



# Análise computacional para a avaliação da resistência ao fogo em elementos construtivos de suporte em aglomerado de madeira com proteção

DOMINGOS DE ARAÚJO MOREIRA PEREIRA

outubro de 2023

# ANÁLISE COMPUTACIONAL PARA A AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO FOGO EM ELEMENTOS CONSTRUTIVOS DE SUPORTE EM AGLOMERADO DE MADEIRA COM PROTEÇÃO

Domingos Araújo Moreira Pereira

**2023**

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica

isen

P.PORTO

# ANÁLISE COMPUTACIONAL PARA A AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO FOGO EM ELEMENTOS CONSTRUTIVOS DE SUPORTE EM AGLOMERADO DE MADEIRA COM PROTEÇÃO

Domingos Araújo Moreira Pereira

1180819

Dissertação apresentada ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação da Professora Doutora Elza Maria Morais Fonseca

**2023**

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica

isen

P.PORTO

## **AGRADECIMENTOS**

De um modo geral expresso os meus sinceros agradecimentos a todas as pessoas que direta ou indiretamente contribuíram e demonstraram todo o seu apoio para a realização desta dissertação.

No entanto, gostaria de expressar o devido reconhecimento e agradecimento a um conjunto de pessoas cujo apoio e participação foi preponderante ao longo de todo o processo.

À Professora Doutora Elza Maria Morais Fonseca, minha orientadora, pelo acompanhamento, apoio e disponibilidade. A colaboração, partilha de conhecimentos, compreensão e capacidade crítica foram fatores que muito contribuíram para a constante motivação durante o desenvolvimento do trabalho.

À minha namorada, Catarina Gonçalves, pelo apoio incondicional, incentivo, paciência, suporte e por todo o carinho que me encoraja a atingir os meus objetivos e a acreditar que com paixão todos os momentos são melhores.

A toda a minha família, nas individualidades de cada pessoa, pela motivação, conselhos, bons e maus momentos, por acreditarem nas minhas capacidades e por me encorajarem a alcançar todos os meus objetivos.

Aos meus amigos por todo o companheirismo, suporte e apoio que sempre demonstram ao longo de todo o processo.

Aos meus colegas, nomeadamente ao Daniel Gonçalves e ao Pedro Costa Pereira, por todas as lições, conhecimentos, dedicação e força para a concretização deste objetivo.

Por último, um agradecimento especial à memória de meu avô que continua a marcar a sua presença e a contribuir para o meu crescimento pessoal.

Página propositadamente em branco

## RESUMO

A madeira representa um dos materiais mais utilizados pela humanidade há vários séculos e, desde muito cedo, tomou um lugar preponderante na engenharia e construção de edifícios. Com o desenvolvimento dos materiais de construção e da regulamentação relacionada com a segurança contra incêndio, a utilização de elementos em madeira tornou-se improvável. A madeira, sendo um material cujas propriedades variam consoante as condições de humidade, temperatura, carga, entre outros, é particularmente suscetível a alterações induzidas pelas elevadas temperaturas. Quando exposta a uma situação de incêndio, as propriedades da madeira degradam-se, fazendo com que ocorra a carbonização. A carbonização, apesar de garantir a proteção do núcleo interno da madeira, diminui a sua secção resistente, fazendo com que a resistência ao fogo dos elementos construtivos seja comprometida. A avaliação do comportamento da madeira sob condições de fogo é possível recorrendo a testes experimentais, modelos analíticos simplificados e, ainda, numéricos. De modo a colmatar eventuais dificuldades, na elaboração de testes experimentais e das aproximações realizadas aos métodos analíticos, os modelos numéricos permitem aumentar a verificação e a avaliação da resistência ao fogo de diferentes elementos construtivos em madeira de forma paramétrica. Assim, a presente dissertação aborda temáticas como as propriedades dos materiais em estudo, a ação do fogo e a sua relação com os elementos construtivos, bem como as metodologias realizadas por investigadores na avaliação da resistência ao fogo de elementos em madeira, considerando as normas europeias, eurocódigos, livros e estudos científicos sobre as diversas temáticas em função do principal objetivo dos três estudos realizados. O primeiro estudo apresenta um modelo numérico de validação experimental, aplicando o método dos elementos finitos. A validação dos resultados tem como base a evolução do campo de temperaturas, da carbonização e respetiva secção residual, assim como a aplicação do critério de isolamento térmico, de acordo com a norma EN 1363-1:2020. A metodologia utilizada permitiu obter um modelo numérico que verifica e se aproxima às condições existentes num ensaio experimental. Posteriormente, o segundo estudo consiste na avaliação da influência dos parâmetros geométricos associados aos modelos construtivos de suporte em madeira com proteção em gesso na resistência ao fogo. A metodologia aplicada permitiu concluir que, em simultâneo, uma menor distância entre centros, uma maior dimensão do montante de madeira em altura e largura, assim como uma maior espessura da placa de gesso, garantem um melhor desempenho da solução construtiva, quando exposta a condições de fogo padrão. Por último, no terceiro estudo apresentam-se duas aplicações analíticas de um método simplificado proposto, para a análise da resistência ao fogo de elementos construtivos de madeira protegidos com placas de gesso. A análise apresentou resultados inferiores ao expectável, reconhecendo que o método simplificado proposto adota um critério conservativo, quando comparado com os testes experimentais e análises numéricas obtidas.

## PALAVRAS-CHAVE

Madeira; Placa de Gesso; Fogo; Resistência ao fogo; Carbonização.

Página propositadamente em branco

## ABSTRACT

Wood has been one of the most widely used materials by humanity for several centuries and since early on took a leading place in the engineering and buildings construction. With the development of building materials and fire safety regulations, the use of wood elements has become unlikely. Wood is a material whose properties vary depending on the conditions of moisture, temperature, and load, among others, particularly susceptible to changes induced by high temperatures. When exposed to fire situation, the wood properties degrade causing a char layer. Despite ensuring the protection of the internal core of the wood, char layer reduces its resistant section. Thus, compromising the fire resistance of the construction elements. The evaluation of wood behavior under fire conditions is possible using experimental tests, simplified analytical models, and numerical models. In order to overcome difficulties in the development of experimental tests and the approximations made to analytical methods, numerical models allow the verification and evaluation of the fire resistance of different wooden building elements in a parametric way. Thus, this dissertation addresses topics such as the properties of the materials under study, the fire action, and its relationship with building elements, as well as the methodologies carried out by researchers to assess the fire of wooden elements, considering European Standards, Eurocodes, books, and scientific studies on the various topics according to the main goal of the three studies carried out. The first study presents a numerical model for experimental validation, using the finite element method. The validation of the results is based on the evolution of the temperature field, char layer, and its residual section, as well as the application of the thermal insulation criterion according to EN 1362-1:2020. The methodology used made it possible to obtain a numerical model that verifies and approximates the existing conditions in an experimental test. The second study evaluates the influence of the geometric parameters associated with constructive models of wooden with gypsum plasterboard on fire resistance. The methodology applied led to the conclusion that, at the same time, a smaller distance between centers, a larger dimension of the wooden frame in height and width, as well as a greater thickness of gypsum plasterboard, guarantee a better performance of the constructive solution, when exposed to standard fire conditions. Finally, in the third study, two analytical applications of a proposed simplified method are presented for analyzing the fire resistance of wooden elements protected with gypsum plasterboard. The analysis showed lower than expected results, recognizing that the proposed simplified method adopts a conservative criterion, when compared to the experimental tests and numerical analyses obtained.

## KEYWORDS

Wood; Gypsum plasterboard; Fire; Fire resistance; Char layer.

Página propositadamente em branco

# ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS .....	IX
ÍNDICE DE TABELAS .....	XIII
LISTAS DE SIGLAS E SÍMBOLOS .....	XV
1. INTRODUÇÃO .....	19
1.1. Contextualização .....	19
1.2. Objetivos .....	19
1.3. Metodologia .....	20
1.4. Estrutura da dissertação.....	20
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	23
2.1. Materiais e Características .....	23
2.1.1. Madeira Lamelada Colada.....	23
2.1.2. Materiais de Proteção Passiva .....	25
2.2. Ação do Fogo .....	28
2.2.1. Curvas de Incêndio .....	28
2.2.2. Critérios de Resistência ao Fogo .....	29
2.2.3. Classificação dos Elementos Construtivos .....	34
2.2.4. Carbonização.....	36
2.3. Transferência de Calor .....	37
2.3.1. Condução .....	38
2.3.2. Convecção .....	39
2.3.3. Radiação .....	40
2.4. Metodologias.....	41
2.4.1. Método Analítico .....	41
2.4.2. Método Experimental .....	43
2.4.3. Método Computacional .....	45
3. ANÁLISE TÉRMICA .....	47
3.1. Propriedades dos Materiais .....	47
3.1.1. Propriedades térmicas da madeira .....	47
3.1.2. Propriedades térmicas do gesso .....	52
3.1.3. Propriedades térmicas do ar .....	55
3.2. Formulação de elementos finitos.....	59
4. VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL.....	63
4.1. Modelo experimental.....	63
4.2. Modelos numéricos desenvolvidos .....	67
4.2.1. Elementos finitos e malhas .....	69
4.2.2. Condições de fronteira.....	72
4.3. Validação dos resultados.....	75

4.3.1. Temperaturas.....	75
4.3.2. Carbonização.....	79
4.3.3. Secção residual.....	82
4.3.4. Critério de isolamento térmico.....	83
5. NOVOS MODELOS PARAMÉTRICOS.....	85
5.1. Modelos paramétricos em estudo.....	85
5.1.1. Método de elementos finitos e condições fronteira.....	87
5.2. Estudo da distância entre centros.....	88
5.2.1. Temperaturas.....	88
5.2.2. Carbonização.....	90
5.2.3. Secção residual.....	91
5.2.4. Critério de isolamento térmico.....	91
5.3. Estudo da altura da madeira.....	93
5.3.1. Temperaturas.....	94
5.3.2. Carbonização.....	95
5.3.3. Secção residual.....	96
5.3.4. Critério de isolamento térmico.....	97
5.4. Estudo da largura da madeira.....	98
5.4.1. Temperaturas.....	98
5.4.2. Carbonização.....	100
5.4.3. Secção residual.....	101
5.4.4. Critério de isolamento térmico.....	102
5.5. Estudo da espessura do gesso.....	103
5.5.1. Temperaturas.....	103
5.5.2. Carbonização.....	105
5.5.3. Secção residual.....	106
5.5.4. Critério de isolamento térmico.....	107
5.6. Análise dos resultados dos novos modelos paramétricos.....	108
6. MÉTODO SIMPLIFICADO DE RESISTÊNCIA AO FOGO.....	111
6.1. Método de separação de modelos construtivos em madeira.....	111
6.2. Aplicação do método simplificado de resistência ao fogo.....	115
6.2.1. Modelo de validação experimental.....	115
6.2.2. Modelo paramétrico [120x50+25]x400.....	118
6.3. Análise dos resultados da aplicação do método simplificado de resistência ao fogo.....	120
7. CONCLUSÕES.....	123
7.1. Conclusões finais.....	123
7.2. Limitações e trabalhos futuros.....	124
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	125
APÊNDICE A.....	129

---

APÊNDICE B ..... 131

Página propositadamente em branco

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Direções principais da madeira (Adaptada [10]).....	23
Figura 2 - Curvas de Incêndio .....	29
Figura 3 - Critério de resistência ao fogo - Capacidade de Carga (R): a) Vigas, b) Pilares (Adaptada [29]).....	30
Figura 4 - Critério de resistência ao fogo - Integridade (E) (Adaptada [29]).....	32
Figura 5 - Critério de resistência ao fogo - Isolamento (I) (Adaptada [29]) .....	33
Figura 6 - Condução térmica numa parede plana [36].....	38
Figura 7 - Perfil de variação de temperatura e da velocidade de escoamento (Adaptada [36]) .....	40
Figura 8 - Convecção forçada e natural (Adaptada [36]) .....	40
Figura 9 - Verificação experimental do tempo até atingir uma temperatura média de 250°C e uma temperatura pontual de 270°C na superfície não exposta ao fogo (Adaptada [41, 42]).....	44
Figura 10 - Variação da massa volúmica em função da temperatura nas classes de madeira lamelada GL20h, GL24h e GL32h .....	49
Figura 11 – Variação do calor específico da madeira em função da temperatura .....	50
Figura 12 – Variação da condutividade térmica da madeira em função da temperatura .....	51
Figura 13 - Variação da massa volúmica em função da temperatura no gesso tipo A e F .....	53
Figura 14 - Variação do calor específico em função da temperatura no gesso tipo A e F .....	54
Figura 15 - Variação da condutividade térmica em função da temperatura no gesso tipo A e F....	55
Figura 16 - Variação da massa volúmica do ar em função da temperatura .....	56
Figura 17 - Variação do calor específico do ar em função da temperatura .....	57
Figura 18 - Variação da condutividade térmica do ar em função da temperatura.....	58
Figura 19 – Reprodução do modelo geométrico do ensaio 4 .....	64
Figura 20 - Comparação entre as curvas de incêndio .....	65
Figura 21 - Pontos de controlo da evolução da temperatura .....	65
Figura 22 - Curva de incêndio e evolução da temperatura nos pontos de controlo do ensaio 4 ....	66
Figura 23 - Evolução da carbonização da madeira no ensaio 4 [2] .....	66
Figura 24 - Modelo construtivo e dimensões.....	68
Figura 25 - Representação esquemática do elemento finito PLANE55 de quatro nós (a) e de três nós (b) (Adaptada [56]).....	69
Figura 26 - Representação esquemática do elemento superficial SURF151 (Adaptado [56]) .....	70
Figura 27 - Representação esquemática do elemento barra LINK34 (Adaptado [56]) .....	70
Figura 28 - Representação do modelo numérico com malha de ar (Modelo M1).....	71
Figura 29 - Representação do modelo numérico sem malha de ar (Modelos M2 a M4) .....	71
Figura 30 - Condições de fronteira admitidas no modelo com malha de ar nas cavidades (M1)....	72
Figura 31 - Condições de fronteira admitidas no modelo com efeito da radiação nas cavidades (M2) .....	73
Figura 32 - Condições de fronteira admitidas no modelo com curva de aquecimento nas cavidades (M3).....	73
Figura 33 - Condições de fronteira admitidas no modelo com efeito de radiação e convecção nas cavidades (M4).....	74
Figura 34 – Campo de temperaturas obtido para o modelo com malha de ar nas cavidades (M1)	75

Figura 35 – Campo de temperaturas obtido para modelo com efeito da radiação nas cavidades (M2)	76
Figura 36 – Campo de temperaturas obtido para o modelo com curva de aquecimento nas cavidades (M3)	77
Figura 37 – Campo de temperaturas obtido para o modelo com efeito de radiação e convecção nas cavidades (M4)	78
Figura 38 - Malha de elementos finitos do modelo com efeito de radiação e convecção nas cavidades (M4)	79
Figura 39 – Comparação da carbonização nos modelos numéricos desenvolvidos para o instante de 90 minutos com o modelo experimental	79
Figura 40 – Comparação da carbonização nos modelos numéricos desenvolvidos para o instante de 100 minutos com o modelo experimental	80
Figura 41 – Comparação da carbonização nos modelos numéricos desenvolvidos para o instante de 110 minutos com o modelo experimental	81
Figura 42 – Comparação da carbonização nos modelos numéricos desenvolvidos para o instante de 120 minutos com o modelo experimental	82
Figura 43 - Identificação dos nós para análise do critério de isolamento térmico do ensaio 4	83
Figura 44 – Critério de isolamento térmico do modelo com efeito de radiação e convecção nas cavidades (M4)	84
Figura 45 - Modelo construtivo paramétrico do tipo $[H \times W + Tg] \times D$	85
Figura 46 - Identificação dos pontos de controlo A, E e F e dos nós para análise do critério de isolamento térmico	86
Figura 47 - Condições de fronteira admitidas nos novos modelos em estudo	87
Figura 48 - Campo de temperaturas nos pontos A, E e F do modelo $[70 \times 30 + 12,5] \times 400$	88
Figura 49 - Campo de temperaturas nos pontos A, E e F do modelo $[70 \times 30 + 12,5] \times 500$	88
Figura 50 - Campo de temperaturas nos pontos A, E e F do modelo $[70 \times 30 + 12,5] \times 600$	89
Figura 51 - Campo de temperaturas nos pontos A, E e F resultante do estudo da distância entre centros	89
Figura 52 - Comparação da evolução da carbonização do estudo da distância entre centros para o instante de tempo de 30 minutos	90
Figura 53 - Comparação da evolução da carbonização do estudo da distância entre centros para o instante de tempo de 60 minutos	90
Figura 54 - Critério de isolamento térmico do modelo $[70 \times 30 + 12,5] \times 400$	92
Figura 55 - Critério de isolamento térmico do modelo $[70 \times 30 + 12,5] \times 500$	92
Figura 56 - Critério de isolamento térmico do modelo $[70 \times 30 + 12,5] \times 600$	93
Figura 57 - Campo de temperaturas nos pontos A, E e F do modelo $[90 \times 30 + 12,5] \times 400$	94
Figura 58 - Campo de temperaturas nos pontos A, E e F do modelo $[120 \times 30 + 12,5] \times 400$	94
Figura 59 - Campo de temperaturas nos pontos A, E e F resultante do estudo da altura da madeira	95
Figura 60 - Comparação da evolução da carbonização do estudo da altura da madeira para o instante de tempo de 30 minutos	96
Figura 61 - Comparação da evolução da carbonização do estudo da altura da madeira para o instante de tempo de 60 minutos	96
Figura 62 - Critério de isolamento térmico do modelo $[90 \times 30 + 12,5] \times 400$	97
Figura 63 - Critério de isolamento térmico do modelo $[120 \times 30 + 12,5] \times 400$	97

Figura 64 - Campo de temperaturas nos pontos A, E e F do modelo [120x40+12,5]x400 .....	98
Figura 65 - Campo de temperaturas nos pontos A, E e F do modelo [120x50+12,5]x400 .....	99
Figura 66 - Campo de temperaturas nos pontos A, E e F resultante do estudo da largura da madeira .....	99
Figura 67 - Comparação da evolução da carbonização do estudo da largura da madeira para o instante de tempo de 30 minutos.....	100
Figura 68 - Comparação da evolução da carbonização do estudo da largura da madeira para o instante de tempo de 60 minutos.....	100
Figura 69 - Comparação da evolução da carbonização do estudo da largura da madeira para o instante de tempo de 90 minutos.....	100
Figura 70 - Comparação da evolução da carbonização do estudo da largura da madeira para o instante de tempo de 120 minutos.....	100
Figura 71 - Critério de isolamento térmico do modelo [120x40+12,5]x400.....	102
Figura 72 - Critério de isolamento térmico do modelo [120x50+12,5]x400.....	102
Figura 73 - Campo de temperaturas nos pontos A, E e F do modelo [120x50+15]x400 .....	103
Figura 74 - Campo de temperaturas nos pontos A, E e F do modelo [120x50+25]x400 .....	104
Figura 75 - Campo de temperaturas nos pontos A, E e F resultante do estudo da espessura do gesso .....	104
Figura 76 - Comparação da evolução da carbonização do estudo da espessura do gesso para o instante de tempo de 30 minutos.....	105
Figura 77 - Comparação da evolução da carbonização do estudo da espessura do gesso para o instante de tempo de 60 minutos.....	105
Figura 78 - Comparação da evolução da carbonização do estudo da espessura do gesso para o instante de tempo de 90 minutos.....	105
Figura 79 - Comparação da evolução da carbonização do estudo da espessura do gesso para o instante de tempo de 120 minutos.....	105
Figura 80 - Critério de isolamento térmico do modelo [120x50+12,5]x400.....	107
Figura 81 - Critério de isolamento térmico do modelo [120x50+15]x400.....	107
Figura 82 - Critério de isolamento térmico do modelo [120x50+25]x400.....	108
Figura 83 – Numeração e função de cada camada proposto no método simplificado (Adaptada [42]) .....	112
Figura 84 – Numeração e identificação das camadas para aplicação do método simplificado.....	115
Figura 85 – Comparação da resistência ao fogo obtida em testes experimentais e no método simplificado (n = número de camadas) (Adaptada [42]).....	121

Página propositadamente em branco

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química de madeira seca em fração mássica (Adaptada) [6].	24
Tabela 2 - Materiais incombustíveis incluídos nas classes de reação ao fogo A1 e A1 <sub>FL</sub> sem necessidade de ensaio [24].	27
Tabela 3 - Classificação para elementos com funções de suporte de carga e com função de compartimentação resistente ao fogo - divisórias [31].	34
Tabela 4 - Classificação para elementos ou partes de obras sem funções de suporte de carga - divisórias [31].	35
Tabela 5 - Valores de velocidade de carbonização para madeira resinosa e folhosa [35].	37
Tabela 6 - Parâmetros definidos no método analítico simplificado [33].	43
Tabela 7 - Verificação experimental do critério de isolamento térmico (I) de diferentes soluções construtivas [41, 42].	44
Tabela 8 - Coeficientes da massa volúmica da madeira em função da temperatura [35].	48
Tabela 9 - Massa volúmica das madeiras GL20h, GL24h e GL32h em função da temperatura.	48
Tabela 10 - Calor específico da madeira em função da temperatura [35].	50
Tabela 11 - Condutividade térmica da madeira em função da temperatura [35].	51
Tabela 12 - Massa volúmica do gesso tipo A e F em função da temperatura.	53
Tabela 13 - Calor específico do gesso tipo A e F em função da temperatura.	54
Tabela 14 - Condutividade térmica do gesso tipo A e F em função da temperatura.	55
Tabela 15 - Massa volúmica do ar em função da temperatura.	56
Tabela 16 - Calor específico do ar em função da temperatura.	57
Tabela 17 - Condutividade térmica do ar em função da temperatura.	58
Tabela 18 - Ensaio de validação experimental de resistência ao fogo [2].	64
Tabela 19 - Secção residual do modelo experimental do ensaio 4.	67
Tabela 20 - Secção residual dos modelos numéricos desenvolvidos.	83
Tabela 21 - Metodologia de estudo dos modelos paramétricos.	86
Tabela 22 - Secção residual resultante do estudo da distância entre centros.	91
Tabela 23 - Secção residual resultante do estudo da altura da madeira.	96
Tabela 24 - Secção residual resultante do estudo da largura da madeira.	101
Tabela 25 - Secção residual resultante do estudo da espessura do gesso.	106
Tabela 26 - Análise da influência dos parâmetros geométricos na variação da resistência ao fogo.	109
Tabela 27 - Modificação dos coeficientes de posição na existência de cavidades de ar.	114
Tabela 28 - Aplicação do método simplificado ao modelo de validação experimental.	116
Tabela 29 - Resistência ao fogo obtidas pelas metodologias de análise ao modelo de validação experimental.	118
Tabela 30 - Aplicação do método simplificado ao modelo paramétrico [120x50+25]x400.	118
Tabela 31 - Resistência ao fogo obtidas pelas metodologias de análise ao modelo paramétrico [120x50+25]x400.	120

Página propositadamente em branco

## LISTAS DE SIGLAS E SÍMBOLOS

### Lista de Siglas

CLT	<i>Cross-Laminated Timber</i>
CWFT	<i>Classification Without Further Testing</i>
E	Integridade
EW	Função de Integridade e radiação
EC	Eurocódigo
EI	Função de integridade e isolamento térmico
EI-M	Função de integridade, isolamento térmico e ação mecânica
EN	<i>European Standard</i>
FL	<i>Floors</i>
GL	<i>Glulam</i>
GLT	<i>Glued-Laminated Timber</i>
I	Isolamento térmico
ISEP	Instituto Superior de Engenharia do Porto
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
M	Ação Mecânica
MEF	Método dos elementos finitos
MLC	Madeira Lamelada Colada
P. Porto	Instituto Politécnico do Porto
R	Capacidade de carga
RE	Função de suporte de carga e integridade
REI	Função de suporte de carga, integridade e isolamento térmico
REI-M	Função de suporte de carga, integridade, isolamento térmico e ação mecânica
REW	Função de suporte de carga, integridade e radiação
RJ-SCIE	Regime Jurídico da Segurança Contra Incêndio em Edifícios
RT-SCIE	Regulamento Técnico de Segurança Contra Incêndio em Edifícios
SCIE	Segurança Contra Incêndio em Edifícios
SPF	<i>Spruce-Pine-Fir</i>
TGA	Termo gravimétrico
W	Radiação

### Lista de Unidades

K	Kelvin
kg	Quilograma
MPa	Mega Pascal
°C	Graus centígrados
mm	Milímetro
min	Minutos
W	Watt
s	Segundos
m	Metro
J	Joule

### Lista de Símbolos

$c_{1-2}$	Constante de transferência de calor por radiação entre duas superfícies	$W/m^2K^4$
$C$	Deslocamento de contração vertical	mm
$C_{lim}$	Deslocamento de contração vertical limite	mm
$C_p$	Calor específico	J/kgK
$d$	Espessura da secção transversal do elemento	mm
$d_0$	Profundidade média para a linha de carbonização	mm
$d_{char,0}$	Evolução linear de material carbonizado	mm
$d_{char,n}$	Evolução linear de material carbonizado, considerando arredondamentos	mm
$d_{ef}$	Profundidade efetiva de carbonização	mm
$D$	Deflexão	mm
$D_{lim}$	Deflexão máxima	mm
$\left(\frac{dC}{dt}\right)$	Taxa de deslocamento de contração vertical	mm/min
$\left(\frac{dC}{dt}\right)_{lim}$	Taxa limite de deslocamento de contração vertical	mm/min
$\left(\frac{dD}{dt}\right)$	Taxa de deflexão	mm/min
$\left(\frac{dD}{dt}\right)_{lim}$	Taxa limite de deflexão	mm/min
$E$	Número total de elementos	Adimensional
$h$	Altura do provete de teste no instante imediatamente após a aplicação da carga	mm
$h_c$	Condutância térmica superficial por convecção	$W/m^2 \cdot K$
$h_{cr}$	Coefficiente de transferência de calor por convecção e/ou radiação	Adimensional
$h_i$	Espessura das camadas de proteção ou isolamento	mm
$h_u$	Espessura da primeira camada de madeira	mm

$H$	Número de elementos com fronteira convectiva e/ou radiativa ( $\Gamma_c$ e/ou $\Gamma_r$ )	Adimensional
$L$	Comprimento do vão do elemento horizontal	mm
$N_i$ e $N_j$	Funções de forma	Adimensional
$k_0$	Fator correspondente ao tempo de estabilização dos perfis de temperatura na secção residual	Adimensional
$k_{pos,exp,i}$ e $k_{pos,exp,n}$	Coefficientes de posição das camadas, tendo em conta o lado exposto ao fogo	Adimensional
$k_{pos,unexp,i}$	Coefficiente de posição das camadas, tendo em conta o lado não exposto ao fogo	Adimensional
$k_{j,i}$ e $k_{j,n}$	Coefficientes para juntas de união	Adimensional
$q''_{cond}$	Fluxo de calor por condução	W/m <sup>2</sup>
$q''_{conv}$	Fluxo de calor por convecção	W/m <sup>2</sup>
$q''_{rad}$	Fluxo de calor por radiação	W/m <sup>2</sup>
$Q$	Número de elementos com fronteira natural ( $\Gamma_q$ )	Adimensional
$\dot{Q}$	Calor gerado internamente por unidade de volume e tempo	J/m <sup>3</sup> s
$t$	Tempo	min
$t_1$	Tempo – 1.ª fase de carbonização	min
$\sum_{i=1}^{i=n-1} t_{prot,i}$	Soma dos tempos de proteção das camadas, na direção do fluxo de calor, que precedem a última camada do modelo no lado não exposto ao fogo	min
$t_{prot,0,i}$	Valor básico de resistência ao fogo das camadas de proteção	min
$t_{ins,n}$	Tempo de isolamento garantido pela última camada do modelo no lado não exposto ao fogo	min
$t_{ins,0,n}$	Valor básico de resistência ao fogo das camadas de isolamento	min
$t_{req}$	Tempo de resistência ao fogo requerido	min
$T$	Temperatura	°C
$T_0$	Temperatura média inicial	°C ou K
$T_f$	Temperatura do fluido	°C ou K
$T_{máx}$	Temperatura máxima pontual na superfície não exposta ao fogo	°C ou K
$T_{méd}$	Temperatura média na superfície não exposta ao fogo	°C ou K
$T_s$	Temperatura da superfície	°C ou K
$T_{sur}$	Temperatura da superfície recetora	°C ou K
$\Gamma_c$	Fronteira convectiva	Adimensional
$\Gamma_r$	Fronteira radiativa	Adimensional
$\Gamma_q$	Fronteira natural	Adimensional
$\beta_0$	Velocidade de carbonização não considerando arredondamentos	mm/min
$\beta_n$	Velocidade de carbonização considerando arredondamentos	mm/min

---

$\beta_{1,n}$	Velocidade de carbonização considerando arredondamentos e material de isolamento – 1.ª fase de carbonização	mm/min
$\beta_{2,n}$	Velocidade de carbonização considerando arredondamentos e material de isolamento – 2.ª fase de carbonização	mm/min
$\Delta t_i$ e $\Delta t_n$	Tempo de correção para camadas protegidas com gesso	min
$\nabla T$	Gradiente térmico	K/m
$\varepsilon_s$	Emissividade da superfície emissora	Adimensional
$\rho$	Massa volúmica	kg/m <sup>3</sup>
$\lambda$	Condutividade térmica do material	W/m·K
$v$	Velocidade de escoamento do fluido	m/s
$\sigma$	Constante de Stefan-Boltzman	W/m <sup>2</sup> ·K <sup>4</sup>
$\omega$	Teor de humidade	%

---

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. Contextualização

O desenvolvimento dos métodos e dos processos de engenharia tem permitido a aplicação de materiais mais ecológicos e sustentáveis em edifícios. A madeira apresenta-se como um destes materiais, tendo vindo a ser cada vez mais utilizada como elemento estrutural. Em edifícios de pequena dimensão, a aplicação é vasta e de há muito tempo. Por outro lado, o grande desafio da atualidade assenta na utilização da madeira como elemento construtivo em situações com exigências de resistência ao fogo.

A madeira e os seus derivados apresentam-se como uma boa alternativa a outros materiais, uma vez que, por si só, caracterizam-se por um bom isolamento térmico, acústico, facilidade no seu tratamento e manuseamento. A principal vantagem assenta no facto de ser um recurso renovável e existente na natureza.

Assim, a aplicabilidade de soluções construtivas utilizando a madeira dependem do conhecimento e da avaliação da sua capacidade estrutural quando sujeitas a condições de altas temperaturas induzidas por fogo. A utilização da madeira encontra-se regulamentada em normas europeias e eurocódigos, a partir de estudos desenvolvidos ao longo do tempo. Os regulamentos são definidos com base em métodos experimentais e equações simplificadas. Contudo, torna-se possível aferir que os estudos não avaliam todos os fatores que podem influenciar as propriedades térmicas e estruturais de um elemento em madeira. Os processos de fabrico e de transformação de aglomerados em madeira, assim como os diversos tipos de material são alguns dos fatores que variam de produto em produto. Com isto, o desenvolvimento de modelos numéricos para a análise das condições de resistência ao fogo em elementos construtivos de madeira poderá ser uma das principais soluções na avaliação da sua aplicabilidade na construção de edifícios.

## 1.2. Objetivos

Os principais objetivos do presente estudo e trabalho são:

- Definir e estudar modelos construtivos de suporte em aglomerado de madeira, protegidos com placas de gesso formando uma caixa de ar, tendo como base o eurocódigo 5;
- Avaliar o comportamento térmico dos modelos construtivos quando expostos à ação do fogo sob condições de incêndio padrão, tendo como base o eurocódigo 1;
- Obter resultados do tempo de resistência ao fogo nos elementos em estudo, quando expostos a incêndio;
- Desenvolver correlações de dados para o projeto na avaliação da resistência ao fogo desses elementos construtivos.

### 1.3. Metodologia

De modo a atingir os objetivos propostos, adotou-se a seguinte metodologia:

- Pesquisa bibliográfica dos materiais em estudo com aplicabilidade em edifícios e exigências de condições mínimas regulamentares de resistência ao fogo;
- Compreensão da deflagração e propagação de um incêndio urbano e dos critérios de resistência ao fogo, definidos de acordo com as normas europeias;
- Análise da regulamentação europeia e eurocódigos de base, para o projeto de elementos construtivos utilizando madeira e do seu comportamento quando sujeitos a condições de elevadas temperaturas induzidas pelo fogo;
- Estudo dos modos de transferência de calor e a sua relação com situações de incêndio, no âmbito da análise térmica a desenvolver;
- Pesquisa bibliográfica de métodos analíticos, experimentais e computacionais de avaliação do comportamento da madeira sob condições de fogo desenvolvidos por investigadores, de modo a compreender a evolução dos estudos realizados nos últimos anos;
- Estudo e análise de um modelo de teste experimental e consequente validação numérica com base num programa de elementos finitos, considerando uma análise térmica não linear em regime transiente, para a obtenção da resistência ao fogo;
- Aplicação e estudo das metodologias de análise de elementos construtivos de madeira, nomeadamente, a secção residual e o critério de isolamento térmico, de acordo com a norma EN 1363-1:2020 [1];
- Estudo da influência dos parâmetros geométricos de novos modelos construtivos de madeira com proteção em gesso na resistência ao fogo;
- Aplicação e análise de um método simplificado para o cálculo analítico da resistência ao fogo de elementos construtivos de madeira com proteção.

### 1.4. Estrutura da dissertação

A presente dissertação encontra-se dividida em sete capítulos, que apresentam a seguinte ordem: Introdução, Revisão bibliográfica, Análise térmica, Validação experimental, Novos modelos paramétricos, Método simplificado e, por último, Conclusões.

No presente e primeiro capítulo, realizou-se uma introdução ao tema através da sua contextualização, seguido dos objetivo e metodologias para concretização do estudo.

No segundo capítulo, referente à revisão bibliográfica, foram abordadas diversas temáticas com relevância para o desenvolvimento do estudo. Inicialmente, abordaram-se os materiais e as suas características, seguidos pela ação do fogo, modos de transferências de calor e, por último, metodologias desenvolvidas por investigadores para análise de madeira sob condições de fogo.

No terceiro capítulo, apresentaram-se as propriedades térmicos dos materiais utilizados nos estudos, ou seja, madeira, gesso e ar, assim como a formulação de elementos finitos

considerada para elaboração das análises térmicas dos elementos construtivos quando expostos à ação do fogo.

No quarto capítulo, elaborou-se a validação do modelo experimental, no qual se apresentam o modelo em estudo e as metodologias numéricas desenvolvidas, com base no método dos elementos finitos. Numa primeira fase é apresentado o estudo conduzido por H. Takeda e J. R. Mehaffey [2], seguindo-se os modelos numéricos desenvolvidos sustentados pelos elementos finitos, malhas e condições de fronteira. A validação dos modelos numéricos é sustentada pela apresentação dos resultados obtidos para os campos de temperatura, carbonização, secção residual e critério de isolamento térmico.

No quinto capítulo, desenvolveu-se um estudo de modelos paramétricos através da afetação dos diversos parâmetros geométricos. O estudo tem como base uma metodologia sequencial para avaliação do impacto dos parâmetros na resistência ao fogo da solução construtiva. Neste sentido, o estudo iniciou-se pela avaliação da distância entre centros, seguida pelo estudo da altura da madeira e, por consequência, da largura do mesmo elemento. Por último, avaliou-se o impacto da espessura do gesso. O estudo é concluído por uma análise do efeito e influência de cada elemento.

No sexto capítulo, apresenta-se um método simplificado para o cálculo da resistência ao fogo de modelos construtivos de madeira com proteção, através da sua aplicação ao modelo de validação experimental e ao modelo paramétrico com melhor desempenho. O capítulo termina com uma análise à aplicabilidade deste método na generalidade das soluções construtivas deste tipo.

Por último, no sétimo capítulo, apresentam-se as conclusões finais, assim como limitações e propostas de trabalhos futuros, tendo como base todos os estudos desenvolvidos ao longo do presente trabalho.

Página propositadamente em branco

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica encontra-se estruturada em quatro subcapítulos: materiais e características; ação do fogo; transferência de calor e metodologias. Em cada subcapítulo abordam-se diversos tópicos relacionados com o estudo principal do presente relatório.

### 2.1. Materiais e Características

#### 2.1.1. Madeira Lamelada Colada

A madeira é um recurso natural abundante que, durante milhares de anos, evoluiu desde um material de construção primitivo até às soluções modernas aplicadas em diversas áreas, nomeadamente na engenharia [3]. Atualmente, é utilizada em grande escala como elemento estrutural em mobiliário, construções residenciais e pontes [4,5]. Embora seja um material altamente combustível, apresenta-se como uma alternativa atrativa e sustentável quando comparado com o betão e materiais metálicos [4,6].

A madeira é um material anisotrópico e ortotrópico, ou seja, possui propriedades distintas dependendo da sua orientação [7]. Apesar disto, considerando a sua ortotropia, nessas direções as propriedades são constantes. A madeira pode ser caracterizada e definida em três eixos: longitudinal, radial e tangencial [8], conforme se verifica na Figura 1. Adicionalmente, é ainda higroscópica pelo que as suas propriedades no regime elástico são fortemente afetadas pelo teor de humidade [9].

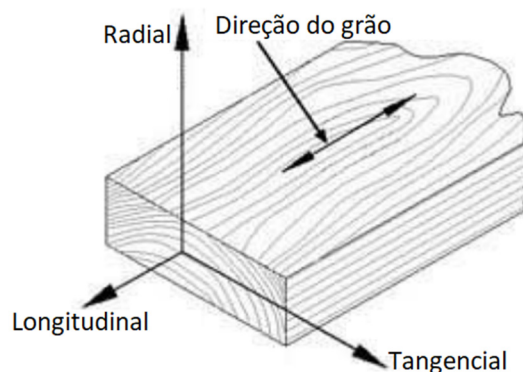


Figura 1 - Direções principais da madeira (Adaptada [10])

Analisando a Figura 1, o eixo longitudinal refere-se à direção do grão, isto é, a direção paralela ao eixo das fibras, o eixo radial corresponde à direção perpendicular às fibras (direção normal aos anéis de crescimento) e, por fim, o eixo tangencial diz respeito à direção perpendicular ao grão e tangente aos anéis de crescimento [7].

Os principais fatores que influenciam as suas propriedades são a massa volúmica, o teor de humidade, os anéis de crescimento e o alinhamento do grão [9]. De um modo geral, a madeira é caracterizada com uma baixa massa volúmica, alta resistência e rigidez, boa tenacidade e excelente maquinabilidade, todos estes associados a uma forte componente sustentável [3, 11, 12].

Os principais constituintes da madeira são celulose, hemiceluloses e lenhina [6]. A sua classificação é subdividida em dois tipos, a madeira folhosa (*hardwood*) e a madeira resinosa (*softwood*) [6, 13]. A distinção entre ambas é verificada na sua composição. A madeira resinosa possui, geralmente, uma maior fração mássica de lenhina, quando comparada com a madeira folhosa, apesar da sua constituição possuir a mesma quantidade de celulose, tal como é possível verificar na Tabela 1 [6].

Tabela 1 - Composição química de madeira seca em fração mássica (Adaptada) [6].

Tipo de Madeira	Celulose	Hemicelulose	Lenhina
Madeira resinosa, ( <i>softwood</i> )	40-44	20-32	25-35
Madeira folhosa, ( <i>hardwood</i> )	40-44	23-40	18-25

Em 2021, Shi L. e Chew M. [6] realizaram um estudo no qual foi aferido que a temperatura de ignição de *hardwoods* encontra-se entre 423 e 613 K, enquanto as *softwoods* possuem valores entre 531 e 755 K. A justificação para este resultado está relacionada com a maior fração de lenhina presente nas *softwoods*, dado que este componente possui maior temperatura de degradação. Considerando este estudo, torna-se possível concluir que nas condições em que é exigida resistência ao fogo serão aplicadas madeiras do tipo *softwood*.

Analisando a família das *softwoods*, encontram-se as madeiras laminadas, nomeadamente a *cross-laminated timber* (CLT) e a *glued-laminated timber* (GLT). A utilização destes produtos permitiu a conceção e a execução de edifícios de maiores dimensões considerando a madeira como principal elemento estrutural, nomeadamente em termos de altura. Apesar de ambos serem constituídos por diversas placas de madeira, a sua distinção é realizada analisando a orientação do grão. A madeira lamelada colada é caracterizada por laminação em todas as placas na mesma direção de grão, enquanto a madeira lamelada cruzada possui um cruzamento da orientação do grão de forma alternada. Pelo facto da GLT ser unidirecional, possui uma melhor resistência a esforços de compressão, pelo que a sua principal aplicação, ao nível estrutural, é em colunas e pilares. Por outro lado, a CLT é utilizada, normalmente, em lajes e paredes, onde as cargas são de direção variável [14, 15, 16].

O presente estudo incide na utilização da GLT, também denominada por *Glulam*. A sua classificação como produto é realizada através da abreviatura GL, seguida de dois algarismos e uma letra no final. Os dois algarismos indicam o valor da resistência à flexão em MPa. O caractere no final indica a constituição do produto, existindo duas soluções. Uma *glulam* poderá ser construída com uma única espécie de madeira sendo, assim, homogénea (h) ou, em alternativa, poderá possuir duas espécies de madeira, ou seja, combinada (c) [17].

## 2.1.2. Materiais de Proteção Passiva

A segurança e proteção contra incêndios em edifícios inclui duas vertentes principais, a proteção ativa e a passiva [18].

A proteção ativa inclui diversos sistemas previstos em projeto de Segurança Contra Incêndio em Edifícios (SCIE), tais como, detecção, alarme e alerta de incêndio, meios de intervenção como extintores e sistema de extinção automática por água, i.e. “*sprinklers*”, assim como iluminação de emergência.

A proteção passiva consiste na tentativa de confinar o fogo e diminuir a sua velocidade de propagação [18]. Esta proteção definida em projeto de SCIE compreende, essencialmente, a compartimentação corta-fogo. A compartimentação consiste na separação entre espaços distintos atribuindo características mínimas regulamentares de resistência ao fogo a elementos construtivos, tais como, paredes, portas, vãos envidraçados, cortinas corta-fogo e lajes. Com isto, um ponto fulcral da compartimentação diz respeito aos materiais de proteção passiva, ou seja, o modo como garantem resistência ao fogo e reagem ao mesmo.

### 2.1.2.1. Gesso

Atualmente, as placas de gesso cartonado têm-se tornado uma prática muito comum em edifícios quando se pretende garantir proteção passiva a incêndio. Devido à sua forma retangular, estas são maioritariamente utilizadas em soluções construtivas de paredes e tetos [19].

As placas de gesso são constituídas por um núcleo incombustível (gesso) revestido com uma superfície lamelada de papel [2]. O gesso é um material sólido poroso composto maioritariamente por sulfato de cálcio di-hidratado ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) [20]. Analisando a sua fórmula molecular, para cada molécula de sulfato de cálcio existem duas moléculas de água quimicamente ligadas na matriz cristalina do material [20]. Em relação ao balanço mássico do gesso, este possui aproximadamente 21% em massa de água quimicamente ligada [20]. Em adição, considera-se ainda a existência de uma pequena percentagem de água absorvida [2]. Com isto, torna-se possível verificar que a presença de água é uma das principais características para dotar o gesso com propriedades de resistência ao fogo [20, 21].

De uma forma geral, quando aquecido a temperaturas superiores a 80°C, o gesso inicia um processo de calcinação, no qual se inicia a dissociação das ligações químicas entre a água e o sulfato de cálcio resultando, assim, na formação de vapor de água. Contudo, o despoletar desta reação química encontra-se dependente de uma absorção de energia térmica de, aproximadamente, 625 kJ por kg de gesso, pelo que a temperatura de iniciação do processo dependerá de outros fatores [2].

Estudos indicam que a desidratação do gesso e libertação de vapor de água ocorrem em duas reações químicas reversíveis distintas. Ambas as reações são endotérmicas, ou seja, absorvem energia. Neste caso, a energia absorvida sob a forma de calor permite retardar o fluxo de calor no interior da placa e, por conseguinte, melhorar as propriedades de resistência ao fogo [20]. O fluxo de calor é retardado ao longo de toda a reação química de calcinação/desidratação [2], ocorrendo, geralmente, a temperaturas no intervalo de 125°C a 225°C [20].

Adicionalmente, sendo o gesso um material poroso, não homogêneo na sua composição e com propriedades dependentes do teor de água conclui-se que as suas propriedades térmicas, nomeadamente a condutividade térmica que influencia diretamente a resistência ao fogo, possuem uma variabilidade significativa [19].

