

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA MULTICAMADA DE MADEIRA E DERIVADOS DE MADEIRA RESISTENTE AO FOGO

MARIA EDUARDA DAGORT



DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA MULTICAMADA DE MADEIRA E DERIVADOS DE MADEIRA RESISTENTE AO FOGO

MARIA EDUARDA DAGORT

Dissertação apresentada à Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Bragança para obtenção do **Grau de Mestre em Engenharia da Construção** no âmbito da **Dupla Diplomação** com a Universidade Tecnológica Federal do Paraná em Engenharia da Construção.

Trabalho orientado por:

Prof.º Dr. Luís Manuel Ribeiro Mesquita

Prof.º Dr. Paulo Alexandre Gonçalves Piloto

Prof.º Dr. Gustavo Lacerda

Bragança

2022

Agradecimentos

Primeiramente, agradeço à minha mãe, guerreira e corajosa, Karina, por todo apoio, incentivo e amor incondicional em mais uma das fases da minha vida. À minha família, Juscelino, Julia, Luisa, Marli, Marci e Márcio, por serem minha base e nunca me deixarem só. Ao meu avô, que mesmo não estando mais aqui, me permitiu continuar.

Agradeço aos meus orientadores, Professor Doutor Luís Mesquita e Professor Doutor Paulo Piloto por toda paciência, disponibilidade e ensinamentos nos últimos meses. Ao meu coorientador, Professor Doutor Gustavo Lacerda, pelo apoio e presença não apenas durante a tese de mestrado, mas em toda a graduação.

O meu agradecimento à Engenheira responsável pelo Laboratório de Resistência dos Materiais, Luiza Barreira e ao Engenheiro Matheus Alves, por toda ajuda e paciência.

Ao Alexandre, pelo incentivo e encorajamento sempre que precisei, por ter sido a figura dos meus pais enquanto eles não puderam estar presentes fisicamente.

À Jaqueline, Ana Flávia, João, Marcelo, Kelly, Lize, Dalila, Mariah, Ana Carolina, Renann, Elias, Pissaia, Gabriel, Pedro e todos os outros amigos próximos que caminharam comigo durante este período e tornaram tudo mais leve e feliz. Aos amigos que, mesmo muito distantes, sempre se fizeram presentes. Obrigada a todos por me darem um lar em seus corações.

Resumo

A presente pesquisa teve foco na reação ao fogo de dois painéis multicamada de madeira e derivados de madeira, tipo sanduíche, constituídos por painel de pinho + lâ de rocha + painel de pinho e painel de MDF + lâ de rocha + painel de MDF, quando submetidos à curva padrão de incêndio ISO834. Foram realizados ensaios experimentais no forno que permitiram classificar os dois sistemas quanto à integridade e tempo resistente como I₁45 e I₁30, respectivamente. Além disso, com o auxílio do software Ansys Workbench, foram elaborados dois modelos numéricos via elementos finitos, que tiveram o propósito de representar o comportamento real dos ensaios experimentais.

A primeira modelagem teve como objetivo aferir a qualidade do modelo em relação às propriedades dos materiais utilizados, baseando-se em ensaios previamente realizados em amostras no calorímetro de cone. Nela, foram definidas as propriedades e analisado a taxa de carbonização dos materiais foco desta pesquisa, verificado que o pinho carboniza mais rápido que o MDF.

A segunda, teve foco na representação do comportamento ao fogo dos painéis multicamada ensaiados experimentalmente no forno, submetidos às mesmas condições de aquecimento. Da análise dos resultados, foi possível observar a semelhança no comportamento da elevação da temperatura nos sistemas, porém, também, a grande influência da variação das propriedades térmicas dos materiais, teor de umidade e da falta da análise mecânica nos resultados.

Palavras-chave: Ansys, Ensaios experimentais, Resistência ao fogo, Comportamento térmico, Simulações numéricas, Elementos finitos.

Abstract

The present research focused on the reaction to fire of two multilayer panels made of wood and wood-based sandwich wood and wood-based panels, sandwich type, consisting of pine panel + rock wool + pine panel and MDF panel + rock wool + MDF panel, when subjected to the standard fire curve ISO834. Experimental tests were carried out in the oven that allowed classifying the two systems for integrity and resistant time as I₁45 and I₁30, respectively. In addition, with the help of Ansys Workbench software, two numerical models, by finite elements, which were intended to represent the actual behavior of the experimental tests.

The first modeling aimed to assess the quality of the model in relation to the the properties of the materials used, based on tests previously performed on samples in a cone calorimeter. In it, the properties were defined and the carbonization rate of the materials focus of this research, verified that the pine carbonizes faster than the MDF.

The second one focused on the representation of the burning behavior of the experimentally tested multi-layer panels in the oven, subjected to the same heating conditions.

From the analysis of the results, it was possible to observe the similarity in the behavior of the temperature rise in the systems, but also the influence of the variation of the moisture content and the lack of mechanical analysis on the results.

Keywords: Ansys, Experimental testing, Fire resistance, Thermal behavior, Numerical simulations, Finite elements.

Nomenclatura

Letras Latinas Minúsculas

b	Base ou menor dimensão da secção transversal	[mm]
c	Calor específico	[kJ/Kg.K]
d	Altura ou maior dimensão da secção transversal	[mm]
<i>d</i>₀	Espessura da camada de resistência zero	[mm]
<i>d</i>_{ef}	Profundidade efetiva de carbonização	[mm]
<i>d</i>_{char,n}	Profundidade da camada carbonizada	[mm]
<i>f</i>	Tensão de flexão instalada	[MPa]
<i>f</i>_{d,fi}	Resistência ao fogo	[MPa]
<i>f</i>₂₀	20% da resistência da madeira à temperatura ambiente	[MPa]
<i>f</i>_{m,k}	Valor característico da resistência à flexão	[MPa]
<i>h</i>_{net}	Fluxo de calor líquido na superfície exposta	[W/m ²]
<i>h</i>_{net,c}	Fluxo de calor líquido devido à convecção	[W/m ²]
<i>h</i>_{net,r}	Fluxo de calor líquido devido à radiação	[W/m ²]
<i>k</i>_θ	Fator de redução	-
<i>k</i>₀	Fator de superfície	-
<i>k</i>_{fi}	Coefficiente a depender do tipo de madeira	-
<i>k</i>_{mod,fi}	Fator de modificação para a madeira em situação de fogo	-
<i>t</i>	Tempo	[min]ou [s]
<i>w</i>	Deslocamento a meio vão na flexão	[mm]

Letras Latinas Maiúsculas

E_L	Módulo de elasticidade longitudinal	[MPa]
E_R	Módulo de elasticidade radial	[MPa]
E_T	Módulo de elasticidade tangencial	[MPa]
F	Carregamento aplicado	[kN]
F_{el}	Máxima força resistida no regime elástico	[kN]
F_{pl}	Máxima força resistida no regime plástico	[kN]
F_{max}	Carga de colapso	[kN]
G_{LR}	Módulo de rigidez no plano Longitudinal-Radial	[MPa]
G_{LT}	Módulo de rigidez no plano Longitudinal-Tangencial	[MPa]
G_{RT}	Módulo de rigidez no plano Radial-Tangencial	[MPa]
L	Comprimento ou dimensão longitudinal da viga	[mm]
M	Momento instalado	[kN.m]
$M_{Rd,0min}$	Momento resistente para 0 minutos de exposição	[kN.m]
$M_{Rd,20^\circ C}$	Momento resistente a 20°C	[kN.m]
$M_{Rd,T}$	Momento resistente à temperatura T	[kN.m]
$M_{Rd,t}$	Momento resistente para o tempo de exposição t	[kN.m]
R_{ij}	Taxa de rendimento nas coordenadas ij	-
W_{el}	Módulo elástico da secção	[mm ³]
W_{pl}	Módulo plástico da secção	[mm ³]

Símbolos gregos

α	Coeficiente de dilatação térmico	[m/m/°C]
α_c	Coeficiente de transferência de calor por convecção	[W/m ² .K]
β_0	Taxa de carbonização para um lado de exposição ao fogo	[mm/min]
β_n	Taxa de carbonização considerando os efeitos do arredondamento	[mm/min]
	Fator parcial de segurança em situação de fogo	[W/m ² .K ⁴]
σ	Constante de Stephan Boltzmann	[W/m ² .K ⁴]
σ_i^y	Tensão de escoamento na direção indicada por i	[MPa]
σ_y	Tensão de escoamento isotrópica	[MPa]
ϵ	Emissividade	-
ϵ_m	Emissividade da superfície do elemento	-
ϵ_f	Emissividade do fogo	-
θ_g	Temperatura do gás que envolve o membro exposto	[°C]
θ_m	Temperatura da superfície do elemento exposto ao fogo	[°C]
θ_r	Temperatura de radiação efetiva do ambiente de incêndio	[°C]
λ	Condutividade térmica	[W/m.K]
μ_{LR}	Coeficiente de Poisson no plano Longitudinal-Radial	-
μ_{LT}	Coeficiente de Poisson no plano Longitudinal-Tangencial	-
μ_{RL}	Coeficiente de Poisson no plano Radial-Longitudinal	-
μ_{RT}	Coeficiente de Poisson no plano Radial-Tangencial	-
μ_{TL}	Coeficiente de Poisson no plano Tangencial-Longitudinal	-
μ_{TR}	Coeficiente de Poisson no plano Tangencial-Radial	-
Φ	Fator de forma	-
ω	Teor de humidade	[%]

Conteúdo

Agradecimentos	v
Resumo	vii
Abstract	ix
Nomenclatura	x
1 Introdução	1
1.1 Contexto e motivação	1
1.2 Objetivos propostos	3
1.3 Estrutura da tese	4
2 Estado da arte	5
2.1 Estrutura macroscópica da madeira	5
2.2 Estrutura microscópica e composição química da madeira	7
2.3 Classificação botânica da madeira	9
2.4 Defeitos da madeira	10
2.5 Madeira maciça e derivados	12
2.6 Madeira na construção civil	14
2.7 Propriedades físicas da madeira	16
2.7.1 Teor de umidade	16
2.7.2 Densidade	17

2.8	Reação ao fogo da madeira e derivados	18
2.8.1	Propriedades de reação ao fogo	18
2.8.2	Comportamento de um incêndio	19
2.8.3	Classificação dos materiais em relação ao fogo	22
2.8.4	Classes de uso	25
2.8.5	Trabalhos realizados	26
3	Comportamento térmico da madeira e derivados	29
3.1	Conceitos fundamentais	29
3.1.1	Pirólise	30
3.1.2	Ignição	30
3.2	Mecanismos de transferência de calor	31
3.2.1	Radiação	32
3.2.2	Convecção	33
3.2.3	Condução	34
3.3	Taxa de carbonização	34
3.4	Propriedades térmicas da madeira e derivados	36
3.4.1	Condutividade térmica	36
3.4.2	Calor específico	38
3.4.3	Emissividade	39
3.4.4	Variação das propriedades em relação à temperatura	40
4	Testes experimentais de comportamento ao fogo	48
4.1	Testes no calorímetro de cone	48
4.2	Ensaio experimentais no forno	53
4.2.1	Introdução	53
4.2.2	Elaboração dos ensaios experimentais no forno	55
4.2.3	Resultados experimentais e discussões	58

5	Modelagem numérica	65
5.1	Introdução	65
5.2	Definição do modelo numérico para os ensaios no calorímetro de cone	67
5.2.1	Geometria do modelo	67
5.2.2	Propriedades dos materiais	68
5.2.3	Malha de elementos finitos	69
5.2.4	Condições de fronteira	72
5.3	Definição do modelo numérico para os ensaios no forno	75
5.3.1	Propriedades dos materiais	76
5.3.2	Malha de elementos finitos	77
5.3.3	Condições de fronteira	77
5.4	Comparação numérica e experimental dos testes realizados no cone	79
5.4.1	Resultados e discussões	80
5.5	Comparação numérica e experimental dos testes realizados no forno	87
5.5.1	Resultados e discussões	87
6	Conclusão e trabalhos futuros	91
6.1	Conclusão	91
6.2	Trabalhos futuros	92
A	Apêndice 01	101

Lista de Tabelas

1.1	Exigências energéticas de materiais de construção mais comuns.	2
3.1	Taxas de carbonização β_0 e β_n , [30].	36
3.2	Condutividade térmica de diversos materiais a 27 °C, [58].	37
3.3	Calor específico médio de alguns materiais, [27].	39
3.4	Emissividade para diversos materiais, [59].	39
3.5	Fator de modificação da densidade para variação de temperatura da madeira macia, [30].	40
3.6	Propriedades térmicas dependentes da temperatura para madeira e a camada carbonizada para membros de madeira e painéis de madeira maciça, segundo o Eurocódigo 1995-1-2 de 2020, [31].	41
3.7	Propriedades térmicas dependentes da temperatura do OSB, madeira compensada, aglomerados e painéis de fibra, [31].	43
3.8	Propriedades térmicas dependentes da temperatura da lã mineral do tipo manta ou fosca com isolamento com nível de proteção 1 (PL1) e densidade superior a 26 kg/m ³ , [31].	45
4.1	Resultados da reação ao comportamento ao fogo, [61], adaptado.	53
5.1	Propriedades físicas do pinho a 8,12% de umidade, adaptado, [31].	68
5.2	Propriedades físicas do MDF a 5,95% de umidade, adaptado, [31].	69
5.3	Propriedades físicas da fibra cerâmica, adaptado, [64].	69
5.4	Análise da qualidade da malha de elementos finitos.	71

5.5	Propriedades físicas da lã de rocha, adaptado, [31].	76
5.6	Resultados das temperaturas obtidas nos tempos pré-definidos nos ensaios experimentais do calorímetro de cone e na modelagem numérica referente ao sistema composto por pinho.	81
5.7	Resultados das temperaturas obtidas nos tempos pré-definidos nos ensaios experimentais do calorímetro de cone e na modelagem numérica referente ao sistema composto por MDF.	83
A.1	Análise da taxa de carbonização do MDF, baseado no modelo numérico desenvolvido.	102
A.2	Análise da taxa de carbonização do pinho, baseado no modelo numérico desenvolvido.	103

Lista de Figuras

2.1	Corte transversal de um tronco de árvore, [8].	5
2.2	Eixos principais da madeira em relação a orientação das fibras, adaptado, [10].	6
2.3	Exemplos de árvores resinosas: a) cipreste; b) abeto; c) cedro; d) pinheiro; e) espruce, [16].	9
2.4	Exemplos de árvores folhosas: a) carvalho; b) sobreiro; c) castanheiro, [16].	10
2.5	Identificação de defeitos da madeira: a) fenda de secagem; b) pequenos nós, [12].	12
2.6	Identificação de defeitos da madeira: a) falha de seção; b) nós, [12].	12
2.7	Pagode do Templo Horyuji, no Japão, [23].	15
2.8	Estruturas em madeira; (a) Cobertura Pavilhão Atlântico ; (b) Metropol Parasol, [24], [25].	15
2.9	Curva temperatura-tempo de um incêndio real, [34].	20
2.10	Curva temperatura-tempo conforme a ISO834-1:1999.	21
3.1	Amostra de madeira após sofrer combustão, [17].	30
3.2	Representação da profundidade de carbonização da amostra.	35
3.3	Condutividade térmica para a madeira e a camada de carvão, [30], [31].	42
3.4	Calor específico para a madeira e a camada de carvão, [30], [31].	42
3.5	Relação de densidade da madeira e da camada de carvão, [31].	43
3.6	Condutividade térmica em função da temperatura para o OSB, madeira compensada, aglomerados e painéis de fibra, [31].	44

3.7	Calor específico em função da temperatura para o OSB, madeira compensada, aglomerados e painéis de fibra, [31].	44
3.8	Relação de densidade do OSB, madeira compensada, aglomerados e painéis de fibra, [31].	45
3.9	Condutividade térmica em função da temperatura para a lã mineral, [31].	46
3.10	Calor específico em função da temperatura para a lã mineral, [31].	46
3.11	Relação de densidade da lã mineral, [31].	47
4.1	a) Amostra de pinho antes do ensaio, b) Amostra de pinho depois do ensaio, [61]	49
4.2	a) Amostra de MDF antes do ensaio, b) Amostra de MDF depois do ensaio, [61]	50
4.3	a) Vista superior da posição dos termopares nas amostras ensaiadas, b) Posições efetivas dos termopares inseridos nas amostras, em mm, [61].	50
4.4	Calorímetro de cone utilizado nos ensaios.	51
4.5	Evolução da temperatura na seção da amostra de pinho, [61].	52
4.6	Evolução da temperatura na seção da amostra de MDF, [61].	52
4.7	Localização dos termopares inseridos nos modelos: a) lado exposto; b) lado não exposto, em mm.	55
4.8	Dimensões da espessura dos sistemas multicamadas: a) MDF + lã de rocha + MDF; b) pinho + lã de rocha + pinho, em mm.	56
4.9	Seção transversal do modelo de MDF ensaiado.	56
4.10	a) Lado exposto do modelo de MDF ensaiado, b) Lado não exposto instalado na estrutura do forno do modelo de MDF ensaiado.	57
4.11	a) Lado exposto do modelo de pinho ensaiado, b) Lado não exposto instalado na estrutura do forno do modelo de pinho ensaiado.	57
4.12	Seção transversal do modelo de pinho ensaiado.	58

