



DETERMINAÇÃO DO EFEITO DA PROTEÇÃO EM ELEMENTOS CONSTRUTIVOS DE MADEIRA SUBMETIDOS À AÇÃO DO FOGO

CRISTOFE SAMORINHA FERNANDES

outubro de 2022

DETERMINAÇÃO DO EFEITO DA PROTEÇÃO EM ELEMENTOS CONSTRUTIVOS DE MADEIRA SUBMETIDOS À AÇÃO DO FOGO

Cristofe Samorinha Fernandes

1170490

2022

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica



DETERMINAÇÃO DO EFEITO DA PROTEÇÃO EM ELEMENTOS CONSTRUTIVOS DE MADEIRA SUBMETIDOS À AÇÃO DO FOGO

Cristofe Samorinha Fernandes

1170490

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.

2022

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica



JÚRI

Presidente

Doutor Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho

Professor adjunto, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Orientador

Doutora Elza Maria Morais Fonseca

Professor coordenador, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Arguente

Doutor Paulo Alexandre Gonçalves Piloto

Professor coordenador, Instituto Politécnico de Bragança

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer à Professora Doutora Elza Maria Morais Fonseca, alguém a quem tenho toda a admiração, por toda a orientação prestada. A disponibilidade, a colaboração e a partilha imensa de conhecimentos foram agentes fundamentais no desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço aos meus pais, Paula e António e aos meus avós, Leonor e Manuel, pelas lições e bons valores transmitidos, pela inspiração que são na sua dedicação e por proporcionarem todas as condições necessárias para o sucesso.

Ao meu irmão, Kevin Fernandes e à minha cunhada, Ana Araújo, pelos bons conselhos, momentos felizes e por serem uma inspiração.

À minha namorada, Inês Neves, de uma forma especial, por todo o carinho e ajuda partilhados ao longo desta jornada. Obrigado por todo o suporte e por me encorajar a atingir os meus objetivos.

Por fim, quero agradecer aos meus amigos e colegas de curso pelo companheirismo e apoio que me foi dado ao longo destes anos de amizade.

PALAVRAS-CHAVE

Madeira; gesso; fogo; Eurocódigos; elementos finitos.

RESUMO

Há vários séculos que a madeira, tal como a história indica, continua a ter um lugar de destaque na engenharia e na construção como recurso disponível. A sua aplicação na construção é regulamentada através da exigência de classificação de incêndio. Esta classificação de incêndio baseia-se em testes ao fogo, ou seja, na resistência que os elementos construtivos apresentam quando submetidos na presença de fogo. É perceptível que as propriedades da madeira variam em função de fatores como a temperatura, a humidade, a espécie, entre outros variáveis. Na situação da madeira exposta a uma ação de incêndio, as propriedades degradam-se com o aumento da temperatura. Essa degradação leva à carbonização da madeira, diminuindo assim a sua secção resistente. Com o recurso a testes experimentais, modelos analíticos e numéricos é possível avaliar o comportamento da madeira sob ação do fogo, determinar a espessura da camada carbonizada e avaliar a secção resistente remanescente para determinação da sua capacidade. Com a validação de modelos a partir de testes experimentais realizados anteriormente, a aproximação pelo método de elementos finitos constitui uma boa solução para o desenvolvimento de estudos. Assim, esta dissertação apresenta um modelo de validação, desenvolvido com a utilização de elementos finitos, constituído por vigas de madeira com uma placa de gesso de cada lado. A validação desse modelo é feita por comparação de resultados experimentais, relativos ao campo de temperaturas em pontos de controlo e na progressão da carbonização, em testes à escala real realizados por outros autores. O campo de temperaturas na face não exposta e a secção residual resultante da carbonização da madeira, são dois indicadores fundamentais para a classificação do elemento construtivo sob a ação do fogo. Posteriormente, desenvolveram-se um total de doze modelos numéricos, em que se variou a espessura da camada protetora de gesso, bem como as dimensões da secção transversal das vigas de madeira. A aplicação do critério de isolamento preconizado pela norma EN1363-1 permitiu

perceber que o aumento da área correspondente à secção transversal das vigas não promove uma alteração significativa na resistência ao fogo do modelo de acordo com os resultados para o critério de isolamento, contudo é visível um aumento considerável na secção residual para a capacidade de carga. Indubitavelmente, a espessura da camada protetora de gesso desempenha um papel importante na resistência do modelo ao fogo, considerando o critério de isolamento. O mesmo se verifica na secção residual responsável pela capacidade de carga, para o instante de tempo de 60 minutos.

KEYWORDS

Wood, gypsum, fire, Eurocode, finite elements

ABSTRACT

For centuries, wood, as history indicates, has a prominent place in engineering and construction as an available resource. Its use in construction is regulated according to a fire rating that is based on fire tests, more precisely, on the resistance that the constructive elements present when submitted to fire. Wood properties vary depending on factors such as temperature, humidity, species, among other factors. And, in case of fire, these properties are degraded due to high temperatures, leading to the char layer of the wood and, consequently, the cross-section reduction. Applying experimental tests, analytical and numerical models, it is possible to evaluate the behavior of wood under the fire action, determine the thickness of the char layer and evaluate the remaining cross-section to obtain maximum fire resistance. With the validation of numerical models from previous experimental tests, the approximation by the finite element method seems to be a good solution for the study development. This thesis presents a validation model, developed with finite elements, with timber studs and a gypsum board on each side. And for its validation, the results of temperature evolution at specific points and the char layer formation were compared with experimental tests carried out in a full-scale furnace by other authors. The temperature field on the unexposed side and the resulting residual cross-section from the wood char layer are two fundamental indicators for the classifying these constructive elements under fire. A total of twelve numerical models were developed, varying the thickness of the protective gypsum layer and the dimensions of the timber stud cross-section. The application of the insulation criterion according to EN1363-1 showed that the increase in the area corresponding to the cross-section of the studs does not promote a significant change in the fire resistance of the model. However, there is a considerable increase in the residual cross-section for the load capacity. Undoubtedly, the thickness of the protective gypsum layer plays a major role in the

fire resistance of the model, considering the insulation criterion. As well as the residual cross-section responsible for the load capacity, for the time instant of 60 minutes.

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

Lista de Abreviaturas

APDL	ANSYS® Parametric Design Language
DL	Decreto Lei
EN	<i>European Standard</i>
GL	<i>Glulam</i> – Madeira Lamelada Colada
ISEP	Instituto Superior de Engenharia do Porto
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
MEF	Método de Elementos Finitos
MLC	Madeira Laminada Colada
SCIE	Segurança Contra Incêndios em Edifícios
TGA	Análise Termogravimétrica

Lista de Unidades

ft	Pé
g	Gramas
°C	Grau Celsius
J	Joule
K	Kelvin
lb	Libra Internacional
m	Metro
N	Newton
Pa	Pascal
min	Minuto
s	Segundo
W	Watt

Lista de Símbolos

A	Área
D	Diâmetro
F	Força
C_p	Calor específico
h_c	Coefficiente de transferência de calor por convecção
h_r	Coefficiente de transferência de calor por radiação
L	Comprimento
λ	Condutibilidade térmica
σ	Constante de Stefan-Boltzman
α	Difusibilidade térmica
ε	Emissividade
ε_s	Emissividade da superfície emissora
q''	Fluxo de calor
∇T	Gradiente térmico
ρ	Massa volúmica
%	Porcentagem
q	Potência calorífica
r	Raio
T	Temperatura
ω	Teor de humidade médio
t	Tempo
V	Volume

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Três principais eixos na madeira em relação ao crescimento dos anéis (Adaptado [7])	10
Figura 2 - Relação entre temperatura e massa volúmica nas classes de madeira lamelada GL20h, GL24h, GL32h	21
Figura 3 - Calor específico da madeira e carvão em função da temperatura [kJ/Kg·K][1]	23
Figura 4 - Condutividade térmica da madeira e da camada carbonizada em função da temperatura [W/m·K] [1]	24
Figura 5 - Massa volúmica do gesso tipo A e F em função da temperatura [kg/m ³]	26
Figura 6 - Calor específico do gesso tipo A e F em função da temperatura	27
Figura 7 - Condutividade térmica do gesso tipo A e F em função da temperatura [W/m·°C]	28
Figura 8 - Massa volúmica do ar em função da temperatura [kg/m ³]	30
Figura 9 - Calor específico do ar em função da temperatura [kJ/Kg·K]	31
Figura 10 - Condutividade térmica do ar em função da temperatura [W/m·K]	32
Figura 11 - Condução através de um sólido ou fluido estacionário [42]	35
Figura 12 - Condução mono dimensional [42]	36
Figura 13 - Convecção forçada – desenvolvimento de camada limite (Adaptado [42]).....	38
Figura 14 - Curva de incêndio ISO 834 [33]	39
Figura 15 - Critérios de resistência ao fogo (Adaptado [50]).....	42
Figura 16 - Integridade, estanqueidade e isolamento (Adaptado [50])	42
Figura 17 - Modelo geométrico e pontos em análise.....	50
Figura 18 - Curva de fogo utilizada e resultados de temperatura para os pontos A, F e G	51
Figura 19 - Progressão da carbonização da madeira no ensaio 6 [5]	52
Figura 20 - Representação esquemática do elemento PLANE55 de a) quatro nós e b) três nós (Adaptado [55]).....	57
Figura 21 - Representação esquemática do elemento SURF151 (Adaptado [55])	58
Figura 22 - Representação do modelo utilizado sem malha de ar	59
Figura 23 - Representação do modelo utilizado no modelo com malha de ar.....	59
Figura 24 - Condições de fronteira admitidas no modelo base sem malha de ar	60

Figura 25 - Condições de fronteira admitidas no modelo base com malha de ar	61
Figura 26 - Curva de fogo e resultados de temperatura para os pontos A, F e G do modelo sem malha de ar	62
Figura 27 - Curva de fogo e resultados de temperatura para os pontos A, F e G do modelo com malha de ar	63
Figura 28 - Comparação da evolução da carbonização com o modelo sem malha de ar	64
Figura 29 - Comparação da evolução da carbonização com o modelo com malha de ar	65
Figura 30 - Modelo geométrico geral e pontos em análise	69
Figura 31 – Resultados de temperatura para os pontos A, F e G do modelo [89×38+16].....	74
Figura 32 – Resultados de temperatura para os pontos A, F e G do modelo [89×76+16]	74
Figura 33 – Resultados de temperatura para os pontos A, F e G do modelo [89×38+32]	74
Figura 34 – Resultados de temperatura para os pontos A, F e G do modelo [89×76+32]	74
Figura 35 – Resultados de temperatura para os pontos A, F e G do modelo [115×38+16]	75
Figura 36 – Resultados de temperatura para os pontos A, F e G do modelo [115×76+16]	75
Figura 37 – Resultados de temperatura para os pontos A, F e G do modelo [115×38+32]	75
Figura 38 – Resultados de temperatura para os pontos A, F e G do modelo [115×76+32]	75
Figura 39 – Resultados de temperatura para os pontos A, F e G do modelo [140×38+16]	76
Figura 40 – Resultados de temperatura para os pontos A, F e G do modelo [140×76+16]	76
Figura 41 – Resultados de temperatura para os pontos A, F e G do modelo [140×38+32]	76
Figura 42 – Resultados de temperatura para os pontos A, F e G do modelo [140×76+32]	76
Figura 43 - Campo de temperatura na face não exposta para o modelo [89x38+16].....	81
Figura 44 - Campo de temperatura na face não exposta para o modelo [89x76+16].....	82
Figura 45 - Campo de temperatura na face não exposta para o modelo [115x38+16].....	82
Figura 46 - Campo de temperatura na face não exposta para o modelo [115x76+16].....	83
Figura 47 - Campo de temperatura na face não exposta para o modelo [140x38+16].....	83
Figura 48 - Campo de temperatura na face não exposta para o modelo [140x76+16].....	84
Figura 49 - Posição geométrica dos pontos que definem o modelo	106

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Quadro resumo de análise qualitativa e quantitativa dos fatores que afetam a taxa de carbonização. (Adaptado [25]).....	13
Tabela 2 - Coeficientes da massa volúmica da madeira.....	20
Tabela 3 - Massa volúmica (GL20H, GL24H, GL32H) em função da temperatura.....	21
Tabela 4 - Calor específico da madeira e carvão em função da temperatura [kJ/kg·K] [1].....	22
Tabela 5 - Condutividade térmica da madeira e da camada carbonizada em função da temperatura [W/m·K] [1].....	24
Tabela 6 - Massa volúmica do gesso tipo A e F em função da temperatura [kg/m ³] [40].....	25
Tabela 7 - Calor específico do gesso tipo A e F em função da temperatura [kJ/kg·K].....	27
Tabela 8 - Condutividade térmica do gesso tipo A e F em função da temperatura [W/m·°C].....	28
Tabela 9 - Massa volúmica do ar em função da temperatura [41].....	29
Tabela 10 - Calor específico do ar em função da temperatura [kJ/kg·K] [41].....	30
Tabela 11 - Condutividade térmica do ar em função da temperatura [W/m·K] [41].....	31
Tabela 12 – Valores de velocidades de carbonização para cada tipo de madeira [1].....	41
Tabela 13 – Classificação para elementos ou partes de obras sem funções de suporte de carga [32].....	45
Tabela 14 - Ensaio de resistência ao fogo [5].....	50
Tabela 15 - Secção residual do modelo numérico validado.....	66
Tabela 16 - Dimensões dos parâmetros geométricos em estudo.....	70
Tabela 17 - Evolução térmica dos modelos do tipo [89×W+16].....	72
Tabela 18 - Evolução térmica dos modelos do tipo [89×W+32].....	73
Tabela 19 - Progressão da carbonização para os modelos do tipo [89×W+T _g].....	77
Tabela 20 - Progressão da carbonização para os modelos do tipo [115×W+T _g].....	78
Tabela 21 - Progressão da carbonização para os modelos do tipo [140×W+T _g].....	79
Tabela 22 - Resistência ao fogo dos modelos em estudo.....	84
Tabela 23 - Secção residual dos modelos submetidos à ação do fogo nos instantes de 40, 60, 90 e 120 minutos.....	86
Tabela 24 - Evolução térmica do modelo [89×38+16] considerando cavidades adiabáticas.....	103

Tabela 25 - Código APDL para a curva de incêndio padrão descrita pela norma ISO834 [16], para a duração de 60 e 240 minutos	104
Tabela 26 - Evolução térmica dos modelos [89x38+16] com e sem ar nas cavidades	105
Tabela 27 - Coordenadas dos pontos dos modelos analisados	106
Tabela 28 - Coordenadas dos pontos dos modelos analisados, (cont.)	107
Tabela 29 - Evolução térmica dos modelos do tipo [115xW+16]	108
Tabela 30 - Evolução térmica dos modelos do tipo [115xW+32]	109
Tabela 31 - Evolução térmica dos modelos do tipo [140xW+16]	110
Tabela 32 - Evolução térmica dos modelos do tipo [140xW+32]	111

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	3
1.1	Motivação	3
1.2	Objetivos	4
1.3	Metodologia	4
1.4	Descrição dos capítulos	5
2	ESTADO DA ARTE	9
2.1	Materiais	9
2.1.1	Madeira	9
2.1.2	Gesso	10
2.2	Fogo em elementos de construção	11
2.3	Testes experimentais	12
2.4	Simulações computacionais	14
2.5	Regulamentação aplicável	15
3	PROPRIEDADES DOS MATERIAIS	19
3.1	Propriedades térmicas da madeira	19
3.1.1	Massa volúmica	19
3.1.2	Calor específico	22
3.1.3	Condutividade térmica	23
3.2	Propriedades térmicas do gesso	25
3.2.1	Massa volúmica	25
3.2.2	Calor específico	26
3.2.3	Condutividade térmica	28

3.3	Propriedades do ar	29
3.3.1	Massa volúmica	29
3.3.2	Calor específico	30
3.3.3	Condutividade térmica	31
4	TRANSFERÊNCIA DE CALOR	35
4.1	Modos de transferência de calor	35
4.1.1	Condução	35
4.1.2	Convecção	37
4.1.3	Radiação	38
4.2	Curvas de incêndio	39
4.2.1	Curva de incêndio padrão ISO 834	39
4.3	Carbonização	40
4.4	Resistência ao fogo	41
4.4.1	Critérios de Resistência ao Fogo	41
4.4.1.1	Capacidade de carga	42
4.4.1.2	Isolamento	44
4.4.1.3	Integridade	45
4.4.2	Classificação de elementos de construção ao fogo	45
5	MODELO DE VALIDAÇÃO NA RESISTÊNCIA AO FOGO	49
5.1	Modelo experimental	49
5.2	Modelos numéricos desenvolvidos	52
5.2.1	Formulação de elementos finitos	53
5.2.2	Elementos finitos e malhas	57
5.2.2.1	Condições fronteira	60
5.3	Validação dos resultados	61
5.3.1	Temperaturas	62
5.3.2	Carbonização	64

5.3.3	Secção residual.....	65
6	NOVOS MODELOS PARAMÉTRICOS EM ESTUDO	69
6.1	Modelos paramétricos em estudo.....	69
6.2	Modelo de elementos finitos.....	70
6.2.1	Malhas e condições fronteira.....	70
6.3	Resultados.....	71
6.3.1	Temperaturas.....	71
6.3.2	Carbonização.....	76
6.3.3	Resistência ao fogo.....	80
6.3.3.1	Crítério de isolamento.....	80
6.3.3.2	Secção residual.....	85
6.4	Discussão dos resultados.....	86
7	CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS	91
7.1	Conclusões.....	91
7.2	Propostas de trabalhos futuros.....	92
8	BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO.....	97
9	ANEXOS.....	103
9.1	Anexo 1.....	103
9.2	Anexo 2.....	104
9.3	Anexo 3.....	105
9.4	Anexo 4.....	106
9.5	Anexo 5.....	108

INTRODUÇÃO

- 1.1 Motivação
- 1.2 Objetivos
- 1.3 Metodologia
- 1.4 Descrição dos capítulos

1 INTRODUÇÃO

1.1 Motivação

Os materiais utilizados, em particular a madeira, são uma solução ecológica na construção e no projeto de engenharia. Este material é bastante competitivo face a outro tipo de materiais, não apenas por proporcionar um isolamento térmico e acústico muito favorável, mas também por ser um recurso renovável, com um processo de transformação favorável e aplicação ecológica.

A utilização da madeira na construção é auxiliada e regulamentada com recurso a normas europeias, baseadas em estudos desenvolvidos ao longo dos anos. Na maioria dos estudos, os métodos utilizados para o dimensionamento de estruturas são baseados em pressupostos e em equações simplificadas, podendo em alguns casos ser baseados em métodos experimentais, realizados em laboratório. O processo de fabrico e/ou transformação da madeira, bem como as variações nas propriedades da madeira, são alguns dos fatores que influenciam os cálculos para o dimensionamento. Assim, em função da massa volúmica, as madeiras são denominadas por resinosas (*softwood*) ou folhosas (*hardwood*). Com base na variação da massa volúmica da madeira e nas características diferentes do material de proteção, a evolução da carbonização desenvolvida nos elementos estruturais sujeitos ao fogo será distinta. O recurso a modelos numéricos computacionais para a avaliação do efeito do revestimento em elementos construtivos de madeira submetidos a ação do fogo, poderá tornar-se desta forma, uma metodologia avançada de cálculo e rigor para o dimensionamento.

1.2 Objetivos

Os principais objetivos do presente estudo são:

- Definir modelos construtivos em madeira (elementos não portantes) constituídos por montagem entre vigas de madeira maciça, protegidos com placas de gesso, de acordo com as regras do Eurocódigo 5 [1, 2];
- Avaliar o comportamento térmico dos elementos construtivos expostos à ação do fogo de acordo com o Eurocódigo 1 [3, 4];
- Validar o modelo numérico a propor no presente estudo, com o modelo desenvolvido pelos autores Takeda e Mehaffley [5];
- Desenvolvimento de novos modelos numéricos de análise térmica em regime transiente e não-linear material, com base no método de elementos finitos e recurso à utilização do programa Ansys®;
- Avaliar a carbonização da madeira, desenvolvida em regime transiente, e determinar a seção residual dos elementos construtivos em análise.

1.3 Metodologia

Para atingir os objetivos acima descritos, adotou-se a metodologia composta pelos seguintes pontos:

- Realização de uma pesquisa bibliográfica dando primazia aos estudos mais recentes sobre a ação do fogo, a madeira e a influência do efeito da proteção, com vista a obter conhecimento sobre o tema em estudo;
- Breve estudo das normas e Eurocódigos que regulamentam a aplicação de elementos construtivos em madeira e o seu compromisso, não só à temperatura ambiente, como também a elevadas temperaturas;
- Análise das curvas normalizadas de incêndio e transferências de calor envolvidos;
- Pesquisa bibliográfica e análise das propriedades dos materiais envolvidos e a influência da temperatura;
- Utilização de um programa de elementos finitos de elevado desempenho para análise térmica transiente não linear material;
- Estudar um modelo de teste experimental referenciado e validar o modelo numérico com base em elementos finitos a desenvolver, para o cálculo da resistência ao fogo;
- Determinação da capacidade de resistência ao fogo em novos modelos construtivos de madeira, sob influência de elementos de proteção com espessura variável.

O modelo construtivo não portante que se pretende analisar, é constituído por montagem entre vigas de madeira maciça, protegidas por placas de gesso. Após validação do modelo numérico, será efetuado um estudo paramétrico com diferentes modelos desenvolvidos, em que as variáveis de altura (H) e largura (W) da viga e espessura (T_g) da camada protetora de gesso são função de diferentes dimensões comerciais. O modelo não portante terá um lado exposto ao fogo e outro não exposto. Os resultados numéricos permitirão identificar a resistência ao fogo nos diferentes modelos, pela utilização do critério de resistência ao isolamento. Serão retiradas conclusões pela influência na alteração da largura e altura da viga de madeira, bem como da espessura da placa de gesso utilizada, de acordo com o tempo de resistência ao fogo por isolamento e com a análise da seção residual em cada modelo construtivo.

1.4 Descrição dos capítulos

No desenvolvimento desta dissertação foram abordados os temas seguindo a ordem: introdução, revisão bibliográfica, propriedades térmicas dos materiais, mecanismos de transferência de calor, modelo de validação na resistência ao fogo, novos modelos paramétricos em estudo, conclusões e propostas para trabalhos futuros.

No presente capítulo, realizou-se a introdução ao tema em questão, iniciando-se pela motivação ao tema, posteriormente definiram-se os objetivos para o trabalho e a metodologia adotada para alcançar esses objetivos.

No segundo capítulo, referente à revisão bibliográfica, foi desenvolvido o estado da arte, onde se encontra a investigação científica elaborada no âmbito da resistência ao fogo, com informação recolhida a partir de livros, artigos e outros trabalhos realizados. Com a revisão bibliográfica foi feita uma aproximação aos conceitos abordados ao longo da dissertação.

Em seguida, no capítulo 3 são apresentadas as propriedades térmicas da madeira, do gesso e do ar, imprescindíveis para a realização de análises térmicas dos modelos construtivos em estudo, sujeitos à ação do fogo.

No capítulo 4, transferência de calor, foi feita uma revisão aos mecanismos transferência de calor envolvidos aquando da presença de fogo na estrutura, com as equações que regem estes fenómenos, a curva de incêndio utilizada nas simulações para introduzir o cenário de fogo. Ainda no capítulo 4, foi descrito o conceito de carbonização e apresentados os critérios de resistência ao fogo.

No capítulo 5, modelo de validação na resistência ao fogo, explica-se o método de validação do modelo numérico utilizado. Inicialmente é descrito o modelo experimental à escala real utilizado como referência para a validação do modelo

numérico desenvolvido no programa computacional *ANSYS® Academic Student 2022 R1*, posteriormente apresentam-se dois modelos numéricos a validar de acordo com a melhor aproximação ao modelo experimental. É apresentada a formulação de elementos finitos através de equações diferenciais da transferência de calor discretizadas. De seguida, são descritas as considerações utilizadas no programa, com a informação do tipo de elementos finitos e malhas selecionadas no programa, bem como, as condições fronteiras impostas nas simulações. O capítulo 5 termina com a apresentação e validação dos resultados obtidos para o campo de temperaturas em pontos localizados de acordo com o modelo experimental, da carbonização e secção residual.

No capítulo 6, após a validação do modelo apresentado no capítulo 5, são desenvolvidos e analisados novos modelos paramétricos com o intuito de estudar a influência da variação da secção transversal dos elementos de madeira e da espessura da camada protetora. Inicia-se pela apresentação de todos os modelos em estudo, seguida pela sintetização de todas as considerações efetuadas. São ainda apresentados os resultados obtidos para os campos de temperaturas em pontos de controlo, os resultados da carbonização em diferentes instantes de tempo e determinada a resistência ao fogo, através da aplicação do critério de isolamento, traduzido pelo campo de temperaturas em pontos localizados na face não exposta ao fogo, com limites impostos pelo critério e as secções residuais para determinados instantes de tempo. O capítulo 6 conclui-se com a discussão dos resultados conseguidos através da aplicação dos métodos numéricos.

No capítulo 7, conclusões e propostas de trabalhos futuros, foram apresentadas as principais conclusões para o efeito da proteção em elementos construtivos submetidos à ação do fogo, resultantes da análise e discussão dos resultados obtidos, com algumas sugestões para trabalhos futuros.

ESTADO DA ARTE

- 2.1 Materiais
- 2.2 Fogo em elementos de construção
- 2.3 Testes experimentais
- 2.4 Simulações computacionais
- 2.5 Regulamentação aplicável

2 ESTADO DA ARTE

A madeira é dos primeiros materiais utilizados pelo ser humano como um elemento construtivo, dada a sua facilidade de obtenção na natureza e o seu manuseio.

Atualmente, as estruturas de madeira são muito utilizadas na construção, tanto em edifícios privados, como públicos e comerciais. Para a sua utilização é obrigatória a certificação de resistência ao fogo, no caso de ocorrência de um incêndio. Essa certificação é efetuada sob o ponto de vista de isolamento e integridade, de acordo com o previsto na escala cronológica de temperatura para incêndios [6].

2.1 Materiais

2.1.1 Madeira

A madeira tem como principal função o suporte das árvores e é composta essencialmente por celulose e lenhina [7]. É muito versátil, contribuindo para a obtenção dos mais diversos produtos, como carvão e mobiliário [7]. Na construção distingue-se esteticamente e pelo seu impacto ambiental uma vez que é biodegradável e renovável [8]. Mas a sua biodegradabilidade contribui para uma durabilidade insuficiente pelo que produtos de madeira expostos ao meio ambiente requerem uma especial proteção à humidade e aos diferentes organismos de decomposição [8].

É um material ortotrópico [7] [9] [10]. Isto porque a sua estrutura interna revela três eixos perpendiculares (longitudinal, tangencial e radial) que, como consequência da orientação das fibras e da maneira como o diâmetro aumenta à medida que a árvore cresce, diferem nas propriedades mecânicas [9] [10].

Na Figura 1 é possível diferenciar os diferentes eixos. Sendo o eixo longitudinal (L) paralelo às fibras, o eixo radial (R) normal aos anéis de crescimento e o eixo tangencial (T) tangente aos anéis de crescimento e perpendicular às fibras.

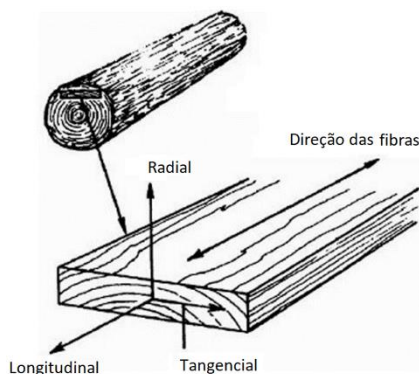


Figura 1 – Três principais eixos na madeira em relação ao crescimento dos anéis (Adaptado [7])

As madeiras podem ser divididas em dois grandes grupos, o das madeiras macias e o das madeiras duras [11]. Estes dois grupos variam na densidade e cor da madeira, sendo as madeiras macias no geral mais claras e de densidades reduzidas enquanto as madeiras duras apresentam densidades mais elevadas e cor escura [11]. Adicionalmente, as madeiras macias são mais baratas e fáceis de trabalhar [11] mas apresentam limitações na construção devido à sua baixa rigidez e resistência [12].

A madeira lamelada colada, uma das mais utilizadas em construções estruturais, é produzida a partir da madeira macia em condições de pressão e temperatura controladas. É utilizada para criar membros estruturais que são compostos por madeira lamelada colada com resina, com a fibra alinhada de forma paralela [12]. E é caracterizada por ser leve, resistente, com boa elasticidade, processamento fácil e boa durabilidade [13].

A classificação da madeira lamelada colada inicia com as letras GL, da abreviatura “Glulam” que diz respeito a “Glued laminated timber”, seguem-se dois algarismos que fazem referência ao valor da resistência à flexão e uma letra final que permite distinguir entre madeira homogénea (letra h) e madeira combinada (letra c). Quando se tem madeira lamelada colada homogénea significa que na composição está presente madeira de uma só espécie, enquanto a madeira lamelada colada combinada apresenta duas espécies distintas de madeira. A GL32h é uma madeira lamelada colada homogénea com uma resistência à flexão de 32 MPa.