#### **2.1.2.2. Fibras de Polipropileno**

Atualmente, o betão continua a ser um dos principais elementos estruturais e construtivos nos edifícios. Contudo, agregados de betão com massa volúmica elevada e baixa permeabilidade, quando sujeitos ao fogo, possuem tendência a fissurar. Este fenómeno tem como consequência a possível diminuição da integridade estrutural do edifício. De modo a prevenir e reduzir a ocorrência de fendas pode-se recorrer à adição de fibras de polipropileno no betão [18]. Sendo um polímero, as fibras atingindo a sua temperatura de fusão (aproximadamente 170°C) fundem e aglomeram-se no betão, promovendo o reforço das ligações internas [22]. Adicionalmente, o facto da expansão térmica das fibras de polipropileno ser consideravelmente superior à do betão contribui para o aumento da resistência do aglomerado [23]. Por fim, a conjugação destes fatores aumenta a permeabilidade do betão, permitindo a redução da pressão exercida pela expelição do vapor de água, resultado do aumento da temperatura em caso de incêndio. Este fenómeno faz com que apenas se criem microfissuras na estrutura, não reduzindo, assim, a resistência ao fogo da estrutura [18].

#### **2.1.2.3. Lã Mineral**

A lã mineral, denominada vulgarmente por lã de rocha, é um material natural incombustível. Possui capacidade de suportar temperaturas até 1000°C, sendo que a partir de temperaturas superiores inicia o processo de degradação das suas fibras. Adicionalmente, devido às suas excelentes propriedades térmicas é habitualmente utilizada como isolamento térmico em paredes interiores e exteriores [18]. Sendo incombustível classifica-se na euroclasse de reação ao fogo A1, ou seja, não contribui para a propagação de incêndio dado que não produz fumo ou gotículas [24]. Este facto, aliado à sua baixa condutividade garante uma elevada resistência e estabilidade ao fogo. A principal utilização da lã mineral revela-se como núcleo em painéis *sandwich* compostos por placas de gesso cartonado com a seguinte configuração: gesso cartonado – lã mineral – gesso cartonado. Outras aplicações passam pela proteção de membros estruturais em construção metálica e isolamento de condutas e ductos [18].

#### **2.1.2.4. Materiais Intumescentes**

Os materiais intumescentes são essencialmente utilizados como revestimento de soluções construtivas. Estes apresentam-se na forma de tinta, sendo que esta poderá ser de base aquosa, de base solvente ou de base epóxi. São principalmente aplicados em estruturas metálicas, em condutas, paredes e lajes com exigência de resistência ao fogo. De um modo geral, um material intumescente reage quimicamente na presença de um aumento de temperatura, normalmente entre 200°C e 250°C. Esta reação consiste numa expansão em volume que desencadeia uma diminuição da sua densidade resultando, assim, numa baixa condutividade térmica [18].

Um revestimento intumescente pode ser avaliado pela sua espessura, dado que existem distinções na sua aplicabilidade. Aplicando tintas aquosas ou de solvente obtém-se uma película fina com espessura entre 1 e 3 mm. Neste caso, a reação química de expansão provoca a libertação de gases, tais como, dióxido de carbono, amoníaco e vapor de água. A presença de gases permite uma expansão volumétrica do revestimento intumescente de aproximadamente 20 a 50 vezes do seu volume inicial. Esta considerável expansão permite alcançar uma proteção até 120 minutos. Ao nível da sua aplicabilidade, as películas finas são utilizadas para proteção passiva de fogos celulósicos em pequenos edifícios comerciais ou industriais [18].

Por último, as tintas de base epóxi permitem a obtenção de uma película espessa de proteção com revestimentos superiores a 5 mm. Estes materiais são utilizados, essencialmente, em edifícios de maior altura e em indústrias devido a serem locais com risco potencial de ocorrer um fogo de hidrocarbonetos. A sua reação química, perante o aumento da temperatura, ocorre de forma semelhante aos revestimentos aquosos ou de solvente. Contudo, a base epóxi permite uma proteção adicional à corrosão dos elementos metálicos estruturais, quando em contacto com água proveniente do combate ao incêndio [18].

#### 2.1.2.5. Materiais Incombustíveis

Os materiais ou produtos incombustíveis são aqueles que apresentam uma contribuição insignificante para a deflagração, o desenvolvimento e a propagação do fogo [24]. Estes materiais, ao nível da regulamentação de SCIE, enquadram-se nas euroclasses de reação ao fogo A1 e A1<sub>FL</sub> (classe respetiva a pavimentos, originalmente *Floors - FL*). A classificação ao nível da classe de reação ao fogo dos materiais encontra-se dependente de ensaios regulamentados como, por exemplo, a bomba calorimétrica e o forno de reação com base na norma ISO. Contudo, de modo a minimizar os custos para determinação da reação ao fogo tornou-se possível realizar a classificação dos materiais sem ensaios através da criação das listas CWFT (*Classification Without Further Testing*). A inclusão dos materiais nas listas encontra-se limitada por um conjunto de fatores: o produto deve estar conforme a regulamentação europeia e possuir um determinado grau de exatidão; o desempenho do produto deve ser considerado estável; e a classe de reação ao fogo deve ser obtida com uma margem de segurança considerável [24].

Assim, a primeira lista CWFT publicada diz respeito aos materiais incombustíveis (classes de reação A1 e A1<sub>FL</sub>), cuja classificação realiza-se sem necessidade de ensaios. Alguns materiais incluídos na lista podem ser consultados na Tabela 2.

Tabela 2 - Materiais incombustíveis incluídos nas classes de reação ao fogo A1 e A1<sub>FL</sub> sem necessidade de ensaio [24]

<b>Materiais metálicos</b>	<b>Materiais de Construção</b>	<b>Materiais Cerâmicos</b>	<b>Materiais Naturais</b>
Ferro, Aço e Aço inoxidável	Betão Lã mineral	Vidro	Lãs de rocha, de vidro ou de escória de alto-forno
Cobre e Ligas de cobre	Cimento	Vidro cerâmico	Gesso e massas de gesso
Alumínio e ligas de alumínio	Elementos à base de argila	Cerâmica	Pedra Natural e ardósia

Adicionalmente, importa referir que a presente lista não contempla os produtos na sua forma final e os respetivos fornecedores. Em determinadas soluções construtivas poderá ser exigível realizar ensaios de classificação de modo a verificar a classe de reação ao fogo.

## 2.2. Ação do Fogo

### 2.2.1. Curvas de Incêndio

De modo a avaliar o comportamento dos materiais e das soluções construtivas quando sujeitas a condições de fogo torna-se necessário padronizar e normalizar os testes experimentais. Esta padronização foi criada aquando da elaboração da norma ISO 834-1:199 [25]. Esta norma especifica o método de teste para determinação da resistência ao fogo de diversos elementos de construção quando sujeitos a condições de incêndio padrão. A norma apresenta a curva nominal, denominada como curva de incêndio padrão ISO 834. A curva de incêndio padrão consiste numa função logarítmica que descreve a evolução da temperatura ao longo do tempo, de acordo com a equação 1.

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

Apesar da curva ISO 834 ser a mais utilizada como referência para a avaliação da resistência ao fogo, de acordo com o EC1-1-2, EN 1991-1-2 (2010) [26], existem duas curvas adicionais, a curva de incêndio para elementos exteriores e a curva para incêndio de hidrocarbonetos.

A curva de incêndio para elementos exteriores consiste numa função exponencial que descreve a evolução da temperatura ao longo do tempo, de acordo com a equação 2.

$$T = 660 (1 - 0,687 e^{-0,32t} - 0,313 e^{-3,8t}) + 20 \quad (2)$$

A curva de incêndio de hidrocarbonetos, à semelhança da curva para elementos exteriores, consiste numa função exponencial que descreve a evolução da temperatura ao longo do tempo, de acordo com a equação 3.

$$T = 1080 (1 - 0,325 e^{-0,167t} - 0,675 e^{-2,5t}) + 20 \quad (3)$$

Nas equações anteriores,  $T$  representa a temperatura dos gases na proximidade do elemento em °C e  $t$  o tempo decorrido do incêndio em minutos.

A representação gráfica das curvas de incêndio definidas pelas funções das equações 1 a 3 encontra-se presente na Figura 2.

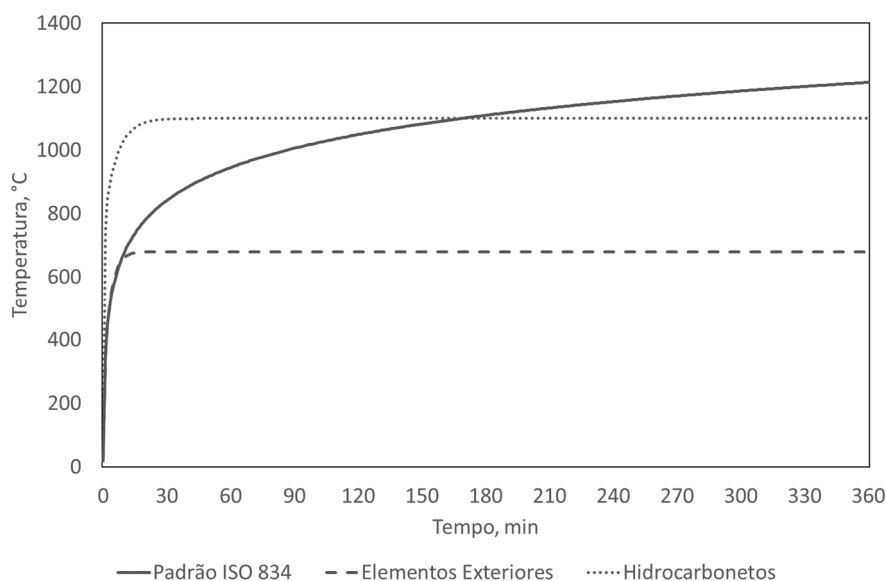


Figura 2 - Curvas de Incêndio

Analisando as três curvas apresentadas é possível retirar algumas conclusões. No que diz respeito às curvas utilizadas para compartimentos de fogo interiores aos edifícios, ou seja, a curva de incêndio padrão e a de hidrocarbonetos, possuem comportamentos bastante distintos. A curva de incêndio padrão aumenta progressivamente ao longo do tempo e revela-se sempre crescente até aos 360 minutos, ascendendo até uma temperatura aproximadamente de 1200°C. Por outro lado, a curva de incêndio de hidrocarbonetos revela-se mais enérgica, no sentido em que a temperatura aumenta muito rapidamente. A temperatura máxima é alcançada em aproximadamente 30 minutos e permanece constante ao longo do tempo, igual a 1100°C.

A curva de incêndio para elementos exteriores tem um crescimento semelhante à de hidrocarbonetos, ou seja, a temperatura máxima é igualmente atingida em aproximadamente 30 minutos e permanece constante ao longo do tempo. Contudo, esta curva possui como valor máximo 680°C. Esta temperatura, pode ser justificada pelo facto de ser utilizada para elementos estruturais exteriores, expostos ao fogo, diretamente a partir do interior do compartimento através das aberturas nas fachadas do edifício como, por exemplo, janelas [27].

### 2.2.2. Critérios de Resistência ao Fogo

Segundo o EC1-1-2, EN 1991-1-2 (2010) [26], resistência ao fogo define-se como a “Capacidade de uma estrutura, de parte de uma estrutura ou de um elemento para desempenhar as funções pretendidas (função de suporte de cargas e/ou função de compartimentação) para um nível de carga específico, quando sujeita a uma situação de incêndio específica e durante um período de tempo especificado”.

Analisando a definição de resistência ao fogo atribuída pelo EC1-1-2, EN 1991-1-2 (2010) [26], esta apresenta-se de forma generalista sendo necessário avaliar a definição atribuída de acordo com a regulamentação portuguesa. Assim, de acordo com a Portaria n.º 135/2020, de 2 de junho, que define o Regulamento Técnico de Segurança Contra Incêndio em Edifícios (RT-SCIE) [28], resistência ao fogo é a “Propriedade de um elemento de construção, ou de outros componentes de

um edifício, de conservar durante um período de tempo determinado a estabilidade ou a estanquidade, isolamento térmico, resistência mecânica, ou qualquer outra função específica, quando sujeito ao processo de aquecimento resultante de um incêndio”.

De forma sucinta, a resistência ao fogo consiste no tempo durante o qual os elementos estruturais ou outros componentes mantêm as suas propriedades iniciais e desempenham as funções intrinsecamente atribuídas. Neste ponto, outros componentes de um edifício podem ser enquadrados como condutas, ductos, armários técnicos, entre outros, nos quais, por condições técnicas e regulamentares especificadas poderão ter a necessidade de possuir classificação ao nível da resistência ao fogo. Contudo, estes equipamentos revelam-se como condições específicas, ou seja, a atribuição de resistência ao fogo aplica-se, essencialmente, a elementos construtivos não portantes e portantes, como pilares estruturais, paredes divisórias e lajes de pavimento.

De acordo com a norma EN 1363-1:2020 [1] e para a determinação da resistência ao fogo, os materiais e as soluções construtivas devem ser avaliados ao nível da Capacidade de carga (R), Integridade (E) e Isolamento térmico (I). Os testes de resistência ao fogo determinam o escalão de tempo pelo qual os componentes verificam cada um dos critérios, quando sujeitos a condições de temperatura e pressão pré-definidos na norma.

Adicionalmente, torna-se importante referir que os testes determinam a resistência ao fogo padrão, ou seja, resultam da aplicação das condições de temperatura definidas pela curva de incêndio padrão durante um determinado período de tempo específico. A avaliação dos materiais pode ser realizada para apenas uma ação ou para uma combinação de ações [26].

### 2.2.2.1 Capacidade de Carga

A capacidade de carga (R), definida no RT-SCIE como Estabilidade ao fogo, avalia a capacidade de um elemento de construção ou estrutural resistir ao colapso durante um período de tempo determinado, quando sujeito à ação de temperaturas elevadas resultantes de um incêndio [28]. Verifica-se que o critério se relaciona intrinsecamente com o escalão de tempo durante o qual é assegurada a resistência mecânica da solução construtiva [29].

Num edifício, os elementos de construção encontram-se, essencialmente, em duas posições: horizontal ou vertical. Os elementos horizontais podem ser enquadrados como vigas ou lajes de pavimento e são submetidos a esforços de flexão, Figura 3 a), enquanto os verticais são pilares ou paredes portantes carregadas axialmente, nomeadamente suportando esforços de compressão, tal como representado na Figura 3 b).



Figura 3 - Critério de resistência ao fogo - Capacidade de Carga (R): a) Vigas, b) Pilares (Adaptada [29])

Para os elementos submetidos à flexão, de acordo com a norma EN 1363-1:2020 [1], devem ser avaliados os parâmetros descritos nas equações 4 e 5.

- Deflexão máxima (D) [mm]:

$$D_{lim} = \frac{L^2}{400 d} \quad (4)$$

- Taxa limite de deflexão (dD/dt) [mm/min]:

$$\left(\frac{dD}{dt}\right)_{lim} = \frac{L^2}{9000 d} \quad (5)$$

Nas equações 4 e 5,  $L$  representa o comprimento do vão do elemento horizontal em mm e  $d$  a espessura da secção transversal do elemento em mm.

De acordo com a norma, na classificação de um elemento horizontal considera-se que existiu falha estrutural na situação em que ocorre um dos fatores descritos nas equações 6 e 7:

$$D_{verificada} \geq 1,5 D_{lim} \quad (6)$$

$$D_{verificada} > D_{lim} \wedge \left(\frac{dD}{dt}\right)_{verificada} > \left(\frac{dD}{dt}\right)_{lim} \quad (7)$$

Relativamente aos elementos submetidos a esforços axiais, de acordo com a norma EN 1363-1:2020 [1], os parâmetros analisados no teste de resistência ao fogo padrão são os descritos nas equações 8 e 9:

- Deslocamento de contração vertical limite (C) [mm]:

$$C_{lim} = \frac{h}{100} \quad (8)$$

- Taxa limite de deslocamento de contração vertical (dC/dt) [mm/min]:

$$\left(\frac{dC}{dt}\right)_{lim} = \frac{3 h}{1000} \quad (9)$$

Nas equações 8 e 9,  $h$  representa a altura do provete de teste no instante imediatamente após a aplicação da carga em mm.

Segundo os parâmetros definidos na norma, considera-se a existência de falha da capacidade de carga do elemento vertical aquando da ocorrência de um dos fatores indicados nas equações 8 e 9, ou seja, deslocamento de contração vertical limite ou taxa limite de deslocamento de contração vertical.

### 2.2.2.2 Integridade

O critério de Integridade (E) é definido como a capacidade de um elemento, com função de compartimentação, impedir a passagem de chamas e de gases quentes durante um determinado período de tempo, quando exposto ao fogo de um lado [26]. Na regulamentação portuguesa (RT-SCIE), este critério é denominado como Estanquidade ao fogo devido ao facto de não existir a passagem de fumos para o compartimento não exposto ao fogo [28]. Na Figura 4 encontra-se uma representação ilustrativa da comparação entre um elemento sem resistência ao fogo e um cumprindo o critério de Integridade (E).

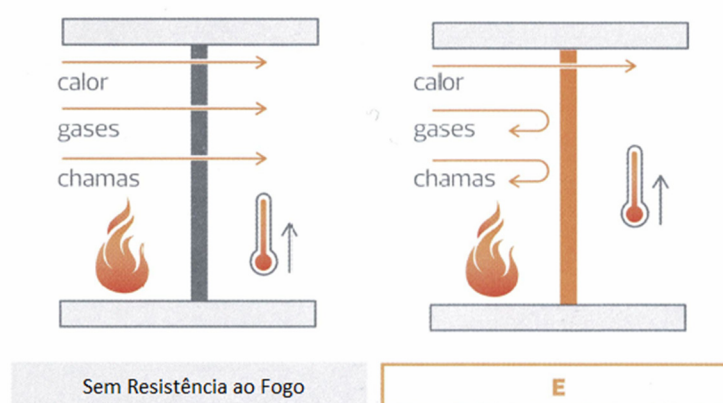


Figura 4 - Critério de resistência ao fogo - Integridade (E) (Adaptada [29])

Segundo a norma EN 1363-1:2020 [1], a avaliação deste critério deve consistir na verificação dos seguintes pontos: ignição de um modelo experimental de algodão; existência de fissuras ou poros de determinadas dimensões; e ocorrência de uma chama por um determinado período no lado não exposto ao fogo.

### 2.2.2.3 Isolamento térmico

O critério de Isolamento (I) diz respeito à propriedade de um elemento construtivo, com função de compartimentação, garantir que a temperatura na face não exposta ao fogo, não se eleva acima de um determinado valor, no período compreendido entre o início da exposição e o tempo definido de resistência em minutos [28].

Analisando a definição, considerando que no compartimento não exposto à ação do fogo não existe um aumento significativo da temperatura nas imediações do elemento construtivo é possível aferir que, verificando o isolamento térmico, a integridade é automaticamente cumprida. Adicionalmente, analisando a literatura de apoio ao projeto de SCIE [29] e o RT-SCIE [28] considera-se que o impedimento de passagem de chamas e gases quentes é uma condição necessária para a

verificação do isolamento térmico. Contudo, de acordo com a norma EN 1363-1:2020 [1] os critérios de resistência ao fogo devem ser analisados e verificados individualmente. Neste sentido, a norma define duas regras de análise aos critérios de resistência ao fogo:

1. os critérios de Integridade e Isolamento devem ser considerados não cumpridos se a Capacidade de Carga deixar de ser verificada;
2. o critério Isolamento deixa de ser cumprido assim que a Integridade ao fogo é comprometida e existe passagem de chamas e gases quentes para o compartimento não exposto ao fogo.

No que diz respeito ao Isolamento térmico, a norma EN 1363-1:2020 [1] define que a resistência ao fogo atribuída por este critério deve ser o menor escalão de tempo considerando os seguintes fatores:

- atingida uma temperatura máxima pontual na superfície não exposta ao fogo  $T_{máx}$  [°C ou K] superior 180°C ou 180K relativamente à temperatura média inicial  $T_0$  [°C ou K], de acordo com a equação 10:

$$T_{máx} = T_0 + 180 \quad (10)$$

- temperatura média na superfície não exposta ao fogo  $T_{méd}$  [°C ou K] superior 140°C ou 140K comparativamente à temperatura média inicial  $T_0$  [°C ou K], equação 11:

$$T_{méd} = T_0 + 140 \quad (11)$$

De acordo com a norma EN 1363-1:2020 [1], assim que a superfície não exposta ao fogo atinge uma temperatura superior à temperatura máxima pontual ou à temperatura média admissível deixa de ser verificado o critério de isolamento. Na Figura 5 observa-se uma ilustração do critério.

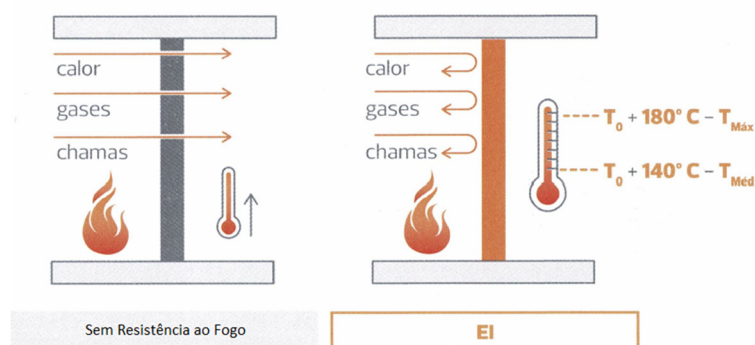


Figura 5 - Critério de resistência ao fogo - Isolamento (I) (Adaptada [29])

### 2.2.3. Classificação dos Elementos Construtivos

A classificação dos elementos construtivos ao nível da resistência ao fogo é definida pela norma EN 13501-2:2007 [30]. Esta norma europeia define a classificação dos elementos com base nos testes de resistência ao fogo realizados de acordo com a norma EN 1362-1:2020 [1].

Os elementos construtivos avaliados pela norma EN 13501-2:2007 [30] são os seguintes: Elementos com funções de suporte de carga e sem função de compartimentação; Elementos com função de suporte de carga e com função de compartimentação; Produtos e sistemas para proteção de elementos ou partes de obras com funções de carga e elementos ou partes de obras sem funções de suporte de carga. Adicionalmente, são definidas as resistências ao fogo de diversos elementos incorporados nos edifícios, tais como, portas corta-fogo, condutas de ventilação, chaminés e cabos elétricos.

Considerando que o elemento construtivo para análise no presente estudo é um elemento não portante com função de compartimentação, importa referir as classes de resistência ao fogo da norma EN 13501-2:2007 [30]. A norma define escalões de tempo em minutos que deverão ser atribuídos, com base nos testes de resistência ao fogo, aos critérios de resistência ou à combinação de vários. Assim, analisando um elemento com função de suporte de carga, integridade e isolamento térmico (REI) obtêm-se os seguintes escalões de tempo em minutos: 15, 20, 30, 45, 60, 90, 120, 180, 240, 360. Por outro lado, considerando um elemento que cumpre o critério de integridade e isolamento, sem função de suporte de carga (EI), a resistência ao fogo em minutos possui os seguintes valores: 15, 20, 30, 45, 60, 90, 120, 180, 240. Analisando os valores e realizando uma comparação verifica-se que os elementos com suporte de cargas possuem um patamar adicional de 360 minutos. Este valor bastante superior ao limite máximo de um elemento sem suporte de carga (240 minutos) é explicado pelo facto de os primeiros definirem os elementos estruturais dos edifícios e deverão ser os últimos a colapsar em situação de incêndio.

No presente trabalho, o estudo incidirá em elementos construtivos de madeira e gesso, não portantes, do tipo divisórias, sem função de suporte de cargas. Contudo, de forma a enquadrar as diferenças entre os escalões de tempo para elementos portantes e não portantes, ambas serão abordadas. Na regulamentação portuguesa, as classes de resistência dos elementos de construção são definidas pela Lei n.º 123/2019, que estabelece o Regime Jurídico da Segurança Contra Incêndio em Edifícios (RJ-SCIE) [31]. Os escalões de tempo atribuídos às combinações de classes de resistência ao fogo encontram-se nas Tabelas 3 e 4.

Tabela 3 - Classificação para elementos com funções de suporte de carga e com função de compartimentação resistente ao fogo - divisórias [31]

Classificação	Duração (minutos)									
	-	20	30	-	60	90	120	180	240	360
RE	-	20	30	-	60	90	120	180	240	360
REI	15	20	30	45	60	90	120	180	240	360
REI-M	-	-	30	-	60	90	120	180	240	360
REW	-	20	30	-	60	90	120	180	240	360

Tabela 4 - Classificação para elementos ou partes de obras sem funções de suporte de carga - divisórias [31]

Classificação	Duração (minutos)								
	-	20	30	-	60	90	120	-	-
<b>E</b>	-	20	30	-	60	90	120	-	-
<b>EI</b>	15	20	30	45	60	90	120	180	240
<b>EI-M</b>	-	-	30	-	60	90	120	180	240
<b>EW</b>	-	30	30	-	60	90	120	-	-

Com base nas tabelas 3 e 4 definidas no RJ-SCIE e comparando com as exigências regulamentares previstas no RT-SCIE é possível verificar algumas discrepâncias. Ao nível do RT-SCIE que serve, essencialmente, como principal base na elaboração do projeto de especialidade de SCIE, os escalões de tempo definidos para as classes de resistência ao fogo são apresentados de forma mais sucinta. No regulamento técnico apenas se prevê a aplicabilidade de elementos construtivos com base nos seguintes parâmetros em minutos: 30, 60, 90, 120 e 180.

Adicionalmente, apesar do RT-SCIE apenas definir os critérios de resistência referidos anteriormente, ou seja, Capacidade de Carga ou Estabilidade ao fogo, Integridade ou Estanquidade e Isolamento Térmico, o RJ-SCIE, de acordo com as tabelas 3 e 4, pressupõe a utilização de elementos construtivos que verifiquem os critérios de resistência ao fogo de Radiação (W) e de Ação Mecânica (M).

- **Radiação**

Segundo a norma EN 13501-2:2007 [30], a resistência ao fogo através do critério de resistência de radiação (W) é definida como a capacidade de um elemento construtivo reduzir a probabilidade de transmissão de fogo por efeito de radiação, quer através do próprio elemento ou pelas superfícies adjacentes, quando exposto ao fogo de um lado. Ao nível de comportamento ao fogo, o critério de radiação assemelha-se ao de isolamento térmico pelo que, segundo a regulamentação, um material que cumpra o isolamento verifica, igualmente, a resistência ao fogo por radiação num escalão de tempo igual. Adicionalmente, para que seja atribuída a classificação de radiação, os materiais e soluções construtivas devem, no máximo, permitir uma transferência de calor por radiação de 15 kW/m<sup>2</sup>. Considera-se que os materiais perdem esta propriedade assim que ocorrem fissuras na superfície com uma determinada dimensão ou, em alternativa, desencadeiam chamas permanentes no lado não exposto ao fogo [30].

- **Ação Mecânica**

No que diz respeito ao critério de ação mecânica (M), contrariamente aos restantes, este não representa um escalão de tempo na tentativa de impedir a propagação do fogo. De acordo com a norma EN 13501-2:2007 [30], este critério representa a capacidade de um elemento suportar um impacto proveniente de uma falha estrutural de outro como, por exemplo, o colapso de uma parede que resulta num impacto num pilar com resistência ao fogo. Para que seja atribuído o critério de ação mecânica a um elemento, este é submetido a um impacto após o término dos testes de capacidade de carga (R), integridade (E) ou isolamento (I) sendo que, caso não falhe estruturalmente é atribuída esta propriedade.

## 2.2.4. Carbonização

A resistência ao fogo dos elementos construtivos de madeira é influenciada pela carbonização do material [32]. Os elementos de madeira quando sujeitos ao fogo, sofrem um processo de degradação térmica denominado como pirólise. Este processo provoca, essencialmente, a produção de gases combustíveis e uma redução da massa volúmica no elemento, ou seja, a decomposição da madeira. Assim, considera-se que ocorre a carbonização da madeira, caracterizada por uma camada de carbono na superfície exposta ao fogo. Apesar de ocorrer a degradação da madeira, a camada de carbono constitui um bom isolamento térmico e protege a secção de madeira intacta do calor proveniente do fogo [33].

A camada de carbono, com a deflagração do incêndio, tem tendência em aumentar em espessura na direção perpendicular à superfície, reduzindo a secção residual de madeira não afetada até uma zona limite [33]. A zona de interface é definida pela transição entre uma camada de carbono, sem propriedades de resistência ou rigidez relevantes, e a camada de pirólise. Esta transição entre a madeira carbonizada e não carbonizada verifica-se a uma temperatura de aproximadamente 300°C e é definida como a linha de carbonização [32].

A taxa de carbonização depende de diversos fatores, tais como: tipo de madeira; massa volúmica; permeabilidade; composição; conteúdo de humidade; geometria do elemento; tipologia do incêndio e direção de carbonização, ou seja, paralela ou perpendicular ao grão [32, 34]. A taxa de carbonização encontra-se diretamente relacionada com a profundidade e a velocidade de carbonização. A profundidade de carbonização consiste na distância entre a superfície exterior da madeira carbonizada e a linha de carbonização. A velocidade de carbonização é um parâmetro essencial na determinação da resistência ao fogo de estruturas em madeira, uma vez que permite determinar o tamanho da secção residual e a área carbonizada [32].

Na prática, a carbonização sofre uma evolução não linear, devido às propriedades ortotrópicas da madeira, mas, de modo a simplificar o cálculo dos parâmetros associados, os modelos consideram a linearidade da degradação [32]. Assim, os estudos focam-se, essencialmente, em determinar uma taxa de carbonização nominal assumindo uma camada limite de resistência nula, de modo a contabilizar a degradação das propriedades mecânicas da madeira junto à linha de carbonização [34, 35].

De acordo com o EC5-1-2, EN 1995-1-2 (2003) [35], os métodos de cálculo apresentados avaliam a evolução linear do material carbonizado. Assim, a velocidade de carbonização pode ser calculada por dois métodos. O primeiro considera a perda de massa proveniente da degradação da madeira e o segundo a evolução linear da camada de carbonização, sendo este o mais utilizado, uma vez que permite um cálculo simplificado da secção residual de madeira intacta e da área degradada [35].

Considerando a situação de um elemento de madeira sem proteção submetida ao fogo apenas numa face, a evolução linear de material carbonizado  $d_{char,0}$  [mm] é calculada de acordo com a equação 12:

$$d_{char,0} = \beta_0 t \quad (12)$$

Por outro lado, o processo de degradação da madeira pode apresentar alterações como a fissuração e o arredondamento da sua superfície. Assim, considerando estes efeitos e uma exposição em mais do que uma face, o EC5-1-2, EN 1995-1-2 (2003) [35] prevê que a evolução linear da carbonização  $d_{char,n}$  [mm] se calcule aplicando a equação 13:

$$d_{char,n} = \beta_n t \quad (13)$$

Nas equações 12 e 13,  $t$  representa o tempo de exposição ao fogo em min e  $\beta_0$  e  $\beta_n$  consistem na velocidade de carbonização em mm/min. Contudo, verifica-se que as velocidades de carbonização possuem valores distintos. De acordo com a Tabela 5, conclui-se que  $\beta_n$  possui valores ligeiramente superior a  $\beta_0$ , uma vez que o aparecimento de defeitos no material provoca condições mais favoráveis à ocorrência de carbonização, aumentando a velocidade do processo.

Tabela 5 - Valores de velocidade de carbonização para madeira resinosa e folhosa [35]

Tipo de Madeira	Massa volúmica característica	$\beta_0$	$\beta_n$
<b>Madeira resinosa, (softwood)</b>	MLC, $\rho \geq 290 \text{ kg/m}^3$	0,65	0,7
	Madeira Maciça, $\rho \geq 290 \text{ kg/m}^3$	0,65	0,8
<b>Madeira folhosa, (hardwood)</b>	Madeira Maciça e Lamelados Colados, $\rho \geq 290 \text{ kg/m}^3$	0,65	0,7
	Madeira Maciça e Lamelados Colados, $\rho \geq 450 \text{ kg/m}^3$	0,5	0,55

### 2.3. Transferência de Calor

De modo a compreender a propagação e desenvolvimento de um incêndio torna-se necessário abordar os fenómenos de transferência de calor. Segundo Cengel [36], o calor é definido como uma forma de energia que é transferida de um sistema para outro como resultado de uma diferença de temperatura. Assim, a entrada ou saída de calor de um corpo irá provocar uma variação do seu teor energético que se traduz numa variação de temperatura ou numa mudança de fase do sistema [24]. A transferência de calor define-se como a ciência que estuda e determina as taxas de energia térmica trocada entre corpos distintos [36]. A transferência de energia, sob a forma de calor, realiza-se sempre das zonas ou corpos com maior temperatura para aqueles com menor temperatura [36]. Esta troca termina assim que a temperatura nas zonas distintas se equilibra [36].

A transmissão de calor pode ocorrer em regime estacionário, no qual a temperatura permanece constante, ou em regime variável, em que a temperatura varia no tempo e espaço. Num incêndio, a deflagração do fogo desenvolve-se em regime variável, uma vez que existem diversas variações da temperatura dos compartimentos no tempo e espaço [24].

Os mecanismos de transferência de calor são condução, convecção e radiação [36]. Analisando um edifício em situação de incêndio conclui-se que, num compartimento ou espaço, o calor é transferido por convecção dos gases quentes sobre a envolvente, isto é, paredes e tetos, por radiação das chamas e do fumo sobre os elementos presentes no espaço e, por último, por condução no seio das paredes e dos materiais [36]. Contudo, analisando de forma detalhada, é

possível aferir que numa solução construtiva de parede com caixa de ar existem os três mecanismos. Assim, existe condução nos materiais que constituem a parede, convecção no interior do vazio definido pela caixa de ar e radiação entre as superfícies que delimitam a caixa de ar.

### 2.3.1. Condução

O fenómeno de condução consiste na transferência de energia das zonas com maior energia cinética (temperatura superior) para as de menor energia cinética (temperatura inferior), como resultado das interações moleculares entre as partículas do meio material. Este método pode ocorrer em sólidos, líquidos e gases [36]. Nos meios sólidos, a transmissão de calor resulta da combinação de dois fatores, sendo estes a vibração no interior da malha e a energia transportada por eletrões livres. Nos gases e líquidos, ocorre devido à colisão das moléculas resultante do seu movimento direcional aleatório no meio [24].

A quantificação da energia transferida sob a forma de calor realiza-se aplicando a Lei de Fourier. Esta lei define que o fluxo de calor transmitido no fenómeno de condução depende da geometria do meio, da sua espessura, do tipo de material e, ainda, da diferença de temperaturas [36]. A lei de Fourier consiste numa solução analítica definida pela equação 14:

$$q''_{cond} = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \quad (14)$$

Em que  $q''$  é o fluxo de calor em  $W/m^2$ ,  $\lambda$  corresponde à condutividade térmica do material em  $W/mK$  e  $\partial T/\partial x$  diz respeito ao gradiente térmico ( $\nabla T$ ) em  $K/m$ .

Analisando a equação 14, conclui-se que o fluxo de calor por condução é diretamente proporcional à diferença de temperaturas entre as duas superfícies, à área de transferência de calor e à condutividade térmica do material, mas verifica-se inversamente proporcional à espessura.

De forma representativa, a condução térmica numa parede plana segue o princípio definido na Figura 6.

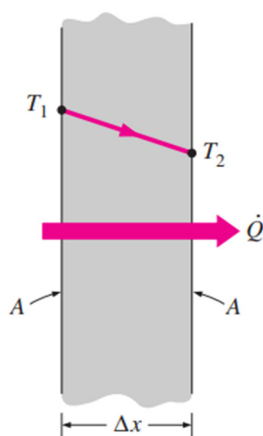


Figura 6 - Condução térmica numa parede plana [36]

### 2.3.2. Convecção

A convecção é o modo de transferência de energia térmica entre a superfície de um sólido e uma adjacente líquida ou gasosa com movimento relativo entre ambas. Assim, é possível afirmar que este processo envolve os efeitos combinados da transmissão de calor por condução e do movimento dos fluidos. Numa situação em que não existe movimento do fluido líquido ou gasoso não ocorre transmissão de calor por convecção, sendo esta realizada puramente por condução. O movimento relativo é uma condição obrigatória para a existência de convecção e, quanto mais rápida é a movimentação dos fluidos, maior é o fluxo de calor transmitido [36].

Num incêndio, considerando um compartimento de fogo, este é o modo de transferência de calor predominante, uma vez que transporta a energia térmica libertada pelo movimento dos gases quentes e fumos. Tendo em conta a combinação dos efeitos, esta ocorre quando os gases estão em movimento e transportam o calor que receberam, seja por contacto com a envolvente do compartimento a temperaturas superiores, seja, ainda, no seu próprio seio devido a uma reação química que provoca uma dissipação interna [24].

O fluxo de calor transferido por convecção em  $W/m^2$  pode ser descrito pela lei de arrefecimento de Newton expressa na equação 15:

$$q''_{conv} = h_c (T_s - T_f) \quad (15)$$

Em que  $h_c$  é o coeficiente de condutância térmica superficial por convecção em  $W/m^2 \cdot K$ ,  $T_s$  é a temperatura da superfície em K ou °C e  $T_f$  a temperatura do fluido em K ou °C.

É possível concluir que a energia transmitida é diretamente proporcional ao coeficiente de transferência de calor por convecção e à diferença de temperaturas entre o fluido líquido ou gasoso e a superfície sólida adjacente. Adicionalmente, o coeficiente  $h_c$  da equação 15 não é uma propriedade do fluido. Este é obtido experimentalmente e pode ser consultado em ábacos e tabelas de constantes termodinâmicas. A condutância térmica por convecção depende de fatores, tais como, a geometria da superfície do sólido, o regime de convecção, as propriedades dos fluidos e a velocidade de escoamento [36].

De modo a clarificar o fenómeno de convecção importa abordar a camada limite nos regimes de convecção. Desenvolvido por Prandtl, o conceito de camada limite consiste na zona do fluido em movimento junto à superfície do elemento sólido. Na sua teoria, considerou que a camada do fluido condiciona o efeito da transmissão de calor por convecção dado que se mantém praticamente aderente à superfície do sólido, sendo a sua existência justificada pelas tensões tangenciais provocadas pela viscosidade do fluido [24]. Na Figura 7 pode observar-se o perfil de variação de temperatura e da velocidade de escoamento.

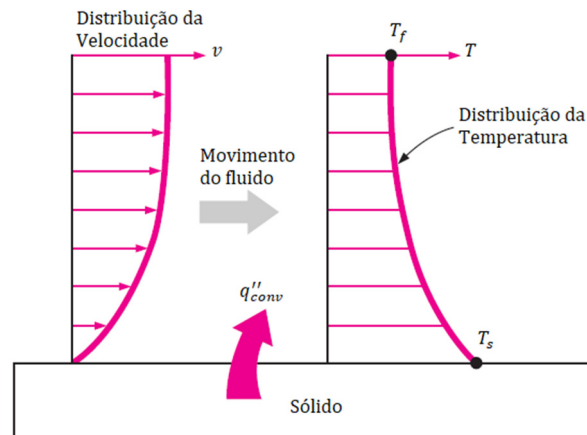


Figura 7 - Perfil de variação de temperatura e da velocidade de escoamento (Adaptada [36])

Em relação aos regimes de convecção, estes dividem-se em regime forçado ou natural. A convecção forçada é caracterizada por um movimento do fluido induzido por ação mecânica como, por exemplo, através de um ventilador ou bomba. Por outro lado, a convecção natural desenvolve-se devido a forças internas induzidas por diferenças de densidade causadas pela variação de temperatura no interior do fluido [36]. As diferenças encontram-se ilustradas na Figura 8. Considerando esta distinção é possível avaliar que, num incêndio, o fenómeno de convecção ocorre naturalmente, uma vez que o movimento dos fluidos acontece devido à libertação de energia no seio dos gases quentes.

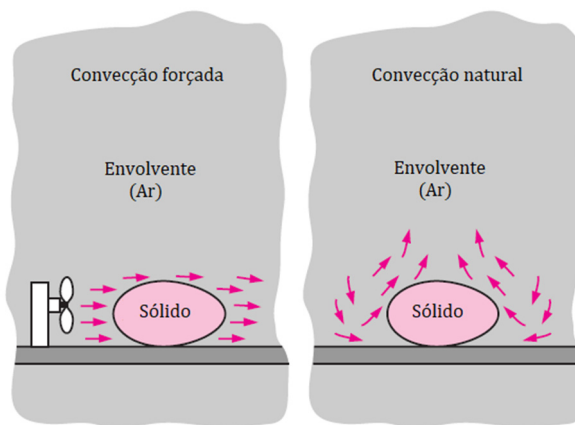


Figura 8 - Convecção forçada e natural (Adaptada [36])

### 2.3.3. Radiação

A transferência de calor por radiação consiste na emissão de energia sob a forma de ondas eletromagnéticas denominadas por fótons devido a alterações nas configurações eletrónicas de átomos ou moléculas. Ao contrário da condução e da convecção, a transmissão de calor por radiação não necessita da existência de meio natural, ou seja, pode propagar-se no vazio. Para que exista radiação, os corpos intervenientes devem possuir uma temperatura superior ao zero absoluto, ou seja, 273,15K [36].

A radiação eletromagnética possui um comprimento de onda superior à da luz visível enquadrando-se no domínio dos infravermelhos (entre 1 e 100  $\mu\text{m}$ ). Esta energia, quando atinge a superfície de um outro meio é refletida, transmitida e ainda absorvida, transformando-se em calor. Assim, conclui-se que todos os corpos emitem e absorvem radiações eletromagnéticas com uma intensidade que depende da sua temperatura e do estado físico da sua superfície [24].

O fluxo de calor transmitido por radiação em  $\text{W}/\text{m}^2$  é expresso pela equação 16:

$$q''_{rad} = \varepsilon_s \sigma (T_s^4 - T_{sur}^4) \quad (16)$$

Em que  $\varepsilon_s$  diz respeito à emissividade da superfície emissora (adimensional com valores compreendidos entre 0 e 1),  $T_s$  é a temperatura da superfície emissora em K ou  $^{\circ}\text{C}$  e  $T_{sur}$  a temperatura da superfície recetora em K ou  $^{\circ}\text{C}$ . Por fim,  $\sigma$  consiste na taxa de radiação máxima emitida por uma superfície à temperatura  $T_s$  em  $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}^4$ , sendo denominada como constante de Stefan-Boltzman.

O modo de radiação, à semelhança da convecção, possui um peso preponderante na propagação de um incêndio. Na presença de fogo, a troca de energia entre as superfícies ocorre, maioritariamente, por emissão e absorção por gases e felugem, sendo este último o fator predominante na sua deflagração. Adicionalmente, na presença de chamas com dimensão característica superior a 0,2 m, a transferência de calor por radiação apresenta fluxos de energia superiores às de condução e convecção [24].

## 2.4. Metodologias

### 2.4.1. Método Analítico

Em 2009, Andrea Frangi et al. [33] desenvolveram um modelo analítico simplificado baseado no método da secção residual reduzida definido no EC5-1-2, EN 1995-1-2 (2003) [35]. As considerações de simplificação do método foram as seguintes: evolução linear, ou seja, a relação linear entre a profundidade de carbonização e o tempo de exposição ao fogo; aproximação da exposição de elementos verticais apenas numa face, ao contrário das três exigidas pelo EC5-1-2, EN 1995-1-2 (2003) [35]; e consideram que não existe penetração do fogo nas cavidades superficiais ou, em alternativa, que estas estão preenchidas com um isolamento com ponto de fusão superior a  $1000^{\circ}\text{C}$  [33].

O método desenvolvido tem em consideração as duas fases da carbonização. A primeira diz respeito ao período de tempo no qual a profundidade de carbonização  $d_{char,n}$  [mm] é menor ou igual à espessura da primeira camada de madeira  $h_u$  [mm], quando os painéis são constituídos por mais de uma camada, de acordo com a equação 17.

$$d_{char,n} \leq h_u \quad (17)$$

Nesta fase, considera-se a influência de defeitos de fissuração, o arredondamento da sua superfície e o material de isolamento, ou seja, a velocidade de carbonização  $\beta_{1,n}$  [mm/min]. Assim, considera-se que a primeira fase possui uma duração igual a  $t_1$  [min], obtida com a equação 18.

$$t_1 = \frac{h_u}{\beta_{1,n}} \quad (18)$$

A segunda fase consiste na carbonização dos elementos interiores após a total carbonização da camada superficial considerada na primeira fase, ou seja, para a condição indicada na equação 19. A velocidade de carbonização  $\beta_{2,n}$  [mm/min] é diretamente influenciada pela espessura do elemento interior.

$$d_{char,n} > h_u \quad (19)$$

Considerando ambas as fases, para um determinado tempo de resistência ao fogo requerido  $t_{req}$  [min], o modelo analítico desenvolvido consiste na aplicação das equações 20 e 21, de modo a obter a profundidade de carbonização do elemento.

$$d_{char,n} = \beta_{1,n} t_{req}, 0 \leq t_{req} \leq t_1 \quad (20)$$

$$d_{char,n} = h_u + \beta_{2,n} (t_{req} - t_1), t_{req} \geq t_1 \quad (21)$$

Por fim, o método de cálculo permite a determinação da secção residual através da subtração da secção inicial com a profundidade efetiva de carbonização do elemento  $d_{ef}$  [mm], sendo esta última calculada com base na equação 22.

$$d_{ef} = d_{char,n} + k_0 d_0 \quad (22)$$

A profundidade adicional definida por  $k_0 d_0$  [mm] diz respeito à redução da resistência e rigidez da secção por efeitos do aumento da temperatura na secção residual do elemento. O fator  $k_0$  consiste num valor adimensional entre 0 e 1, que aumenta linearmente durante os primeiros 20 minutos de exposição ao fogo, uma vez que é este o tempo de estabilização dos perfis de temperatura nas zonas afetadas termicamente da secção residual [33, 37]. Para períodos superiores, deve ser considerado um fator  $k_0$  unitário.