4.13	Gráfico da elevação da temperatura do forno, da curva ISO834 de acordo com a Equação 2.3 e das temperaturas medidas pelos termopares na região exposta da amostra de MDF.	59
4.14	Gráfico da elevação da temperatura nos termopares instalados na face não exposta do modelo de MDF.	59
4.15	Gráfico da elevação da temperatura do forno, da curva ISO834 de acordo com a Equação 2.3 e as temperaturas medidas pelos termopares na região exposta da amostra de pinho.	60
4.16	Gráfico da elevação da temperatura nos termopares instalados na face não exposta do modelo de pinho.	60
4.17	Gráfico para avaliação do tempo resistente do sistema multicamada MDF + lã de rocha + MDF.	61
4.18	Gráfico para avaliação do tempo resistente do sistema multicamada pinho +lã de rocha + pinho.	61
4.19	a) Carbonização completa da placa de MDF ao fim do ensaio no forno, b) Interior do forno após o ensaio.	63
4.20	a) Interior do forno após o ensaio do modelo de pinho; b) Região não exposta ao fogo da placa de pinho ao final do ensaio no forno.	63
5.1	Geometria do SOLID70, <i>Ansys Help</i>	66
5.2	Modelo 3D das amostras ensaiadas, em milímetros.	67
5.3	Exemplo de implementação da malha de elementos finitos.	70
5.4	Local de análise da temperatura para definição da malha.	71
5.5	Fluxo de calor de chama transiente medido para o MDF, [67], [68].	73
5.6	Detalhamento do início do ensaio da amostra de MDF no calorímetro de cone, [61].	74
5.7	Modelo esquemático da amostra e dos fluxos de calor em que foi submetida no calorímetro de cone	75
5.8	Detalhamento da malha de elementos finitos definida para o modelo.	77

5.9	Comportamento das amostras ensaiadas no forno.	78
5.10	Gráfico de comparação da temperatura da face exposta e não exposta dos ensaios numéricos e experimentais da amostra de pinho.	80
5.11	Gráfico de comparação da temperatura da face exposta e não exposta dos ensaios numéricos e experimentais da amostra de MDF	82
5.12	Gráfico da elevação da temperatura em relação à espessura do modelo de pinho	84
5.13	Gráfico da elevação da temperatura em relação à espessura do modelo de MDF	84
5.14	Gráfico da taxa de carbonização do estudo numérico realizado, outros valores propostos por pesquisadores e segundo a EN 1995-1-2 de 2004, [70], [72], [71], [30].	85
5.15	Comparação entre os resultados experimentais e numéricos da região exposta da amostra de pinho, baseados na variação de temperaturas da curva ISO834 e da curva de temperatura imposta no forno.	87
5.16	Comparação entre os resultados experimentais e numéricos da região não exposta da amostra de pinho.	88
5.17	Comparação entre os resultados experimentais e numéricos da região exposta da amostra de MDF, baseados na variação de temperaturas da curva ISO834 e da curva de temperatura imposta no forno.	88
5.18	Comparação entre os resultados experimentais e numéricos da região não exposta da amostra de MDF.	89

Capítulo 1

Introdução

1.1 Contexto e motivação

Para muitos tipos de infraestrutura, a segurança contra o incêndio é um dos requisitos fundamentais para o projeto, construção e execução, tendo como principal objetivo minimizar a perda de vidas, mas, também, tem o intuito de diminuir danos à propriedade pública, privada e ao meio ambiente, [1].

Na Europa, os Eurocódigos 1 e 5 regem os princípios da segurança contra o fogo. A EN 1991-1-2:2002 descreve as ações térmicas e mecânicas para projetos de edificações expostas ao fogo, a EN1995-1-1:2004 é específica para estruturas de madeira, com destaque nos requisitos de segurança, manutenção e durabilidade, enquanto a EN 1995-1-2:2004 e a nova proposta EN 1995-1-2:2020 descrevem os princípios, requisitos e regras para o projeto de edifícios expostos ao fogo.

A construção civil é reconhecida como uma das mais importantes atividades para o desenvolvimento social e econômico da sociedade, e, por outro lado, comporta-se, ainda, como grande geradora de impactos ambientais, devido ao grande consumo de recursos naturais, pela modificação da paisagem e pela geração de resíduos. A falta de efetividade ou, em alguns casos, a inexistência de políticas públicas que disciplinam e ordenam os fluxos da destinação dos resíduos da construção civil nas cidades, provocam impactos ambientais,

como degradação das áreas de manancial e de proteção permanente, proliferação de agentes transmissores de doenças, assoreamento de rios e córregos, obstrução dos sistemas de drenagem, ocupação de vias e logradouros públicos por resíduos, com prejuízo à circulação de pessoas e veículos, além da degradação da paisagem urbana, [2].

Por representar um setor de alto consumo de recursos energéticos e materiais, a crescente escassez de recursos disponíveis na construção civil e de mão de obra qualificada coloca uma pressão crescente na melhoria da eficiência da construção na região da Europa Central, [3], [4].

Em geral, a quantificação de energia consumida no setor costumava ser considerada apenas durante a sua utilização, contudo, em recentes pesquisas, tem-se revelado a importância da quantificação de energia incorporada nos materiais desde a extração, transformação de matéria-prima, utilização e eventual demolição. Tendo isso em vista, a madeira é classificada como o material que gasta o mínimo de energia dentro do processo cíclico de produção, quando comparada com outros materiais comuns na construção civil, como se verifica na Tabela 1.1, [5].

Tabela 1.1: Exigências energéticas de materiais de construção mais comuns.

Material	Energia consumida (MJ/kg)
Madeira leve e seca em forno	3,4
Madeira pesada e seca em forno	2,0
Madeira seca ao ar	0,5
Madeira prensada	10,4
PVC	80,0
Cimento	5,6
Blocos de concreto	1,4
Vidro	12,7
Ferro galvanizado	38,0
Alumínio	170,0

Caso esses materiais sejam substituídos pela madeira, assumindo durabilidade semelhante, a energia do processo de produção e utilização é economizada e as emissões evitadas, [6]. Pensando nessa eficiência, fazendo parte das medidas de proteção passiva, atuam

como elementos de compartimentação as paredes e portas corta-fogo, sendo implementadas como parâmetros de proteção ao incêndio, devendo ser ensaiadas segundo a norma de ensaio de resistência EN 1634-1 e classificadas segundo a norma de classificação EN 13501-2.

Segundo o estudo da Associação Portuguesa de Segurança, APSEI, último estudo conhecido do setor da segurança eletrônica e proteção contra incêndio em Portugal, o mercado de proteção passiva representava, em 2009, um volume de negócios de 180M€, com 30M€ relativos ao setor das portas corta-fogo e acessórios, [6].

Frente a grande quantidade de variáveis que o estudo da madeira como material construtivo em portas corta-fogo apresenta, é comum que sejam realizados estudos numéricos buscando abranger diferentes condições de exposição ao calor, reduzindo despesas e tempo de ensaio, definindo parâmetros comparativos a ensaios experimentais e criando alternativas viáveis econômica e socialmente.

1.2 Objetivos propostos

Com o auxílio do software Ansys Workbench, a presente pesquisa visa elaborar um modelo numérico para prever o comportamento de uma amostra de painel tipo sanduíche de elementos derivados de madeira e outros materiais com alta resistência ao fogo, quando submetidos a situações de incêndio reais, e comparar esses resultados com ensaios no forno em escala real de sinistro. Para isso, pretendendo aferir a qualidade do modelo numérico a ser elaborado, serão utilizados ensaios experimentais previamente realizados no calorímetro de cone como base para determinar as propriedades dos materiais que serão utilizados no modelo numérico final, visando um modelo funcional e o mais próximo possível da realidade.

Por fim, objetiva-se desenvolver um sistema multicamada de madeira e derivados de madeira resistente ao fogo, utilizando a solução numérica realizada para comparar e discutir o comportamento dos materiais em situações de incêndio, podendo assegurar a segurança da vida humana e fomentar futuros estudos sobre o assunto.

1.3 Estrutura da tese

O presente trabalho encontra-se dividido em seis capítulos.

No **capítulo 1** é apresentada uma introdução ao tema que será abordado, a motivação da pesquisa realizada, assim como os objetivos e a organização da tese.

No **capítulo 2**, denominado estado da arte, é abordado as características macro e microscópicas da madeira, assim como sua classificação botânica, aplicabilidade na construção civil, possíveis defeitos, comportamento de um incêndio, classificação dos materiais e trabalhos realizados sobre o assunto.

No **capítulo 3**, é abordado o comportamento da madeira exposta a altas temperaturas, contemplando ações térmicas e as propriedades físicas juntamente das suas respectivas variações em função da temperatura.

No **capítulo 4** são descritos os ensaios experimentais de resistência ao fogo, o ensaio no calorímetro de cone e no forno, assim como a classificação dos materiais analisados e discussão dos resultados obtidos.

No **capítulo 5** é descrita a metodologia de cálculo adotada para a realização das simulações numéricas no software *Ansys Workbench*, as considerações iniciais e descrição do método de elementos finitos, além dos resultados e discussões dos modelos numéricos desenvolvidos e, por fim, no **capítulo 6**, são apresentadas as conclusões e possíveis linhas futuras de pesquisa.

Capítulo 2

Estado da arte

2.1 Estrutura macroscópica da madeira

Fisiologia é a parte da biologia que investiga as funções orgânicas, processos ou atividades vitais dos seres vivos. A árvore cresce inicialmente no sentido vertical e, com o passar do tempo, formam-se camadas sucessivas que se sobrepõe ao redor das camadas mais antigas. Ao cortar transversalmente um tronco, pode-se observar camadas e avaliar a idade da árvore através dos anéis de crescimento, [7], como é observado na Figura 2.1.

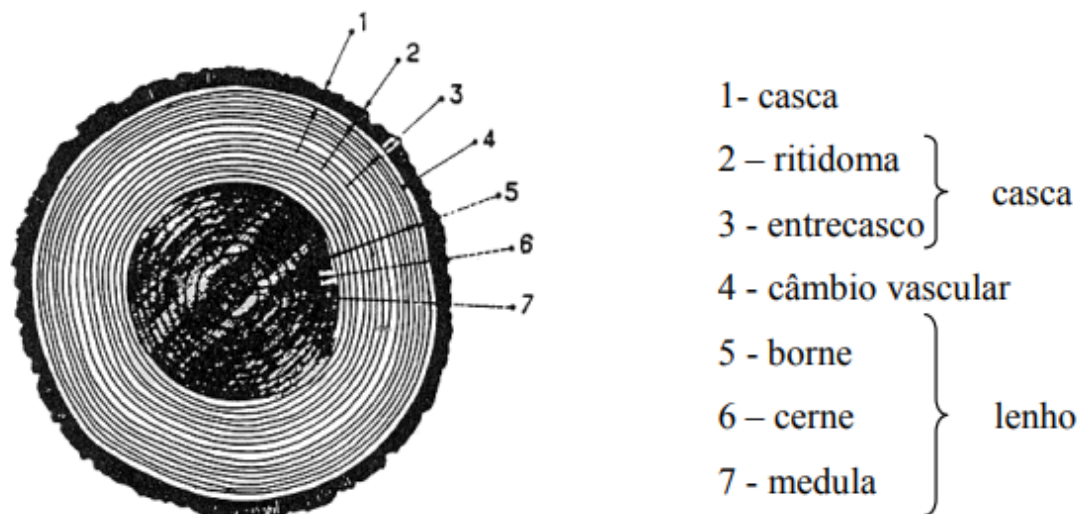


Figura 2.1: Corte transversal de um tronco de árvore, [8].

A casca protege o lenho e é o veículo da seiva elaborada das folhas para o lenho do tronco, formada por duas camadas: externa e epidérmico, formado por tecido morto, denominado por ritidoma e outro interno, formado de tecido vivo, mole e úmido, denominado por entrecasco. O ritidoma protege os tecidos mais novos do ambiente, dos excessos de evaporação e dos agentes destrutivos, enquanto no entrecasco, desce a seiva que foi elaborada nas folhas a partir de substâncias retiradas do solo e do ar, [9].

Entre a casca e o lenho existe uma camada, visível com o auxílio de lentes, aparentemente fluida, denominada câmbio vascular, sendo a parte viva da árvore. Todo o aumento de diâmetro da árvore vem do câmbio, por adição de novas camadas e não do desenvolvimento das mais antigas, [7]. O crescimento transversal verifica-se pela adição de novas camadas concêntricas e periféricas: os anéis de crescimento.

Os anéis de crescimento registam a idade da árvore e servem de referência para a consideração e estudo da anisotropia da madeira. As células que formam a madeira possuem diferentes tipos morfológicos e apresentam propriedades diferentes dependendo do eixo analisado em relação a orientação de suas fibras, podendo ser longitudinal, radial ou tangencial, [9], representados na Figura 2.2.

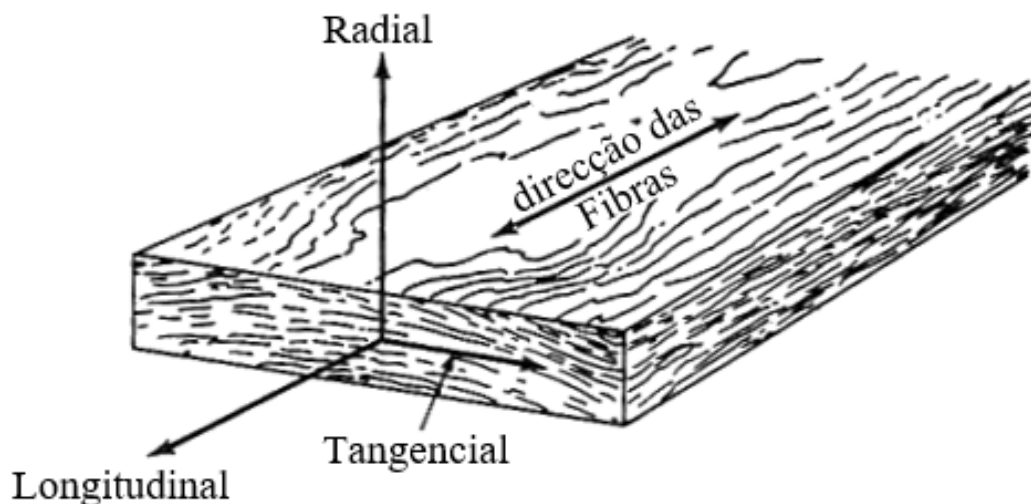


Figura 2.2: Eixos principais da madeira em relação a orientação das fibras, adaptado, [10].

2.2. ESTRUTURA MICROSCÓPICA E COMPOSIÇÃO QUÍMICA DA MADEIRA 7

A camada mais interna da árvore é chamada de lenho. É o núcleo de resistência e sustentação da árvore e apresenta-se com duas zonas bem definidas: o borne e o cerne, seções úteis do tronco para obtenção de peças estruturais de madeira. O borne é a camada mais externa, com cor mais clara, formado por células vivas, conduzindo a seiva bruta, já o cerne, camada anterior ao borne, de cor mais escura, é formado por células mortas, com maior resistência mecânica, densidade e, principalmente, maior durabilidade, pois, sendo constituído de tecido morto, sem seiva, amido e açúcares, não atrai agentes de deterioração.

Por último, a camada mais interna da madeira é o núcleo do lenho, a medula. O tecido é mole e esponjoso, muitas vezes já apodrecido, sem resistência mecânica ou durabilidade, e a sua presença em peças constitui um defeito, [9].

2.2 Estrutura microscópica e composição química da madeira

A madeira, assim como todos os tecidos vivos, é constituída por células que apenas podem ser identificadas com auxílio de um microscópio. As células consistem em pequenas unidades, que juntas, formam conjuntos que constituem os tecidos, podendo possuir várias funções, como o transporte de substâncias nutritivas e de água, proteção, armazenamento de nutrientes e elaboração e transformação química das substâncias, [11]. De maneira geral, na madeira, podem-se destacar os traqueídeos, raios lenhosos, células de parênquima e a parede celular. Os traqueídeos são células alongadas, de diâmetro quase constante, que desempenham uma função dupla de transporte de seiva e suporte mecânico das árvores, [9]. Além dos traqueídeos, os raios lenhosos também conduzem substâncias nutritivas no sentido radial do troco e/ou as armazenam. Eles constituem o parênquima radial, sendo um tecido de células curtas, destinado principalmente à distribuição e reserva de hidratos de carbono, [11], [12]. Já a rigidez e suporte da estrutura de uma árvore se deve a espessura da parede celular do elemento, de modo que quanto mais espessa for esse

componente, maior a sua capacidade de suporte. [12].