2.1.2 Gesso

O gesso é um composto inorgânico [14] que contém na sua composição sulfato de cálcio di-hidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) [15]. Das etapas de obtenção do gesso é de salientar a calcinação que mediante as condições a que é realizada pode contribuir para gessos com diferentes características. Isto é, se a calcinação for via húmida o gesso obtido

será do tipo alfa, mais frágil [16], caro e predominantemente utilizado em meio hospitalar [17]. Caso a calcinação seja por via seca obter-se-á gesso tipo beta que é frequentemente utilizado na construção e economicamente mais favorável [16] [17].

O gesso apresenta diversas aplicações sendo exemplos a correção de solos salino-sódicos [18], moldes de fundição [15], fertilização dos solos em cálcio e enxofre [19] e melhoramento da agregação do solo ao permitir melhor infiltração de água [19]. Painéis de gesso são também muito utilizados na construção em paredes interiores e tetos [15] [16] porque para além de apresentarem uma boa resistência ao fogo [20] [21], são baratos, de fácil fabrico e amigos do ambiente [22]. A resistência ao fogo deve-se à sua baixa condutibilidade térmica [21] e à evaporação de água presente na placa de gesso, que ao absorver uma quantidade significativa de calor, é capaz de retardar o aumento da temperatura no sistema [17] [21].

Os painéis de gesso consistem em um núcleo de gesso poroso com uma folha de papel de cada lado, plana, resistente e de formato retangular, e possíveis aditivos. Há vários tipos de gesso, no entanto, de acordo com o Eurocódigo 5 parte 1-2 [1], os utilizados na proteção de ligações de madeira são os painéis do tipo A, H e F. Os primeiros são painéis regulares com um núcleo de gesso poroso, mas sem qualquer reforço para além do papel laminado existente na superfície, os painéis do tipo H exibem resistência à água e os painéis do tipo F, que são os considerados na presente tese, possuem um núcleo de gesso com aditivos que melhoram a coesão do núcleo a altas temperaturas. Sendo de notar que o F da sua designação se refere a “fire-resistant”, isto é, resistente ao fogo.

2.2 Fogo em elementos de construção

Segundo V. D. Thi et al. [6] em 2018, existem três critérios de análise à resistência de elementos construtivos em madeira quando submetidos à ação do fogo, denominados por: integridade, isolamento e capacidade de carga [23].

É admitida a falha da integridade do elemento, o instante a partir do qual existe inflamação do mesmo. De igual modo, a falha no isolamento do elemento determina-se quando existe a permeabilidade de fumos que possam colocar vidas em perigo [24].

Em 2018, na revisão bibliográfica realizada por Alastair I. Bartlett et al [25], o fogo traduz-se nos fenómenos de pirólise, ignição, combustão e extinção do mesmo, organizados por ordem cronológica. Alguns parâmetros característicos destes fenómenos, para a avaliação de riscos da estrutura, encontram-se bem definidos, como é por exemplo o caso do fluxo de calor necessário para a existência de ignição, de cerca $12 \text{ kW/m}^2 \pm 2 \text{ kW/m}^2$ [25], bem como a energia libertada durante a combustão $17,5 \text{ MJ/kg} \pm 2,5 \text{ MJ/kg}$ [25]. No entanto, o mesmo não se verifica no

fenómeno de extinção, em que, não estando bem estudado e definido, apresenta uma taxa de massa ardida por área compreendida entre 2,5 g/m²·s a 5 g/m²·s [25].

2.3 Testes experimentais

Ainda em 2018, segundo a revisão bibliográfica realizada por Alastair I. Bartlett et al [25], a resistência ao fogo apresenta uma taxa de carbonização média ao longo da duração dos testes, que varia em função das propriedades do material, em particular a massa volúmica e o teor de humidade, podendo estes fatores provocar uma variação de 18%. Outros fenómenos, como por exemplo a delaminação da madeira, manifestam efeitos na taxa de carbonização da madeira, que dada a complexidade na sua previsão, levaram os autores a caracterizar alguns fatores como sendo estocásticos. Concluíram assim, que o principal fator influenciador do comportamento da madeira sob a ação do fogo é a área exposta, uma vez que é a principal responsável pelo fluxo de calor incidente na estrutura. De notar que os resultados obtidos se basearam em numerosos testes realizados em fornos para ensaio de modelos à escala real, permitindo assim a análise e o estudo na quantificação de diversos fatores influenciadores, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 – Quadro resumo de análise qualitativa e quantitativa dos fatores que afetam a taxa de carbonização.
(Adaptado [25])

Parâmetro	Observação	Intervalo Típico	Impacto Percentual na Taxa de Carbonização
Massa volúmica	Uma massa volúmica superior, exige uma quantidade energia por unidade de volume superior	400kg/m ³ a 600kg/m ³	14%
Teor de humidade	É necessária energia para provocar a evaporação da humidade absorvida	10% a 20%	18%
Permeabilidade	O aumento de permeabilidade permite um aumento do fluxo de voláteis	-----	Dados Insuficientes
Direção da face exposta	Afeta os efeitos da convecção, como o fluxo de gases, o comportamento da chama e a delaminação	Parede, chão ou teto	11% em alguns testes (Sem concordância entre testes)
Dimensão da amostra	Afeta o tamanho da chama, e consequentemente a troca de calor	2m a 20m	Indiferente
Proteção	Reduz a taxa de carbonização, dado reduzir a temperatura sofrida pela madeira. Contudo, aquando do seu colapso, dá-se uma aceleração na taxa de carbonização.	Maioritariamente perpendicular	88%
Fluxo de Calor	Fluxos de calor superiores fornecem mais energia para iniciar as reações de pirólises	30kW/m ² (ISO 834) a 270kW/m ²	800%
Concentração de Oxigénio	O aumento da concentração de oxigénio promove uma maior oxidação do carvão, permitindo mais combustão de gases de pirólise que consequentemente aumentam o tamanho de chama e o efeito da radiação.	4% a 21%	50%

2.4 Simulações computacionais

Em 1999, P. Clancy [26], desenvolveu o modelo ADIDRAS. Este avalia a difusão térmica com base na análise de diferenças finitas com direção implícita alternada e recorre ao método da radiação discreta de modo a analisar a transferência de calor radiante através do fumo e cavidades de diversos formatos. O modelo descrito é capaz de prever com precisão o comportamento térmico de sistemas com placas de gesso com estrutura de madeira quando expostos a condições padrão de fogo.

Bevan H Jones [27], em 2001, utilizando o SAFIR2001, um programa de elementos finitos desenvolvido na universidade de Liège na Bélgica, obteve previsões do comportamento térmico de diferentes modelos com placas de gesso quando expostos a vários fogos fora do padrão e comparou-as com vários testes em fornos à escala real e piloto. Os modelos aqui testados diferem no material das vigas, sendo com vigas de madeira ou de aço e ambos apresentam uma placa de gesso de cada lado. O autor conclui que as previsões de temperatura obtidas a partir do programa em questão foram razoáveis para fogos moderados, mas fracas no caso de fogos mais fortes.

Em 2018, Van Diem Thi et al [6], apresentaram uma metodologia numérica para simular a resistência ao fogo de sistemas de parede à base de madeira em escala real expostos ao fogo. A principal contribuição deste trabalho, no que diz respeito à literatura existente, é a aplicação de um perfil de madeira transversal na parte central dos perfis verticais, onde a pirólise da madeira foi modelada explicitamente no sistema de equações de balanço de energia. Para a introdução desse efeito na análise térmica, os autores implementaram, com sucesso, uma sub-rotina denominada UMATHT no código de elementos finitos ABAQUS®. Com base em observações experimentais, os autores tiveram em consideração a queda das placas de gesso expostas ao fogo no modelo de elementos finitos. Na análise de resultados os autores concluíram que para se obter uma boa aproximação aos ensaios experimentais sob o ponto de vista da integridade da estrutura, é fundamental considerar as fissuras e consequentes desprendimento de placas de gesso durante as simulações.

Em 2021, H. Kang [12], recorre ao modelo tridimensional de elementos finitos, com a utilização do Abaqus/CAE para simular o comportamento de placas de gesso com paredes estruturais de madeira no ambiente e quando sujeitas ao fogo de modo a prever a falha de adequação estrutural nessas condições. De seguida, os resultados foram comparados com testes experimentais de exposição unilateral ou bilateral ao fogo em condições padrão. Dessa comparação percebeu-se que o modelo foi capaz de prever o comportamento das paredes submetidas ao fogo unilateral e ao fogo bilateral com bastante precisão, contudo, nos modelos de exposição bilateral, os resultados da temperatura das vigas internas não apresentaram uma aproximação tão favorável quanto os das vigas externas.

2.5 Regulamentação aplicável

Elementos construtivos em madeira revestidos a gesso, como o caso de divisórias, são vulgarmente classificadas como uma construção leve e rápida. Estes tipos de elementos estão sujeitos à certificação na qual consta a classificação da resistência ao fogo dos materiais sob o ponto de vista da sua integridade e isolamento.

Na Europa, é possível obter esta certificação, cumprindo com os requisitos apresentados nas normas regulamentares:

- Eurocódigo 1 1-1 [3];
- Eurocódigo 1 1-2 [4];
- Eurocódigo 5 1-1 [2];
- Eurocódigo 5 1-2 [1];
- *Decreto-Lei nº 220/2008* [28];
- CEN, *EN 1363-1* [23];
- CEN, *EN 1365-1* [29];
- CEN, *EN 1364-1* [30];
- CEN, *EN 13501-2* [31];
- *Decreto-Lei nº123/2019* [32];
- Curva de fogo padrão ISO 834-1 [33].

PROPRIEDADES DOS MATERIAIS

- 3.1 Propriedades térmicas da madeira
- 3.2 Propriedades térmicas do gesso
- 3.3 Propriedades do ar

3 PROPRIEDADES DOS MATERIAIS

Os materiais utilizados nos modelos construtivos (tipo portantes) em estudo são a madeira, cujas propriedades diferem entre os grupos e as espécies. O gesso também será utilizado como proteção na estrutura em madeira submetida ao fogo. Serão ainda apresentadas as propriedades do ar, por tratar-se do constituinte do meio presente nas cavidades dos modelos construtivos em estudo. Neste capítulo, são abordadas as principais características destes materiais e as propriedades mais importantes para o estudo.

As propriedades abordadas são as seguintes:

- Massa volúmica – que determina a massa por unidade de volume;
- Calor específico – quantifica a energia necessária para aumentar 1 grau de temperatura por unidade de massa;
- Condutividade térmica – indica o rácio de calor que é conduzido num determinado intervalo de tempo através de um determinado material [34].

3.1 Propriedades térmicas da madeira

3.1.1 Massa volúmica

A massa volúmica expressa-se como a relação entre a medida de massa por unidade de volume, normalmente traduzida pelas unidades de grandeza g/cm^3 , kg/m^3 ou lbs/ft^3 .

Para o caso da madeira, a massa volúmica pode ser considerada como aparente, isto é, num volume de madeira a considerar, existem poros com um determinado volume que não é deduzido. É uma propriedade influenciada em função de fatores como a composição química, da estrutura da madeira e do teor de humidade, sendo que este último não influencia só a massa, como também, o volume da amostra [35].

É também importante referir que existe uma relação entre a massa volúmica e a resistência, na medida em que, considera-se as madeiras de massa volúmica superior em geral mais resistentes. No entanto, nesta correlação terá de se considerar a grande heterogeneidade e a diversidade morfológica de espécies [36].

Os coeficientes de massa volúmica em função do aumento da temperatura são apresentados na Tabela 2, a que correspondem a um teor de humidade médio de 12% (ω), conforme apresentado no Eurocódigo 5 1-2 [1].

Tabela 2 - Coeficientes da massa volúmica da madeira.

Temperatura [°C]	Coeficiente
0	$1+\omega$
99	$1+\omega$
120	1
200	1
250	0,93
300	0,76
350	0,52
400	0,38
600	0,28
800	0,26
1200	0

A variação da massa volúmica em função da temperatura para os três tipos de madeira (GL20H, GL24H, GL32H) é apresentada na Tabela 3 e traduzida na Figura 2. Os valores de coeficiente de massa volúmica utilizados, foram os apresentados na Tabela 2 e tendo por base as massas volúmicas de 370 kg/m^3 , 420 kg/m^3 e 480 kg/m^3 para os tipos GL20H, GL24 e GL32H, respetivamente [37].

Tabela 3 - Massa volúmica (GL20H, GL24H, GL32H) em função da temperatura.

Temperatura [°C]	Massa Volúmica [kg/m ³]		
	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

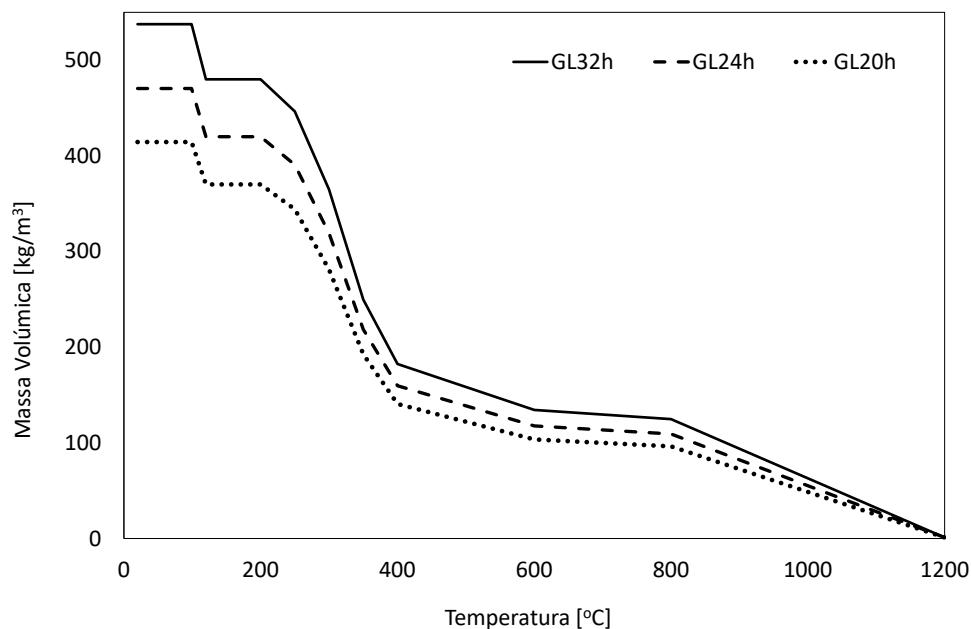


Figura 2 - Relação entre temperatura e massa volúmica nas classes de madeira lamelada GL20h, GL24h, GL32h

É possível observar através da Figura 2 que aproximadamente a partir dos 100°C, temperatura a partir da qual o conteúdo de água presente na madeira evapora, a madeira apresenta a primeira queda de massa volúmica. De notar também a perda de massa acentuada por volta dos 300°C, que de acordo com o Eurocódigo 5 1-2 [1] deve-se ao facto de ser a temperatura em que a madeira começa a carbonizar.

3.1.2 Calor específico

O calor específico define-se como a quantidade de calor necessária para fazer variar um grau de temperatura em uma unidade de massa de um determinado material. Para a madeira, o calor específico considera-se praticamente independente da massa volúmica ou da espécie em si, variando sob ação de outros fatores como o caso da temperatura ou da humidade presente na amostra [38].

Os valores de calor específico para a madeira, em função da temperatura, encontram-se descritos na Tabela 4 e representados na Figura 3, segundo o Eurocódigo 5 parte 1-2 [1].

Tabela 4 - Calor específico da madeira e carvão em função da temperatura [kJ/kg·K] [1]

Temperatura [°C]	Calor específico [kJ/kg·K]
20	1,53
99	1,77
110	13,60
120	13,50
130	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

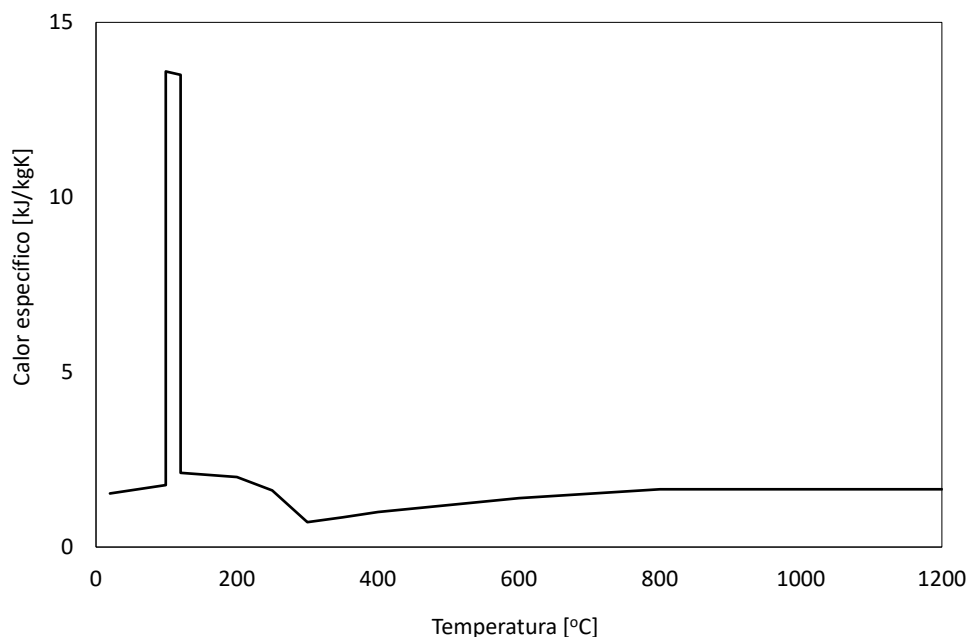


Figura 3 - Calor específico da madeira e carvão em função da temperatura [kJ/Kg·K][1]

O calor específico apresenta um pico próximo dos 100 °C, a que corresponde a libertação de água da madeira. Para os restantes valores de temperatura, o calor específico mantém-se constante.

3.1.3 Condutividade térmica

A condutividade térmica é uma propriedade medida por fluxo de calor que atravessa a espessura de um determinado material sujeito a um gradiente térmico [39].

Esta propriedade é também obtida pela consulta do Eurocódigo 5 1-2 [1], com os valores apresentados na Tabela 5, seguidos da representação na Figura 4.

Tabela 5 - Condutividade térmica da madeira e da camada carbonizada em função da temperatura [W/m·K] [1]

Temperatura [°C]	Condutividade Térmica [W/m·K]
20	0,12
200	0,15
350	0,07
500	0,09
800	0,35
1200	1,50

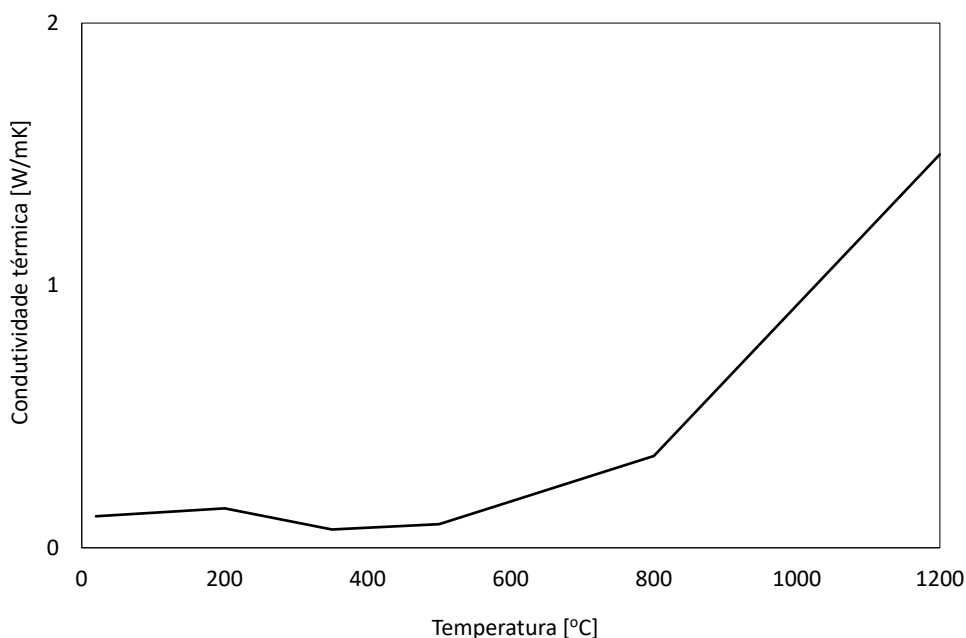


Figura 4 - Condutividade térmica da madeira e da camada carbonizada em função da temperatura [W/m·K] [1]

De acordo com a representação da Figura 4, é possível observar que a condutividade térmica na madeira aumenta com o aumento da temperatura, sendo este aumento mais acentuado a partir dos 800°C.

3.2 Propriedades térmicas do gesso

Dado o gesso ser um material poroso, e, portanto, não homogéneo, para além do facto do teor de humidade nele contido ser influenciador das suas propriedades térmicas, provoca alguma dificuldade na obtenção de dados experimentais, o que resulta em alguma ambiguidade na literatura disponível. Contudo, existe a certeza de que as propriedades do gesso serem dependentes da temperatura, com especial atenção para a condutividade térmica [21].

3.2.1 Massa volúmica

Para o caso da massa volúmica, foi desenvolvido um estudo por A. Frangi et al. [40], no Instituto Geotécnico de Engenharia de ETH em Zurique, o qual consistiu em submeter painéis de gesso do tipo A, a uma taxa de aquecimento de 20°C/min e analisar o seu comportamento. Neste estudo, a variação da massa em função da temperatura foi determinada, recorrendo à Análise Termogravimétrica (TGA). Deste modo, a TGA apresentou duas perdas de massa, sendo a primeira no intervalo de temperatura entre 100 e 170°C, apresentando 17%, e a segunda entre os 600 e os 750°C, representando 5%. Após a TGA dos gases emitidos durante as perdas de massa, verificou-se que no primeiro caso, trata-se essencialmente de água, e no segundo caso de dióxido de carbono. À temperatura ambiente, consideraram como valor de referência para o gesso tipo A 640kg/m³, e para o tipo F 889kg/m³.

Os valores da variação da massa volúmica em função da temperatura para o gesso em estudo, encontram-se descritos na Tabela 6 e representados na Figura 5.

Tabela 6 - Massa volúmica do gesso tipo A e F em função da temperatura [kg/m³] [40]

Temperatura [°C]	Massa Volúmica [kg/m ³]	
	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

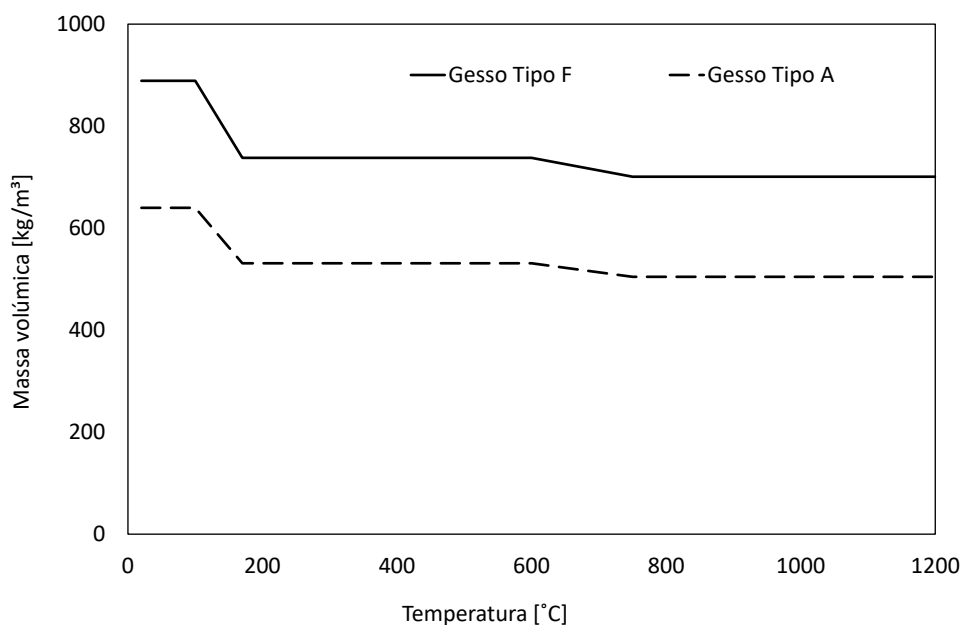


Figura 5 - Massa volúmica do gesso tipo A e F em função da temperatura [kg/m3]

3.2.2 Calor específico

O calor específico do gesso tipo A e F, de acordo com o estudo desenvolvido por I. Rahmanian e Y. Wang em 2009 [21], com valor admitido para a temperatura atmosférica de 0,950 kJ/kg°C, apresenta a mesma variação em função da temperatura. O aumento da temperatura provoca dois picos no valor do calor específico, motivados pela desidratação do gesso. A Figura 6 representa a variação do calor específico dos dois tipos de gesso, ou seja, a energia necessária para dissociar e evaporar as moléculas de água, e o transporte da água para zonas mais frias, no interior das respetivas placas.

Tabela 7 - Calor específico do gesso tipo A e F em função da temperatura [kJ/kg·K]

Temperatura [°C]	Calor específico [kJ/kg·K]	
	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

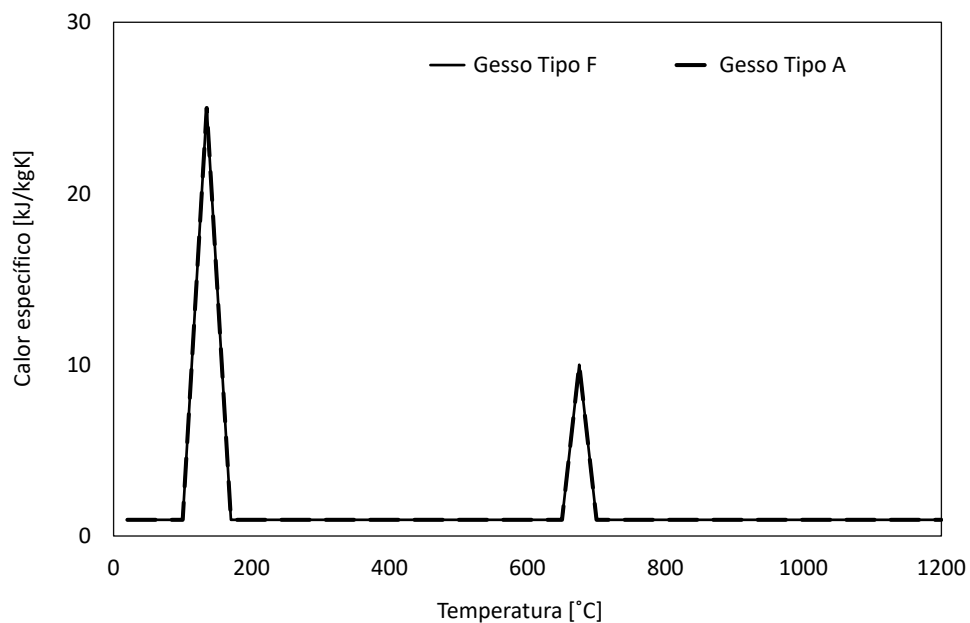


Figura 6 - Calor específico do gesso tipo A e F em função da temperatura

3.2.3 Condutividade térmica

A condutividade térmica do gesso, sendo este material não homogéneo, é afetada também pelo aumento da temperatura. Os valores descritos na Tabela 8 e apresentados na Figura 7 foram obtidos no mesmo estudo anterior, referido por Rahmanian e Y. Wang [21].

Tabela 8 - Condutividade térmica do gesso tipo A e F em função da temperatura [W/m·°C]

Temperatura [°C]	Condutividade térmica [W/m·°C]	
	Gesso tipo A	Gesso tipo F
20	0,190	0,190
95	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

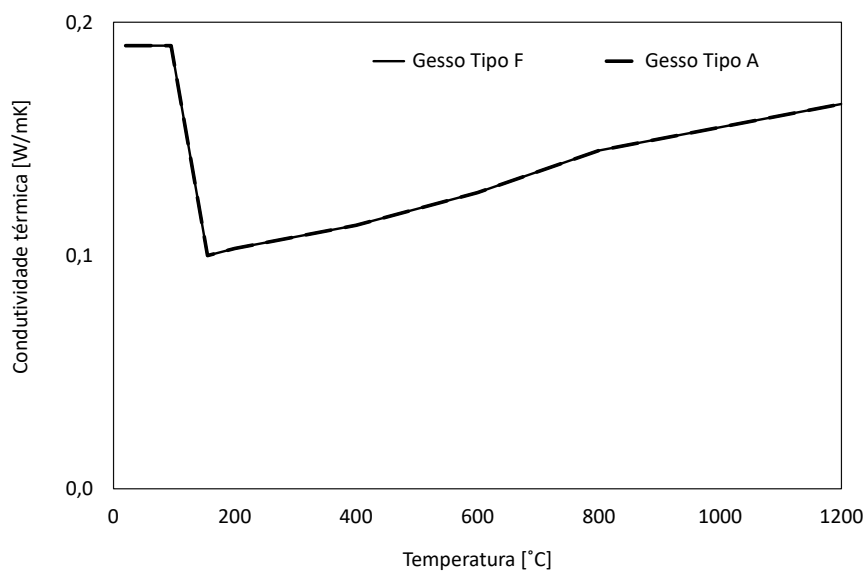


Figura 7 - Condutividade térmica do gesso tipo A e F em função da temperatura [W/m·°C]

3.3 Propriedades do ar

O ar encontra-se presente no ambiente, na aplicação de divisórias com estrutura de madeira, quando revestidas com placas de gesso, é previsível que nas cavidades entre as vigas de madeira o ar ambiente esteja presente. Neste contexto, para modelar as cavidades dos modelos na simulação numérica da estrutura sob ação do fogo é necessário conhecer as propriedades do material presente nas cavidades e qual a sua variação com o aumento de temperatura da temperatura a que estará sujeito, a fim de obter resultados o mais próximo da realidade.