O modelo analítico simplificado desenvolvido por Andrea Frangi et al. [33] prevê a aplicação das velocidades de carbonização e do fator  $d_0$  com base na Tabela 6.

Tabela 6 - Parâmetros definidos no método analítico simplificado [33]

Fase de carbonização	Velocidade de carbonização (mm/min)	Fator $d_0$ (mm)
1.ª Fase: $d_{char,n} \leq h_u$	$\beta_{1,n} = 0,8$	7
2.ª Fase: $d_{char,n} > h_u$	$\beta_{1,n} = 1,6$	20

## 2.4.2. Método Experimental

Em 2003, Andrea Frangi e Fontana [38] realizaram um projeto de investigação com o intuito de estudar o comportamento ao fogo de lajes e vigas de madeira, constituindo um núcleo formado pela caixa de ar envolvente. Os testes experimentais consistiram numa sequência de séries realizadas de acordo com os parâmetros da norma ISO 834 [25]. As análises consistiram num teste de resistência ao fogo das ligações entre os componentes em madeira em escala reduzida e numa avaliação a uma estrutura, em tamanho real, formadas pelos elementos em madeira. Através deste estudo, os autores concluem que, em condições de fogo padrão, as aproximações a equações simplificadas, baseadas em taxas de carbonização constantes, são possíveis entre os 30 e os 110 minutos de exposição [38]. Adicionalmente, as velocidades de carbonização verificadas experimentalmente aproximaram-se das previstas pelo EC5-1-2, EN 1995-1-2 (2003) [35]. Por fim, verificou-se que a taxa de carbonização do elemento aumentou consideravelmente assim que a secção residual alcançou cerca de 35% da secção inicial [38].

Em 2009, Andrea Frangi et al. [39] conduziram um estudo para avaliar o comportamento ao fogo de painéis CLT quando sujeitos a condições de incêndio padrão, e comparar com os resultados obtidos para elementos homogêneos de madeira. Os testes foram realizados em laboratório, à escala reduzida num forno com 1,0 x 0,8 m. Os resultados obtidos permitiram aos investigadores concluir que o comportamento ao fogo dos painéis CLT é altamente influenciado pelo tipo de adesivo utilizado na união das lamelas. Assim, dependendo das propriedades dos adesivos, o aumento da temperatura induzido pelo fogo provoca, a partir de determinada altura, o colapso da camada carbonizada. Esta desintegração, resulta no aumento da carbonização em taxas superiores a elementos homogêneos. Por outro lado, utilizando adesivos com maior resistência a temperaturas elevadas, verificou-se uma equidade entre as taxas de carbonização dos painéis CLT e dos elementos de madeira homogênea [39].

Ainda em 2009, Te-Hsin Yang et al. [40] concretizaram uma análise experimental de modo a determinar a profundidade da camada carbonizada, a taxa de carbonização e a libertação de energia calorífica de painéis de *Glulam* quando submetidas a uma exposição ao fogo, de acordo com a curva de incêndio padrão. O estudo consistiu na utilização de cinco tipos *glulam* com base de madeira resinosa, normalmente utilizadas em elementos construtivos aplicados em edifícios. Para cada tipo de *softwood* foram testados dois tipos de painéis, cada um com sete lamelados. Os provetes testados possuíam dimensões de 1800 x 190 x 38 mm e 1800 x 140 x 38 mm (comprimento x largura x espessura) e foram submetidos a testes de exposição ao fogo de 30 e 45 minutos. Através desta avaliação, os investigadores concluíram que as taxas de carbonização obtidas na grande parte dos tipos de *glulam* estavam de acordo com o definido no EC5-1-2, EN 1995-1-2 (2003) [35]. Adicionalmente, verificaram que a carbonização diminui com o aumento da massa volúmica dos painéis GLT. No que respeita à profundidade da camada carbonizada concluíram que, em painéis com maior massa volúmica e menor tempo de exposição ao fogo, esta foi consideravelmente superior a outros de menor massa volúmica, mas com maior tempo de ensaio [40].

Andrea Frangi et al. [41], [42], em 2010, executaram um estudo experimental para analisar o comportamento ao fogo de elementos construtivos de madeira, para uso em paredes ou em pavimentos, protegidos com placas de gesso cartonado em condições de fogo padrão. O principal objetivo consistiu na verificação dos critérios de resistência ao fogo de Integridade (E) e de Isolamento térmico (I). Para isso, foram conduzidos testes de exposição ao fogo em escala reduzida de elementos com diferentes propriedades, ao nível do material, espessura, posição e número de revestimentos de proteção. No decorrer do estudo, foram consideradas placas de gesso cartonado do tipo A e do tipo F. As placas do tipo A possuem um núcleo formado por gesso poroso sem reforço, enquanto as do tipo F possuem um núcleo reforçado com fibras de vidro e outros isolamentos que permitem uma melhor resistência ao fogo, possuindo uma maior massa volúmica quando comparadas com as de tipo A. Adicionalmente, foram consideradas soluções construtivas possuindo caixa de ar e outras com isolamento térmico preenchendo esse vazio. O primeiro estudo experimental considerado consistiu na avaliação do período de tempo de diferentes soluções construtivas, de acordo com a Figura 9. O teste terminava assim que fosse atingida uma temperatura média de 250°C e uma temperatura pontual de 270°C na superfície não exposta ao fogo [41, 42].

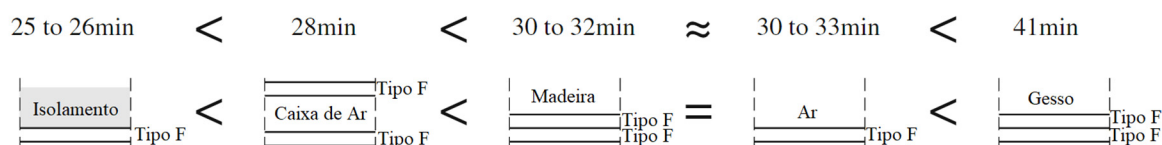


Figura 9 - Verificação experimental do tempo até atingir uma temperatura média de 250°C e uma temperatura pontual de 270°C na superfície não exposta ao fogo (Adaptada [41, 42])

O segundo estudo experimental consistiu na validação das condições exigidas para atribuição do critério de isolamento térmico (I) a um elemento construtivo. Assim, os investigadores [41, 42], submeteram diferentes soluções de modo a verificar o impacto das alterações dos materiais constituintes na resistência ao fogo, de acordo com a Tabela 7.

Tabela 7 - Verificação experimental do critério de isolamento térmico (I) de diferentes soluções construtivas [41, 42]

Solução construtiva	Tempo de validação de isolamento térmico (min)
10 + 10 + 10 mm placas de gesso cartonado do tipo F	57
15 + 15 mm placas de gesso cartonado do tipo F com cavidade de 80 mm preenchida com fibra de madeira ( $\rho = 178 \text{ kg/m}^3$ )	72
15 + 15 mm placas de gesso cartonado do tipo F com caixa de ar	80
15 + 15 mm placas de gesso cartonado do tipo F	83
15 + 15 mm placas de gesso cartonado do tipo F com cavidade de 80 mm preenchida com fibra de vidro ( $\rho = 27 \text{ kg/m}^3$ )	85
15 + 15 mm placas de gesso cartonado do tipo F com cavidade de 40 mm preenchida com lã de rocha ( $\rho = 31 \text{ kg/m}^3$ )	> 85 (teste interrompido)
15 + 15 mm placas de gesso cartonado do tipo F com cavidade de 40 mm preenchida com lã de rocha ( $\rho = 10 \text{ kg/m}^3$ )	> 85 (teste interrompido)

Em 2019, Alastair I. Bartlett et al. [34] publicaram um estudo onde apresentaram um conjunto de fatores obtidos experimentalmente que afetam a taxa de carbonização média de elementos construtivos em madeira expostos ao fogo. Assim, os autores concluíram que as principais propriedades da madeira que afetam a sua resistência ao fogo são a massa volúmica e o teor de humidade, provocando um aumento da taxa de carbonização até 18%. Ainda assim, o principal fator que influencia a diminuição da resistência ao fogo consiste no fluxo de calor induzido pela temperatura do fogo. O fluxo de calor é diretamente proporcional à área de exposição do elemento, ou seja, quanto maior a área exposta de madeira maior será o fluxo de calor que induzirá uma maior energia térmica para iniciação das reações químicas de pirólise. Por outro lado, verificou-se que a colocação de um revestimento de proteção com resistência ao fogo reduz a taxa de carbonização e retarda o colapso do elemento em aproximadamente 80% [34].

Por último, ainda em 2019, R. Fahrni et al. [43] realizaram uma análise experimental que consistiu na avaliação da resistência ao fogo de vigas estruturais em *glulam* quando submetidas à flexão em quatro pontos, em condições de fogo padrão. Previamente ao estudo, foram analisadas as propriedades dos seis elementos construtivos de GL24h e GL36h, nomeadamente a massa volúmica, assim como a verificação de defeitos superficiais que induzem o aumento da taxa de carbonização. O objetivo consistia na determinação da profundidade da linha de carbonização e compará-la com o método de cálculo apresentado pelo EC5-1-2, EN 1995-1-2 (2003) [35]. Assim, a profundidade média obtida experimentalmente para a linha de carbonização foi de 6,4 mm que se aproxima aos 7 mm definidos no EC5-1-2, EN 1995-1-2 (2003) [35] para a situação de teste [43].

### 2.4.3. Método Computacional

Em 1998, H. Takeda e J. R. Mehaffey [2] desenvolveram um programa computacional denominado *WALL2D*. Consistiu num programa para análise de modelos bidimensionais que permitia a previsão da transferência de calor em paredes de madeira com revestimento de placas de gesso cartonado, quando expostas ao fogo. Sucintamente, este método consistiu numa análise tripartida ao elemento construtivo, ou seja, a previsão da transferência de energia térmica nas placas de gesso, na madeira e, ainda, no vazio constituído pela caixa de ar. Os resultados consistiam em gráficos para a avaliação da evolução da temperatura no tempo e a progressão da carbonização sofrida pelo elemento de madeira [2].

Massimo Fragiaco et al. [44], em 2013, publicaram um modelo numérico desenvolvido com o objetivo de prever a resistência ao fogo de elementos construtivos em madeira. O método computacional consistia numa dupla avaliação utilizando o processo definido pelo código de elementos finitos *ABAQUS*. O primeiro passo consistia numa análise térmica evolutiva ao longo do tempo do elemento quando exposto ao fogo e o segundo numa análise estrutural considerando uma carga constante. Esta última, considerava a degradação das propriedades mecânicas ao longo do tempo, ou seja, uma redução do módulo de elasticidade e da resistência mecânica, provocadas pelo aumento da carbonização. Assim, a validação do modelo consistiu na aplicação das equações simplificadas definidas no EC5-1-2, EN 1995-1-2 (2003) [35] para a evolução da temperatura e da taxa de carbonização. Adicionalmente, procederam a testes experimentais para a comparação de resultados. Os investigadores concluíram que o método proposto apresentava uma boa aproximação e poderia ser implementado em substituição dos testes experimentais, dado que estes representam um maior custo e complexidade [44].

Em 2018, Van Diem Thi et al. [45] apresentaram uma metodologia numérica com objetivo de simular a resistência ao fogo ao nível da integridade de elementos construtivos de madeira expostos ao fogo, em escala real. Comparando com trabalhos desenvolvidos por outros investigadores, o principal atributo do modelo proposto é o facto de prever a degradação de um perfil de madeira transversal aplicado na zona central dos perfis verticais. Neste ponto, foi possível prever o efeito da pirólise com base no sistema de equações de balanço de energia. Para isto, recorreram à aplicação de uma sub-rotina, denominada como UMATHT, no código de elementos finitos *ABAQUS*. Com base nos resultados obtidos, os autores concluíram que, para obtenção de uma boa aproximação preditiva, é necessário considerar o desprendimento das placas de gesso e os defeitos superficiais do elemento quando exposto ao fogo [45].

Por fim, em 2020, Piloto e Fonseca [46], propuseram um modelo numérico para avaliação da resistência ao fogo de uma solução construtiva, em escada real, constituída por uma placa de gesso cartonado em cada lado e perfis longitudinais de madeira. A metodologia desenvolvida permitia a avaliação da temperatura em diversos pontos e a evolução da carbonização ao longo do tempo. O modelo desenvolvido consistiu numa análise através do método dos elementos finitos e verificou ser uma boa aproximação quando comparado com o teste experimental utilizado para validação dos resultados. Adicionalmente, os investigadores [46] concluíram que, para a solução construtiva analisada, o aumento da secção dos perfis em madeira não provoca um aumento significativa da resistência ao fogo ao nível do critério de isolamento térmico. Contudo, verificaram que este aumento da secção atribui ao elemento construtivo um aumento significativo da capacidade de carga, resultando do incremento da secção residual [46].

## 3. ANÁLISE TÉRMICA

No presente estudo, os modelos construtivos são elementos não portantes, do tipo paredes divisórias interiores, constituídos por montantes de madeira maciça, protegidos por placas de gesso cartonado. Em relação à cavidade interna de ar, formada pelo vazio entre as placas de revestimento, não será preenchida por qualquer material de isolamento. Os elementos construtivos formados por madeira revestida a gesso são classificados como uma construção leve e rápida. Estes tipos de soluções construtivas estão sujeitos a certificação, na qual se representa a sua classificação da resistência ao fogo relativamente aos critérios de integridade (E) e isolamento térmico (I) [1, 25, 47].

A resistência ao fogo dos elementos construtivos depende principalmente da sua constituição e, essencialmente, da proteção imposta. Em relação à madeira, esta possui algumas limitações devido à grande diversidade de propriedades, aliado ao facto de ser um material combustível na presença de um fogo. O gesso, sendo um material com uma elevada taxa de humidade, apresenta propriedades isolantes que impede a exposição direta ao fogo da madeira e retarda o aumento da temperatura e conseqüente propagação de um sinistro. A cavidade possui um papel muito relevante como retardante. A presença de ar, garante a ocorrência de fenómenos de transferência de calor como convecção e radiação entre as paredes internas, que provocam a excitação das partículas de ar e aquecimento progressivo da cavidade. A utilização de um material incombustível para preenchimento da cavidade possui um papel ainda não relevante. A lã de rocha, por exemplo, é um material com um elevado ponto de fusão e calor específico, contribuindo para o aumento da resistência ao fogo deste tipo de soluções construtivas.

### 3.1. Propriedades dos Materiais

No presente capítulo apresentam-se as principais características dos materiais e as propriedades mais relevantes para o estudo, nomeadamente a massa volúmica, o calor específico e a condutividade térmica.

#### 3.1.1. Propriedades térmicas da madeira

##### 3.1.1.1 Massa volúmica

A massa volúmica é uma das propriedades com maior impacto na resistência ao fogo de um elemento construtivo em madeira [34]. A madeira possui uma morfologia heterógena, dado que é constituída por um conjunto de fibras distintas e inúmeros poros. Estes, também denominados como cavidades, possuem um volume de ar variável, pelo que impossibilita a sua quantificação nas soluções construtivas. Assim, devido a este fator, a massa volúmica da madeira é considerada como aparente. Esta propriedade é influenciada por diversos fatores, tais como, composição química, quantidade e alinhamento das fibras, estrutura e teor de humidade. Este último fator, possui uma grande influência na determinação da massa e volume de uma solução construtiva em madeira, assim como na resistência ao fogo destes elementos, dado que um maior teor permite retardar a ocorrência de carbonização [48].

O EC5-1-2, EN 1995-1-2 (2003) [35] define o método de avaliação da massa volúmica em função do aumento da temperatura. Este método é influenciado diretamente pelo teor de humidade  $\omega$ , sendo que os valores padronizados encontram-se afetados por um teor de humidade médio de 12%. Os coeficientes definidos no EC5-1-2, EN 1995-1-2 (2003) [35] encontram-se apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 - Coeficientes da massa volúmica da madeira em função da temperatura [35]

Temperatura (°C)	Coeficiente da massa volúmica
20	1 + $\omega$
99	1 + $\omega$
100	1,00
120	1,00
200	1,00
250	0,93
300	0,76
350	0,52
400	0,38
600	0,28
800	0,26
1200	0,00

Analisando os coeficientes presentes na Tabela 8, verifica-se que a massa volúmica da madeira diminui com o aumento da temperatura, sendo que é definida para o intervalo de temperaturas entre os 100°C e os 200°C. Deste modo, para o presente estudo, uma vez que este incide nas madeiras lameladas coladas, será avaliada a variação da massa volúmica em função da temperatura para os três tipos de madeira (GL20h, GL24h e GL32h). Estes tipos de madeira encontram-se definidas com as massas volúmicas de 370 kg/m<sup>3</sup>, 420 kg/m<sup>3</sup> e 480 kg/m<sup>3</sup>, respetivamente [49]. Assim, aplicando os coeficientes presentes na Tabela 8, encontra-se apresentada na Tabela 9 a variação da massa volúmica destes elementos em função da temperatura, graficamente na Figura 10.

Tabela 9 - Massa volúmica das madeiras GL20h, GL24h e GL32h em função da temperatura

Temperatura (°C)	Massa volúmica (kg/m <sup>3</sup> )		
	GL20h	GL24h	GL32h
20	414,4	470,4	537,6
99	414,4	470,4	537,6
120	370,0	420,0	480,0
200	370,0	420,0	480,0
250	344,1	390,6	446,4
300	281,2	319,2	364,8
350	192,4	218,4	249,6
400	140,6	159,6	182,4
600	103,6	117,6	134,4
800	96,2	109,2	124,8
1200	1,0	1,0	1,0

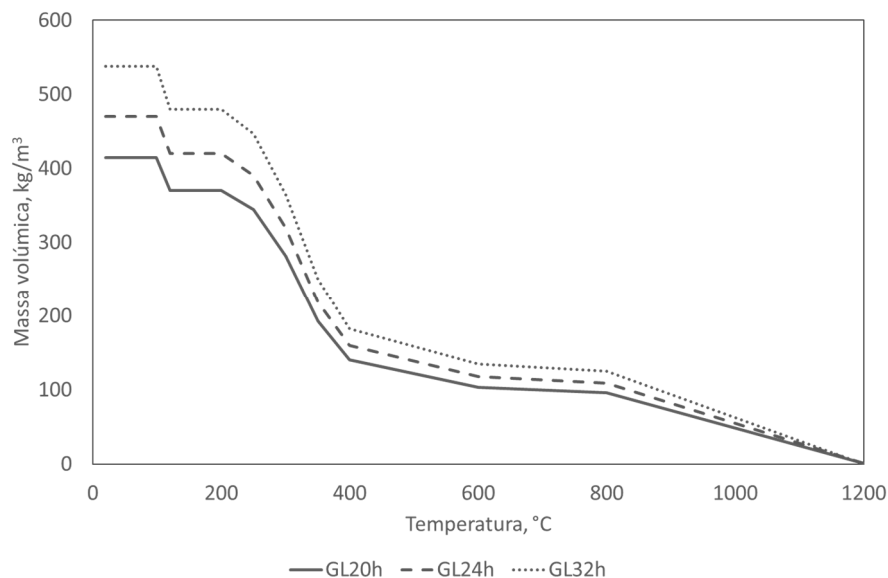


Figura 10 - Variação da massa volúmica em função da temperatura nas classes de madeira lamelada GL20h, GL24h e GL32h

De acordo com o descrito na evolução da massa volúmica presente na Figura 10, a partir dos 200°C ocorre uma queda. Essa diminuição é justificada pela menor taxa de humidade devido à evaporação da água existente na madeira. Adicionalmente, de acordo com o previsto no EC5-1-2, EN 1995-1-2 (2003) [35], à temperatura de, aproximadamente, 300°C ocorre uma maior diminuição da massa volúmica, dado que a madeira inicia a sua carbonização a essa temperatura.

### 3.1.1.2 Calor específico

O calor específico é definido pela quantidade de energia calorífica necessária para variar um grau de temperatura numa unidade de massa de um determinado material [50]. Na madeira, esta propriedade é independente do tipo de madeira, ou seja, não varia significativamente com as diversas massas volúmicas que pode assumir em função da sua espécie. Assim, considera-se que esta depende da temperatura e da humidade presente no elemento [50]. Por este motivo, o EC5-1-2, EN 1995-1-2 (2003) [35] define os valores que o calor específico assume em função da temperatura, descritos na Tabela 10 e representados na Figura 11.

Tabela 10 - Calor específico da madeira em função da temperatura [35]

Temperatura (°C)	Calor específico (kJ/kgK)
20	1,53
99	1,77
100	13,60
120	13,50
121	2,12
200	2,00
250	1,62
300	0,71
350	0,85
400	1,00
600	1,40
800	1,65
1200	1,65

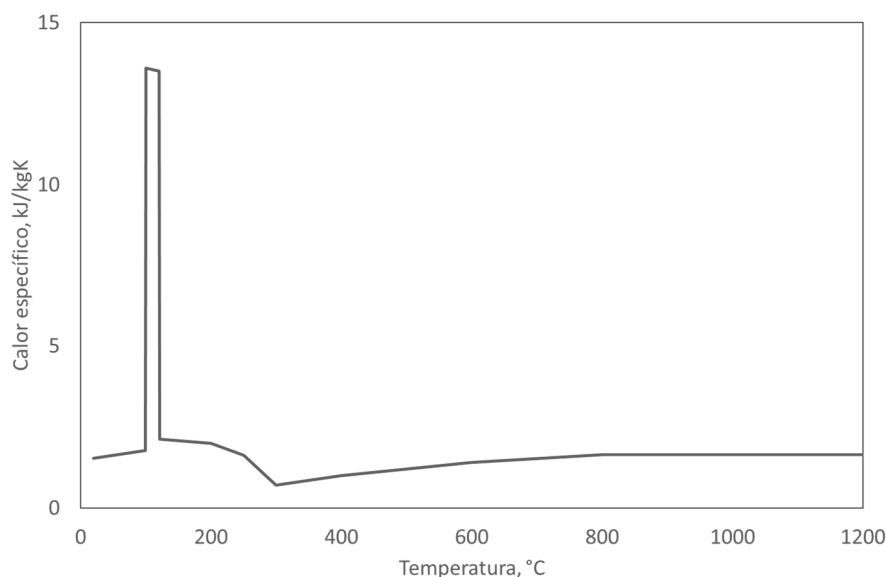


Figura 11 – Variação do calor específico da madeira em função da temperatura

A representação gráfica presente na Figura 11 revela que o calor específico apresenta um pico a uma temperatura de aproximadamente 100°C. Este pico é justificado pela libertação do conteúdo de humidade presente na madeira. Adicionalmente, verifica-se que, após o pico, esta propriedade possui uma tendência decrescente, invertendo a sua curva a uma temperatura de 300°C, correspondente ao ponto de início da degradação do elemento devido à carbonização. A partir desta temperatura, o calor específico é praticamente constante, aumentando ligeiramente até aos 800°C e nivelando a curva após este ponto.

### 3.1.1.3 Condutividade térmica

A condutividade térmica é definida pelo fluxo de calor que atravessa a espessura de um determinado material sujeito a um gradiente térmico [50]. À semelhança do calor específico, esta propriedade é independente do tipo de madeira, sendo esta definida pelo EC5-1-2, EN 1995-1-2 (2003) [35]. A condutividade térmica para um elemento em madeira encontra-se descrita na Tabela 11 e graficamente na Figura 12.

Tabela 11 - Condutividade térmica da madeira em função da temperatura [35]

Temperatura (°C)	Condutividade térmica (W/mK)
20	0,12
200	0,15
350	0,07
500	0,09
800	0,35
1200	1,50

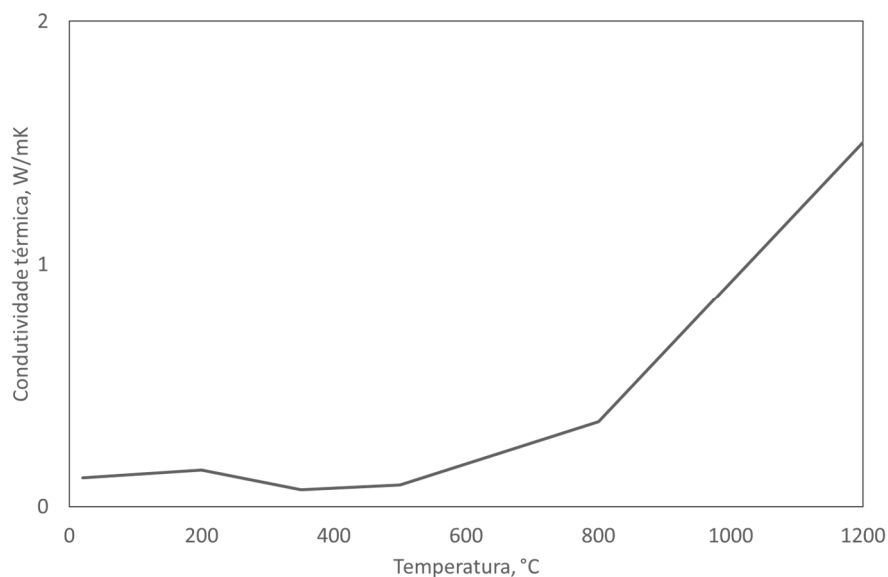


Figura 12 – Variação da condutividade térmica da madeira em função da temperatura

### 3.1.2. Propriedades térmicas do gesso

O gesso é um material poroso que pode adotar diversas formas e possui uma grande versatilidade de aplicações. Neste caso, importa abordar os tipos de gesso que possuem como finalidade as soluções construtivas do tipo parede com núcleo em madeira. De acordo com o EC5-1-2, EN 1995-1-2 (2003) [35], os utilizados na proteção de ligações em madeira são os painéis de gesso cartonado do tipo A, H e F. O gesso do tipo A representa uma solução standard, ou seja, são painéis com um núcleo de gesso poroso revestidos por uma folha de papel em ambas as superfícies, mas sem qualquer reforço no núcleo. Os painéis do tipo H são definidos como hidrófugos dado que são constituídos por um núcleo de gesso tratado com um agente resistente à água para diminuir a sua absorção. Por último, os painéis de gesso do tipo F são denominados por *Fire resistant*, ou seja, resistentes ao fogo. Estes são revestidos por duas folhas de papel e possuem um núcleo com aditivos, normalmente fibras de vidro, que melhoram a coesão dos constituintes a elevadas temperaturas [51].

Sendo um material heterogéneo, a obtenção das propriedades do gesso de forma experimental não é um processo com um elevado grau de exatidão. Adicionalmente, esta dificuldade acresce pelo facto de possuir um elevado teor de humidade. Assim, apesar da literatura não ser explícita, estudos apontam para que as propriedades do gesso variam em função da temperatura [19]. No presente estudo, serão apresentadas as propriedades térmicas dos gessos do tipo A e F. Devido ao facto da evolução das propriedades com o aumento da temperatura não se encontrar definida em regulamentação, serão consideradas as obtidas em ensaios experimentais.

#### 3.1.2.1 Massa volúmica

Em relação à massa volúmica, um estudo desenvolvido por Andrea Frangi et al. [41], conduzido no Instituto Geotécnico de Engenharia de ETH em Zurique, permitiu analisar a evolução desta propriedade em painéis de gesso do tipo A e F. Esta análise teve por base a aplicação de uma taxa de aquecimento de 20°C/min nas placas. Com este teste, aplicando o método de análise termo gravimétrico (TGA), os investigadores determinaram a variação da massa em função do aumento da temperatura. Assim, a análise TGA revelou dois instantes com perdas de massa considerável. A primeira queda ocorreu no intervalo de temperatura entre 100°C e 170°C, representando uma perda de 17% da massa volúmica inicial, e a segunda verificou-se entre os 600°C e os 750°C, resultando numa perda de 22% do valor inicial. Adicionalmente, verificou-se que as perdas de massa no primeiro instante dizem respeito à diminuição da humidade das placas, ou seja, remoção da água existente, e no segundo acontece uma libertação de dióxido de carbono. Por fim, a análise TGA permitiu concluir que, desconsiderando as perdas de massa volúmica nos instantes referidos, esta propriedade mantém-se constante entre estes intervalos. Os valores de referência adotados pelos autores e que serão considerados no presente estudo foram de 640 kg/m<sup>3</sup> para o gesso do tipo A e 889 kg/m<sup>3</sup> para o gesso do tipo F, à temperatura ambiente [41].

A variação da massa volúmica em função da temperatura considerada no presente estudo encontra-se descrita na Tabela 12 e representada na Figura 13.

Tabela 12 - Massa volúmica do gesso tipo A e F em função da temperatura

Temperatura (°C)	Massa Volúmica (kg/m <sup>3</sup> )	
	Gesso Tipo A	Gesso Tipo F
20	640,00	889,00
100	640,00	889,00
170	531,20	737,87
600	531,20	737,87
750	504,64	700,98
1200	504,64	700,98

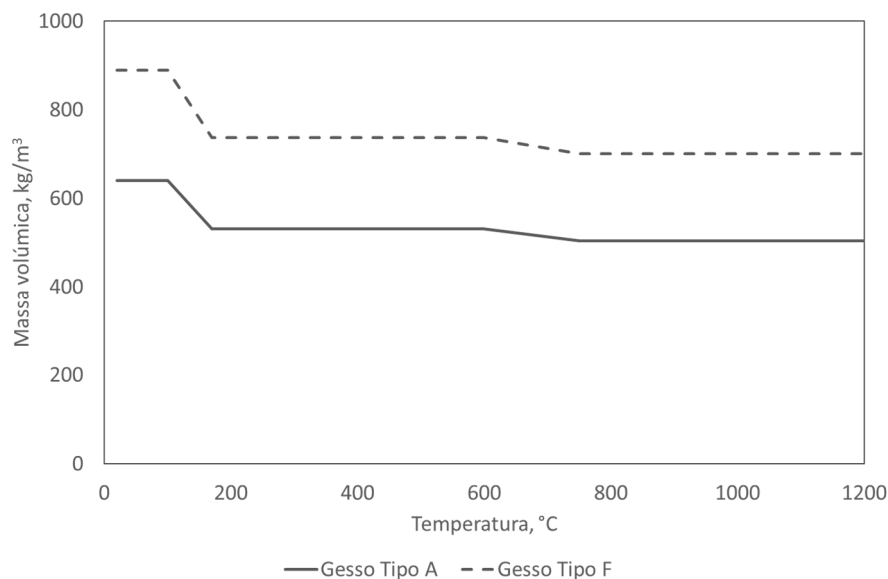


Figura 13 - Variação da massa volúmica em função da temperatura no gesso tipo A e F

### 3.1.2.2 Calor específico

De acordo com o estudo desenvolvido por I. Rahmanian e Y. Wang [19], o aumento da temperatura provoca a ocorrência de dois picos máximos no valor do calor específico. Estes picos correspondem às duas reações químicas de desidratação do gesso, referidas no estudo anterior relativamente à massa volúmica, conduzido por Andrea Frangi et al. [41]. O calor específico do gesso possui a mesma variação em função da temperatura independentemente do seu tipo, sendo o valor admitido à temperatura ambiente igual a 0,95 kJ/kgK [19], [52]. Adicionalmente, no gesso, o calor específico caracteriza-se como a energia necessária para dissociar e evaporar as moléculas de água e realizar o transporte da água para as zonas mais frias no interior das placas [19]. Na Tabela 13 apresentam-se os valores do calor específico dos dois tipos de gesso (A e F), estando representada na Figura 14.

Tabela 13 - Calor específico do gesso tipo A e F em função da temperatura

Temperatura (°C)	Calor específico (kJ/kgK)	
	Gesso Tipo A	Gesso Tipo F
20	0,95	0,95
100	0,95	0,95
135	25,00	25,00
170	0,95	0,95
650	0,95	0,95
675	10,00	10,00
700	0,95	0,95
1200	0,95	0,95

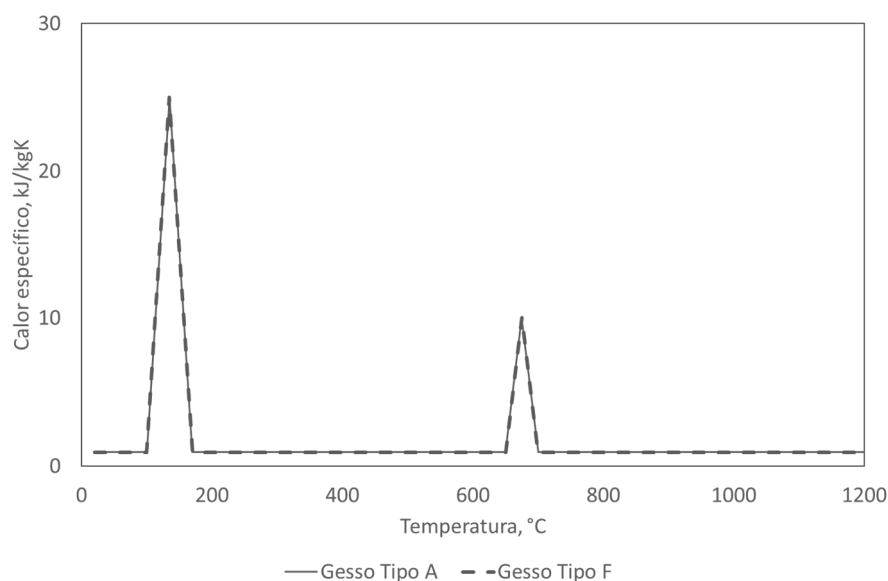


Figura 14 - Variação do calor específico em função da temperatura no gesso tipo A e F

### 3.1.2.3 Condutividade térmica

Segundo o estudo abordado anteriormente e conduzido por I. Rahmanian e Y. Wang [19], sendo o gesso um material não homogêneo, a condutividade térmica é afetada por diversos fatores, tais como, massa volúmica, taxa de humidade e porosidade. Esta diversidade de fatores faz com que exista uma grande variedade de valores assumidos para a condutividade térmica do gesso na literatura. Contudo, considerando uma solução padrão de gesso com uma distribuição de poros esféricos, os autores desenvolveram uma relação para a evolução da condutividade térmica do gesso em função da temperatura. À semelhança do que acontece com o calor específico, a condutividade térmica do gesso não depende da sua tipologia, ou seja, se consiste numa solução do tipo A ou F [19]. Os valores considerados no presente estudo encontram-se apresentados na Tabela 14 e representados graficamente na Figura 15.

Tabela 14 – Condutividade térmica do gesso tipo A e F em função da temperatura

Temperatura (°C)	Condutividade térmica (W/mK)	
	Gesso Tipo A	Gesso Tipo F
20	0,190	0,190
195	0,190	0,190
155	0,100	0,100
200	0,103	0,103
400	0,113	0,113
600	0,127	0,127
800	0,145	0,145
1200	0,165	0,165

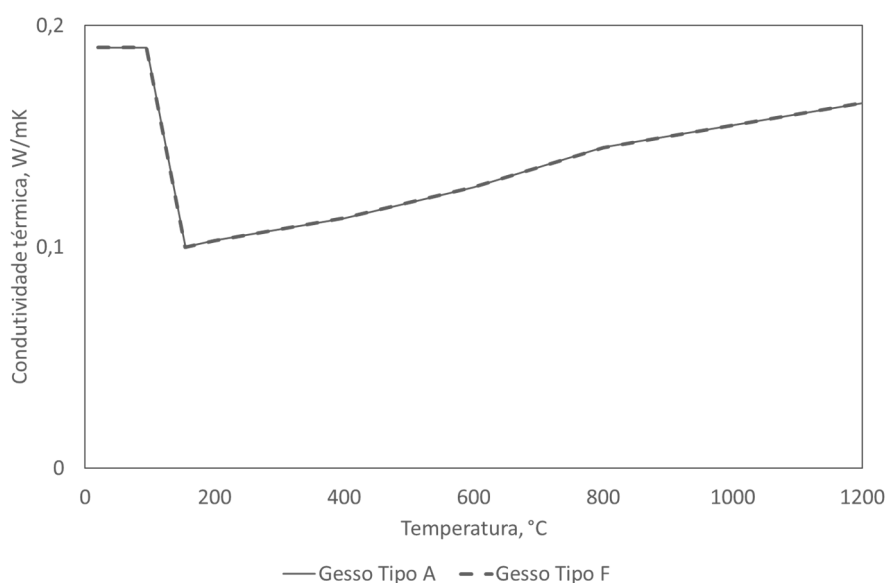


Figura 15 - Variação da condutividade térmica em função da temperatura no gesso tipo A e F

### 3.1.3. Propriedades térmicas do ar

Numa solução construtiva do tipo parede divisória interior com estrutura de madeira e revestimento com placas de gesso torna-se necessário considerar o efeito do ar. O seu efeito é preponderante para a avaliação da resistência ao fogo, dado que este encontra-se na envolvente da solução construtiva, assim como no seu interior. Ao nível interno, o ar está presente nas porosidades do gesso e da madeira, na interface entre os elementos e na cavidade interior (i.e., caixa de ar). Com isto, para uma correta modelação do modelo numérico na tentativa de uma aproximação às condições experimentais, será necessário considerar o efeito do ar.

As propriedades térmicas do ar encontram-se bem definidas na literatura, sendo possível a sua evolução em função da temperatura em qualquer livro ou ábaco de termodinâmica e transferências de calor.

### 3.1.3.1 Massa volúmica

A massa volúmica do ar descreve uma variação em função da temperatura, da humidade relativa e da composição química. De acordo com J. P. Holman [53], a sua variação ocorre entre os 20°C e os 1000°C, encontrando-se os valores da massa volúmica limitados entre os 1,205 kg/m<sup>3</sup> e os 0,277 kg/m<sup>3</sup>. A partir da temperatura de 1000°C, a massa volúmica é constante, assumindo o valor mínimo de 0,277 kg/m<sup>3</sup>. A variação da massa volúmica do ar em função da temperatura encontra-se descrita na Tabela 15 e representada na Figura 16.

Tabela 15 - Massa volúmica do ar em função da temperatura

Temperatura (°C)	Massa volúmica (kg/m <sup>3</sup> )
20	1,205
30	1,165
60	1,060
100	0,946
200	0,746
300	0,616
500	0,456
1000	0,277
1200	0,277

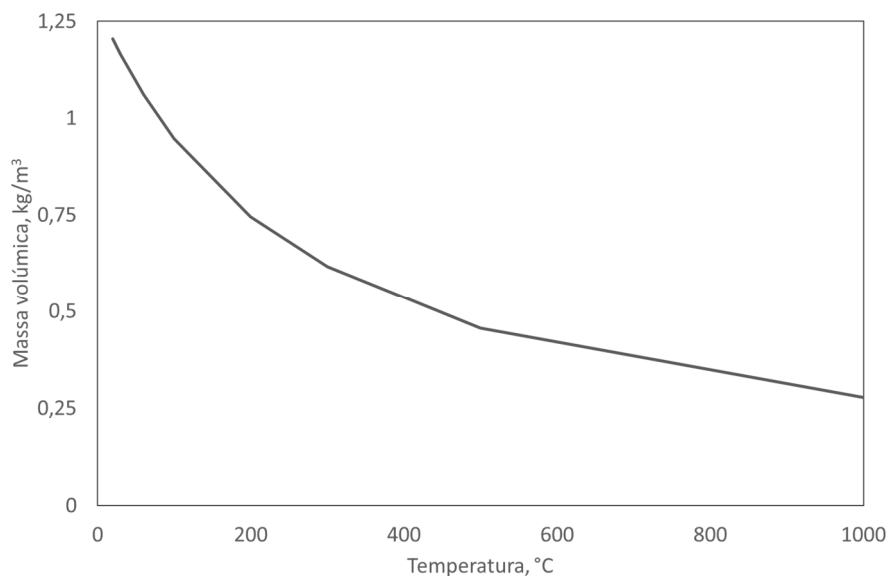


Figura 16 - Variação da massa volúmica do ar em função da temperatura

### 3.1.3.2 Calor específico

O calor específico do ar apenas apresenta uma ligeira variação em função da temperatura. Considerando a variação de temperatura entre os 20°C e os 1000°C, o calor específico apresenta valores entre os 1,01 kJ/kgK e os 1,19 kJ/kgK, aproximadamente. À semelhança do que acontece com a massa volúmica, para temperaturas superiores a 1000°C, o calor específico atinge o seu máximo absoluto aproximadamente igual a 1,19 kJ/kgK [53]. A variação do calor específico do ar em função da temperatura encontra-se descrita na Tabela 16 e representada na Figura 17.

Tabela 16 - Calor específico do ar em função da temperatura

Temperatura (°C)	Calor específico (kJ/kgK)
20	1,006
30	1,006
60	1,008
100	1,011
200	1,025
300	1,045
500	1,093
1000	1,185
1200	1,185

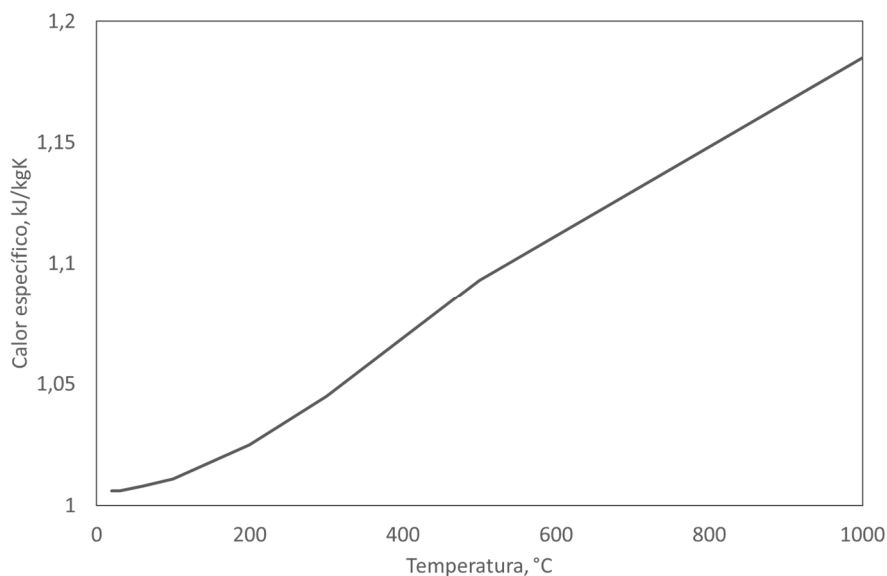


Figura 17 - Variação do calor específico do ar em função da temperatura

### 3.1.3.3 Condutividade térmica

O ar apresenta valores de condutividade térmica consideravelmente baixos, uma vez que este é um material com características isolantes. Contudo, a sua condutividade térmica aumenta com o aumento da temperatura, apresentando uma variação entre os 0,025 W/mK e os 0,076 W/mk, para um intervalo de temperaturas de 20°C a 1000°C, respetivamente. Adicionalmente, à semelhança das propriedades referidas anteriormente, a condutividade térmica revela-se constante para temperaturas superiores a 1000°C, tomando, assim, um valor igual a 0,076 W/mK [53]. A variação do calor específico do ar em função da temperatura encontra-se descrita na Tabela 17 e graficamente na Figura 18.

Tabela 17 - Condutividade térmica do ar em função da temperatura

Temperatura (°C)	Condutividade térmica (W/mK)
20	0,025
30	0,026
60	0,028
100	0,032
200	0,039
300	0,045
500	0,056
1000	0,076
1200	0,076

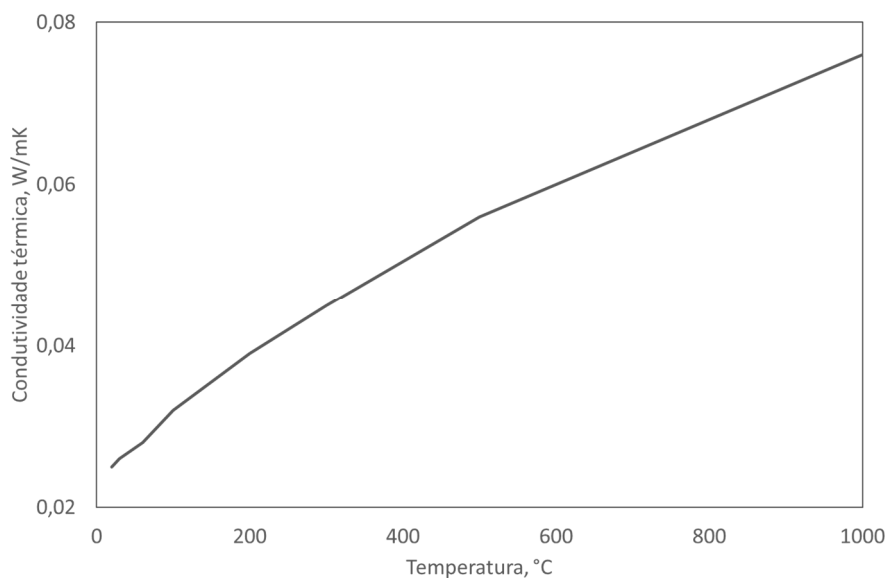


Figura 18 - Variação da condutividade térmica do ar em função da temperatura

### 3.2. Formulação de elementos finitos

O método dos elementos finitos (MEF) é uma técnica muito utilizada na área da engenharia, dado que apresenta a capacidade de resolução de problemas complexos, obtendo soluções aproximadas com elevada fiabilidade. Os modelos de cálculo baseados no MEF permitem uma maior rapidez quando comparada com métodos analíticos e ensaios experimentais.