Como será abordado mais detalhadamente na Seção 2.3, existem duas grandes classes botânicas de madeira: as resinosas e as folhosas. A nível microscópico, elas apresentam algumas distinções. As resinosas podem apresentar canais secretores, responsáveis pela produção e transporte de resina, presentes na forma de cavidades longitudinais cercadas por células de parênquima. Nas folhosas, a existência de uma estrutura interna mais complexa, devido a evolução é observada. As fibras lenhosas e os vasos condutores são elementos presentes em maior quantidade, tendo a estrutura interna do lenho com a possibilidade de ser dividida em duas partes, interna e externa. Além disso, na microestrutura das folhosas, uma porosidade entre cada anel de crescimento é verificado, o que pode levar a redução ou perda da camada resistente, [11], [13].

Quimicamente, as células da madeira são constituídas por quatro substâncias:

- Celulose - Constitui cerca de 40-50% da composição química da madeira,[14], sendo um polímero tridimensional, na forma de largas cadeias unidas por pontes de hidrogênio e ligações químicas do tipo Van der Waals, possuindo uma elevada resistência mecânica. Possui valências abertas e atrai quimicamente a água, constituindo-se como um material higroscópico, responsável pela mesma característica no material, [13];
- Hemicelulose - Constitui cerca de 20-30% da composição química da madeira, [14], sendo um polímero tridimensional amorfo, ramificado por diferentes açúcares, de unidade variável. O seu grau de polimerização é mais baixo em relação à celulose, sendo parte de uma matriz que a aglutina, garantindo a união entre as fibras, [13];
- Lenhina - Constitui, assim como a hemicelulose, cerca de 20-30% da composição química da madeira, [14], sendo um polímero tridimensional amorfo composto por unidades de fenilpropano, constituindo uma matriz que também aglutina a celulose, contribuindo para a integridade estrutural das fibras. Além disso, contribui para a rigidez e resistência da madeira à compressão e ao corte, [13];

- Outras substâncias - Constituem cerca de 5-7% da composição química da madeira, conferindo distintas características à madeira do cerne. São exemplos destes componentes as resinas, trementinos os taninos, as ceras e substâncias como proteínas e pectinas, [14].

2.3 Classificação botânica da madeira

Botanicamente, as árvores são divididas em dois grandes grupos: as gimnospermas e angiospermas, de onde se destacam as subclasses coníferas, comumente designadas por resinosas, e dicotiledóneas, usualmente conhecidas por folhosas, que abrangem as árvores madeireiras, isto é, árvores capazes de produzir madeira com estrutura lenhosa em condições habituais de uso. As gimnospermas, coníferas, *softwoods* (na literatura estrangeira) ou, ainda, resinosas, possuem de médio a grande porte e apresentam resistência para sobreviver em ambientes secos. São exemplos desse grupo: cipreste, abeto, cedro, pinheiro e espruce, como representado na Figura 2.3, [15], [16].



Figura 2.3: Exemplos de árvores resinosas: a) cipreste; b) abeto; c) cedro; d) pinheiro; e) espruce, [16].

Já as angiospermas, folhosas ou *hardwoods* (na literatura estrangeira), abrangem desde pequenas espécies até grandes árvores frutíferas. Além da aparência exterior, as diferenças entre estas espécies se estendem também na estrutura anatômica do tecido essencial, o lenho.

A grande variabilidade de espécies interfere diretamente nas propriedades e estrutura da madeira, sendo que as condições de crescimento da árvore também têm grande influência. [15], [17]. A Figura 2.4 mostra algumas espécies de folhosas.

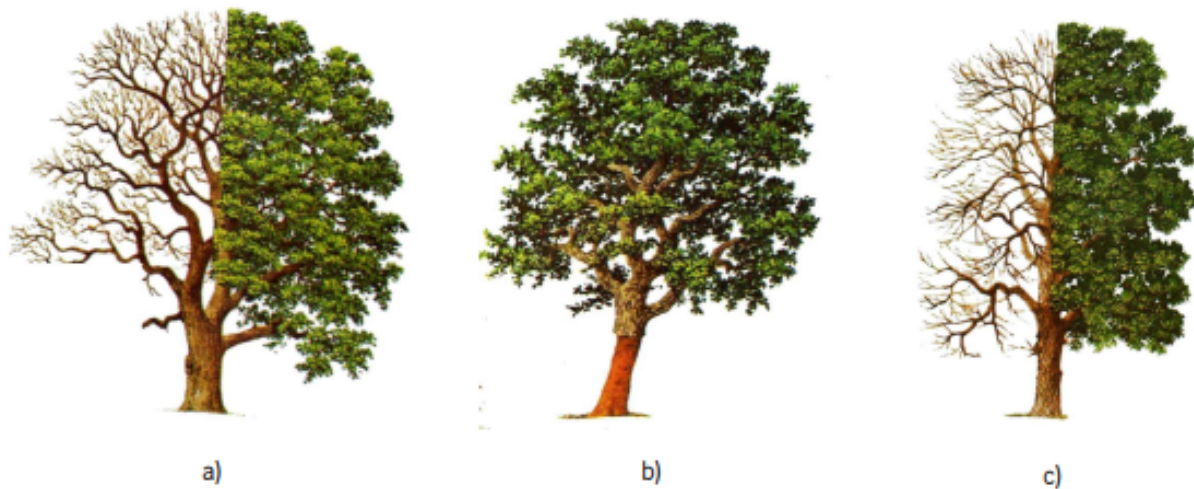


Figura 2.4: Exemplos de árvores folhosas: a) carvalho; b) sobreiro; c) castanheiro, [16].

É importante ressaltar que existem cerca de 30.000 espécies de madeira conhecidas, incluindo as resinosas e folhosas. Em termos comerciais, centenas de espécies de madeira servem como matéria-prima para diferentes trabalhos em madeira e para fins estruturais, [15].

2.4 Defeitos da madeira

O crescimento da árvore e as condições a que esta está sujeita influenciam diretamente na existência de defeitos na estrutura, os quais podem, em determinadas situações,

provocar anomalias importantes no seu comportamento e desempenho. Além disso, o armazenamento/aplicação das madeiras pode condicionar o aparecimento de defeitos, ainda que de menor relevância no comportamento da peça estrutural, [13]. Os vários defeitos que se podem encontrar na madeira estão descritos abaixo, [12].

- Nós - Pontos onde existiam ramos no tronco, existindo um desvio de direção das fibras longitudinais;
- Fendas – Zonas de descontinuidade (aberturas), provocadas por secagem rápida, por tensões de crescimento ou até mesmo por defeitos;
- Gretas – Separação dos anéis anuais, provocada por ações externas ou por tensões internas;
- Abaulamento - Ganho de curvatura na direção da largura da peça;
- Arqueamento - Ganho de curvatura na direção longitudinal;
- Desvios da fibra - Alteração da direção das fibras em relação ao eixo longitudinal;
- Lenho de reação – Zonas do tronco da árvore sujeitas a ações externas originando propriedades anormais, maior espessura de anéis, maior retração e dilatação por secagem;
- Bolsas de resina e casca inclusa - Cavidades existentes na madeira, que podem conter gomas ou resinas;
- Descaio – Falha de madeira nas arestas da peça.

As Figuras 2.5 e 2.6 abaixo representam alguns possíveis defeitos da madeira.



Figura 2.5: Identificação de defeitos da madeira: a) fenda de secagem; b) pequenos nós, [12].



Figura 2.6: Identificação de defeitos da madeira: a) falha de seção; b) nós, [12].

2.5 Madeira maciça e derivados

A madeira maciça é adequada para estruturas de suporte, principalmente para utilizações com elevadas exigências em termos de concepção. Devido a variabilidade das propriedades e quantidade disponível de material adequado para sistemas estruturais, a

padronização do uso desse elemento torna-se dificultoso. Neste sentido, os produtos derivados de madeira foram criados para suprir as limitações da madeira maciça e facilitar sua adaptação para usos mais específicos, pois melhoram o comportamento frente à umidade e ao fogo, diminuem a retração no processo de secagem e permitem a adição de arquiteturas mais complexas às convencionais, [15]. O trabalho desta dissertação diz respeito à madeira maciça, pinho bravo, e ao derivado de madeira *Medium Density Fiberboard* ou placa de fibra de média densidade (MDF).

O pinheiro-bravo – *Pinus pinaster Ait.* – é uma espécie resinosa, indígena de Portugal Continental. As árvores adultas podem atingir aos 60-70 anos, 20 a 25 m de altura e 55 a 60 cm de diâmetro do caule. A casca é espessa e fendilhada, de cor castanha-avermelhada, tornando-se mais escura na medida em que as árvores envelhecem, apresentando elevada qualidade para elementos estruturais maciços sendo muito utilizado para carpintaria de exterior e possui um bom comportamento em pavimentos, postes, travessas, carroçaria de carga, aglomerados, pasta para papel, entre outros. Em função das dimensões da madeira, o pinheiro-bravo possui diferentes utilizações, [18]. Já o MDF é uma chapa composta principalmente por fibras lignocelulósicas combinadas com resina sintética, ou outro adesivo análogo, unidos entre si através de pressão e calor. As chapas atendem a diferentes áreas, como construção civil, fabricação de móveis e confecção de embalagens, por exemplo. É um produto homogêneo, uniforme, estável, de superfície lisa e plana, oferecendo boa trabalhabilidade, além de reduzir o uso de tintas, tingidores, vernizes e apresentar ótima aceitação de revestimentos com inúmeras utilizações e acabamentos, [19]. Os aglomerados de fibras de média densidade representam o produto derivado de madeira com melhores condições para substituir a madeira maciça, perfeitamente adequado para responder aos requisitos das aplicações de mobiliário ou pavimentos, a necessidades de resistência à umidade ou ao fogo, ou mesmo para utilizações estruturais, [20].

2.6 Madeira na construção civil

A madeira é um material vantajoso quando comparado com o concreto, aço e cerâmica, por se tratar de um isolante térmico, pois além do conforto térmico garantido às edificações, a baixa condutibilidade térmica do material confere a ela um bom desempenho estrutural ao dificultar a elevação da temperatura em zonas próximas ao fogo, além de evitar a dilatação excessiva da estrutura. Esta propriedade se deve ao fato das trocas de calor entre a madeira e o ambiente serem relativamente lentas quando comparadas aos materiais convencionais. É um recurso renovável que existe em abundância na natureza, fazendo com que a sua utilização, enquanto material de construção, seja bastante ecológica, [21].

Desde a época neolítica, cerca de 5000 anos a.C., quando o homem se sedentariza e desenvolve a necessidade de construir abrigo utilizando materiais e utensílios que tinha à disposição, começaram a surgir construções de diversos tipos, em geral utilizando madeira, [22]. Vaz, [22], refere que as casas em madeira tiveram origem em África, espalhando-se para o Este da Europa, China e Japão, Oeste e Norte da Europa e para a América do Norte, num padrão similar ao padrão de migração das populações, adaptando-se ao clima, ao tipo de madeira disponível e a outros fatores políticos e sociais, por vezes combinada com outros materiais, tais como, argila, pedra, palha e ferro, [12].

Entre as construções de madeiras mais antigas, pode-se citar o templo Horyuji, localizado na prefeitura de Nara, no centro do Japão. É um complexo constituído por vários edifícios onde se destaca um Pagode de 5 andares, considerado como o edifício de madeira mais antigo do mundo, totalmente preservado. Este edifício, representado na Figura 2.7, foi finalizado no ano 607 d.C., tendo mais de 1300 anos e uma altura de 32,45 m.

Se existe hoje adaptações para a utilização da madeira em construções isso reflete, sobretudo, na grande variedade de soluções construtivas à base de madeira. Como exemplo de grandes estruturas de madeira que utilizaram seus derivados, pode-se citar a primeira grande estrutura de madeira lamelada colada construída em Portugal: a cobertura do pavilhão Atlântico e a emblemática construção em madeira micro-laminada na praça La

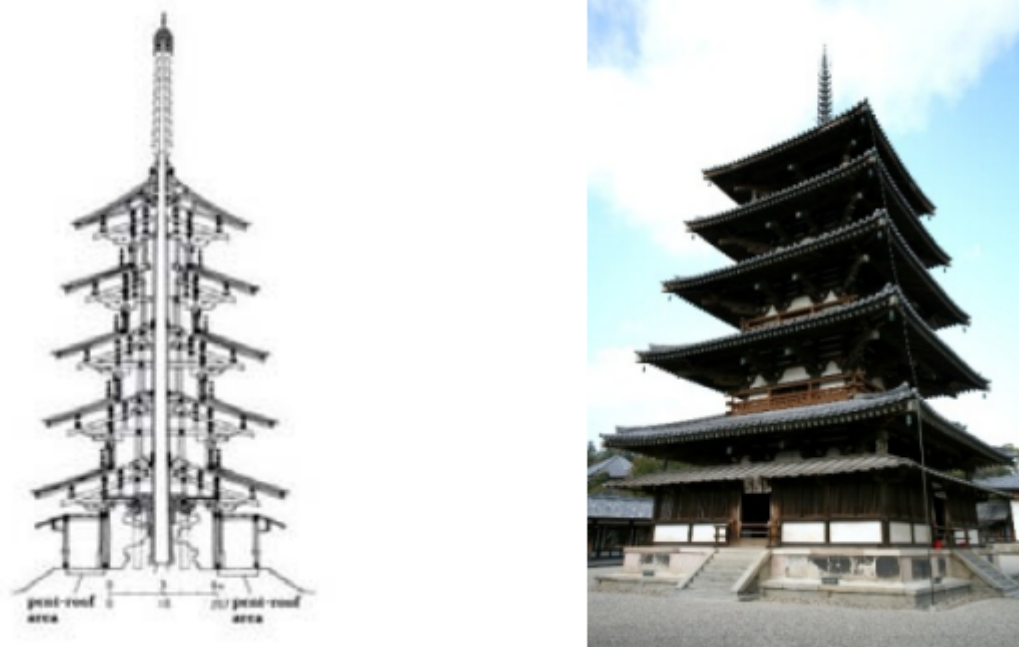


Figura 2.7: Pagode do Templo Horyuji, no Japão, [23].

Encarnación, em Sevilha – Metropol Parasol – reconhecida pela imprensa internacional como a maior estrutura em madeira do mundo, [24]. A Figura 2.8 representa estas grandes construções.

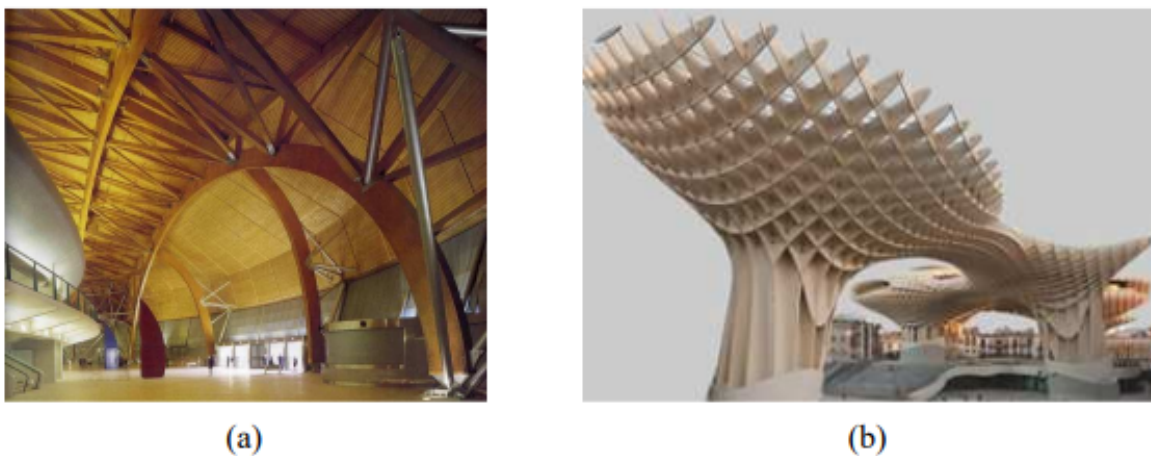


Figura 2.8: Estruturas em madeira; (a) Cobertura Pavilhão Atlântico ; (b) Metropol Parasol, [24], [25].

A madeira é um material estrutural esteticamente agradável que permite desenvolver soluções inovadoras, criativas, robustas e de alta qualidade em resposta a numerosos desafios arquitetônicos e estruturais, [24]. Tendo isso em vista, o uso da madeira na construção civil traz consigo diversas vantagens e desafios, devendo ser alvo de estudo e adaptações para garantir o uso de todo seu potencial enquanto material construtivo.