Deste modo, como nos dois materiais já apresentados, são abordados neste capítulo as propriedades do ar em função da temperatura tabeladas de acordo com a diversa literatura disponível sobre transferências de calor

3.3.1 Massa volúmica

A massa volúmica do ar pode variar em função da temperatura, da humidade relativa e com a composição do ar. A sua variação entre os 20°C os 1000°C pode residir entre os 1,205 kg/m³ e os 0,277 kg/m³. Esta variação é descrita na Tabela 9 e apresentada no gráfico da Figura 8.

Tabela 9 - Massa volúmica do ar em função da temperatura [41]

Temperatura [°C]	Massa Volúmica [kg/m ³]
20	1,205
30	1,165
60	1,060
100	0,946
200	0,746
300	0,616
500	0,456
1000	0,277

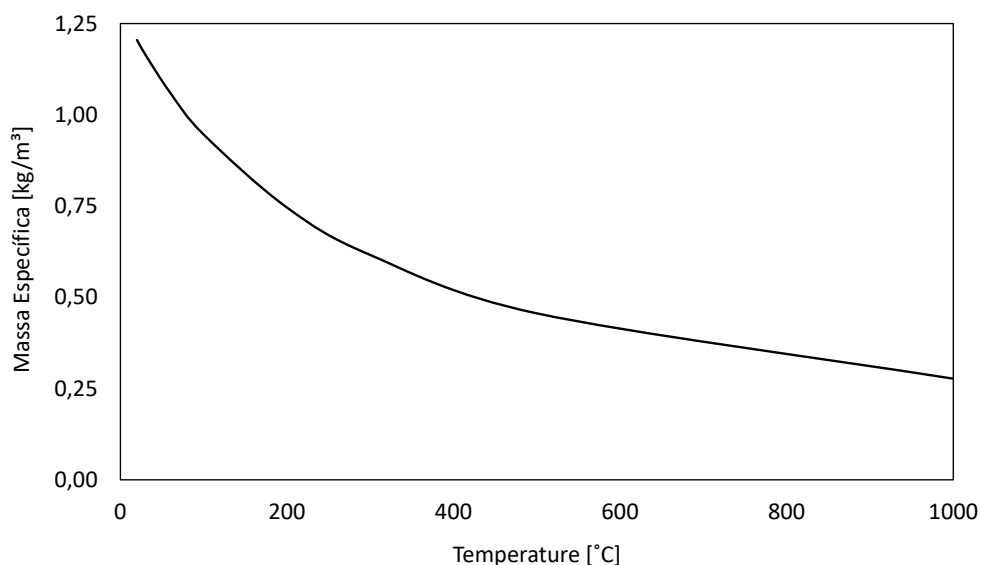


Figura 8 - Massa volúmica do ar em função da temperatura [kg/m3]

3.3.2 Calor específico

O calor específico do ar apresenta uma variação em função da temperatura pouco significativa. Para uma variação de temperatura de 20°C a 1000°C, o calor específico varia aproximadamente entre 1 kJ/kgK e os 1,2 kJ/kgK. Para uma melhor análise a variação do calor específico do ar em função da temperatura é descrito na Tabela 10 e apresentado no gráfico da Figura 9.

Tabela 10 - Calor específico do ar em função da temperatura [kJ/kg·K] [41]

Temperatura [°C]	Calor específico [kJ/kg·K]
20	1,006
30	1,006
60	1,008
100	1,011
200	1,025
300	1,045
500	1,093
1000	1,185

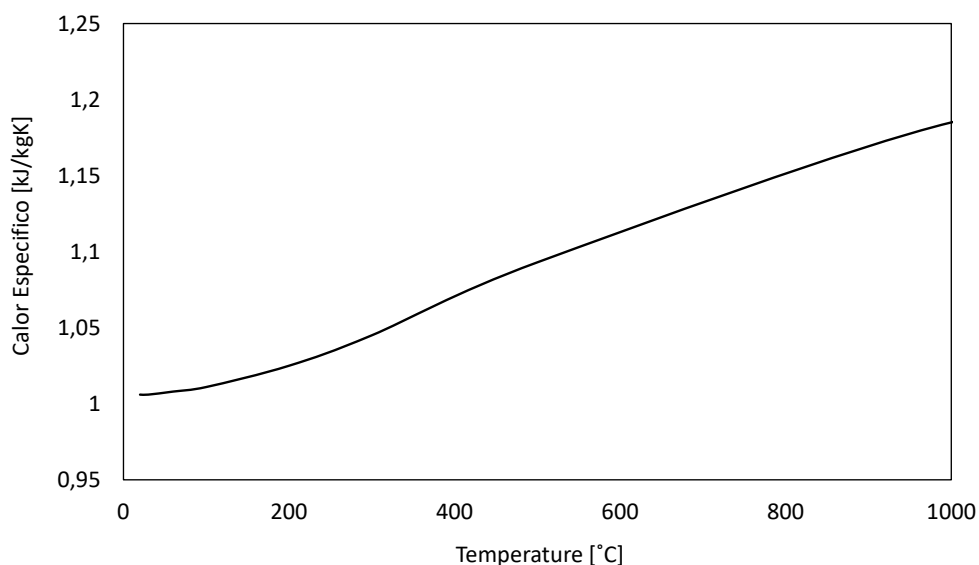


Figura 9 - Calor específico do ar em função da temperatura [kJ/Kg·K]

3.3.3 Condutividade térmica

O ar é um material por si só isolante, dado apresentar alguma resistência à passagem de calor, com valores de condutividade baixos. À semelhança do calor específico, a condutividade térmica do ar aumenta com a temperatura, com uma variação entre 0,025 W/mK e 0,075 W/mK. Estes valores são descritos na Tabela 11 e apresentados no gráfico da Figura 10.

Tabela 11 - Condutividade térmica do ar em função da temperatura [W/m·K] [41]

Temperatura [°C]	Condutividade Térmica [W/m·K]
20	0,12
200	0,15
350	0,07
500	0,09
800	0,35
1200	1,50

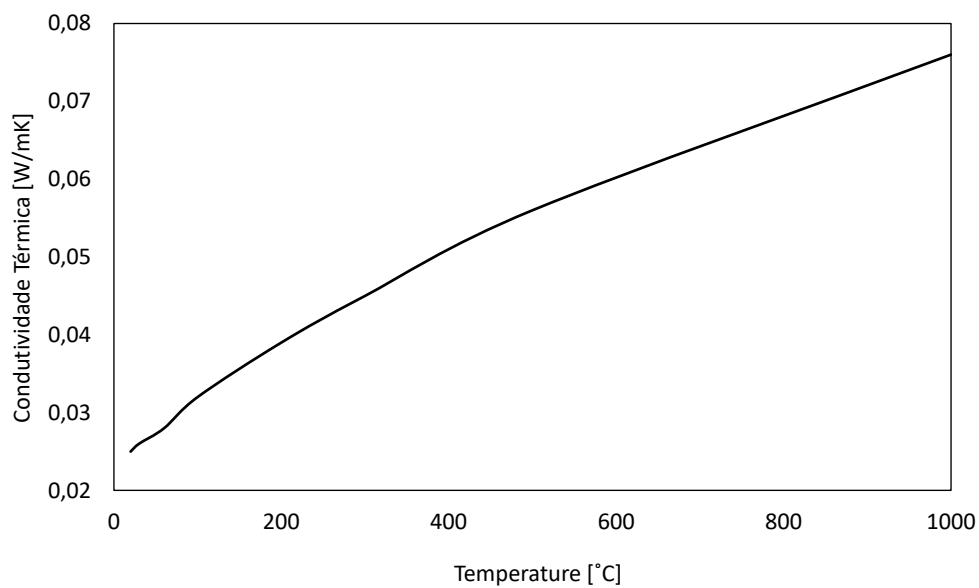


Figura 10 - Conduktividade térmica do ar em função da temperatura [W/m·K]

TRANSFERÊNCIA DE CALOR

- 4.1 Modos de transferência de calor
- 4.2 Curvas de incêndio
- 4.3 Carbonização
- 4.4 Resistência ao fogo

4 TRANFERÊNCIA DE CALOR

A transferência de calor define-se como uma energia térmica em movimento devido à existência de uma diferença espacial de temperatura. Isto é, quando duas substâncias entram em contacto a diferentes temperaturas, o fluxo de energia promove o equilíbrio térmico do sistema, ou seja, no sentido da substância que apresenta uma temperatura mais elevada, para a substância de menor temperatura. A transferência de calor pode desenvolver-se através de três diferentes modos: condução, convecção e radiação.[20]

4.1 Modos de transferência de calor

4.1.1 Condução

Condução é um modo de transferência de calor, o qual se caracteriza por ocorrer devido à existência de uma diferença de temperaturas no meio. O sentido da transferência de calor dá-se a partir de zonas de temperatura superior e, portanto, com maior energia cinética molecular, para zonas de temperatura inferior, sendo estas de energia cinética molecular inferior.

Um dos critérios presente neste modo relaciona-se com o facto de ser necessário dar-se num meio (Figura 11). A condução é um modo de transferência de calor que não faz sentido no vácuo, na medida em que, independentemente de este ser sólido ou fluido, deverá ser macroscopicamente estacionário, isto é, não existe transferência de massa durante a condução [20].

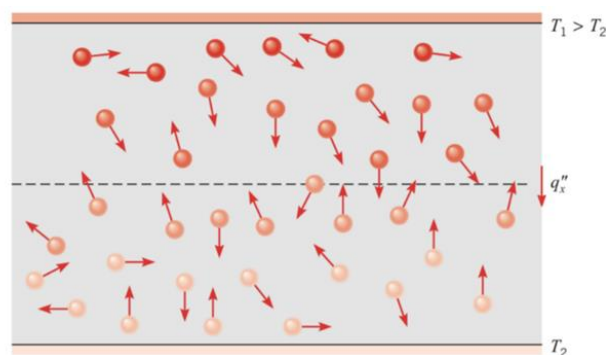


Figura 11 - Condução através de um sólido ou fluido estacionário [42]

É possível quantificar a transferência de calor por condução recorrendo à Lei de Fourier, obtida a partir de estudos experimentais desenvolvidos pelo matemático e físico Jean Fourier [43], proposta em 1822.

Fourier concluiu que o fluxo de calor resultante da condução térmica é proporcional à magnitude do gradiente de temperatura, sendo oposto em sinal, dado o fluxo de calor ter lugar no sentido contrário ao gradiente de temperatura.

Esta lei é expressa pela equação 1.

$$q'' = -\lambda \nabla T \quad (1)$$

Em que q'' é o fluxo de calor [W/m^2], λ a condutividade térmica do material [W/Mk] e ∇T o gradiente de temperatura [K/m]. [44]

Para condições unidimensionais da condução (Figura 12), o fluxo de calor é expresso de acordo com a equação 2.

$$q'' = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2)$$

Onde o gradiente de temperatura é agora expresso na direção do fluxo de calor.

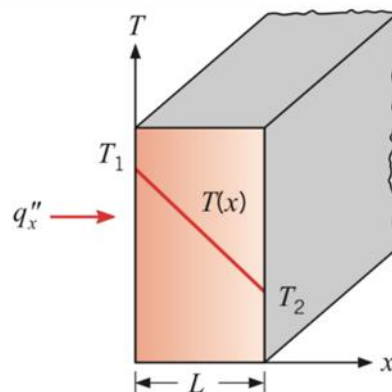


Figura 12 - Condução mono dimensional [42]

4.1.2 Convecção

A convecção é um modo de transferência de calor no qual ocorrem dois acontecimentos em simultâneo, dado conjugar o mecanismo da condução. Ou seja, apenas existe movimento molecular dentro do próprio fluido, macroscopicamente, movimento este provocado devido à diferença de temperatura existente.

Dado existir movimento macroscópico, a convecção aplica-se em fluidos, ou na interface entre fluidos e sólidos quando estes se encontram a temperaturas distintas, podendo ser denominada natural ou forçada. A distinção entre a convecção forçada e a convecção natural é feita analisando as interferências externas à movimentação do fluido. Neste caso, e para a situação de inexistência de interferência externa ao movimento do fluido, com movimento apenas por ação da diferença de temperatura, trata-se da convecção natural. Quando existe a presença de intervenientes externos à movimentação do fluido, tais como bombas, reações de queima ou ventiladores, trata-se da convecção natural [44].

Esta movimentação natural traduz-se quando um fluido entra em contacto com uma superfície quente, em que a temperatura do fluido próximo da interface irá aumentar, o que provoca um aumento do volume específico e, conseqüentemente, a diminuição da massa volúmica, este irá executar um movimento vertical ascendente, que por sua vez, o fluido mais distante da superfície quente, apresentando uma temperatura e massa volúmica inferiores irão movimentar-se na mesma direção mas sentido oposto, criando desta forma uma ciclo.[42]

O fluxo de calor por convecção, em $[W/m^2]$, é expresso pela equação 3.

$$q_c'' = h_c(T - T_\infty) \quad (3)$$

Onde h_c é o coeficiente de transferência de calor por convecção, expresso em $[W/m \cdot K]$, T a temperatura da superfície e T_∞ a temperatura do fluido.

Para a situação de convecção, consequência do escoamento entre um fluido e uma superfície sólida, o efeito da viscosidade promove o surgimento da camada limite dinâmica que se caracteriza por apresentar diferentes valores de velocidade do fluido, desde a interface dos materiais, onde a velocidade é zero, até ao topo da camada limite apresentada como velocidade livre do escoamento. Havendo a presença de um gradiente de temperaturas entre o fluido e a superfície, desenvolve-se também uma camada limite termodinâmica, que apresenta uma variação de temperatura em função da diferença das temperaturas dos dois materiais [42]. Ambas as camadas limite encontram-se representadas na Figura 13.

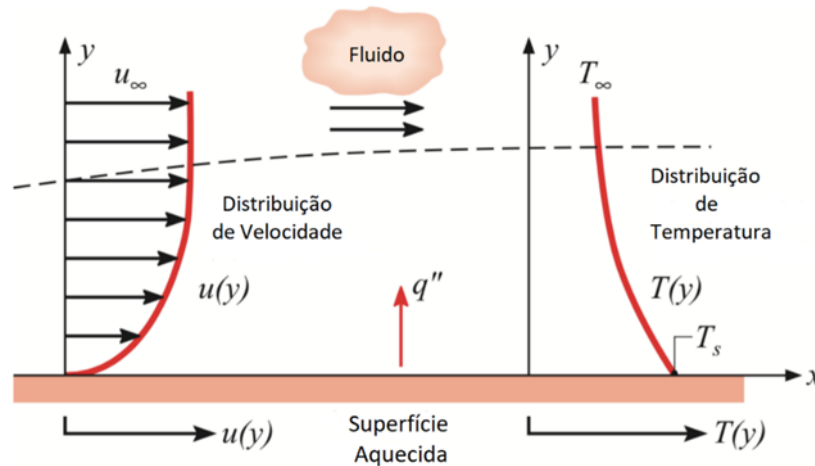


Figura 13 - Convecção forçada – desenvolvimento de camada limite (Adaptado [42])

Na análise térmica de um elemento sob ação do fogo, a convecção é o modo de transferência de calor mais importante, sendo responsável pelo transporte dos gases quentes e a propagação das chamas. Neste caso, dada a convecção ser entre o fluido e a superfície sólida, é apenas utilizada como condição fronteira, não sendo necessária a determinação de velocidades que se desenvolvem devido à convecção [45].

4.1.3 Radiação

A transferência de calor por radiação caracteriza-se pela propagação de energia através de ondas eletromagnéticas, emitidas por qualquer tipo de corpo que se encontra a uma temperatura superior ao zero absoluto, não sendo por isso necessária a existência de um meio natural para a propagação, o que permite o transporte eficiente no vácuo [46].

Quanto mais elevada a temperatura de um dado corpo, maior a intensidade de radiação apresentada. É possível assim, avaliar um corpo quanto ao poder de emitir radiação, em função do valor da sua emissividade ε [47].

A radiação transportada por ondas eletromagnéticas, transforma-se em energia térmica após ser absorvida por um recetor [48].

O corpo capaz de emitir toda a sua energia de forma ideal, de acordo com a Lei de Stefan-Boltzmann, equação 4, denomina-se por corpo negro.

$$q_{rad} = \varepsilon_s A_s \sigma (T_s^4 - T_{sur}^4) \quad (4)$$

Em que ε_s é a emissividade da superfície emissora, A_s a área da superfície emissora, T_s a temperatura da superfície emissora e T_{sur} a temperatura da superfície recetora.

4.2 Curvas de incêndio

4.2.1 Curva de incêndio padrão ISO 834

De forma a possibilitar a padronização e avaliar os testes experimentais em elementos de construção sob ação do fogo, os materiais são testados segundo a norma ISO 834-1:1999 [33]. Com a sua utilização é possível comparar resultados entre diferentes testes relativos ao mesmo material, comparando o comportamento sob a ação do fogo entre diferentes materiais. Esta norma apresenta o comportamento que a curva de fogo deve descrever nos testes experimentais, sendo uma função logarítmica relacionando a temperatura do incêndio no tempo, expressa na equação 5, e representada na Figura 14.

$$T = 345 \log_{10}(8t + 1) + 20 \quad (5)$$

Em que, T representa a temperatura média dos gases quentes gerados no compartimento de incêndio [°C], e t o tempo decorrido do incendio [min].

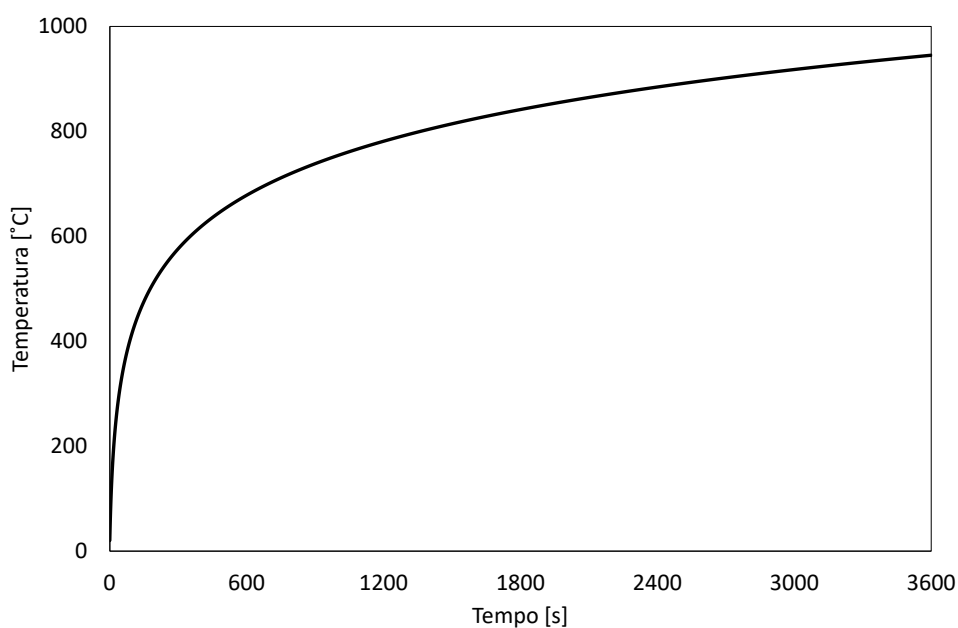


Figura 14 - Curva de incêndio ISO 834 [33]

4.3 Carbonização

Durante a exposição do elemento de madeira ao fogo, e após reunidas as condições necessárias, ocorre a carbonização, caracterizada por apresentar uma camada de carbono na superfície, proveniente da decomposição da madeira.

A zona de interface entre a madeira considerada carbonizada, da não carbonizada encontra-se a uma temperatura de aproximadamente 300°C [49].

Como a madeira carbonizada, estando decomposta, não apresenta capacidade de carga, acabando por se desintegrar, é necessário haver um estudo da velocidade à qual se dá a referida carbonização. O cálculo do período de tempo, em que a estrutura se considera resistente ao fogo, ou seja, a verificação da secção reta de madeira intacta e responsável pela estabilidade estrutural, é um parâmetro importante.

Para o cálculo da velocidade de carbonização, isto é, velocidade linear em que a madeira intacta se transforma em madeira carbonizada, pode-se recorrer a modelos validados e formulados a partir de testes experimentais ou de métodos teóricos. Esse cálculo pode apresentar-se sob a forma de perda de massa [g/s] ou evolução linear de material carbonizado [mm/s], sendo este último o mais utilizado, dada a facilidade do cálculo posterior de secção residual e área carbonizada [1].

Para a situação da madeira não protegida e com apenas uma face exposta ao fogo, para determinar o cálculo da evolução linear de material carbonizado, $d_{char,0}$, em [mm], é necessário relacionar a velocidade de carbonização β_0 em [mm/min] com o tempo t em [min], de exposição ao fogo, de acordo com a equação 6 [1].

$$d_{char,0} = \beta_0 \times t \quad (6)$$

Dado que ao longo da queima da madeira, esta pode apresentar fenómenos como a fissuração e o arredondamento da secção, no caso de ter mais do que uma face exposta ao fogo, aumentando assim a área exposta, deve-se considerar a equação 7, a qual considera valores da velocidade de carbonização superiores [1].

$$d_{char,n} = \beta_n \times t \quad (7)$$

Os valores de velocidade de carbonização β_0 e β_n , de acordo com o tipo de madeira em questão, encontram-se tabelados de acordo com o Eurocódigo 5 Parte 1-2 [1], e apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 – Valores de velocidades de carbonização para cada tipo de madeira [1]

Tipologia	Massa volúmica característica	β_0	β_n
<i>Softwood</i> (madeira resinosa)	MLC, $\rho \geq 290$ [kg/m ³]	0,65	0,70
	Madeira Maciça $\rho \geq 290$ [kg/m ³]	0,65	0,80
<i>Hardwood</i> (madeira folhosa)	MLC, $\rho \geq 290$ [kg/m ³]	0,65	0,70
	Madeira Maciça, $\rho \geq 450$ [kg/m ³]	0,50	0,55

4.4 Resistência ao fogo

Os elementos construtivos em estudo são elementos não portantes, do tipo paredes divisórias interiores, constituídos por montagem entre vigas de madeira maciça, protegidas por placas de gesso ou outros materiais de revestimento. A cavidade formada pelas placas de revestimento pode ser preenchida ou não com um material de isolamento. A resistência ao fogo destes elementos estruturais depende principalmente da proteção do sistema de revestimento.

A definição de resistência ao fogo, de acordo com o regime jurídico da segurança contra incêndios em edifícios RT SCIE (DL220 de 2008) [28], é: “Propriedade de um elemento de construção ou de outros componentes de um edifício, de conservar, durante um período de tempo determinado, a estabilidade e/ou a estanquidade e/ou o isolamento térmico e/ou a resistência mecânica e/ou qualquer outra função específica, quando sujeito ao processo de aquecimento resultante de um incêndio”.

A resistência ao fogo é assim uma medida pelo tempo durante o qual, sob a ação de um incêndio, os elementos estruturais continuam a desempenhar as funções para os quais foram concebidos.

4.4.1 Critérios de Resistência ao Fogo

A resistência ao fogo deve ser verificada quanto à capacidade de suporte de carga (R), isolamento (I) e integridade (E), representados na Figura 15, geralmente utilizando testes padrão experimentais, em que a instrumentação e os critérios são definidos de acordo com a regulamentação.

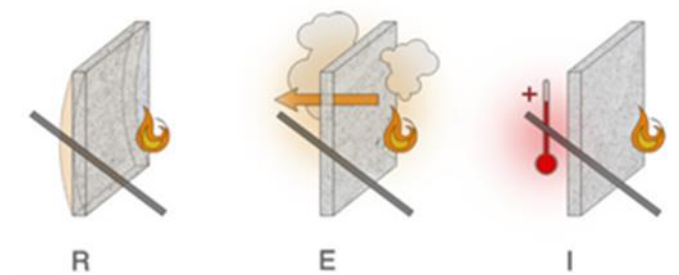


Figura 15 - Critérios de resistência ao fogo (Adaptado [50])

Estes critérios, para a execução de testes são definidos de acordo com a norma EN1363-1 [23], e dependendo do tipo de paredes com estrutura de madeira, a EN1365-1 [29] aplicável para paredes portantes (de suporte de carga) e a EN1364-1 [30] indicada para paredes não portantes (Figura 16).

No caso em estudo, paredes ou elementos construtivos de madeira não portantes (sem carga), a resistência ao fogo deve ser verificada relativamente ao isolamento (I) e à integridade (E), geralmente com as mesmas normas EN1363-1 [23], ISO834 [33] e EN1364-1 [30].



Figura 16 - Integridade, estanqueidade e isolamento (Adaptado [50])

4.4.1.1 Capacidade de carga

O critério de capacidade de carga (R) traduz a capacidade, do elemento estrutural suportar o carregamento durante o incêndio sem colapsar ou sofrer deformações excessivas. De acordo com alguns autores, é possível distinguir três modos de rutura: flexão, corte longitudinal, e rutura por corte vertical.

Os critérios estabelecidos para elementos submetidos à flexão e em situação de incêndio padrão, devem ter com consideração o valor da deflexão máxima D (mm),

conforme a equação 8, ou o valor da taxa de deflexão (dD/dt), expressa pela equação 9 [23].

$$D_{lim} = \frac{L^2}{400d} \quad (8)$$

$$\left(\frac{dD}{dt}\right)_{lim} = \frac{L^2}{9000d} \quad (9)$$

Em que L [mm] representa o vão do elemento e d [mm] a distância ou espessura da secção transversal do elemento.

Deste modo, de acordo com a norma EN1363-1 [23], ocorre a falha da estrutura quando pelo menos uma das equações 10 ou 11 é satisfeita.

$$D \geq 1,5 \times D_{lim} \quad (10)$$

$$D \geq D_{lim} \wedge \left(\frac{dD}{dt}\right) = \left(\frac{dD}{dt}\right)_{lim} \quad (11)$$

De igual modo, os critérios estabelecidos para elementos carregados axialmente e em situação de incêndio padrão, devem ter com consideração o valor limite do deslocamento real de contração [mm], de acordo com a equação 12, ou a taxa de deslocamento vertical por contração, conforme a equação 13 [33].

$$C = \frac{h}{100} \quad (10)$$

$$\frac{dC}{dt} = \frac{3h}{1000} \quad (11)$$

4.4.1.2 Isolamento

O critério ou a capacidade de isolamento (I) é a capacidade do elemento de resistir à exposição ao fogo apenas de um lado, sem transmissão significativa de transferência de calor do lado exposto para o não exposto. A transmissão deve ser limitada de forma que a superfície não exposta ou qualquer material próximo a essa superfície seja inflamado, impedindo assim a combustão de algum material na parte superior, que consequentemente levaria à propagação do incêndio.

A classificação (I) de um elemento construtivo em madeira não portante deve ser atribuída com base no menor tempo em que os critérios de aumento máximo ou médio de temperatura são satisfeitos em qualquer área discreta [23, 33].

O nível de desempenho utilizado para definir o isolamento deve ser calculado com base no aumento da temperatura média do lado não exposto, limitado a 140°C acima da temperatura média inicial ou com base no aumento da temperatura máxima, limitado a 180°C acima a temperatura média inicial [33, 46].

De acordo com EN1363-1 [23], a resistência ao fogo pelo critério de isolamento é expressa em minutos, e refere-se ao menor tempo entre:

- A temperatura máxima da superfície não exposta do elemento, quando atinge em algum ponto um aumento máximo de temperatura $T_{Máx}$ [°C ou K] de 180 [°C ou K] em relação à temperatura média inicial T_0 [°C ou K], conforme a equação 14.

$$T_{Máx} = T_0 + 180 \quad (12)$$

- Ou entre a temperatura média da superfície não exposta da laje, quando atinge um aumento de médio de temperatura $T_{Méd}$ [°C ou K] de 140 [°C ou K] em relação à temperatura média inicial T_0 [°C ou K], conforme a equação 15.

$$T_{med} = T_0 + 140 \quad (13)$$

O critério de isolamento térmico, como definido pela norma EN 1363-1 [23], requer a realização de testes experimentais para a determinação do incremento máximo (180°C) e médio (140°C) de temperatura na face não exposta de elementos. Neste trabalho, será efetuado um método alternativo de cálculo através de testes numéricos.