A metodologia de elementos finitos é descrita pela análise de fenómenos físicos que ocorrem em meios contínuos, sendo caracterizada pela discretização do domínio de um problema em subdomínios. Esta decomposição permite a obtenção de vários problemas mais simples, cujos são representados num conjunto de equações com possibilidade de resolução exata ou aproximada. A combinação dos resultados obtidos nos diversos subdomínios permite obter um sistema global para o cálculo da solução final do problema [54].

De forma sucinta, a resolução de um problema utilizando o MEF consiste na aplicação de um conjunto de procedimentos padronizados. Assim, de acordo com o objetivo da aplicação do método, o modelo é decomposto num conjunto de elementos de geometria simples e com dimensão finita, unidos entre si através de pontos, denominados de nós. Os nós possuem graus de liberdade que variam conforme o tipo de análise e as condições de fronteira do problema. O conjunto dos elementos e nós de um modelo designa-se como malha [55].

Neste caso, o programa computacional desenvolvido tem como objetivo a realização de uma análise térmica em regime transiente, cujo principal objetivo é a determinação da evolução dos campos da temperatura no modelo. Analiticamente, a determinação do campo de temperaturas na secção transversal do modelo, concretiza-se através da solução da equação diferencial da condução de calor definida na equação 14. Na equação 23 apresenta-se a solução para domínios bidimensionais [55].

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \dot{Q} = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (23)$$

Sendo  $\lambda$  a condutividade térmica do material em W/mK,  $\dot{Q}$  o calor gerado internamente por unidade de volume e tempo em J/m<sup>3</sup>s,  $\rho$  a massa volúmica em kg/m<sup>3</sup> e  $C_p$  o calor específico em J/kgK.

De modo a determinar o campo de temperaturas, a equação diferencial tem de obedecer às condições iniciais e de fronteira definidas para o modelo. As condições iniciais definem-se pela distribuição de temperatura no instante inicial. As condições de fronteira apresentam vários tipos, podendo ser [55]:

- Condições de fronteira essenciais (Condição de Dirichlet): As temperaturas são determinadas numa região da fronteira, na qual  $T = \bar{T}$ .
- Condições de fronteira naturais: Corresponde a um fluxo de calor prescrito na parte da fronteira  $\Gamma_q$ , segundo a condição de *Newman*.
- Condição de fronteira convectiva: Considera a transmissão de calor por convecção (Condição de *Cauchy*) de uma parte  $\Gamma_c$  da fronteira para a vizinhança.

- Condição de fronteira radiativa: Considera as trocas de calor por radiação entre uma zona  $\Gamma_r$  da fronteira à temperatura  $T$  e a envolvente à temperatura  $T_s$ .
- Condição de fronteira convectiva e radiativa: Corresponde à troca de calor simultânea por convecção e radiação definida em  $\Gamma_{cr}$ .

A resolução de problemas térmicos utilizando o método dos elementos finitos através da equação diferencial da condução de calor, considera uma aplicação do método dos resíduos pesados. Este método consiste na transformação das equações da sua forma diferencial para a forma integral, através da divisão do domínio  $\Omega$  em subdomínios ou elementos  $\Omega_e$ . Recorrendo ao método de *Galerkin*, que consiste numa discretização parcial dos elementos, obtém-se o sistema global de equações para o domínio  $\Omega$  definido pela equação 24 [55].

$$[K] T + [C] \dot{T} = \{F\} \quad (24)$$

Sendo, para problemas bidimensionais, as matrizes  $K$  e  $C$  e o vetor  $F$  definidas pelas equações 25, 26 e 27, respetivamente.

$$K_{ij} = \sum_{e=1}^E \int_{\Omega^e} \left( \frac{\partial N_i}{\partial x} \lambda \frac{\partial N_j}{\partial x} + \frac{\partial N_i}{\partial y} \lambda \frac{\partial N_j}{\partial y} \right) d\Omega^e + \sum_{e=1}^H \int_{\Gamma_c^e} N_i N_j h_{cr} d\Gamma_c^e \quad (25)$$

$$C_{ij} = \sum_{e=1}^E \int_{\Omega^e} \rho C_p N_i N_j d\Omega^e \quad (26)$$

$$F_i = \sum_{e=1}^E N_i \dot{Q} d\Omega^e - \sum_{e=1}^Q \int_{\Gamma_q^e} N_i \bar{q} d\Gamma_c^e - \sum_{e=1}^H \int_{\Gamma_c^e} N_i h_{cr} T_\infty d\Gamma_c^e \quad (27)$$

Onde  $E$  representa o número total de elementos,  $Q$  o número de elementos com fronteira natural ( $\Gamma_q$ ),  $H$  o número de elementos com fronteira convectiva e/ou radiativa ( $\Gamma_c$  e/ou  $\Gamma_r$ ),  $N_i$  e  $N_j$  as funções de forma e  $h_{cr}$  o coeficiente de transferência de calor por convecção e/ou radiação.

Considerando um problema bidimensional, cujo sistema de equações diferenciais encontra-se descrito na equação 24, e de modo a obter a sua solução torna-se necessário realizar a sua discretização no tempo a partir das diferenças finitas, conforme presente na equação 28.

$$\hat{K}_{n+\alpha} T_{n+\alpha} = \hat{F}_{n+\alpha}, 0 < \alpha \leq 1 \quad (28)$$

Na qual,  $\hat{K}_{n+\alpha}$  e  $\hat{F}_{n+\alpha}$  são definidas pelas equações 29 e 30.

$$\hat{K}_{n+\alpha} = K_{n+\alpha} + \frac{C_{n+\alpha}}{\alpha \Delta t}, 0 < \alpha \leq 1 \quad (29)$$

$$\hat{F}_{n+\alpha} = F_{n+\alpha} + \frac{C_{n+\alpha}}{\alpha \Delta t} T_n, 0 < \alpha \leq 1 \quad (30)$$

Assim, considerando o intervalo de tempo  $\Delta t$ , o campo de temperaturas é obtido através da equação 31.

$$T_{n+1} = \frac{T_{n+\alpha}}{\alpha} + \left(1 - \frac{1}{\alpha}\right) T_n, 0 < \alpha \leq 1 \quad (31)$$

A constante  $\alpha$  presente nas equações acima descritas pode variar de modo a obter-se vários esquemas de integração no tempo. Os sistemas considerando  $\alpha$  não nulo, são designados como implícitos. Os esquemas mais utilizados utilizam valores, diferentes de zero, para o parâmetro  $\alpha$ , sendo estes o de *Crank-Nicolson* para  $\alpha = 1/2$ ,  $\alpha = 2/3$  segundo a regra de *Galerkin* e  $\alpha = 1$  no esquema de *Euler Backward*. Pelo facto dos vários esquemas admitirem as suas próprias características de estabilidade, convergência e precisão de resultados torna-se difícil admitir qual o mais eficiente na resolução de problemas. Assim, para a madeira e gesso, ou seja, materiais cujas propriedades térmicas são não lineares, o sistema de equações de *Galerkin*, presente na equação 24, pode ser descrito de acordo com a formulação da equação 32 [55].

$$[K]_{(T,t)} T_{(t)} + [C]_{(T,t)} \dot{T}_{(t)} = \{F\}_{(T,t)} \quad (32)$$

Considerando esta formulação, as matrizes  $[K_{n+\alpha}]$  e  $[C_{n+\alpha}]$  e o vetor  $\{F_{n+\alpha}\}$ , variam ao longo do intervalo de tempo  $\Delta T$  em função da temperatura  $T$  e do tempo  $t$ , sendo definidas pelas equações 33, 34 e 35.

$$K_{n+\alpha} = K(T_{n+\alpha}, t_{n+\alpha}) \quad (33)$$

$$C_{n+\alpha} = C(T_{n+\alpha}, t_{n+\alpha}) \quad (34)$$

$$F_{n+\alpha} = F(T_{n+\alpha}, t_{n+\alpha}) \quad (35)$$

Adicionalmente, no que diz respeito à convergência do método de resolução é necessário aplicar um processo iterativo, tendo como base as condições de não linearidade das propriedades térmicas dos materiais em estudo, dependentes da temperatura. Assim, recorreu-se ao método de *Newton-Raphson* modificado, que se traduz no sistema de forças residuais descrito na equação 36.

$$\psi_{n+\alpha}^i = \hat{F}_{n+\alpha}^i - \hat{K}_{n+\alpha}^i T_{n+\alpha}^{i+1} \neq 0 \quad (36)$$

Tendo a consideração a aplicação do método iterativo na sua forma simplificada, admite-se que a solução corrigida  $T_{n+\alpha}^i$ , em cada iteração, pode ser obtida através da aplicação das equações 37 e 38.

$$\Delta T_{n+\alpha}^i = [\hat{K}_{n+\alpha}]^{-1} \psi_{n+\alpha}^i \quad (37)$$

$$T_{n+\alpha}^{i+1} = T_{n+\alpha}^i + \Delta T_{n+\alpha}^i \quad (38)$$

O método de resolução do sistema acima descrito consiste na obtenção de  $\Delta T_{n+\alpha}^i$  em cada iteração até se atingir a convergência de resultados, sendo a matriz  $[\hat{K}_{n+\alpha}]$  atualizada em cada iteração. O critério de convergência considerado na resolução do problema descreve-se pela equação 39.

$$\frac{\|\Delta T_{n+\alpha}^i\|}{\|T_{n+\alpha}^{i+1}\|} = \frac{\|T_{n+\alpha}^{i+1} - T_{n+\alpha}^i\|}{\|T_{n+\alpha}^{i+1}\|} < TOL \quad (39)$$

Sendo  $TOL$  a tolerância admitida,  $\| \quad \|$  a norma euclidiana,  $\Delta T_{n+\alpha}^i$  a alteração do campo de temperaturas e  $T_{n+\alpha}^{i+1}$  a temperatura atual.

## 4. VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL

O presente capítulo aborda a principal temática da presente dissertação, tendo como base os ensaios experimentais realizados pelos autores H. Takeda e J. R. Mehaffey [2]. A reprodução de modelos testados em condições experimentais para a validação de modelos numéricos revela-se bastante complexa e iterativa, pela imposição de todas as características térmicas dos materiais não lineares e pela reprodução das condições de ensaio. O programa computacional utilizado no desenvolvimento dos modelos numéricos foi o programa de elementos finitos *ANSYS® Academic Student 2022 R1*, com o intuito de validar os resultados experimentais obtidos nos testes conduzidos pelos autores. A validação do modelo numérico desenvolvido, com base nos ensaios experimentais, permitirá uma análise posterior alargada em diferentes modelos construtivos úteis ao projeto na engenharia de construção. Assim, o presente estudo incide na comparação dos resultados dos campos de temperatura, da camada de carbonização e consequente secção residual nos montantes de madeira. Em adição, nos resultados do campo de temperaturas obtidos com o modelo numérico de validação, é ainda proposta a metodologia para a verificação do critério de isolamento térmico de acordo com a norma EN 1363-1:2020 [1].

### 4.1. Modelo experimental

Em 1998, H. Takeda e J. R. Mehaffey [2] conduziram um conjunto de ensaios experimentais com o objetivo de analisar e estudar o comportamento de elementos construtivos constituídos por madeira revestidos por placas de gesso cartonado, quando submetidos à ação do fogo. O estudo consistiu na realização de 6 ensaios experimentais, desenvolvidos no Instituto Nacional de Investigação do Canadá.

Os ensaios experimentais realizados distinguiam-se em diversos parâmetros, tais como, escala do teste, constituição do modelo, tipo de materiais e dimensões. Assim, dos 6 ensaios experimentais realizados, 4 foram concretizados em escala reduzida e 2 em escala real. Tal como referido anteriormente, todos os modelos consideraram uma solução construtiva em madeira com placas de gesso cartonado. Os gessos utilizados por H. Takeda e J. R. Mehaffey [2] foram do tipo C e X, com uma massa volúmica à temperatura ambiente de 732 e 648 kg/m<sup>3</sup>, respetivamente. Adicionalmente, foi padronizado, em todos os modelos, que as placas de gesso do tipo C possuíam uma espessura de 12,7 mm e as de tipo X uma espessura de 15,9 mm. Em relação à madeira, os autores não definem o tipo de madeira considerado. Contudo, apresentam de forma genérica dois tipos de madeira denominados como “*SPF*” e “*Douglas fir*”, com massa volúmica à temperatura ambiente de, aproximadamente, 480 e 550 kg/m<sup>3</sup>, respetivamente. Na Tabela 18 apresenta-se uma descrição sucinta dos 6 ensaios conduzidos por H. Takeda e J. R. Mehaffey [2].

Tabela 18 - Ensaio de validação experimental de resistência ao fogo [2]

Ensaio	Escala	Constituição do modelo
1	Reduzida	4 placas de gesso do tipo C com 12,7 mm (sem madeira)
2	Reduzida	1 placa de gesso do tipo C com 12,7 mm em cada lado da madeira
3	Reduzida	1 placa de gesso do tipo X com 15,9 mm em cada lado da madeira
4	Reduzida	2 placas de gesso do tipo X com 15,9 mm em cada lado da madeira
5	Real	1 placa de gesso do tipo C com 12,7 mm em cada lado da madeira
6	Real	1 placa de gesso do tipo X com 15,9 mm em cada lado da madeira

No presente estudo, será escolhido o ensaio 4, realizado em escala reduzida, para a posterior validação e comparação de resultados. Segundo os autores, nos ensaios realizados em escala real, ou seja, 5 e 6, foi considerada uma dimensão transversal de 38 mm x 89 mm (largura x altura) para os montantes de madeira, espaçados de 400 mm entre centros. Contudo, no que diz respeito aos ensaios em escala reduzida nada se refere, pelo que se considerou que o ensaio 4 seguiu os mesmos parâmetros. Adicionalmente, no presente estudo considerou-se a existência de 3 cavidades de ar, conforme se apresenta na Figura 19, com exposição ao fogo durante 2 horas.

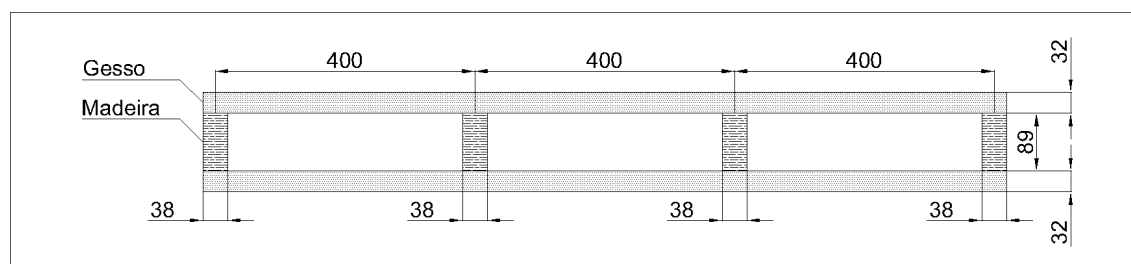


Figura 19 – Reprodução do modelo geométrico do ensaio 4

Tal como referido anteriormente, o ensaio 4 consiste num teste experimental realizado em escala reduzida. Esta escala tem como premissa a utilização de um forno elétrico de dimensões reduzidas, o qual não permite a reprodução na íntegra das condições de fogo padrão. Assim, efetuou-se uma comparação gráfica entre a curva de incêndio padrão e a curva de fogo efetivamente aplicada neste ensaio, de acordo com o representado na Figura 20.

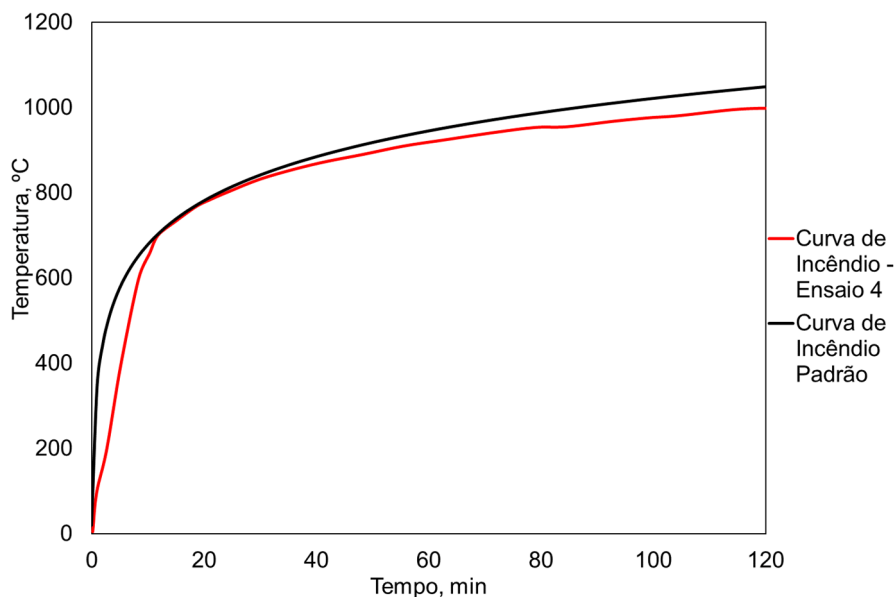


Figura 20 - Comparação entre as curvas de incêndio

Analisando ambas as curvas de incêndio, conclui-se que a evolução de temperatura considerada no ensaio 4 é semelhante à definida na curva de incêndio padrão.

Nos ensaios experimentais realizados, os autores procederam à análise da evolução da temperatura no tempo em diversos pontos de controlo. As medições realizaram-se recorrendo a termopares, posicionados em pontos pré-definidos na solução construtiva. Os pontos foram denominados de acordo com as letras alfabéticas de A a H, de acordo com a Figura 21.

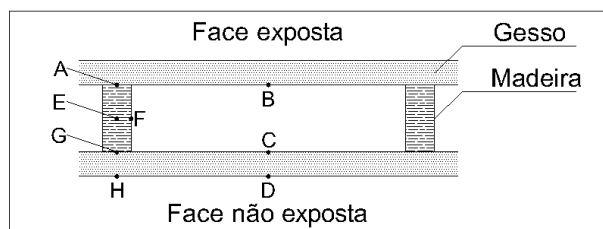


Figura 21 - Pontos de controlo da evolução da temperatura

Com base nos pontos de controlo considerados por H. Takeda e J. R. Mehaffey [2], procedeu-se à extração dos valores resultantes do ensaio experimental através da ferramenta *Web Plot Digitalizer*<sup>®</sup>, para a posterior comparação de resultados. Neste sentido e realizando um paralelismo com o objetivo do presente trabalho, considerou-se que a evolução da temperatura nos pontos B, C e D não representam um interesse considerável, dado que apenas consideram o efeito das placas de gesso e a caixa de ar. Em relação ao ponto H, os autores não apresentam qualquer curva de temperatura. Assim, foram consideradas no presente estudo, as curvas da evolução das temperaturas nos pontos identificados na Figura 22, bem como a curva de fogo considerada no ensaio 4.

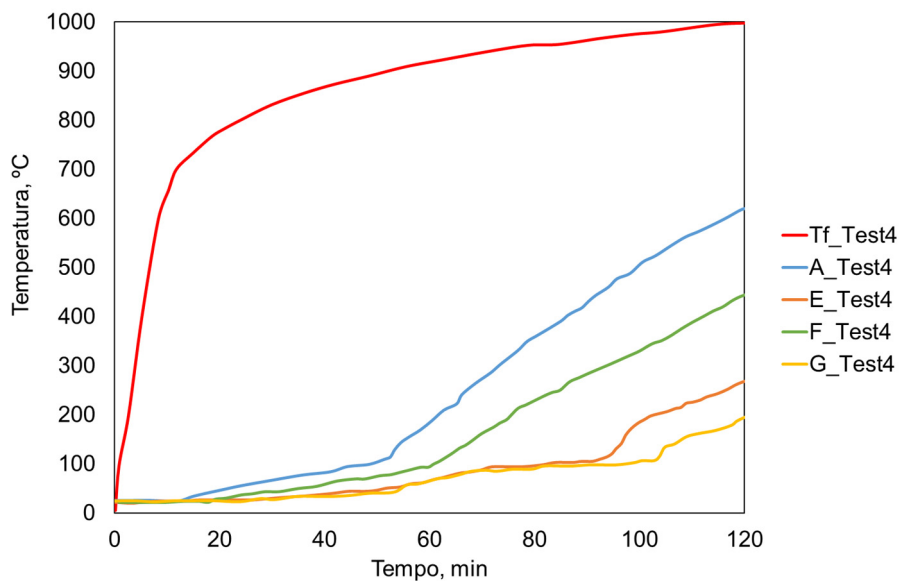


Figura 22 - Curva de incêndio e evolução da temperatura nos pontos de controlo do ensaio 4

Por fim, no trabalho experimental conduzido por H. Takeda e J. R. Mehaffey [2] é apresentada a secção residual resultante da carbonização da madeira para os instantes de tempo de 90, 100, 110 e 120 minutos. Na Figura 23 encontra-se a representação esquemática da carbonização nos instantes de tempo considerados no ensaio 4.

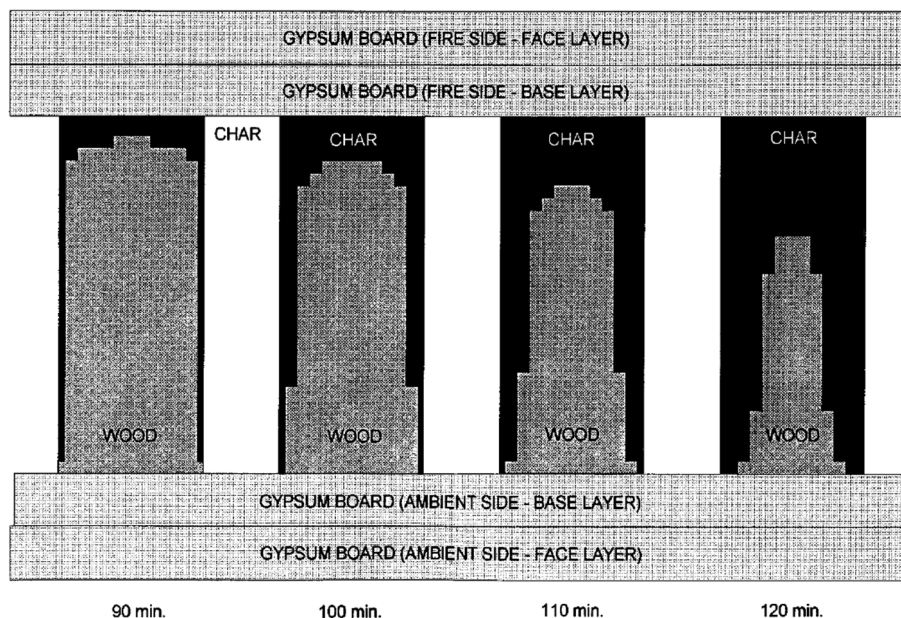


Figura 23 - Evolução da carbonização da madeira no ensaio 4 [2]

Tendo como base a representação esquemática da carbonização, presente na Figura 23, recorreu-se ao software *ImageJ*® para determinação da secção residual na madeira. Este programa, relaciona os pixels de uma determinada imagem com as dimensões do elemento e delimita secções

por cores, permitindo assim, a obtenção da área carbonizada. Foi possível então, considerando a área total do montante de madeira e a área carbonizada, proceder-se ao cálculo da secção residual por aplicação da equação 40.

$$\text{Secção Residual [\%]} = \frac{A_{total} - A_{carbonizada}}{A_{total}} \times 100 \quad (40)$$

Na Tabela 19 apresentam-se os resultados da secção residual nos instantes de tempo considerados no ensaio 4.

Tabela 19 - Secção residual do modelo experimental do ensaio 4

Instante de tempo [min]	Área do montante [mm <sup>2</sup> ]	Área carbonizada [mm <sup>2</sup> ]	Secção Residual [%]
90	3382	616,9	81,8
100	3382	1160,4	65,7
110	3382	1632,6	51,7
120	3382	2516,1	25,6

## 4.2. Modelos numéricos desenvolvidos

No âmbito do estudo apresentado na presente dissertação, é efetuada uma análise térmica dos diferentes elementos construtivos em regime transiente considerando a não-linearidade das propriedades térmicas dos materiais e através da imposição de condições fronteira para simulação da ação do fogo. Neste sentido, foram utilizados modelos numéricos bidimensionais recorrendo ao programa de elementos finitos *ANSYS® Academic Student 2022 R1*.

Este programa, amplamente utilizado em investigação e projeto, permite a utilização de diferentes elementos finitos, cujos deverão ser selecionados em função do tipo de análise e do modelo construtivo a concretizar. Adicionalmente, é necessário considerar as propriedades dos materiais, a geometria do modelo em estudo e a parametrização requerida pelos elementos finitos a utilizar.

Numa fase inicial, o objetivo do estudo incidiu na validação numérica das condições experimentais obtidas pelos investigadores H. Takeda e J. R. Mehaffey [2], considerando uma reprodução da geometria dos modelos testados. Assim, tal como referido anteriormente, foi considerada uma dimensão transversal de 38 mm x 89 mm (largura x altura) para os montantes de madeira, espaçados de 400 mm entre centros. Contudo, considerou-se uma simplificação da espessura das placas de gesso ao nível da sua espessura, resultando numa diferença de 0,1 mm, em excesso, quando comparando com o modelo experimental. Em relação ao número de cavidades interiores, dado que nada é referido pelos autores, foram consideradas três cavidades. Por último, por se considerar com características próximas às do ensaio experimental, foram utilizadas as propriedades da madeira lamelada colada GL24h e o gesso tipo A. O modelo construtivo utilizado na validação e as respetivas dimensões encontram-se evidenciadas na figura 24.

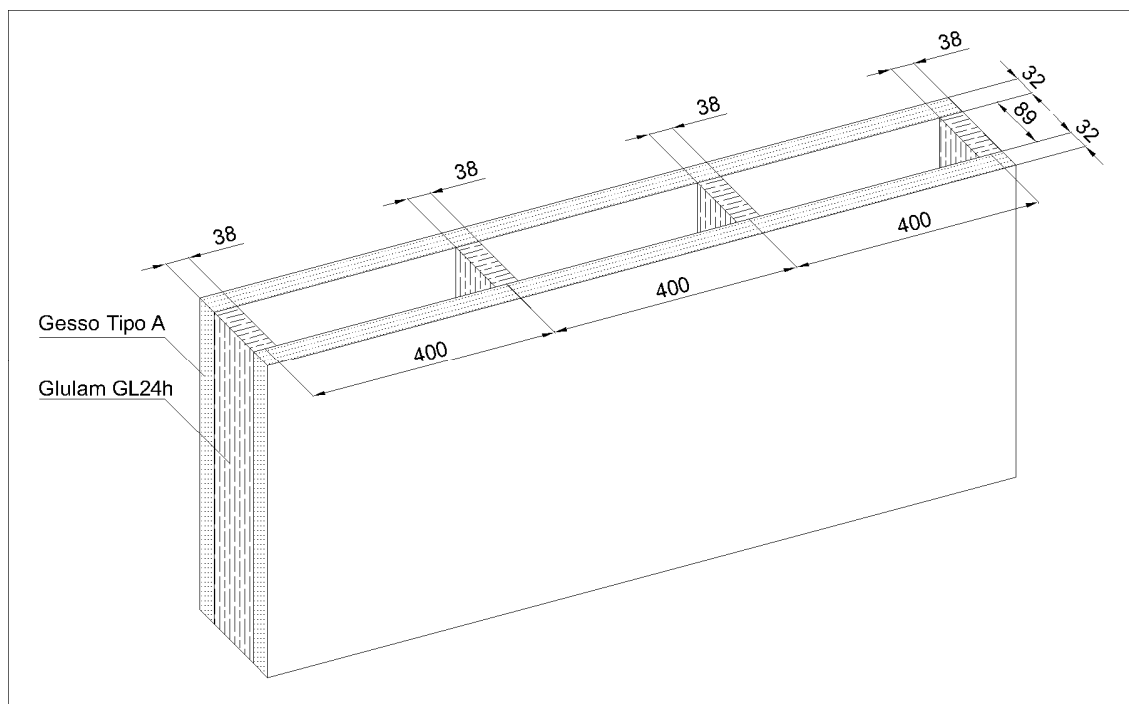


Figura 24 - Modelo construtivo e dimensões

Adotando um processo iterativo e de modo a obter a melhor aproximação aos resultados experimentais obtidos pelos investigadores H. Takeda e J. R. Mehaffey [2] foram desenvolvidos quatro modelos numéricos, cujos diferem apenas nos elementos finitos utilizados e nas condições fronteiras impostas nas cavidades.

No primeiro caso em estudo considerou-se a existência de ar nas cavidades, como um modelo sólido, onde as trocas de calor se realizam através de condução ao longo das cavidades. O segundo estudo considerou a introdução de um novo elemento capaz de simular o efeito da radiação entre as faces internas, sem o efeito do modelo sólido de ar na cavidade. Após esta fase, o objetivo passou pela tentativa de simular o efeito de convecção no interior da cavidade e consequente evolução da temperatura. Para este efeito, considerou-se, de forma análoga, a inserção da radiação e da convecção através do efeito da curva de ensaio experimental do ponto de controlo F (F\_Test4), representada na Figura 22. Contudo, apesar deste modelo se aproximar às condições experimentais, numa perspetiva de validação dos resultados obtidos pelos autores, este não pode ser considerado pois utiliza valores obtidos experimentalmente para validação numérica. Assim, procedeu-se à elaboração de um novo modelo considerando o efeito da radiação e da convecção no interior da cavidade através de dois novos elementos finitos.

Com isto, de forma resumida, os modelos numéricos desenvolvidos para validação do teste experimental foram os seguintes:

- **Modelo M1** – Modelo com malha de ar considerando o elemento finito PLANE55 considerado como um modelo sólido permitindo a condução de calor dentro da cavidade;
- **Modelo M2** – Modelo com efeito da radiação pela introdução de um novo elemento finito (SURF151) no interior da cavidade;

- **Modelo M3** – Modelo com fronteiras de radiação e convecção na cavidade pela introdução da curva de ensaio (F\_Test4), representativa da evolução da temperatura no interior resultante do teste experimental;
- **Modelo M4** – Modelo com efeito da radiação e convecção através da consideração de dois elementos finitos (SURF151 + LINK34) no interior da cavidade.

### 4.2.1. Elementos finitos e malhas

Na presente validação numérica dos resultados experimentais obtidos no ensaio 4 realizado por H. Takeda e J. R. Mehaffey [2] foram considerados três elementos finitos distintos no plano bidimensional: PLANE55, SURF151 e LINK34.

O elemento finito PLANE55 (*2-D Thermal Solid*) possui capacidade de condução térmica no plano bidimensional, através de um único grau de liberdade (temperatura) em cada nó. Quando aplicado em análises térmicas, este permite simulações em regime estacionário ou transiente, pelo que verifica as condições necessárias para a modelação numérica em regime transiente em estudo. Os resultados obtidos, utilizando este elemento finito, são temperaturas nodais, gradientes térmicos ou componentes do fluxo de calor na secção transversal do modelo [56]. Este elemento encontra-se presente nos quatro modelos numéricos desenvolvidos, sendo responsável pela condução térmica nos montantes de madeira lamelada colada GL24h e nas placas de gesso do tipo A. Adicionalmente, tal como referido anteriormente, este elemento é utilizado no modelo M1, dado que este considerada o ar presente nas cavidades como um sólido com capacidade de condução térmica.

A geometria, localização dos nós e sistema de coordenadas do elemento finito PLANE55 encontram-se representados na Figura 25.

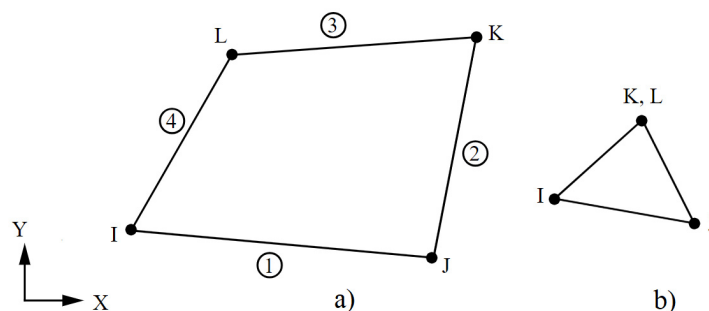


Figura 25 - Representação esquemática do elemento finito PLANE55 de quatro nós (a) e de três nós (b) (Adaptada [56])

Nos modelos numéricos M2 e M4, de modo a simular o efeito da transferência de calor por radiação entre as paredes das cavidades, considerou-se a utilização do elemento superficial SURF151 (*2-D Thermal Surface Effect*). Este elemento permite a aplicação de vários carregamentos ou de ações de efeito superficial, podendo ser sobreposto e/ou utilizado em simultâneo com outros elementos bidimensionais. O elemento SURF151 é constituído por dois nós, associados a um nó extra, conforme apresentado na Figura 26.

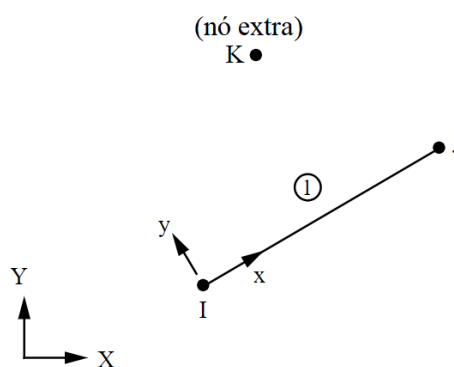


Figura 26 - Representação esquemática do elemento superficial SURF151 (Adaptado [56])

De acordo com a representação esquemática da Figura 26, no modelo numérico, os elementos SURF151 são definidos por ordem dos nós, ou seja, I e J representam os nós nas paredes internas das cavidades e K representa um nó extra colocado no interior da cavidade. Este último, ao longo do processo de evolução de temperatura realiza as trocas de calor por radiação com os nós superficiais que, por sua vez, transmitem essa energia térmica por condução aos montantes de madeira e às placas de gesso, através da coexistência dos elementos SURF151 e PLANE55.

Em relação ao modelo M4, o efeito de transferência de calor por convecção é garantido através da aplicação do elemento de barra LINK34 (*Convection Link*). Este elemento possui capacidade de convecção em elementos bidimensionais ou tridimensionais em regime estacionário ou transiente, sendo neste caso aplicado numa análise bidimensional em regime transiente. À semelhança dos elementos PLANE55 e SURF151, este possui um único grau de liberdade (temperatura) em cada nó. O elemento LINK34 é constituído por dois nós, o nó I pertencente à fronteira da cavidade interna e o nó J definido como um nó extra no interior do vazio, de acordo com o representado na Figura 27.

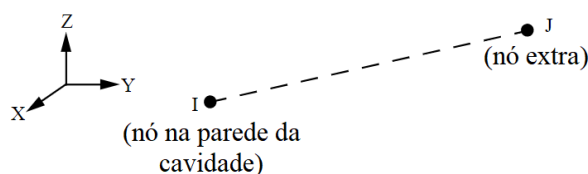


Figura 27 - Representação esquemática do elemento barra LINK34 (Adaptado [56])

Os materiais utilizados na modelação numérica, nomeadamente a madeira, o gesso e o ar constituem materiais isotrópicos cujas propriedades térmicas são não lineares. Em relação às suas superfícies, ao nível do gesso e da madeira, estas apresentam níveis de rugosidade diferentes de zero. Numa situação experimental, o contacto entre as superfícies não é perfeito, ou seja, existem pequenas cavidades de ar, existindo trocas de calor por convecção e radiação nestas zonas. No entanto, na elaboração da malha de elementos finitos assumiu-se o contacto perfeito entre todos os materiais, de modo a permitir a condução de energia térmica entre os mesmos.

Adicionalmente, na malha de elementos finitos considerou-se uma dimensão de aresta de cada elemento igual a 10 mm. Este valor foi determinado, considerando o elemento construtivo de menor espessura, ou seja, as placas de gesso com uma espessura igual a 32 mm. No entanto, nestas zonas, o número de elementos finitos foi ajustado a quatro (dimensão inferior a 10 mm), considerando sempre uma malha de elementos gerada automaticamente pelo *ANSYS® Academic Student 2022 R1*.

A malha de elementos finitos considerada no modelo numérico M1, ou seja, incluindo a malha de ar, a comparar com o modelo de teste experimental encontra-se na Figura 28.

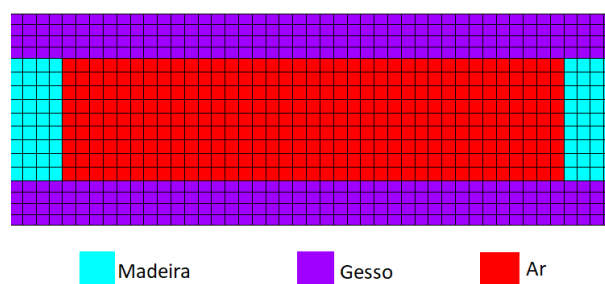


Figura 28 - Representação do modelo numérico com malha de ar (Modelo M1)

A malha de elementos finitos considerada nos modelos numéricos M2 a M4 (sem malha de ar), a comparar com o modelo de teste experimental encontra-se na Figura 29.

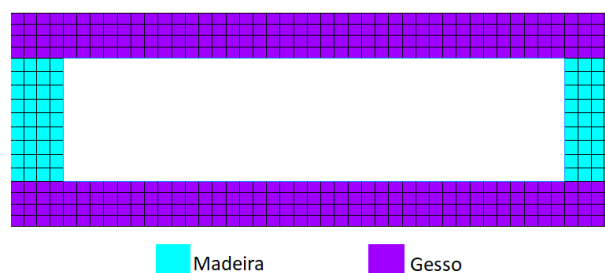


Figura 29 - Representação do modelo numérico sem malha de ar (Modelos M2 a M4)

## 4.2.2. Condições de fronteira

As condições de fronteira dos modelos numéricos dizem respeito à introdução dos fenômenos de trocas de calor por radiação e convecção, nas fronteiras externas e internas do modelo, assim como a consideração do efeito do aumento da temperatura pela introdução da curva de incêndio.

No presente estudo, tendo em conta os quatro modelos numéricos desenvolvidos, conclui-se que é possível admitir que existem condições de fronteira comuns a todos os modelos e outras que se aplicam a casos específicos. Assim, em todos os modelos, considerou-se como condição inicial uma temperatura ambiente de 20°C. Na face do modelo exposta ao fogo, o efeito do aumento da temperatura foi simulado através da introdução da curva de incêndio experimental  $T_f$  considerada pelos autores H. Takeda e J. R. Mehaffey [2] e apresentada na Figura 20. Este aumento da temperatura induzido pela curva de incêndio resulta na ocorrência de trocas de calor por convecção e radiação na face exposta ao fogo. Nas fronteiras laterais do modelo foi admitida a condição adiabática, sem qualquer troca de calor. Na face inferior não exposta ao fogo foram consideradas unicamente as trocas de calor por convecção.

Para introduzir o fenómeno de transferência de calor por convecção na face exposta e não exposta ao fogo recorreu-se à aplicação dos coeficientes de convecção definidos no EC1-1-2, EN 1991-1-2 (2010) [26]. Na face exposta ao fogo, considerou-se um coeficiente de convecção  $h_c$  de 25 W/m<sup>2</sup>K e na face não exposta ao fogo igual a 9 W/m<sup>2</sup>K. Em relação à radiação considerada na face exposta ao fogo, o valor de emissividade  $\epsilon$  foi igual a 1.

Na Figura 30 apresentam-se as condições de fronteira aplicadas no modelo com malha de ar nas cavidades (M1).

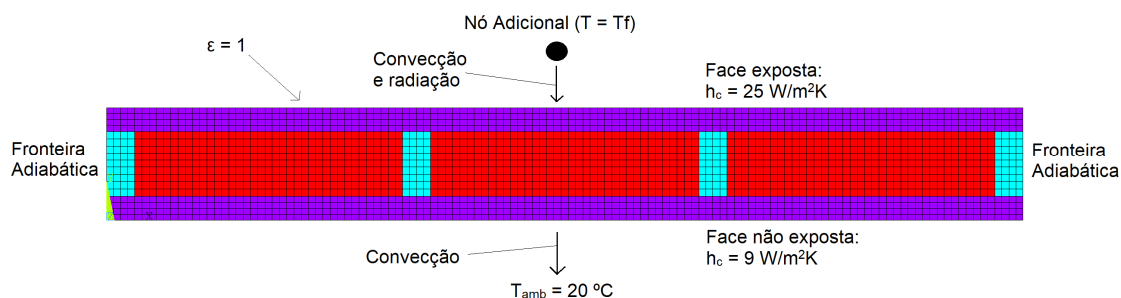


Figura 30 - Condições de fronteira admitidas no modelo com malha de ar nas cavidades (M1)

No modelo com o efeito da radiação nas cavidades admitiu-se a emissividade  $\epsilon$  com um valor de 0,8 relativa ao ambiente. As condições de fronteira aplicadas no modelo M2 apresentam-se na Figura 31.

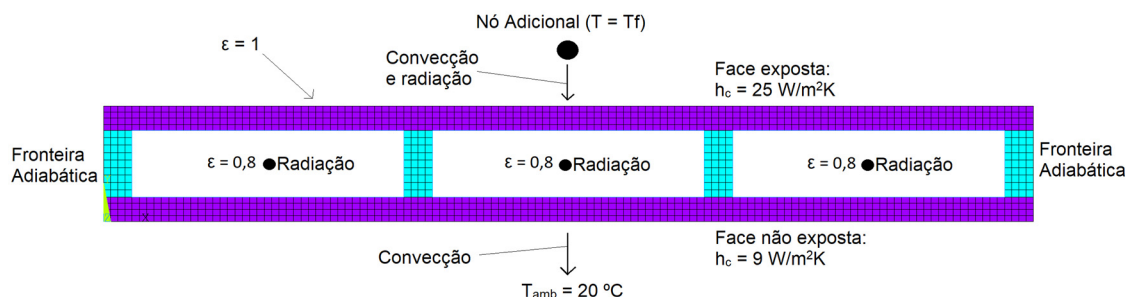


Figura 31 - Condições de fronteira admitidas no modelo com efeito da radiação nas cavidades (M2)

Em relação ao modelo M3, tal como referido anteriormente, considera o efeito do aumento da temperatura nas cavidades através da inserção da curva de ensaio experimental do ponto de controlo F ( $F_{\text{Test4}}$ ). Assim, de acordo com o definido pelos investigadores H. Takeda e J. R. Mehaffey [2], admitiu-se um coeficiente de convecção  $h_c$  de  $9 \text{ W/m}^2\text{K}$  no interior das cavidades e o valor de emissividade igual a 1 nas condições indicadas de teste. As condições de fronteiras aplicadas no modelo M3 encontram-se representadas na Figura 32.

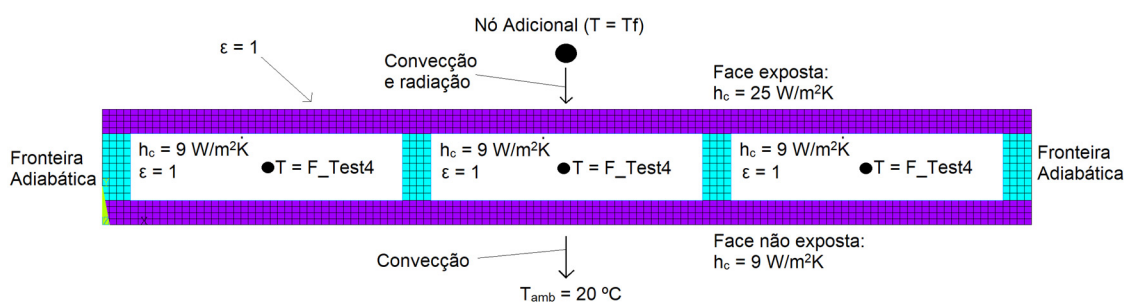


Figura 32 - Condições de fronteira admitidas no modelo com curva de aquecimento nas cavidades (M3)

Por último, o modelo M4 considera o efeito das trocas de calor por radiação e convecção através da combinação de dois elementos finitos. Em relação à radiação, admitiram-se as condições iniciais preconizadas no modelo M2, ou seja, um valor de emissividade igual a 0,8. Em relação às trocas de calor por convecção, os *inputs* exigidos pelo elemento de barra LINK34 definem um valor constante para o coeficiente de convecção através da adoção de um coeficiente empírico para as condições do modelo numérico. Neste sentido, de acordo com o definido pelo *software ANSYS® Academic Student 2022 R1*, a opção que melhor se enquadrava na situação do estudo diz respeito à consideração da média de temperaturas entre as superfícies internas das cavidades e o ponto com efeito do aumento da temperatura (nó adicional), sendo necessário admitir o valor para o coeficiente de convecção  $h_c$ . Após consulta do EC1-1-2, EN 1991-1-2 (2010) [26], verifica-se que este apenas define os coeficientes de convecção para condições de total exposição ao fogo ou o inverso, ou seja, temperatura ambiente constante. No entanto, de acordo com A. Ujma e N. Umnyakova [57], a constante de convecção entre duas superfícies  $h_{c(1-2)}$  calcula-se aplicando a equação 41.

$$h_{c(1-2)} = \frac{c_{1-2} \left[ \left( \frac{T_1+273}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2+273}{100} \right)^4 \right]}{T_1 - T_2} \quad (41)$$

Na qual  $c_{1-2}$  [ $\text{W}/\text{m}^2\text{K}^4$ ] corresponde à constante de transferência de calor por radiação entre as duas superfícies e  $T_1$  e  $T_2$  [K] dizem respeito às temperaturas nas superfícies.