2.7 Propriedades físicas da madeira

Tendo em vista a natureza orgânica da madeira, existem muitos fatores que influenciam as suas características físicas e mecânicas, as quais explicam a sua heterogeneidade. A espécie botânica, a zona do tronco de onde é retirada a peça de madeira, os defeitos e o teor de água na peça interferem diretamente nas características físico-mecânicas da madeira, [13]. Apresenta-se a análise das propriedades físicas de maior relevância na análise da madeira como material de construção.

2.7.1 Teor de umidade

Segundo Freitas *et al*, a madeira, como muitos materiais naturais, a madeira é higroscópica, tendo a capacidade de fixar água por adsorção e de a restituir ao ambiente em que se encontra, em função das variações de temperatura e de pressão parcial de vapor de água do ambiente que o envolve, [26]. Muitos dos desafios do uso da madeira como material de engenharia surgem do teor de umidade do material. A troca entre a madeira e o ar depende da umidade relativa, da temperatura do ar e da quantidade atual de água na madeira. Esta relação de umidade tem uma influência importante nas propriedades e no desempenho da madeira.

O teor de umidade de um material, expresso em porcentagem, é dado pela relação entre o peso da água contida no seu interior e o peso do mesmo elemento quando seco. No caso da madeira, a variação do teor de umidade causa alterações nas dimensões da peça, modificação das propriedades mecânicas, suscetibilidade ao aparecimento de fungos, entre outros fatores que afetam suas propriedades, [27].

A Norma EN 322:1993 padroniza a determinação do teor de umidade por meio da perda de massa da peça ensaiada a uma temperatura de $(103 \pm 2)^\circ\text{C}$. A Equação 2.1 representa o teor de umidade da amostra, [28].

$$\omega = \frac{m_h - m_o}{m_o} \times 100 \quad (2.1)$$

Onde:

m_h é a massa de madeira úmida [g];

m_o é a massa de madeira seca [g].

Estabeleceu-se o valor de 12% de umidade relativa como medida internacional de referência para a realização de ensaios para apurar as propriedades físicas que dela dependam, sendo necessário efetuar correções matemáticas quando esse padrão não é alcançado, [13].

2.7.2 Densidade

A densidade ou massa volúmica é uma medida do peso de um corpo por unidade de volume, como descrito na Equação 2.2, [27].

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (2.2)$$

Onde:

m é a massa de um corpo [g];

V é o volume de um corpo [cm^3].

No caso da madeira, a densidade é grandemente influenciada pela variação do teor de umidade. Existem duas definições para densidade da madeira: a densidade básica e a densidade aparente. A densidade básica é definida como a massa específica convencional obtida pelo quociente da massa seca pelo volume saturado, enquanto a densidade aparente é determinada para uma umidade padrão de referência de 12%. [29]. O Eurocódigo 1995-1-2 de 2004, [30], e a nova proposta do Eurocódigo 1995-1-2 de 2020, [31] tratam o ajuste da densidade em relação à umidade de formas diferentes. O de 2004 utiliza uma densidade

de referência para a madeira seca, enquanto o de 2020 trata da densidade de diferentes materiais de forma individual, utilizando uma densidade de referência com umidade a 12%, sendo que ambos apresentam o mesmo resultado.

2.8 Reação ao fogo da madeira e derivados

Sendo um material com vasto propósito, a utilização da madeira como material de construção incita algumas questões quando, cada vez mais, se exige que os edifícios cumpram requisitos de segurança contra riscos de incêndio, [32]. Devido à presença de elementos como o carbono, oxigênio e o hidrogênio, fornecidos pela celulose e lenhina, a madeira é um material combustível. O processo de aquecimento da madeira começa como um processo endotérmico, até a temperatura da superfície chegar na ordem dos 300 °C. Nessa fase, a madeira utiliza a energia absorvida para liberar a água que contém, depois disso, a combustão é definida como um processo químico de reação rápida e exotérmica, sendo visível o desprendimento de gases e de calor.

A densidade interfere na reação da madeira ao fogo, sendo que, quanto maior é seu valor, menor é a facilidade e velocidade de combustão. O teor de água da madeira influencia também este processo, atrasando-o, [13]. Utilizando materiais pouco inflamáveis na construção civil, é possível reduzir significativamente a velocidade de propagação das chamas durante um incêndio, bem como minimizar a sua contribuição para o fogo, visto que, caso existam materiais suficientemente inflamáveis, o sinistro irá rapidamente se intensificar e se expandir.

2.8.1 Propriedades de reação ao fogo

A reação ao fogo é caracterizada através do comportamento de um determinado material quando exposto a um cenário de incêndio. Alguns conceitos devem ser estudados para esclarecer esse procedimento:

Taxa de libertação de calor

A taxa de libertação de calor (HRR-*heat release rate*) é o calor liberado por unidade de tempo e área, durante a queima de um material, e pode fornecer energia térmica adicional necessária para o desenvolvimento do fogo. Este parâmetro é determinado experimentalmente através da medição do consumo de oxigênio em ensaios no calorímetro de cone. O pico da taxa de libertação de calor (pHRR-*heat release rate*) ocorre durante um período curto de tempo e é uma boa indicação do máximo de inflamabilidade do material, [33].

Perda de massa

A perda de massa diz respeito à quantidade e à taxa de decomposição dos constituintes orgânicos e pode ser determinada ao longo do incêndio através da variação do peso da amostra, também por ensaios no calorímetro de cone, [33].

Produção de fumo

A produção de fumo nos incêndios é a principal preocupação no que diz respeito à saúde pela produção de monóxido de carbono (CO). Por isso, há interesse em compósitos com baixa libertação de fumo. A produção de fumo está diretamente relacionada com a taxa de libertação de calor: a decomposição da matriz orgânica determina a taxa e, conseqüentemente, a densidade dos fumos produzidos. A quantidade de CO produzida pela queima de um composto depende da constituição dos componentes orgânicos, da temperatura e do oxigênio disponível, [33].

2.8.2 Comportamento de um incêndio

Um incêndio é caracterizado por meio de curvas que relacionam temperatura com o tempo, associando a elevação da temperatura em função do tempo de duração do sinistro. Um incêndio real é definido por três estágios: o primeiro estágio, chamado de ignição, comportamento detalhado na Seção 3.1.2, é caracterizado pela presença de combustível e comburente suficientes para propagação do fogo para outros materiais, definindo a fase de

propagação, chamada de pré-flashover, sem risco de haver colapso da estrutura. Não ocorrendo a extinção do incêndio, a acumulação de fumo e dos gases de combustão aliados ao aumento de temperatura, resultam na inflamação generalizada do material, fase conhecida como flashover. No segundo estágio, conhecido por fase de aquecimento, com temperatura superior a 300 °C, faz com que todo o material combustível entre em combustão, devido ao aquecimento elevado num curto período de tempo, até atingir a temperatura máxima de incêndio, a qual pode ultrapassar os 1000 °C. O terceiro e último estágio, representa a redução gradativa da temperatura dos gases no ambiente após combustão de todo o material combustível disponível, sendo chamado de fase de resfriamento. É possível notar que, devido à inércia térmica, ou seja, a transferência de calor, a temperatura do material continuará a aumentar por alguns minutos durante o terceiro estágio, [34], [35]. A Figura 2.9 representa o comportamento mencionado.

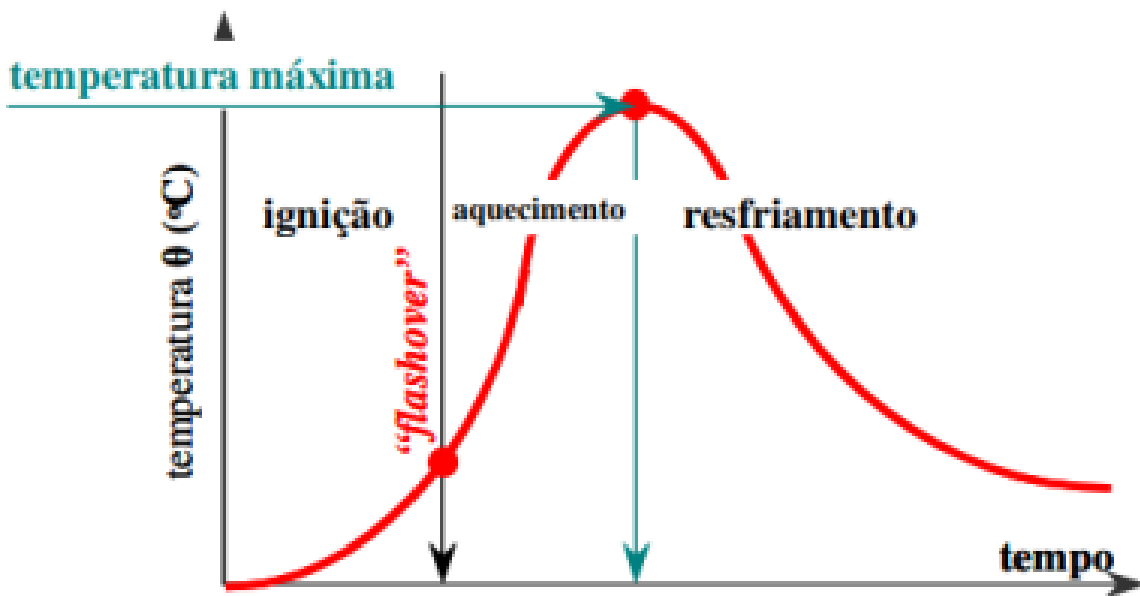


Figura 2.9: Curva temperatura-tempo de um incêndio real, [34].

O Eurocódigo 1991-1-2 define três curvas nominais de incêndio, sendo uma delas, a curva de incêndio padrão ISO834, alvo de estudo nesse trabalho. Ela representa um

modelo de incêndio totalmente desenvolvido em um compartimento, fornecendo especificações em relação a ação do fogo sobre os materiais, facilitando o estudo dos materiais submetidos a altas temperaturas, com base em modelos matemáticos e curvas típicas do desenvolvimento de um incêndio. A curva de incêndio padrão ISO834 é definida pela Equação 2.3 e está representada na Figura 2.3.

$$\Theta_g = 20 + 345 \times \log_{10}(8 \times t + 1) \quad (2.3)$$

Onde:

Θ_g é a temperatura dos gases no compartimento em chamas [$^{\circ}\text{C}$];

t é o tempo [min].

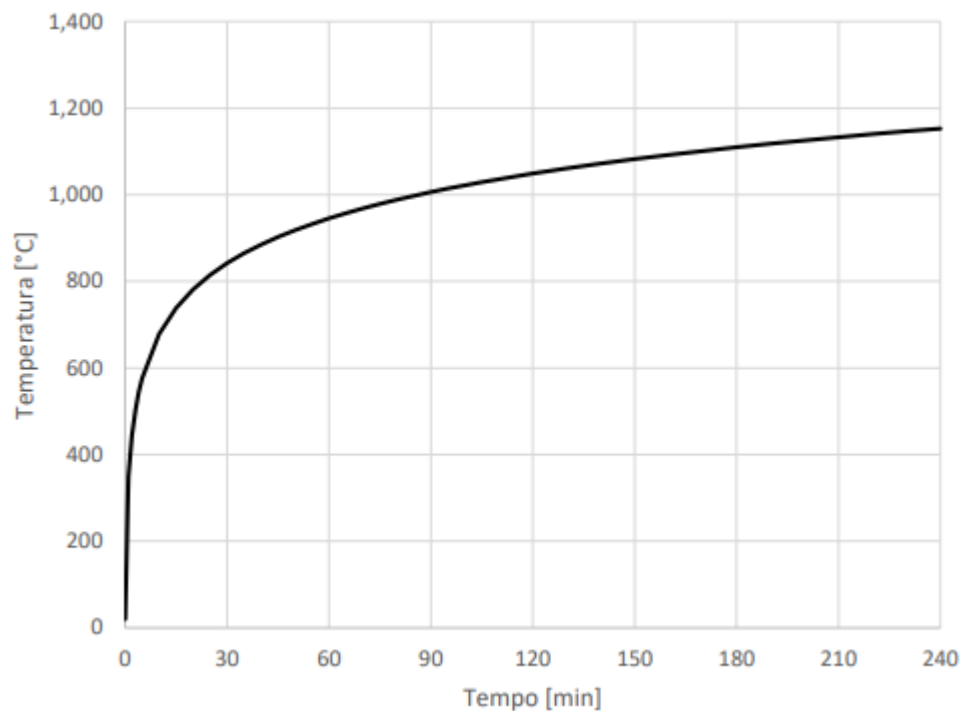


Figura 2.10: Curva temperatura-tempo conforme a ISO834-1:1999.

Num fogo em completo desenvolvimento, os elementos estruturais e de compartimentação devem garantir a resistência ao fogo, estabilidade e capacidade portante, ausência

de emissão de gases para a face não exposta ao fogo, estanqueidade à passagem de chamas e gases quentes e resistência térmica suficiente para impedir que na face não exposta se alcancem temperaturas superiores às estabelecidas pela EN 13501, [36], de modo a conter o fogo onde teve origem, [32].

2.8.3 Classificação dos materiais em relação ao fogo

Tendo em vista a importância de estudos acerca do comportamento dos materiais em relação ao fogo, faz-se necessário classificá-los de acordo com a sua combustibilidade. Os requisitos de segurança contra incêndios encontram-se regulamentados nas respectivas normas de construção, tendo como finalidade permitir uma evacuação segura de todos os ocupantes de um espaço fechado em caso de incêndio.

As normas europeias para classificação de materiais em relação ao risco de incêndio correspondem a um conjunto de testes padrões que permitem aos fabricantes produzir ou importar produtos que foram testados seguindo um modelo comum, [21], [36].

No caso específico do estudo da resistência ao fogo de elementos de construção, para os ensaios experimentais no forno, a EN 1363-1 rege os ensaios de resistência ao fogo, a EN 1634-1 e EN 1634-3 orientam os ensaios de resistência ao fogo para conjuntos de portas e sistemas de fecho e a EN 13501 classifica os produtos de construção e dos elementos construtivos em função do seu comportamento ao fogo, considerando que os equipamentos a utilizar, bem como as condições de ensaio devem estar em conformidade com a EN 1363-1.

O objetivo da determinação da resistência ao fogo é avaliar o comportamento de uma amostra de um elemento de construção civil quando submetido a condições definidas de aquecimento e pressão, quantificando a capacidade do elemento de resistir à exposição a altas temperaturas. Uma amostra representativa do elemento é exposta a um regime padronizado de aquecimento e o desempenho do corpo de prova é monitorado com base nos critérios descritos na norma, [37].

A resistência ao fogo do elemento de teste é expressa como o tempo durante o qual os

critérios apropriados foram satisfeitos, neste caso, o critério analisado será o de isolamento, detalhado posteriormente no Capítulo 4.

A EN 13501-1 define a classificação da reação e resistência ao fogo dos produtos de construção e especifica cinco testes para classificar os materiais, sendo eles: teste de incombustibilidade (ISO 1182), que determina o quanto um produto contribui ou não para o incêndio; teste de calor de combustão (ISO 1716) que define o poder calorífico superior e inferior do material, bem como o calor total máximo que ele poderá liberar; teste do elemento isolado (ISO 13823) que estabelece a reação do produto ao fogo quando exposto a um objeto isolado em combustão; teste de inflamabilidade (ISO 11925-2) que regula a facilidade que um produto entra em ignição, sob a influência de uma chama piloto e o teste do comportamento em relação ao fogo através de uma fonte de calor radiante (ISO 9239-1) que indica a reação ao fogo apenas de elementos utilizado em pavimentos e revestimentos, [21], [36].

A norma define sete classes para classificar os materiais e elementos da construção, separando um primeiro grupo os que são utilizados em revestimentos de pisos e um segundo grupo com todos os outros casos de aplicação. As sete classes são:

- A1, materiais que não contribuem para nenhuma fase do incêndio, mesmo quando totalmente desenvolvido, cumprindo todos os requisitos das classes inferiores. Os resultados dos testes EN ISO 1716 e EN ISO 1182 são rigorosos;
- A2, materiais que não contribuem significativamente para a carga e nem desenvolvimento do incêndio, satisfazendo os requisitos da classe B. Os testes da EN 13823, EN ISO 1716 e EN ISO 1182 devem ser realizados, com requisitos mínimos mais exigentes;
- B, materiais cuja contribuição para a propagação do fogo é limitada, cumprindo os requisitos da classe C. Os testes da EN ISO 11925-2 e a EN 13823, são realizados com requisitos mínimos mais exigentes para seus resultados;
- C, materiais com contribuição relativamente limitada para o incêndio, satisfazendo

os critérios da classe D, embora com requisitos mais rigorosos. Os testes da EN ISO 11925-2 e a EN 13823, são realizados com requisitos mínimos para seus resultados;

- D, materiais com uma contribuição relativamente significativa para o incêndio, cumprindo todos os requisitos da classe E e tem capacidade de resistir por um período de tempo superior ao ataque por uma chama de pequenas dimensões sem que ocorra uma propagação substancial. Conseguem ainda suportar o ataque térmico de um elemento isolado em combustão, com uma libertação de calor suficientemente retardada e limitada. Deve-se realizar os testes ISO 11925-2 com exposição de 30s e EN 13823, com requisitos mínimos para seus resultados;
- E, para materiais que contribuem significativamente para a propagação do fogo, tendo que resistir à chama apenas por um curto período de tempo. Deve-se realizar o Teste de inflamabilidade, com uma exposição de 15s e obter requisitos mínimos para seus resultados;
- F, quando o material possui um comportamento ao fogo não conhecido.