4.4.1.3 Integridade

O critério de estanquidade ou integridade (E) traduz a capacidade, do elemento construtivo resistir ao fogo na superfície diretamente exposta ao incêndio, e resistir à penetração dos gases quentes e das chamas que poderiam passar através de fendas e aberturas no elemento [23].

A penetração de gases quentes e/ou de chamas podem causar ignição da superfície não exposta ou de qualquer material adjacente a essa superfície. A avaliação da estanquidade deve ser realizada com base nos seguintes três aspetos: verificação de fissuras ou abertura excessiva de certas dimensões; existência de ignição num modelo de algodão; ou existência de uma chama permanente no lado não exposto [51].

4.4.2 Classificação de elementos de construção ao fogo

A classificação da resistência ao fogo, normalmente usada para estes materiais e elementos de construção, é definida pela norma europeia para a classificação de fogo de produtos e elementos de construção EN13501-2 [31].

Os sistemas de suporte de carga e de paredes divisórias utilizados em residenciais e espaços comerciais são obrigados a ter a classificação ao fogo de acordo com os tempos estabelecidos na classificação ao fogo de produtos e elementos de construção, EN13501-2 [31]. Esta norma europeia propõe uma duração em minutos relativamente elevada para paredes ou elementos de suporte de carga com função de separação de fogo REI (15, 20, 30, 45, 60, 90, 120, 180, 240, 360) e para paredes ou elementos divisórios sem função de carga EI (15, 20, 30, 45, 60, 90, 120, 180, 240), EN13501-2 [31].

O nível de segurança é selecionado por cada país europeu, usando o próprio sistema de regulamentação nacional. Na atual regulamentação, a resistência ao fogo é classificada pelas Euroclasses de resistência através da conjugação de letras, de acordo com a Tabela 13 [32].

Tabela 13 – Classificação para elementos ou partes de obras sem funções de suporte de carga [32]

Classificação	Duração [min]									
	—	20	30	—	60	90	120	—	—	—
E	—	20	30	—	60	90	120	—	—	—
EI	15	20	30	45	60	90	120	180	240	—
EI-M	—	—	30	—	60	90	120	180	240	—
EW	—	20	30	—	60	90	120	—	—	—

Em que a classificação E representa a estanquidade a chamas e gases inflamáveis ou quentes, EI classifica a estanquidade a chamas e gases inflamáveis ou quentes e o isolamento térmico, EI-M em adição considera também a ação mecânica e EW a estanquidade de gases quentes ou inflamáveis e a radiação.

A legislação nacional aplica estes princípios nas regras nacionais, estipuladas e apresentadas nos DL nº123/2019 [32], 1ª série de 18 de outubro 2019 e DL nº220/2008 [28].

MODELO DE VALIDAÇÃO NA RESISTÊNCIA AO FOGO

- 5.1 Modelo experimental
- 5.2 Modelos numéricos desenvolvidos
- 5.3 Validação dos resultados

5 MODELO DE VALIDAÇÃO NA RESISTÊNCIA AO FOGO

Apesar da madeira ser um elemento construtivo de excelência, apresenta algumas limitações, como é o caso de ser combustível na presença de fogo, promovendo então a sua carbonização. Como resultado, grande parte das estruturas existentes contruídas apenas em madeiras não respeitam os requisitos mínimos de resistência ao fogo apresentados pelas normas e legislação europeias. Por conseguinte, é viável recorrer ao uso de um elemento protetor com propriedades isolantes que para além de impedir a exposição direta ao fogo, permita retardar o aumento de temperatura da madeira e, conseqüentemente, a sua carbonização.

Dada a facilidade de manuseio e instalação, o gesso sob forma de placas (gesso cartonado) é um dos materiais mais utilizados na proteção de elementos estruturais.

Como tal, a determinação da distribuição de temperaturas de elementos construtivos em madeira revestidos a gesso, quando expostos à ação do fogo, pode ser realizada por meios experimentais, numéricos e analíticos.

Neste capítulo são apresentados os ensaios experimentais realizados por Takeda e Mehaffey [5], a partir dos quais se pretende validar o modelo numérico a realizar no programa computacional de elementos finitos *ANSYS® Academic Student 2022 R1*.

5.1 Modelo experimental

Na tentativa de analisar e estudar o comportamento de elementos construídos em madeira revestidos por placas de gesso sob a ação do fogo, em 1998, H. Takeda e J. R. Mehaffey [5] realizaram 6 ensaios experimentais no Instituto Nacional de Investigação do Canadá.

Como já apresentado no capítulo anterior, existe uma variedade de tipos de gesso. Deste modo, os gessos utilizados por H. Takeda e J. R. Mehaffey [5] foram do tipo C e X com uma massa volúmica, ρ , à temperatura ambiente de 732 kg/m³ e 648 kg/m³, respetivamente.

Na Tabela 14 encontra-se a descrição sucinta dos 6 ensaios realizados, sendo que, 4 deles em escala reduzida e 2 à escala real.

Tabela 14 - Ensaio de resistência ao fogo [5]

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

Será dada especial atenção ao ensaio 6, onde a estrutura tem 38 mm × 89 mm para os montantes madeira, espaçados de 400 mm e protegidos por placas de gesso do tipo X com 15,9 mm de espessura, conforme sugere a Figura 17, com exposição ao fogo durante uma hora.

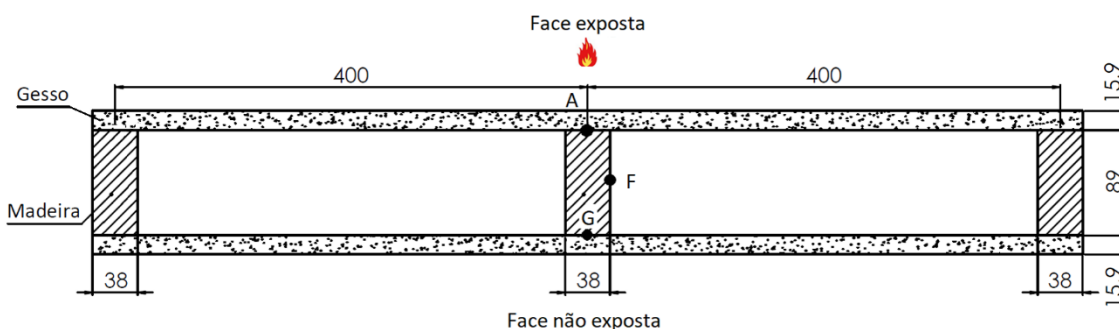


Figura 17 - Modelo geométrico e pontos em análise

Durante os ensaios, foi analisada a evolução da temperatura em diversos pontos de controlo, com especial interesse para os pontos A e G, de interface entre a madeira e

as placas de gesso, e o ponto médio da interface entre a madeira e a cavidade (F), conforme apresentado na Figura 17.

Através da ferramenta *Web Plot Digitalizer*[®] foi possível extrair os valores numéricos expressos através dos gráficos presentes no ensaio experimental de Takeda e Mehaffey [5], onde a evolução das temperaturas nos pontos em estudo se encontram expressas na Figura 18, bem como a curva de fogo do próprio ensaio.

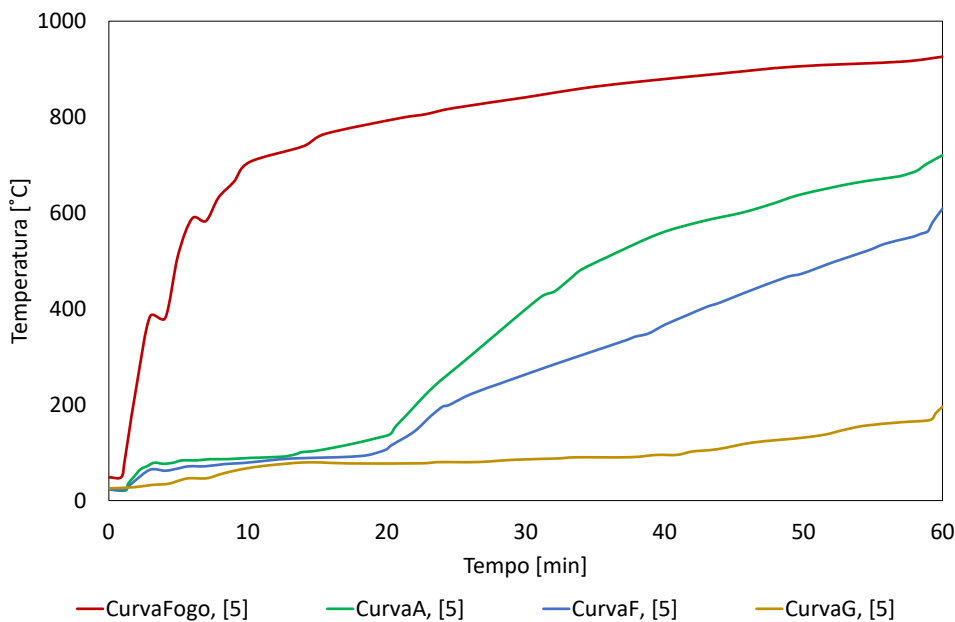


Figura 18 - Curva de fogo utilizada e resultados de temperatura para os pontos A, F e G

No trabalho desenvolvido por Takeda e Mehaffey [5] é ainda apresentado, esquematicamente, a secção residual, resultante da carbonização da madeira para os instantes de tempo 40, 50 e 60 minutos. A Figura 19 representa a progressão da carbonização do ensaio 6 realizado por Takeda e Mehaffey [5].

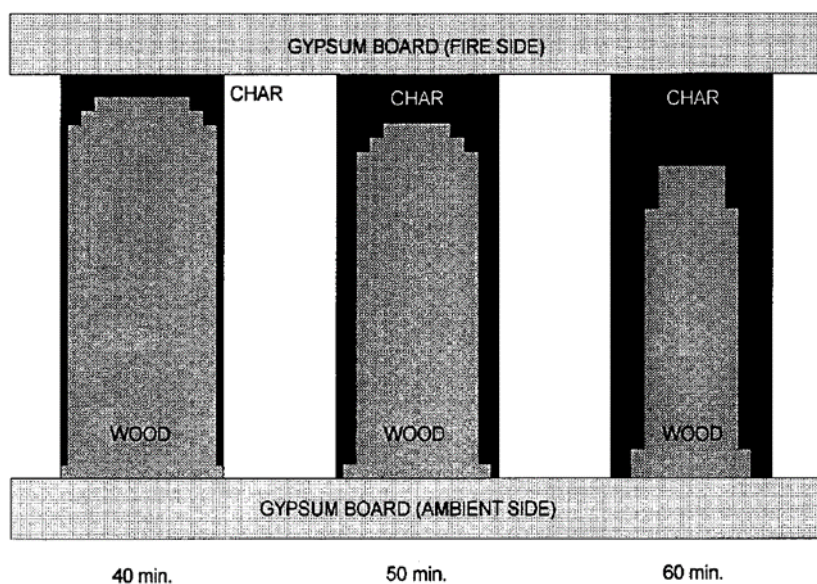


Figura 19 - Progressão da carbonização da madeira no ensaio 6 [5]

5.2 Modelos numéricos desenvolvidos

Como anteriormente referido, as análises térmicas dos diferentes elementos construtivos foram realizadas com auxílio de modelos numéricos realizados no programa de elementos finitos *ANSYS® Academic Student 2022 R1*.

O programa *ANSYS® Academic Student 2022 R1* permite a seleção de diferentes elementos finitos, sendo que a tipologia adequada deve ser selecionada em função da análise e do modelo a realizar. No programa também é necessário incluir as propriedades dos materiais, fazer a geometria do modelo e selecionar o tipo de análise para obtenção da solução. No presente estudo, a análise será térmica em regime transiente a não linear material.

Como o objetivo inicial é validar as simulações conseguidas através do *ANSYS®*, comparando com os ensaios experimentais dos investigadores Takeda e Mehaffey [5], procurou-se delinear modelos de dimensões semelhantes às do ensaio 6, anteriormente descrito, ver Figura 17, diferindo apenas em 0,1 mm na espessura do revestimento de gesso.

Por forma a encontrar a melhor aproximação aos ensaios experimentais foram desenvolvidos dois modelos numéricos, ambos com geometria semelhante ao modelo dos autores, diferindo nos elementos utilizados e nas condições de fronteira impostas das cavidades. No primeiro caso em estudo, apenas é considerado trocas de calor por radiação nas faces interiores das cavidades, ao passo que no segundo caso é

introduzido ar nas cavidades, como um modelo sólido, responsável pela condução de calor ao longo das cavidades.

Para perceber melhor a influência da transferência de calor nas cavidades, foi ainda desenvolvido um terceiro modelo considerando o vazio nas cavidades, mas com as suas fronteiras internas adiabáticas. Os resultados para este modelo encontram-se apresentados no Anexo 1.

5.2.1 Formulação de elementos finitos

O método dos elementos finitos é uma técnica amplamente utilizada na área da engenharia, solucionando problemas de elevada complexidade, através da análise de fenómenos físicos que ocorrem em meios contínuos. Este método consiste em dividir o domínio do problema em subdomínios, sendo cada subdomínio representado por um conjunto de equações num sistema global para o cálculo da solução final [52].

A utilização deste método permite desenvolver várias simulações numéricas com um custo mais reduzido, comparativamente a ensaios experimentais. Contudo para se obter uma solução confiável é necessário definir com rigor todas as variáveis associadas, como é o caso da geometria, propriedades dos materiais e condições fronteira.

A determinação do campo de temperaturas na secção transversal do modelo é realizada através da solução da equação diferencial da condução de calor. Para domínios bidimensionais é traduzida pela equação 16.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) + \dot{Q} = \rho c_p \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (14)$$

Sendo λ a condutibilidade térmica [W/mK], \dot{Q} o calor gerado internamente no sólido por unidade de volume [J/m³s], ρ a massa volúmica [kg/m³] e c_p o calor específico [J/kgK].

A equação 16 que cumpre o campo de temperaturas, necessita de satisfazer as condições iniciais e de fronteira. As condições iniciais são a distribuição da temperatura no instante inicial no modelo. As condições de fronteira podem ser do tipo [53]:

- Essenciais (condição de Dirichlet). As temperaturas são prescritas numa região da fronteira, $\theta = \bar{\theta}$.

- Naturais. Um fluxo de calor prescrito na parte da fronteira Γ_q , segundo a condição de Newman.
- Convectiva, adiciona a transmissão de calor por convecção de uma parte Γ_c da fronteira (condição de Cauchy) para a vizinhança.
- Radiativa, correspondente à transferência de calor por radiação entre uma parte Γ_r da fronteira e a envolvente
- Convectiva e radiativa, correspondentes à transferência de calor por convecção e radiação em simultâneo Γ_{cr} .

A aplicação do método de elementos finitos na equação de condução de calor e às condições de fronteira, pode ser considerado como uma ampliação do método dos resíduos pesados, sendo que este consiste na divisão do domínio Ω em subdomínios ou elementos Ω_e . Com recurso a uma discretização parcial e aplicando o método de Galerkin, obtém-se o sistema de equações global para o domínio Ω representado pela equação 17.

$$K\theta + C\dot{\theta} = F \quad (15)$$

Em que as matrizes K e C , bem como o vetor F são expressos pelas equações 18, 19 e 20, respetivamente

$$K_{lm} = \sum_{e=1}^E \int_{\Omega^e} \left(\frac{\partial N_l}{\partial x} \lambda \frac{\partial N_m}{\partial x} \lambda + \frac{\partial N_l}{\partial y} \lambda \frac{\partial N_m}{\partial y} \lambda \right) d\Omega^e + \sum_{e=1}^H \int_{\Gamma_c^e} \alpha_{cr} N_l N_m d\Gamma_c^e \quad (16)$$

$$C_{lm} = \sum_{e=1}^E \int_{\Omega^e} \rho c_p N_l N_m d\Omega^e \quad (17)$$

$$F_l = \sum_{e=1}^E \int_{\Omega^e} N_l \dot{Q} d\Omega^e - \sum_{e=1}^Q \int_{\Gamma_q^e} N_l \bar{q} d\Gamma_q^e - \sum_{e=1}^H \int_{\Gamma_c^e} N_l \alpha_{cr} \theta_{\infty} d\Gamma_c^e \quad (18)$$

Onde E é o número total de elementos, Q é o número de elementos com fronteira natural (Γ_q), H representa o número de elementos com fronteira convectiva e/ou radiativa (Γ_c e/ou Γ_r), N_l e N_m as funções de forma são e α_{cr} o coeficiente de transmissão de calor por convecção e/ou radiação.

Dado trabalhar em domínios bidimensionais nesta dissertação, as operações na direção z foram consideradas.

Para obter a solução prevista pelo sistema de equações diferenciais descrito na equação 15, é necessário realizar sua discretização no tempo a partir das diferenças finitas, onde se obtém a equação 21.

$$\hat{K}_{n+\alpha} \theta_{n+\alpha} = \hat{F}_{n+\alpha}; 0 < \alpha \leq 1 \quad (19)$$

Em que, $\hat{K}_{n+\alpha}$ e $\hat{F}_{n+\alpha}$ são dadas pelas equações 22 e 23.

$$\hat{K}_{n+\alpha} = K_{n+\alpha} + \frac{1}{\alpha \Delta t} C_{n+\alpha}; 0 < \alpha \leq 1 \quad (20)$$

$$\hat{F}_{n+\alpha} = F_{n+\alpha} + \frac{1}{\alpha \Delta t} C_{n+\alpha} \theta_n; 0 < \alpha \leq 1 \quad (21)$$

Decorrido o intervalo de tempo Δt , o campo de temperaturas obtém-se segunda a equação 24.

$$\theta_{n+1} = \frac{1}{\alpha} \theta_{n+\alpha} + \left(1 + \frac{1}{\alpha}\right) \theta_n; 0 < \alpha \leq 1 \quad (22)$$

O parâmetro α presente na equação 24 é variável, resultando diversos esquemas de integração no tempo, tomando como valores mais comuns $\alpha = 1/2$, segundo a regra de Crank-Nicolson, $\alpha = 2/3$ segundo a regra de Galerkin e $\alpha = 1$ de acordo com a regra de Backward [54].

Para materiais com propriedades térmicas não lineares, como é o caso da madeira e do gesso, o sistema de equações obtido da equação 17 pode ser transcrito de acordo com a seguinte formulação:

$$K_{(\theta,t)} \theta_{(t)} + C_{(\theta,t)} \dot{\theta}_{(t)} = F_{(\theta,t)} \quad (23)$$

Deste modo, as matrizes $K_{n+\alpha}$ e $C_{n+\alpha}$ e o vetor $F_{n+\alpha}$ passam a ser determinados pelas equações 26, 27 e 28.

$$K_{n+\alpha} = K(\theta_{n+\alpha}, t_{n+\alpha}) \quad (24)$$

$$C_{n+\alpha} = C(\theta_{n+\alpha}, t_{n+\alpha}) \quad (25)$$

$$F_{n+\alpha} = F(\theta_{n+\alpha}, t_{n+\alpha}) \quad (26)$$

Por forma a obter a convergência do método, satisfazendo as condições de não linearidade das propriedades térmicas dos materiais, é necessário implementar um processo iterativo. Deste modo, é possível recorrer ao método de Newton-Raphson modificado que se traduz num sistema de forças residuais descrito por:

$$\psi_{n+\alpha}^i = \hat{F}_{n+\alpha}^i - \hat{K}_{n+\alpha}^i \theta_{n+\alpha}^i \neq 0 \quad (27)$$

Aplicada a simplificação, a solução corrigida pode ser determinada pelas equações 30 e 31.

$$\Delta \theta_{n+\alpha}^i = [\hat{K}_{n+\alpha}^i]^{-1} \psi_{n+\alpha}^i \quad (28)$$

$$\theta_{n+\alpha}^{i+1} = \theta_{n+\alpha}^i + \Delta \theta_{n+\alpha}^i \quad (29)$$

Para o cálculo do critério de convergência para a verificação da mesma, utiliza-se a equação 32.

$$\frac{\|\Delta\theta_{n+\alpha}^i\|}{\|\theta_{n+\alpha}^{i+1}\|} = \frac{\|\theta_{n+\alpha}^{i+1} - \theta_{n+\alpha}^i\|}{\|\theta_{n+\alpha}^{i+1}\|} < TOL \tag{30}$$

Em que TOL é a tolerância exigida, $\| \|$ representa a norma euclidiana, $\Delta\theta_{n+\alpha}^i$ a alteração do campo de temperaturas e $\theta_{n+\alpha}^{i+1}$ corresponde à temperatura atual.

5.2.2 Elementos finitos e malhas

Uma vez o objetivo principal em estudo ser a determinação do campo de temperaturas na secção transversal do perfil de madeira, as análises térmicas dos modelos foram realizadas num plano bidimensional.

Para a modelação numérica, o elemento finito utilizado foi o PLANE55 de quatro nós. Este elemento possui capacidade de condução térmica no plano bidimensional, com apenas um grau de liberdade (temperatura) em cada nó. Apesar de ser aplicável tanto em análises em regime transiente, como estacionário, na construção dos modelos nesta dissertação, foi aplicado em análises em regime transiente. Os resultados obtidos com este tipo de elemento são temperaturas nodais, gradientes térmicos ou componentes do fluxo de calor [22].

Na Figura 20 está representado o elemento finito PLANE55, a sua geometria, localização dos nós e o sistema de coordenadas do elemento.

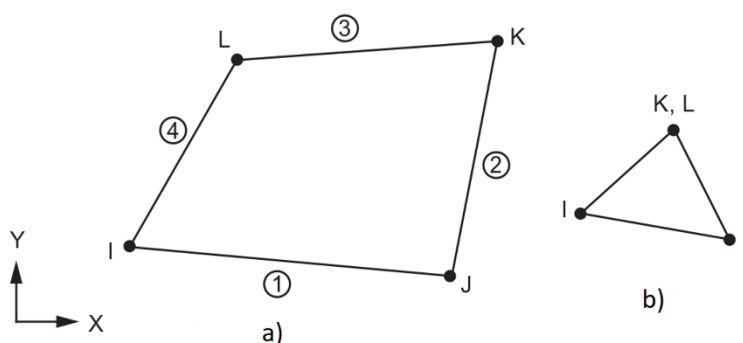


Figura 20 - Representação esquemática do elemento PLANE55 de a) quatro nós e b) três nós (Adaptado [55])

Como referido, a diferença nos dois modelos desenvolvidos é relativa às cavidades, tendo-se desenvolvido um modelo sem malha de ar e outro com malha de ar nas cavidades. No primeiro caso, consideram-se as cavidades sem malha de ar existindo trocas de calor apenas por radiação entre as suas superfícies internas. No segundo caso, foi considerada a malha de ar nas cavidades com as propriedades já referidas. Na análise térmica desenvolvida para este segundo caso, o ar é considerado como um modelo sólido permitindo a condução de calor dentro da cavidade.

Para considerar o efeito da radiação existente no interior das cavidades do modelo em estudo, isto é, a radiação entre as superfícies interiores da cavidade e um ponto qualquer no seu interior, foi utilizado o elemento superficial SURF151 (*2-D Thermal Surface Effect*).

Este tipo de elemento permite aplicar carregamentos ou ações de efeito superficial, possibilitando assim a sua sobreposição a um elemento bidimensional. Conforme apresentado pela Figura 21, o elemento SURF151 é tipicamente constituído por dois nós, aos quais está associado um nó extra, que na aplicação em questão se localiza no interior das cavidades do modelo.

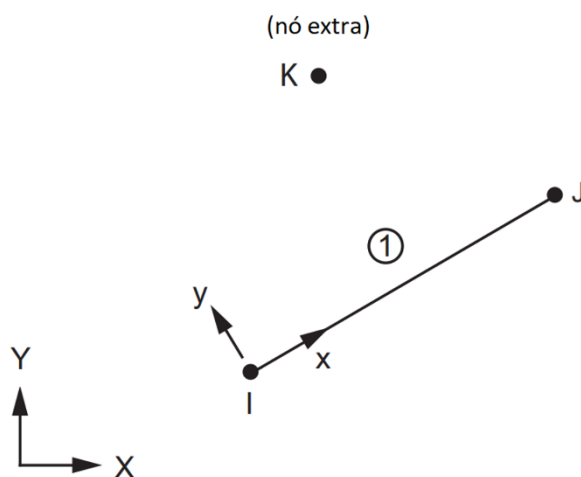


Figura 21 - Representação esquemática do elemento SURF151 (Adaptado [55])

Os elementos SURF151 são criados indicando por ordem os nós I, J, K ao longo de todas as faces internas das cavidades. Deste modo, o nó extra (K) permite as trocas de calor por radiação com o elemento SURF151, ao qual está associado, que por sua vez, transmite essa energia sob forma de condução aos restantes elementos do modelo (neste caso, da madeira e do gesso constituídos por elementos do tipo PLANE55).

Nos modelos desenvolvidos, a madeira e o gesso foram considerados como materiais não lineares e isotrópicos. Os modelos foram expostos à curva de incêndio nominal de

acordo com a ISO834 [33] numa das suas faces exteriores. Assumiu-se ainda o contacto perfeito entre todos os materiais, de forma a permitir a condução de energia térmica entre todos os elementos.

Na elaboração da malha de elementos finitos, foi determinada a dimensão de aresta do elemento igual a 10mm, de modo a ter pelo menos dois elementos de malha na menor espessura do gesso. Este tamanho de elemento foi considerado para utilização nos modelos a desenvolver nesta dissertação.

Após determinada a dimensão da aresta do elemento, a malha é gerada automaticamente pelo programa.

Na Figura 22 pode ser observado o modelo sem malha de ar nas cavidades a aferir com o modelo de teste experimental.

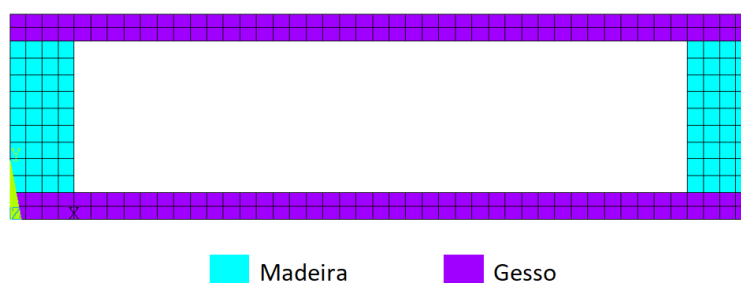


Figura 22 - Representação do modelo utilizado sem malha de ar

Na Figura 23 pode ser observado o modelo com malha de ar nas cavidades a aferir com o modelo de teste experimental.

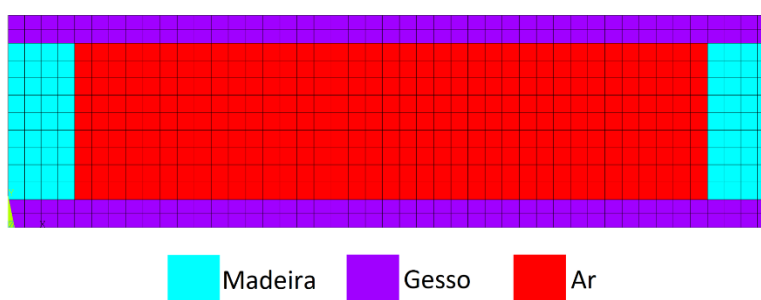


Figura 23 - Representação do modelo utilizado no modelo com malha de ar

5.2.2.1 Condições fronteira

As condições de fronteira dos modelos prendem-se com o fluxo de calor por radiação e convecção introduzidas nas fronteiras do modelo. A condição inicial correspondente à temperatura ambiente foi definida a 20°C. Na face exposta ao fogo foram introduzidas essas condições de fronteira (convecção e radiação) para simular a evolução da temperatura do incêndio padrão descrita pela norma ISO834 [33]. Na face não exposta do modelo foi considerada unicamente convecção e para o caso do modelo sem malha de ar, na cavidade interna a condição foi de radiação. Nas fronteiras das faces laterais dos modelos, foi admitida a condição adiabática, eliminando assim as trocas de calor pelas zonas laterais.

As trocas de calor por convecção revelam-se um fenómeno bastante complexo, essencialmente devido à dificuldade em determinar o coeficiente de convecção h_c . Por conseguinte, é possível recorrer ao Eurocódigo 1 parte 1-2 [4], onde é apresentado de forma simplificada, um coeficiente de convecção constante de 25 W/m²K, utilizado para a face exposta ao fogo e de 9 W/m²K para a parte não exposta. O valor de emissividade foi igual a 1 na fronteira de exposição ao fogo e 0,8 para o material (gesso e madeira).

Na Figura 24 estão resumidas as condições fronteira consideradas no modelo sem malha de ar nas cavidades, a aferir.

