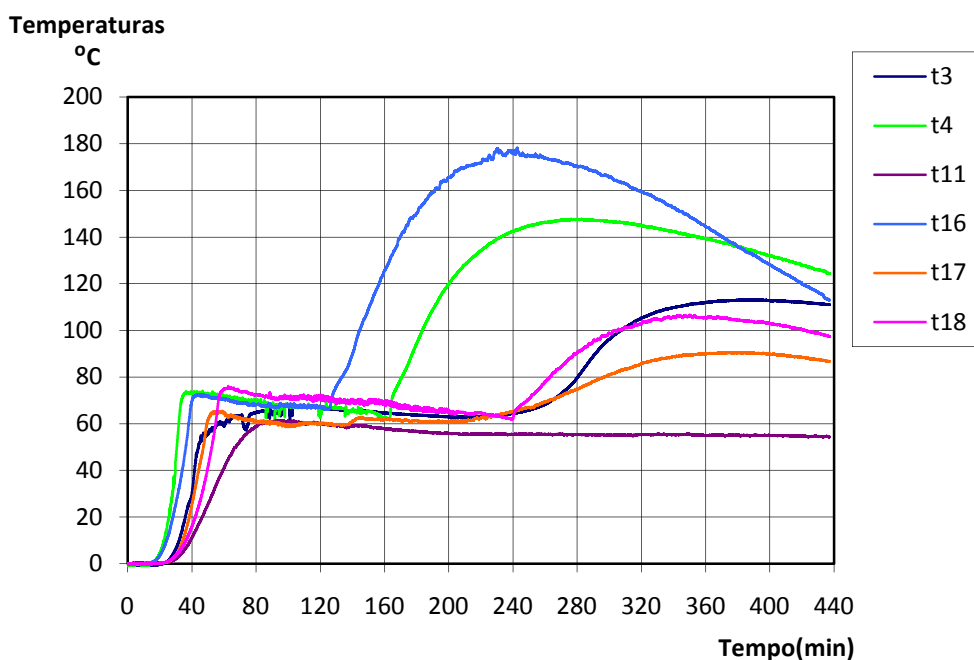


Figura 4-5 Evolução da temperatura no centro dos painéis (Vila Real, Lopes, *et al.*, 2009).

Devido a uma presença significativa de humidade, tanto no reboco com nos tijolos no ensaio, registou-se um patamar nos 100 °C com uma duração considerável entre 1 a 2 horas, este patamar durou mais nos painéis com reboco pois apresentam maior humidade.

Como se pode ver pelo gráfico da Figura 4-5, as piores temperaturas foram registadas nos termopares T4 e T16 correspondentes aos painéis P2 e P5, respectivamente, que não tinham reboco sendo mais alta no painel constituído por blocos de solo-cimento.

Nos termopares das faces com reboco num só lado, correspondente ao T3 e T18 regista-se uma subida mais rápida da temperatura a partir dos 240 minutos. O T18 correspondente à parede com blocos de solo-cimento sofre um aumento de temperaturas maior que o T3 até aos 320 minutos quando é ultrapassado por este.

O termopar T11 relativo à face P3, com reboco nos dois lados, apresenta um comportamento anormal não subindo a temperatura ao longo de todo o ensaio.

4.2.4. Conclusão

A parede apresentou um comportamento bom ao fogo, sendo o crescimento da temperatura nas faces não expostas lento. Conclui-se que, nas faces sem reboco, os blocos kraftterra

apresentam um comportamento ao fogo mais favorável, com uma subida de temperatura mais baixa que na face relativa aos blocos solo-cimento.

O reboco influencia significativamente o crescimento das temperaturas, visto as faces com reboco nos dois lados apresentarem temperaturas mais baixas.

4.3.Obtenção da malha pelo GID

4.3.1. Descrição geral

O programa GID é um programa que serve para a modelação geométrica e para a entrada de dados em diversos programas de simulação numérica. Foi desenvolvido pelo CIMNE, tendo em conta as necessidades do utilizador e a simplicidade, a velocidade, a eficácia e a exactidão que o utilizador exige na preparação dos dados de entrada para os programas de simulação numérica.

4.3.2. Descrição da parede

A parede modelada geometricamente no programa GID apresenta as dimensões de 3100 x 3100 mm² e 105 mm de largura. A zona rebocada apresenta as medidas de 1060 mm de largura para facilitar a concepção da malha. A parede é constituída até aos 1500 mm de altura por tijolo em solo-cimento, acima dos 1500 mm é constituída por tijolo Kraftterra. Os últimos 100 mm são constituídos pelo mesmo material das juntas.

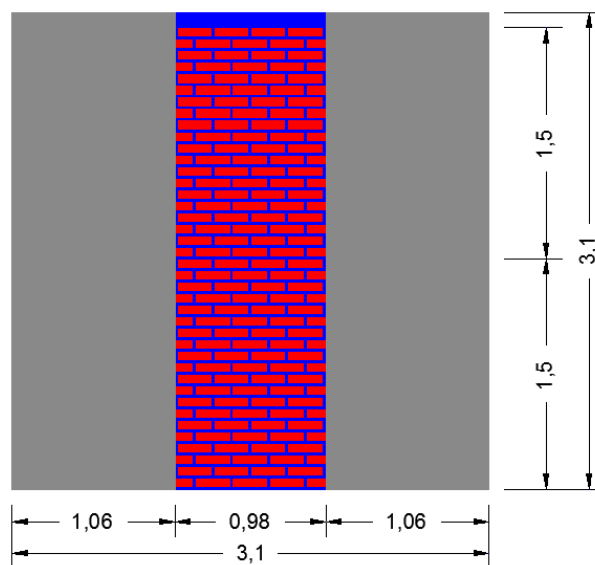


Figura 4-6 Dimensões da parede (medidas em metros)

4.3.3. Modelo geométrico da parede pelo GID

Foram modeladas geometricamente no GID duas paredes, uma representada por menos volumes (A) e outra com uma maior pormenorização (B), logo mais volumes. Estas são apresentadas a seguir.

4.3.3.1. Modelo geométrico A da parede

Tal como no ensaio prático a parede foi dividida em 6 painéis diferentes:

- P1 painel realizado em kraftterra com reboco na face exposta;
- P2 painel realizado em kraftterra sem reboco;
- P3 painel realizado em kraftterra com reboco nas duas faces;
- P4 painel realizado em solo-cimento com reboco na face exposta;
- P5 painel realizado em solo-cimento sem reboco;
- P6 painel realizado em solo-cimento com reboco nas duas faces;

Os painéis inferiores têm 1,5 metros de altura e os superiores 1,6 metros.

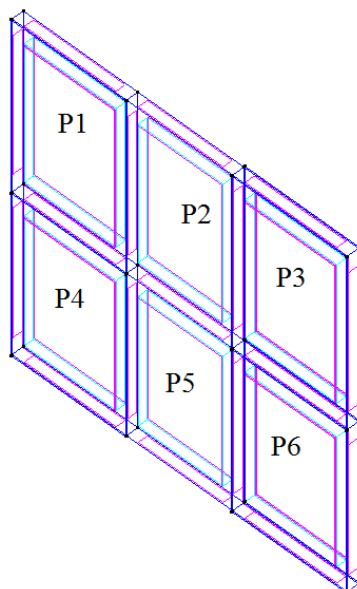


Figura 4-7 Modelo geométrico A no GID

4.3.3.2. Modelo geométrico B da parede

O modelo geométrico B apresentado na Figura 4-8 encontra-se também dividida em 6 painéis iguais aos do modelo A. A diferença é que os painéis superiores têm a mesma

altura dos de baixo, sendo este modelo constituído por uma parcela superior de junta com 10 cm de altura. Além disto apresenta um maior número de volumes e diferenciação de materiais. Apresenta juntas que são constituídas por diferentes valores relativamente ao comportamento térmico conforme o painel é superior ou inferior.

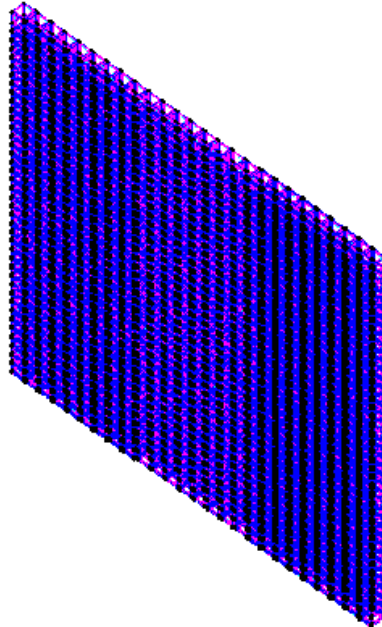


Figura 4-8 Modelo geométrico B no GID

4.3.4. Malha de elementos finitos pelo GID

Gerar uma malha é um processo realizado através da definição da geometria. As condições de apoio e de carregamento, bem como os materiais atribuídos à geometria podem ser transferidos aos nós e aos elementos da malha.

O programa GID tem uma série de opções para a geração de malhas, podendo ser malhas estruturais, malhas semi-estruturais e malhas não estruturais.

A obtenção da malha pode ser realizada depois de todos os dados e configurações estarem atribuídos à geometria. O GID permite a geração de malhas de grandes dimensões de uma maneira fácil e eficiente e tem a capacidade de se poder visualizar várias malhas antes de seleccionar a desejada.

Para este trabalho foram realizadas 4 malhas diferentes para a parede; estas são apresentadas nas figuras seguintes.

4.3.4.1. Malha 1,2 e 3 de elementos finitos do modelo geométrico A

A malha apresentada na Figura 4-9 é a malha mais simples das quatro estudadas. Os painéis são coincidentes com a malha. Em termos de espessura da parede a zona do reboco não se encontra dividido, mas a zona do tijolo está dividido em 3 secções pela malha.

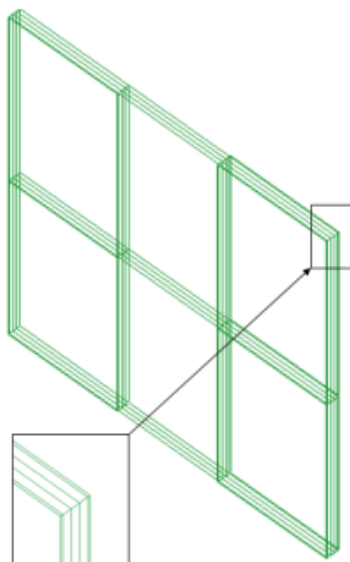


Figura 4-9 Malha 1 de elementos finitos da parede

A malha seguinte é mais detalhada dividindo os painéis em 4 partes, sendo que a malha transversal divide a espessura da zona do tijolo em 5 partes.

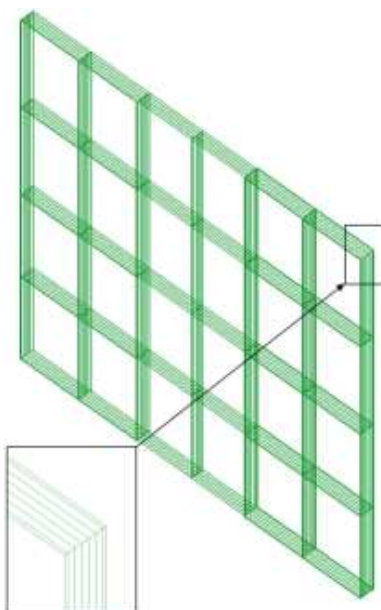


Figura 4-10 Malha 2 de elementos finitos da parede

Relativamente ao modelo geométrico A, a malha da Figura 4-11 é a que apresenta maior complexidade. A diferença da malha 3 para a malha 2 reside numa maior divisão dos painéis.