Assim, conclui-se que o coeficiente de convecção  $h_{c(1-2)}$ , nas condições do modelo numérico pode ser aproximado à média dos definidos pelo EC1-1-2, EN 1991-1-2 (2010) [26]. Com isto, para o modelo M4, admitiu-se um coeficiente de convecção  $h_c$  igual a  $17,5 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$ . As condições de fronteira aplicadas no modelo com efeito de radiação e convecção encontram-se representadas na Figura 33.

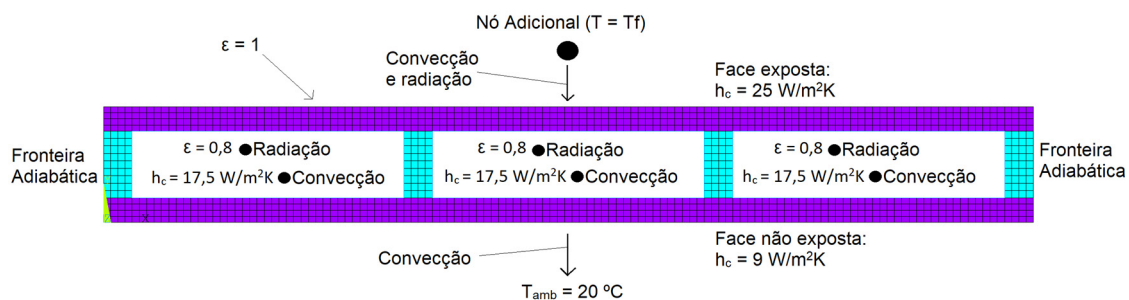


Figura 33 - Condições de fronteira admitidas no modelo com efeito de radiação e convecção nas cavidades (M4)

Para os modelos em estudo, o tempo total das simulações corresponde ao tempo de exposição às condições de fogo coincidentes com as definidas pelos autores H. Takeda e J. R. Mehaffey [2] para o ensaio 4, ou seja, 120 minutos de exposição. Durante o tempo de simulação, foram considerados intervalos de tempo de 60 segundos, no qual o incremento de tempo mínimo definiu-se como 1 segundo e o máximo como 60 segundos, dado que se verificou que intervalos de tempo inferiores não apresentavam uma melhoria significativa dos resultados e aumentavam consideravelmente os tempos de simulação.

De modo a satisfazer as condições não lineares do problema, o programa *ANSYS® Academic Student 2022 R1* recorre ao método iterativo de Newton-Raphson modificado, utilizando um critério de convergência baseado no fluxo de calor com uma tolerância admitida de 0,9. A verificação do critério de Newton-Raphson foi realizada através da aplicação da norma euclidiana  $L_2$ , com o mínimo de referência de 1.

### 4.3. Validação dos resultados

Após a simulação dos modelos numéricos desenvolvidos torna-se necessário analisar os resultados de modo a validar as condições admitidas e a parametrização utilizada no software *ANSYS® Academic Student 2022 R1*, no âmbito da análise térmica. Assim, no presente capítulo apresentam-se os resultados obtidos para o campo de temperaturas, ao nível da carbonização na secção transversal dos montantes de madeira e a respetiva secção residual para os instantes de tempo em estudo. Tal como abordado anteriormente, a presente validação dos resultados numéricos consiste numa comparação com os obtidos pelos autores H. Takeda e J. R. Mehaffey [2] no ensaio 4. Adicionalmente, realiza-se a verificação do critério de isolamento térmico para o modelo numérico com a melhor aproximação às condições experimentais.

#### 4.3.1. Temperaturas

A validação dos modelos numéricos teve em consideração a evolução do campo de temperaturas nos pontos de controlo A, E e F, conforme representação na Figura 21. A opção por estes três nós recaiu no facto de se encontrarem em posições na quais se permite avaliar as interações entre as fronteiras dos materiais. O ponto A encontra-se no contacto entre as placas de gesso e o montante de madeira, o ponto E localiza-se no centro do elemento de madeira e o ponto F situa-se na fronteira entre a madeira e a cavidade de ar, numa posição central. A determinação do campo de temperaturas nestes pontos permite a obtenção das curvas descritivas da sua evolução no tempo, permitindo a comparação entre os resultados numéricos e os obtidos no teste 4 do ensaio conduzido por H. Takeda e J. R. Mehaffey [2].

Tendo em conta o modelo com malha de ar nas cavidades (M1), a comparação entre as curvas de evolução de temperatura do teste 4 do ensaio experimental e as obtidas na simulação numérica, encontram-se representadas na Figura 34.

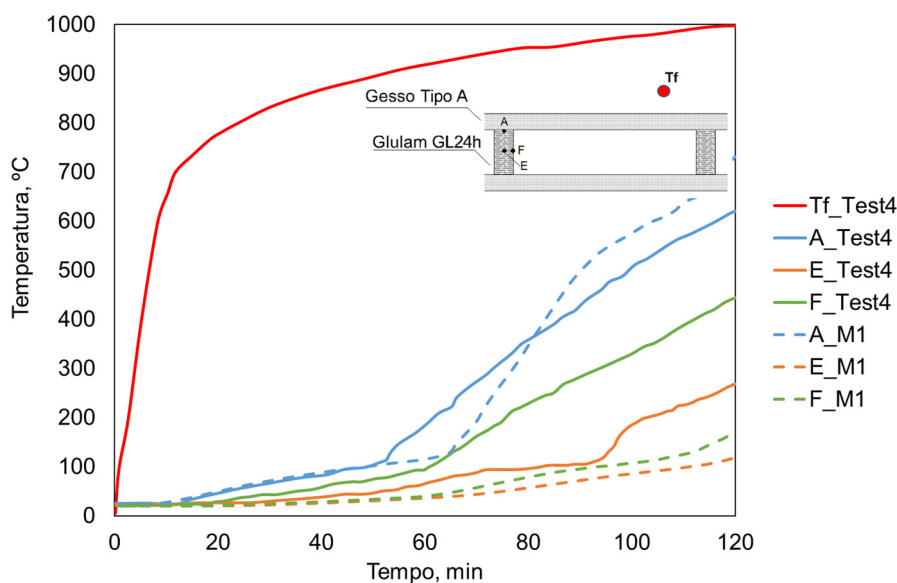


Figura 34 – Campo de temperaturas obtido para o modelo com malha de ar nas cavidades (M1)

Analisando os resultados obtidos para o modelo M1, descritos na Figura 34, conclui-se que este não se aproxima às condições obtidas experimentalmente no ensaio 4. Em relação à curva de temperaturas no ponto A é possível observar que esta é a que apresenta maior campo de temperaturas por se localizar entre a interface do gesso e madeira, sendo que se aproxima às condições experimentais. Analisando o seu desenvolvimento verifica-se que, apesar do aumento de temperatura ocorrer numa fase mais tardia, esta apresenta um declive ligeiramente superior à curva experimental, resultando numa temperatura no instante de tempo final (120 minutos) superior à obtida no ensaio 4. Tendo em conta a sua localização no modelo, conclui-se que o seu campo de temperaturas é maioritariamente afetado pelas propriedades do gesso considerado, uma vez que os autores utilizam gesso do tipo X e no modelo numérico gesso do tipo A, que apresenta uma massa volúmica ligeiramente inferior.

Em relação aos pontos E e F, o campo de temperaturas obtido é muito reduzido, praticamente não sofrendo qualquer perturbação significativa. Neste sentido, conclui-se que a malha de ar não descreve as condições experimentais, dado que considera o fenómeno de condução térmica no interior da cavidade e, na realidade, ocorre a combinação de trocas de calor por radiação e convecção.

Neste sentido, procedeu-se à simulação do modelo com efeito da radiação nas cavidades (M2). A comparação entre as curvas de evolução de temperatura do teste 4 do ensaio experimental e as obtidas na simulação numérica do modelo encontra-se representada na Figura 35.

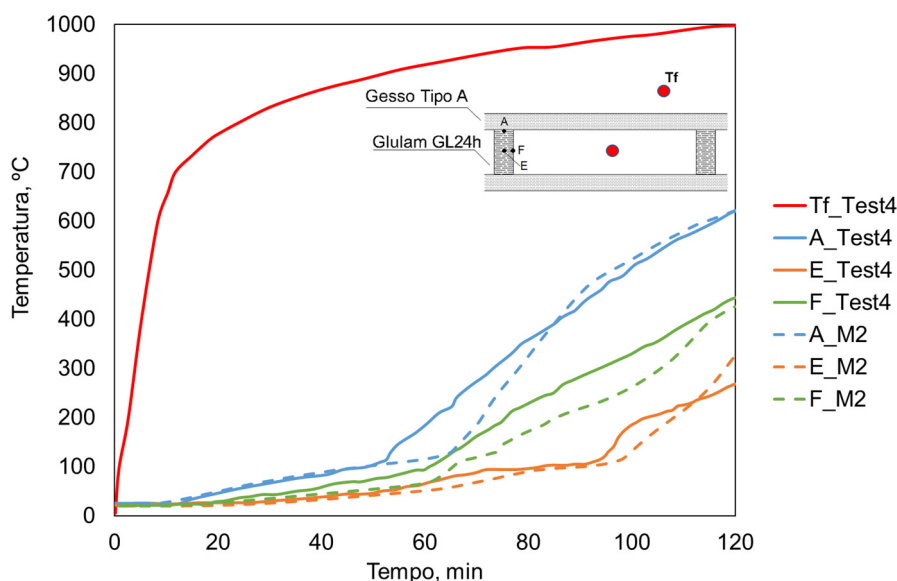


Figura 35 – Campo de temperaturas obtido para modelo com efeito da radiação nas cavidades (M2)

Analisando a Figura 35, a evolução de temperatura resultante no ponto A é semelhante à obtida no modelo com malha de ar (M1). No entanto, a sua curva sofre uma redução do declive, aproximando-se à resultante no teste 4 do ensaio experimental. Com isto, conclui-se que, apesar de depender essencialmente das propriedades do gesso utilizado, a introdução do elemento de radiação (SURF151) resulta numa redução das temperaturas obtidas a partir do instante de tempo

de 80 minutos. Esta alteração pode ser justificada pela uniformização do aquecimento sofrido pelos montantes de madeira.

Relativamente às curvas E e F, verifica-se que as curvas obtidas apresentam uma evolução com um comportamento próximo ao ensaio experimental, sustentando a grande influência do fenómeno de radiação no interior das cavidades e a forma como esta afeta o campo de temperaturas nos montantes de madeira.

No entanto, apesar do modelo M2 validar as condições experimentais, na presente dissertação pretende-se considerar a influência da convecção no interior das cavidades de ar. Neste sentido, numa tentativa de prever o campo de temperaturas obtido pela combinação das trocas de calor por convecção e radiação realizou-se um modelo introduzindo a curva de aquecimento experimental no ponto de controlo F nas cavidades. Na Figura 36 apresenta-se a comparação entre as curvas de evolução de temperatura do teste 4 do ensaio experimental e as obtidas na simulação numérica do modelo M3.

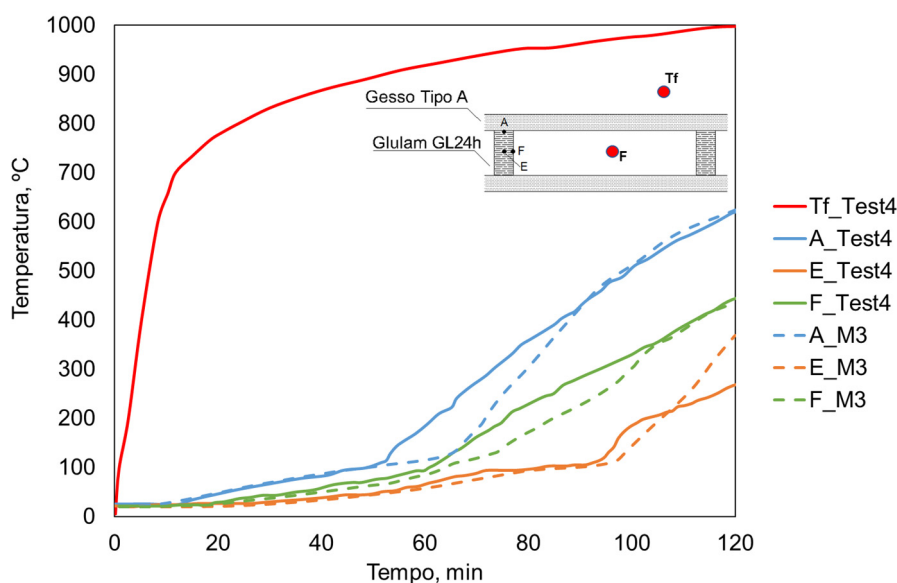


Figura 36 – Campo de temperaturas obtido para o modelo com curva de aquecimento nas cavidades (M3)

De acordo com os resultados obtidos presentes na Figura 36, verifica-se que a introdução das trocas de calor por convecção no interior das cavidades de ar apresenta uma influência reduzida na aproximação às condições experimentais. Nos três pontos de controlo apenas se verificou um ligeiro reajuste e conseqüente aproximação das curvas de evolução de temperaturas obtidas no modelo M2 às obtidas experimentalmente no ensaio 4.

Contudo, as condições iniciais utilizadas no modelo M3 não verificam as imposições de um modelo numérico de validação experimental, uma vez que se considerou a introdução de um parâmetro obtido experimentalmente no mesmo (Curva experimental do ponto de controlo F). Neste sentido, na tentativa de combinação de convecção e radiação, considerou-se a utilização do elemento LINK34 (com o efeito de convecção) e do elemento superficial SURF151 (efeito de radiação), tendo sido realizada a sua simulação numérica. Na Figura 37 apresenta-se a comparação entre as curvas de evolução de temperatura do teste 4 do ensaio experimental e as obtidas na simulação numérica do modelo M4.

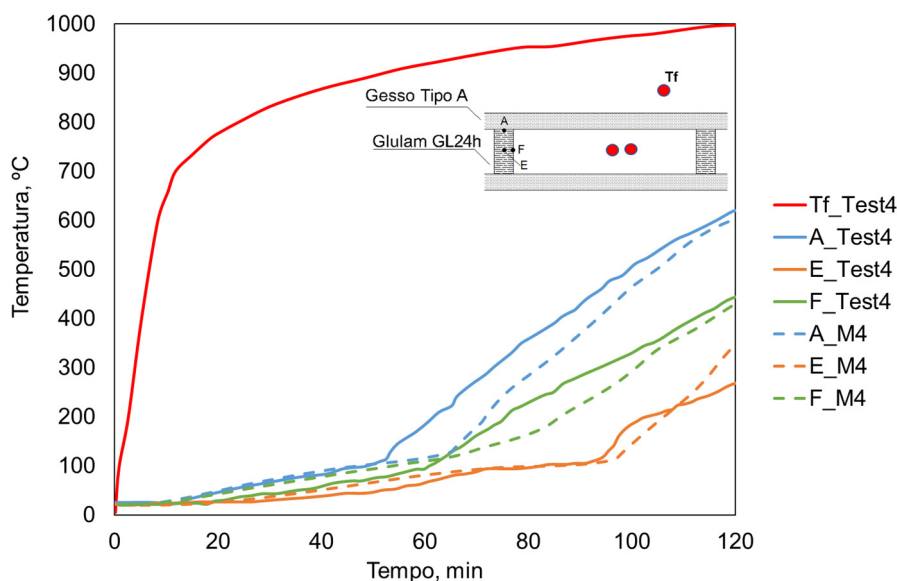


Figura 37 – Campo de temperaturas obtido para o modelo com efeito de radiação e convecção nas cavidades (M4)

Analisando a Figura 37, ao nível da curva de temperaturas obtidas para o ponto A, conclui-se que o seu aumento de temperatura ocorre numa fase mais tardia do que experimentalmente. No entanto, esta curva encontra-se em linha com os obtidos nos restantes modelos. A principal diferença prende-se com o paralelismo existente entre o declive experimental e o numérico, assim como a temperatura final obtida ser praticamente coincidente com a experimental, pelo que se conclui que o modelo M4 valida a evolução de temperatura no ponto A.

Em relação ao ponto F, este apresenta uma evolução de temperatura muito semelhante à obtida no modelo M3 e à resultante no teste 4 do ensaio experimental, sendo os declives aproximadamente iguais, apesar da curva F\_M4 apresentar temperaturas ligeiramente inferiores às experimentais.

Por último, analisando a curva obtida numericamente para o ponto E verifica-se que esta é coincidente à experimental até ao instante de tempo aproximadamente igual a 110 minutos, apresentando um pico de temperatura até ao instante final. No entanto, este aumento do declive nos instantes de tempo finais ocorre em todos os modelos numéricos desenvolvidos, pelo que se conclui que a curva E\_M4 valida as condições experimentais.

Com isto, considerando os resultados obtidos para o modelo M4, conclui-se que este é o que melhor se aproxima às condições experimentais ao nível do campo de temperaturas. Adicionalmente, o modelo considera o efeito de radiação e convecção nas cavidades através da combinação de três elementos finitos distintos, sendo o mais completo dos modelos numéricos desenvolvidos. A malha de elementos finitos que define o modelo M4 encontra-se presente da Figura 38.

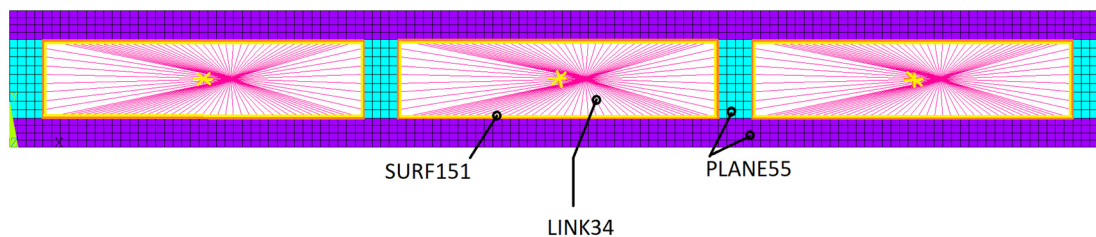


Figura 38 - Malha de elementos finitos do modelo com efeito de radiação e convecção nas cavidades (M4)

### 4.3.2. Carbonização

Os modelos numéricos desenvolvidos foram avaliados tendo em conta a evolução da carbonização ao longo do tempo. De modo a comparar com os resultados experimentais foram obtidas as imagens esquemáticas para os instantes de tempo de 90, 100, 110 e 120 minutos, conforme definido pelos autores H. Takeda e J. R. Mehaffey [2] para o ensaio 4 do teste experimental. O montante de madeira utilizado para analisar a carbonização consistiu num dos perfis centrais, de modo a obter resultados para a região mais crítica. Com o intuito de comparar a carbonização obtida através das simulações com a do ensaio experimental considerou-se, em todos os modelos numéricos, a temperatura limite para formação da camada carbonizada imposta pelos autores, de 288°C.

A presente análise à carbonização foi realizada para cada um dos instantes de tempo referidos acima, não considerando a carbonização obtida no modelo numérico com malha de ar (M1), dado que este apresenta resultados diferentes dos experimentais. Neste sentido, a carbonização é verificada pela comparação simultânea entre os três modelos numéricos com resultados válidos, ou seja, M2, M3 e M4. Assim, na Figura 39 representa-se a carbonização resultante no instante de tempo de 90 minutos.

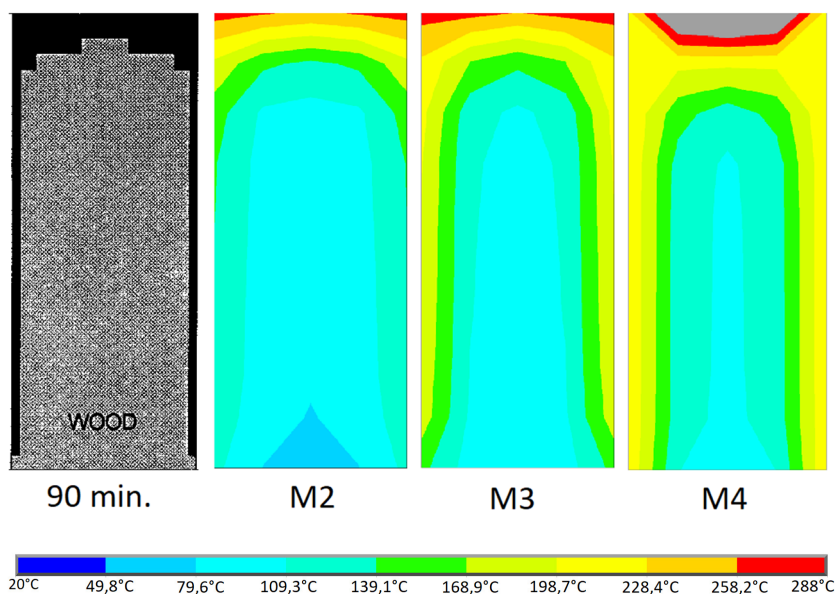


Figura 39 – Comparação da carbonização nos modelos numéricos desenvolvidos para o instante de 90 minutos com o modelo experimental

Analisando a carbonização representada na Figura 39, verifica-se que a carbonização obtida nos quatros modelos numéricos desenvolvidos apresenta uma evolução retardada em comparação com o ensaio experimental. Os modelos M2 e M3, para o instante de tempo 90 minutos, não apresentam qualquer zona carbonizada, enquanto o modelo M4 apresenta uma carbonização significativamente inferior à obtida experimentalmente. Estes resultados vão de encontro ao verificado nos gráficos de evolução de temperatura, dado que nos pontos E e F as temperaturas obtidas numericamente são ligeiramente inferiores às experimentais, reduzindo o efeito da carbonização.

Para o instante de tempo de 100 minutos, a comparação da carbonização encontra-se representada na Figura 40.

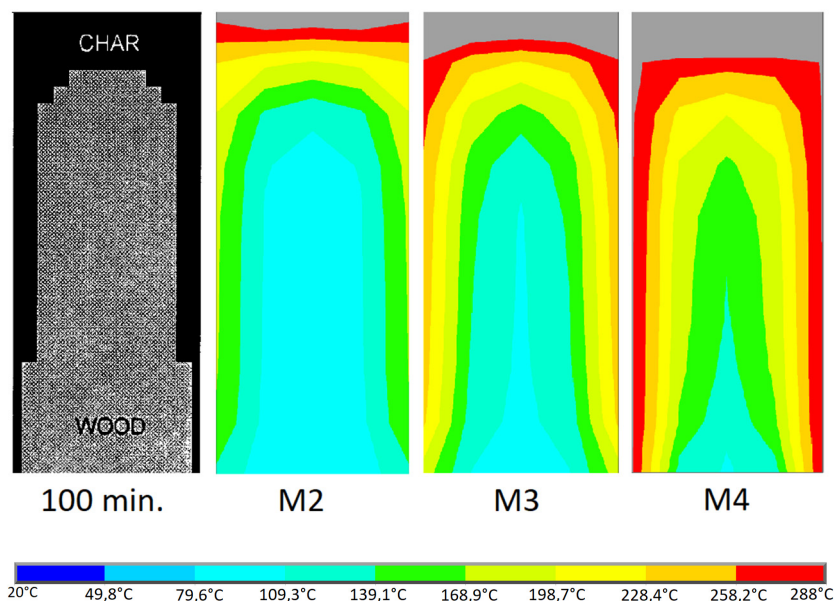


Figura 40 – Comparação da carbonização nos modelos numéricos desenvolvidos para o instante de 100 minutos com o modelo experimental

Tendo em conta os resultados obtidos para o instante de tempo 100 minutos presentes na Figura 40 verifica-se que todos os modelos testados apresentam área carbonizada. No entanto, a carbonização obtida nos modelos M2 e M3 verifica-se bastante distinta da experimental. À semelhança do instante de tempo de 90 minutos, a evolução de temperatura nestes modelos é ligeiramente tardia e inferior à obtida experimentalmente, resultando numa redução na secção carbonizada. Em relação ao modelo M4, apesar da zona carbonizada ser visivelmente inferior à experimental, o perfil obtido aproxima-se ao obtido pelos autores. Neste sentido, conclui-se que o efeito da transferência por convecção admitido no interior da cavidade possui influência na definição da evolução da carbonização nos montantes de madeira.

De forma a avaliar a carbonização para o instante de tempo de 110 minutos, apresenta-se na Figura 41 os resultados obtidos.

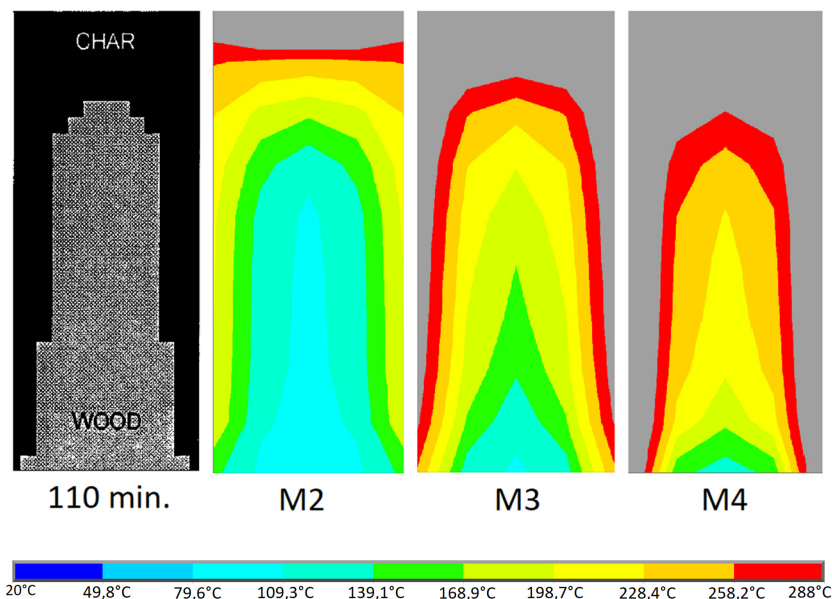


Figura 41 – Comparação da carbonização nos modelos numéricos desenvolvidos para o instante de 110 minutos com o modelo experimental

Para o instante de tempo de 110 minutos, representado na Figura 41, verifica-se que os resultados obtidos para os modelos M3 e M4 apresentam perfis de evolução da carbonização muito semelhantes ao experimental, enquanto o modelo M2 possui um perfil muito distinto. Com isto, conclui-se que o modelo M2, pelo facto de apenas considerar o efeito da radiação nas cavidades internas, apresenta uma zona carbonizada muito residual, praticamente não sofrendo qualquer evolução quando comparado com o anterior instante de tempo (90 minutos). Em relação aos resultados para os modelos M3 e M4, ambos apresentam um perfil semelhante ao experimental. No entanto, pela análise realizada, considera-se que o modelo M4 aproxima-se mais favoravelmente ao obtido pelos autores, comprovando a melhor aproximação de evolução das temperaturas.

Por último, apresenta-se na Figura 42 a comparação da carbonização para o instante de tempo final de 120 minutos.

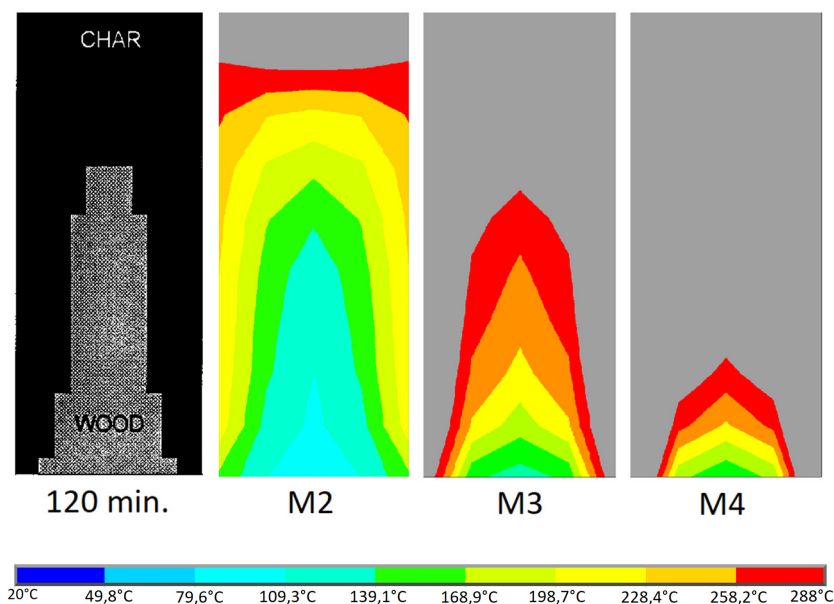


Figura 42 – Comparação da carbonização nos modelos numéricos desenvolvidos para o instante de 120 minutos com o modelo experimental

Analisando os resultados presente na Figura 42 para o instante de tempo final e desconsiderando a carbonização resultante no modelo M2 pelos motivos apresentados anteriormente, conclui-se que os modelos M3 e M4 evoluíram o seu perfil de carbonização de acordo com o obtido experimentalmente. No entanto, o modelo M4 aparenta possuir uma zona carbonizada superior à obtida pelos autores, enquanto o modelo M3 aproxima-se consideravelmente.

Tendo em conta a carbonização apresentada nas Figuras 39 a 42 conclui-se que o efeito da consideração das trocas de calor pela combinação de radiação e convecção é bastante considerável na aproximação aos resultados experimentais. No modelo com efeito único de radiação nas cavidades a carbonização é praticamente nula e o perfil de evolução da zona carbonizada é bastante díspar do experimental, ao contrário do obtido para os modelos com curva de aquecimento e com efeito da radiação e convecção nas cavidades.

### 4.3.3. Secção residual

De modo a avaliar a evolução e os perfis de carbonização presentes nas Figuras 39 a 42 e comparar efetivamente a sua proximidade com os resultados obtidos experimentalmente pelos autores determinou-se a secção residual dos montantes centrais de madeira. Para esse feito, utilizou-se a ferramenta *ImageJ*<sup>®</sup>, que permite relacionar os pixéis de uma determinada imagem com dimensões conhecidos e definir as áreas delimitadas por cores distintas.

Assim, utilizando o programa para calcular a área carbonizada nos diferentes modelos e instantes de tempo, e conhecendo a área transversal do montante de madeira, calcularam-se as secções residuais aplicando a equação 40. Os resultados da secção residual obtidos para os modelos numéricos desenvolvidos encontram-se na Tabela 20.

Tabela 20 - Secção residual dos modelos numéricos desenvolvidos

Modelo	Área do montante [mm <sup>2</sup> ]	Secção Residual [%]			
		90 minutos	100 minutos	110 minutos	120 minutos
Experimental	3382	81,8	65,7	51,7	25,6
M2	3382	100,0	96,6	92,1	88,2
M3	3382	100,0	92,6	72,6	36,4
M4	3382	96,8	88,3	51,3	13,3

Considerando os resultados obtidos na Tabela 20 para a secção residual dos montantes de madeira conclui-se que o modelo com efeito da radiação e convecção nas cavidades (M4) apresenta os resultados mais próximos e favoráveis ao ensaio 4 do teste experimental.

#### 4.3.4. Critério de isolamento térmico

Os resultados apresentados para o campo de temperaturas, carbonização e secção residual não permitem determinar a resistência ao fogo do modelo do ensaio 4 do teste experimental. De modo a obter a resistência ao fogo torna-se necessário aplicar o critério de isolamento térmico, definido pela norma EN 1363-1:2020 [1]. Conforme abordado anteriormente, a resistência ao fogo atribuída por este critério define-se pelo menor escalão de tempo, na face não exposta, com base na temperatura pontual máxima  $T_{máx}$ , ou seja, 180°C acima da temperatura inicial  $T_0$  de 20°C, ou pela temperatura média na superfície  $T_{méd}$ , 140°C acima da temperatura inicial. De modo a analisar a evolução de temperatura definiram-se nós na superfície não exposta ao fogo. Estes foram numerados de 1 a 13, da esquerda para a direita, conforme representado na Figura 43. Na distribuição dos pontos de análise foi considerado um ponto ao centro de cada montante de madeira e de cada cavidade, tendo os restantes sido distribuídos a uma distância intermédia.

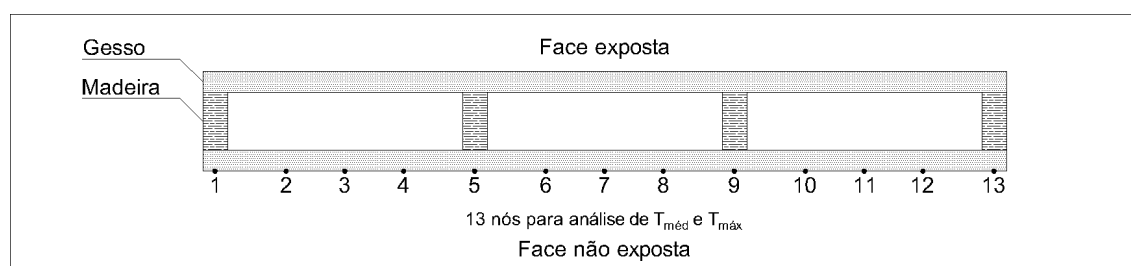


Figura 43 - Identificação dos nós para análise do critério de isolamento térmico do ensaio 4

Na presente análise foi considerado apenas o modelo com efeito de radiação e convecção nas cavidades (M4), pelo facto de ter apresentado a melhor aproximação ao teste experimental. Adicionalmente, de modo a atingir as temperaturas limite impostas pelo critério de isolamento térmico de acordo com a norma EN 1363-1:2020 [1] e definidas anteriormente para o caso de estudo, procedeu-se à simulação considerando a evolução de temperatura equivalente a 240 minutos (4 horas) de exposição ao fogo. Na Figura 44 encontra-se o gráfico corresponde à evolução da temperatura média na superfície não exposta ao fogo e no nó onde se verifica a temperatura máxima.

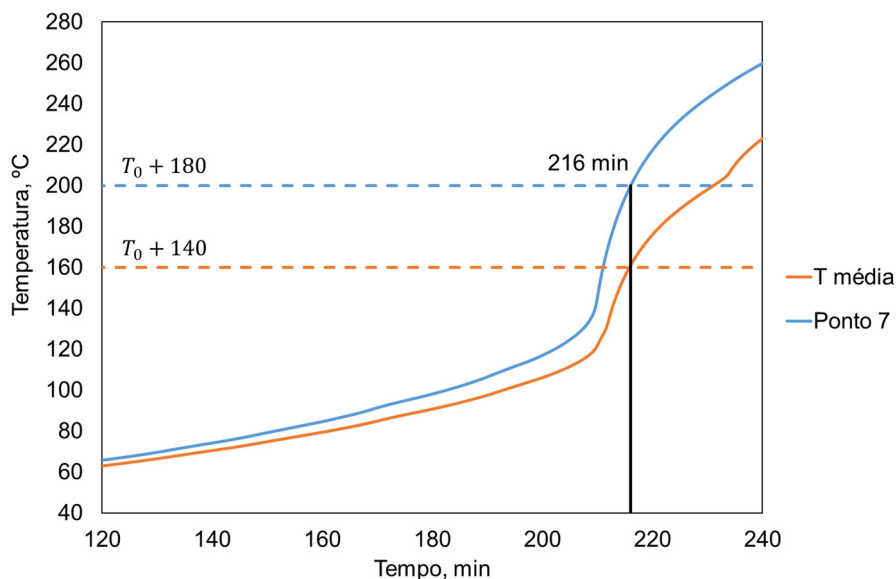


Figura 44 – Critério de isolamento térmico do modelo com efeito de radiação e convecção nas cavidades (M4)

Analisando a evolução de temperaturas presente na Figura 44 e após a imposição do critério de isolamento térmico, verifica-se que a interseção da condição da temperatura média e temperatura pontual máxima acontece para o mesmo instante de tempo. Assim, conclui-se que a resistência ao fogo imposta pelo critério de isolamento térmico, para o modelo M4, é aproximadamente igual a 216 minutos. Analisando os resultados obtidos pelos investigadores Takeda e J. R. Mehaffey [2] para o ensaio 4 verifica-se que estes apenas submeteram o modelo experimental até aos 135 minutos, instante no qual ainda não tinham sido alcançadas as temperaturas limite impostas pelo critério de isolamento térmico. No entanto, este critério foi simulado recorrendo ao programa computacional *WALL2D*, desenvolvido com base nos resultados experimentais. Com base no modelo computacional, os autores obtiveram um escalão de resistência ao fogo aproximadamente igual a 226 minutos. Com isto, conclui-se que os resultados obtidos para o modelo M4 aproximam-se aos resultados obtidos pelos investigadores no modelo computacional e nos testes experimentais, validando o modelo numérico desenvolvido.

## 5. NOVOS MODELOS PARAMÉTRICOS

O presente capítulo consiste na análise computacional para a avaliação da resistência ao fogo de elementos construtivos de suporte em aglomerado de madeira, de acordo com o principal objetivo da dissertação. Tendo como base a validação do modelo numérico exposta no capítulo 4, torna-se possível estudar o comportamento ao fogo, em diferentes modelos paramétricos construtivos de suporte, considerando as mesmas premissas. Deste modo, a variação dos parâmetros geométricos, associados às soluções construtivas, como a distância entre os centros, a altura e a largura dos montantes, bem como a espessura do gesso permitirá determinar a influência de cada variável. Assim, o presente estudo incide na determinação do campo de temperaturas nos pontos de controlo dos diferentes modelos paramétricos, da carbonização nos montantes de madeira, do cálculo da respetiva secção residual e da resistência ao fogo dos modelos em análise, com base na aplicação do critério de isolamento térmico, de acordo com a norma EN 1363-1:2020 [1].

### 5.1. Modelos paramétricos em estudo

O estudo da resistência ao fogo dos novos modelos teve como base a adoção de uma metodologia paramétrica, com base em diferentes parâmetros geométricos, associada à solução construtiva tipo. No entanto, apesar do objetivo principal, estudar o comportamento dos modelos quando sujeitos a condições de fogo padrão, verificou-se, em complemento, que este é intrinsecamente afetado pelos parâmetros geométricos de forma direta. Assim, o estudo subdivide-se em quatro estudos iterativos, cada um avaliando a influência dos parâmetros geométricos. O primeiro estudo consiste na variação da distância entre os centros dos montantes de madeira ( $D$ ), o segundo na alteração da altura dos montantes de madeira ( $W$ ), o terceiro afetou a largura dos montantes de madeira ( $H$ ) e, por último, o quarto avaliou o impacto da espessura das placas de gesso ( $T_g$ ). O modelo construtivo tipo, com a identificação dos parâmetros geométricos, encontra-se representado na Figura 45.

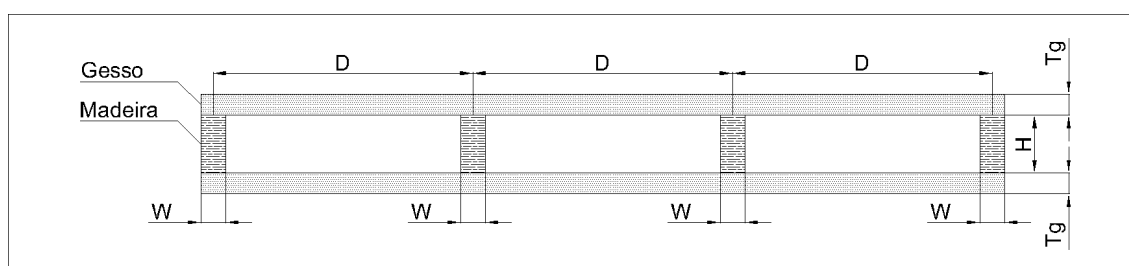


Figura 45 - Modelo construtivo paramétrico do tipo  $[H \times W + T_g] \times D$

Relativamente aos estudos adotou-se uma metodologia iterativa e sequencial, sendo que cada estudo é constituído por três variações de um dos parâmetros geométricos ( $D$ ,  $H$ ,  $W$  e  $T_g$ ), conforme representado na Tabela 21.

Tabela 21 - Metodologia de estudo dos modelos paramétricos

Estudo	Modelos paramétrico do tipo $[H \times W + Tg] \times D$			Verificação
Distância entre centros (D)	$[70 \times 30 + 12,5] \times 400$	$[70 \times 30 + 12,5] \times 500$	$[70 \times 30 + 12,5] \times 600$	D que impõe melhor desempenho (D1)
Altura da madeira (H)	$[70 \times 30 + 12,5] \times D1$	$[90 \times 30 + 12,5] \times D1$	$[120 \times 30 + 12,5] \times D1$	H que impõe melhor desempenho (H1)
Largura da madeira (W)	$[H1 \times 30 + 12,5] \times D1$	$[H1 \times 40 + 12,5] \times D1$	$[H1 \times 50 + 12,5] \times D1$	W que impõe melhor desempenho (W1)
Espessura do gesso (Tg)	$[H1 \times W1 + 12,5] \times D1$	$[H1 \times W1 + 15] \times D1$	$[H1 \times W1 + 25] \times D1$	Tg que impõe melhor desempenho (Tg1)

Analisando a Tabela 21 conclui-se que cada estudo possui um objetivo parcial, cujo consiste na determinação do valor referente ao parâmetro geométrico que permite a obtenção de um melhor desempenho, ou seja, uma maior resistência ao fogo. Adicionalmente, verifica-se que a partir do estudo da distância entre centros (D), um dos modelos paramétricos repete-se no estudo seguinte, conforme a representação sombreada. Assim, o estudo consiste no desenvolvimento de 9 análises computacionais recorrendo ao programa de elementos finitos *ANSYS® Academic Student 2022 R1*. No que diz respeito aos materiais considerou-se a utilização da madeira lamelada colada GL32h e do gesso tipo F, uma vez que são os materiais que apresentam melhores características para obtenção da maior resistência ao fogo.

Por último, tal como referido anteriormente, em cada modelo paramétrico foi obtido o campo de temperaturas nos pontos de controlo A, E e F, a carbonização dos montantes de madeira, a respetiva secção residual e a resistência ao fogo, através da aplicação do critério de isolamento térmico, de acordo com a norma EN1363-1:2020 [1]. Neste sentido, os pontos de controlo A, E e F, assim como os 13 nós localizados na superfície não exposta ao fogo encontram-se representados na Figura 46.

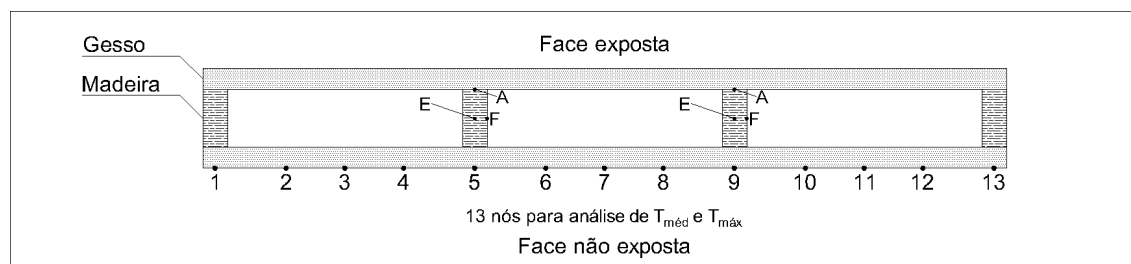


Figura 46 - Identificação dos pontos de controlo A, E e F e dos nós para análise do critério de isolamento térmico

### 5.1.1. Método de elementos finitos e condições fronteira

A avaliação dos novos modelos em estudo possui como base a validação experimental realizada no capítulo anterior. Neste sentido, foram adotadas as condições de simulação numérica obtidas para o modelo M4 referenciado anteriormente, dado que este obteve a melhor aproximação às condições experimentais em comparação. Assim, os modelos paramétricos em estudo foram avaliados nas mesmas condições da análise térmica em regime transiente, com os mesmos elementos finitos definidos, tipo de malha e idênticas condições de fronteira.

A análise térmica teve como base os elementos finitos PLANE55, SURF151 e LINK34. Tal como abordado anteriormente, o PLANE55 utilizado foi o de quatro nós e permite atribuir a capacidade de condução térmica no plano bidimensional na madeira e no gesso, o SURF151 e o LINK34 possuem a capacidade de simular o efeito da transferência de calor por radiação entre as paredes das cavidades e por convecção, respetivamente. No que diz respeito à malha de elementos finitos considerou-se um controlo de malha, cuja dimensão de aresta de cada elemento finito foi de 10 mm, de acordo com o modelo de validação experimental.