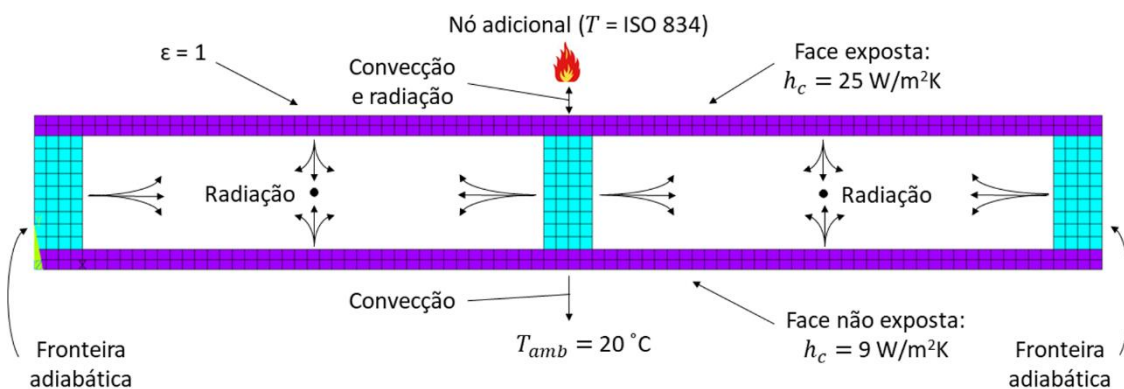


Figura 24 - Condições de fronteira admitidas no modelo base sem malha de ar

De igual modo, na Figura 25 encontram-se resumidas as condições fronteira consideradas no modelo com malha de ar nas cavidades, a aferir.

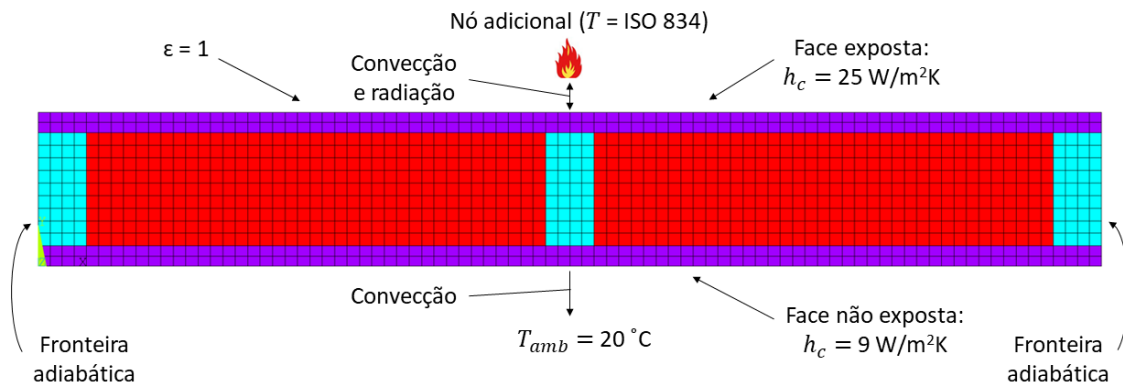


Figura 25 - Condições de fronteira admitidas no modelo base com malha de ar

De notar que na imposição da curva de incêndio padrão descrita pela norma ISO834 [33] aplicada no nó adicional, foi utilizado um código em linguagem APDL (ANSYS® *Parametric Design Language*) para gerar tabelas com os valores de tempo e temperatura. Deste modo, foi possível minimizar o tempo necessário para o pré processamento do modelo. Este código deve ser escrito em arquivos com extensão “*.txt”, para posteriormente ser utilizado na linha de comandos do ANSYS®. O código referente à curva de incêndio é apresentado no Anexo 2.

Com o objetivo de satisfazer as condições não lineares do problema, o ANSYS® recorre ao método iterativo de Newton-Raphson modificado na resolução das equações numéricas. O tempo total das simulações dos modelos, correspondem ao tempo de exposição ao fogo, sendo coincidentes com o ensaio experimental a comparar, descrito no capítulo 5.1 para 60 minutos de exposição. Relativamente ao controlo do tempo, foram definidos intervalos de tempo, entre os quais o programa calcula a distribuição de temperaturas, de 60 segundos, em que o incremento mínimo é de 1 segundo e o máximo de 60 segundos, uma vez que intervalos de tempo inferiores não mostrarem uma melhoria significativa nos resultados, mas um aumento considerável no tempo de cálculo. Foi utilizado um critério de convergência baseado no fluxo de calor com uma tolerância admitida de 0,9. A verificação deste critério foi realizada pelo próprio programa, pela norma euclidiana L2 e com o mínimo de referência de 1.

5.3 Validação dos resultados

Após a elaboração dos modelos e realizadas as simulações, é necessário analisar os resultados de forma a ser possível validar a utilização do ANSYS® *Academic Student 2022 R1* no contexto da análise térmica. Neste capítulo da dissertação são apresentados os resultados alcançados para a evolução da temperatura, a

apresentação da zona carbonizada na secção transversal, a partir da qual foi possível determinar a secção residual para diferentes instantes de tempo.

Nas referidas simulações numéricas obteve-se os valores referentes à evolução da temperatura nos nós com a posição coincidente com a dos pontos analisados por Takeda e Mehaffey [5] no teste 6 dos ensaios experimentais. Deste modo, foi possível validar estes resultados por comparação direta.

5.3.1 Temperaturas

Para validar o modelo numérico por melhor aproximação ao ensaio experimental foi analisada a evolução da temperatura para os nós com localização correspondente aos pontos A, F e G. De forma a facilitar a análise dos resultados da evolução da temperatura nos diferentes pontos, representam-se as curvas descritas pela evolução da temperatura de cada modelo desenvolvido, comparativamente aos resultados obtidos nos pontos de controlo do teste 6 do ensaio experimental.

A Figura 26 representa as curvas descritas pela evolução da temperatura nos diferentes pontos do modelo sem malha de ar nas cavidades, comparativamente ao teste 6 do ensaio experimental. Ainda neste gráfico, encontram-se descritas as curvas de incêndio utilizadas. No caso da presente simulação, foi utilizada a norma ISO 834 [33], sendo que no teste experimental a curva real é a de um forno a gás propano.

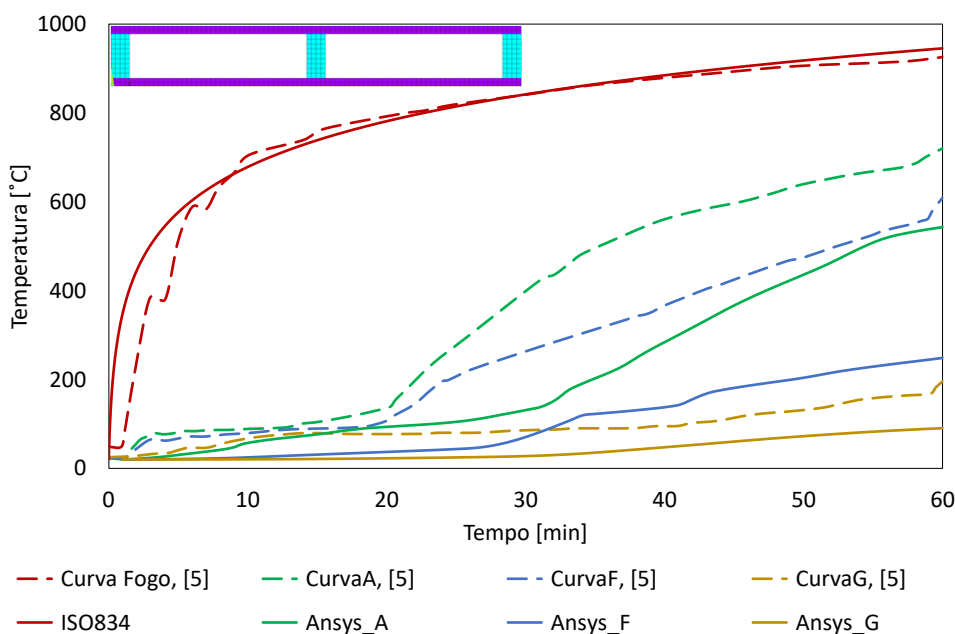


Figura 26 - Curva de fogo e resultados de temperatura para os pontos A, F e G do modelo sem malha de ar

Para a curva de temperaturas no ponto A da simulação numérica é possível observar que apesar de ter uma elevação de temperatura mais tardia apresenta uma evolução próxima do teste experimental, com declives bastante próximo. Recordando, através da Figura 17, que a posição do ponto A é na interface entre a primeira camada de gesso e a viga de madeira, este fenómeno de aumento de temperatura mais tarde comparativamente ao ensaio experimental, deve-se às diferentes propriedades do gesso utilizado, um vez que o autor utiliza gesso do tipo X e na simulação foi utilizado gesso tipo F, dado ser o gesso indicado para aplicações suscetíveis à ação do fogo.

No caso das curvas de temperatura dos pontos F e G, verifica-se também um aumento de temperatura mais lento, motivado pelo facto de na simulação apenas considerar a radiação nas cavidades do modelo, e no ensaio experimental estão presentes todos os modos de transferência de calor. Contudo, é também visível a evolução com um comportamento próximo ao ensaio experimental, sendo que as diferenças são transversais para as três curvas o que mostra a consistência do modelo numérico.

As curvas descritas pela evolução da temperatura nos diferentes pontos do modelo considerando malha de ar nas cavidades, comparativamente aos respetivos pontos de controlo no teste 6 do ensaio experimental encontram-se descritas na Figura 27.

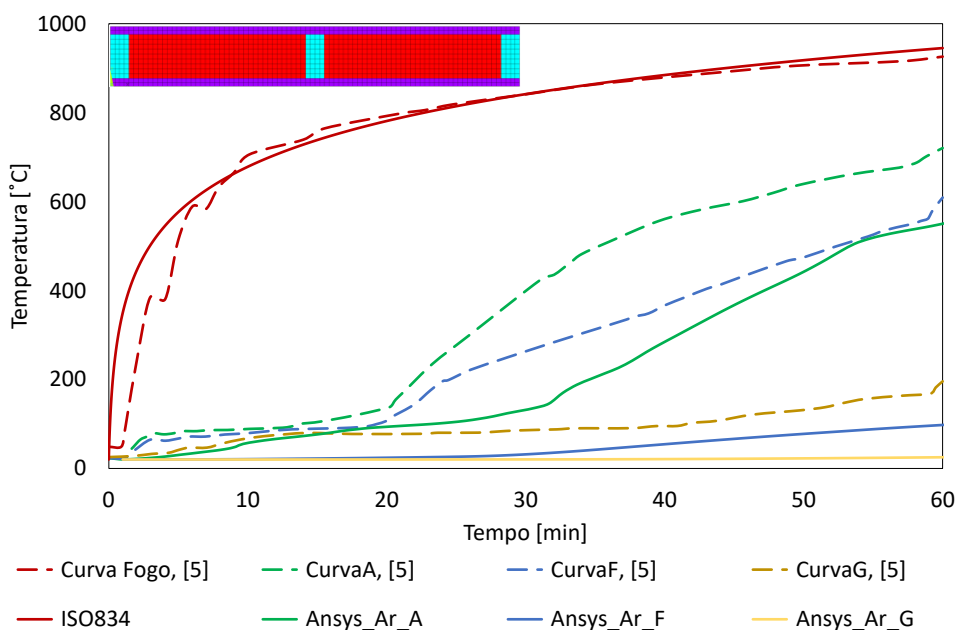


Figura 27 - Curva de fogo e resultados de temperatura para os pontos A, F e G do modelo com malha de ar

A curva de temperaturas do ponto A apresenta uma evolução semelhante à analisada no gráfico do modelo sem malha de ar nas cavidades, demonstrando uma vez mais que

este depende essencialmente das propriedades do gesso que separa a madeira do fogo.

Relativamente às curvas de temperatura dos pontos F e G, facilmente se conclui que considerar apenas a condução de calor nas cavidades através do ar existente não é suficiente para simular o aumento de temperatura nos pontos de interface com as cavidades, o que leva também a concluir que irá ter influência no desempenho da madeira no que respeita à carbonização.

Através da análise do campo de temperaturas para pontos de controlo, conclui-se que o modelo a validar é o primeiro apresentado, que para além das restantes condição fronteira, considera o elemento SURF151 nas faces internas das cavidades, apresentando uma melhor aproximação ao modelo de Takeda e Mehaffey [5].

A evolução térmica para ambos os modelos, pode ser observada no Anexo 3.

5.3.2 Carbonização

Os modelos também foram analisados de acordo com a evolução da carbonização ao longo do tempo. Conforme apresentado por Takeda e Mehaffey [5], foram obtidas as imagens esquemáticas da carbonização para os instantes de tempo de 40, 50 e 60 minutos. O perfil de madeira utilizado para analisar a carbonização foi numa seção do montante central, de forma a obter resultados para a região mais crítica. De forma a poder comparar visualmente a carbonização entre as simulações e o ensaio experimental, em todas as simulações deste capítulo referente à validação do modelo numérico, respeitou-se a temperatura limite para formação da camada carbonizada imposta pelos autores, de 288 °C.

A comparação da evolução da carbonização entre o ensaio experimental e as análises numéricas dos modelos com e sem malha de ar, encontra-se representada na Figura 28 e na Figura 29, respetivamente.

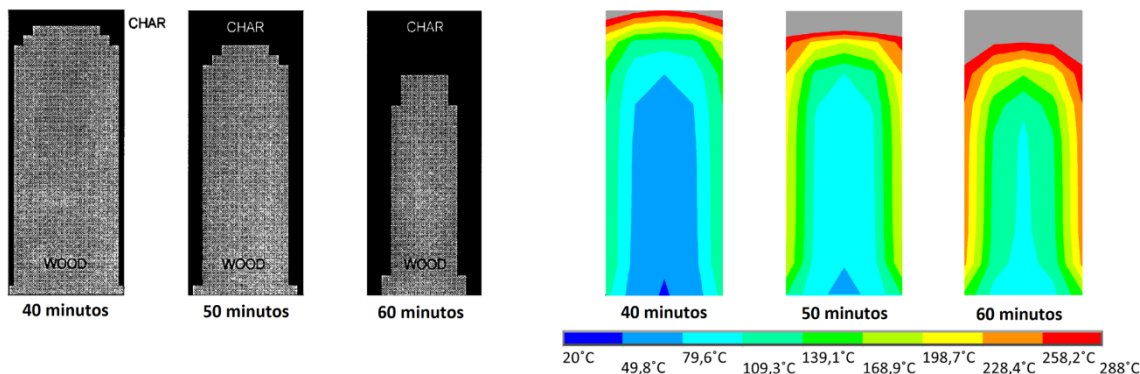


Figura 28 - Comparação da evolução da carbonização com o modelo sem malha de ar

Analisando as imagens descritas na Figura 28, verifica-se que a carbonização no modelo numérico apresenta uma evolução ligeiramente inferior da obtida no ensaio experimental de Takeda e Mehaffey [5], concordando com o concluído anteriormente na análise do campo de temperaturas nos pontos médios da interface da madeira. Este facto é motivado pela diferença das propriedades dos materiais e na ausência de consideração de outros fenómenos de transferência de calor nas cavidades do modelo, como por exemplo a convecção.

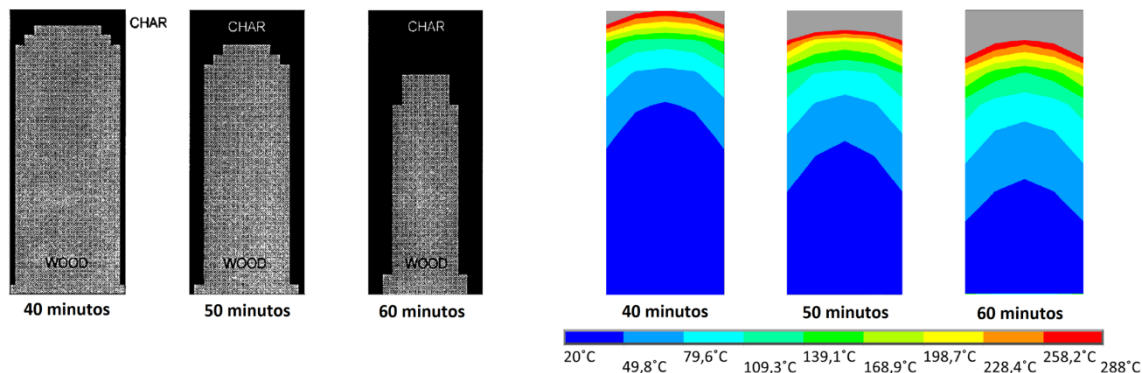


Figura 29 - Comparação da evolução da carbonização com o modelo com malha de ar

Neste caso, para o modelo contemplando malha de ar nas cavidades, sob o ponto de vista da carbonização apresenta resultados semelhantes ao modelo que contempla a radiação descritos na Figura 28. Contudo, a diferença assenta uma vez mais na interface com as cavidades, dado que a temperatura nas laterais da viga de madeira apresenta valores significativamente superiores comparativamente ao modelo anterior.

Permite-se assim concluir, conforme concluído para o campo de temperatura, que o modelo com vazio nas cavidades, considerando apenas a radiação, apresenta resultados mais favoráveis ao ensaio experimental. Deste modo, foi o selecionado como base, para a análise de novos modelos apresentados no capítulo seguinte.

5.3.3 Secção residual

Através das imagens referentes à evolução da carbonização presentes nas Figura 28 29, determinou-se a secção residual dos elementos de madeira. Para tal, utilizou-se o programa *ImageJ*, que permite relacionar os pixéis de uma determinada imagem com dimensões conhecidas e definir secções delimitadas por cores.

Sabendo a área total do elemento de madeira e a área carbonizada, calculou-se a secção residual através da equação 33.

$$Secção\ Residual\ [\%] = \frac{A_{total} - A_{carbonizada}}{A_{total}} \times 100\% \quad (31)$$

Na Tabela 15 encontra-se apresentados os resultados da secção residual nos instantes de tempo analisados, para ambos os modelos em estudo.

Tabela 15 - Secção residual do modelo numérico validado

Modelo	Área [mm ²]	Secção residual [%]		
		40 minutos	50 minutos	60 minutos
[89x38]+16 Sem ar	3382	98,8%	92,1%	86,5%
[89x38]+16 Com ar	3382	98,2%	91,9%	87,4%

NOVOS MODELOS PARAMÉTRICOS EM ESTUDO

- 6.1 Modelos paramétricos em estudo
- 6.2 Modelo de elementos finitos
- 6.3 Resultados
- 6.4 Discussão dos resultados

6 NOVOS MODELOS PARAMÉTRICOS EM ESTUDO

Após o estudo e a validação do modelo numérico do capítulo anterior, é possível obter resultados do campo de temperaturas nos pontos de controlo, da resistência ao fogo de acordo com o critério de isolamento e a secção residual ao fim de determinados instantes para elementos construtivos sob as mesmas condições, diferenciando parâmetros geométricos, como a largura, a altura dos perfis de madeira e a espessura da camada de gesso.

Para determinar a distribuição de temperaturas não uniforme na secção transversal, foram realizadas um total de 12 simulações, incluindo o modelo já descrito, com o objetivo de verificar com a melhor clareza qual a influência dos diferentes parâmetros na evolução da temperatura no elemento construtivo em estudo.

6.1 Modelos paramétricos em estudo

A Figura 30 representa o modelo geral utilizado, com os parâmetros geométricos H , W , e T_g a variar, cujos valores se encontram descritos na Tabela 16.

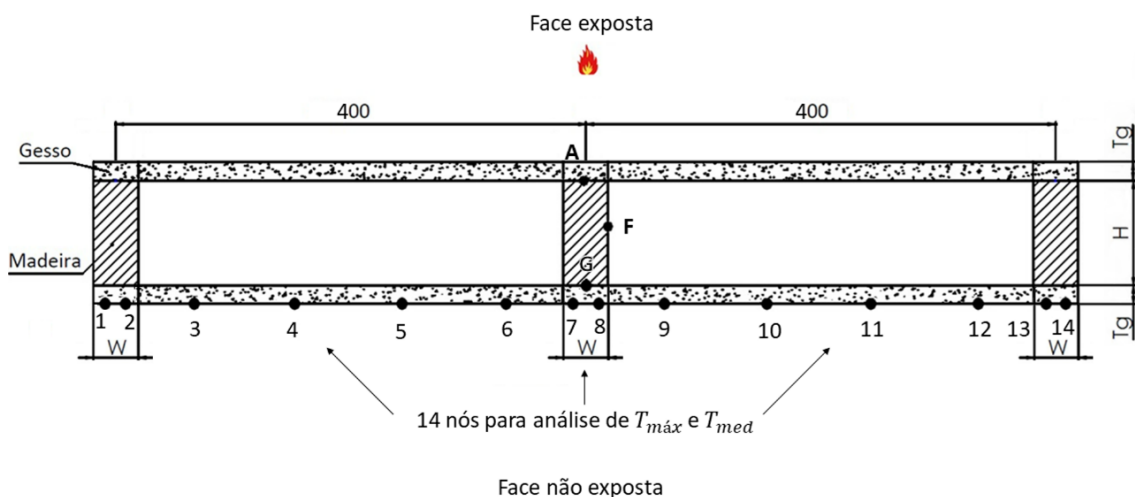


Figura 30 - Modelo geométrico geral e pontos em análise

Tabela 16 - Dimensões dos parâmetros geométricos em estudo

$[H \times W + T_g]$	
89x38+16	89x76+16
115x38+16	115x76+16
140x38+16	140x76+16
89x38+32	89x76+32
115x38+32	115x76+32
140x38+32	140x76+32

Para estudar o comportamento dos modelos construtivos sob a ação do fogo, os materiais foram considerados sempre os mesmos nas 12 simulações, com o gesso do tipo F na proteção e madeira lamelada GL32H para os perfis estruturais, com as propriedades descritas anteriormente.

A modelação das diferentes geometrias dos modelos em estudo foi auxiliada por uma folha de cálculo em Excel, com representação da posição e funções descritas na tabela do Anexo 4. Após introduzidos as principais dimensões variáveis (H, W e T_g) calculam-se diretamente as coordenadas dos pontos a introduzir no *ANSYS® Academic Student 2022 R1* para a modelação da geometria do modelo.

6.2 Modelo de elementos finitos

6.2.1 Malhas e condições fronteira

Dado que o objetivo principal é estudar o efeito da proteção em elementos construtivos de madeira submetidos à ação do fogo, analisando os resultados de forma comparativa entre os mesmos, é necessário que a malha de elementos finitos e as condições fronteiras impostas sejam as mais similares possíveis.

Nestes modelos a análise térmica é igualmente num plano bidimensional, para determinar o campo de temperaturas na secção transversal do modelo. Os elementos finitos utilizados no programa *ANSYS® Academic Student 2022 R1* serão os PLANE55 de quatro nós e o elemento superficial SURF151, pelos motivos já evidenciados no capítulo anterior. Manteve-se o tamanho da aresta de cada elemento de 10 mm, sendo a malha gerada automaticamente pelo programa.

Os diferentes modelos estarão sujeitos à curva de incêndio padrão descrita de acordo com a norma ISO834 [33] numa das faces do modelo (Figura 24).

De igual modo, como o modelo anterior foi validado, todos os restantes modelos estão sujeitos a condições fronteira idênticas (Figura 24). A condição inicial de temperatura considerada foi de 20°C, com as emissividades para o fogo e o gesso de 1 e 0,8, respetivamente. Os coeficientes de convecção constantes utilizados foram de 25 W/m²K para a face exposta ao fogo e 9 W/m²K para a face não exposta [4]. Nas faces laterais do modelo não foram consideradas transferências de calor, admitindo a condição adiabática.

Dada a alteração da geometria dos modelos, foi necessário alargar o tempo de simulação para 4 horas de duração, garantindo deste modo a carbonização evoluída para todos os modelos simulados. O intervalo de tempo definido foi de 60 segundos, com um incremento mínimo é de 1 segundo e o máximo de 60 segundos. O critério de convergência utilizado é baseado no fluxo de calor com uma tolerância admitida de 0,9. A verificação deste critério foi realizada por uma norma proposta pelo próprio programa, conforme referido anteriormente.

6.3 Resultados

Após realizar as simulações obtiveram-se os resultados. Partindo da evolução da temperatura nos diferentes modelos, a partir dos quais, e com a introdução da temperatura limite a partir da qual há formação da camada carbonizada, é possível observar a evolução da mesma nas imagens para diferentes instantes de tempo, o que posteriormente permite calcular as secções residuais e a resistência ao fogo.

Nesta dissertação obtiveram-se resultados para 12 simulações, utilizando 6 secções transversais diferentes para as vigas de madeira (H-altura e W-largura) e 2 espessuras de proteção diferentes (T_g).

Para analisar a evolução da temperatura na face não exposta ao fogo, recorreu-se a doze pontos nodais com as localizações representadas na Figura 30.

6.3.1 Temperaturas

Por forma a poder estudar o comportamento térmico nos diferentes modelos sob ação do fogo, obtiveram-se resultados para os campos de temperaturas dos modelos completos para diferentes instantes de tempo. Na Tabela 17 e Tabela 18 são apresentados os resultados térmicos para os modelos do tipo [89xW+ T_g], para os

instantes de tempo de 40, 60, 90 e 120 minutos, de acordo com a mesma escala de temperatura para melhor análise da evolução térmica no modelo completo.