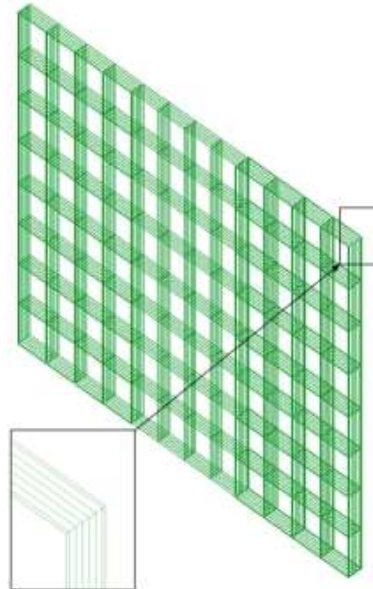
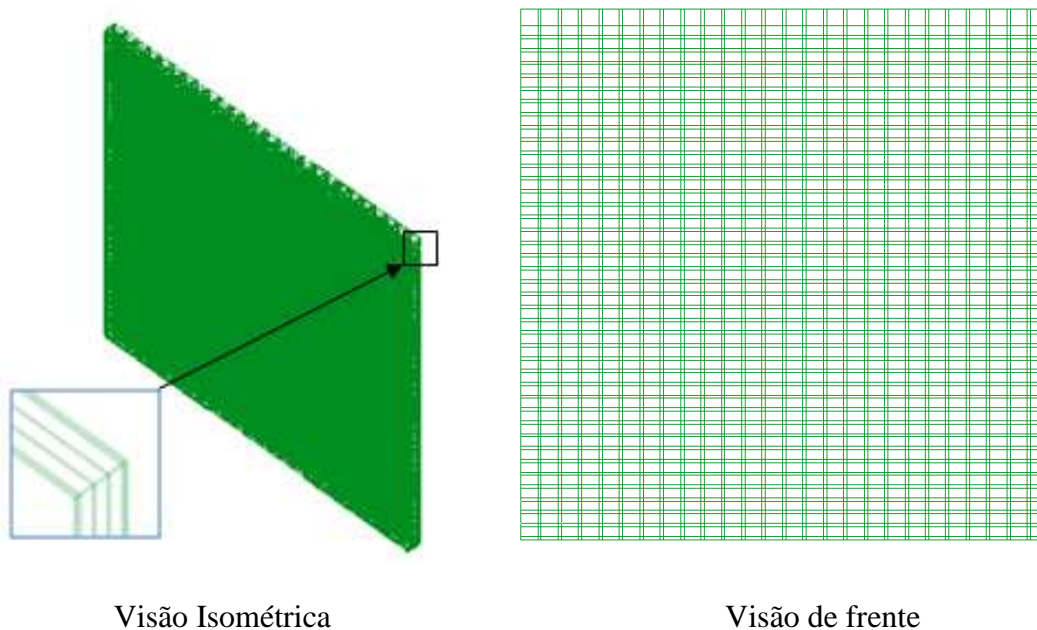


Figura 4-11 Malha 3 de elementos finitos da parede

4.3.4.2. Malha 4 de elementos finitos do modelo geométrico B

Na Figura 4-12 apresenta-se a malha 4 relativa ao modelo geométrico B. Esta apresenta uma complexidade considerável sendo coincidente com os tijolos e juntas.



Visão Isométrica

Visão de frente

Figura 4-12 Visão de diferentes perspectivas da malha 4

4.4. Propriedades térmicas dos materiais usados na modelação numérica

Neste subcapítulo será explicada a obtenção dos valores térmicos, que são necessários saber para os materiais usados na realização da parede. Alguns dos valores foram obtidos através da análise dos resultados do ensaio experimental, outros tendo por base dados respectivos. Por fim, os valores finais serão apresentados na Tabela 4-4.

4.4.1. Valores retirados do RCCTE

Para efeito da modelação numérica alguns valores usados para determinadas propriedades térmicas foram retirados do RCCTE. O coeficiente de transmissão de calor por convecção usado na superfície quente (h_{hot}) foi de $25 \text{ W/m}^2 \text{ K}$. Para o coeficiente de transmissão de calor por convecção na superfície fria (h_{cold}) foi usado o valor de $7,7 \text{ W/m}^2 \text{ K}$, sendo estes valores inversamente proporcionais às resistências térmicas superficiais presentes na Tabela 4-1 do RCCTE e obtidas pelas seguintes equações.

$$h_{hot} = \frac{1}{R_{se}} \quad (4.1)$$

$$h_{cold} = \frac{1}{R_{si}} \quad (4.2)$$

Tabela 4-1 Resistências térmicas superficiais (Diário da República Portuguesa, 2006)

Sentido do fluxo de calor	Resistência térmica superficial [(m ² °C)/W]	
	Exterior R _{se}	Interior R _{si}
Horizontal ⁽¹⁾	0,04	0,13
Vertical ⁽²⁾	ascendente	0,04
	descendente	0,04
		0,10
		0,17

1- Aplicável a paredes (+/- 30° com a vertical)

2- Aplicável a coberturas e pavimentos (+/- 60° com a horizontal)

Para o cálculo do coeficiente de condutividade térmica, λ , usou-se a fórmula clássica da equação de fluxo unidireccional em regime permanente, onde é considerada a resistência térmica superficial interior, $R_{si}=0,13$ como adoptado no RCCTE.

$$\lambda = e \times \left(\frac{1}{R_{si}} \right) \times \frac{(\theta_{int} - \theta_{si})}{(\theta_{si} - \theta_{parede})} \quad (4.3)$$

Em que:

R_{si} – Resistência térmica superficial interior ($m^2 \cdot ^\circ W$);

e – Espessura do elemento (m);

θ_{int} – Temperatura interior ($^\circ C$);

θ_{si} – Temperatura superfície interior ($^\circ C$);

θ_{parede} – Temperatura no interior da parede ($^\circ C$).

Para o θ_{int} considerou-se a temperatura no laboratório que manteve um valor constante durante o ensaio experimental; para o θ_{si} considerou-se a temperatura registada nos termopares exteriores nas respectivas faces; relativamente ao θ_{parede} usou-se o valor do termopar inserido na parede a 3 ou 6 cm conforme a face estudada. Estas dimensões por sua vez foram usadas para a espessura do elemento. O valor da condutividade térmica retirado corresponde a uma fase de estabilização das temperaturas dentro do forno.

4.4.2. Valores retirados de bases de dados

A obtenção dos valores do calor específico e da emissividade requerem um estudo aprofundado da constituição dos blocos de solo-cimento e Kraftterra. Devido ao número de diferentes materiais presentes nos blocos estimou-se os respectivos valores através do estudo de cada um destes. Na Tabela 4-2 são apresentadas as propriedades térmicas de alguns materiais de construção.

Tabela 4-2 Propriedades térmicas de materiais de construção mais comuns (Incropera & De Witt, 1990).

Descrição/composição	Temperatura (K)	Massa volúmica, ρ (kg/m ³)	Condutividade Térmica λ (W/m·K)	Calor Específico, c_p (J/kg·K)
Areia	300	1515	0,27	800
Argamassa de cimento	300	1920	0,72	780
Argila	300	1460	1,3	880
Betão	300	2300	1,4	880
Solo	300	2050	0,52	1840

Como se pode ver os valores do calor específico variam de maneira significativa entre os diferentes materiais. Assim, através do estudo da percentagem de cada material presente nos blocos, obteve-se um valor aproximado dos 1000 J/kg·K, valor foi usado no estudo inicial.

Em relação a emissividade são apresentados também valores para alguns materiais.

Tabela 4-3 Emissividade de alguns materiais (Incropera & De Witt, 1990).

Descrição/composição	Temperatura (K)	Emissividade ϵ
Água	300	0,96
Areia	300	0,90
Betão	300	0,88-0,93
Solo	300	0,93-0,96

Para a análise inicial resolveu-se considerar o valor de 0,85 para todos os materiais constituintes da parede.

4.4.3. Propriedades térmicas

Os valores usados para as propriedades térmicas são apresentados na Tabela 4-4.

Tabela 4-4 Propriedades térmicas dos materiais.

Face P1, P2 e P3 (junta superior, reboco superior, blocos kraftterra)							
T (°C)	λ (W/m K)	Cp (J/kg·K)	ρ (kg/m ³)	Teor de água (kg/m ³)	h_{hot} (W/m ² K)	h_{cold} (W/m ² K)	ϵ
20,00	0,60	1000,00	1409,21	28,90	25,00	7,70	0,85
100,00	0,60	1000,00	1383,08	28,90	25,00	7,70	0,85
200,00	0,60	1000,00	1364,11	28,90	25,00	7,70	0,85
1200,00	0,60	1000,00	1268,59	28,90	25,00	7,70	0,85
Face P4, P5 e P6 (junta inferior, reboco inferior, blocos solo-cimento)							
T (°C)	λ (W/m K)	Cp (J/kg·K)	ρ (kg/m ³)	Teor de água (kg/m ³)	h_{hot} (W/m ² K)	h_{cold} (W/m ² K)	ϵ
20,00	0,60	1000,00	1647,71	15,28	25,00	7,70	0,85
100,00	0,60	1000,00	1633,28	15,28	25,00	7,70	0,85
200,00	0,60	1000,00	1628,14	15,28	25,00	7,70	0,85
1200,00	0,60	1000,00	1611,60	15,28	25,00	7,70	0,85

4.5. Modelação numérica no SAFIR

4.5.1. Descrição geral

O programa SAFIR é um programa de elementos finitos usado principalmente em simulações numéricas. Foi desenvolvido pela Universidade de Liège especialmente para o estudo de estruturas em caso de incêndio. É utilizado para a análise de estruturas à temperatura ambiente e a temperaturas elevadas e em estruturas planas e tridimensionais.

4.5.2. Modelo numérico no SAFIR

4.5.2.1. Modelos numéricos da parede com a malha 1, 2 e 3

Na Figura 4-13 apresentam-se os diferentes modelos da parede conforme a malha usada. Como se pode ver, a parede é constituída basicamente pelos tijolos e o reboco, tal como foi dito anteriormente.