Relativamente às condições de fronteira admitidas para os modelos paramétricos, estas foram em tudo semelhantes às admitidas no modelo M4, referido no capítulo de validação experimental. No entanto, os novos modelos paramétricos em estudo encontram-se sujeitos à curva de incêndio padrão, definida de acordo com a norma ISO 834-1:199 [25]. As condições de fronteira aplicadas nos modelos paramétricos encontram-se representadas na Figura 47.

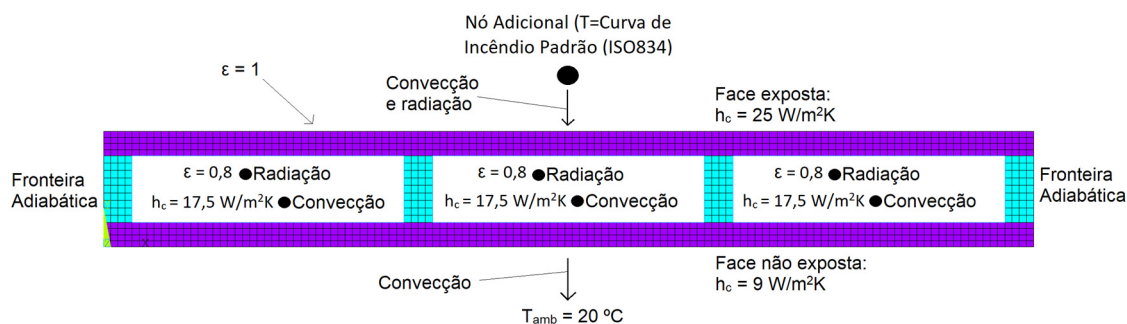


Figura 47 - Condições de fronteira admitidas nos novos modelos em estudo

Por último, considerou-se um tempo total de simulação igual a 240 minutos (4 horas), salvo exceção no estudo do modelo com diferente espessura da placa de gesso, em que foi necessário alargar a simulação até aos 300 minutos (4,5 horas). No decorrer da simulação considerou-se um intervalo de tempo igual a 60 segundos, admitido entre um incremento mínimo de 1 segundo e um máximo de 60 segundos. Adicionalmente, recorrendo ao método iterativo de Newton-Raphson modificado admitiu-se um critério de convergência baseado no fluxo de calor com uma tolerância de 0,9, tendo sido realizada a verificação do critério através da norma euclidiana L2, com o mínimo de referência de 1, à semelhança do considerado na validação experimental.

## 5.2. Estudo da distância entre centros

### 5.2.1. Temperaturas

A avaliação da evolução do campo de temperaturas teve em consideração os resultados obtidos nos pontos de controlo A, E e F, de acordo com a consideração do modelo de validação experimental. Neste sentido, foram traçadas as curvas descritivas da evolução temporal da temperatura até ao instante de tempo de 120 minutos. Os campos de temperatura obtidos para os modelos relativos ao estudo da distância entre centros encontram-se representados nas Figuras 48 a 50.

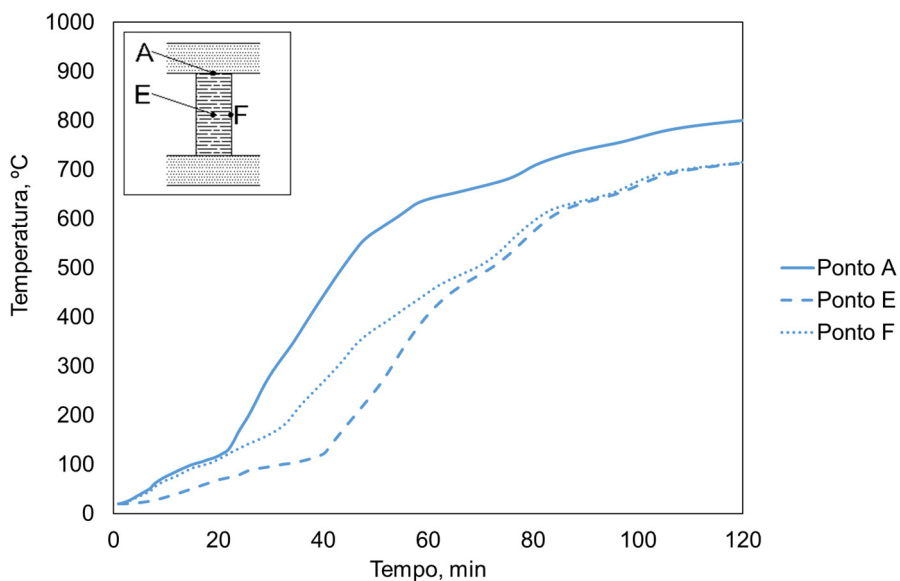


Figura 48 - Campo de temperaturas nos pontos A, E e F do modelo [70x30+12,5]x400

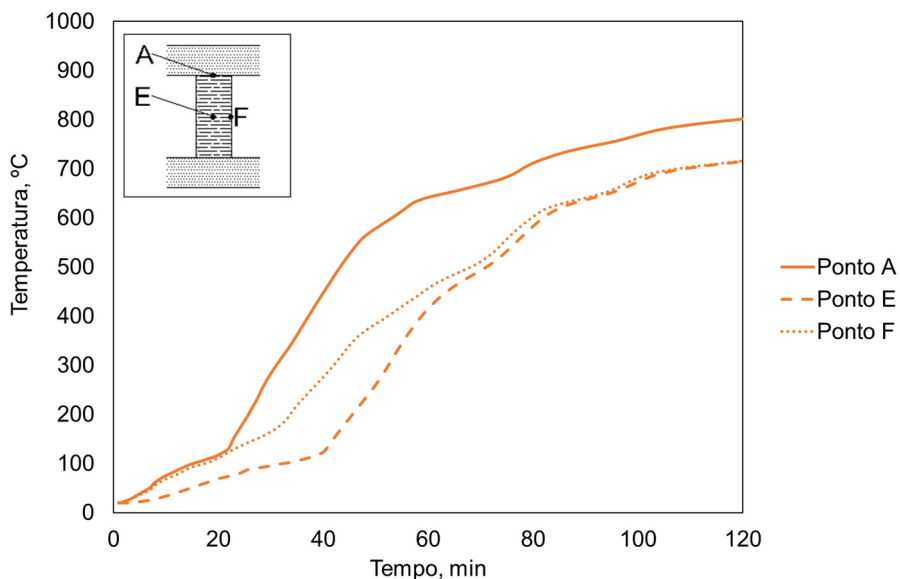


Figura 49 - Campo de temperaturas nos pontos A, E e F do modelo [70x30+12,5]x500

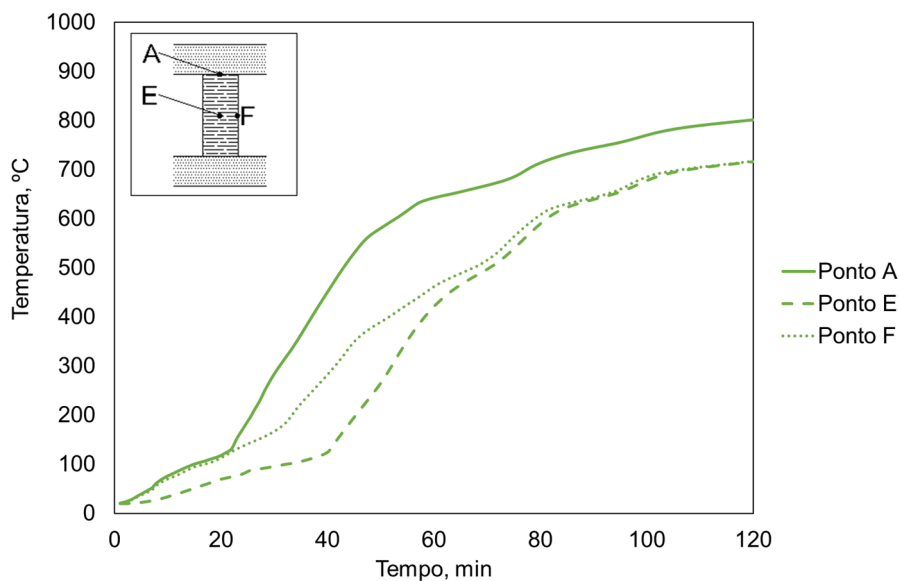


Figura 50 - Campo de temperaturas nos pontos A, E e F do modelo  $[70 \times 30 + 12,5] \times 600$

Tendo em conta os resultados obtidos para cada modelo, evidenciados nas Figuras 48 a 50, procedeu-se à elaboração de uma comparação entre as curvas de evolução de temperatura do estudo entre centros, cuja se encontra representada na Figura 51.

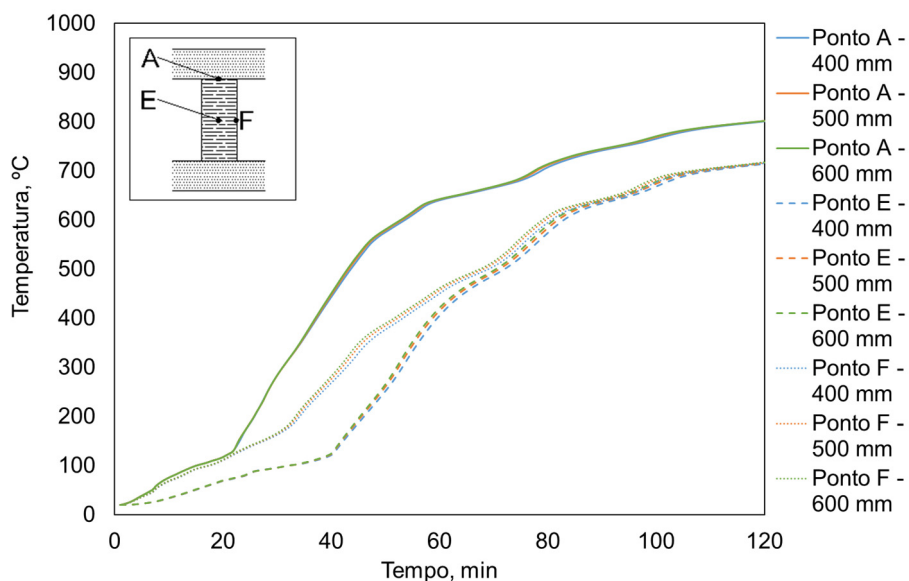


Figura 51 - Campo de temperaturas nos pontos A, E e F resultante do estudo da distância entre centros

Analisando os resultados obtidos para o estudo da distância entre centros, descritos na Figura 51, conclui-se que os campos de temperatura dos diferentes modelos apresentam uma elevada similaridade, sendo os declives das curvas sensivelmente iguais. Em relação às curvas descritas no ponto de controlo A, cujo se situa na fronteira entre o gesso e a zona superior do montante de madeira, as três curvas sobrepõem-se, não sendo possível verificar qualquer diferença

entre estas. Neste sentido, é possível concluir que o campo de temperaturas neste ponto não é afetado pela variação da distância entre centros. Esta questão corrobora a evolução linear da temperatura entre a face exposta ao fogo e o topo do montante de madeira através da condução térmica na placa de gesso. No entanto, no que diz respeito aos pontos de controlo E e F, apesar das curvas possuírem o mesmo declive, verifica-se uma ligeira variação nos resultados. Assim, analisando o campo de temperatura obtido para o modelo  $[70 \times 30 + 12,5] \times 400$ , representado a azul, verifica-se que este possui um aquecimento ligeiramente retardado, seguindo-se o modelo  $[70 \times 30 + 12,5] \times 500$  e, por último, o modelo  $[70 \times 30 + 12,5] \times 600$ .

Com isto, no que diz respeito ao campo de temperaturas obtido para o estudo entre centros, conclui-se que a variação deste parâmetro produz um efeito pouco significativo devido ao facto das curvas possuírem os mesmos declives e uma ligeira sobreposição. No entanto, verifica-se que uma menor distância entre centros, neste caso igual a 400 mm, permite a obtenção de um aumento da temperatura ligeiramente retardado, quando comparado com as distâncias de 500 e 600 mm.

### 5.2.2. Carbonização

Os modelos paramétricos desenvolvidos no âmbito do estudo da distância entre centros foram avaliados tendo em conta a evolução da carbonização ao longo do tempo. De modo a comparar a influência do parâmetro (D) foram obtidas as imagens esquemáticas para os instantes de tempo 30, 60, 90 e 120 minutos, que correspondem a escalões de tempo definidos para elementos construtivos não portantes de acordo com a norma EN 13501-2:2007 [30] e com base no RJ-SCIE [31]. Em todos os modelos, a temperatura limite para formação da camada carbonizada foi imposta considerando o referencial de  $300^\circ\text{C}$  imposto pelo EC5-1-2, EN 1995-1-2 (2003) [35]. A camada carbonizada obtida para os diferentes instantes de tempo, representada pela cor cinza, permite obter a área carbonizada dos montantes de madeira. Nas Figuras 52 e 53 representa-se a carbonização resultante para 30 e 60 minutos. Relativamente aos instantes de tempo de 90 e 120 minutos, devido ao facto da área carbonizada corresponder à totalidade da área do montante, não se considerou relevante a sua apresentação.

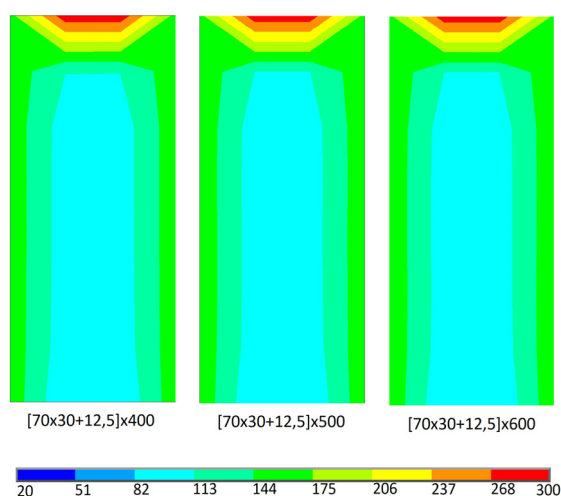


Figura 52 - Comparação da evolução da carbonização do estudo da distância entre centros para o instante de tempo de 30 minutos

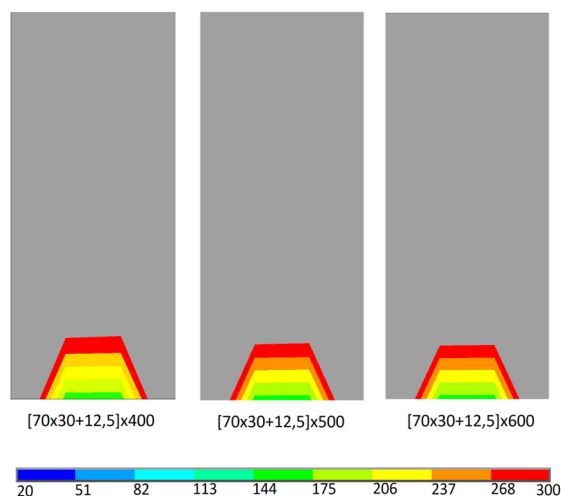


Figura 53 - Comparação da evolução da carbonização do estudo da distância entre centros para o instante de tempo de 60 minutos

Analisando a carbonização representada nas Figuras 52 e 53, verifica-se que os três modelos relativos ao estudo entre centros não apresentam quaisquer diferenças visíveis a partir das imagens esquemáticas. Neste sentido, a partir das imagens conclui-se que uma variação entre os 400 e os 600 mm não representa alterações à camada carbonizada nos montantes, sendo o estudo concluído pela avaliação da secção residual.

### 5.2.3. Secção residual

De modo a avaliar os perfis de carbonização presentes nas Figuras 52 e 53 e obter conclusões relativamente aos efeitos provocados pela variação da distância entre centros procedeu-se à determinação da secção residual nos montantes de madeira. Assim, aplicando a equação 40, obtiveram-se os resultados da secção residual apresentados na Tabela 22.

Tabela 22 - Secção residual resultante do estudo da distância entre centros

Modelo	Área do montante [mm <sup>2</sup> ]	Secção Residual [%]			
		30 minutos	60 minutos	90 minutos	120 minutos
[70x30+12,5]x400	2100	100,00	7,54	0,00	0,00
[70x30+12,5]x500	2100	100,00	7,10	0,00	0,00
[70x30+12,5]x600	2100	100,00	6,87	0,00	0,00

Tendo em conta os resultados obtidos na Tabela 22, conclui-se que a secção residual nos modelos em estudo apenas difere no instante de tempo de 60 minutos, uma vez que aos 30 minutos não existe área carbonizada e aos 90 e 120 minutos a totalidade dos montantes encontra-se carbonizada. Assim, apesar da variação dos valores de secção residual dos modelos em estudo ser pouco significativa, verifica-se que o modelo [70x30+12,5]x400 apresenta o melhor desempenho, pelo facto de apresentar uma maior secção residual, ou seja, menor área carbonizada.

### 5.2.4. Critério de isolamento térmico

A aplicação do critério de isolamento térmico definido pela norma EN 1363-1:2020 [1] permite obter a resistência ao fogo dos modelos em estudo e conseqüente melhor desempenho quando sujeito a condições de fogo padrão. Conforme abordado anteriormente, a aplicação deste critério tem como base o menor escalão de tempo, na face não exposta, quando intersetada com a temperatura pontual máxima  $T_{máx}$ , definida 180°C acima da temperatura inicial  $T_0$  de 20°C, ou com a temperatura média  $T_{méd}$ , correspondente a 140°C acima da temperatura inicial. De modo a avaliar o critério de isolamento térmico recorreu-se a 13 nós localizados na superfície não exposta ao fogo, conforme anteriormente representado na Figura 46. Neste sentido, de modo a atingir as temperaturas limite impostas pelo critério de isolamento térmico procedeu-se à simulação considerando a evolução de temperatura equivalente a 120 minutos (2 horas) de exposição ao fogo. Nas Figuras 54 a 56 encontram-se os gráficos correspondentes à evolução da temperatura média na superfície não exposta ao fogo e no nó onde se verifica a temperatura máxima dos três modelos relativos ao estudo da distância entre centros.

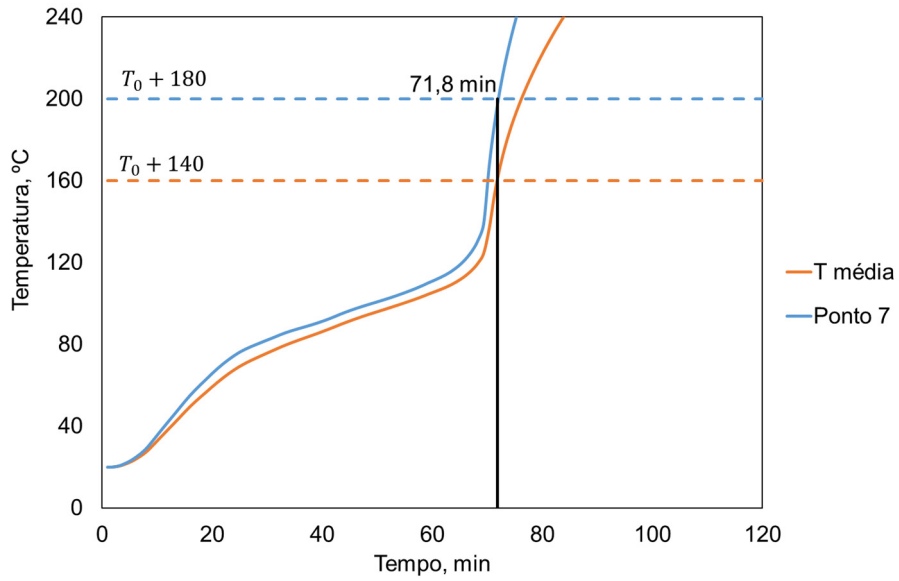


Figura 54 - Critério de isolamento térmico do modelo [70x30+12,5]x400

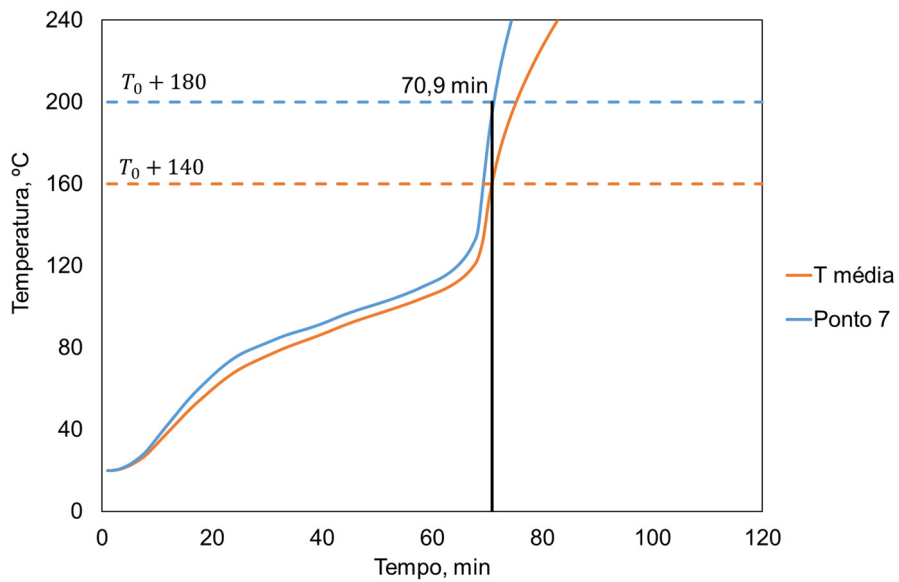


Figura 55 - Critério de isolamento térmico do modelo [70x30+12,5]x500

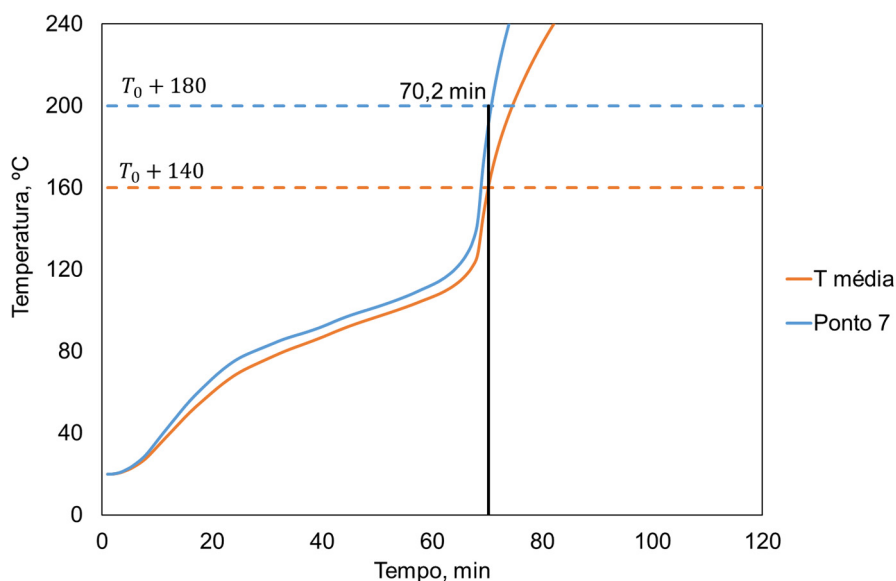


Figura 56 - Critério de isolamento térmico do modelo [70x30+12,5]x600

Analisando os resultados obtidos através da aplicação do critério de isolamento térmico verifica-se uma elevada proximidade no desempenho dos modelos. No entanto, apesar da variação dos tempos de resistência ao fogo obtidos pela aplicação do critério ser muito reduzida, conclui-se que o modelo com melhor desempenho quando sujeitos a condições de fogo padrão é o definido como [70x30+12,5]x400 com um tempo igual a 71,8 minutos. Adicionalmente, importa referir que as temperaturas impostas pela norma EN 1363-1:2020 [1] para o caso de estudo, ou seja, temperatura média na superfície não exposta de 160°C e a temperatura pontual máxima de 200°C, são obtidas para o escalão de tempo que define a resistência ao fogo de todos os modelos.

Tendo em conta os resultados obtidos verifica-se que uma menor distância entre os centros dos montantes em madeira permite a obtenção de um melhor desempenho quando sujeito a condições de fogo padrão. Esta conclusão sustenta-se em ambos os testes de verificação, ou seja, secção residual e critério de isolamento térmico. Com isto, de acordo com a nomenclatura referida na Tabela 21, o parâmetro D1 possui um valor igual a 400 mm.

### 5.3. Estudo da altura da madeira

O estudo da altura da madeira (H) consiste na avaliação do parâmetro geométrico que influencia a espessura total da solução construtiva através da afetação ao montante. Tendo em conta a Tabela 21 e os resultados obtidos no estudo da distância entre centros, cujo definiu o parâmetro D como igual a 400 mm, serão avaliados os modelos [70x30+12,5]x400, [90x30+12,5]x400 e [120x30+12,5]x400 no presente estudo. No entanto, verifica-se que o modelo [70x30+12,5]x400 foi previamente analisado quanto ao campo de temperaturas, carbonização, secção residual e critério de isolamento térmico no estudo da distância entre centros. Neste sentido, no presente estudo apenas serão apresentados os resultados para os modelos [90x30+12,5]x400 e [120x30+12,5]x400.

### 5.3.1. Temperaturas

No seguimento da metodologia utilizada no estudo entre centros, os campos de temperatura obtidos nos pontos de controlo para os modelos  $[90 \times 30 + 12,5] \times 400$  e  $[120 \times 30 + 12,5] \times 400$ , encontram-se representados nas Figuras 57 e 58.

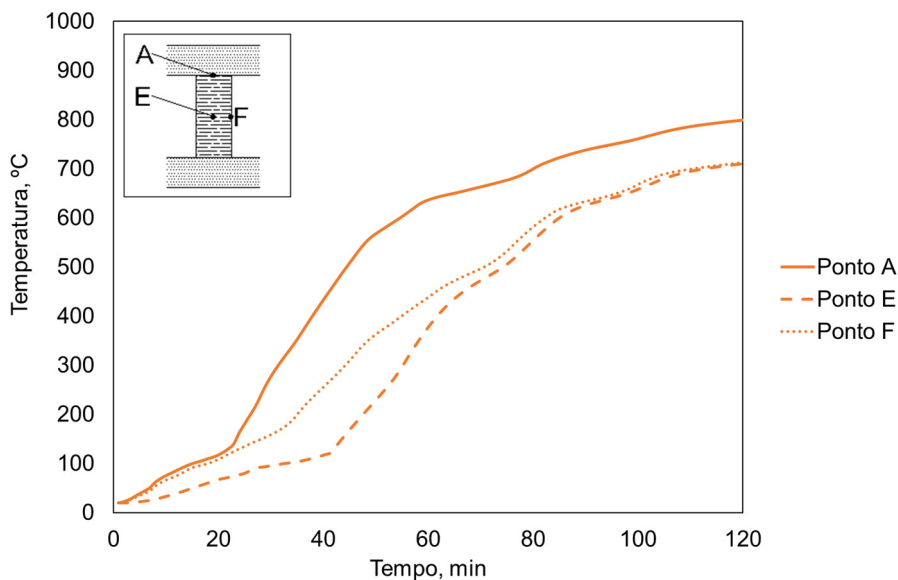


Figura 57 - Campo de temperaturas nos pontos A, E e F do modelo  $[90 \times 30 + 12,5] \times 400$

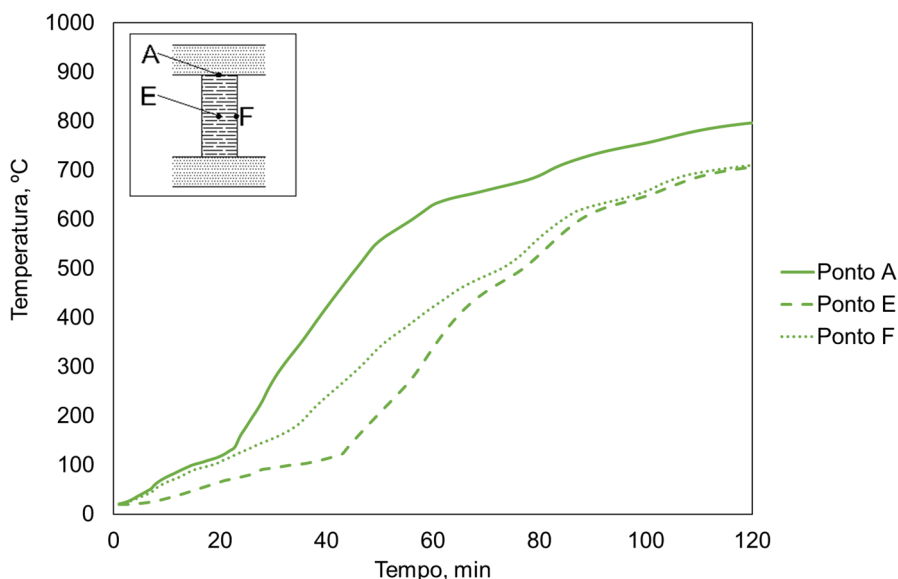


Figura 58 - Campo de temperaturas nos pontos A, E e F do modelo  $[120 \times 30 + 12,5] \times 400$

De modo a proceder à comparação entre as curvas de evolução de temperatura do estudo da altura da madeira realizou-se uma sobreposição dos campos de temperatura, incluindo o modelo  $[70 \times 30 + 12,5] \times 400$ , de acordo com o apresentado na Figura 59.

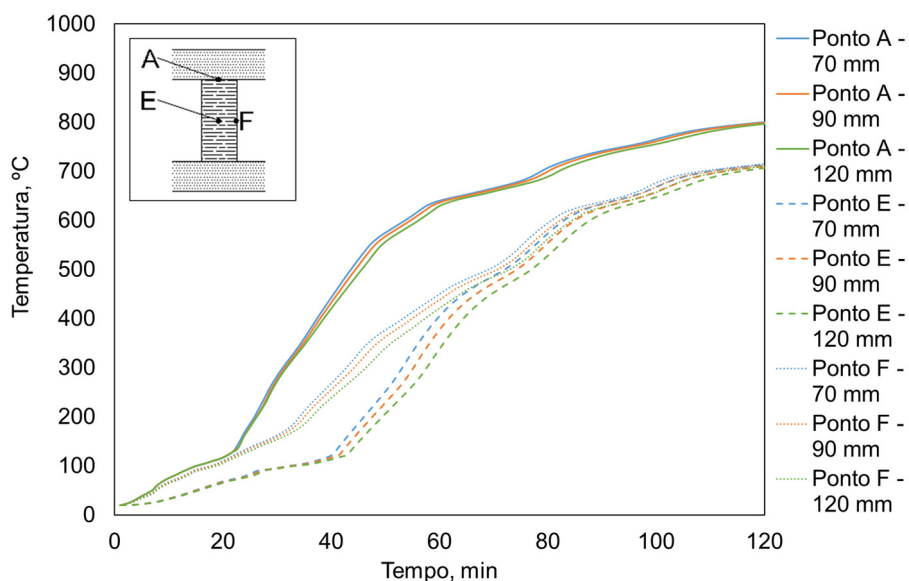


Figura 59 - Campo de temperaturas nos pontos A, E e F resultante do estudo da altura da madeira

Com base nos resultados obtidos para o campo de temperaturas resultante do estudo da altura da madeira, representado na Figura 59, verifica-se uma proximidade dos declives das curvas nos três modelos. Relativamente ao ponto de controlo A, à semelhança do ocorrido no estudo antecedente, verifica-se uma sobreposição das três curvas, pelo que é possível concluir que o campo de temperaturas neste ponto não é influenciado pela variação da altura do montante. Em relação aos pontos E e F, apesar das curvas possuírem o mesmo declive, verifica-se que o aumento da altura da madeira provoca o retardamento da evolução das temperaturas, apesar de no instante de tempo de 120 minutos as temperaturas se igualarem. Assim, verifica-se que o modelo com melhor desempenho no que diz respeito à evolução temporal das temperaturas é o definido por  $[120 \times 30 + 12,5] \times 400$ .

### 5.3.2. Carbonização

De igual modo, os modelos desenvolvidos para avaliação da influência da altura dos montantes de madeira foram avaliados tendo em conta a evolução da carbonização. O estudo teve como base as imagens esquemáticas obtidas para os instantes de tempo de 30, 60, 90 e 120 minutos. No entanto, com base no critério utilizado no estudo da distância entre centros, pelo facto de nos instantes de 90 e 120 minutos o montante se encontrar totalmente definido por área carbonizada não se considerou relevante a sua apresentação. Neste sentido, a carbonização resultante para os três modelos em estudo nos instantes de 30 e 60 minutos encontram-se representada nas Figuras 60 e 61.

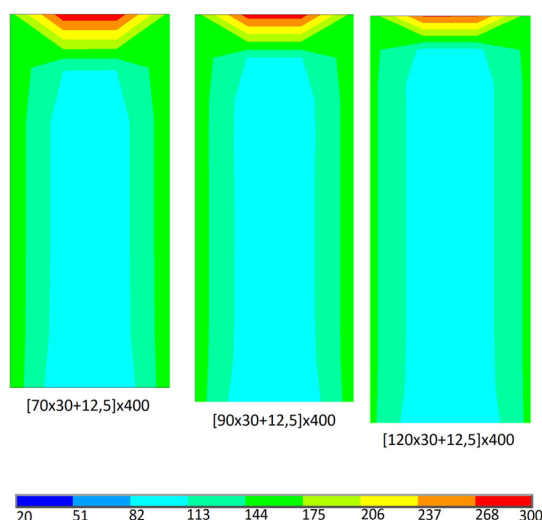


Figura 60 - Comparação da evolução da carbonização do estudo da altura da madeira para o instante de tempo de 30 minutos

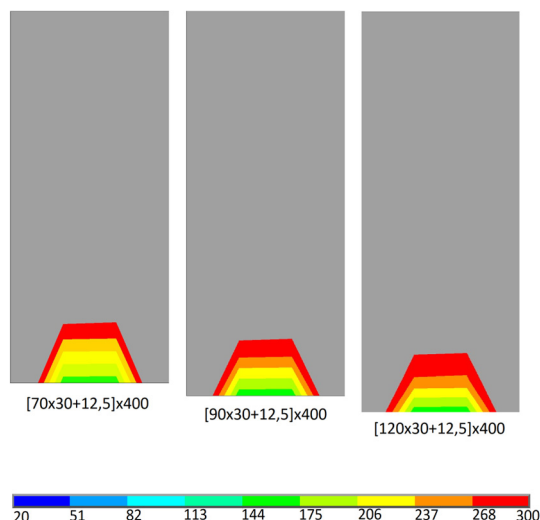


Figura 61 - Comparação da evolução da carbonização do estudo da altura da madeira para o instante de tempo de 60 minutos

Analisando a carbonização representada na Figura 60, correspondente ao instante de tempo de 30 minutos, verifica-se que o modelo  $[120 \times 30 + 12,5] \times 400$  apresenta uma menor temperatura na interface superior entre o montante e o gesso em comparação com os modelos  $[70 \times 30 + 12,5] \times 400$  e  $[90 \times 30 + 12,5] \times 400$ . Este resultado encontra-se de acordo com os campos de temperatura, uma vez que o modelo com maior altura apresenta um aquecimento retardado em comparação com os restantes. No entanto, para o instante de tempo de 60 minutos, os perfis de carbonização, apresentados na Figura 61, obtidos nos três modelos não apresenta diferenças notórias através da sua análise.

### 5.3.3. Secção residual

Tendo em consideração os perfis de carbonização representados nas Figuras 60 e 61 procedeu-se ao cálculo da secção residual nos montantes de madeira através da aplicação da equação 40. Os resultados obtidos para a secção residual encontram-se na Tabela 23.

Tabela 23 - Secção residual resultante do estudo da altura da madeira

Modelo	Área do montante [mm <sup>2</sup> ]	Secção Residual [%]			
		30 minutos	60 minutos	90 minutos	120 minutos
$[70 \times 30 + 12,5] \times 400$	2100	100,00	7,54	0,00	0,00
$[90 \times 30 + 12,5] \times 400$	2700	100,00	7,68	0,00	0,00
$[120 \times 30 + 12,5] \times 400$	3600	100,00	7,91	0,00	0,00

Analisando os resultados presentes na Tabela 23 verifica-se que, à semelhança do estudo da distância entre centros, para o instante de tempo de 30 minutos não existe carbonização e para 90 e 120 minutos toda a área encontra-se carbonizada. Assim, no que diz respeito ao instante de tempo de 60 minutos, a discrepância entre os resultados é praticamente desprezável, dado que apresentam valores muito próximos. No entanto, o modelo  $[120 \times 30 + 12,5] \times 400$  apresenta um

melhor desempenho, dado que apresenta uma menor área carbonizada, sendo seguido pelo modelo  $[90 \times 30 + 12,5] \times 400$  e, por último, pelo modelo  $[70 \times 30 + 12,5] \times 400$ .

### 5.3.4. Critério de isolamento térmico

A aplicação do critério de isolamento térmico teve como base as referências abordadas anteriormente, sendo que, no caso em estudo, foi considerada a evolução de temperatura até ao instante de tempo de 120 minutos, de modo a atingir as temperaturas limite de  $160^\circ\text{C}$  e  $200^\circ\text{C}$ . Nas Figuras 62 e 63 encontram-se representados os gráficos correspondentes aos modelos  $[90 \times 30 + 12,5] \times 400$  e  $[120 \times 30 + 12,5] \times 400$ , sendo que o modelo  $[70 \times 30 + 12,5] \times 400$  representa-se na Figura 54 do estudo da distância entre centros.

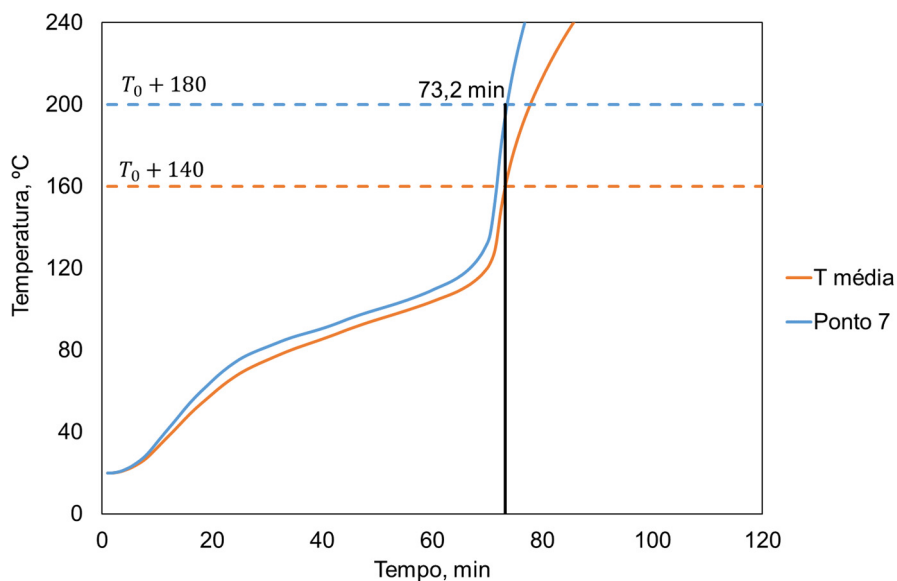


Figura 62 - Critério de isolamento térmico do modelo  $[90 \times 30 + 12,5] \times 400$

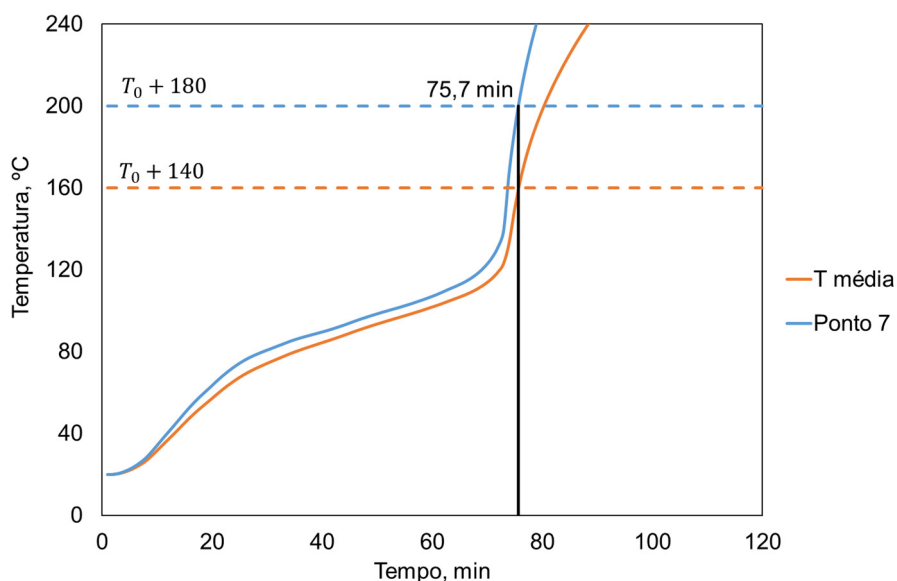


Figura 63 - Critério de isolamento térmico do modelo  $[120 \times 30 + 12,5] \times 400$

Analisando os resultados obtidos conclui-se que o modelo  $[120 \times 30 + 12,5] \times 400$  apresenta um melhor desempenho quando exposto a condições de fogo padrão, admitindo uma resistência ao fogo imposta pelo critério de isolamento térmico igual a 75,7 minutos. Relativamente aos restantes modelos, o tempo de resistência ao fogo decresce com a diminuição da altura dos montantes de madeira.

Neste sentido, conclui-se que o aumento do parâmetro H provoca um melhor desempenho da solução construtiva considerando o critério de isolamento térmico. Com isto, de acordo com a nomenclatura definida na Tabela 21, o parâmetro H1 possui um valor igual a 120 mm.

## 5.4. Estudo da largura da madeira

O estudo da largura da madeira (W) permite avaliar o impacto que o parâmetro geométrico provoca na resistência ao fogo da solução construtiva. Considerando a metodologia para análise presente na Tabela 21 e tendo em conta os resultados obtidos nos estudos antecedentes serão avaliados os modelos  $[120 \times 30 + 12,5] \times 400$ ,  $[120 \times 40 + 12,5] \times 400$  e  $[120 \times 50 + 12,5] \times 400$  no presente estudo. Adicionalmente, os resultados correspondentes ao modelo  $[120 \times 30 + 12,5] \times 400$  foram apresentados no estudo da altura da madeira, pelo que não serão replicados na presente análise.

### 5.4.1. Temperaturas

Os campos de temperatura obtidos para os modelos  $[120 \times 40 + 12,5] \times 400$  e  $[120 \times 50 + 12,5] \times 400$  obtidos nos pontos de controlo A, E e F considerando um tempo de exposição ao fogo de 120 minutos, encontram-se representados nas Figuras 64 e 65.

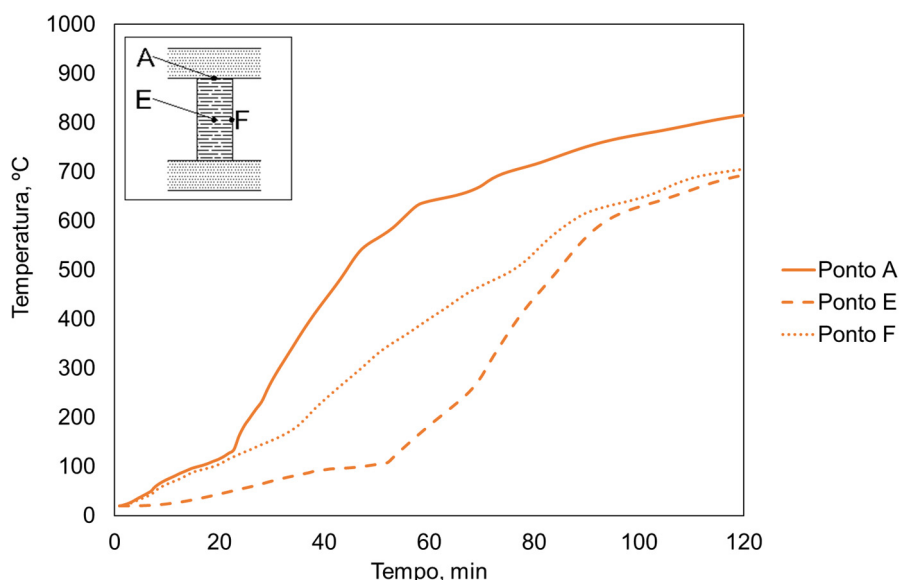


Figura 64 - Campo de temperaturas nos pontos A, E e F do modelo  $[120 \times 40 + 12,5] \times 400$

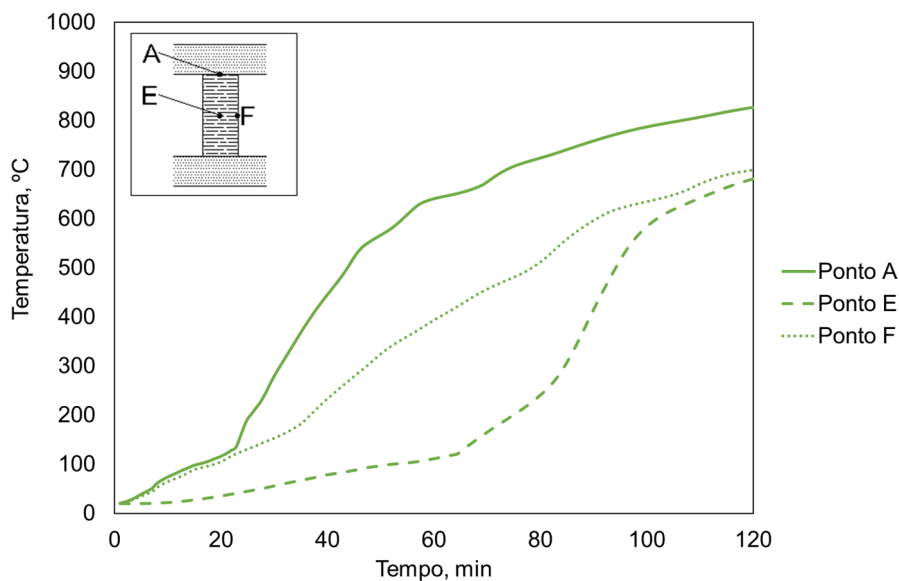


Figura 65 - Campo de temperaturas nos pontos A, E e F do modelo  $[120 \times 50 + 12,5] \times 400$

As curvas de evolução da temperatura comparativas, referentes aos três modelos em análise, encontram-se representadas na Figura 66.