Tabela 17 - Evolução térmica dos modelos do tipo [89xW+16]

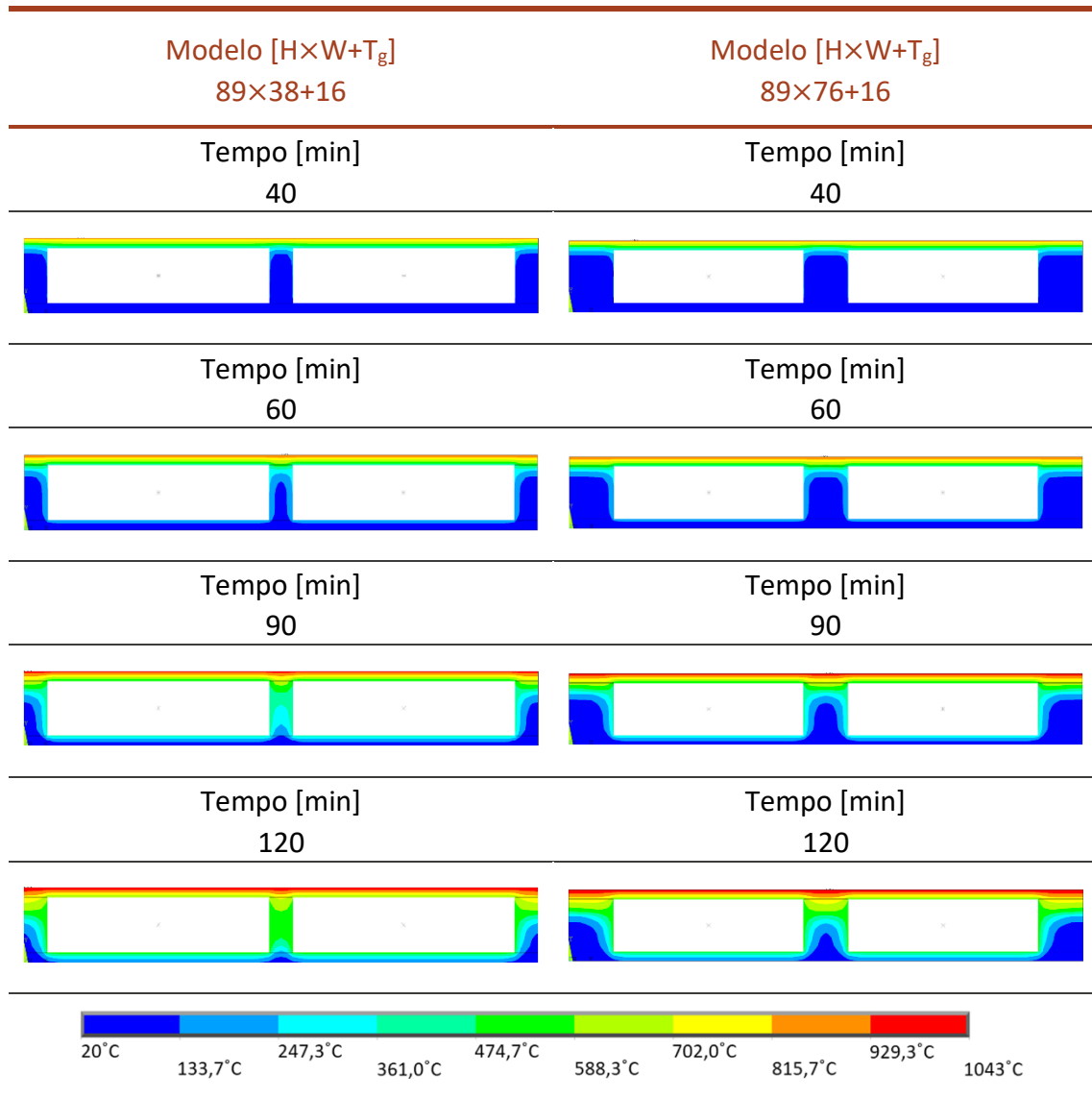
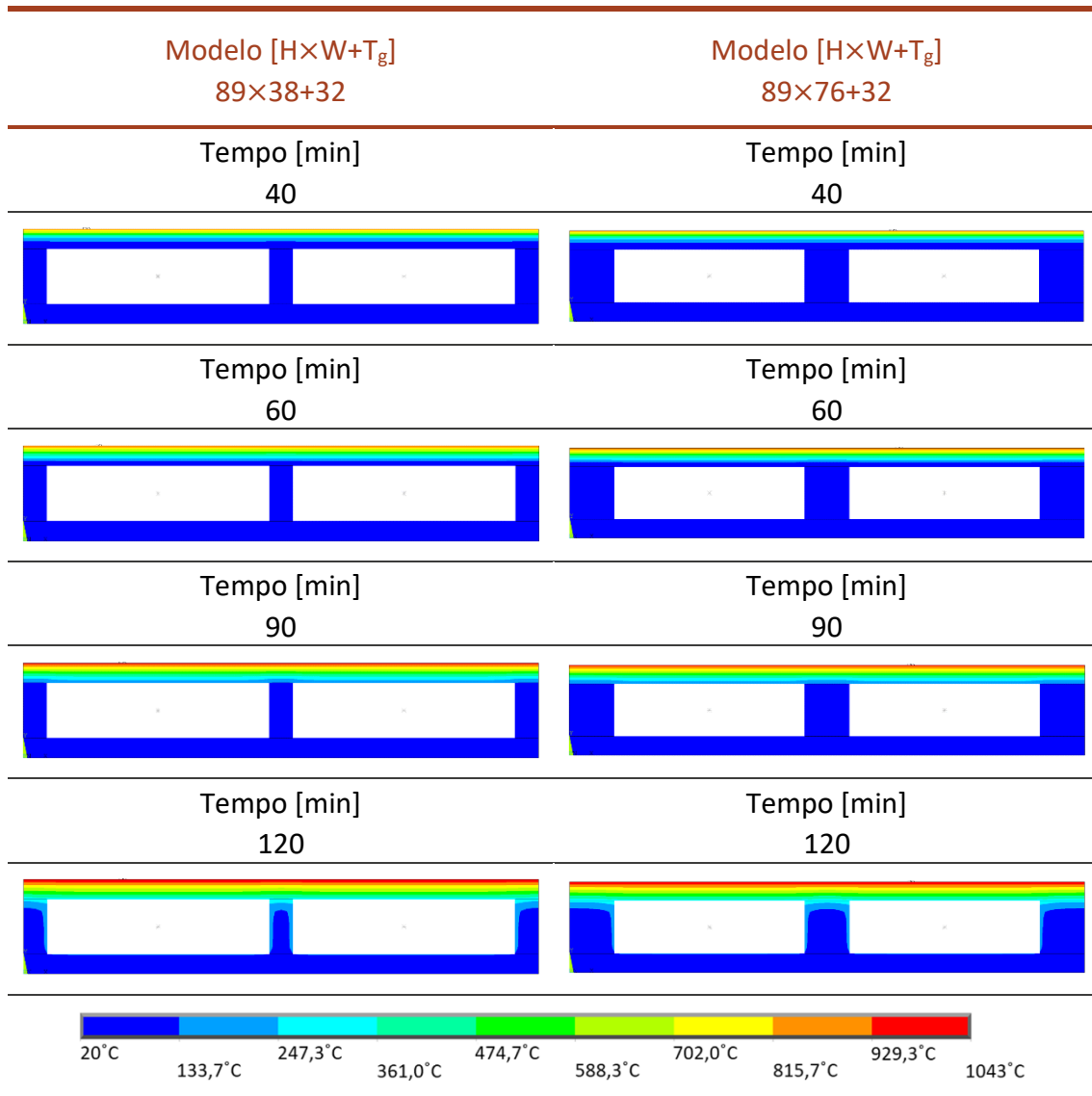


Tabela 18 - Evolução térmica dos modelos do tipo [89xW+32]



Por análise direta das figuras presentes nas tabelas, verifica-se que o aumento da largura (W) da viga promove uma maior resistência ao aumento de temperatura na zona central desta. Contudo, comparando a Tabela 17 com a Tabela 18 facilmente se conclui que a espessura da camada de gesso é um parâmetro de maior relevo nesta matéria.

Os resultados para os restantes modelos encontram-se apresentados no Anexo 5, sendo que no comportamento térmico sob uma análise paramétrica, apresenta resultados semelhantes aos aqui descritos.

Para uma análise mais detalhada da evolução da temperatura nos modelos, com especial atenção à viga central, analisaram-se os campos de temperatura em pontos de

controlo. Estes pontos foram posicionados a meio das interfaces vigas de madeira com o gesso e com a cavidade, conforme analisado para a validação do modelo de base apresentado no capítulo anterior. Deste modo, manteve-se a nomenclatura destes pontos, A, F e G (ver Figura 30).

Os resultados do campo de temperaturas para os modelos do tipo $[89 \times W + T_g]$ nos pontos em análise encontram-se descritos nos gráficos abaixo.

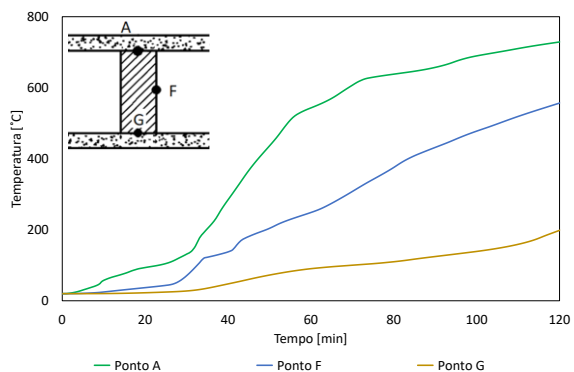


Figura 31 – Resultados de temperatura para os pontos A, F e G do modelo $[89 \times 38 + 16]$

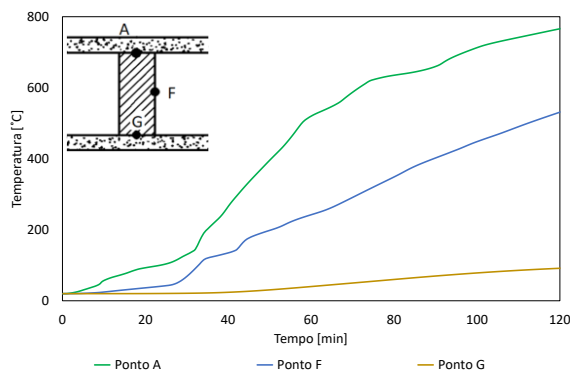


Figura 32 – Resultados de temperatura para os pontos A, F e G do modelo $[89 \times 76 + 16]$

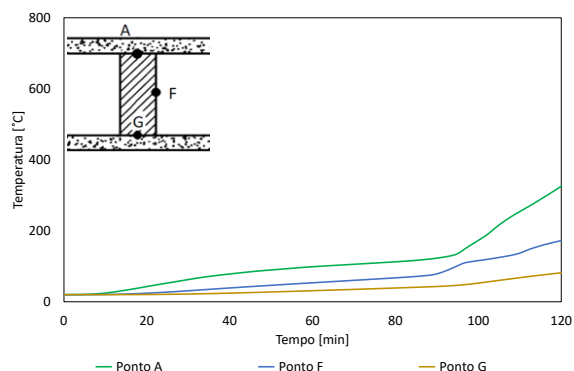


Figura 33 – Resultados de temperatura para os pontos A, F e G do modelo $[89 \times 38 + 32]$

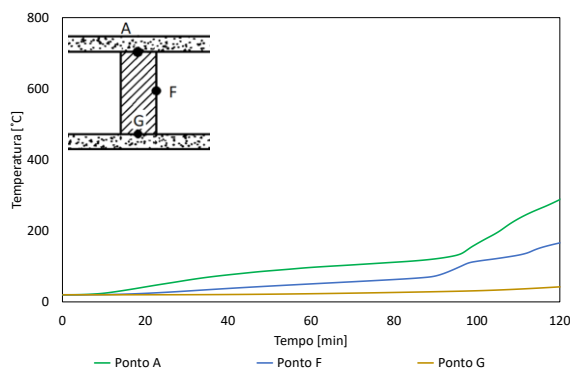


Figura 34 – Resultados de temperatura para os pontos A, F e G do modelo $[89 \times 76 + 32]$

Analisando os gráficos da esquerda para a direita, ou seja, comparando com o aumento da largura (W) verifica-se o já concluído, em que a principal diferença verificada deve-se ao ponto G, posicionado a meio da fronteira entre a madeira e o gesso da face não exposta. Numa comparação vertical de cima para baixo, traduzida pela duplicação da camada protetora de gesso, verifica-se que para os três pontos o aumento de temperaturas foi significativamente mais lento.

Os resultados do campo de temperaturas para os modelos do tipo [115xW+T_g] nos pontos em análise encontram-se descritos nos gráficos seguintes.

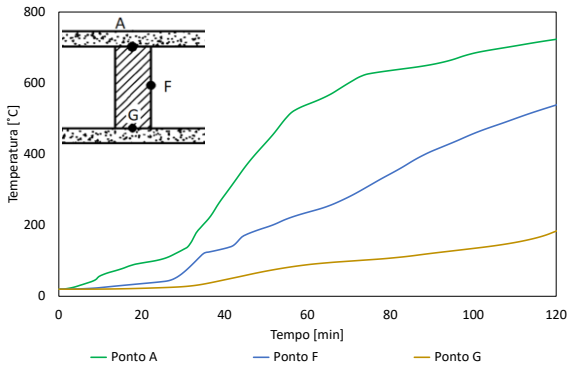


Figura 35 – Resultados de temperatura para os pontos A, F e G do modelo [115x38+16]

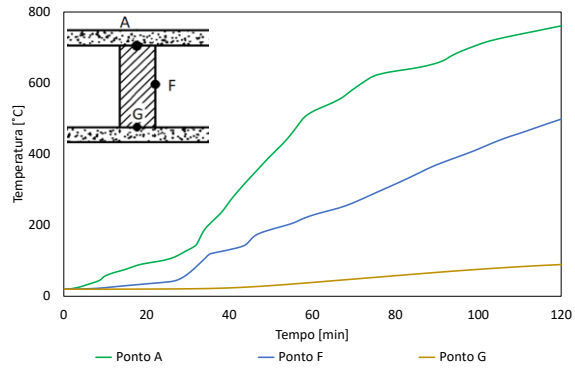


Figura 36 – Resultados de temperatura para os pontos A, F e G do modelo [115x76+16]

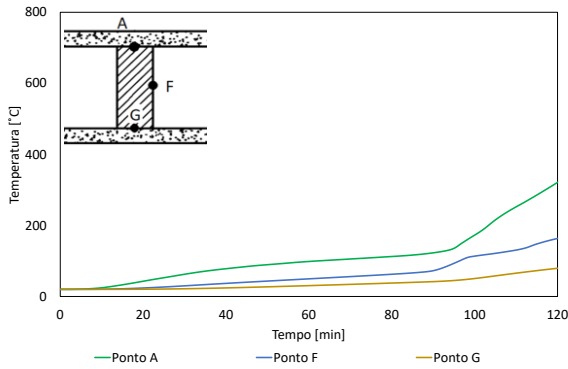


Figura 37 – Resultados de temperatura para os pontos A, F e G do modelo [115x38+32]

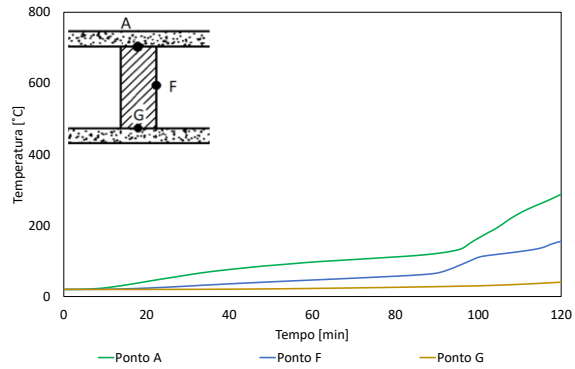


Figura 38 – Resultados de temperatura para os pontos A, F e G do modelo [115x76+32]

Por último, os resultados do campo de temperaturas para os modelos do tipo [140xW+T_g] nos pontos em análise encontram-se descritos nos gráficos abaixo.

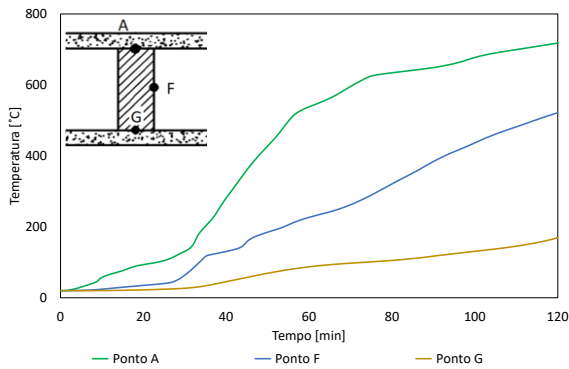


Figura 39 – Resultados de temperatura para os pontos A, F e G do modelo [140x38+16]

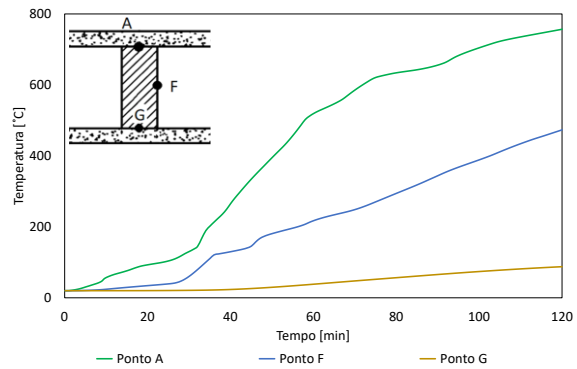


Figura 40 – Resultados de temperatura para os pontos A, F e G do modelo [140x76+16]

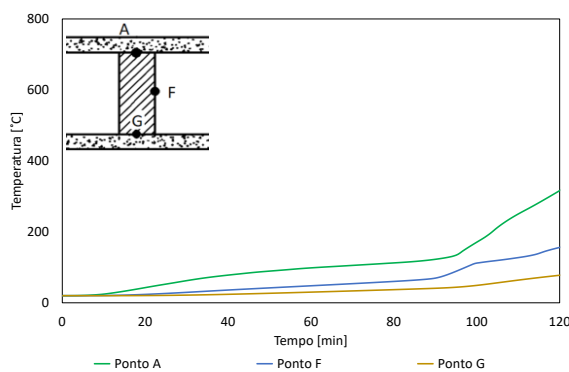


Figura 41 – Resultados de temperatura para os pontos A, F e G do modelo [140x38+32]

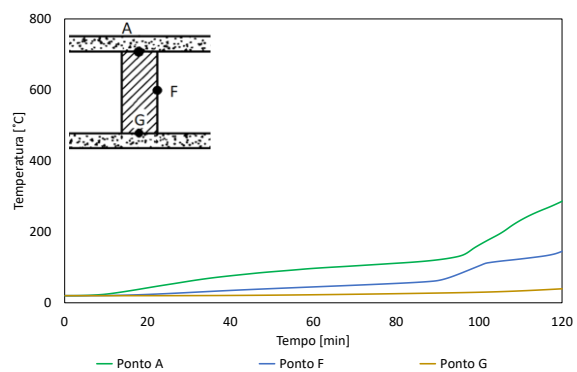


Figura 42 – Resultados de temperatura para os pontos A, F e G do modelo [140x76+32]

Para os modelos do tipo $[115 \times W + T_g]$ e $[140 \times W + T_g]$ também se verifica o aumento da temperatura mais lento para o ponto G quando aumentada a largura (W) da viga, mantendo-se inequivocamente como fator predominante a espessura da camada protetora de gesso.

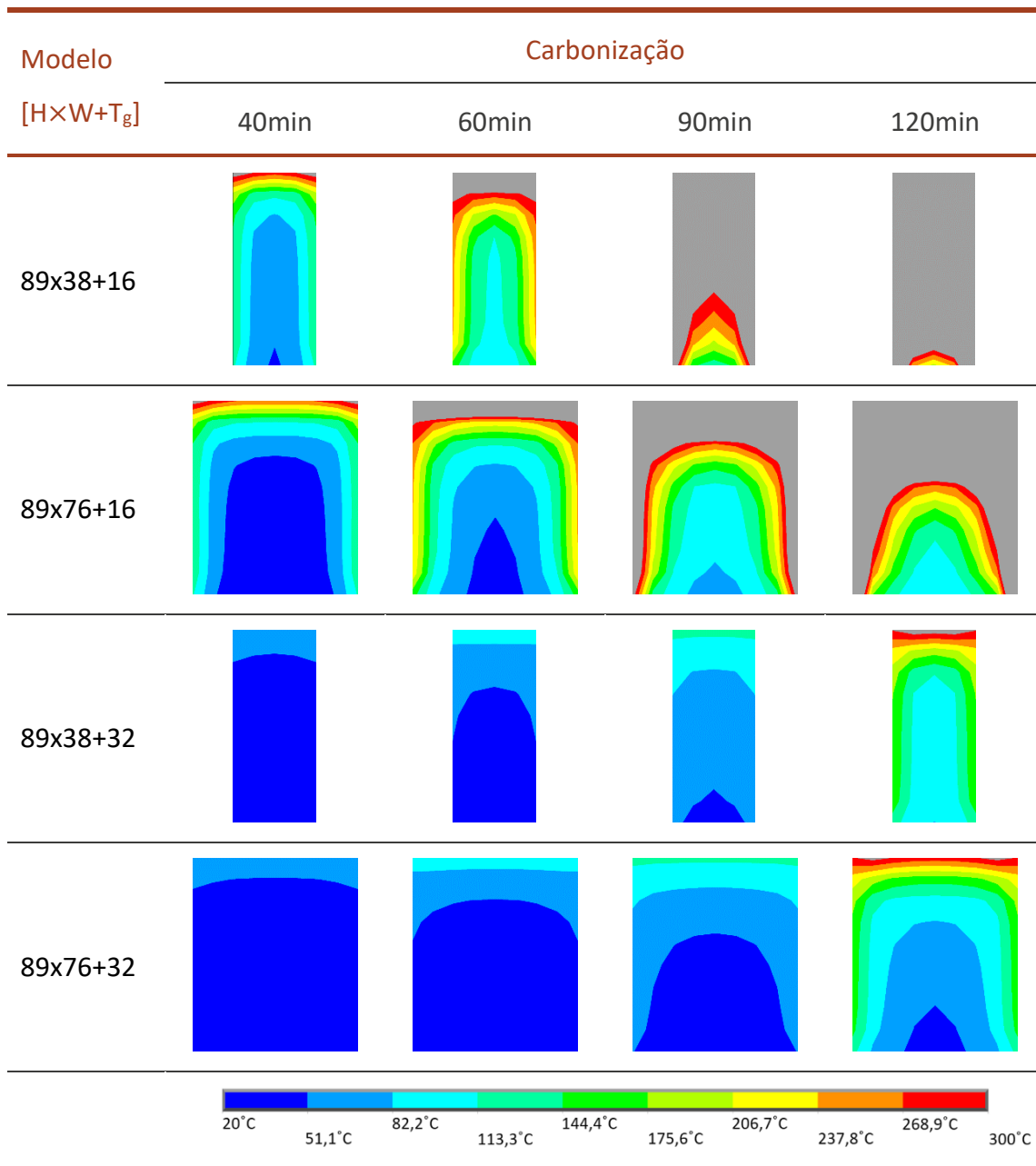
O aumento da altura (H) da viga de madeira promove uma ligeira variação no campo de temperaturas nos pontos em análise, diminuindo a temperatura nos três pontos.

6.3.2 Carbonização

A presença de altas temperaturas na madeira provoca a carbonização da mesma. A imposição do limite da temperatura na formação da camada carbonizada de 300°C , permitiu, por observação direta dos modelos numéricos, analisar a quantidade de carbonização para um determinado instante de tempo. Deste modo, a secção a cinza, representa a área carbonizada da madeira.

A Tabela 19 permite analisar visualmente as diferenças da progressão da carbonização entre os modelos em estudo para os instantes de tempo de exposição ao fogo de 40, 60, 90 e 120 minutos.

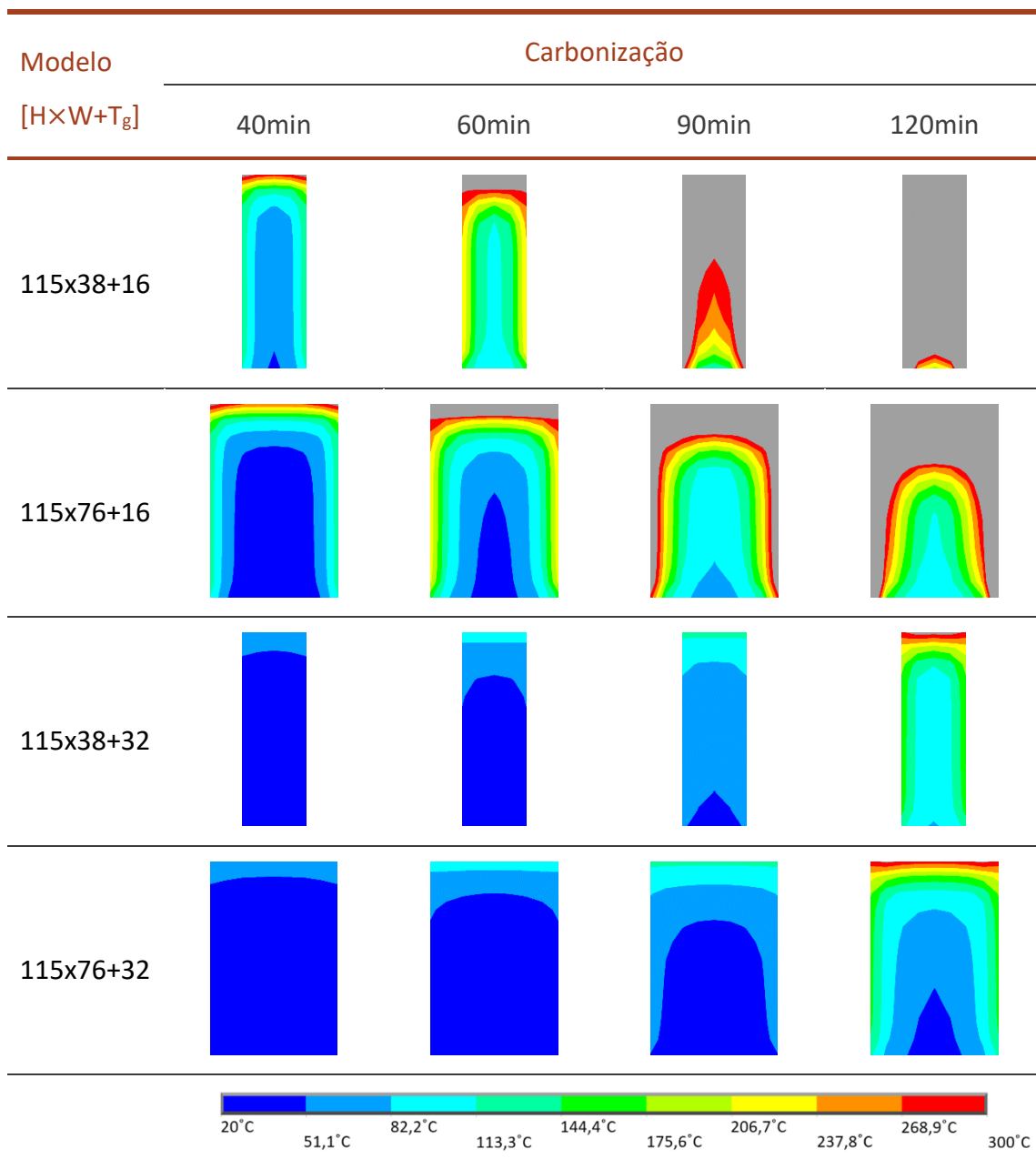
Tabela 19 - Progressão da carbonização para os modelos do tipo [89×W+T_g]



Por observação direta nas imagens da carbonização, verifica-se que para o modelo anteriormente validado de menores dimensões [89×38+16], no instante de 120 minutos a madeira encontra-se praticamente carbonizada. De igual modo, observa-se

que com o aumento da largura das vigas de madeira promove um aumento na secção residual para os mesmos instantes de tempo. Analisando o aumento da espessura da camada protetora de gesso, constata-se que este desenvolve o papel protagonista na resistência da madeira a carbonizar.

Tabela 20 - Progressão da carbonização para os modelos do tipo [115×W+T_g]

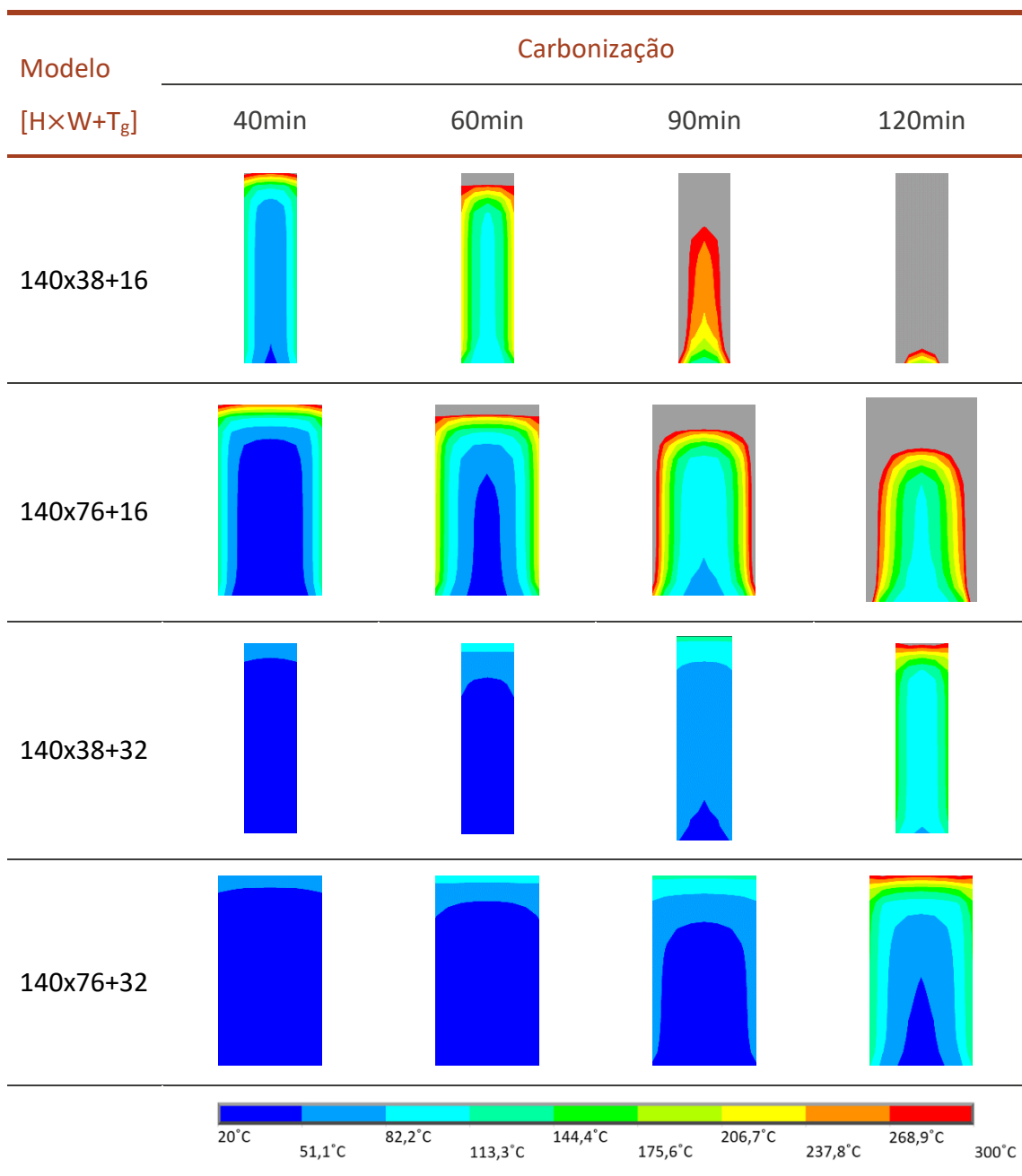


Com o comportamento na evolução da carbonização semelhante à Tabela 19, na Tabela 20, onde se apresenta a progressão da carbonização para os elementos de tipo

[115×W+T_g], observa-se o aumento na capacidade de retardar a carbonização quando aumentada a largura da viga e com o aumento da espessura da camada protetora. Por análise ao instante de 120 minutos, facilmente se conclui que o aumento da espessura da camada protetora de gesso é um fator mais relevante na resistência da estrutura ao fogo, que o aumento da largura da viga de madeira.

Na Tabela 21 encontram-se os resultados obtidos para os modelos do tipo [140×W+T_g].