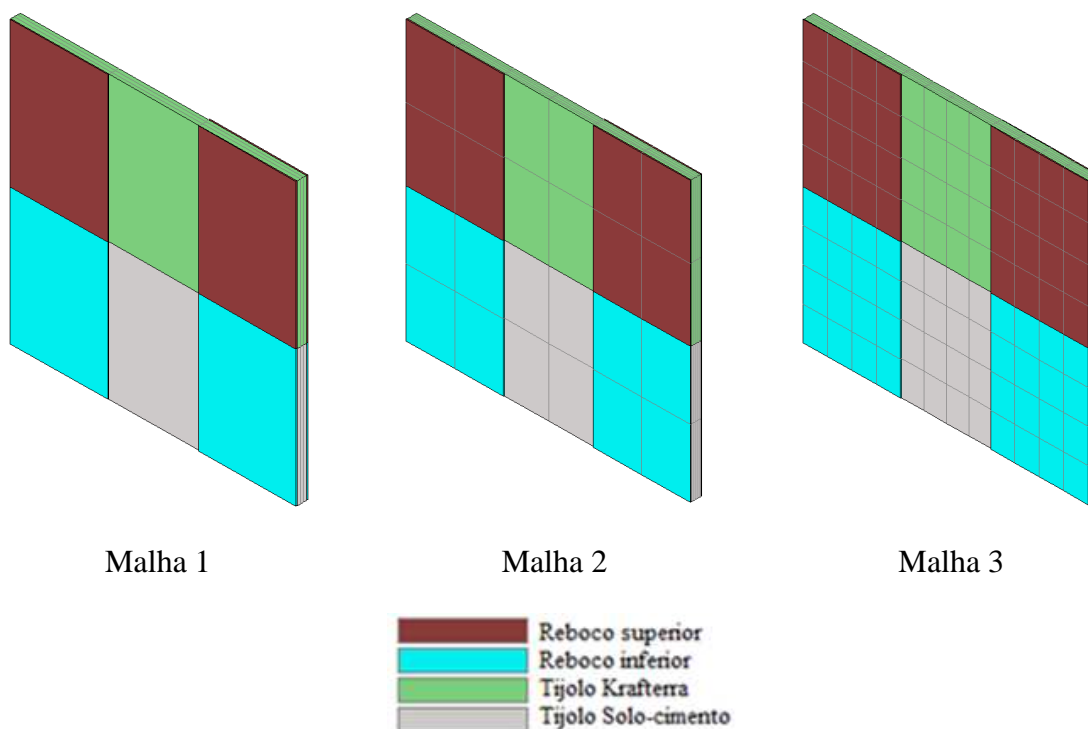


Figura 4-13 Modelos numéricos da parede com a malha 1,2 e 3.

Relativamente á malha 4, a diferenciação de materiais é maior como se regista na Figura 4-14. Apesar desta maior diferenciação, o material relativamente às juntas, reboco e tijolo nas faces superiores acabou por ser considerado o mesmo, como foi dito anteriormente, logo tendo os mesmos valores térmicos, só se diferenciando das 3 faces inferiores.

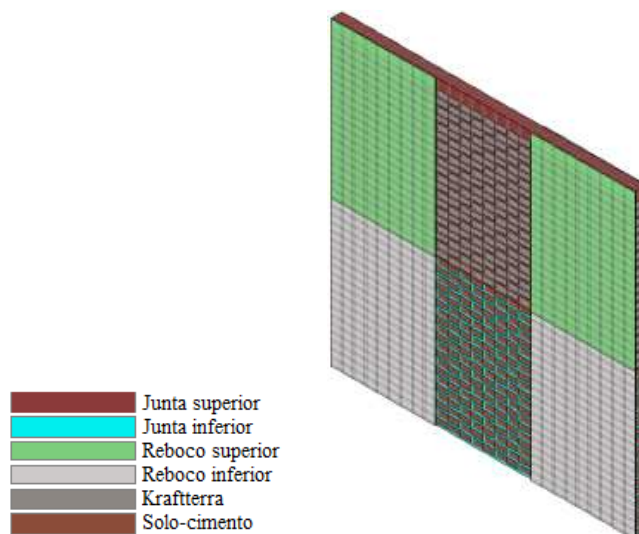


Figura 4-14 Modelo numérico da parede com a malha 4.

4.5.3. Curva de aquecimento usada para a modelação numérica

Para a simulação numérica de incêndio na parede é necessário definir a curva de aquecimento, tal como no ensaio experimental. Para este trabalho, na face sujeita ao fogo, usou-se a curva resultante do ensaio experimental (hot.fc). Na face não exposta usou-se a curva F20 que corresponde à temperatura ambiente.

Durante as duas primeiras horas do ensaio experimental descrito no capítulo 4.2., o valor da temperatura média de todos os termopares activos no interior do forno foi imposto pela curva ISO 834. Após as duas horas, o forno foi desligado, mas mantendo todos os sensores ligados para medir as temperaturas durante o arrefecimento. A curva resultante é apresentada na figura seguinte e vai ser usada para a modelação numérica, sendo designada como a curva hot.fc.

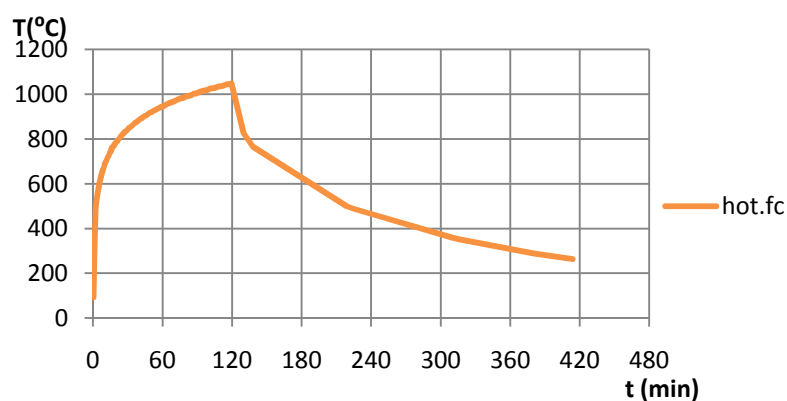


Figura 4-15 Gráfico relativo à curva hot.fc.

Estas duas curvas vão ser usadas respectivamente nas duas faces opostas da parede como se mostra na Figura 4-16.

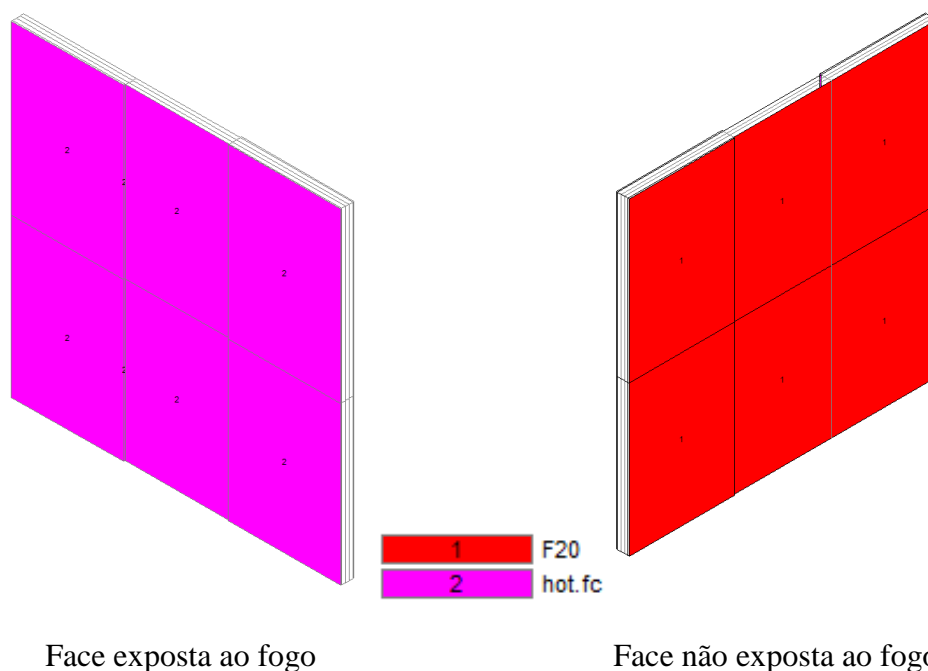


Figura 4-16 Faces da parede sujeitas às curvas de aquecimento.

4.5.4. Resultados e análise da modelação numérica

No programa Safir o comportamento da parede ao fogo foi testado por 6,9 horas, o mesmo tempo do ensaio experimental, de 60 em 60 segundos. As temperaturas ao longo do tempo podem ser obtidas por diferentes cores, correspondentes a diferentes temperaturas ou em gráficos que registam estas ao longo do ensaio em vários nós correspondentes à intersecção da malha.

A distribuição de temperaturas é apresentada nas 3 fases do ensaio delineadas pelo gráfico da Figura 4-15:

- Fase inicial – fase que corresponde ao início do ensaio aos 2 minutos;
- Fase de aquecimento – fase correspondente ao primeiros 120 minutos de ensaio, onde a temperatura na face exposta atinge o máximo;
- Fase de arrefecimento – corresponde à fase final do ensaio, onde a temperatura decresce consideravelmente até aos 414 minutos e indica o fim da monitorização do ensaio experimental.

4.5.4.1. Resultados gráficos das temperaturas nas diferentes malhas

No programa Safir as temperaturas podem ser obtidas de uma maneira precisa por gráficos através da escolha de pontos onde queremos estudar a evolução da temperatura; estes pontos encontram-se na intersecção das linhas das diferentes malhas. Na Figura 4-17 são apresentados os pontos escolhidos para estudo das temperaturas.

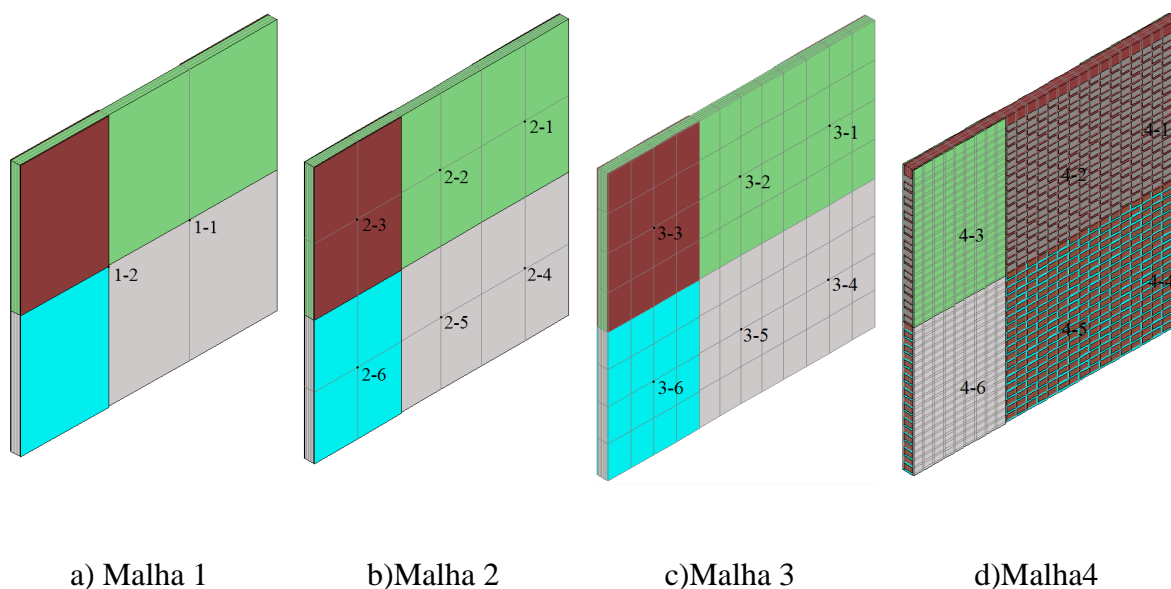


Figura 4-17 Nós estudados na face não exposta das 4 malhas.

Na malha mais simples, visto que esta não se intersectava no meio de cada uma das 6 faces, foram retirados os resultados relativos a dois nós da intersecção das várias faces, como é apresentado na Figura 4-18.

A seguir são apresentados os gráficos relativos às temperaturas medidas nos pontos considerados anteriormente.