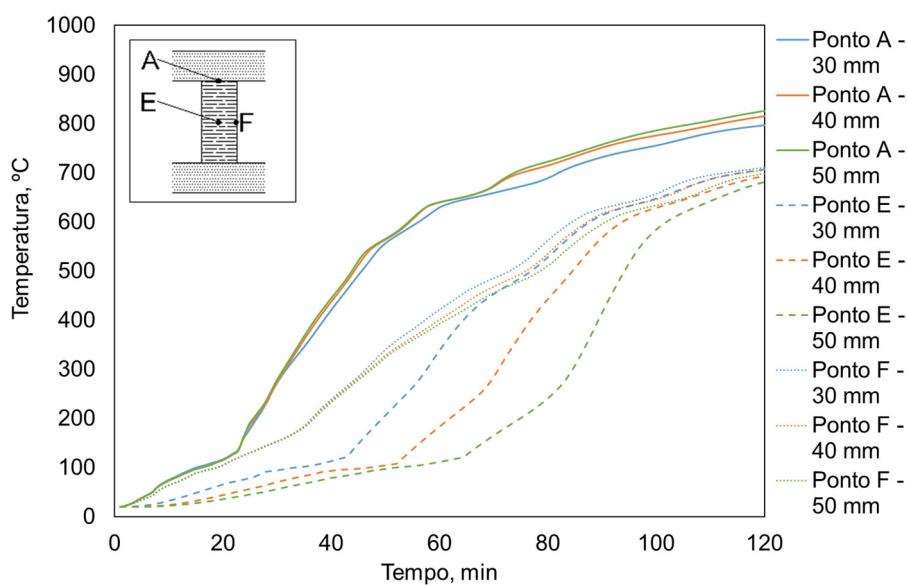


Figura 66 - Campo de temperaturas nos pontos A, E e F resultante do estudo da largura da madeira

Analisando os resultados obtidos para o campo de temperaturas referente ao estudo da largura da madeira, representado na Figura 66, verifica-se que as curvas correspondentes aos pontos A e F possuem uma evolução de temperatura praticamente semelhante. No que diz respeito ao Ponto A, os resultados comprovam as conclusões dos estudos anteriores, ou seja, que ocorre uma evolução linear da temperatura entre a face exposta ao fogo e o topo do montante que depende, maioritariamente, da condução térmica na placa de gesso. Em relação ao ponto F, devido à elevada proximidade dos campos de temperatura, conclui-se que o aquecimento resulta, essencialmente, dos fenómenos de radiação e convecção no interior da cavidade de ar, tendo a condução térmica no montante uma influência bastante reduzida provocando, apenas, um ligeiro

retardamento no aumento da temperatura no modelo com maior largura ( $[120 \times 50 + 12,5] \times 400$ ). Por último, o aumento da largura da madeira provoca um melhor desempenho, como se comprova pela análise da evolução da temperatura no ponto de controlo E. Neste ponto, o aquecimento acima dos  $100^\circ\text{C}$  ocorre a partir do instante de tempo de, aproximadamente, 65 minutos para o modelo  $[120 \times 50 + 12,5] \times 400$ , enquanto no  $[120 \times 30 + 12,5] \times 400$  verifica-se aos 45 minutos. Com isto, conclui-se que, dos modelos em estudo, o que permite a obtenção de um melhor desempenho ao nível do campo de temperaturas é o  $[120 \times 50 + 12,5] \times 400$ .

### 5.4.2. Carbonização

O estudo para avaliação da influência da largura da madeira ao nível da evolução da carbonização teve como base as imagens esquemáticas obtidas para os instantes de tempo de 30, 60, 90 e 120 minutos, conforme representados nas Figuras 67 a 70.

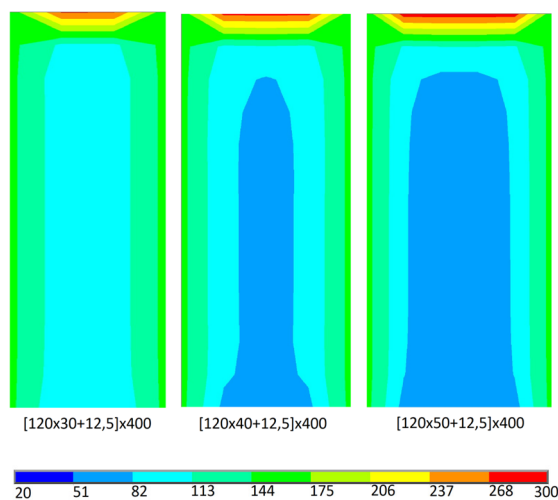


Figura 67 - Comparação da evolução da carbonização do estudo da largura da madeira para o instante de tempo de 30 minutos

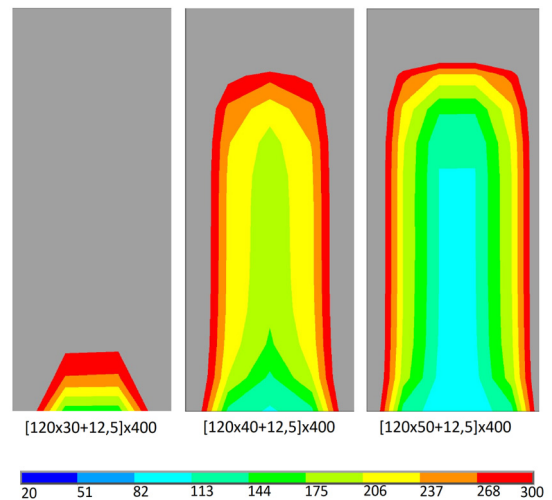


Figura 68 - Comparação da evolução da carbonização do estudo da largura da madeira para o instante de tempo de 60 minutos

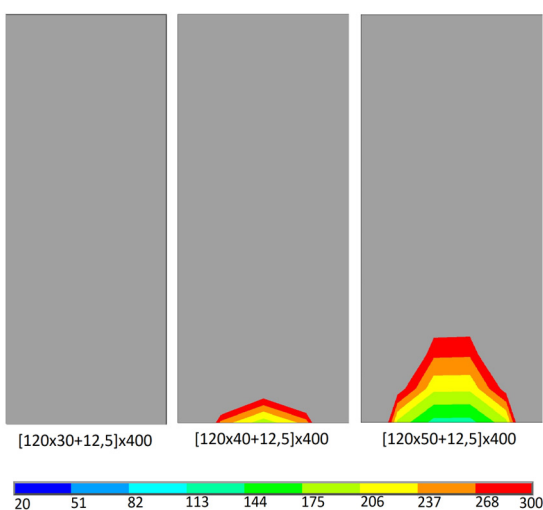


Figura 69 - Comparação da evolução da carbonização do estudo da largura da madeira para o instante de tempo de 90 minutos

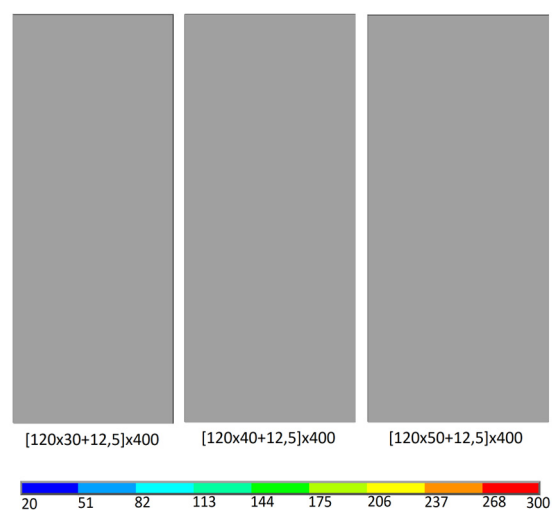


Figura 70 - Comparação da evolução da carbonização do estudo da largura da madeira para o instante de tempo de 120 minutos

Analisando a carbonização representada na Figura 67 verifica-se que aos 30 minutos de exposição ao fogo não existe área carbonizada. No entanto, é possível concluir que o modelo [120x50+12,5]x400 tem um menor aquecimento no núcleo do montante em comparação com os restantes. Esta situação é justificada com o facto de, considerando a maior largura do montante, o fenómeno de condução térmica longitudinal provocada pela convecção e radiação no interior da cavidade possuir uma maior dificuldade em provocar o aquecimento do núcleo do montante. No instante de tempo de 60 minutos, representado na Figura 68, o modelo [120x30+12,5]x400, ou seja, o de menor largura, possui uma área carbonizada muito superior, quando comparada com os dois modelos de maior largura. Em relação aos modelos [120x40+12,5]x400 e [120x50+12,5]x400 verifica-se uma carbonização bastante similar em área carbonizada. No entanto, o perfil de temperaturas resultante da carbonização nestes modelos permite concluir que o modelo de maior largura possui um aquecimento inferior com zonas a temperaturas inferiores a 100°C. Tendo em conta a Figura 69, cuja representa a carbonização para 90 minutos de exposição, verifica-se que o modelo [120x30+12,5]x400 possui a sua área totalmente carbonizada, sendo que nos restantes existe uma zona bastante residual na qual não foi atingida a temperatura limite de 300°C. Por último, para o instante de tempo de 120 minutos, presente na Figura 70, todos os modelos encontram-se totalmente carbonizados.

### 5.4.3. Secção residual

Considerando os perfis de carbonização representados nas Figuras 67 a 70 procedeu-se ao cálculo da secção residual nos montantes de madeira, cujos resultados encontram-se na Tabela 24.

Tabela 24 - Secção residual resultante do estudo da largura da madeira

Modelo	Área do montante [mm <sup>2</sup> ]	Secção Residual [%]			
		30 minutos	60 minutos	90 minutos	120 minutos
[120x30+12,5]x400	3600	100,00	7,91	0,00	0,00
[120x40+12,5]x400	4800	100,00	58,20	2,43	0,00
[120x50+12,5]x400	6000	100,00	67,98	9,99	0,00

Analisando os resultados de secção residual presentes na Tabela 23, para os instantes de tempo limites, ou seja, 30 e 120 minutos, não existir área carbonizada e o montante encontrar-se totalmente deteriorado, respetivamente. Relativamente à secção residual para 60 minutos encontram-se as maiores diferenças. Os modelos [120x40+12,5]x400 e [120x50+12,5]x400 possuem uma secção residual bastante superior à existente no modelo [120x30+12,5]x400. No entanto, considerando os incrementos de 10 mm entre cada modelo, verifica-se entre os modelos [120x30+12,5]x400 e [120x40+12,5]x400 um aumento de aproximadamente 50% da secção residual, enquanto deste último para o modelo [120x50+12,5]x400 a secção residual apenas acresce cerca de 10%. Com isto, conclui-se que incrementos de largura na mesma dimensão não provocam um aumento linear da secção residual. Por último, no instante de tempo de 90 minutos o modelo de menor largura não possui secção residual, enquanto o modelo de maior largura possui um desempenho ligeiramente superior ao de largura intermédia.

#### 5.4.4. Critério de isolamento térmico

O critério de isolamento térmico para avaliação do estudo da largura da madeira teve em consideração a evolução da temperatura até ao instante de tempo de 120 minutos, de modo a serem atingidas as temperaturas limite de 160°C e 200°C. Os gráficos correspondentes aos modelos [120x40+12,5]x400 e [120x50+12,5]x400 encontram-se representados nas Figuras 71 e 72, sendo que o correspondente ao modelo [120x30+12,5]x400 representa-se na Figura 63 do estudo da altura da madeira.

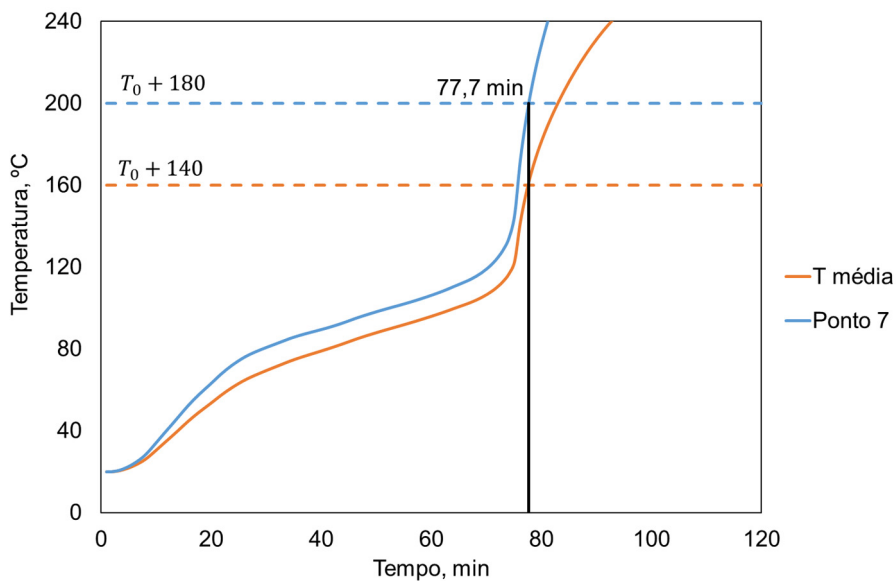


Figura 71 - Critério de isolamento térmico do modelo [120x40+12,5]x400

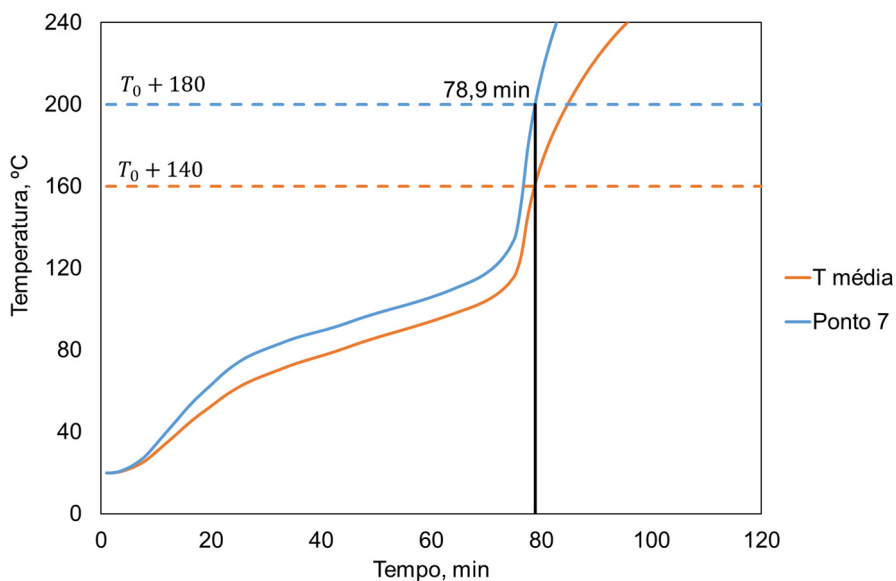


Figura 72 - Critério de isolamento térmico do modelo [120x50+12,5]x400

Tendo em conta os resultados obtidos conclui-se que o modelo [120x50+12,5]x400 apresenta um melhor desempenho em relação à verificação da secção residual e critério de isolamento térmico, garantindo uma resistência ao fogo igual a 78,9 minutos.

Assim, conclui-se que o aumento do parâmetro  $W$  provoca um melhor desempenho pelo critério de isolamento térmico da solução construtiva. Com isto, tendo como base a Tabela 21, o parâmetro  $W$  admite um valor igual a 50 mm.

## 5.5. Estudo da espessura do gesso

O estudo da espessura do gesso ( $T_g$ ) consiste na variação do parâmetro geométrico de modo a avaliar a sua influência na resistência ao fogo da solução construtiva, tendo em conta que esta variação provoca um aumento ou decréscimo da espessura total da mesma. Tendo em conta os modelos propostos para análise na Tabela 21, o estudo da espessura do gesso teve em consideração os modelos [120x50+12,5]x400, [120x50+15]x400 e [120x50+25]x400.

### 5.5.1. Temperaturas

Os campos de temperatura obtidos para os modelos [120x50+15]x400 e [120x50+25]x400 obtidos nos pontos de controlo A, E e F considerando uma exposição durante um período igual a 120 minutos encontram-se representados nas Figuras 73 e 74. Relativamente ao modelo [120x50+12,5]x400, o campo de temperaturas encontra-se representado na Figura 65 do estudo da largura da madeira.

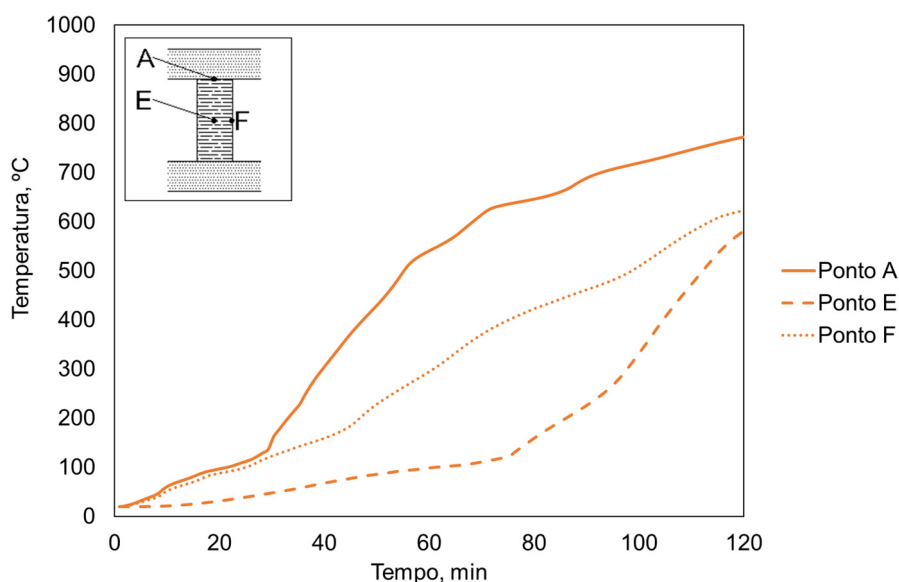


Figura 73 - Campo de temperaturas nos pontos A, E e F do modelo [120x50+15]x400

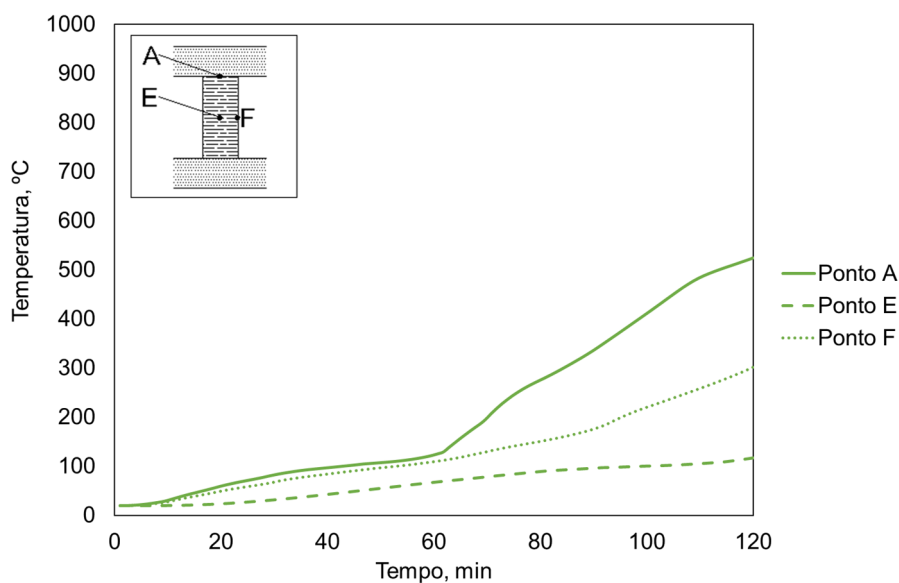


Figura 74 - Campo de temperaturas nos pontos A, E e F do modelo  $[120 \times 50 + 25] \times 400$

De acordo com a metodologia utilizada nos estudos anteriores, a comparação entre as curvas de evolução de temperatura relativas ao estudo da espessura do gesso encontra-se representada na Figura 75.

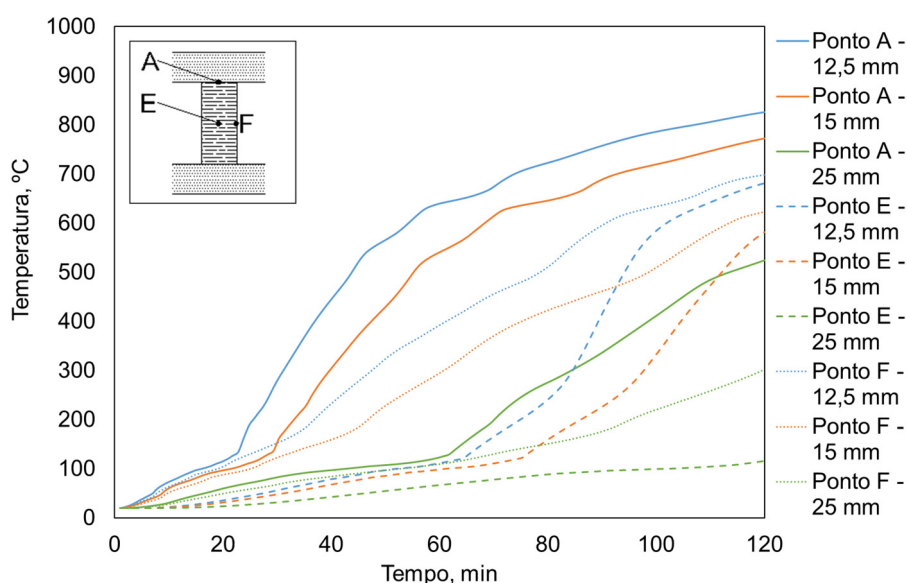


Figura 75 - Campo de temperaturas nos pontos A, E e F resultante do estudo da espessura do gesso

Analisando os resultados obtidos para o campo de temperaturas resultante do estudo da espessura do gesso, de acordo com a Figura 75, conclui-se que o parâmetro geométrico  $T_g$  é o que produz maiores variações à evolução das temperaturas, quando comparado com os restantes. Relativamente ao ponto de controlo A, uma vez que a temperatura nesta zona é maioritariamente influenciada pela evolução linear da temperatura entre a face exposta ao fogo e o topo do montante, através de condução térmica, verifica-se que o modelo com maior espessura possui uma evolução da temperatura bastante retardada em comparação com os restantes e com uma menor temperatura máxima. No que diz respeito aos pontos de controlo E e F verifica-se uma evolução da

temperatura com declives baixos no modelo  $[120 \times 50 + 25] \times 400$ . Este fenómeno é justificado pelo facto da maior espessura de gesso retardar o aquecimento por radiação e convecção no interior das cavidades de ar, resultando em temperaturas pouco significativas na fronteira entre o montante e a cavidade (ponto F) e no interior do montante (ponto E). Com isto, a análise ao campo de temperaturas permite concluir que o modelo com melhor desempenho é o  $[120 \times 50 + 25] \times 400$ .

### 5.5.2. Carbonização

Os perfis de carbonização obtidos no estudo da espessura do gesso para os instantes de tempo de 30, 60, 90 e 120 minutos encontram-se representados nas Figuras 76 a 79.

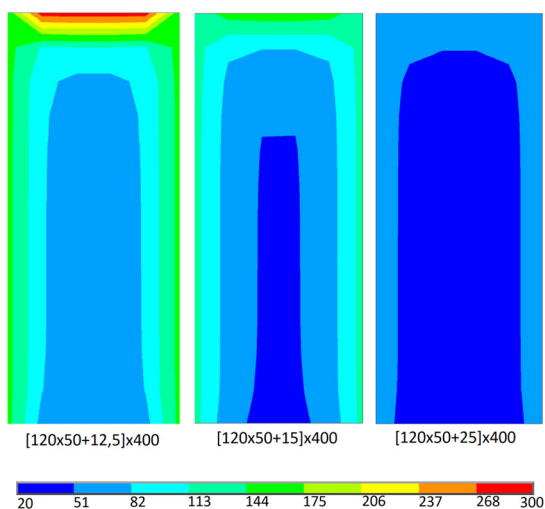


Figura 76 - Comparação da evolução da carbonização do estudo da espessura do gesso para o instante de tempo de 30 minutos

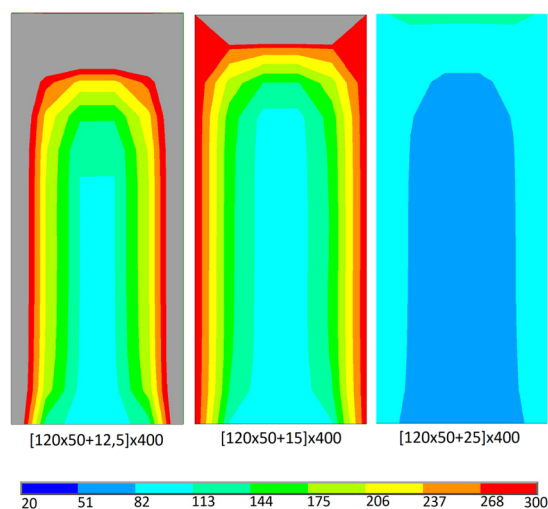


Figura 77 - Comparação da evolução da carbonização do estudo da espessura do gesso para o instante de tempo de 60 minutos

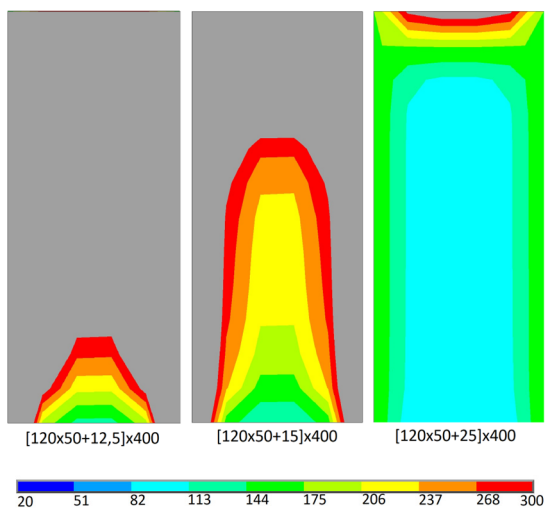


Figura 78 - Comparação da evolução da carbonização do estudo da espessura do gesso para o instante de tempo de 90 minutos

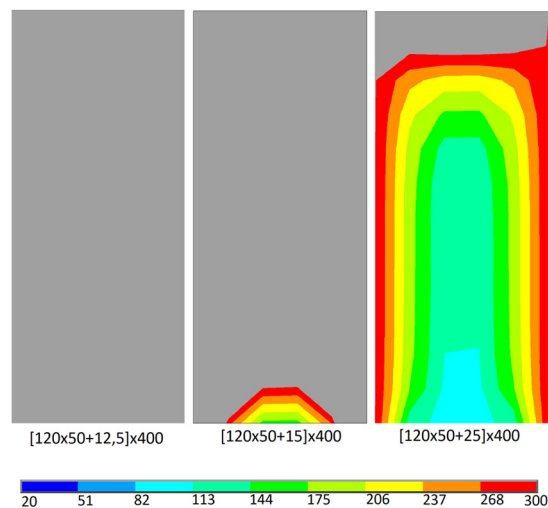


Figura 79 - Comparação da evolução da carbonização do estudo da espessura do gesso para o instante de tempo de 120 minutos

Tendo em conta os resultados obtidos para o instante de tempo de 30 minutos, representado na Figura 76, verifica-se que não existe área carbonizada. Contudo, os perfis de temperatura evidenciam que o modelo  $[120 \times 50 + 25] \times 400$  encontra-se praticamente à temperatura ambiente, uma vez que a sua área se encontra entre os 20°C e os 51°C. Por outro lado, o modelo  $[120 \times 50 + 12,5] \times 400$ , na sua zona superior, encontra-se no limiar de temperatura para início da carbonização. Em relação à exposição ao fogo para o instante de 60 minutos, de acordo com a Figura 77, verifica-se que o modelo  $[120 \times 50 + 25] \times 400$  encontra-se numa fase inicial para existência de carbonização dado que a temperatura máxima situa-se no intervalo de 113°C e 144°C. Relativamente aos restantes modelos estes apresentam área carbonizada, sendo importante ressaltar o fenómeno ocorrido no modelo  $[120 \times 50 + 15] \times 400$ , dado que, conforme indicado na Figura 77, a carbonização inicia no contacto superior entre o gesso e o montante de madeira. De seguida, analisando a Figura 78, conclui-se que o modelo  $[120 \times 50 + 25] \times 400$  iniciou o processo de carbonização num instante próximo aos 90 minutos, enquanto o modelo  $[120 \times 50 + 12,5] \times 400$  encontra-se com uma área carbonizada próxima à área total do montante. Em relação ao modelo  $[120 \times 50 + 15] \times 400$ , este possui um perfil de carbonização intermediário. Por último, para o instante de tempo final de 120 minutos, conforme representado na Figura 79, o modelo com menor espessura de gesso encontra-se totalmente deteriorado, seguindo-se o modelo com espessura igual a 15 mm com uma secção residual muito reduzida. No entanto, para o modelo de maior espessura, o fenómeno de carbonização apresenta uma área carbonizada muito reduzida.

### 5.5.3. Secção residual

Com base nos perfis de carbonização representados e aplicando a equação 40 procedeu-se ao cálculo da secção residual nos montantes de madeira. Na Tabela 25 encontram-se os resultados obtidos para a secção residual.

Tabela 25 - Secção residual resultante do estudo da espessura do gesso

Modelo	Área do montante [mm <sup>2</sup> ]	Secção Residual [%]			
		30 minutos	60 minutos	90 minutos	120 minutos
<b>[120x50+12,5]x400</b>	6000	100,00	67,98	9,99	0,00
<b>[120x50+15]x400</b>	6000	100,00	94,29	43,06	4,36
<b>[120x50+25]x400</b>	6000	100,00	100,00	99,13	88,93

Analisando os resultados obtidos, de acordo com Tabela 25, conclui-se que, à semelhança dos restantes estudos, não existe área carbonizada no instante de tempo inicial de 30 minutos. Relativamente aos instantes de tempo de 60 e 90 minutos, conclui-se que a diferença de apenas 2,5 mm entre os modelos  $[120 \times 50 + 12,5] \times 400$  e  $[120 \times 50 + 15] \times 400$  provoca um aumento da secção residual bastante considerável, na ordem dos 23% e 33%, respetivamente. Comparando os modelos  $[120 \times 50 + 15] \times 400$  e  $[120 \times 50 + 25] \times 400$ , aos 60 minutos as diferenças são praticamente desprezáveis. No entanto, para os tempos de exposição de 90 e 120 minutos o valor da secção residual difere consideravelmente, demonstrando que um aumento de 10 mm na espessura das placas de gesso provoca um elevado aumento do desempenho da solução construtiva.

### 5.5.4. Critério de isolamento térmico

A avaliação do estudo da espessura do gesso através da imposição do critério de isolamento térmico foi desenvolvida tendo em conta um tempo de exposição ao fogo durante 300 minutos (4,5 horas), de modo a serem atingidas as temperaturas limite de 160°C e 200°C. Os gráficos correspondentes aos três modelos em estudo encontram-se representados nas Figuras 80 a 82.

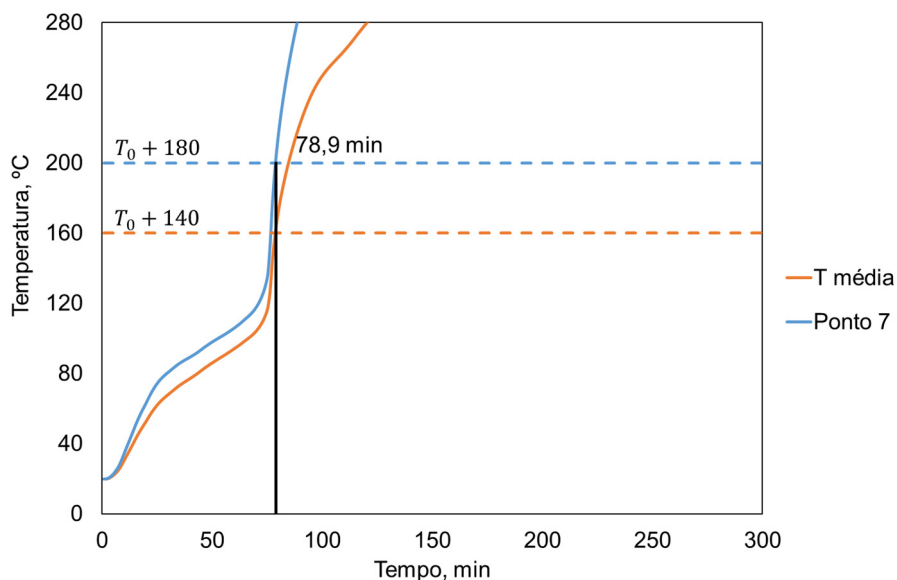


Figura 80 - Critério de isolamento térmico do modelo [120x50+12,5]x400

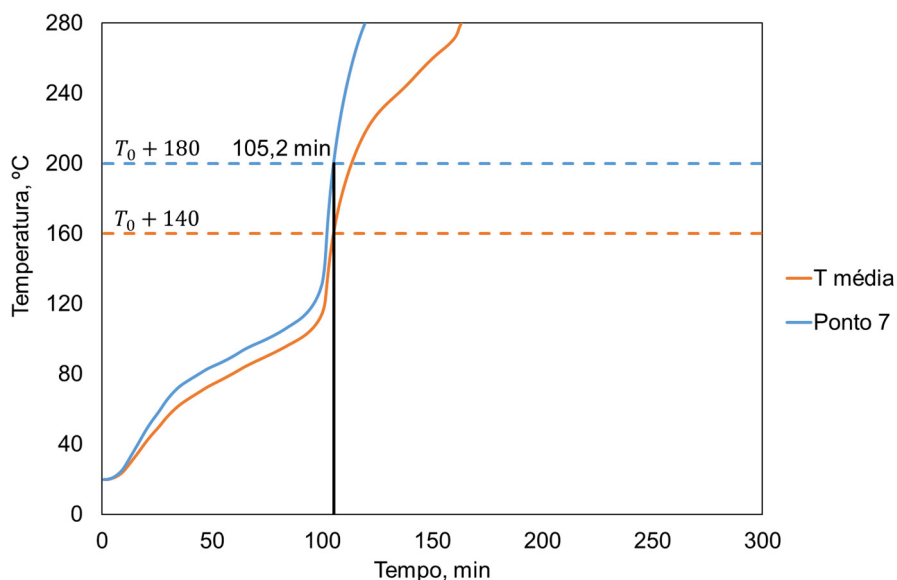


Figura 81 - Critério de isolamento térmico do modelo [120x50+15]x400

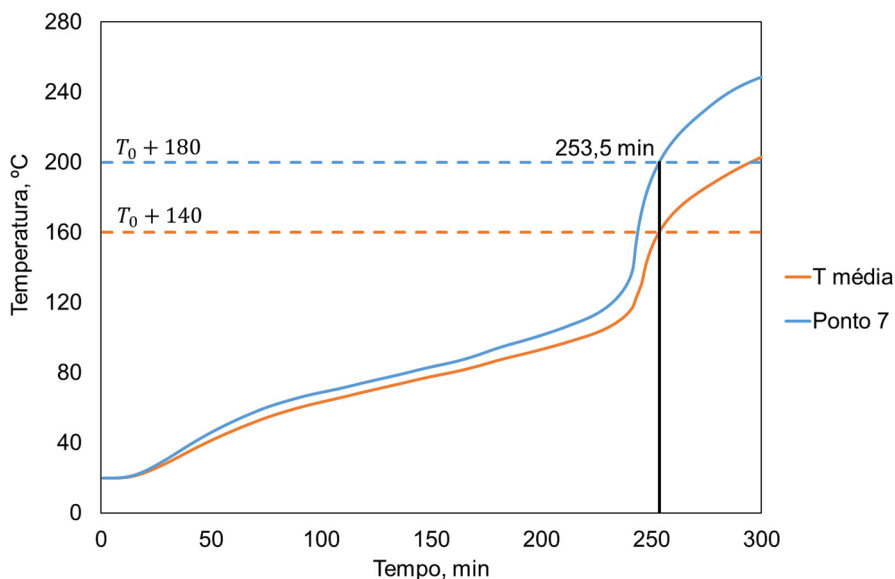


Figura 82 - Critério de isolamento térmico do modelo [120x50+25]x400

Analisando os resultados, conclui-se que o modelo [120x50+25]x400 apresenta o melhor desempenho entre todos os modelos avaliados quanto à secção residual e critério de isolamento térmico, admitindo uma resistência ao fogo igual a 253,5 minutos. Adicionalmente, conclui-se que o parâmetro geométrico com maior influência na proteção da solução construtiva é a espessura do gesso, dado que a duplicação da camada de gesso, neste caso de 12,5 para 25 mm provoca um aumento da resistência ao fogo de, aproximadamente, 175 minutos.

Assim, o aumento do parâmetro  $T_g$  provoca um melhor desempenho geral da solução construtiva cujo, tendo como base a Tabela 21, o parâmetro  $T_{g1}$  admite um valor igual a 25 mm.

## 5.6. Análise dos resultados dos novos modelos paramétricos

O estudo dos modelos paramétricos permitiu avaliar a influência de uma forma geral da variação das dimensões geométricas associadas aos elementos construtivos de suporte em madeira com proteção de gesso. No entanto, um dos fatores importantes no projeto deste tipo de modelos construtivos é a previsibilidade das alterações impostas, ou seja, se a variação de um determinado parâmetro permite um aumento ou a redução da resistência ao fogo, num escalão de tempo linear. Neste sentido, torna-se importante avaliar se a influência dos parâmetros ocorre de modo linear ou, em alternativa, se esta assume outra forma de progressão.

A análise da previsão dos diferentes parâmetros seguiu uma metodologia imposta na análise da resistência ao fogo pelo critério de isolamento térmico. Foi considerada como referência, a variação entre os modelos com menor desempenho referentes ao parâmetro em estudo. A referência, considerada como expectável pelo critério da linearidade, diz respeito à diferença entre os dois modelos com menor resistência ao fogo, de acordo com o critério de isolamento térmico. De seguida, procedeu-se à comparação da evolução existente na simulação entre os dois modelos com maior desempenho do parâmetro em estudo e aquela que seria previsível considerando a linearidade do parâmetro. As análises elaboradas para a resistência ao fogo obtida nos diversos modelos encontram-se na Tabela 26.

Tabela 26 - Análise da influência dos parâmetros geométricos na variação da resistência ao fogo

<b>Estudo da distância entre centros</b>			
<b>Comparação dos modelos em estudo</b>	[70x30+12,5]x600 para [70x30+12,5]x500	[70x30+12,5]x500 para [70x30+12,5]x400	
<b>Critério</b>	Verificada na simulação numérica	Expectável pelo critério de linearidade	
<b>Variação da resistência ao fogo (I) [min]</b>	+ 0,7	+ 0,9	+ 0,7
<b>Estudo da altura da madeira</b>			
<b>Comparação dos modelos em estudo</b>	[70x30+12,5]x400 para [90x30+12,5]x400	[90x30+12,5]x400 para [120x30+12,5]x400	
<b>Critério</b>	Verificada na simulação numérica	Expectável pelo critério de linearidade	
<b>Variação da resistência ao fogo (I) [min]</b>	+ 1,4	+ 2,5	+ 2,1
<b>Estudo da largura da madeira</b>			
<b>Comparação dos modelos em estudo</b>	[120x30+12,5]x400 para [120x40+12,5]x400	[120x40+12,5]x400 para [120x50+12,5]x400	
<b>Critério</b>	Verificada na simulação numérica	Expectável pelo critério de linearidade	
<b>Variação da resistência ao fogo (I) [min]</b>	+ 2	+ 1,2	+ 2
<b>Estudo da espessura do gesso</b>			
<b>Comparação dos modelos em estudo</b>	[120x50+12,5]x400 para [120x50+15]x400	[120x50+15]x400 para [120x50+25]x400	
<b>Critério</b>	Verificada na simulação numérica	Expectável pelo critério de linearidade	
<b>Variação da resistência ao fogo (I) [min]</b>	+ 26,3	+ 148,3	+ 105,2

Tendo em conta a análise efetuada na Tabela 26 conclui-se que a evolução da resistência ao fogo, no estudo da distância entre centros, apresenta-se praticamente como linear, existindo apenas uma pequena variação entre o verificado na simulação numérica e o expectável. Relativamente à altura e largura da madeira, ambos os parâmetros não verificam a linearidade, dado que a variação existente difere da expectável. De igual modo, na comparação dos modelos do estudo da espessura do gesso verifica-se a maior divergência, sendo a evolução verificada na simulação numérica muito superior à expectável.

Adicionalmente, com base nas variações da resistência ao fogo presentes na Tabela 26, é possível aferir quanto à importância dos parâmetros no desempenho da solução construtiva. Assim, conclui-se que o aumento da espessura do gesso é o parâmetro com maior preponderância na resistência ao fogo, dado que provoca a maior variação. O segundo parâmetro, com maior impacto positivo na resistência ao fogo, é a altura da madeira, seguindo-se a largura do montante. Por último, o parâmetro com uma importância menos significativa diz respeito à variação da distância entre centros, dado que o aumento do mesmo provoca um incremento muito reduzido no desempenho da solução construtiva.

Página propositadamente em branco

## 6. MÉTODO SIMPLIFICADO DE RESISTÊNCIA AO FOGO

A aplicação de metodologias analíticas de cálculo no projeto de soluções construtivas permite um estudo-prévio do desempenho obtido pelas mesmas, além de avaliar previamente o cumprimento dos critérios regulamentares associados. Para materiais como o gesso e a madeira, cujas propriedades térmicas são não lineares, a definição de equações analíticas para análise geral de elementos construtivos com diferentes parâmetros geométricos, assenta em critérios com elevada dificuldade de previsibilidade. No entanto, Andrea Frangi et al. [42] desenvolveram uma metodologia de cálculo simplificada, com base em ensaios experimentais, para obtenção do tempo de resistência ao fogo de elementos construtivos de madeira com proteção. Neste sentido, o presente capítulo aplica o método simplificado aos modelos de validação experimental e ao paramétrico [120x50+25]x400, sendo este o que representou o melhor desempenho entre os analisados. Adicionalmente, através da comparação dos resultados obtidos, apresenta-se uma análise à aplicabilidade do método simplificado aos modelos estudados.

### 6.1. Método de separação de modelos construtivos em madeira

Tendo como base um conjunto de estudos experimentais e de análises térmicas com recurso ao método de elementos finitos, Andrea Frangi et al. [42], desenvolveram um modelo analítico de cálculo, com o objetivo de estudar a função individual, ao nível da resistência ao fogo de cada elemento, num modelo construtivo de suporte em madeira. O método permite a avaliação de modelos com um número ilimitado de elementos de gesso e madeira ou diferentes combinações, sendo que em relação às cavidades admite as mesmas como vazios ou preenchidas com materiais de isolamento.

O método de cálculo desenvolvido baseia-se na soma das contribuições dos materiais de proteção ao fogo e de isolamento, sendo o tempo total de resistência ao fogo de um modelo construtivo em madeira, definido pela equação 42.

$$t_{ins} = \sum_{i=1}^{i=n-1} t_{prot,i} + t_{ins,n} \quad (42)$$

Em que  $\sum_{i=1}^{i=n-1} t_{prot,i}$  diz respeito à soma dos tempos de proteção das camadas, na direção do fluxo de calor, que precedem a última camada do modelo no lado não exposto ao fogo, em minutos, e  $t_{ins,n}$  consiste no tempo de isolamento garantido pela última camada do modelo no lado não exposto ao fogo, em minutos.