Tabela 21 - Progressão da carbonização para os modelos do tipo [140×W+T_g]



De acordo com a Tabela 21, para os modelos com menor proteção de gesso, pode-se aferir que a carbonização se inicia aproximadamente aos 40 minutos. Por outro lado, para o modelo [140×76+32] apenas ao fim de 120 minutos surge a formação de carbonização.

Numa análise geral às tabelas apresentadas, constata-se que ao fim de 120 minutos aproxima-se a carbonização total da secção nos modelos em estudo de menor largura e simultaneamente com menor espessura da camada de gesso. De igual modo, também se verificou para modelos com a espessura da camada protetora de 32 mm, que ao fim de 40 minutos ainda não havia sido atingida a temperatura limite para a formação da camada de carbonização da madeira.

6.3.3 Resistência ao fogo

A análise térmica desenvolvida no Ansys, permite obter o campo de temperaturas ao longo de todo o modelo simulado. Desta forma, o estudo da resistência do modelo sob ação do fogo pode ser definida implementando o critério de isolamento, preconizado norma EN1363-1 [23], o que permite obter resultados de tempo a partir do qual o modelo perde a capacidade de resistir à exposição ao fogo apenas de um lado, sem transmissão significativa de calor do lado exposto para o não exposto. Outra abordagem importante é perceber a resistência da madeira através da determinação da secção residual para diferentes instantes de tempo resultante da ação do fogo.

6.3.3.1 Critério de isolamento

Os resultados obtidos nos pontos assinalados para o campo de temperaturas na face não exposta ao fogo permitem determinar a resistência ao fogo do modelo considerando o critério de isolamento de acordo com a norma EN1363-1 [23], em que, conforme explicado anteriormente, sugere analisar, para 14 nós posicionados na face não exposta como descrito na Figura 30, o aumento de temperatura média (T_{med}), limitado a 140°C acima da temperatura inicial (T_0) considerada de 20°C, ou com base no aumento da temperatura máxima atingida num dos 14 nós ($T_{máx}$), limitado a 180°C acima a temperatura inicial (T_0). Estes nós, foram numerados de 1 a 14, da esquerda para a direita em todos os modelos, para se analisar o comportamento da evolução da temperatura ao longo da face não exposta.

Para todos os modelos com espessura de camada de gesso superior, durante a simulação de 4 horas, não foram atingidas as temperaturas limite impostas pelo critério de isolamento de acordo com a norma EN1363-1 [23], permitindo assim validar os modelos em questão para o critério de isolamento. Deste modo, serão

apresentados os gráficos da evolução de temperaturas num dos nós posicionados na face não exposta em que é atingida a temperatura máxima, bem como a temperatura média dos 14 nós analisados e determinado o instante de tempo em que são atingidos os limites impostos para o isolamento.

Na Figura 43 é apresentado o gráfico da temperatura da face não exposta para o modelo [89x38+16], bem como o critério de isolamento referente à temperatura, definido pelo aumento da temperatura inicial em 140 °C e 180 °C.

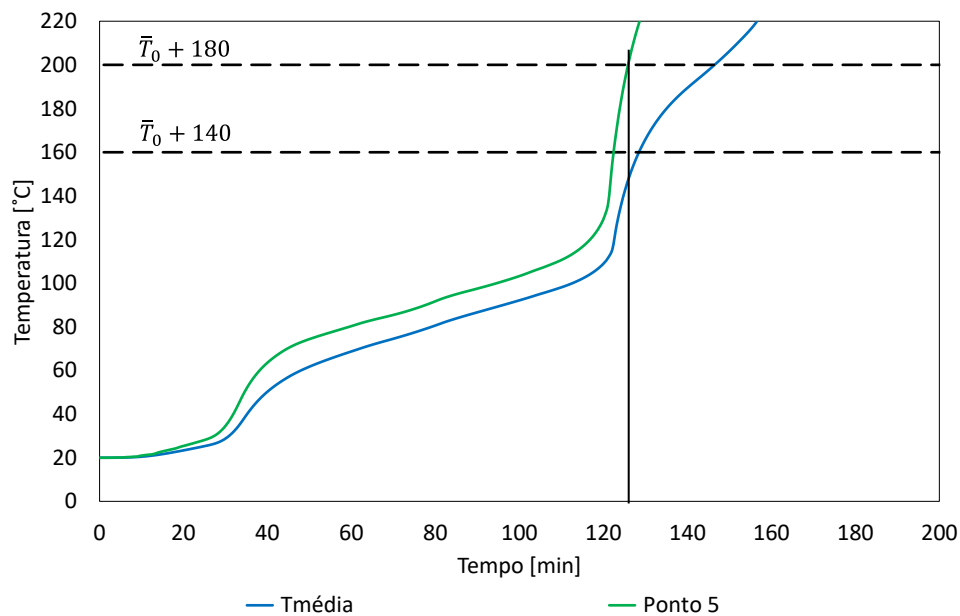


Figura 43 - Campo de temperatura na face não exposta para o modelo [89x38+16]

Na análise térmica apenas são consideradas temperaturas até os 200 minutos de exposição ao fogo, dado que, a temperatura delimitada pelo critério de isolamento é atingida em todos os modelos com menor espessura de gesso dentro dos 200 minutos.

Para o modelo [89x76+16], os resultados referentes ao campo de temperaturas são apresentados no gráfico da Figura 44.



Figura 44 - Campo de temperatura na face não exposta para o modelo [89x76+16]

Na Figura 45 apresentam-se as temperaturas para o modelo [115x38+16].

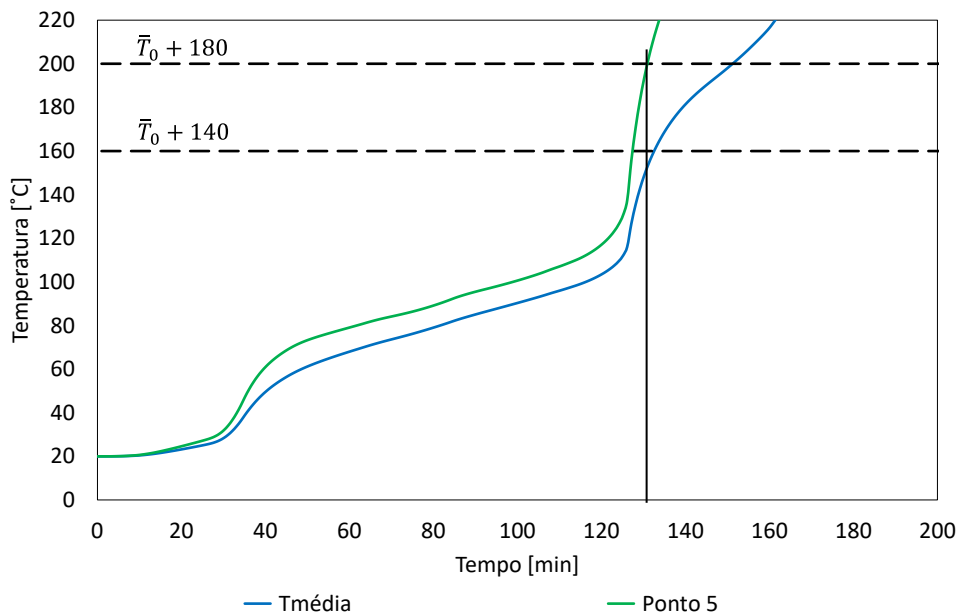


Figura 45 - Campo de temperatura na face não exposta para o modelo [115x38+16]

Na Figura 46 apresentam-se as temperaturas para o modelo [115x76+16].

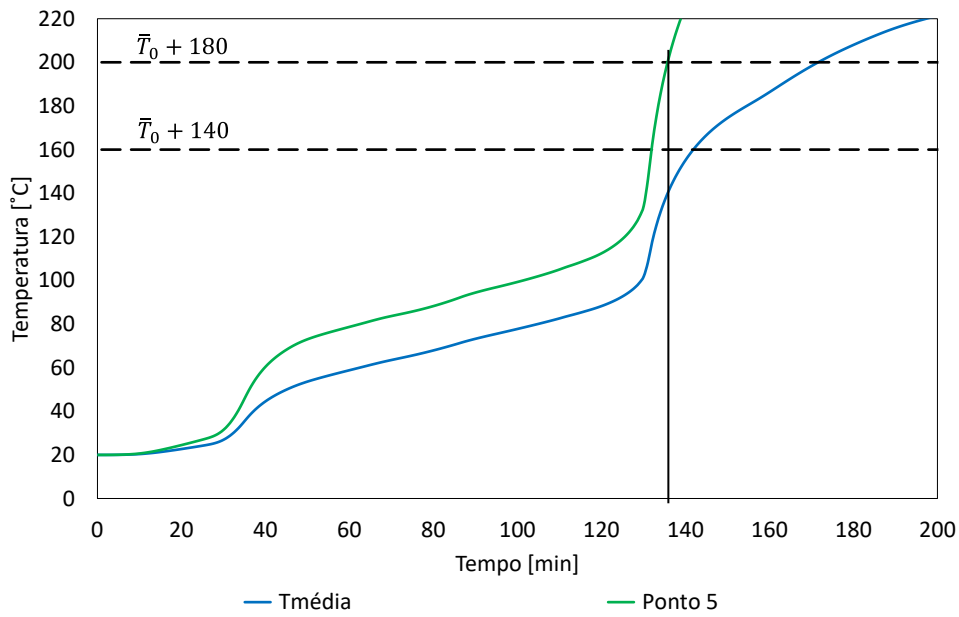


Figura 46 - Campo de temperatura na face não exposta para o modelo [115x76+16]

Por fim, nas Figura 47 e Figura 48 encontram-se as temperaturas para os modelos [140x38+16] e [140x76+16].

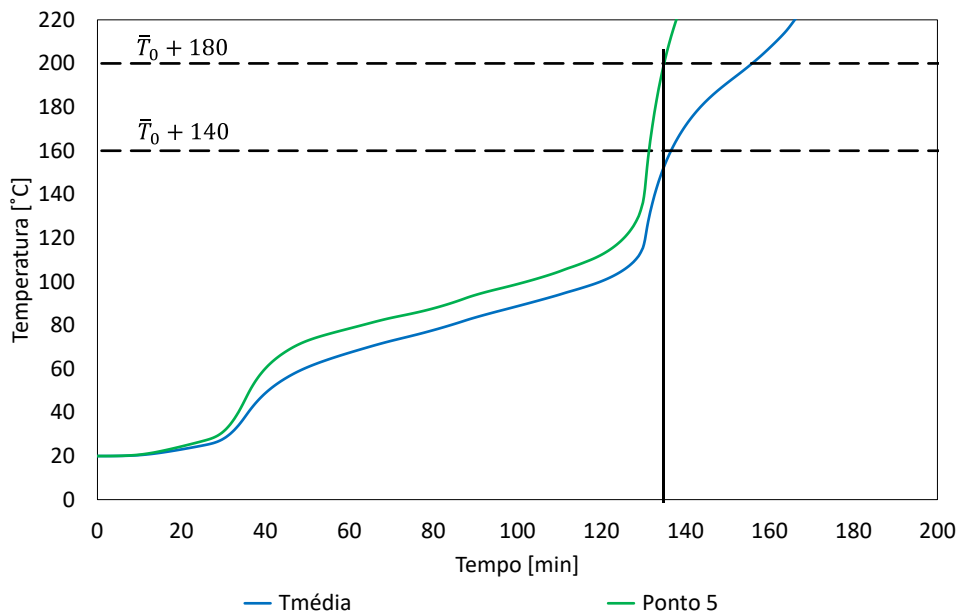


Figura 47 - Campo de temperatura na face não exposta para o modelo [140x38+16]

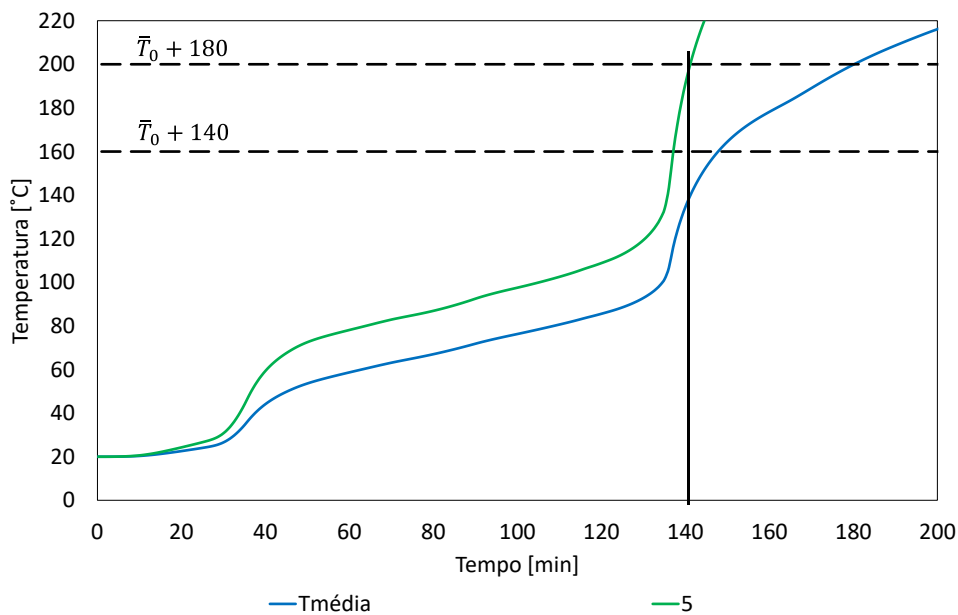


Figura 48 - Campo de temperatura na face não exposta para o modelo [140x76+16]

Como verificado nos gráficos, em todos os modelos o tempo limite para o critério de isolamento foi determinado através da temperatura máxima num ponto, posicionado na face não exposta de gesso a uma distância intermédia de duas vigas de madeira.

A partir dos resultados obtidos, foi possível determinar o índice de desempenho definido para o isolamento nos seis modelos testados com menor proteção de gesso. O tempo de resistência para os diferentes modelos de acordo com o critério de isolamento (t_{iso}) é apresentado na Tabela 22.

Tabela 22 - Resistência ao fogo dos modelos em estudo

Modelo [H×W+T _g]	t_{iso} [min]
89x38+16	127
89x76+16	130
115x38+16	131
115x76+16	136
140x38+16	135
140x76+16	141

Com os resultados apresentados, verifica-se que de acordo com o critério de isolamento, os modelos testados mostram que, para a mesma espessura de gesso (T_g) de 16 mm, o aumento da altura (H) da viga de madeira em aproximadamente 60% (de 89 mm para 140 mm), promove um aumento de tempo em 11%. Por sua vez a duplicação da largura (W) apenas influencia o tempo de resistência em 4,4%.

6.3.3.2 *Secção residual*

A madeira é um material combustível, e como tal vê as suas propriedades degradarem-se após ser ultrapassada a temperatura limite de formação da camada carbonizada. Contudo, a área residual não carbonizada mantém as suas capacidades estruturais. Para o cálculo da capacidade de carga é necessário determinar a secção transversal mínima que permite assegurar o compromisso estrutural a que o elemento poderá estar comprometido, daí o apresentar-se neste capítulo a determinação da secção residual da secção.

Assim, são obtidos os resultados da área residual de madeira não carbonizada, obtidos através da equação 31, para os instantes de tempo 40, 60, 90 e 120 minutos de acordo com a evolução da carbonização apresentada no capítulo anterior. Os resultados para os diferentes instantes de tempo são descritos na Tabela 23.

Tabela 23 - Secção residual dos modelos submetidos à ação do fogo nos instantes de 40, 60, 90 e 120 minutos

Modelo [H×W+T _g]	Área [mm ²]	Secção residual [%]			
		40min	60min	90min	120min
89x38+16	3382	99,4%	88,3%	20,5%	3,1%
89x76+16	6764	99,8%	90,7%	64,5%	38,6%
89x38+32	3382	100,0%	100,0%	100,0%	98,1%
89x76+32	6764	100,0%	100,0%	100,0%	99,7%
115x38+16	4370	99,7%	91,8%	30,1%	3,3%
115x76+16	8740	99,9%	93,0%	72,3%	48,9%
115x38+32	4370	100,0%	100,0%	100,0%	98,9%
115x76+32	8740	100,0%	100,0%	100,0%	99,8%
140x38+16	5320	99,8%	93,5%	44,5%	3,5%
140x76+16	10640	99,9%	94,3%	78,5%	56,1%
140x38+32	5320	100,0%	100,0%	100,0%	99,4%
140x76+32	10640	100,0%	100,0%	100,0%	99,9%

Deste modo, e com os resultados obtidos, é possível analisar com maior detalhe qual os efeitos produzidos na secção residual pela variação da geometria do gesso e da madeira.

6.4 Discussão dos resultados

A avaliação dos resultados centrou-se na comparação entre modelos, considerando a variação das dimensões (H e W) da secção transversal das vigas de madeira e da espessura (T_g) da camada de gesso.

Os resultados térmicos apresentados permitem analisar a transferência de calor que é transmitida através de um determinado modelo em estudo, entre o lado que é

exposto ao fogo e o não exposto, em suma, permitem determinar a capacidade do isolamento (I) dos modelos submetidos sob ação do fogo numa das faces.

Da análise ao campo de temperaturas para os instantes de tempo de 40, 60, 90 e 120 minutos apresentados no Anexo 5, e considerando a mesma espessura de gesso, verifica-se para todos os modelos que o aumento da resistência térmica promovido pelo aumento da largura da viga de madeira foi significativamente inferior quando comparado com a situação de duplicação da camada de gesso. Este fenómeno foi também observado através dos gráficos que descrevem a curva de temperatura para os pontos de análise A, F e G, em que o aumento da camada de gesso revela ser o parâmetro principal na resistência térmica quando o modelo está sujeito à curva de fogo.

Para modelos com espessura de gesso (T_g) de 16 mm, conclui-se que a largura (W) apresenta menor impacto na resistência do modelo ao fogo de acordo com o critério de isolamento quando comparado com a altura (H). Contudo, no cálculo da secção residual verifica-se que para os instantes de tempo de 90 e 120 minutos, o aumento da altura (H) das vigas, que se traduz no aumento da cavidade e, portanto, num afastamento entre as placas de gesso, produz um aumento na secção residual inferior ao provocado pela variação da largura (W).

No estudo da secção residual obtiveram-se resultados com maior detalhe para quatro instantes de tempo. De acordo com as imagens da carbonização e com os valores apresentados na Tabela 23, os modelos com menor largura de viga e simultaneamente menor espessura de gesso ao fim de 40 minutos já apresentam alguma carbonização e para os 120 minutos decorridos, toda a viga de madeira encontra-se praticamente carbonizada. Contrariamente, todos os modelos com espessura de gesso superiores, apenas ao fim de 120 minutos de exposição ao fogo apresentam início de formação de camada carbonizada.

Ainda de acordo com os resultados da secção residual, é possível analisar os efeitos consequentes da variação de cada parâmetro. Para o caso do aumento da altura (H) das vigas de madeira, sem a alteração da restante geometria, resulta numa secção residual superior, com influência máxima para os 90 minutos na ordem de 24%. Por sua vez, com especial atenção na largura (W) das vigas, o seu aumento favorece a resistência ao fogo, com maior impacto para os 120 minutos de 52,6%. Por fim, a variação da espessura (T_g) de gesso de 16mm para 32mm, permite ao modelo maior resistência ao fogo, com principal importância nos 120 minutos, com aproximadamente 96% de aumento da secção residual.

CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

- 7.1 Conclusões
- 7.2 Propostas de trabalhos futuros

7 CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

7.1 Conclusões

A opção de utilizar a madeira como recurso para estruturas, com eventual revestimento a gesso deve assentar em critérios claros e objetivos. Devem ser reconhecidas as suas características físicas e térmicas, não descurando as crescentes preocupações ambientais. Dada a madeira ser um material renovável, é por si só um material de excelência no que diz respeito a questões ambientais diretas e indiretas, atendendo à economia de energia associada ao seu processo de transformação. Com base neste facto, têm vindo a ser desenvolvidos diversos estudos experimentais e numéricos com o intuito de melhorar a aplicação deste material em elementos construtivos.

Esta dissertação teve como principal objetivo o estudo do efeito da proteção em elementos construtivos de madeira submetidos à ação do fogo, apresentando um modelo numérico para prever a resistência ao fogo, pelo critério de isolamento e determinação da secção residual da madeira, para elementos de parede em madeira revestidas com placas de gesso. Para tal, no seu desenvolvimento utilizaram-se métodos numéricos, que através de análises térmicas em regime transiente, permitem determinar a distribuição de temperaturas na secção transversal dos modelos.

Inicialmente o modelo numérico mais favorável, através do programa ANSYS® *Academic Student 2022 R1*, foi validado com resultados obtidos através de testes experimentais realizados à escala real pelos autores Takeda e Mehaffey presente no artigo *“WALL2D: a Model for Predicting Heat Transfer through Wood-Stud Walls Exposed to Fire”*.

De modo a estudar o comportamento de diferentes “paredes”, desenvolveram-se um total de doze modelos com variação da geometria, propondo diferentes dimensões para a secção transversal das vigas de madeira e diferentes espessuras da camada protetora de gesso.

Os resultados obtidos para o campo de temperaturas referentes aos modelos completos preveem inequivocamente ser a espessura de gesso o fator predominante na resistência ao aumento de temperatura provocado pela curva de fogo imposta

numa das faces dos modelos. Para estes dados a largura das vigas de madeira tem importância significativa para o caso de ser aplicada simultaneamente uma camada de gesso mais fina.

Através dos gráficos que descrevem a curva de temperaturas para os pontos A, F e G analisados, constata-se que a variação da largura do montante influencia mais significativamente os resultados referentes ao ponto F. Conclui-se também a partir destes resultados, que a espessura de gesso provoca a maior variação da evolução temperatura ao longo do tempo.

Os resultados obtidos pela aplicação do critério isolamento preconizado pela norma EN1363-1, foi determinado pela temperatura máxima num ponto da face não exposta incrementada de 180°C à temperatura inicial.

De acordo com os resultados conclui-se que todos os modelos com espessura de gesso superior preveem a conformidade para o isolamento em toda a duração da simulação. No caso de menor espessura de gesso, o aumento da secção da viga promove um impacto positivo na resistência ao fogo por isolamento, tendo obtido a variação máxima de 14 minutos (11%).

Com os resultados disponíveis para a carbonização e secção residual, rapidamente se conclui que ao fim de 120 minutos de exposição ao fogo, os modelos com menor espessura de proteção e menor área de secção transversal já se encontram com valores de secção residual desprezáveis.

Por fim, ainda no campo da secção residual, conclui-se uma vez mais que o parâmetro protagonista é a espessura de gesso, com aumentos da secção residual resultantes da variação deste na ordem de 95% para os 120 minutos. A área da secção transversal na viga de madeira promove também o aumento da secção residual com o aumento máximos entre a menor e maior área de secção de madeira para os 90 minutos de 58%.

7.2 Propostas de trabalhos futuros

No ponto anterior foram levantados alguns aspetos que, com o aprofundamento do tema poderão contribuir para uma melhor compreensão do comportamento de elementos construtivos divisórios em madeira sob a ação do fogo. Deste modo, seria interessante desenvolver novas análises térmicas com a introdução e a variação de elementos isolantes dentro das cavidades. Os resultados numéricos comparados e validados com testes experimentais, realizados em laboratório, poderiam permitir o desenvolvimento de materiais isolantes inovadores.

Seria também interessante a análise térmica em estruturas completas em madeira, considerando elementos ligadores em aço entre as diferentes vigas encarregados pela ligação da estrutura, bem como a junção entre as placas protetoras de gesso e os elementos estruturais de madeira. Assim, seria possível compreender a influência do aço presente na ligação no aumento de temperatura da madeira. O estudo da carbonização deste elemento de madeira em que é aplicada a ligação em aço, bem como o cálculo da secção residual na região da ligação, seria interessante para compreender a sua influência na capacidade de carga da estrutura.

**BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES
DE INFORMAÇÃO**

8 BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO

- [1] EN1995-1-2, *Eurocode 5: Design of timber structures - Part 1-2: Structural fire design*. Bruxelas: CEN, European Committee for Standardization, 2003.
- [2] EN1995-1-1, *Eurocode 5: Design of Timber Structures - Part 1-1: General - Structural Fire Design*. Bruxelas, CEN: European Committee for Standardization, 2005.
- [3] EN1991-1-1, *Eurocode 1 - Actions on Structures - General Actions - Densities, Self-Weight, Imposed Loads for Buildings*. British Standards Institute Staff, 2006.
- [4] EN1991-1-2, *Eurocode 1, Actions on Structures: General actions ; actions on structures exposed to fire. Part 1-2*. Bruxelas: CEN, 2002.
- [5] H. Takeda e J. R. Mehaffey, "WALL2D: A model for predicting heat transfer through wood-stud walls exposed to fire," 1998.
- [6] V. D. Thi, M. Khelifa, M. Oudjene, M. El Ganaoui, e Y. Rogaume, "Numerical simulation of fire integrity resistance of full-scale gypsum-faced cross-laminated timber wall," *International Journal of Thermal Sciences*, 2018.
- [7] H. Alves, L. Otani, P. Segundinho, e E. Morales, *Elastic moduli characterization of wood and wood products using the Impulse Excitation Technique*. 2015.
- [8] C. Brischke, "5 - Timber," in *Long-term Performance and Durability of Masonry Structures*, B. Ghiassi and P. B. Lourenço, Eds.: Woodhead Publishing, 2019, pp. 129-168.
- [9] P. Bajpai, "Chapter 7 - Properties of Wood," in *Biermann's Handbook of Pulp and Paper (Third Edition)*, P. Bajpai, Ed.: Elsevier, 2018, pp. 215-232.
- [10] N. Mascia e F. Rocco Lahr, "Remarks on orthotropic elastic models applied to wood," *Materials Research*, 2006.
- [11] M. Asif, "2 - Sustainability of timber, wood and bamboo in construction," in *Sustainability of Construction Materials*, J. M. Khatib, Ed.: Woodhead Publishing, 2009, pp. 31-54.
- [12] A. I. T. Construction e J. D. Linville, *Timber Construction Manual*. Wiley, 2012.
- [13] R. Mirski, D. Dziurka, M. Chuda-Kowalska, J. Kawalerczyk, M. Kuliński, e K. Łabęda, "The Usefulness of Pine Timber (*Pinus sylvestris* L.) for the Production of Structural Elements. Part II: Strength Properties of Glued Laminated Timber," 2020.
- [14] C. McPhee, J. Reed, e I. Zubizarreta, "Chapter 2 - Wellsite Core Acquisition, Handling and Transportation," in *Developments in Petroleum Science*: Elsevier, 2015, pp. 17-88.
- [15] H. Asakura, "19 - Removing gypsum from construction and demolition waste (C&DW)," in *Handbook of Recycled Concrete and Demolition Waste*, F. Pacheco-Torgal, V. W. Y. Tam, J. A. Labrincha, Y. Ding, and J. de Brito, Eds.: Woodhead Publishing, 2013, pp. 479-499.

- [16] Q. L. Yu e H. J. H. Brouwers, "Thermal properties and microstructure of gypsum board and its dehydration products: A theoretical and experimental investigation," 2012.
- [17] A. Barbosa, A. Ferraz, e G. Santos, "Chemical, mechanical and morphological characterization of gypsum obtained at Araripe, PE, Brazil," *Ceramica*, pp. 501-508, 2014.
- [18] A. Filho, M. Barros, M. Rolim, e Ê. Silva, "Incorporação de gesso para correção da salinidade e sodicidade de solos salino-sódicos," *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, pp. 247-252, 2012.
- [19] R. L. Chaney, "Chapter Two - Food Safety Issues for Mineral and Organic Fertilizers," in *Advances in Agronomy*, vol. 117, D. L. Sparks, Ed.: Academic Press, 2012, pp. 51-116.
- [20] Y. A. Cengel e A. J. Ghajar, *Heat and mass transfer: Fundamentals and applications*, 5 ed. New York, NY: McGraw-Hill Professional, 2014.
- [21] I. Rahmanian e Y. Wang, "Thermal Conductivity of Gypsum at High Temperatures – A Combined Experimental and Numerical Approach," *Acta Polytechnica*, 2009.
- [22] E. Madenci e I. Guven, *The Finite Element Method and Applications in Engineering using ANSYS®*, 2nd ed. Springer ed. 2015.
- [23] EN1363-1, *Fire resistance tests Part 1: General Requirements*. Bruxelas: CEN-European Committee for Standardization, 2020.
- [24] A. Y. Nassif, I. Yoshitake, e A. Allam, "Full-scale fire testing and numerical modelling of the transient thermo-mechanical behaviour of steel-stud gypsum board partition walls," *Construction and Building Materials*, 2014.
- [25] A. I. Bartlett, R. M. Hadden, e L. A. Bisby, "A Review of Factors Affecting the Burning Behaviour of Wood for Application to Tall Timber Construction," *Fire Technology*, 2019.
- [26] P. Clancy, "Time and probability of failure of timber framed walls in fire," Victoria University of Technology, 1999.
- [27] B. Jones, "Performance of Gypsum Plasterboard Assemblies Exposed to Real Building Fires," School of Engineering University of Canterbury, 2001.
- [28] *Decreto-Lei nº 220/2008 de 12 de novembro (Regime Jurídico de Segurança Contra Incêndio em Edifícios - RJSCIE)*, Portugal, 2008.
- [29] EN1365-1, *Fire resistance tests for loadbearing elements - Part 1: Walls*. Bruxelas: CEN-Europ. Brussels: European Committee for Standardization, 2013.
- [30] EN1364-1, *Fire resistance tests for non-loadbearing elements. Part 1: Walls*. CEN- European Committee for Standardization, 2015.
- [31] EN13501-2, *Fire classification of construction products and building elements - Part 2: Classification using data from fire resistance tests, excluding ventilation services*. Bruxelas: CEN- European Committee for Standardization, 2016.
- [32] *Decreto-Lei nº123/2019, 1ª série de 18 de outubro 2019 (Regime Jurídico de Segurança Contra Incêndio em Edifícios - RJSCIE)*, Portugal, 2019.
- [33] *ISO 834-1-1999: Fire-resistance Test - Elements of Building Construction - Part 1: requirements*. Genève, 1999.
- [34] S. K. Ghosh, "Manufacturing engineering and technology," *Journal of Materials Processing Technology*, 1991.