Os requisitos mínimos estão descritos na Tabela 1 da EN 13501-1. Além disso, há a classificação conforme a produção de fumo do material, representado pela letra s e conforme a libertação de partículas/gotas inflamadas, pela letra d. A produção de fumo é dividida em três classes: classe s3, quando não há limite para a produção de fumo, s2, havendo um limite para a produção total de fumo e para a taxa de produção de fumo e s1, contemplando requisitos mais rigorosos para os mesmos da classe s2. Para a classificação de acordo com a libertação de partículas/gotas inflamadas, d0, quando não ocorre a produção delas, d1, não havendo a produção por um determinado período de tempo e d2 quando não há restrições para a libertação das partículas/gotas inflamadas. Essas são as classificações dos materiais no que diz respeito ao seu comportamento ao fogo, descritas na norma europeia. De acordo com a EN 13501-1, a classificação comumente utilizada para os materiais de madeira é a D, porém, podem ser melhoradas através de processos e produtos ignífugos, sendo assim classificadas, comumente, como B, [38], [21],

[36]. No início do aquecimento, quando a temperatura da madeira está acima de 100 °C, as ligações químicas de seus componentes começam a se romper. Entre 100 °C e 200 °C há liberação de água, óxidos de carbono e vestígios de produtos biológicos.

2.8.4 Classes de uso

A classificação da madeira e produtos derivados de madeira, definida pela EN 335/2013, visa separar os materiais de acordo com a suscetibilidade à biodegradação no ambiente em que ele será exposto e são separadas em cinco classes, [39]:

- Classe de uso 1 - Situações onde a madeira, ou os produtos derivados de madeira, estão aplicados no ambiente interno da construção, sem estar exposto diretamente ao clima e a umidade. Os ataques de fungos e insetos são considerados insignificantes;
- Classe de uso 2 - Continuam expostas em um ambiente interno (não diretamente expostas ao clima nem a chuva), entretanto podem ser submetidas a umidade ocasionalmente, sendo assim a superfície da madeira ou produto derivado da madeira pode permanecer molhado por um curto tempo. Neste caso, ataques de fungos e insetos já são considerados possíveis, a intensidade e frequência deles dependem da região da construção;
- Classe de uso 3 - A madeira ou o produto à base de madeira está acima do solo e exposto ao clima, principalmente à chuva. Neste caso, ataques de fungos e insetos já são considerados possíveis, a intensidade e frequência deles também dependem da região da construção. Ela está dividida em duas subclasses:
Subclasse 3.1, quando a exposição a água (chuva) é por um curto tempo, sendo que a água não irá acumular;
Subclasse 3.2 é para as situações onde o escoamento é lento, sendo a madeira ou o produto à base de madeira submetido a água acumulada por um longo período;
- Classe de uso 4 - A madeira e os produtos derivados da madeira estão em contato

direto com o solo e/ou água doce. Ataques de fungos e insetos são considerados possíveis, a intensidade e frequência deles também dependem da região da construção. Caso esteja completamente submersa no solo e/ou saturadas, o ataque de fungos é desconsiderado, porém é suscetível ao decaimento bacteriano;

- Classe de uso 5 - Situação onde o material encontra-se permanente ou regularmente submerso em água salgada/salobra. Pode ocorrer ataques de fungos e insetos na superfície de contato da água com o ar, mas os principais agentes deterioradores nesta classe são organismos marinhos.

Além da classificação acima citada, existe a classificação de acordo a classe de serviço para construção de estruturas em madeira, de acordo com o Eurocódigo 5-1- 1 de 2004. Nela existem 3 classes, [40]:

- Classe de serviço 1 - É caracterizada pelo teor de água do material, correspondente para a temperatura de 20 [°C] e que a umidade relativa ao seu redor só exceda a 65 % por poucas semanas no ano, de no máximo 12%;
- Classe de serviço 2 - É caracterizada pelo teor de água do material, correspondente para a temperatura de 20 [°C] e que a umidade relativa ao seu redor só exceda a 85% por poucas semanas no ano, de no máximo 20%.
- Classe de serviço 3 - Nesta classe, a madeira está exposta a condições climáticas que elevam o teor de umidade além da classe de serviço 2.

2.8.5 Trabalhos realizados

Um relatório elaborado por uma equipe formada a pedido do ministro dos negócios estrangeiros finlandês, em 2010, estima que o aumento de 10% da cota de construção em madeira na Europa seria responsável por 25% das metas de redução de emissões de gases que agravam o efeito de estufa fixadas pelo Protocolo de Quioto para a União Europeia, [41]. Tendo em vista a importância da madeira como material construtivo, ao longo dos

anos, pesquisas vem sendo desenvolvidas, ampliando o conhecimento do comportamento desse material.

Em 2017, B. Östman *et al* publicaram uma revisão de literatura a respeito dos principais desafios e oportunidades para o uso da madeira em edifícios, com adequada segurança contra incêndio. Os autores buscaram possíveis soluções para reduzir os obstáculos ainda existentes ao comércio dentro da Europa. Com isso, identificaram a importância da qualidade na inspeção da segurança contra incêndios durante a construção, constatando que o detalhamento do projeto é um dos principais desafios para a segurança contra incêndio, propondo o desenvolvimento de estratégias para prevenção da perda de propriedade e o controle dessas estratégias para evitar o colapso da estrutura quando exposta ao incêndio, [42].

No ano seguinte, F. Richter *et al*, verificando as restrições na regulamentação para construções em madeira e o grande interesse pela utilização do material enquanto elemento construtivo, realizaram um estudo sobre o efeito da composição química na carbonização da madeira. O estudo foi justificado pela perda de capacidade de carga da madeira pela carbonização, cuja cinética química, assumindo que os modelos atuais de carbonização reconhecem o mesmo esquema de reação e parâmetros cinéticos para todas as espécies de madeira, o que potencializa uma grande incerteza. Usando dois modelos, em microescala e em mesoescala, os pesquisadores analisaram a celulose, hemiceluloses e lignina. Para a escolha das madeiras a serem estudadas, foi copilado um banco de dados com mais 600 combinações, simulando diversas espécies. Com as simulações, provou-se que a variação da cinética tem influência insignificante em relação ao aumento da temperatura no material, comprovando que um modelo cinético de carbonização de uma espécie de madeira, é válida para todas as outras, tanto madeira macia, como madeira dura, [43].

Ainda, em 2020, Marcin Wójcik, pesquisou relações entre o design centrado, tecnologias digitais e práticas ambientalmente responsáveis no que diz respeito às construções em madeira, argumentando que os métodos computacionais tem a capacidade de abrir novas oportunidades para a conceituação do material. O estudo identificou que o avanço digital oferece uma oportunidade para incluir parâmetros de utilização da madeira como fatores

de projeto válidos, mencionando diretamente a diminuição de impactos ambientais com a utilização de ferramentas computacionais, [44].

Capítulo 3

Comportamento térmico da madeira e derivados

3.1 Conceitos fundamentais

Segundo Ralph Hamerlinck, [13], um incêndio é caracterizado pelo desenvolvimento da temperatura em função do tempo. Este desenvolvimento de temperatura depende de um grande número de fatores, como quantidade, tipo e distribuição do material combustível, bem como as dimensões e a ventilação do ambiente. Assim, na prática, o desenvolvimento da temperatura é diferente para cada cenário de incêndio. A escolha de materiais utilizados na construção ou reabilitação de edifícios influencia diretamente na segurança humana e impacto ambiental causado em caso de sinistro.

Pensando nisso, em 2007, a União Europeia publicou a EN 13501-1, padronizando níveis necessários de segurança e proteção contra incêndios, baseando-se em testes de reação ao fogo de materiais da construção civil. Para poder entender e analisar o desempenho desses diferentes materiais frente ao fogo, é necessário esclarecer conceitos fundamentais relacionados ao comportamento térmico desses elementos, podendo classificar e descrever as melhores soluções a serem adotadas para diferentes projetos e finalidades, garantindo durabilidade e segurança durante a vida útil das edificações.

3.1.1 Pirólise

Quando a madeira, inicialmente à temperatura ambiente, é exposta a um determinado fluxo de calor externo constante e uma fonte de ignição, dá-se, após o processo de aquecimento, uma decomposição do material. Este processo químico de decomposição da matéria orgânica por meio de altas temperaturas é chamado de pirólise.

Pode-se dizer que durante a combustão da madeira existem três camadas básicas: a carbonosa, a de pirólise e a virgem, como mostrado na Figura 3.1. A camada da pirólise é quase imperceptível e existe exclusivamente durante a combustão do material orgânico, [45].



Figura 3.1: Amostra de madeira após sofrer combustão, [17].

3.1.2 Ignição

A ignição da madeira é caracterizada pelo início de uma combustão visual alimentada pela pirólise da madeira. O fluxo de calor, podendo vir de situações de incêndio real, pela combustão de outro material próximo a madeira ou em ensaios experimentais através da temperatura de um resistor elétrico radiando para a face do material, é fundamental para induzir a pirólise, sendo, portanto, uma condição necessária para a ignição, [45].

Enquanto houver fonte de calor, haverá ignição contínua do material, estágio conhecido

como propagação do incêndio. No instante da ignição, o fluxo de calor para a superfície da madeira é uma combinação do fluxo externo e do fluxo da chama, tendo como resultado um aumento súbito da taxa de libertação de calor, atingindo um valor máximo, até que uma camada de carvão se acumule gradualmente à medida que a frente de pirólise se desloca para o interior da amostra.

Esta camada de carvão forma uma resistência térmica crescente entre a superfície exposta e a frente de pirólise, fazendo com que haja uma diminuição contínua da taxa de libertação de calor após ter atingido o primeiro pico. O tempo desde o fornecimento do calor, até a ignição do material, é chamado de tempo de ignição, um parâmetro importante para a análise do comportamento frente ao fogo do material, [46], [47].

As fases da ignição consistem em dois diferentes mecanismos: a fase de aquecimento e pirólise do material, seguida por reações químicas na fase gasosa. No entanto, com uma concentração de oxigênio considerada normal no caso de ignição com chama piloto, a fase responsável pelas reações químicas é muito mais curta do que a fase de aquecimento e pirólise do material, sugerindo assim, que o momento em que o sólido entra em ignição é equivalente ao momento em que atinge a temperatura de pirólise, assumindo que esta temperatura será igual à temperatura de ignição, [48], [49], [50].

3.2 Mecanismos de transferência de calor

O calor é definido como a energia associada ao movimento aleatório de átomos e moléculas, podendo ser transferida de um sistema para outro como resultado da diferença de temperatura. A ciência que trata da determinação das taxas de transferência de energia é a transferência de calor. Essa taxa, em uma determinada direção, depende da magnitude do gradiente de temperatura (diferença de temperatura por unidade de comprimento ou taxa de mudança de temperatura) nessa direção.

Quanto maior o gradiente de temperatura, maior a taxa de transferência de calor. Convecção, radiação e condução são os três mecanismos básicos compreendidos no fenômeno de transferência de calor, [51].

A Equação 3.1 determina a quantidade de calor transferida entre corpos, a qual, de acordo com o Eurocódigo 1995-1-2, é determinada considerando a soma das parcelas de convecção e radiação, [52].

$$h_{net} = h_{net,c} + h_{net,r} \quad (3.1)$$

Onde:

h_{net} é o fluxo de calor líquido na superfície exposta [W/m^2];

$h_{net,c}$ é o fluxo de calor líquido devido à convecção [W/m^2];

$h_{net,r}$ é o fluxo de calor líquido devido à radiação [W/m^2].

Nas superfícies expostas ao fogo, o fluxo de calor líquido deve ser entendido como a energia absorvida pelos membros, por unidade de tempo e área de superfície, [52].

3.2.1 Radiação

No contexto da transmissão de calor, a radiação consiste no transporte de energia por meio de ondas electromagnéticas, que se propagam à velocidade da luz. Ao contrário da condução e da convecção, a radiação não necessita de um meio material para que a transferência de energia seja efetuada, [53].

De acordo com o Eurocódigo 1991-1-2, o fenômeno de transferência de calor por radiação ($h_{net,r}$), correspondente à segunda parcela do fluxo líquido de calor de uma superfície e pode ser definido pela Equação 3.2, [52].

$$h_{net,r} = \varphi \times \varepsilon_m \times \varepsilon_f \times \sigma \times [(\theta_r + 273)^4 - (\theta_m + 273)^4] \quad (3.2)$$

Onde:

$h_{net,r}$ é o fluxo de calor líquido devido à radiação [W/m^2];

φ é o fator de forma;

ε_m é a emissividade da superfície do elemento;

ε_f é a emissividade do fogo;

σ é a constante de Stephan Boltzmann [5, $67.10^{-8}W/m^2.K^4$];

θ_r é a temperatura de radiação efetiva do ambiente de incêndio [°C];

θ_m é a temperatura da superfície do elemento exposto ao fogo [°C].

O Eurocódigo 1991-1-2 define que os valores da emissividade do fogo e do fator de forma, quando não especificado, devem ser considerados iguais a 1, [54].

3.2.2 Convecção

A convecção é o mecanismo de troca de calor entre uma superfície sólida e um fluido, líquido ou gasoso, em movimento. A convecção pode ser gerada por uma força externa, ocasionando uma convecção forçada, ou pelo próprio gradiente de temperatura do fluido, gerando uma variação na sua densidade, de forma a ocorrer a convecção natural, [55].

De acordo com o Eurocódigo 1991-1-2, O fenômeno de transferência de calor por convecção ($h_{net,c}$) correspondente a parcela do fluxo líquido de calor definido pela Equação 3.3.

$$h_{net,c} = \alpha_c \times (\theta_g - \theta_m) \quad (3.3)$$

Onde:

$h_{net,c}$ é o fluxo de calor líquido devido à convecção [W/m^2];

α_c é o coeficiente de transferência de calor por convecção [W/m^2];

θ_g é a temperatura do gás que envolve o membro exposto [°C];

θ_m é a temperatura da superfície do elemento exposto ao fogo [°C].

Sendo que os valores assumidos para o coeficiente de transferência de calor convectivo variam entre $\alpha_c = 4$ [W/m^2K] para uma análise do lado não exposto ao fogo, $\alpha_c = 9$ [W/m^2K] para análises em que os efeitos da transferência de calor por radiação são considerados, $\alpha_c = 25$ [W/m^2K] segundo a curva de incêndio ISO384 ou $\alpha_c = 50$ [W/m^2K] segundo a curva de incêndio para hidrocarbonetos, [52].

3.2.3 Condução

Assim como a transferência de calor por convecção, a transferência por condução necessita de um meio material para que ocorra a troca de energia térmica. Ela ocorre a nível molecular e é definida pela energia transferida pela interação entre as partículas mais energizadas, com maior temperatura, e as menos energizadas, com menor temperatura, [51].

Devido ao gradiente de temperatura que o material estará exposto, a transferência de calor ocorre da extremidade mais quente para a mais fria, abrangendo meios sólidos, líquidos ou gasosos. A lei de Fourier, expressa pela Equação 3.4, traduz esse comportamento, [56].

$$\phi^{calor} = -\lambda \times \frac{dT}{dx} \quad (3.4)$$

Onde:

λ representa uma constante de proporcionalidade e descreve a condutividade térmica do material [W/mK];

$\frac{dT}{dx}$ é a representação do gradiente de temperatura na direção do fluxo de calor [K/m].

O valor da condutividade térmica é uma característica própria do material, como verificado na Seção 3.4.1, e quantifica a capacidade de conduzir energia térmica, logo, para determinar a transferência de calor por condução, é fundamental conhecer esta propriedade.

3.3 Taxa de carbonização

A carbonização consiste em um processo químico que ocorre em sólidos orgânicos expostos a combustão, a qual pode ser definida como uma reação exotérmica onde há consumo de oxigênio, liberação de hidrogênio e tendo como produto final apenas o carbono.

Quando exposta a ações acidentais, como condições de incêndio, a madeira apresenta

uma camada carbonizada circundante, a qual pode ser utilizada para calcular a taxa de carbonização, tratando-se de uma relação entre a profundidade de formação de carvão ao longo da superfície da madeira em função do tempo de exposição ao fogo, [57].