Os tempos de proteção e de isolamento dependem de um conjunto de fatores relacionados com a solução construtiva, nomeadamente, valores básicos associados a cada camada, coeficientes de posição das respetivas camadas no modelo e coeficientes de correção e de junta, de acordo com as equações 43 e 44.

$$t_{prot,i} = [(t_{prot,0,i} k_{pos,exp,i} k_{pos,unexp,i}) + \Delta t_i] k_{j,i} \quad (43)$$

$$t_{ins,n} = [(t_{ins,0,n} k_{pos,exp,n}) + \Delta t_n] k_{j,n} \quad (44)$$

Sendo  $t_{prot,0,i}$  e  $t_{ins,0,n}$  os valores básicos de resistência ao fogo das camadas  $i$  e da última camada  $n$  do modelo no lado não exposto ao fogo em minutos, respetivamente;  $\Delta t_i$  e  $\Delta t_n$  os tempos de correção para camadas protegidas com gesso em minutos;  $k_{pos,exp,i}$  e  $k_{pos,exp,n}$  os coeficientes de posição das respetivas camadas no modelo, tendo em conta o lado exposto ao fogo;  $k_{pos,unexp,i}$  o coeficiente de posição da camada no modelo, considerando o lado não exposto ao fogo; e  $k_{j,i}$  e  $k_{j,n}$  os coeficientes para juntas de união entre as diferentes camadas.

O método simplificado proposto para o cálculo da resistência ao fogo de modelos construtivos de suporte em madeira, definido nas equações 42 a 44, tem como princípio a imagem esquemática representada na Figura 83, que indica a numeração e função de cada camada.

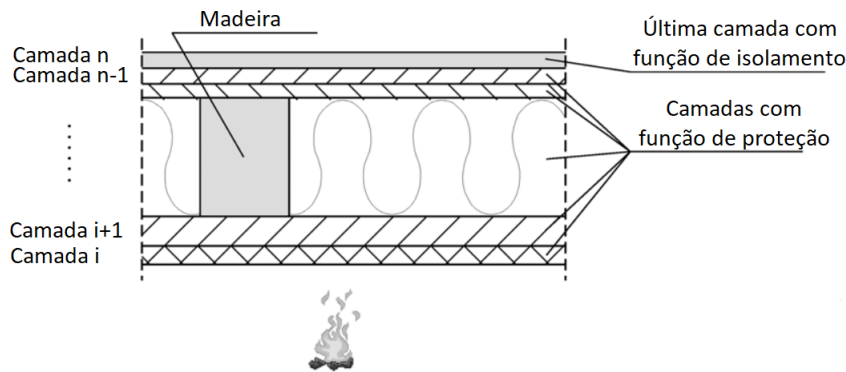


Figura 83 – Numeração e função de cada camada proposto no método simplificado (Adaptada [42])

No seguimento do método simplificado, importa realçar a formulação utilizada para modelos construtivos de madeira com proteção em gesso. Assim, com base no estudo de Andrea Frangi et al. [42], apresenta-se abaixo o procedimento para o cálculo da resistência ao fogo, assim como dos coeficientes e parâmetros associados.

Os valores básicos de resistência ao fogo, para cada material correspondente às camadas de proteção, obtêm-se aplicando as equações 45 e 46.

- Para as camadas em gesso:

$$t_{prot,0,i} = 30 \left( \frac{h_i}{15} \right)^{1,2} \quad (45)$$

- Para as camadas em madeira:

$$t_{prot,0,i} = 30 \left( \frac{h_i}{20} \right)^{1,1} \quad (46)$$

Relativamente às camadas de isolamento, os valores básicos de resistência ao fogo calculam-se através das equações 47 e 48.

- Para as camadas em gesso:

$$t_{ins,0,n} = 24 \left( \frac{h_i}{15} \right)^{1,4} \quad (47)$$

- Para as camadas em madeira:

$$t_{ins,0,n} = 19 \left( \frac{h_i}{20} \right)^{1,4} \quad (48)$$

Nas equações 45 a 48,  $h_i$  é a espessura da camada correspondente em mm.

No que diz respeito aos coeficientes de posição das respetivas camadas no modelo, tendo em conta o lado exposto ao fogo, estes são obtidos com base nas equações 49 e 50, sendo estas consideradas para gesso e madeira.

- Para as camadas de proteção:

$$k_{pos,exp,i} = \begin{cases} 1 - \left( 0,6 \frac{\sum t_{prot,i-1}}{t_{prot,0,i}} \right) & \text{se } \sum t_{prot,i-1} \leq \frac{t_{prot,0,i}}{2} \\ 0,5 \sqrt{\frac{t_{prot,0,i}}{\sum t_{prot,i-1}}} & \text{se } \sum t_{prot,i-1} > \frac{t_{prot,0,i}}{2} \end{cases} \quad (49)$$

- Para as camadas de isolamento:

$$k_{pos,exp,n} = \begin{cases} 1 - \left( 0,6 \frac{\sum t_{prot,i-1}}{t_{ins,0,n}} \right) & \text{se } \sum t_{prot,i-1} \leq \frac{t_{ins,0,n}}{2} \\ 0,5 \sqrt{\frac{t_{ins,0,n}}{\sum t_{prot,i-1}}} & \text{se } \sum t_{prot,i-1} > \frac{t_{ins,0,n}}{2} \end{cases} \quad (50)$$

O coeficiente de posição da camada no modelo, considerando o lado não exposto ao fogo, calcula-se através da aplicação das equações 51 e 52.

- Para as camadas em gesso:

$$k_{pos,unexp,i} = \begin{cases} 1 & \text{se camada seguinte é de proteção (gesso/madeira)} \\ 0,5 h_i^{0,15} & \text{se camada seguinte é de isolamento} \end{cases} \quad (51)$$

- Para as camadas em madeira:

$$k_{pos,unexp,i} = \begin{cases} 1 & \text{se camada seguinte é de proteção (gesso/madeira)} \\ 0,35 h_i^{0,21} & \text{se camada seguinte é de isolamento} \end{cases} \quad (52)$$

Os tempos de correção para camadas protegidas com gesso, considerando soluções construtivas do tipo parede, são obtidos pela aplicação das equações 53 e 54.

- Para as camadas de proteção:

$$\Delta t_i = \begin{cases} 0,03 t_{prot,i-1} + 0,9 t_{prot,0,i} - 2,3 & \text{se } t_{prot,0,i} < 12 \text{ min} \\ 0,22 t_{prot,i-1} - 0,1 t_{prot,0,i} + 4,7 & \text{se } t_{prot,0,i} \geq 12 \text{ min} \end{cases} \quad (53)$$

- Para as camadas de isolamento:

$$\Delta t_n = \begin{cases} 0,03 t_{prot,i-1} + 0,9 t_{ins,0,n} - 2,3 & \text{se } t_{ins,0,n} < 12 \text{ min} \\ 0,22 t_{prot,i-1} - 0,1 t_{ins,0,n} + 4,7 & \text{se } t_{ins,0,n} \geq 12 \text{ min} \end{cases} \quad (54)$$

Relativamente aos coeficientes para juntas de união entre as diferentes camadas, para ligações com uma união na qual os materiais distam, no máximo, 2 mm, os coeficientes são considerados como unitários. Assim, para o caso em estudo, será adotada esta consideração.

Por último, o método simplificado considera a existência de cavidades de ar entre duas camadas através da afetação dos valores dos coeficientes de posição. O cálculo considera a modificação dos coeficientes de posição na camada no lado exposto ao fogo da cavidade e na camada no lado não exposto ao fogo da cavidade, conforme os princípios definidos na Tabela 27.

Tabela 27 – Modificação dos coeficientes de posição na existência de cavidades de ar

Camada	Camada no lado exposto ao fogo da cavidade	Camada no lado não exposto ao fogo da cavidade
Proteção	$k_{pos,unexp,i}$ de acordo com equação 52	$1,6 k_{pos,exp,i}$
Isolamento	$k_{pos,unexp,i} = 1$	$3 \Delta t_i$
		$\Delta t_i$ de acordo com equação 53

## 6.2. Aplicação do método simplificado de resistência ao fogo

O método simplificado representa uma ferramenta muito importante no auxílio ao projeto de modelos construtivos de suporte em madeira com proteção. A sua aplicação permite obter uma rápida noção da resistência ao fogo admitida pelas soluções construtivas numa fase prévia à sua validação em testes experimentais. No âmbito do presente estudo, a aplicação do método simplificado permite obter uma comparação com os resultados experimentais e numéricos. Neste sentido, o modelo de cálculo proposto por Andrea Frangi et al. [42] foi aplicado no contexto de validação experimental, tendo em conta o estudo WALL2D conduzido por H. Takeda e J. R. Mehaffey [2], e no âmbito dos modelos paramétricos desenvolvidos, nomeadamente o modelo [120x50+25]x400, que representa a maior resistência ao fogo.

### 6.2.1. Modelo de validação experimental

Tendo em conta o modelo de validação experimental correspondente ao ensaio 4 do estudo elaborado por H. Takeda e J. R. Mehaffey [2] realizou-se a aplicação do método simplificado de Andrea Frangi et al. [42]. Este cálculo analítico é importante para comparação com os resultados obtidos experimentalmente e numericamente através da simulação pelo método de elementos finitos correspondentes ao modelo M4. Neste sentido, o método de cálculo teve como base a solução construtiva definida no teste 4 do ensaio experimental, conforme representado na Figura 84.

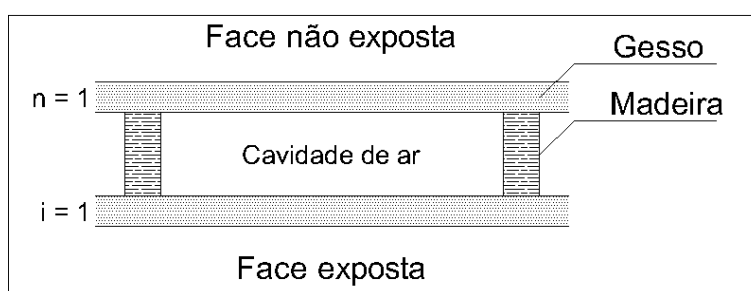


Figura 84 – Numeração e identificação das camadas para aplicação do método simplificado

De acordo com o método simplificado, para o modelo da Figura 84, a camada com função de proteção, representada com a letra  $i$ , é a primeira camada de gesso no lado exposto ao fogo. Relativamente à camada de isolamento, identificada pela letra  $n$ , de acordo com as regras do método simplificado, apenas se considera a última camada de gesso, no lado não exposto ao fogo. Adicionalmente, de acordo com a formulação do método de cálculo, a presença da cavidade de ar é considerada através da afetação dos coeficientes de posição e tempos de correção.

Assim, considerando a formulação proposta no método simplificado procedeu-se à avaliação da resistência ao fogo do modelo de validação experimental. Numa primeira fase, torna-se necessário obter o tempo correspondente à camada de proteção e, na segunda parte do cálculo, da camada de isolamento, considerando os diversos fatores que afetam a resistência ao fogo, de acordo com o indicado na Tabela 28.

Tabela 28 - Aplicação do método simplificado ao modelo de validação experimental

Identificação da camada	Função da camada	Material	$h_i$ [mm]
i = 1	Proteção	Gesso Tipo A	32
n = 1	Isolamento	Gesso Tipo A	32

Tendo em conta a Tabela 28, a aplicação do método simplificado iniciou-se pela camada de proteção (i=1), tendo sido obtido o valor básico de resistência ao fogo, através da aplicação da equação 45 e conforme equação 55.

$$t_{prot,0,1} = 30 \times \left(\frac{32}{15}\right)^{1,2} = 74,47 \text{ min} \quad (55)$$

De seguida, procedeu-se ao cálculo dos coeficientes de posição do lado exposto e não exposto ao fogo respetivos à camada, com base nas equações 49 e 51 e conforme indicado no cálculo em 56 e 57.

$$\sum t_{prot,0} = 0 \Rightarrow k_{pos,exp,1} = 1 - \left(0,6 \times \frac{0}{74,47}\right) = 1 \quad (56)$$

$$k_{pos,unexp,1} = 1 \quad (57)$$

Relativamente ao tempo de correção, associado à camada de proteção (i=1), considerou-se a utilização da equação 53 conforme representado em 58.

$$t_{prot,0,1} \geq 12 \text{ min} \Rightarrow \Delta t_{i=1} = -0,1 \times 74,47 + 4,7 = -2,75 \text{ min} \quad (58)$$

Na consideração da afetação da cavidade de ar nesta camada, de acordo com o método simplificado, as cavidades apenas são consideradas no cálculo de camadas que se encontram posteriores, pelo que não se considera no cálculo na camada de proteção (i=1). Assim, com base na equação 43 procedeu-se ao cálculo do tempo de resistência ao fogo garantido por esta camada, de acordo com a expressão 59.

$$t_{prot,1} = [(74,47 \times 1 \times 1) - 2,75] \times 1 = 71,72 \text{ min} \quad (59)$$

De seguida, com base na Tabela 27, procedeu-se à análise da camada de isolamento (n=1). O cálculo do valor básico de resistência ao fogo teve em consideração a equação 47, representado na expressão 60.

$$t_{ins,0,n} = 24 \times \left(\frac{32}{15}\right)^{1,4} = 69,33 \text{ min} \quad (60)$$

Relativamente ao coeficiente de posição no lado exposto ao fogo, este foi obtido através da aplicação da equação 50, representada agora na 61.

$$\sum t_{prot,1} > \frac{t_{ins,0,1}}{2} \Rightarrow k_{pos,exp,n} = 0,5 \times \sqrt{\frac{69,33}{71,72}} = 0,49 \quad (61)$$

De seguida, de modo a obter o tempo de correção aplicou-se a equação 54, conforme indicado em 62.

$$t_{ins,0,1} \geq 12 \text{ min} \Rightarrow \Delta t_{n=1} = 0,22 \times 71,72 - 0,1 \times 69,33 + 4,7 = 13,55 \text{ min} \quad (62)$$

No que diz respeito à afetação dos coeficientes, devido à existência da cavidade de ar, para a camada de isolamento ( $n=1$ ), serão considerados os valores presentes na Tabela 26. Neste sentido, o tempo de resistência ao fogo associado a esta camada é calculado através da equação 44, pelo cálculo efetuado em 63.

$$t_{ins,1} = [(69,33 \times 1,6 \times 0,49) + 3 \times 13,55] * 1 = 95,23 \text{ min} \quad (63)$$

Considerando os resultados obtidos nas equações 59 e 63, o tempo total de resistência ao fogo admitido para a solução construtiva, de acordo com o método simplificado, é dado através da aplicação da equação 42, representado em 64.

$$t_{ins} = 71,72 + 95,23 = 166,95 \text{ min} \quad (64)$$

Considerando a aplicação do método simplificado ao modelo de validação experimental, é possível comparar os valores de resistência ao fogo obtidos para a solução experimental, numérica e analítica pelo método simplificado. Na Tabela 29 apresentam-se os tempos de resistência ao fogo obtidos para as três metodologias através da aplicação do critério de isolamento térmico, de acordo com a norma EN1363-1:2020 [1].

Tabela 29 - Resistência ao fogo obtidas pelas metodologias de análise ao modelo de validação experimental

Metodologia de análise	Resistência ao fogo [min]
Ensaio experimental (Estudo WALL2D de H. Takeda e J. R. Mehaffey [2])	226
Simulação numérica (Modelo M4)	216
Método Simplificado	166,95

Tendo em conta as resistências ao fogo apresentadas na Tabela 29, torna-se possível calcular a relação entre o valor experimental e numérico, com o obtido pela aplicação do método simplificado, de acordo com as equações 65 e 66.

$$\frac{t_{ins,WALL2D}}{t_{ins,método simplificado}} = \frac{226}{166,95} = 1,35 \quad (65)$$

$$\frac{t_{ins,Modelo M4}}{t_{ins,método simplificado}} = \frac{216}{166,95} = 1,29 \quad (66)$$

Considerando as relações obtidas nas equações 65 e 66 verifica-se que o teste experimental apresenta uma resistência ao fogo superior à calculada pelo método simplificado em 35%, sendo o modelo numérico superior em 29% em comparação com a metodologia analítica.

### 6.2.2. Modelo paramétrico [120x50+25]x400

No estudo dos modelos paramétricos concluiu-se que o modelo [120x50+25]x400 analisado permitiu o melhor desempenho e resistência ao fogo. De modo a verificar a adequabilidade e aproximação de resultados ao método simplificado procedeu-se também ao cálculo com este modelo paramétrico. Este modelo apresenta dimensões diferentes ao experimental, nomeadamente ao nível do parâmetro da espessura das camadas de proteção e isolamento  $h_i$  e das dimensões das cavidades de ar.

Relativamente à numeração e identificação das camadas com base no método simplificado, o modelo paramétrico segue os princípios definidos na Figura 84, uma vez que apresenta uma camada de gesso no lado exposto ao fogo, considerada como de proteção, e uma no lado não exposto ao fogo, sendo de isolamento. No entanto, na Tabela 30 encontram-se os parâmetros aplicados no cálculo analítico do modelo [120x50+25]x400.

Tabela 30 - Aplicação do método simplificado ao modelo paramétrico [120x50+25]x400

Identificação da camada	Função da camada	Material	$h_i$ [mm]
i = 1	Proteção	Gesso Tipo F	25
n = 1	Isolamento	Gesso Tipo F	25

De forma sucinta, procedeu-se ao cálculo do tempo de resistência ao fogo associado à camada de proteção ( $i=1$ ), conforme apresentado nas equações 69 a 73.

$$t_{prot,0,1} = 30 \times \left(\frac{25}{15}\right)^{1,2} = 55,38 \text{ min} \quad (69)$$

$$\sum t_{prot,0} = 0 \Rightarrow k_{pos,exp,1} = 1 - \left(0,6 \times \frac{0}{55,38}\right) = 1 \quad (70)$$

$$k_{pos,unexp,1} = 1 \quad (71)$$

$$t_{prot,0,1} \geq 12 \text{ min} \Rightarrow \Delta t_{i=1} = -0,1 \times 55,38 + 4,7 = -0,84 \text{ min} \quad (72)$$

$$t_{prot,1} = [(55,38 \times 1 \times 1) - 0,84] \times 1 = 54,54 \text{ min} \quad (73)$$

Relativamente ao tempo de resistência ao fogo associado à camada de isolamento ( $n=1$ ), apresenta o cálculo nas equações 74 a 77.

$$t_{ins,0,n} = 24 \times \left(\frac{25}{15}\right)^{1,4} = 49,07 \text{ min} \quad (74)$$

$$\sum t_{prot,1} > \frac{t_{ins,0,1}}{2} \Rightarrow k_{pos,exp,n} = 0,5 \times \sqrt{\frac{49,07}{54,54}} = 0,47 \quad (75)$$

$$t_{ins,0,1} \geq 12 \text{ min} \Rightarrow \Delta t_{n=1} = 0,22 \times 54,54 - 0,1 \times 49,07 + 4,7 = 11,79 \text{ min} \quad (76)$$

$$t_{ins,1} = [(49,07 \times 1,6 \times 0,47) + 3 \times 11,79] \times 1 = 72,27 \text{ min} \quad (77)$$

Tendo em conta os resultados obtidos nas equações 73 e 77 procedeu-se ao cálculo da resistência ao fogo admitida pelo método simplificado ao modelo paramétrico, conforme a expressão 78.

$$t_{ins} = 54,54 + 72,27 = 126,81 \text{ min} \quad (78)$$

Na Tabela 31 encontram-se os tempos de resistência ao fogo admitidos pelas metodologias numérica e simplificada.

Tabela 31 - Resistência ao fogo obtidas pelas metodologias de análise ao modelo paramétrico [120x50+25]x400

Metodologia de análise	Resistência ao fogo [min]
Simulação numérica	253,5
Método Simplificado	126,81

No seguimento dos valores presentes na Tabela 31, a relação entre o tempo de resistência ao fogo obtido numericamente e o admitido pelo método simplificado encontra-se na equação 79.

$$\frac{t_{ins,simulação\ numérica}}{t_{ins,método\ simplificado}} = \frac{253,5}{126,81} = 2 \quad (79)$$

Neste sentido, analisando a relação, conclui-se que a resistência ao fogo admitida pelo critério de isolamento térmico na simulação numérica apresenta-se como duas vezes superior à obtida pela aplicação do método simplificado.

### 6.3. Análise dos resultados da aplicação do método simplificado de resistência ao fogo

A aplicação do método simplificado aos dois modelos, que apresentam a mesma composição, permite retirar conclusões relativamente à aplicabilidade do método simplificado. No que diz respeito à comparação dos parâmetros geométricos verifica-se que o modelo de validação experimental possui uma maior espessura de gesso, mas uma menor altura e largura dos montantes de madeira, em comparação com o modelo [120x50+25]x400, sendo a distância entre centros igual em ambos. Relativamente ao tempo de resistência ao fogo obtido por outras metodologias e conforme abordado ao longo da presente dissertação, o modelo [120x50+25]x400 apresenta um maior escalão de tempo quando comparado com o de validação experimental.

Analisando a metodologia de cálculo, definida no método simplificado, conclui-se que o parâmetro com maior importância e que afeta todos os coeficientes no cálculo é a espessura de cada camada, definida como  $h_i$ . Tendo em conta este princípio, o método simplificado apresenta resultados diferentes aos obtidos pelo ensaio experimental e análises numéricas, dado que define o modelo de validação experimental com uma resistência ao fogo superior ao modelo paramétrico. Adicionalmente, o método de cálculo não considera a cavidade de ar como camada de proteção, dado que apresenta coeficientes de afetação gerais aos parâmetros do tempo de proteção e de isolamento. Tendo como base a aplicação analítica, conclui-se que os coeficientes gerais não refletem as variações de altura da cavidade de ar, ao contrário dos testes experimentais e numéricos, uma vez que, tal como verificado anteriormente, uma maior altura da cavidade provoca um aumento do tempo de resistência ao fogo.

Neste sentido, apesar dos resultados obtidos nos dois modelos simplificados se apresentarem no lado conservativo, importa verificar se estes se aproximam à análise efetuada pelos investigadores. Com base no gráfico de comparação, entre diversos testes experimentais e aplicações do método simplificado apresentado no estudo da Figura 85, de Andrea Frangi et al. [42], torna-se possível averiguar a aproximação dos resultados presentes nas equações 65, 66 e 79.

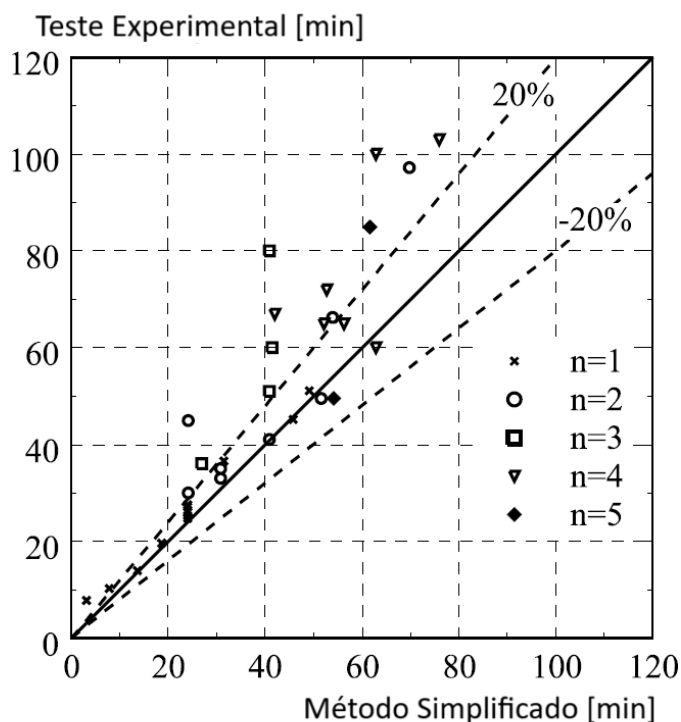


Figura 85 – Comparação da resistência ao fogo obtida em testes experimentais e no método simplificado (n = número de camadas) (Adaptada [42])

Com base na Figura 85, conclui-se que os resultados obtidos na aplicação do método simplificado para os modelos de validação experimental e paramétrico, possuem enquadramento no definido no estudo de referência. Adicionalmente, conclui-se que os resultados poderão aproximar-se à situação real em alguns modelos, mas divergir bastante noutros. Assim, apesar dos investigadores Andrea Frangi et al. [42] admitirem no seu estudo que um aumento do número de camadas provoca um aumento da relação entre o resultado experimental e o obtido analiticamente, no presente estudo, o número de camadas foi mantido, tendo sido apenas modificada a altura da cavidade de ar e a espessura do gesso. Com isto, conclui-se que o efeito da cavidade de ar deverá ser introduzido no método simplificado proposto, através de uma diferente afetação aos coeficientes, tendo em conta a altura da cavidade, ou, em alternativa, ser introduzida uma camada de proteção associada à evolução da temperatura nas cavidades de ar com equações dedicadas.

Página propositadamente em branco

## 7. CONCLUSÕES

### 7.1. Conclusões finais

A madeira, sendo um material abundante e renovável, apresenta um forte potencial na sua utilização em estruturas. O seu uso considerando a proteção com materiais de revestimento, como é o caso do gesso, aumenta o seu desempenho quando exposta ao fogo. No entanto, o facto das propriedades térmicas dos materiais serem não lineares dificulta o processo de regulamentação e definição do seu estudo em normas europeias e eurocódigos. O desenvolvimento de diversos testes experimentais, modelos numéricos e metodologias analíticas de cálculo permitem obter um maior conhecimento dos mesmos e auxiliar na definição das regras de aplicação destes em elementos construtivos.

A análise computacional para a avaliação da resistência ao fogo em elementos construtivos de suporte de madeira com proteção teve como base a validação numérica das condições experimentais apresentadas nos ensaios realizados pelos investigadores H. Takeda e J. R. Mehaffey no seu artigo *“WALL2D: a Model for Predicting Heat Transfer through Wood-Stud Walls Exposed to Fire”*. Os modelos numéricos desenvolvidos consistiram em análise térmicas não lineares em regime transiente, tendo sido avaliados parâmetros para previsão da secção residual nos montantes de madeira e da resistência ao fogo pelo critério de isolamento térmico. Do presente estudo de validação experimental, conclui-se que o modelo numérico M4 apresenta uma evolução próxima à real. Esta situação deve-se, essencialmente, à conjugação de dois elementos finitos no interior da cavidade de ar. A introdução do elemento SURF151 para simulação da transferência de calor entre as superfícies internas às cavidades e do elemento LINK34, que permite a simulação do aquecimento das cavidades através do fenómeno de convecção.

Considerando o modelo numérico de validação experimental desenvolveram-se um conjunto de modelos paramétricos com variação dos principais parâmetros, nomeadamente distância entre centros, dimensões dos montantes de madeira e espessura do gesso. O objetivo dos novos estudos consistiu na avaliação da influência que estes possuem na resistência ao fogo, através da análise do campo de temperaturas, carbonização e secção residual, assim como o critério de isolamento térmico.

Os resultados obtidos nos novos modelos permitiram concluir que a resistência ao fogo é positivamente influenciada por uma menor distância entre centros, uma maior altura e espessura dos montantes em madeira e por uma maior espessura do gesso. No entanto, verificou-se uma importância mais significativa da espessura do gesso, pelo facto deste permitiu um maior aumento da resistência ao fogo pelo critério de isolamento térmico.

No que diz respeito à previsibilidade da evolução da resistência ao fogo através da alteração dos parâmetros geométricos foi realizada uma análise aos resultados. No entanto, conclui-se necessário concretizar ainda mais modelos para aferir quanto à tendência linear ou não linear das variações.

Por último, considerou-se a aplicação do método simplificado proposto por um grupo de investigadores liderado por A. Frangi, designado como *“Design model for the verification of the separating function of light timber frame assemblies”*. Através da utilização deste método conclui-

se que este atribui a principal importância para cálculo da resistência ao fogo à espessura das camadas de proteção e isolamento. No que diz respeito à cavidade de ar, considera-se que o método não avalia a total influência deste elemento na resistência ao fogo, dado que apenas considera uma afetação genérica aos fatores previamente definidos pela espessura das camadas.

## 7.2. Limitações e trabalhos futuros

Na presente dissertação e de acordo com os aspetos levantados nas conclusões finais, considera-se que a principal limitação diz respeito à necessidade de incrementar o número de modelos paramétricos, para permitir o estudo da previsibilidade da influência dos parâmetros geométricos com maior certeza. Adicionalmente, a segunda limitação prende-se com a aplicação do método simplificado, dado que as informações existentes sobre o mesmo são muito reduzidas e a metodologia de aplicação dos diversos fatores e coeficientes não se encontra explicitamente definida no artigo, nomeadamente ao nível da afetação da cavidade de ar no cálculo.

Neste sentido, de modo a colmatar as principais limitações existentes no trabalho desenvolvido, considera-se interessante desenvolver um maior número de modelos paramétricos referente a cada um, de quatro parâmetros geométricos abordados. Um estudo alargado permitiria avaliar a existência de um padrão para evolução da resistência ao fogo, ou seja, a previsibilidade das alterações induzidas pelos parâmetros.

Adicionalmente, no que diz respeito ao método simplificado de resistência ao fogo, considera-se que seria importante realizar um aprofundamento do modo de aplicação da metodologia, nomeadamente ao nível dos diferentes coeficientes associados para compreensão da simulação e influência das cavidades de ar na resistência ao fogo obtida analiticamente.

Por último, apesar do modelo numérico de validação com fronteiras de radiação e convecção (M4) representar uma boa aproximação à solução experimental, considera-se que a realização de novos ensaios experimentais à solução construtiva em estudo permitiria uma possível tentativa calibração do modelo numérico, de modo a garantir uma aproximação exata às condições reais.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] European Standard, "EN 1363-1:2020 Fire Resistance tests - Part 1: General Requirements," 2020.
- [2] H. Takeda and J. R. Mehaffey, "WALL2D: A model for predicting heat transfer through wood-stud walls exposed to fire," *Fire Mater*, vol. 22, no. 4, pp. 133–140, Jul. 1998, doi: 10.1002/(SICI)1099-1018(1998070)22:4<133::AID-FAM642>3.0.CO;2-L.
- [3] Z. Yu *et al.*, "Emerging Bioinspired Artificial Woods," *Advanced Materials*, vol. 33, no. 28, p. 2001086, Jul. 2021, doi: 10.1002/adma.202001086.
- [4] J. Wang, J. Liu, J. Li, and J. Y. Zhu, "Characterization of Microstructure, Chemical, and Physical Properties of Delignified and Densified Poplar Wood," *Materials*, vol. 14, no. 19, p. 5709, Sep. 2021, doi: 10.3390/ma14195709.
- [5] H. Qiu *et al.*, "Improvement of the Performance of Plantation Wood by Grafting Water-Soluble Vinyl Monomers onto Cell Walls," *ACS Sustain Chem Eng*, vol. 6, no. 11, pp. 14450–14459, Nov. 2018, doi: 10.1021/acssuschemeng.8b03112.
- [6] L. Shi and M. Y. L. Chew, "A review of thermal properties of timber and char at elevated temperatures," *Indoor and Built Environment*, p. 1420326X2110355, Aug. 2021, doi: 10.1177/1420326X211035557.
- [7] L. B. Otani, P. Gutemberg, A. Segundinho, and E. Morales, "Elastic moduli characterization of wood and wood products using the Impulse Excitation Technique," *Research Gate*, 2015, doi: 10.13140/RG.2.1.3074.9608.
- [8] S. Hering, D. Keunecke, and P. Niemz, "Moisture-dependent orthotropic elasticity of beech wood," *Wood Sci Technol*, vol. 46, no. 5, pp. 927–938, Sep. 2012, doi: 10.1007/s00226-011-0449-4.
- [9] M. Tavakkol-khah and W. Klingsch, "Calculation Model For Predicting Fire Resistance Time Of Timber Members," *Fire Safety Science*, vol. 5, pp. 1201–1211, 1997, doi: 10.3801/IAFSS.FSS.5-1201.
- [10] G. Ravenshorst, "Species independent strength grading of structural timber," 2015. doi: 10.4233/uuid:b2243d5d-3275-4d93-9378-b39f97a39f02.
- [11] J. Song *et al.*, "Processing bulk natural wood into a high-performance structural material," *Nature*, vol. 554, no. 7691, pp. 224–228, Feb. 2018, doi: 10.1038/nature25476.
- [12] L. Gustavsson and R. Sathre, "Variability in energy and carbon dioxide balances of wood and concrete building materials," *Build Environ*, vol. 41, no. 7, pp. 940–951, Jul. 2006, doi: 10.1016/j.buildenv.2005.04.008.
- [13] C.-M. Popescu, G. Singurel, M.-C. Popescu, C. Vasile, D. S. Argyropoulos, and S. Willför, "Vibrational spectroscopy and X-ray diffraction methods to establish the differences between hardwood and softwood," *Carbohydr Polym*, vol. 77, no. 4, pp. 851–857, Jul. 2009, doi: 10.1016/j.carbpol.2009.03.011.
- [14] F. Wiesner and L. Bisby, "The structural capacity of laminated timber compression elements in fire: A meta-analysis," *Fire Saf J*, vol. 107, pp. 114–125, Jul. 2019, doi: 10.1016/j.firesaf.2018.04.009.
- [15] R. Brandner, G. Flatscher, A. Ringhofer, G. Schickhofer, and A. Thiel, "Cross laminated timber (CLT): overview and development," *European Journal of Wood and Wood Products*, vol. 74, no. 3, pp. 331–351, May 2016, doi: 10.1007/s00107-015-0999-5.
- [16] K. A. Malo, R. B. Abrahamsen, and M. A. Bjertnæs, "Some structural design issues of the 14-storey timber framed building 'Treet' in Norway," *European Journal of Wood and Wood Products*, vol. 74, no. 3, pp. 407–424, May 2016, doi: 10.1007/s00107-016-1022-5.
- [17] C. Samorinha Fernandes, "Determinação do Efeito da Proteção em Elementos Construtivos de Madeira Submetida à Ação do Fogo," Tese de Mestrado, Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP), Porto, 2022.

- [18] K. Mróz, I. Hager, and K. Korniejenko, "Material Solutions for Passive Fire Protection of Buildings and Structures and Their Performances Testing," *Procedia Eng*, vol. 151, pp. 284–291, 2016, doi: 10.1016/j.proeng.2016.07.388.
- [19] I. Rahmanian and Y. Wang, "Thermal Conductivity of Gypsum at High Temperatures – A Combined Experimental and Numerical Approach," *Acta Polytechnica*, vol. 49, no. 1, Jan. 2009, doi: 10.14311/1081.
- [20] S. Kukuck, "Heat and mass transfer through gypsum partitions subjected to fire exposures," Gaithersburg, MD, 2009. doi: 10.6028/NIST.IR.7461.
- [21] V. S. Ramachandran, R. M. Paroli, J. J. Beaudoin, and A. H. Delgado, *Handbook of Thermal Analysis of Construction Materials*. Noyes Publications, Norwich, NY, 2003.
- [22] P. Kalifa, G. Chéné, and C. Gallé, "High-temperature behaviour of HPC with polypropylene fibres," *Cem Concr Res*, vol. 31, no. 10, pp. 1487–1499, Oct. 2001, doi: 10.1016/S0008-8846(01)00596-8.
- [23] P. Sullivan, "Deterioration and spalling of high strength concrete under fire," Report for UK Health & Safety Executive, City University of London, 2001.
- [24] A. Leça Coelho, *Incêndios em Edifícios*, 1st ed. Edições Orion, ISBN: 9789728620165, 2010.
- [25] "ISO 834-1 Fire-resistance tests-Elements of building construction-Part 1: General requirements," 1999.
- [26] N. Portuguesa, "Eurocódigo 1 - Acções em estruturas Parte 1-2: Acções gerais Acções em estruturas expostas ao fogo," 1991
- [27] A. da Silva Reis, "Determinação de cenários de incêndio em edifícios," Tese de Mestrado, Universidade de Aveiro, Aveiro, 2011.
- [28] Diário da República, "Regulamento Técnico de Segurança Contra Incêndio em Edifícios," Portaria n.º 135/2020, Jun. 02, 2020
- [29] J. Aidos Rocha, *Segurança Contra Incêndio em Edifícios - Regulamentação Ilustrada e Anotada*, vol. 01. Exactubooks, 2017.
- [30] European Standard, "EN 13501-2:2007 Fire Classification of construction products and building elements - Part 2: Classification using data from fire resistance tests, excluding ventilation services," 2009.
- [31] Assembleia da República, "Regime Jurídico da Segurança Contra Incêndio em Edifícios," Lei n.º 123/2019, Oct. 18, 2019
- [32] P. B. Cachim and J.-M. Franssen, "Comparison between the charring rate model and the conductive model of Eurocode 5," *Fire Mater*, vol. 33, no. 3, pp. 129–143, Apr. 2009, doi: 10.1002/fam.985.
- [33] A. Frangi, M. Knobloch, and M. Fontana, "Fire design of timber slabs made of hollow core elements," *Eng Struct*, vol. 31, no. 1, pp. 150–157, Jan. 2009, doi: 10.1016/j.engstruct.2008.08.002.
- [34] A. I. Bartlett, R. M. Hadden, and L. A. Bisby, "A Review of Factors Affecting the Burning Behaviour of Wood for Application to Tall Timber Construction," *Fire Technol*, vol. 55, no. 1, pp. 1–49, Jan. 2019, doi: 10.1007/s10694-018-0787-y.
- [35] Bruxelas: CEN - European Committee for Standardization, "EN 1995-1-2, Eurocode 5: Design of timber structures - Part 1-2: Structural fire design," 2003
- [36] Y. A. Cengel, *Heat Transfer: A Practical Approach*, 2nd Edition. New York, 2002.
- [37] J. König, "Structural fire design according to Eurocode 5—design rules and their background," *Fire Mater*, vol. 29, no. 3, pp. 147–163, May 2005, doi: 10.1002/fam.873.
- [38] A. Frangi and M. Fontana, "Charring rates and temperature profiles of wood sections," *Fire Mater*, vol. 27, no. 2, pp. 91–102, Mar. 2003, doi: 10.1002/fam.819.
- [39] A. Frangi, M. Fontana, E. Hugli, and R. Jübstl, "Experimental analysis of cross-laminated timber panels in fire," *Fire Saf J*, vol. 44, no. 8, pp. 1078–1087, Nov. 2009, doi: 10.1016/j.firesaf.2009.07.007.

- [40] T.-H. Yang, S.-Y. Wang, M.-J. Tsai, and C.-Y. Lin, "The charring depth and charring rate of glued laminated timber after a standard fire exposure test," *Build Environ*, vol. 44, no. 2, pp. 231–236, Feb. 2009, doi: 10.1016/j.buildenv.2008.02.010.
- [41] A. Frangi, V. Schleifer, M. Fontana, and E. Hugi, "Experimental and Numerical Analysis of Gypsum Plasterboards in Fire," *Fire Technol*, vol. 46, no. 1, pp. 149–167, Jan. 2010, doi: 10.1007/s10694-009-0097-5.
- [42] A. Frangi, V. Schleifer, and M. Fontana, "Design model for the verification of the separating function of light timber frame assemblies," *Eng Struct*, vol. 32, no. 4, pp. 1184–1195, Apr. 2010, doi: 10.1016/j.engstruct.2009.12.044.
- [43] R. Fahrni, M. Klippel, A. Just, A. Ollino, and A. Frangi, "Fire tests on glued-laminated timber beams with specific local material properties," *Fire Saf J*, vol. 107, pp. 161–169, Jul. 2019, doi: 10.1016/j.firesaf.2017.11.003.
- [44] M. Fragiaco, A. Menis, P. J. Moss, I. Clemente, A. H. Buchanan, and B. de Nicolo, "Predicting the fire resistance of timber members loaded in tension," *Fire Mater*, vol. 37, no. 2, pp. 114–129, Mar. 2013, doi: 10.1002/fam.2117.
- [45] V. D. Thi, M. Khelifa, M. Oudjene, M. el Ganaoui, and Y. Rogau, "Numerical simulation of fire integrity resistance of full-scale gypsum-faced cross-laminated timber wall," *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 132, pp. 96–103, Oct. 2018, doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2018.06.003.
- [46] P. A. G. Piloto and E. M. M. Fonseca, "Timber framed walls lined with gypsum plates under fire," in *Proceedings IRF2020: 7th International Conference Integrity-Reliability-Failure, INEGI-FEUP*, J. F. Silva Gomes and S. A. Meguid, Eds., 2020, pp. 547–556.
- [47] European Standard, "EN 1364-1:2015 Fire resistance tests for non-loadbearing elements - Part 1: Walls," 2015.
- [48] A. Faria and J. Negrão, *Projecto de Estruturas de Madeira*. Publindústria, 2009.
- [49] H. Group, "Glued Laminated Timber," 2022. [https://www.hasslacher.com/data/\\_dateimanager/broschuere/HNT-Brettschichtholz-EN.pdf](https://www.hasslacher.com/data/_dateimanager/broschuere/HNT-Brettschichtholz-EN.pdf) (accessed Jul. 10, 2023).
- [50] Forest Products Laboratory, *Wood Handbook: Wood as an Engineering Material*. Madison, WI: United States Department of Agriculture, 1999.
- [51] Gyptec Ibérica, "Gyptec Ibérica: Documentação Técnica," Apr. 20, 2023. <https://gyptec.eu/documentacao-tecnica/> (accessed Apr. 20, 2023).
- [52] J. R. Mehaffey, P. Cuerrier, and G. Carisse, "A model for predicting heat transfer through gypsum-board/wood-stud walls exposed to fire," *Fire Mater*, vol. 18, no. 5, pp. 297–305, Sep. 1994, doi: 10.1002/fam.810180505.
- [53] J. P. Holman, *Heat Transfer*. New York: McGraw Hill, 2010.
- [54] O. C. Zienkiewicz and R. L. Taylor, *The Finite Element Method - Solid and Fluid Mechanics, Dynamics and Non-Linearity*, 4th ed. Michigan: McGraw-Hill.
- [55] E. M. M. Fonseca, "Análise por Elementos Finitos do Comportamento de Tubagens Sob a Acção de Fortes Gradientes Térmicos," Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto para a obtenção do grau de doutor em Engenharia Mecânica, 2003.
- [56] Inc. ANSYS, "ANSYS Mechanical APDL Element Reference." Canonsburg, PA, Nov. 2011.
- [57] A. Ujma and N. Umnyakova, "Thermal efficiency of the building envelope with the air layer and reflective coatings," *E3S Web of Conferences*, vol. 100, p. 00082, Jun. 2019, doi: 10.1051/e3sconf/201910000082.

Página propositadamente em branco

## APÊNDICE A

Comandos APDL utilizados na criação da geometria do modelo paramétrico, no programa de elementos finitos *ANSYS® Academic Student 2022 R1*:

K,1,0,0,,

K,2,50,0,,

K,3,400,0,,

K,4,450,0,,

K,5,800,0,,

K,6,850,0,,

K,7,1200,0,,

K,8,1250,0,,

K,9,0,15,,

K,10,50,15,,

K,11,400,15,,

K,12,450,15,,

K,13,800,15,,

K,14,850,15,,

K,15,1200,15,,

K,16,1250,15,,

K,17,0,135,,

K,18,50,135,,

K,19,400,135,,

K,20,450,135,,

K,21,800,135,,

K,22,850,135,,

K,23,1200,135,,

K,24,1250,135,,

K,25,0,150,,

K,26,50,150,,

K,27,400,150,,

K,28,450,150,,

K,29,800,150,,

K,30,850,150,,

K,31,1200,150,,

K,32,1250,150,,

## APÊNDICE B

Comandos APDL utilizados na criação da geometria do modelo paramétrico, no programa de elementos finitos *ANSYS® Academic Student 2022 R1*:

LSTR, 1, 2  
LSTR, 2, 10  
LSTR, 10, 9  
LSTR, 9, 1  
LSTR, 9, 17  
LSTR, 17, 18  
LSTR, 10, 18  
LSTR, 18, 26  
LSTR, 26, 25  
LSTR, 25, 17  
LSTR, 2, 3  
LSTR, 10, 11  
LSTR, 18, 19  
LSTR, 26, 27  
LSTR, 3, 11  
LSTR, 11, 19  
LSTR, 19, 27  
LSTR, 27, 28  
LSTR, 19, 20  
LSTR, 20, 28  
LSTR, 20, 12  
LSTR, 12, 11  
LSTR, 3, 4  
LSTR, 4, 12  
LSTR, 4, 5  
LSTR, 12, 13  
LSTR, 20, 21  
LSTR, 28, 29  
LSTR, 29, 21

---

LSTR,	21,	13
LSTR,	13,	5
LSTR,	5,	6
LSTR,	13,	14
LSTR,	14,	6
LSTR,	14,	22
LSTR,	22,	21
LSTR,	29,	30
LSTR,	30,	22
LSTR,	6,	7
LSTR,	14,	15
LSTR,	22,	23
LSTR,	30,	31
LSTR,	31,	23
LSTR,	23,	15
LSTR,	15,	7
LSTR,	7,	8
LSTR,	8,	16
LSTR,	16,	15
LSTR,	16,	24
LSTR,	24,	23
LSTR,	31,	32
LSTR,	32,	24