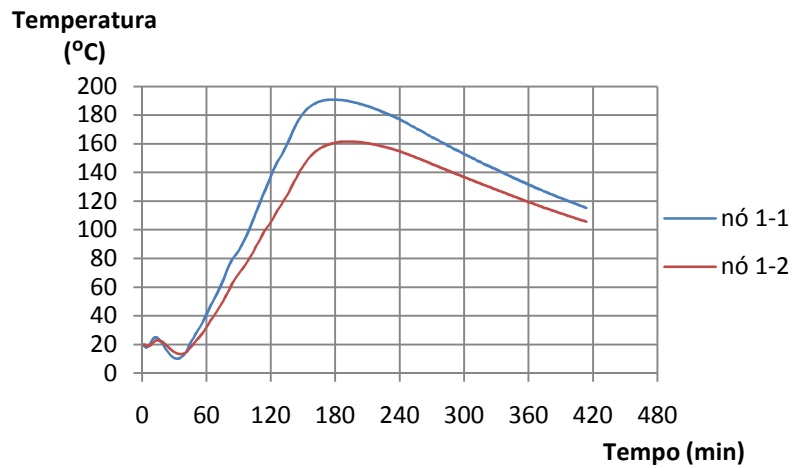


Figura 4-18 Evolução da temperatura na malha 1.

A pior temperatura foi registada no nó 1-1, entre as faces com reboco no exterior (P1 e P4) e as faces sem reboco (P2 e P5). Visto esta malha não apresentar pontos de medida centrais nas 6 faces, de seguida, só se considera e compara em cada gráfico, a evolução de temperaturas nas 3 malhas mais complexas.

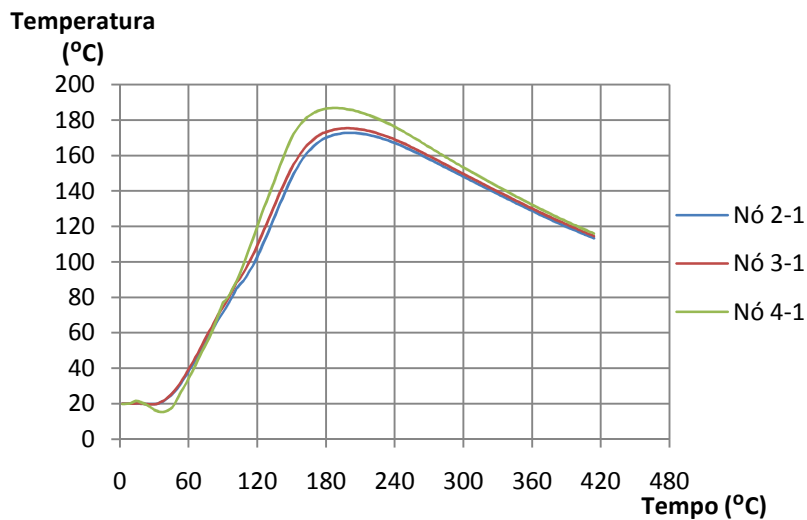


Figura 4-19 Evolução da temperatura na face P1.

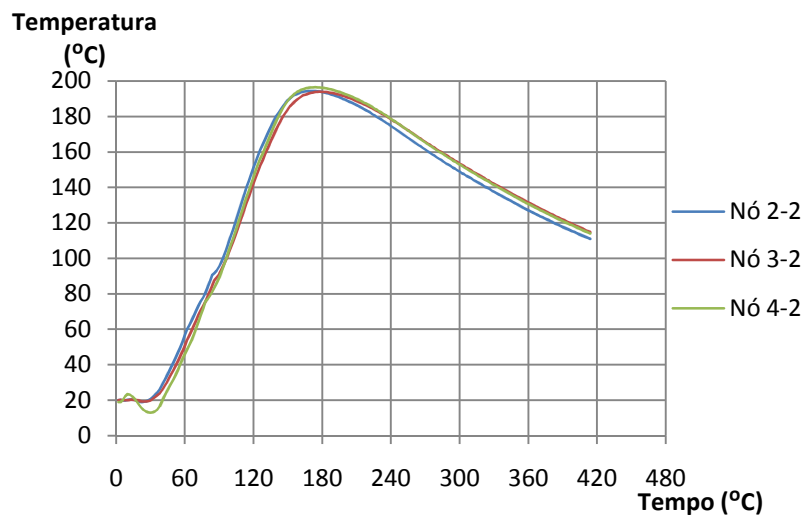


Figura 4-20 Evolução da temperatura na face P2.

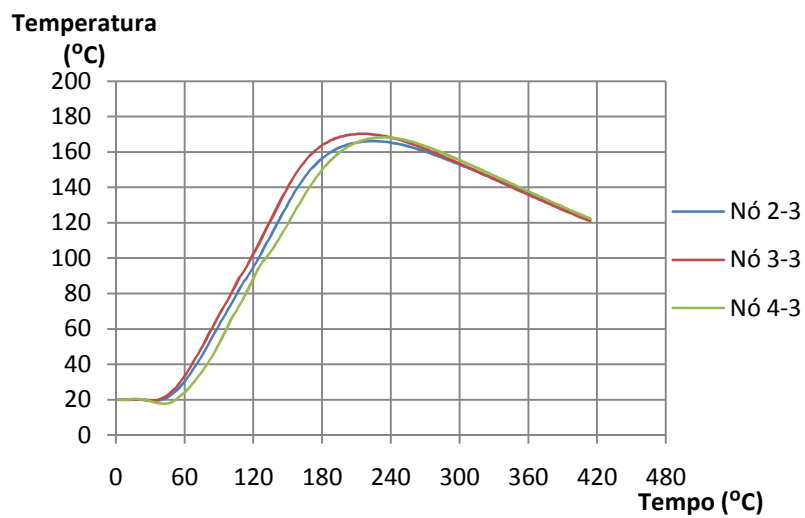


Figura 4-21 Evolução da temperatura na face P3.

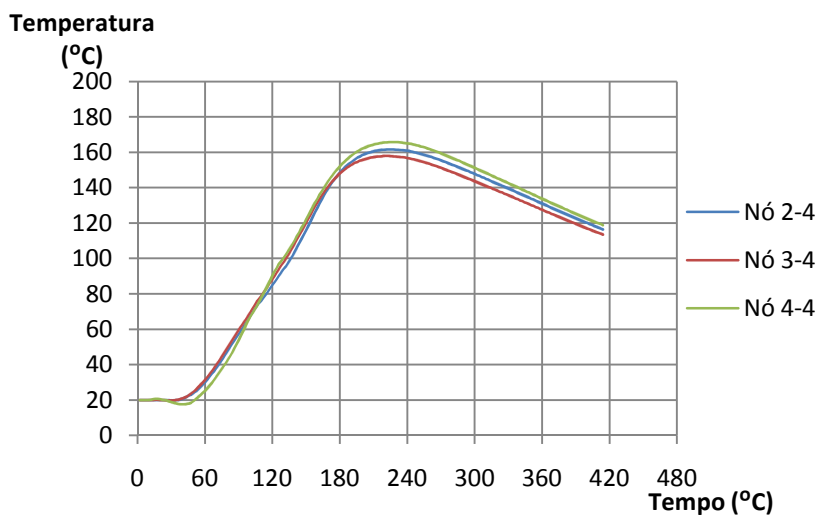


Figura 4-22 Evolução da temperatura na face P4.

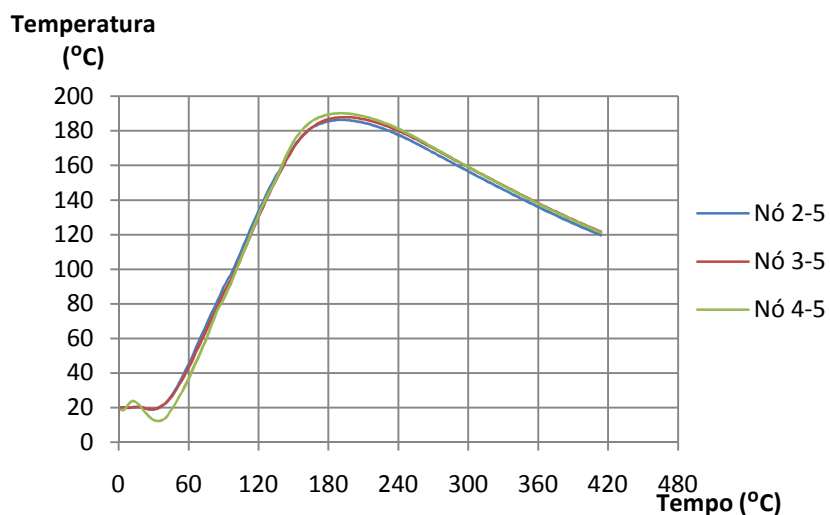


Figura 4-23 Evolução da temperatura na face P5.

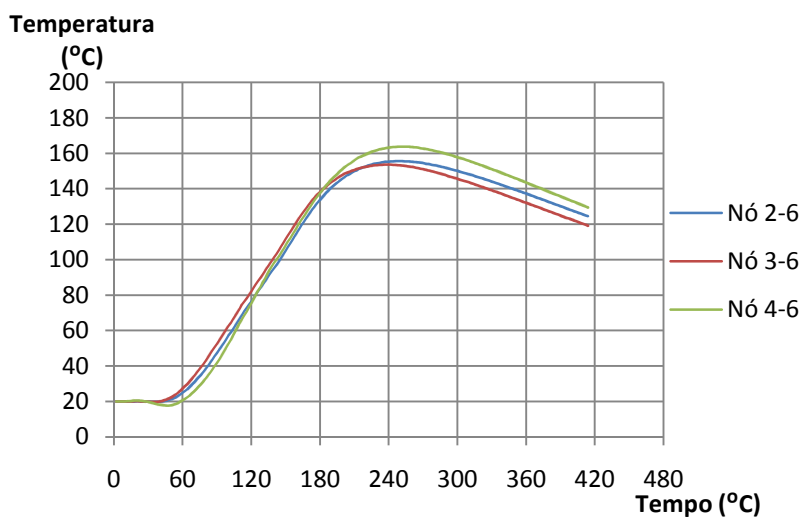


Figura 4-24 Evolução da temperatura na face P6.

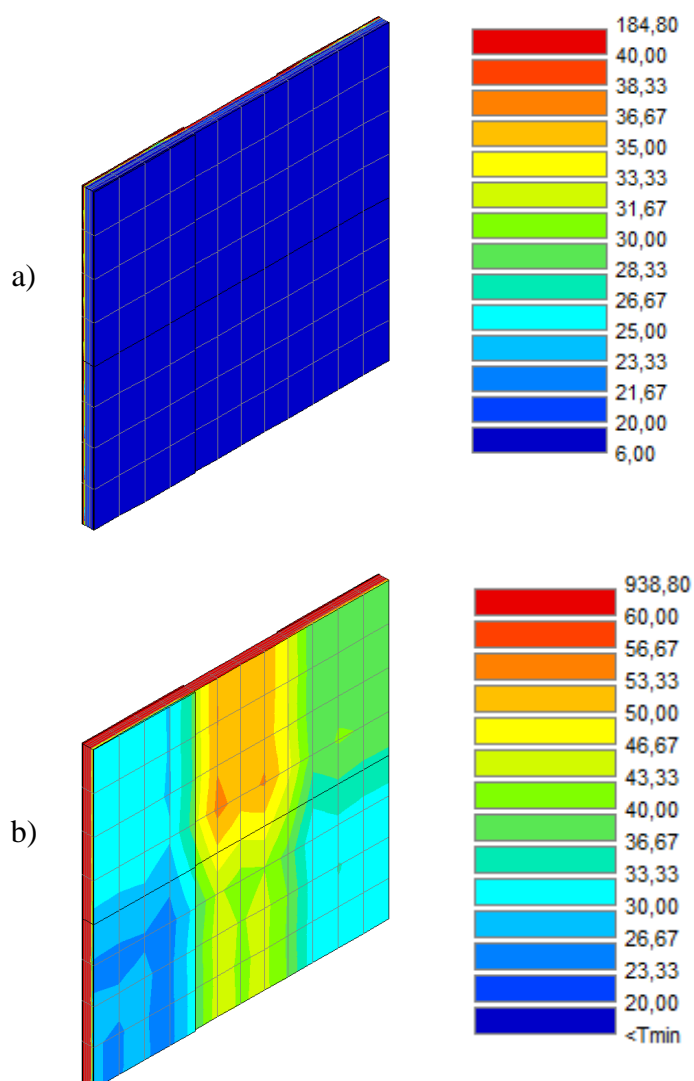
Pela análise dos gráficos das Figura 4-19 à Figura 4-24 verifica-se uma semelhança entre as temperaturas das várias malhas, havendo uma diferença notável na temperatura da malha 4 em relação às outras na face 1 e 6. A temperatura máxima foi alcançada mais rapidamente na malha 2, e as temperaturas máximas foram registadas na parede sem reboco dos dois lados, relativas à face P2 e P5.