Segundo o Eurocódigo 5, a taxa de carbonização unidimensional deve ser calculada com a Equação 3.5 descrita abaixo e a profundidades de carbonização está representada na Figura 3.2

$$d_{(char, 0)} = \beta_0 \times t \quad (3.5)$$

Onde:

$d_{(char, 0)}$ é a profundidade de carbonização projetada para carbonização unidimensional;
 β_0 é a taxa de carbonização de projeto unidimensional sob exposição padrão ao fogo;
 t é o tempo de exposição ao fogo.

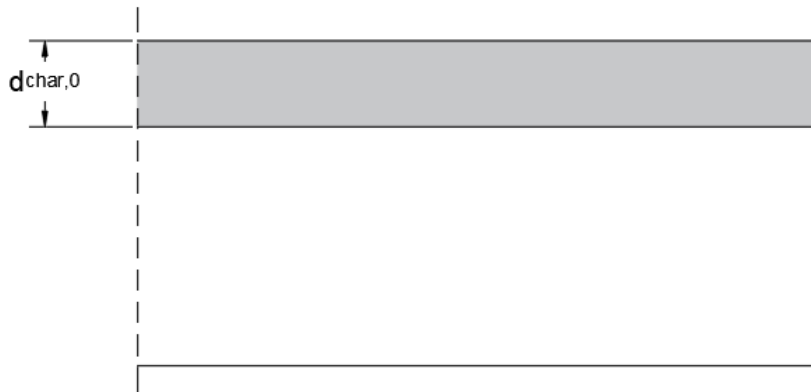


Figura 3.2: Representação da profundidade de carbonização da amostra.

O comportamento em relação fogo das estruturas de madeira requer uma análise térmica e mecânica desacoplada, a qual é fortemente dependente das propriedades do material, níveis de temperatura e teor de umidade. Esses parâmetros são importantes no projeto de segurança contra incêndio, porque eles determinam a seção transversal de suporte de carga residual, devido a condições externas críticas, [57].

O Eurocódigo 5 determina valores para a taxa de carbonização de diferentes sólidos orgânicos, demonstrados na Tabela 3.1, sendo que a designação β_n diz respeito à taxa de carbonização de projeto nocional, cuja magnitude inclui o efeito de arredondamento de cantos e fissuras, [30], não considerado nesta pesquisa.

Tabela 3.1: Taxas de carbonização β_0 e β_n , [30].

	β_0 [mm/min]	β_n [mm/min]
a) Madeira macia		
Madeira maciça com densidade superior a 290 kg/m ³	0,65	0,7
Madeira maciça com densidade superior a 290 kg/m ³	0,65	0,8
b) Madeira dura		
Madeira sólida ou laminada colada com densidade característica de 290 kg/m ³	0,65	0,7
Madeira sólida ou laminada colada com densidade característica superior a 450 kg/m ³	0,5	0,55
c) Painéis		
Painéis de madeira	0,9 ^a	–
Contraplacado	1,0 ^a	–
Painéis a base de madeira, exceto contraplacado	0,9 ^a	–
^a Os valores aplicam-se a uma densidade característica de 450 kg/m ³ e uma espessura de painel de 20mm.		

3.4 Propriedades térmicas da madeira e derivados

3.4.1 Condutividade térmica

A condutividade térmica é uma medida da taxa de fluxo de calor através de um material sujeito a variação de temperatura, quantificando a habilidade de um material de conduzir energia térmica, [45], sendo equivalente a quantidade de calor transmitida através de uma espessura, numa direção normal a uma superfície devido a uma variação de temperatura, como descreve a Equação 3.6, [58].

$$\lambda = \frac{\Delta Q \times L}{A \times \Delta t \times \Delta T} \quad (3.6)$$

Onde:

λ é a condutividade térmica do material [W/mK];

ΔQ é a quantidade de calor fornecida [J];

L é a espessura analisada [m];

A é a área da superfície de contato [m^2];

Δt é o intervalo de tempo [s];

ΔT é a variação de temperatura [$^{\circ}C$];

Materiais com alta condutividade térmica são utilizados como dissipadores de calor, enquanto materiais com baixa condutividade térmica são utilizados como isolantes térmicos. Essa grandeza é uma característica específica de cada material e, no caso da madeira, varia de acordo com a variação de temperatura, densidade, conteúdo extrativo, teor de umidade, irregularidades estruturais e ângulo das fibras, [45].

Para fins de comparação, a Tabela 3.2 expressa valores da condutividade térmica de alguns materiais a $27^{\circ}C$, [58].

Tabela 3.2: Condutividade térmica de diversos materiais a $27^{\circ}C$, [58].

Material	Condutividade térmica [$W/m.K$]
Prata	426
Cobre	398
Alumínio	237
Ferro	80,3
Vidro	0,72 - 0,86
Água	0,61
Tijolo	0,4 - 0,8
Madeira (pinho)	0,11 - 0,14
Ar	0,026
Polipropileno	0,25

3.4.2 Calor específico

A capacidade térmica específica é definida pela quantidade de energia que um material precisa ganhar para aumentar a temperatura em uma unidade de massa (1 kg) em 1 °C. Essa grandeza pode ser definida pela Equação 3.7, [1].

$$c = \frac{\Delta Q}{m \times \Delta T} \quad (3.7)$$

Onde:

ΔQ é a energia necessária para elevar a temperatura de um material [*J*];

m é a massa do material [*kg*];

ΔT é a variação de temperatura [*°C*].

Além de variar de acordo com a temperatura, o calor específico de um material também varia de acordo com a umidade do material analisado, pois, quanto maior for a quantidade de água nele presente, maior será a quantidade de energia necessária para ela evaporar e, conseqüentemente, aumentar a temperatura desse mesmo material. Por isso, o calor específico equivalente de acordo com a umidade presente no elemento é obtido adicionando ao valor base, o qual varia com a temperatura, uma energia adicional devido a reação endotérmica. Essa energia pode ser calculada pela Equação 3.8, [1].

$$\Delta c = \frac{2,26 \times 10^6 \times e_{free}}{\Delta T} \quad (3.8)$$

Onde:

$2,26 \times 10^6$ é o calor latente de evaporação da água [*J/kg*];

e_{free} é o teor de água livre no material [*adm*];

ΔT é a variação de temperatura [*°C*].

Para fins de comparação, a Tabela 3.3 expressa valores simplificados do calor específico de alguns materiais.

Tabela 3.3: Calor específico médio de alguns materiais, [27].

Material	c [kJ/kgK]
Metais	0,10
Concreto	0,18 - 0,20
Ar a 0°C	0,24
Madeira seca	0,32
Água	1,00

De acordo com a tabela acima, é possível analisar que a água possui um calor específico muito superior ao da madeira seca por exemplo, implicando que o teor de umidade do material interfere significativamente na variação do calor específico, [1].

3.4.3 Emissividade

A emissividade é essencialmente uma propriedade da superfície de um material, em vez de uma propriedade intrínseca dele. Ela representa a habilidade relativa de sua superfície para irradiar o calor absorvido, [45], ou seja, determina a maior ou menor quantidade de energia que um corpo emite, sendo que quanto menor a emissividade do corpo, menor será a energia emitida e maior será a temperatura superficial do elemento. Esse valor depende de vários fatores, como o comprimento de onda, direção de observação em relação à superfície em estudo e a temperatura da superfície. Diversos materiais e suas respectivas emissividades são apresentados na Tabela 3.4, [59].

Tabela 3.4: Emissividade para diversos materiais, [59].

Material	Emissividade
Aço polido a 100°C	0,07 - 0,08
Cimento	0,54
Concreto de 0 – 100 °C	0,92 - 0,94
Madeira	0,80 - 0,90

O Eurocódigo 1995-1-2 define o coeficiente de emissividade para superfícies não carbonizadas e carbonizadas de madeira, materiais a base de madeira e para elementos de proteção contra incêndio como 0,8, [31].

3.4.4 Variação das propriedades em relação à temperatura

O Eurocódigo 1995-1-2 de 2004 apresenta valores da variação em relação a temperatura de condutividade térmica para a madeira em geral e camadas de carvão e valores de calor específico quando submetidas a altas temperaturas. Conforme as recomendações dadas por essa norma, utiliza-se a relação indicada na Tabela 3.5 para corrigir a densidade de acordo com a umidade presente no material.

Tabela 3.5: Fator de modificação da densidade para variação de temperatura da madeira macia, [30].

T [°C]	Razão de densidade
20	$1+\omega$
99	$1+ \omega$
100	$1+\omega$
121	1
200	1
250	0,93
300	0,76
350	0,52
400	0,38
600	0,28
800	0,26
1200	0
ω é o teor de umidade	

Já a nova proposta do Eurocódigo 1995-1-2 de 2020 também expõe esses valores de propriedades térmicas para a madeira maciça, adicionando variações para derivados de madeira e isolantes, sendo eles membros de madeira e painéis de madeira maciça, OSB, madeira compensada, aglomerados, painéis de fibra e lã mineral.

As Tabelas 3.6, 3.7 e 3.8 representam os valores das propriedades em função da elevação da temperatura imposta proposta pela nova versão do Eurocódigo e os Gráficos 3.3, 3.4, 3.5, 3.6, 3.7, 3.8, 3.9, 3.10 e 3.11 representam cada uma das propriedades acima citadas. Ainda, como descrito no Capítulo 2, Seção 2.7.2, o Eurocódigo 5 de 2004 e a nova proposta de 2020 tratam da variação da densidade de acordo com a umidade presente nos materiais de formas diferentes.

Neste trabalho, serão utilizados os coeficientes para correção fornecidos pela nova proposta da norma com umidade de referência de 12%, utilizando a Equação 3.9.

$$\rho_{20} = \frac{\rho}{1 + \omega} \times (1 + 0,12) \quad (3.9)$$

Onde:

ρ é a densidade básica;

ω é a umidade do material.

Além da correção da densidade em relação a umidade, também serão atualizados valores para o calor específico dos materiais, conforme apresentado na Seção 3.4.2 deste capítulo.

Tabela 3.6: Propriedades térmicas dependentes da temperatura para madeira e a camada carbonizada para membros de madeira e painéis de madeira maciça, segundo o Eurocódigo 1995-1-2 de 2020, [31].

T [C°]	λ [W/mK]	c [kJ/kgK]	ρ/ρ_{20} [kg/m³]
20	0,12	1,53	1
99	*	1,77	1
100	*	13,6	1
120	*	13,5	1
121	*	2,12	0,89
200	0,15	2	0,89
250	*	1,62	0,83
300	*	0,71	0,68
350	0,07	0,85	0,46
400	*	1	0,34
500	0,09	*	*
600	*	1,4	0,25
800	0,35	1,65	0,23
1200	1,5	1,65	0

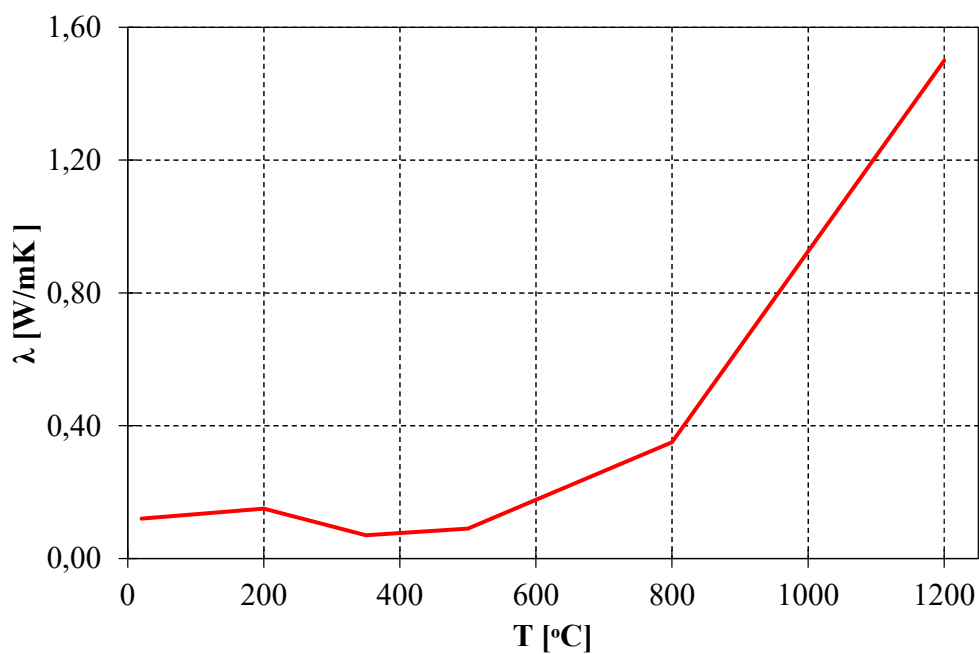


Figura 3.3: Condutividade térmica para a madeira e a camada de carvão, [30], [31].

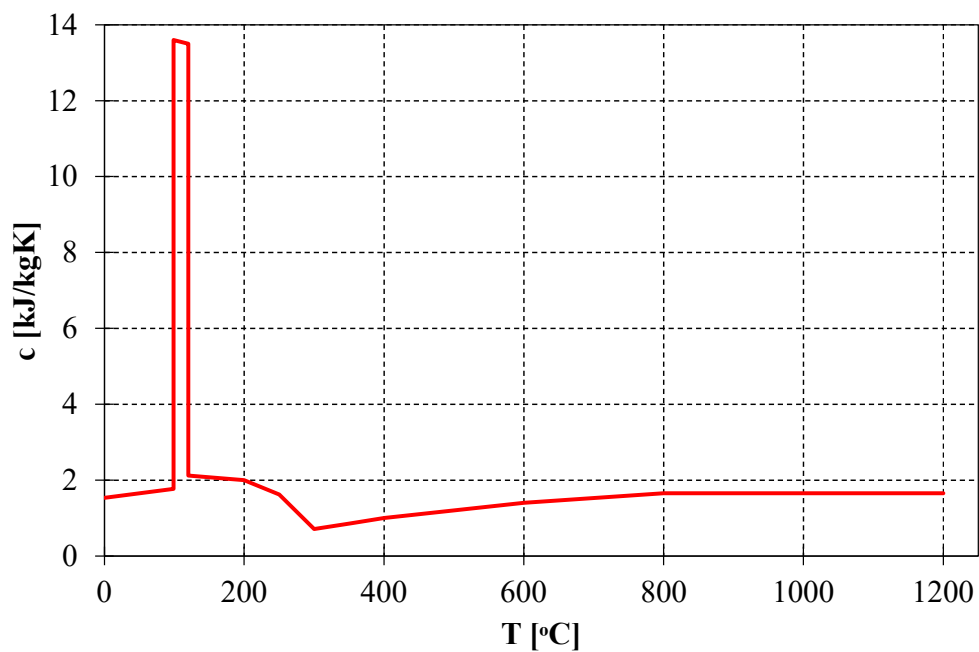


Figura 3.4: Calor específico para a madeira e a camada de carvão, [30], [31].

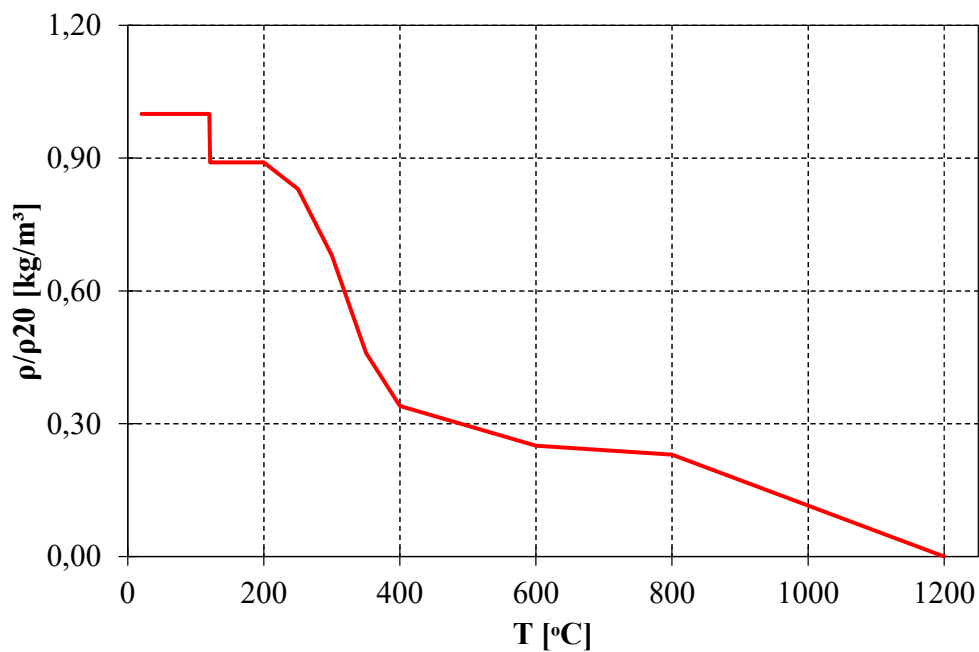


Figura 3.5: Relação de densidade da madeira e da camada de carvão, [31].