- [35] N. João e J. Amorim Faria, *Projecto de Estruturas de Madeira* (Edições Técnicas). Porto: Publindústria, 2009.
- [36] E. S. Correia, "Análise e Dimensionamento de Estruturas de Madeira," Dissertação apresentada para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, FEUP, Porto, 2009.
- [37] H. Group, "Glued Laminated Timber ", ed, (catalogue), Áustria, 2022, <https://www.hasslacher.com>, Acedido em (30/02/2022).
- [38] R. J. Ross, U. F. Service, e F. P. Laboratory, "Wood handbook : wood as an engineering material " 2010.
- [39] M. J. Moran e H. N. Shapiro, *Princípios de Termodinâmica para Engenharia.*, 4ª ed. LTC Editora., 2002.
- [40] A. Frangi, V. Schleifer, M. Fontana, e E. Hugi, "Experimental and Numerical Analysis of Gypsum Plasterboards in Fire," *Fire Technology*, 2009.
- [41] J. P. Holman, *Heat Transfer*. Nova York: McGraw Hill, 2010.
- [42] J. H. Lienhard, C. D. Publications, Ed. *A Heat Transfer Textbook*, 3 ed. Massachusetts, 2019.
- [43] I. Grattan-Guinness, "Chapter 26 - Joseph Fourier, Théorie analytique de la chaleur (1822)," in *Landmark Writings in Western Mathematics 1640-1940*, I. Grattan-Guinness, R. Cooke, L. Corry, P. Crépel, and N. Guicciardini, Eds. Amsterdam: Elsevier Science, 2005.
- [44] W. M. Rohsenow, J. P. Hartnett, e Y. I. Cho, *Handbook of Heat Transfer*, 3rd ed. New York: McGraw-Hill Education, 1998.
- [45] A. H. Buchanan e A. K. Abu, *Structural Design for Fire Safety*. John Wiley & Sons, 2017.
- [46] J. C. M. Coelho, *Energia e fluidos: transferência de calor*. Blucher, 2016.
- [47] A. J. Ede, N. S. Billington, e E. Ower, *An Introduction to Heat Transfer Principles and Calculations: International Series of Monographs in Heating, Ventilation and Refrigeration*. Elsevier Science, 2013.
- [48] T. L. Bergman, F. P. Incropera, D. P. DeWitt, e A. S. Lavine, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. Wiley, 2011.
- [49] R. H. White, *SFPE Handbook of fire protection engineering*. Massachusetts: National Fire Protection Association, Inc., 2002.
- [50] KnaufInsulaion. *reaction-to-fire-vs-fire-resistance*. Available: <https://www.knaufinsulation-ts.com/reaction-to-fire-vs-fire-resistance>, Acedido em (15/01/2022)
- [51] A. Frangi, V. Schleifer, e M. Fontana, "Design model for the verification of the separating function of light timber frame assemblies," *Engineering Structures*, 2010.
- [52] O. C. Zienkiewicz e R. L. Taylor, *The Finite Element Method - Solid and Fluid Mechanics, Dynamics and Non-Linearity*, 4th ed. Michigan: McGraw-Hill.
- [53] E. Fonseca e P. V. Real, "Análise não-linear do comportamento termomecânico de componentes em aço sujeitas ao fogo," 1999.
- [54] E. Fonseca, "Análise por Elementos Finitos do Comporamento de Tubangens sob a Ação de Fortes Gradientes Térmicos," Dissertação apresentada para

obtenção do grau de doutor em Engenharia Mecânica à Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2003.

- [55] R. ANSYS® Academic Research, Help System, Elements Reference, ANSYS, Inc.

ANEXOS

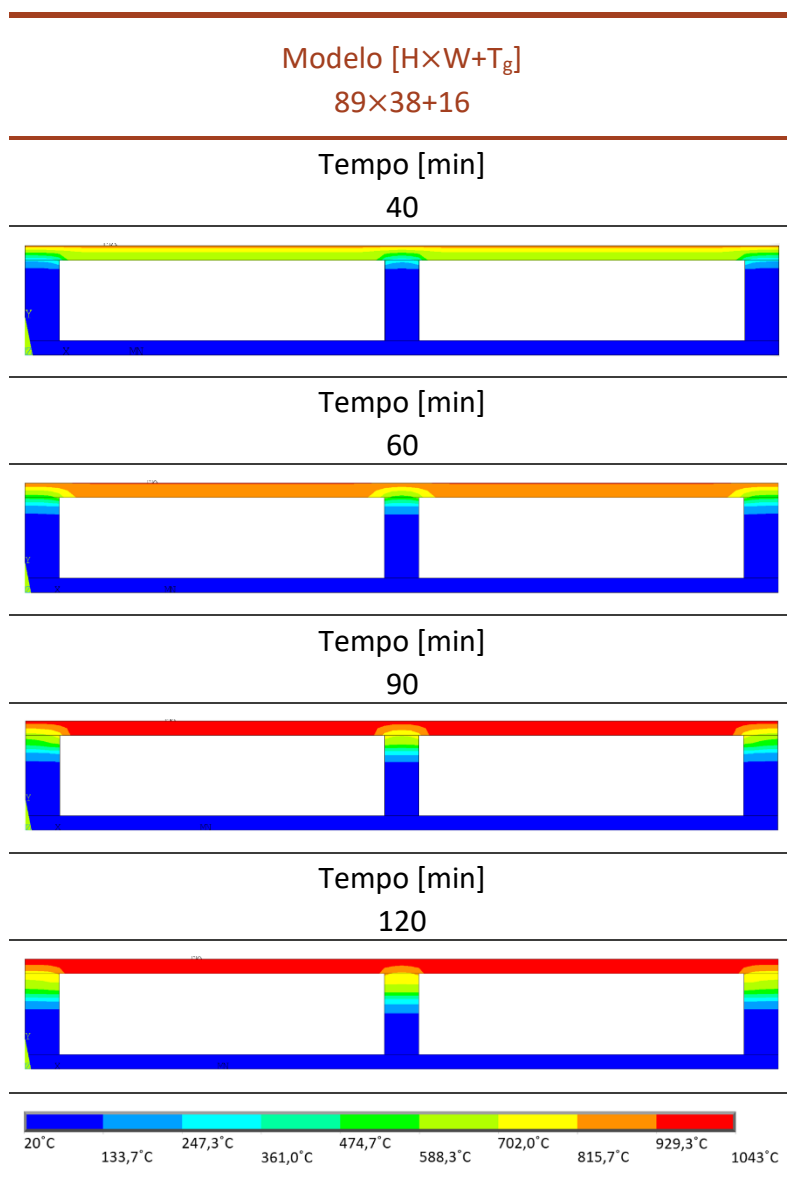
- 9.1 Anexo 1
- 9.2 Anexo 2
- 9.3 Anexo 3
- 9.4 Anexo 4
- 9.5 Anexo 5

9 ANEXOS

9.1 Anexo 1

Neste anexo são apresentados os resultados para o campo de temperaturas do modelo [89x38+16] considerando as fronteiras internas das cavidades como adiabáticas.

Tabela 24 - Evolução térmica do modelo [89x38+16] considerando cavidades adiabáticas



9.2 Anexo 2

Neste anexo é apresentado o código APDL para a curva de incêndio padrão descrita pela norma ISO834 [33], para a duração de 60 e 240 minutos.

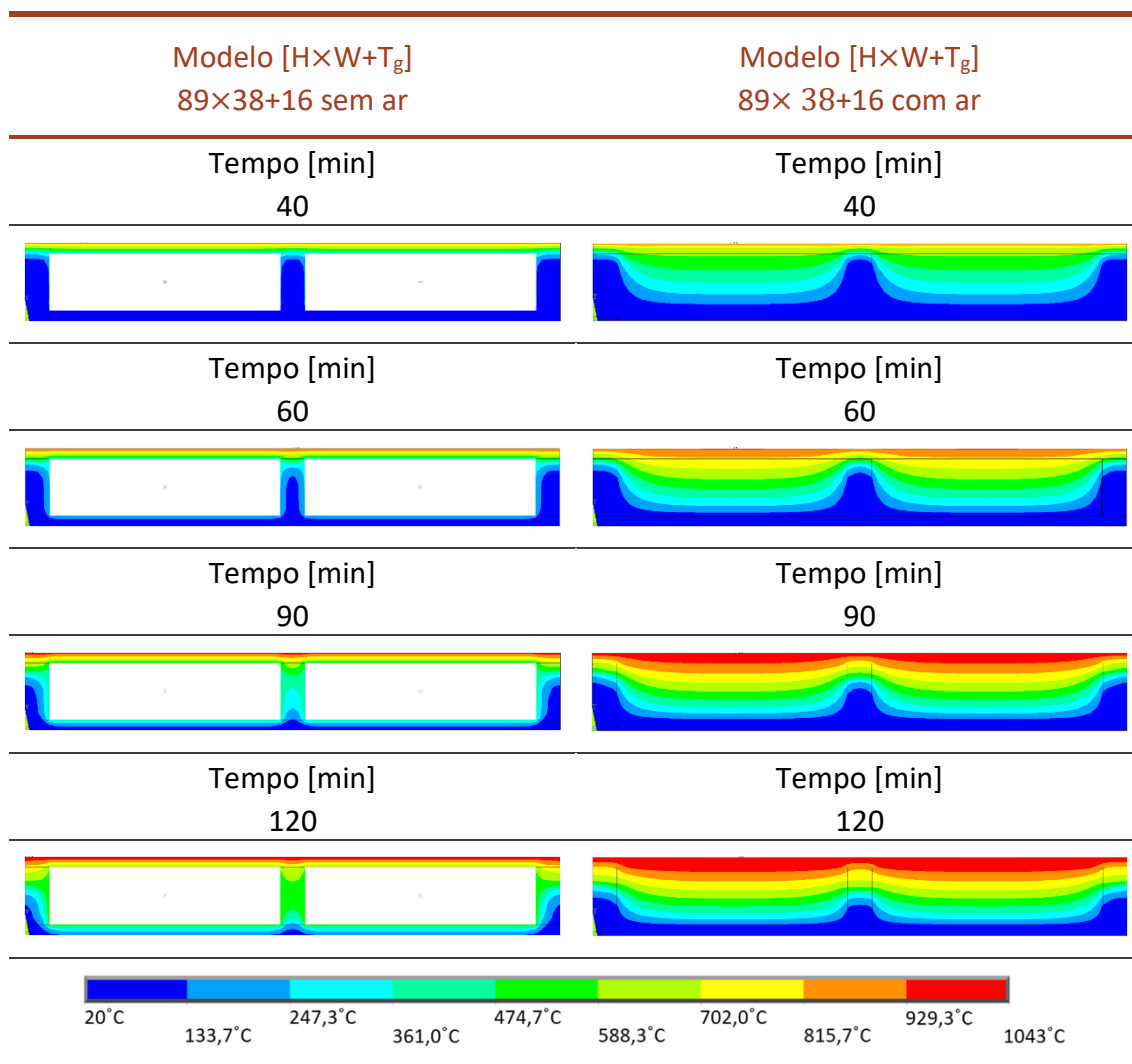
Tabela 25 - Código APDL para a curva de incêndio padrão descrita pela norma ISO834 [16], para a duração de 60 e 240 minutos

ISO 834 (60min)	ISO 834 (240min)
*DIM,ISO834,TABLE,241,1,1,,,	*DIM,ISO834,TABLE,241,1,1,,,
*SET,ISO834(1,0,1),0	*SET,ISO834(1,0,1),0
*SET,ISO834(1,1,1),20	*SET,ISO834(1,1,1),20
*SET,ISO834(2,0,1),60	*SET,ISO834(2,0,1),60
*SET,ISO834(2,1,1),349.2	*SET,ISO834(2,1,1),349.2
*SET,ISO834(3,0,1),120	*SET,ISO834(3,0,1),120
*SET,ISO834(3,1,1),444.5	*SET,ISO834(3,1,1),444.5
*SET,ISO834(4,0,1),180	*SET,ISO834(4,0,1),180
*SET,ISO834(4,1,1),502.3	*SET,ISO834(4,1,1),502.3
*SET,ISO834(5,0,1),240	*SET,ISO834(5,0,1),240
*SET,ISO834(5,1,1),543.9	*SET,ISO834(5,1,1),543.9
*SET,ISO834(6,0,1),300	*SET,ISO834(6,0,1),300
*SET,ISO834(6,1,1),576.4	*SET,ISO834(6,1,1),576.4
...	...
*SET,ISO834(56,0,1),3300	*SET,ISO834(236,0,1),14100
*SET,ISO834(56,1,1),932.3	*SET,ISO834(236,1,1),1149.7
*SET,ISO834(57,0,1),3360	*SET,ISO834(237,0,1),14160
*SET,ISO834(57,1,1),935.0	*SET,ISO834(237,1,1),1150.3
*SET,ISO834(58,0,1),3420	*SET,ISO834(238,0,1),14220
*SET,ISO834(58,1,1),937.7	*SET,ISO834(238,1,1),1150.9
*SET,ISO834(59,0,1),3480	*SET,ISO834(239,0,1),14280
*SET,ISO834(59,1,1),940.3	*SET,ISO834(239,1,1),1151.6
*SET,ISO834(60,0,1),3540	*SET,ISO834(240,0,1),14340
*SET,ISO834(60,1,1),942.8	*SET,ISO834(240,1,1),1152.2
*SET,ISO834(61,0,1),3600	*SET,ISO834(241,0,1),14400
*SET,ISO834(61,1,1),945.3	*SET,ISO834(241,1,1),1152.8

9.3 Anexo 3

Neste anexo são apresentados os resultados para o campo de temperaturas dos modelos [89x38+16] com e sem ar nas cavidades.

Tabela 26 - Evolução térmica dos modelos [89x38+16] com e sem ar nas cavidades



9.4 Anexo 4

Neste anexo é apresentado através da Figura 49 a posição das coordenadas dos modelos analisados, de acordo com as fórmulas utilizadas na Tabela 27.

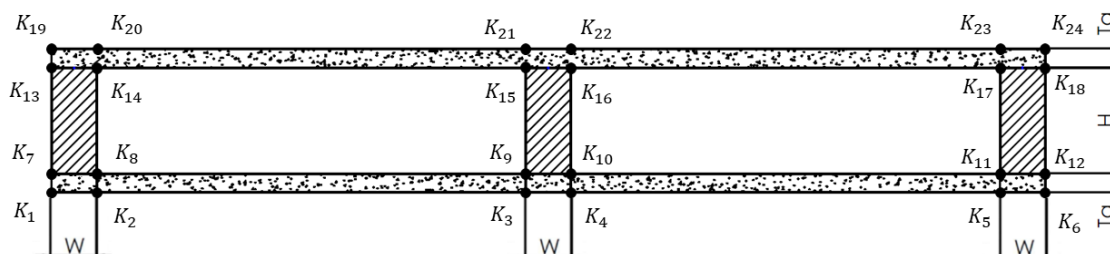


Figura 49 - Posição geométrica dos pontos que definem o modelo

Tabela 27 - Coordenadas dos pontos dos modelos analisados

Pontos K	X [mm]	Y [mm]
K ₁	0	0
K ₂	W	0
K ₃	400	0
K ₄	W+400	0
K ₅	800	0
K ₆	W+800	0
K ₇	0	Tg
K ₈	W	Tg
K ₉	400	Tg
K ₁₀	W+400	Tg
K ₁₁	800	Tg
K ₁₂	W+800	Tg

Tabela 28 - Coordenadas dos pontos dos modelos analisados, (cont.)

Pontos K	X [mm]	Y [mm]
K ₁₃	0	Tg+H
K ₁₄	W	Tg+H
K ₁₅	400	Tg+H
K ₁₆	W+400	Tg+H
K ₁₇	800	Tg+H
K ₁₈	W+800	Tg+H
K ₁₉	0	2Tg+H
K ₂₀	W	2Tg+H
K ₂₁	400	2Tg+H
K ₂₂	W+400	2Tg+H
K ₂₃	800	2Tg+H
K ₂₄	W+800	2Tg+H

9.5 Anexo 5

Neste anexo são apresentados os resultados relativos à evolução térmica dos restantes modelos referentes ao capítulo das temperaturas.

Tabela 29 - Evolução térmica dos modelos do tipo [115xW+16]

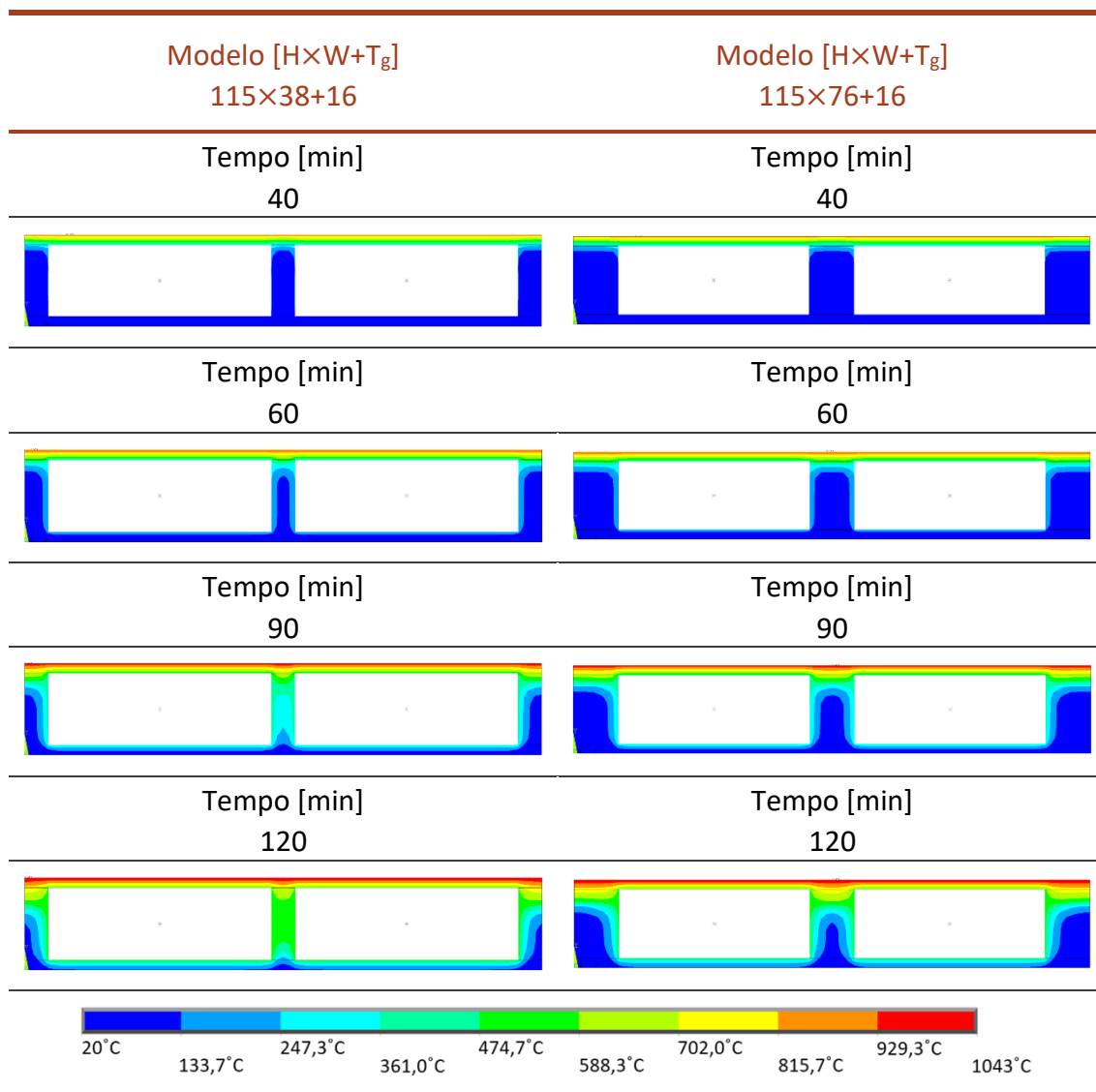


Tabela 30 - Evolução térmica dos modelos do tipo [115xW+32]

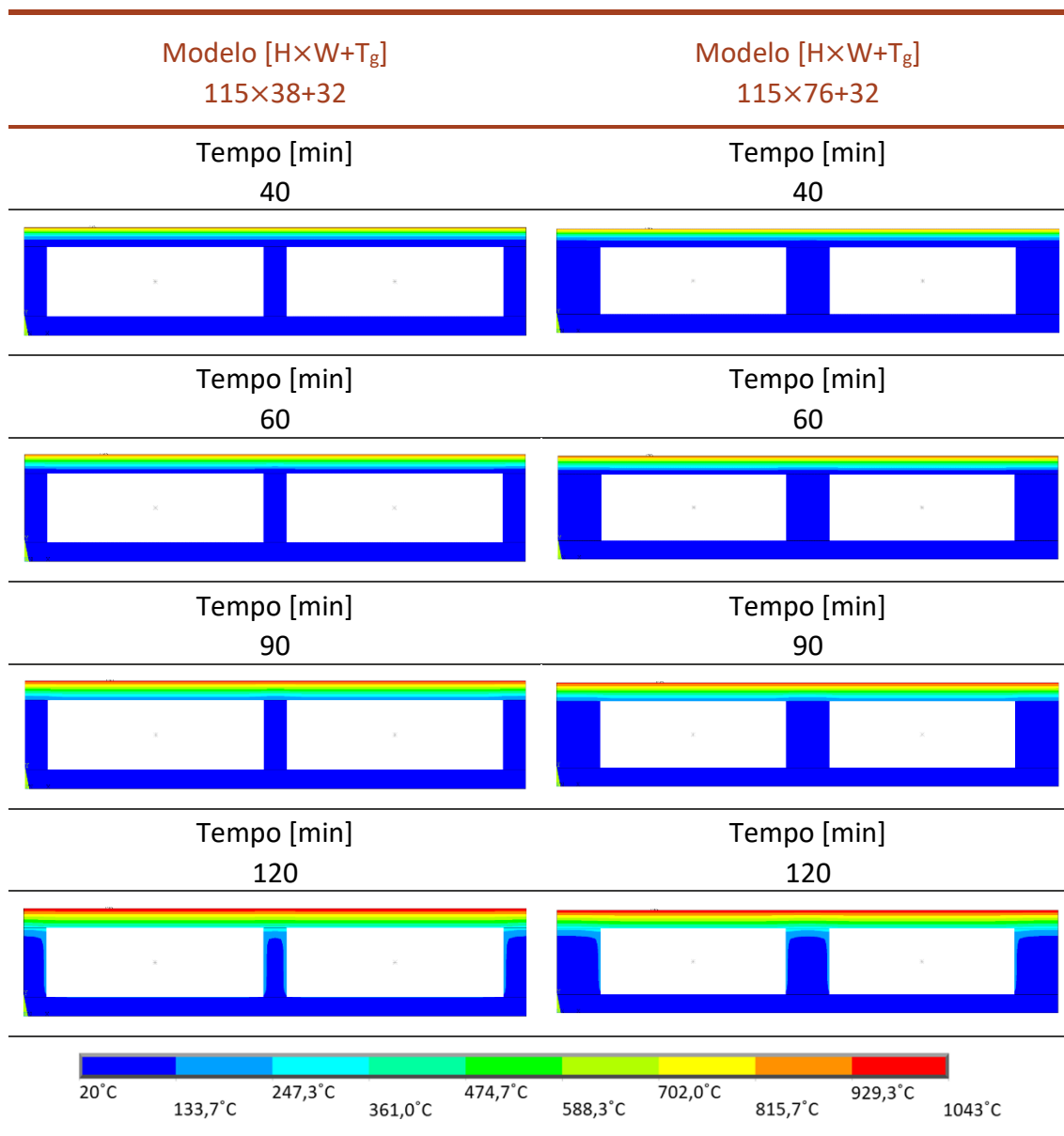


Tabela 31 - Evolução térmica dos modelos do tipo [140xW+16]

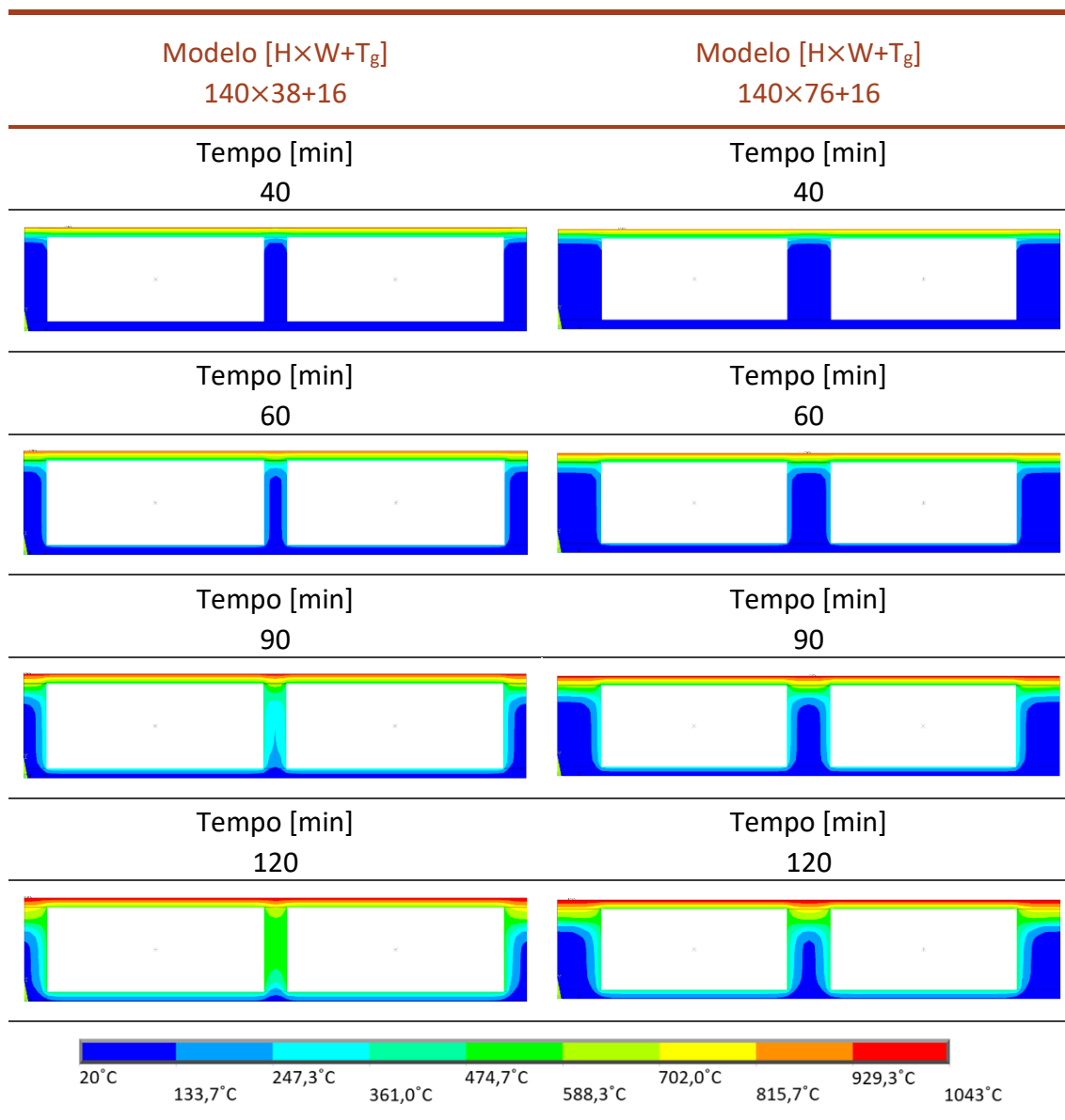


Tabela 32 - Evolução térmica dos modelos do tipo [140xW+32]