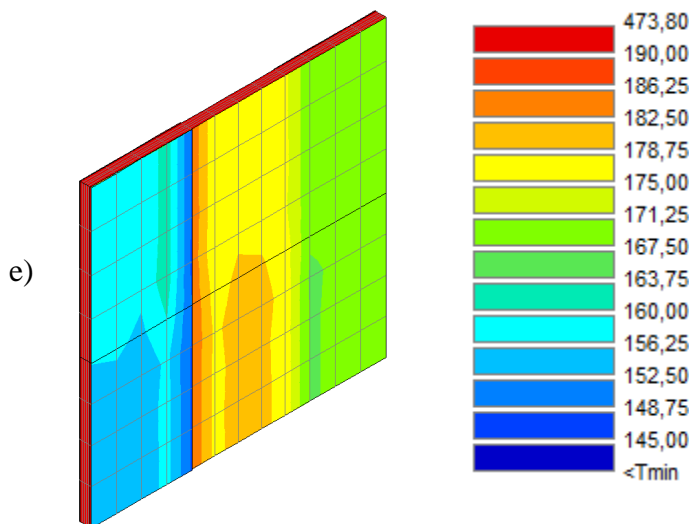
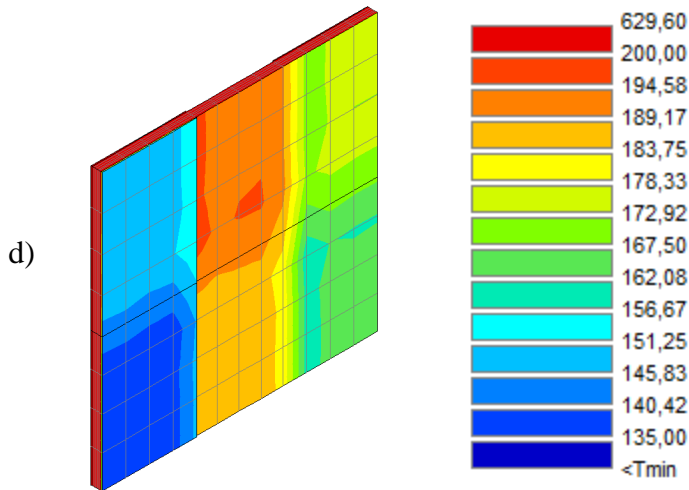
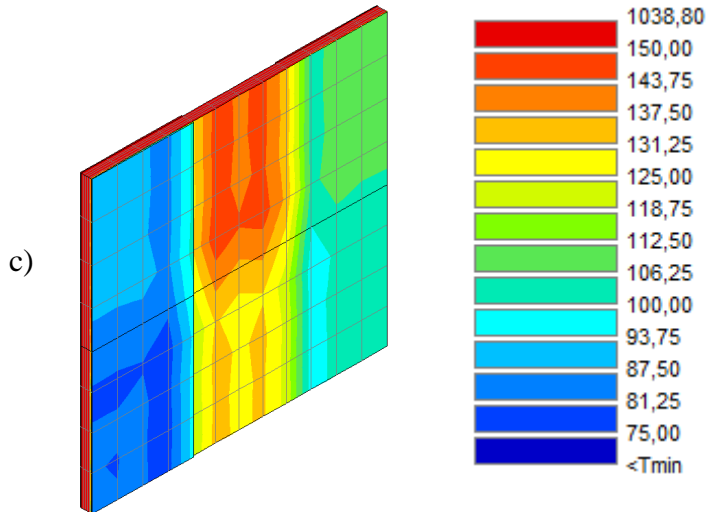
O crescimento da temperatura é constante, não havendo a presença de um patamar previsto na fase dos 100 °C.

4.5.4.2. Distribuição das temperaturas da parede com a malha 3

No programa Safir as temperaturas ao longo do tempo podem ser obtidas por diferentes cores, correspondentes a diferentes temperaturas ou em gráficos que registam estas ao longo do ensaio em vários nós correspondentes à intersecção da malha usada. Tendo como exemplo a Figura 4-25 apresenta-se a distribuição de temperaturas na parede com a malha 3 ao longo do ensaio.

A distribuição de temperaturas é apresentada para seis durações diferentes dentro das três fases do ensaio descritas anteriormente:





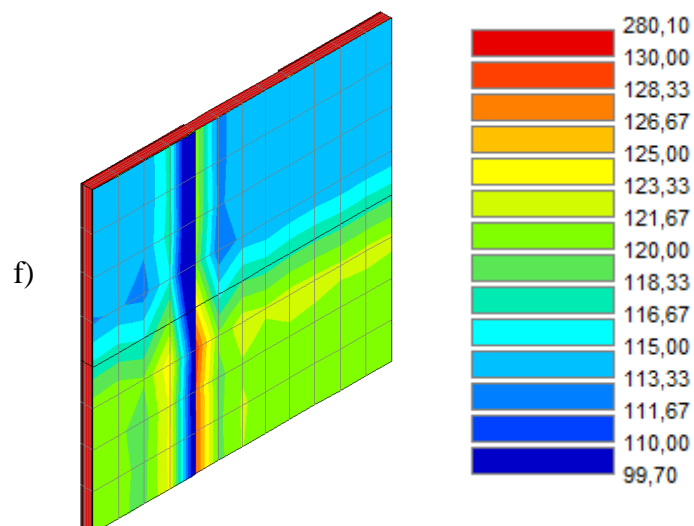


Figura 4-25 Distribuição de temperaturas na face não exposta da parede com a malha 3 aos a)2 b)60 e c)120 d)180 e)240 f)414 minutos.

Através deste modo de visualização, pode-se analisar em termos qualitativos a progressão das temperaturas ao longo da amostra.

Aos 2 minutos, como seria de esperar, a temperatura apresenta um valor constante de 20 °C ao longo de todas as faces, correspondendo à temperatura ambiente pois o ensaio encontra-se numa fase inicial.

Aos 60 minutos as temperaturas mais altas encontram-se nas faces sem reboco, sendo a temperatura máxima registada nos blocos Kraftterra por volta dos 55 °C. As temperaturas mais baixas encontram-se nas faces com reboco dos dois lados, mais exactamente, na face correspondente a blocos solo-cimento, com valores próximos dos 25°C.

Aos 120 minutos a distribuição de temperaturas é similar com a dos 60 minutos, com a excepção de a temperatura máxima englobar uma percentagem maior de superfície da face de blocos Kraftterra, sem reboco. Esta tem um valor aproximado de 150 °C. A temperatura mínima anda à volta dos 75°C.

As temperaturas aos 180 minutos atingem o valor máximo registado no ensaio. A face sem reboco continua a registar as temperaturas mais altas, mas o máximo é alcançado também na intersecção da face sem reboco e com reboco nos dois lados. A temperatura máxima ronda os 195 °C e a mínima os 135

Aos 240 minutos, já durante a fase de arrefecimento, regista-se uma diminuição mais rápida da temperatura na face sem reboco correspondente aos blocos Kraftterra, apesar de esta ter registado os valores mais altos. Assim, as temperaturas mais altas são registadas na face com blocos solo-cimento e sem reboco e na intersecção das faces sem reboco e com reboco nos dois lados com valor aproximado dos 190 °C. As temperaturas mínimas encontram-se na mesma intersecção no reboco, com valores à volta dos 145 °C.

Aos 414 minutos, no fim da monitorização de ensaio, as temperaturas já decresceram consideravelmente na face exposta. As faces inferiores relativas aos blocos de solo-cimento apresentam temperaturas mais altas com um valor máximo aproximado dos 130 °C, presentes numa pequena percentagem da face de blocos solo-cimento perto da intersecção com a face com reboco nos dois lados. A temperatura mínima é registada ao longo de toda a intersecção da face com reboco com as faces sem reboco com um valor a rondar os 100 °C.

4.5.1. Calibração do modelo numérico

Como se pode analisar pelos materiais já apresentados anteriormente neste trabalho, certas propriedades térmicas alteram-se com o aumento da temperatura, tais como, o calor específico e a condutividade. A presença de água conduz a um patamar que, com a evolução da temperatura, desaparece, sendo que esta mudança de fase não é fácil de modelar a 100%.

Como se pode ver pelos valores das propriedades térmicas usados para a modelação, estes consideraram-se constantes ao longo do tempo quando sujeitos a diferentes temperaturas, visto não haver dados suficientes para alterá-los. Assim, neste subcapítulo tenta-se proceder a uma calibração das propriedades térmicas, para melhor relação com o resultado experimental.

Visto que as diferentes malhas usadas não alteram significativamente os resultados de temperaturas obtidos, considerou-se usar a malha 3 para esta calibração. Estudou-se o ponto localizado no centro da face P2 e da face P5, relativa aos blocos Kraftterra e blocos solo-cimento sem a presença do reboco, pois este no ensaio experimental sofreu fissuração e descolamento dificultando a obtenção de resultados similares com a modelação numérica

4.5.1.1. Calibração da face de blocos Kraftterra (P2)

A evolução de temperaturas da curva 3-2, relativamente à modelação numérica da face de blocos Kraftterra, apresentou diferenças significativas com a temperatura lida no ensaio experimental pelo termopar t4, presente na face P2. Assim, procedeu-se a uma tentativa de calibração para alcançar valores mais próximos, sendo esta feita com o uso de conhecimentos teóricos de outros materiais. De seguida, na Figura 4-26 e Figura 4-27 são expostas as alterações efectuadas às propriedades térmica dos blocos Kraftterra e das juntas, estas que são constituídas pelo mesmo material.