Tabela 3.7: Propriedades térmicas dependentes da temperatura do OSB, madeira compensada, aglomerados e painéis de fibra, [31].

T [C°]	λ [W/mK]	c [kJ/kgK]	ρ/ρ20 [kg/m³]
20	0,12	1,79	1
100	0,3	1,79	1
110	0,23	30,8	0,97
120	0,15	1,79	0,94
200	0,18	1,79	0,94
275	0,14	6,17	0,58
350	0,09	0,69	0,23
500	0,23	0,69	0,21
800	0,74	0,69	0,17
1200	4,2	0,69	0,11

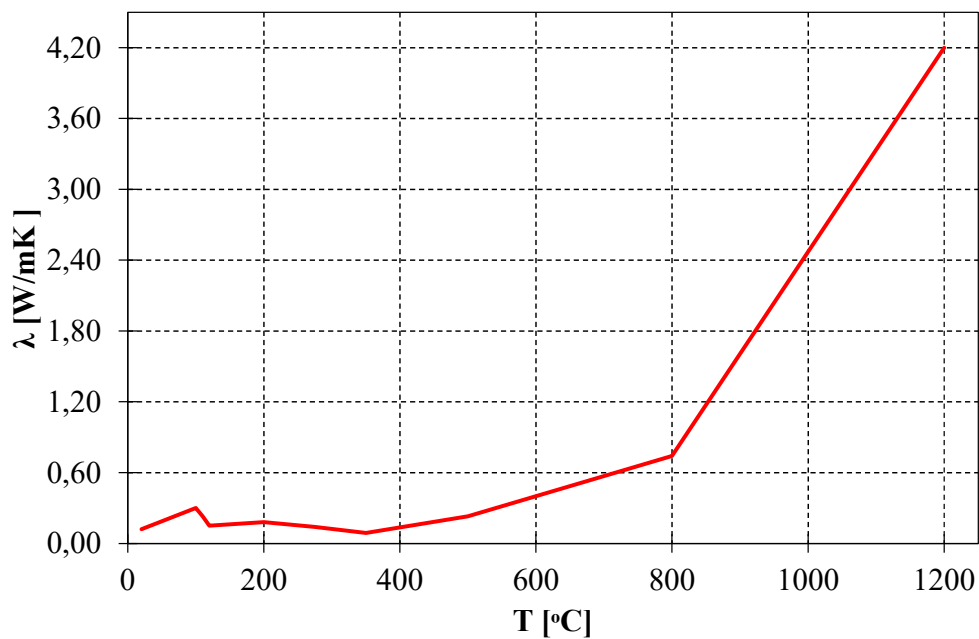


Figura 3.6: Condutividade térmica em função da temperatura para o OSB, madeira compensada, aglomerados e painéis de fibra, [31].

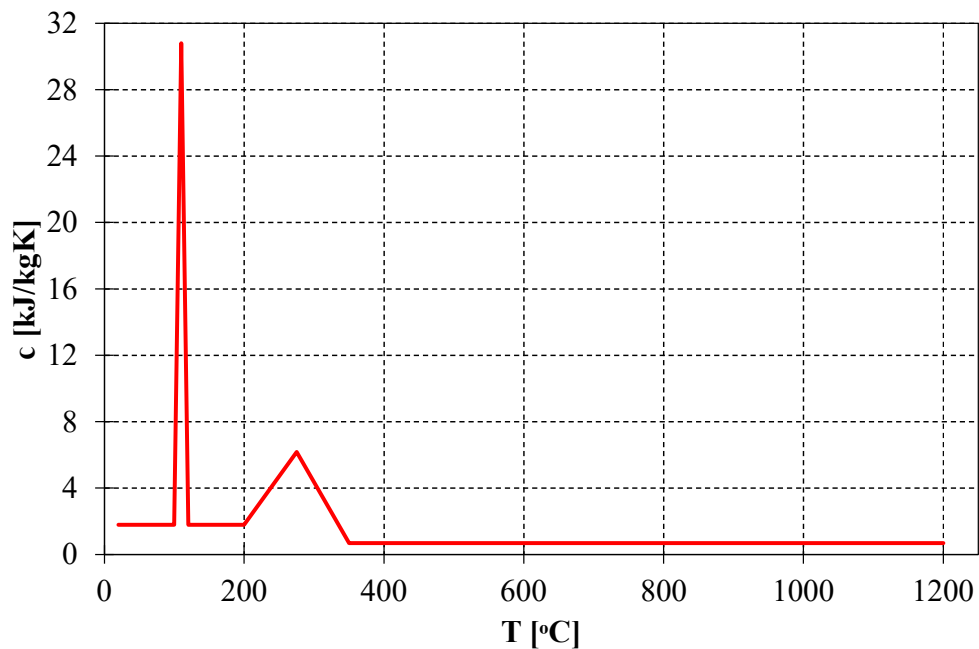


Figura 3.7: Calor específico em função da temperatura para o OSB, madeira compensada, aglomerados e painéis de fibra, [31].

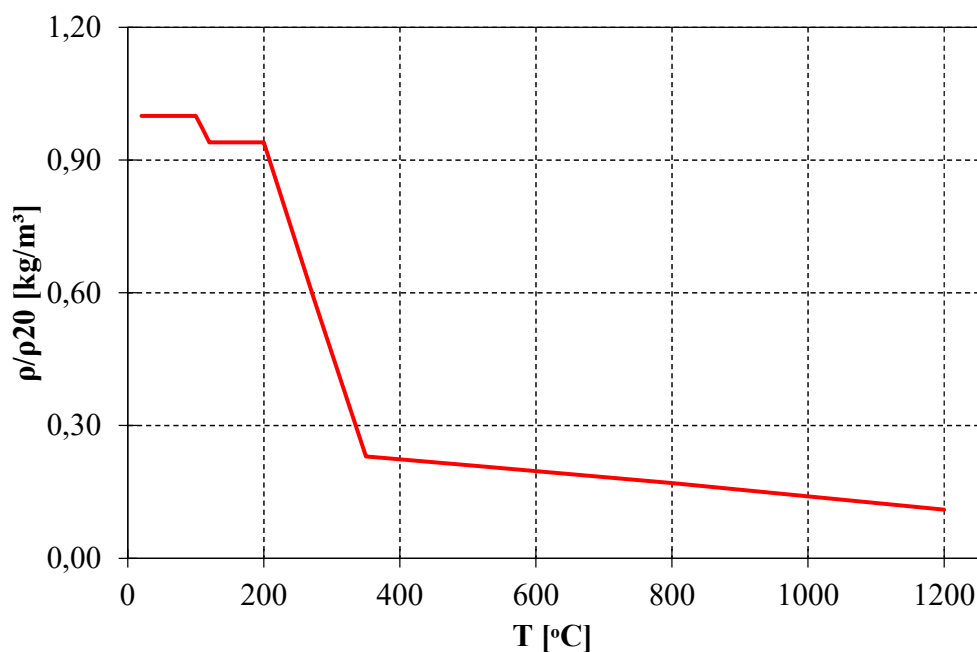


Figura 3.8: Relação de densidade do OSB, madeira compensada, aglomerados e painéis de fibra, [31].

Tabela 3.8: Propriedades térmicas dependentes da temperatura da lã mineral do tipo manta ou fosca com isolamento com nível de proteção 1 (PL1) e densidade superior a 26 kg/m³, [31].

T [C°]	λ [W/mK]	c [kJ/kgK]	ρ/ρ_{20} [kg/m ³]
20	0,036	0,88	1
100	0,047	1,04	1
200	*	1,16	0,98
400	$0,09 \times (11 \times e^{0,05 \times p_{20}} + 1,9)$	1,28	0,977
600	$0,15 \times (11 \times e^{0,05 \times p_{20}} + 1,9)$	1,355	0,97
800	$0,23 \times (11 \times e^{0,05 \times p_{20}} + 1,9)$	1,43	0,97
925	$0,30 \times (11 \times e^{0,05 \times p_{20}} + 1,9)$	1,48	0,96
1200	$0,45 \times (11 \times e^{0,05 \times p_{20}} + 1,9)$	1,58	0,89

*Para fins de representação, foi utilizado o valor de ρ_{20} para a lã de rocha empregada nesta pesquisa.

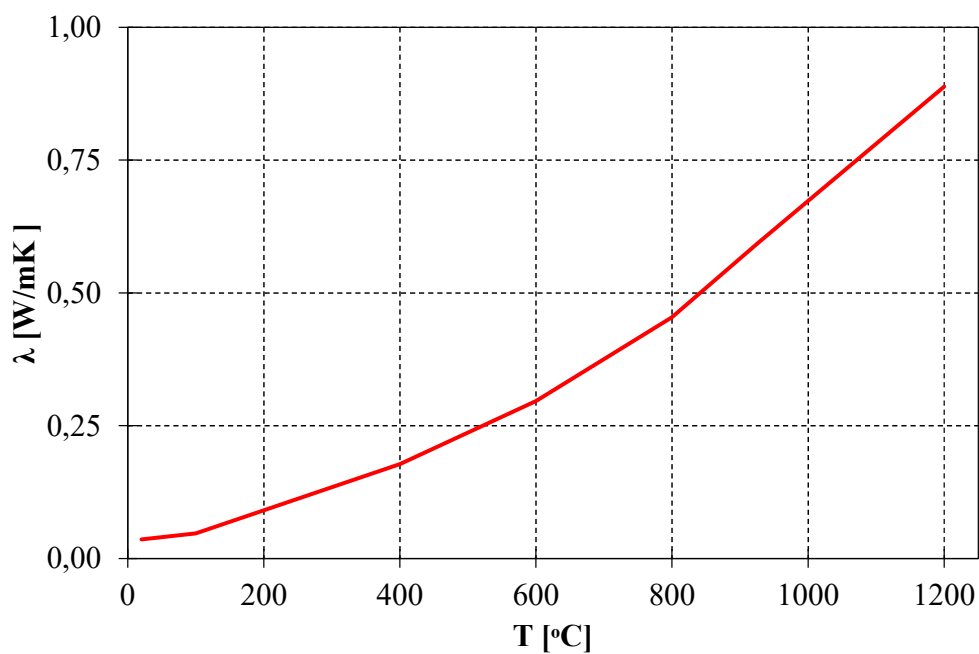


Figura 3.9: Condutividade térmica em função da temperatura para a lã mineral, [31].

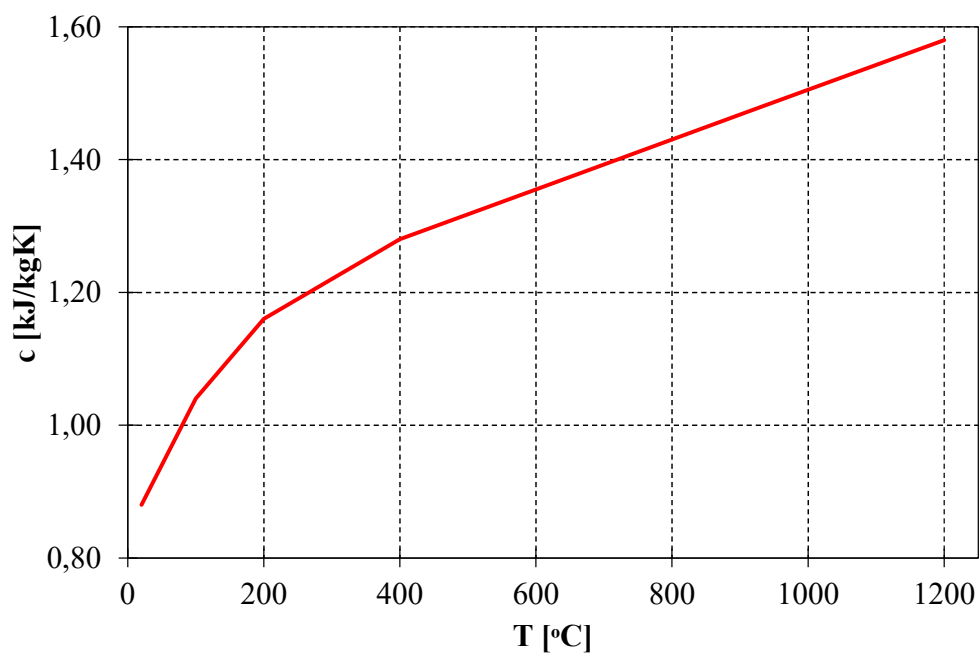


Figura 3.10: Calor específico em função da temperatura para a lã mineral, [31].

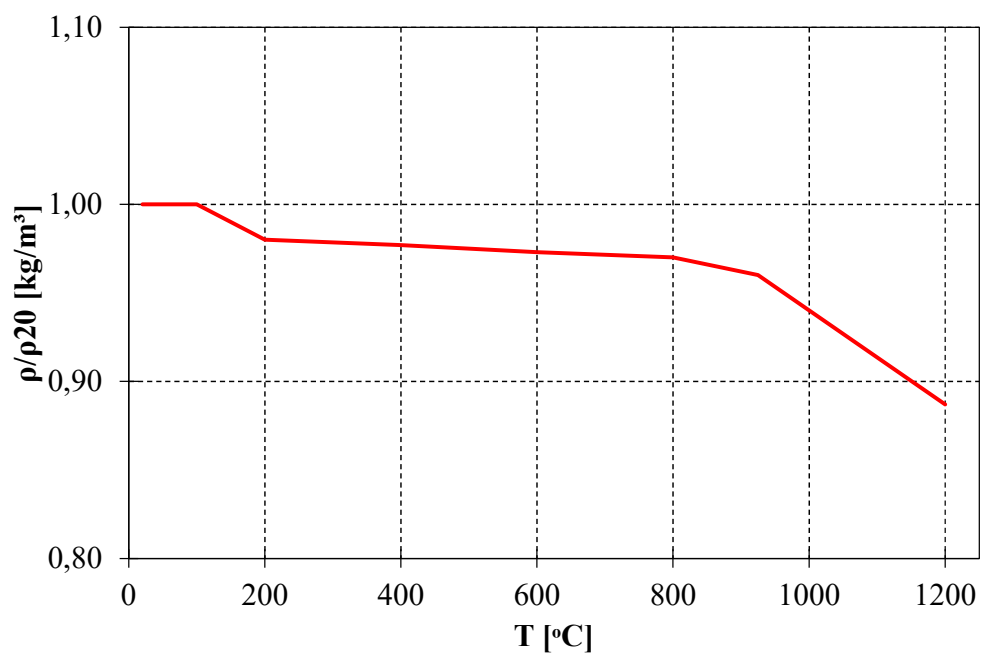


Figura 3.11: Relação de densidade da lã mineral, [31].

Capítulo 4

Testes experimentais de comportamento ao fogo

4.1 Testes no calorímetro de cone

O teste em calorimetria de cone, o qual segue o procedimento indicado no padrão internacional ISO 5660-1, avalia o comportamento ao fogo de um determinado material, tendo o aquecimento controlado por um termostato que monitora o fluxo de calor transmitido à amostra, para que este seja constante. O método permite estimar a inflamabilidade de um material, fornecendo a possibilidade de avaliar sua resposta em diferentes situações de incêndio, auxiliando na classificação de elementos de acordo com critérios de certificação em relação ao comportamento frente ao fogo, [60].

Para definir as propriedades dos materiais do modelo numérico a ser implementado para sistemas multicamadas de madeira em situação real de incêndio, serão utilizados ensaios previamente realizados no calorímetro de cone, [61], como base, para definir e padronizar parâmetros em relação às propriedades desses materiais, que serão utilizados posteriormente nos ensaios no forno, especificado a seguir neste capítulo, definindo as propriedades térmicas e intrínsecas dos materiais quando sujeitas a variações de temperatura em relação ao tempo, aferindo a qualidade do modelo. As amostras, Figuras 4.1 e 4.2, foram

ensaiadas com dimensões de 10x10 mm e sujeitas a um fluxo de calor incidente de 75 kW/m^2 , valor utilizado para um incêndio totalmente desenvolvido, gerado pelo elemento de aquecimento em forma de cone. O teste foi realizado com a amostra na horizontal, colocada num porta amostras composto por um material de baixa densidade que isola a face não exposta e as bordas do material, evitando a queima lateral e perdas de calor e de gases voláteis. Durante o teste, a massa da amostra é registada continuamente e a superfície da amostra é posicionada a 25 mm do aquecedor em cone. Dois eletrodos de faísca são colocados entre a amostra e o aquecedor para ativarem a ignição dos gases combustíveis liberados a partir da decomposição térmica inicial do material. O princípio do ensaio está na medição da quantidade de oxigênio consumido durante a combustão do material, conseguindo-se obter valores de HRR para as amostras ensaiadas. A Figura 4.3 representa as posições dos termopares inseridos na amostra.