Face P2 (junta superior, blocos kraftterra)

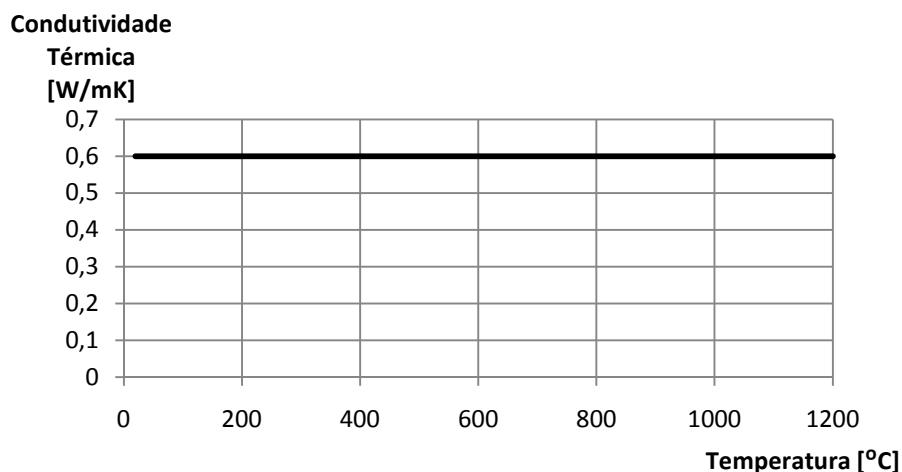


Figura 4-26 Valores da condutividade térmica usados na 1ª calibração.

Face P2 (junta superior, blocos kraftterra)

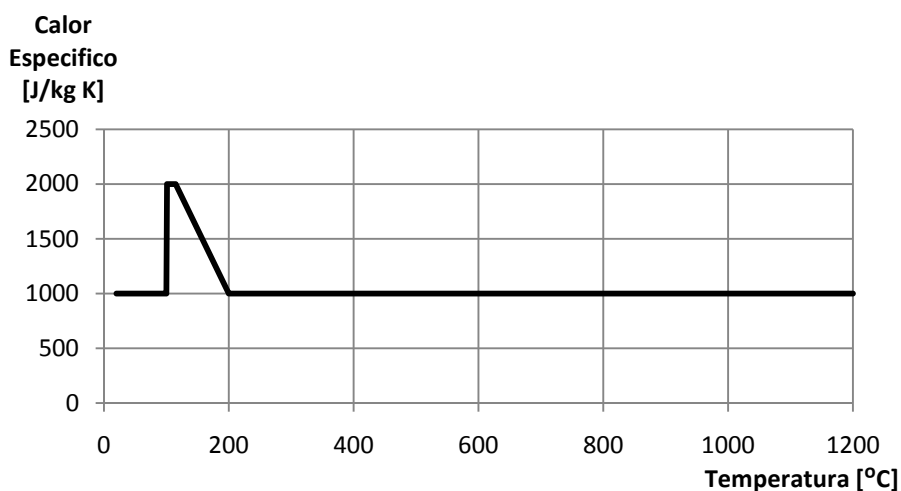


Figura 4-27 Valores de calor específico usados na 1ª calibração.

A calibração consistiu em inserir duas novas linhas relativas às temperaturas 101 °C e 115 °C, respectivamente, para tentar simular o calor específico relativo ao betão apresentado na Figura 2-8, na tentativa de obtenção de um patamar aos 100 °C.

Na Figura 4-28 é apresentada a curva de temperaturas obtida pela modificação do calor específico. Como se pode observar, houve uma diminuição no crescimento das temperaturas na fase inicial, mas não houve uma alteração significativa de maneira a ficar mais parecida com a temperatura no termopar t4, relativa ao ensaio experimental.

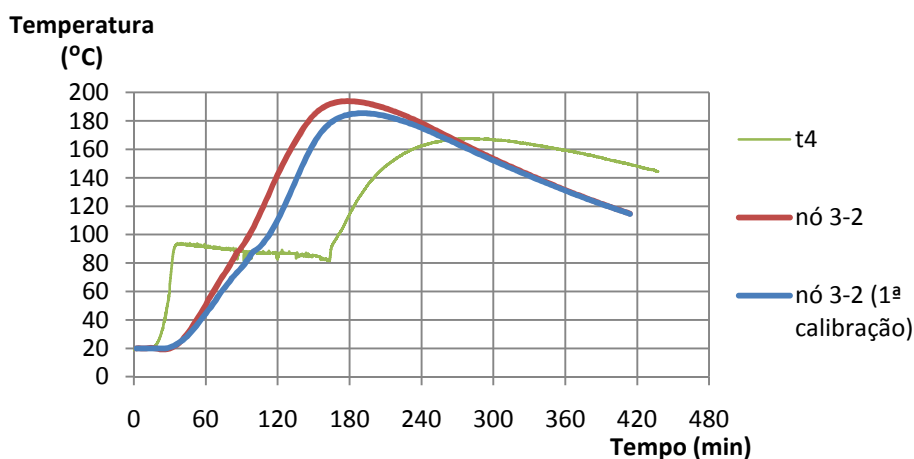


Figura 4-28 Comparação entre a evolução da temperatura no termopar t4 e 1ª calibração.

De seguida, para tentar criar o crescimento abrupto de temperaturas na fase inicial presente na curva t4, procedeu-se de maneira a que a condutividade térmica tivesse valores mais altos no início, como apresentado na Figura 4-29. O valor de condutividade térmica adoptado no intervalo de 21 °C a 99 °C, provém da média de valores obtidos no mesmo intervalo durante o ensaio experimental. Durante esta fase há uma grande variação do valor da condutividade térmica.

Relativamente ao calor específico, este foi modificado no intervalo dos 200 °C aos 1200 °C, de maneira a descer o máximo da temperatura obtida para perto do 160 °C (Figura 4-30).

Face P2 (junta superior, blocos kraftterra)

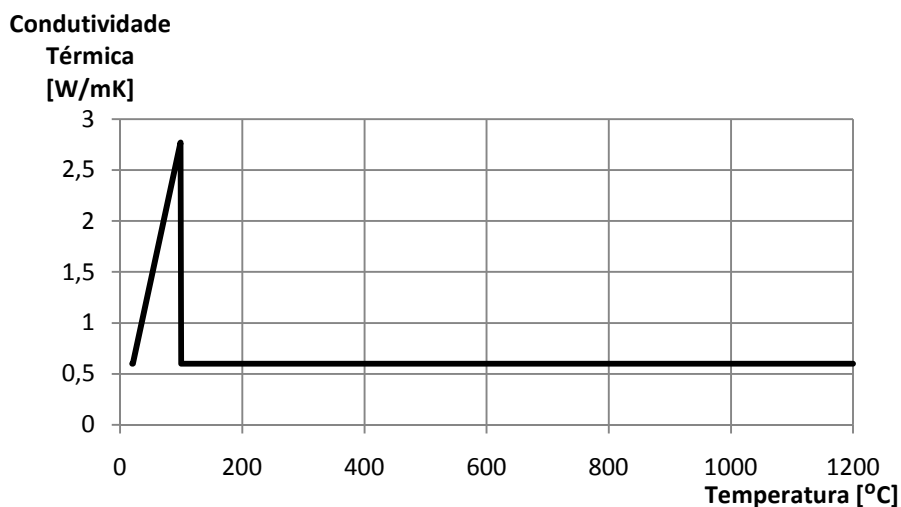


Figura 4-29 Valores da condutividade térmica usados na 2ª calibração.

Face P2 (junta superior, blocos kraftterra)

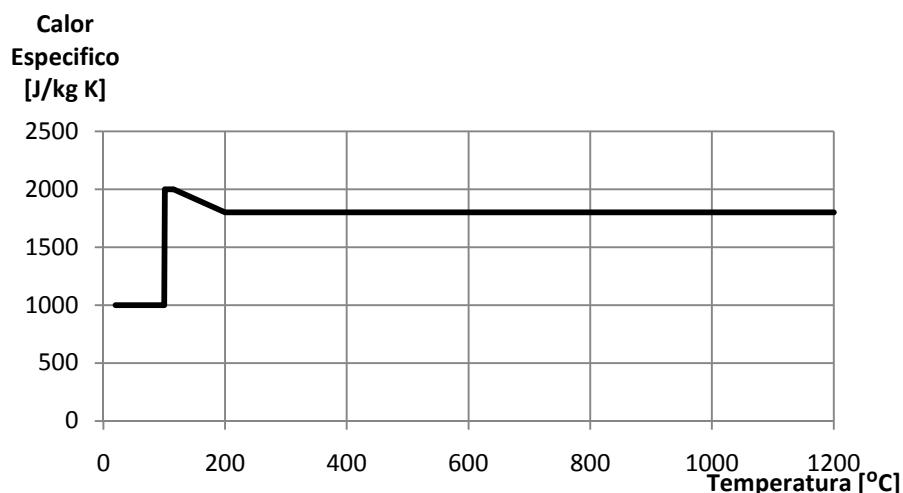


Figura 4-30 Valores de calor específico usados na 2ª calibração.

Através destas alterações obteve-se uma curva com um comportamento mais parecido com o do ensaio experimental (Figura 4-31), onde a mudança nos valores de condutividade térmica provocou alterações significativas na fase inicial e o aumento do calor específico provocou a descida do máximo alcançado na curva original.

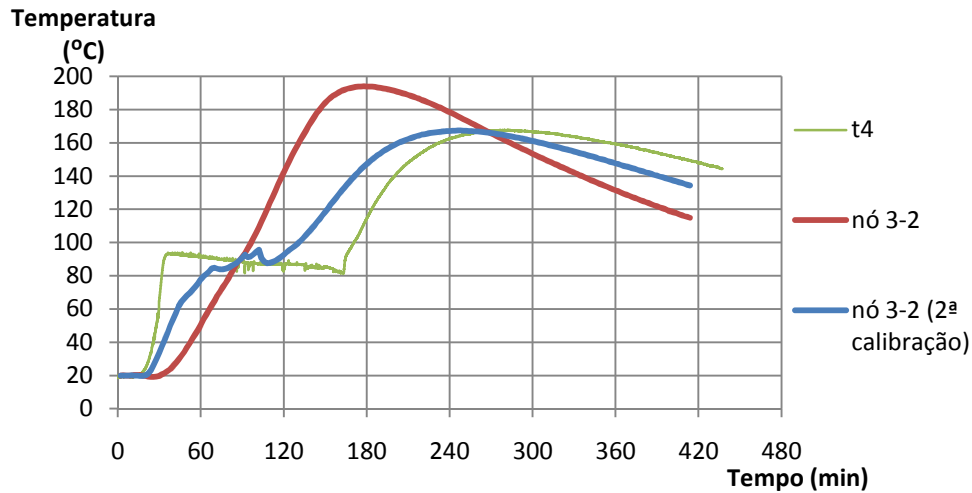


Figura 4-31 Comparação entre a evolução da temperatura no termopar t4 e 2ª calibração.

Continua a ser difícil simular o patamar da curva experimental apesar da maior semelhança entre a nova curva e a curva do ensaio experimental.

Para tentar aproximar o ponto onde as temperaturas atingem o máximo entre a curva t4 e da nova curva, procedeu-se ainda a uma terceira calibração. Assim alterou-se o valor usado do calor específico substancialmente para se obter um crescimento mais lento da curva (Figura 4-34)

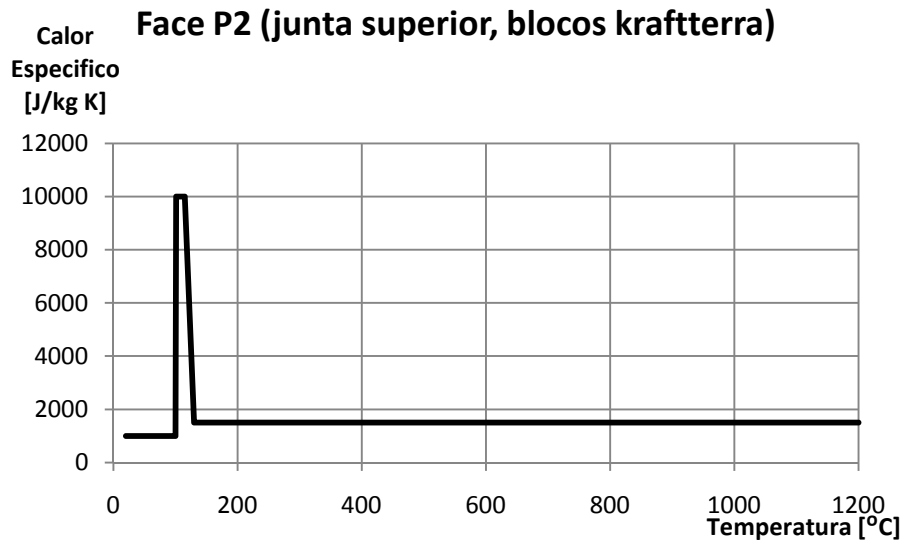


Figura 4-32 Valores de calor específico usados na 3ª calibração.

A curva resultante apresentada na Figura 4-33 relativa à alteração efectuada anteriormente apresenta valores máximos mais baixos de temperatura, mas tem um comportamento ainda mais próximo da curva t4. Apesar da temperatura máxima ser mais baixa, a diferença de tempo em que os máximos das duas curvas são alcançados é menor.

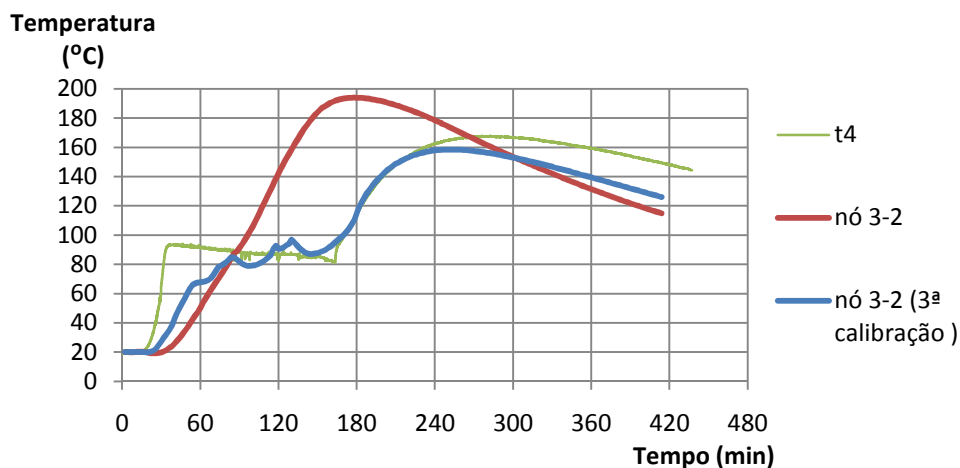


Figura 4-33 Comparação entre a evolução da temperatura no termopar t4 e 3ªcalibração.

As calibrações efectuadas anteriormente consideraram-se as mais próximas devido à complexidade que provém da alteração dos valores sem ter mais dados concretos e ao número de tentativas necessárias para maior aproximação dos valores

4.5.1.2. Calibração da face de blocos solo-cimento (P5)

A face de blocos solo-cimento registou durante o ensaio experimental as temperaturas máximas. A curva relativa à evolução de temperaturas no termopar t16 é a que apresenta maior semelhança com a curva da modelação numérica no nó 3-5. Procedeu-se então a uma calibração semelhante à anterior dos blocos Kraftterra, mas com alteração da condutividade térmica, usando-se a média das condutividades obtidas no ensaio experimental no mesmo intervalo de temperaturas.

Face P5 (junta inferior, blocos solo-cimento)

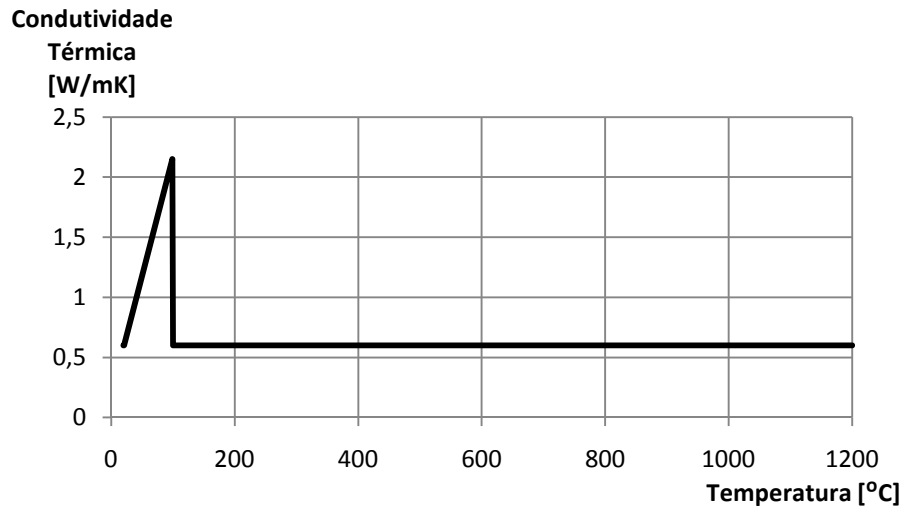


Figura 4-34 Valores da condutividade térmica usados na 4ª calibração

Como o máximo alcançado na curva experimental foi aproximadamente o mesmo da curva no nó 3-5 da malha 3, o uso dos valores de calor específico usados na calibração relativa à face de blocos Kraftterra vai fazer com que o valor máximo seja menor, assim usou-se valores de calor específico mais baixos na fase entre os 100 °C e 1200 °C (Figura 4-35).

Face P5 (junta inferior, blocos solo-cimento)

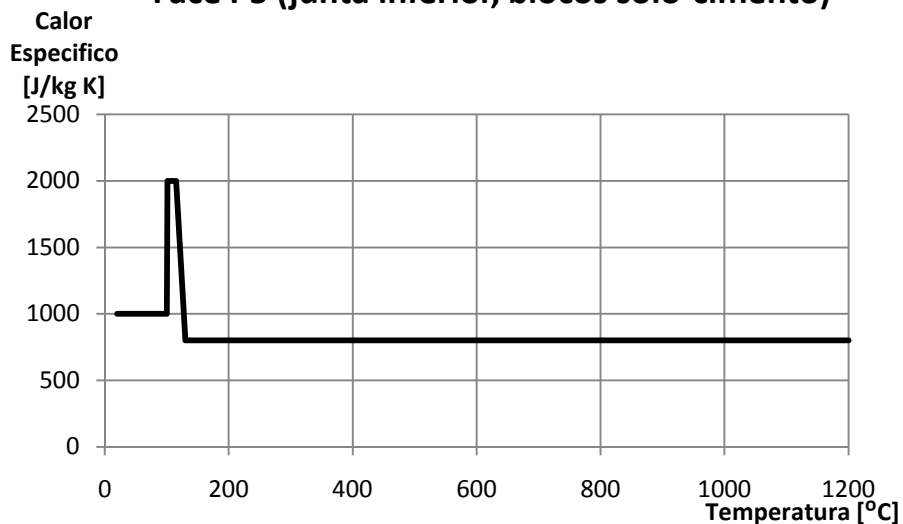


Figura 4-35 Valores de calor específico usados na 4ª calibração.

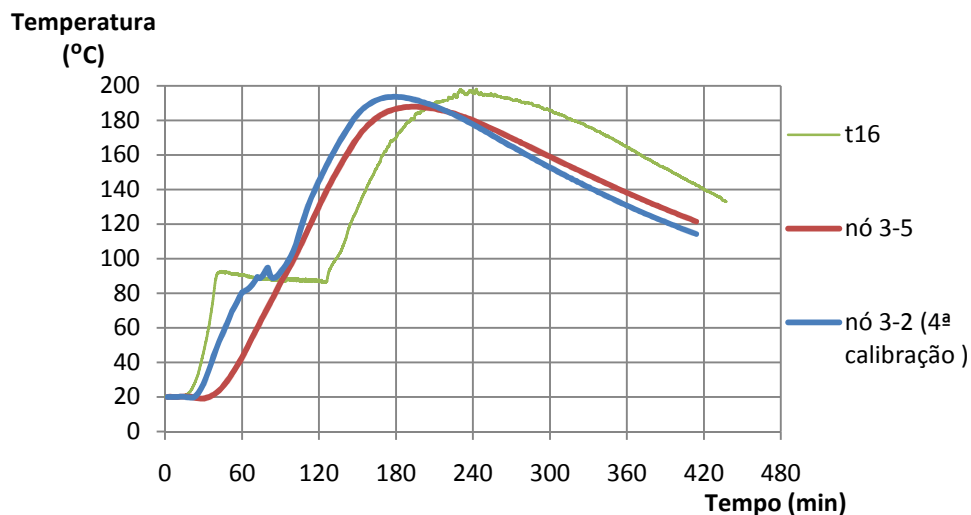


Figura 4-36 Comparação entre a evolução da temperatura no termopar t16 e 4ª calibração.

Para a nova curva atingir os mesmos valores de temperatura máximas basta diminuir o calor específico, mas continua a ser difícil obter o patamar aos 100 °C e que as temperaturas máximas sejam atingidas no mesmo intervalo de tempo.

A alteração dos valores de calor específico na face de blocos solo-cimento provoca a alteração da evolução de temperaturas na face dos blocos Kraftterra, assim, durante a calibração teve que se ter em conta um balanço entre as duas faces.

Realizou-se uma última calibração para tentar diminuir o intervalo, entre as duas curvas, em que se atinge as temperaturas máximas. Esta calibração, mais uma vez, só será possível aumentando o calor específico (Figura 4-37).

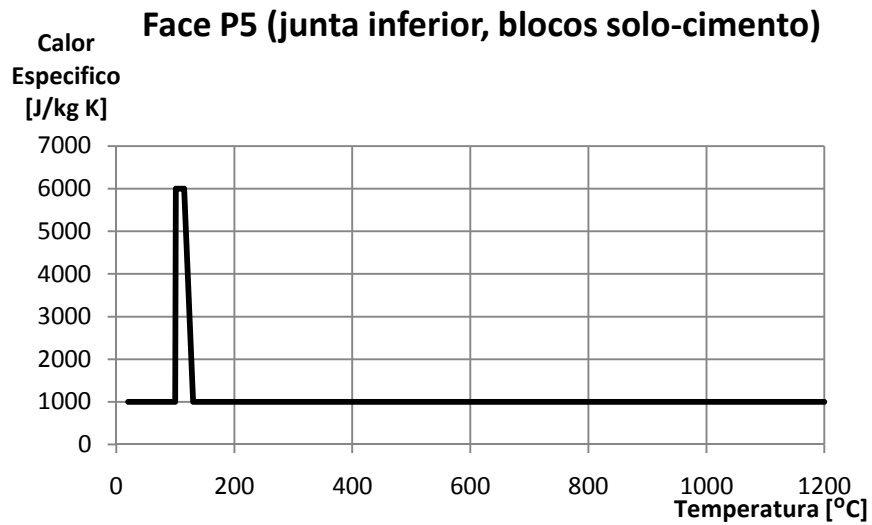


Figura 4-37 Valores de calor específico usados na 5ª calibração.

Como se pode observar na Figura 4-38 os valores de temperatura máximas atingidas são menores devido ao aumento dos valores do calor específico, e o intervalo de tempo entre os máximos atingidos tornou-se menor também.

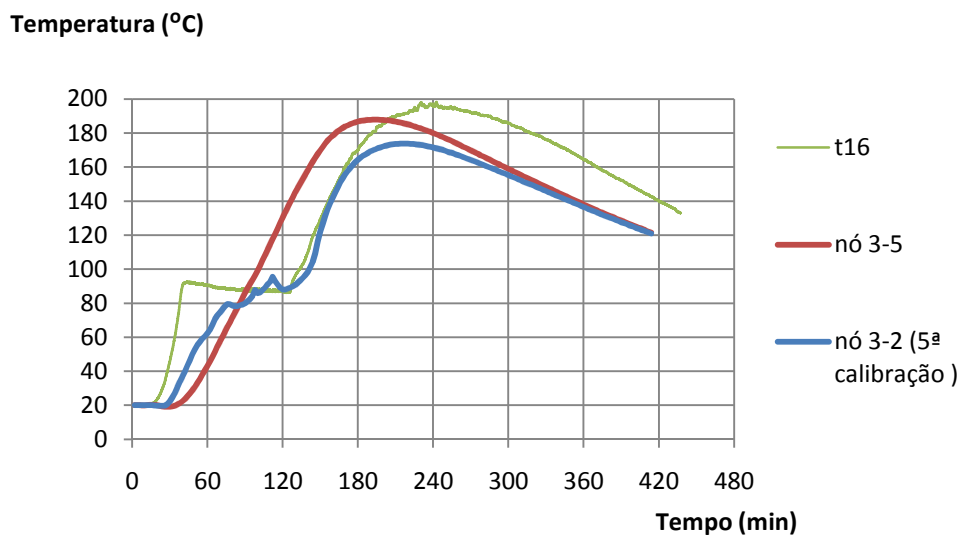


Figura 4-38 Comparação entre a evolução da temperatura no termopar t16 e 5ª calibração.

4.6. Considerações finais

Conclui-se que a complexidade da malha usada não altera significativamente os resultados de temperaturas, sendo a diferença de valores de temperaturas entre as diferentes malhas muito pequena na maior parte das faces.

Conclui-se que a face mais desfavorável pelo Safir é a face P2, que não apresenta reboco nas duas faces e é constituída por blocos Kraftterra, sendo a diferença de temperatura para a P5, esta constituída por blocos solo-cimento e sem reboco, pequena.

Relativamente à capacidade de arrefecimento, os blocos Kraftterra apresentaram um comportamento mais favorável, pois apesar de alcançarem temperaturas maiores durante o aquecimento, apresentaram temperaturas mais baixas na fase seguinte.

Conclui-se que a calibração é um processo difícil de efectuar, sendo igualmente difícil obter uma curva muito parecida com a do ensaio experimental. Obteve-se no entanto aproximações razoáveis donde se conclui que os blocos Kraftterra, provavelmente, apresentam valores de calor específico mais altos logo têm um comportamento mais favorável ao incêndio.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

5.1. Considerações finais

Do estudo efectuado conclui-se que os materiais usados nos produtos de construção apresentam diferentes propriedades térmicas, influenciando significativamente o seu comportamento em caso de incêndio. Assim, é importante considerar estas propriedades quando se espera que um certo produto de construção possa ser classificado pelos parâmetros de estabilidade ao fogo, pára-chamas ou corta-fogo, de maneira a respeitar o regulamento e a maximizar a segurança em caso de incêndio

5.2. Conclusões finais

Neste trabalho apresentaram-se ensaios experimentais a elementos de compartimentação constituídos por vários materiais. Conclui-se que alguns ensaios tiveram melhor comportamento ao fogo que outros. Devem-se realizar estes ensaios à escala real podendo-se caracterizar assim a sua resistência ao fogo

Com o uso de materiais passivos ou corta-fogo é possível aumentar a resistência das portas sendo aqueles cada vez mais numerosos no mercado.

Das várias paredes estudadas nos ensaios experimentais nota-se uma resistência ao fogo considerável, tanto a de gesso cartonado, como alvenaria de tijolo ou a parede de blocos solo-cimento e kraftterra.

Relativamente á modelação numérica da parede, regista-se numa primeira fase que as propriedades térmicas usadas não conduzem a resultados similares às do ensaio experimental; só as temperaturas máximas atingidas foram semelhantes entre a modelação e o ensaio experimental. É preciso notar que durante o ensaio experimental houve descolamento do reboco e aparecimento de fissuras, logo difícil de simular no Safir, podendo conduzir a resultados variados em termos de temperaturas. Relativamente à parede em blocos Krafterra e solo-cimento sem reboco, através da alteração das propriedades térmicas do calor específico e da condutividade térmica foi possível obter um comportamento mais parecido com o do ensaio experimental, mas conclui-se que é um processo difícil e com pouca exactidão, necessitando de um estudo mais aprofundado das propriedades dos materiais durante o ensaio experimental.

5.3. Desenvolvimentos futuros

No seguimento do trabalho desenvolvido na presente dissertação, apresentam-se resumidamente algumas sugestões tendo como objectivo futuros desenvolvimentos nesta área de investigação:

- Efectuar simulações numéricas e ensaios experimentais noutras espécies de soluções construtivas;
- Estudar o comportamento ao fogo de ligações de madeira, experimentalmente e numericamente, e verificar a influência de ligações metálicas em peças de madeira, quando submetidas a altas temperaturas;
- Realizar ensaios experimentais em mais elementos de compartimentação constituídos por outros materiais, como por exemplo, em alvenaria antiga de forma a verificar o comportamento ao fogo de construções antigas.

BIBLIOGRAFIA

APICER, CTCV, & DEC_FCTUC. (2000). *Manual de Alvenaria de Tijolo*. Coimbra: Associação Portuguesa de Industriais de Cerâmica de Construção.

Buson, M. (2009). *Márcio Buson*. Obtido em 13 de Setembro de 2010, de <http://arquitecturasdeterra.blogspot.com/2009/05/krafterraconferenciamarcio-buson.html>

Cachim, P. B. (2007). *Construções em madeira - a madeira como material de construção*. Porto: Pubblindústria.

CEN. (2003). *EN 13501-2: Fire classification of construction products and building elements - Part 2: Classification using data from resistance tests, excluding ventilation services*. Bruxelas, Bélgica.

CEN. (1999). *EN 1363-1: Fire resistance tests - General requirements*. Bruxelas, Bélgica.

CEN. (2002). *EN 1991-1-2 : Actions on structures - Part 1-2 : General actions - Actions on structures exposed to fire*. Bruxelas, Bélgica.

CEN. (2004a). *EN 1992-1-2 : Design of concrete structures - Part 1-2 : General rules - Structural fire design*. Bruxelas, Bélgica.

CEN. (2004b). *EN 1993-1-2 : Design of steel structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design*. Bruxelas, Bélgica.

CEN. (2004c). *EN 1995-1-2: Design of timber structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design*. Bruxelas, Bélgica.

CEN. (2005b). *EN 1996-1-2: Design of masonry structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design*. Bruxelas, Bélgica.

CEN. (2006). *EN 1999-1-2 : Design of aluminium structures - Part 1-2: Structural fire design*. Bruxelas, Bélgica.

Diário da República Portuguesa. (2008a). *Decreto-Lei n.º220/2008, D.R.n.º220,Série I de 2008-11-12. Estabelece o regime jurídico de segurança contra incêndios em edifícios*.

Diário da República Portuguesa. (2006). *Decreto-Lei n.º80/2006, Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios(RCCTE)*.

Diário da República Portuguesa. (2008b). *Portaria n.º 1532/2008,1ªsérie,n.º250 de 29 de Dezembro 2008*.

Ecocasa. (2009). Obtido em 13 de Dezembro de 2009, de <http://www.ecocasa.org/userfiles/file/LA%20DE%20ROCHA.pdf>

FEUP. (2010). Obtido em 20 de Setembro de 2010, de http://paginas.fe.up.pt/~vpfreita/mce04011_Propriedades_mecanicas_do_vidro.pdf

Franssen, J., Kodur, V., & Zaharia, R. (2009). *Designing steel structures for fire safety*. London: CRC Press.

Incroprera, F. P., & De Witt, D. P. (1990). *Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa* (5ª Edição ed.). LTC Editora.

Jesus, A. (2008). *Ensaio de resistência ao fogo de elementos de compartimentação*, Tese de mestrado em engenharia civil. Universidade de Aveiro.

Karamanos, A., Hadiarakou, S., & Papadopoulos, A. M. (2008). *The impact of temperature and moisture on the thermal performance of stone wool*.

Kusterle, W., Lindlbauer, W., Zeiml, M., & Muchsel, H. (2005). *Fire resistance of concrete tunnel linings-conclusions of large scale tests*. Vancouver.

Larocha. (2010). Obtido em 15 de Agosto de 2010, de <http://www.larocha.com/?produtos=mantas&larocha=produtos>

Lopes, N. (2009). *Comportamento ao fogo de estruturas em aço inoxidável*, Tese de doutoramento em engenharia civil. Universidade de Aveiro.

Mesquita, L. M., Piloto, P. A., Vaz, M. A., & Vila Real, P. M. (2006). *Ensaio de resistência ao fogo de vigas em aço protegidas com tinta intumescente*.

Mundiperfil. (2010). Obtido em 20 de Setembro de 2010, de <http://www.mundiperfil.pt>

Negrão, J. H. (2005). *Estruturas de Madeira*. Coimbra: D.E.C. - F.C.T.U.C.

Pereira, M. F. (2005). *Anomalias em paredes de alvenaria sem função estrutural*, Dissertação de mestrado em engenharia civil. Universidade do Minho.

Reis, A., Farinha, M., & Farinha, J. (2006). *Tabelas Técnicas*. Lisboa: Edições Técnicas E. T. L.

Rodrigues, J. (1994). *Recuperação de estruturas danificadas por incêndio - propriedades mecânicas residuais do aço e do betão*, Tese de mestrado em engenharia civil. Universidade de Coimbra.

Vicaima. (2010). Obtido em 20 de Setembro de 2010, de <http://www.vicaima.com/pt/portugal/produtos/portas-tecnicas/corta-fogo/corta-fogo-60m.html>

Vila Real, P. (2010). *Algumas notas sobre a equação simplificada do EC3 para determinação da temperatura de perfis metálicos não protegidos, o factor de sombra e o factor de vista.*

Vila Real, P. (2003). *Incêndio em estruturas metálicas: cálculo estrutural.* Lisboa: Orion.

Vila Real, P., Lopes, N., Buson, M., & Varum, H. (2009). *Ensaio ao fogo de uma parede de blocos kraftterra e solo cimento.* Requerido por Humberto Varum e Marcio Buson: Realizado no LERF da Universidade de Aveiro.

Vitro Chaves. (2010). Obtido em 20 de Setembro de 2010, de http://www.vitro.com/vitro_chaves/pyroglass1.htm

Viver. (2010). Obtido em 20 de Setembro de 2010, de <http://viverarquitectura.blogspot.com/2009/01/parede-de-gesso-acartonado.html>

Walker, P. J. (1995). *Strength, durability and shrinkage characteristics of cement stabilised soil blocks.*

Youssef, M. A., & Moftah, M. (2007). *General stress - strain relationship for concrete at elevated temperatures.*

Ytong. (2010). *Ytong.* Obtido em 2 de Dezembro de 2010, de <http://www.ytong.pt>