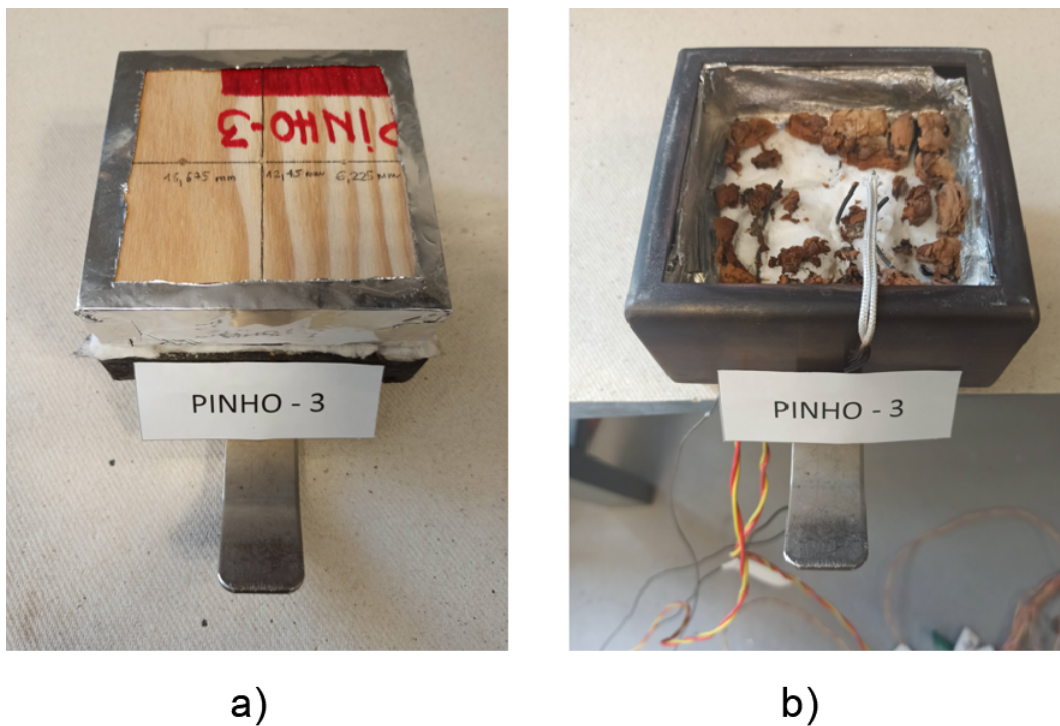


Figura 4.1: a) Amostra de pinho antes do ensaio, b) Amostra de pinho depois do ensaio, [61]

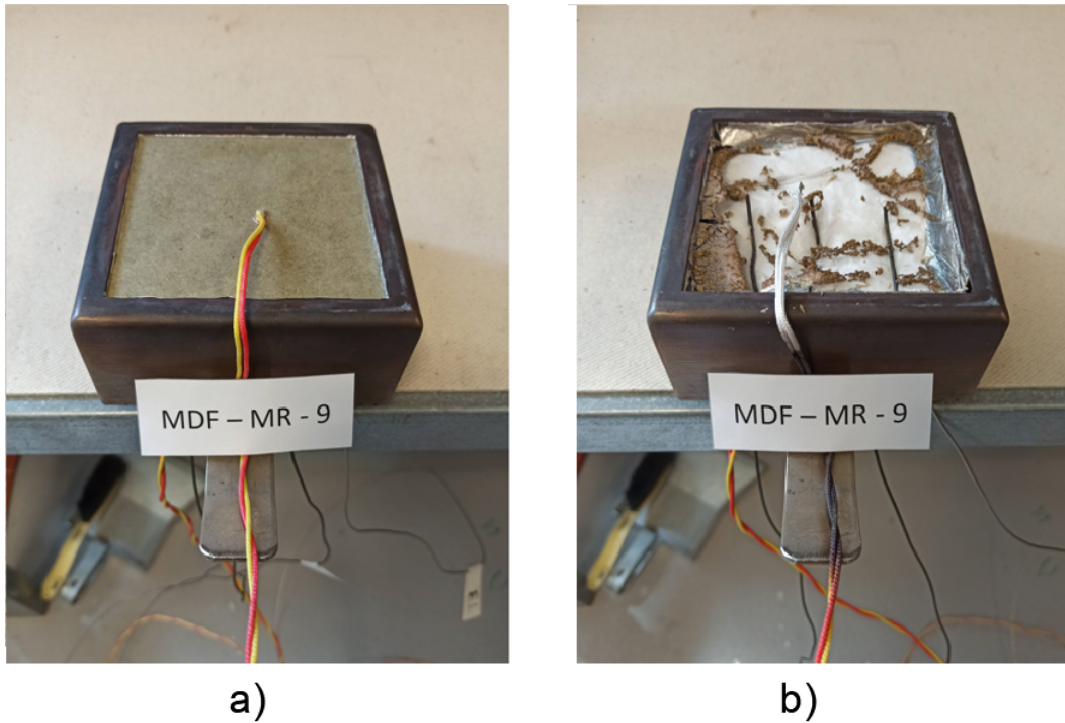


Figura 4.2: a) Amostra de MDF antes do ensaio, b) Amostra de MDF depois do ensaio, [61]

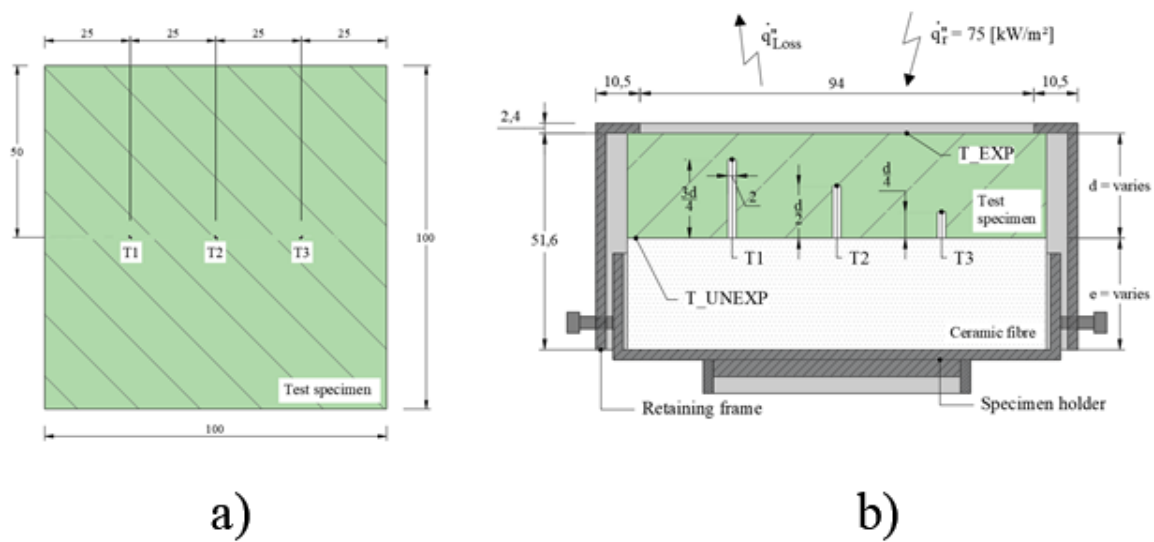


Figura 4.3: a) Vista superior da posição dos termopares nas amostras ensaiadas, b) Posições efetivas dos termopares inseridos nas amostras, em mm, [61].

A Figura 4.4 representa o equipamento utilizado.



Figura 4.4: Calorímetro de cone utilizado nos ensaios.

Esses ensaios previamente realizados forneceram dados sobre a evolução da temperatura ao longo da seção das amostras, Gráficos 4.5 e 4.6, tempo de ignição e extinção de pinho e MDF, materiais utilizados nessa pesquisa.

Os valores obtidos nos testes, que serão utilizados para a comparação mencionada, estão descritos na Tabela 4.1.

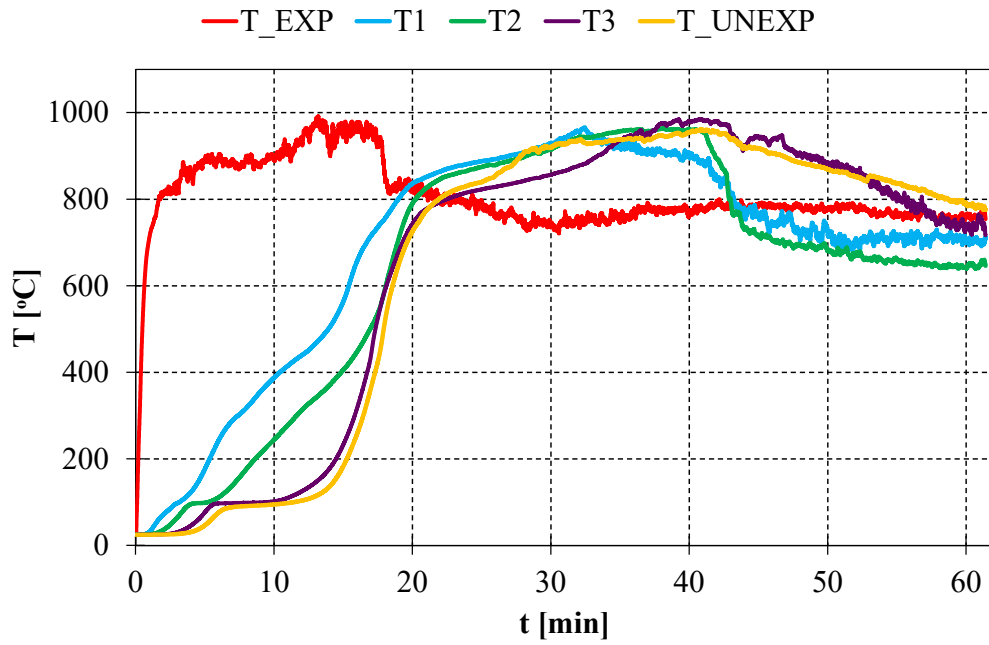


Figura 4.5: Evolução da temperatura na seção da amostra de pinho, [61].

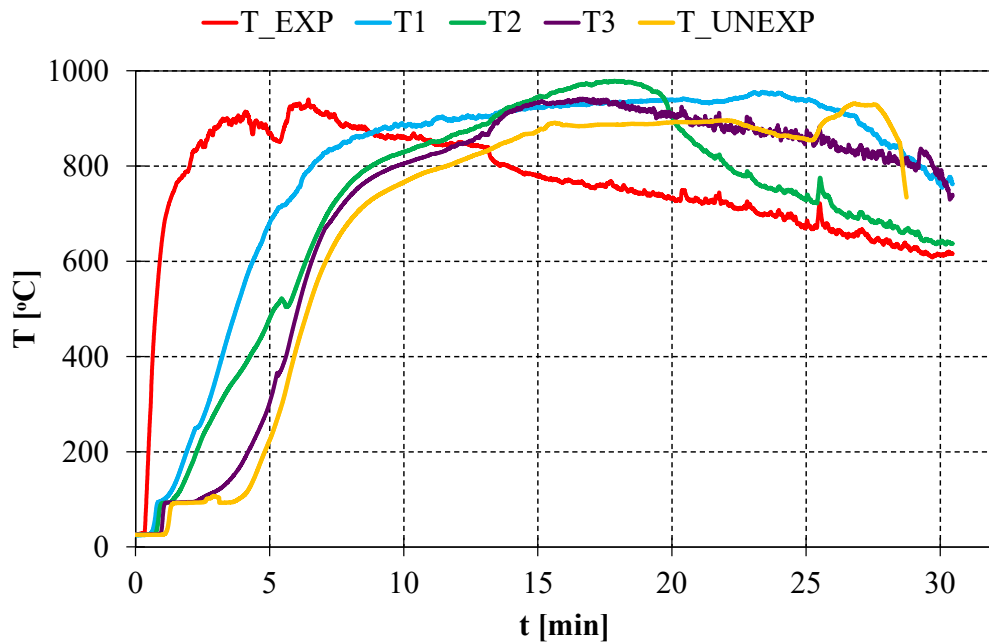


Figura 4.6: Evolução da temperatura na seção da amostra de MDF, [61].

Tabela 4.1: Resultados da reação ao comportamento ao fogo, [61], adaptado.

Espécie	Pinho	MDF
Espessura [mm]	24,9	10,0
Massa inicial [g]	166,2	82,0
Tempo de ignição [s]	16,0	14,0
Tempo de extinção [s]	1170,0	592,0
Massa residual aos 15 min. [%]	*	*
Final do teste [s]	3639,0	1806,0

**Não houve massa residual.*

As espessuras das amostras utilizadas para análise da evolução da temperatura ao longo da seção foram utilizadas de acordo com a disponibilidade de material no Laboratório de Estruturas e Resistência dos Materiais (LERM) do Instituto Politécnico de Bragança. Ainda, o tempo de cada ensaio foi medido experimentalmente, sendo que o final do experimento se deu pela carbonização total dos elementos.

4.2 Ensaios experimentais no forno

4.2.1 Introdução

Para a definir o modelo multicamada de madeira e derivados de madeira mais eficiente frente a incêndios, ensaios experimentais no forno serão desenvolvidos para fins de comparação e classificação desses materiais quanto ao isolamento. No caso específico do estudo da resistência ao fogo de elementos de construção, as normas europeias regem os ensaios. Para os ensaios experimentais no forno, a EN 1363-1 trata dos ensaios de resistência ao fogo, a EN 1634-1 e EN 1634-3 orientam os ensaios de resistência ao fogo para conjuntos de portas e sistemas de fecho e a EN 13501 classifica os produtos de construção e dos elementos construtivos em função do seu comportamento ao fogo, considerando que os equipamentos a utilizar, bem como as condições de ensaio devem estar em conformidade

com a EN 1363-1. O objetivo da determinação da resistência ao fogo é avaliar o comportamento de uma amostra de um elemento de construção quando submetido a condições definidas de aquecimento e pressão, quantificando a capacidade do elemento de resistir à exposição a altas temperaturas. Uma amostra representativa do elemento é exposta a um regime padronizado de aquecimento e o desempenho do corpo de prova é monitorado com base nos critérios descritos na norma, [37].

Sabe-se, que cada elemento construtivo comporta-se de maneira diferente em contato com o fogo e sua resistência é medida com base nos seguintes parâmetros e/ou em suas combinações, [36]:

- Critério R - Capacidade portante: capacidade do elemento construtivo de resistir mecanicamente, sem perder suas propriedades estruturais. Embora os critérios de desempenho variem de acordo com a solução construtiva e as cargas que recebem, a taxa de deformação e a máxima deformação são medidas.
- Critério E - Integridade: capacidade do elemento construtivo de impedir a passagem de fogo e gases quentes para uma área não exposta ao fogo.
- Critério I - Isolamento: capacidade do elemento construtivo de impedir o aumento da temperatura na face não exposta ao fogo.

Essa classificação é geralmente acompanhada por um número, em minutos. A resistência ao fogo do elemento de teste é expressa como o tempo durante o qual os critérios apropriados foram satisfeitos. Neste trabalho, o critério analisado será o de isolamento. O critério I pode ser considerado satisfeito quando o aumento médio da temperatura em toda a superfície não exposta é limitado a 140 °C e o aumento máximo da temperatura, em qualquer ponto dessa superfície, não exceda 180 °C, valores acrescidos à temperatura ambiente de 20 °C, segundo a EN 1363-1, (para a exposição ao fogo da curva padrão temperatura-tempo). Para a aquisição de dados e análise do ensaio no forno, será utilizado o software *catman easy*.

4.2.2 Elaboração dos ensaios experimentais no forno

Serão realizados dois ensaios a fim de comparar duas soluções construtivas distintas de painéis tipo sanduíche multicamada de madeira e derivados de madeira, os quais serão instalados em uma parede de tijolos e apoiados em um aro de madeira. A escolha dos sistemas foi feita baseada nos materiais disponíveis no LERM, bem como suas espessuras.

As designações "BT", do lado exposto ao fogo, e "DT", do lado não exposto ao fogo, Figura 4.7, dizem respeito as posições dos termopares inseridos nos dois modelos nas faces expostas e não expostas ao fogo, além dos instalados no aro dos sistemas, todos de acordo com a EN 1363-1. Para fins desta pesquisa, os valores de temperatura medidos pelos termopares que serão considerados para avaliação do tempo de resistência ao incêndio são os: BT1, BT2, DT1, DT2, DT3, DT4, DT5, DT6, DT7 e DT8. As Figuras 4.7 e 4.8 representam as dimensões dos modelos ensaiados.

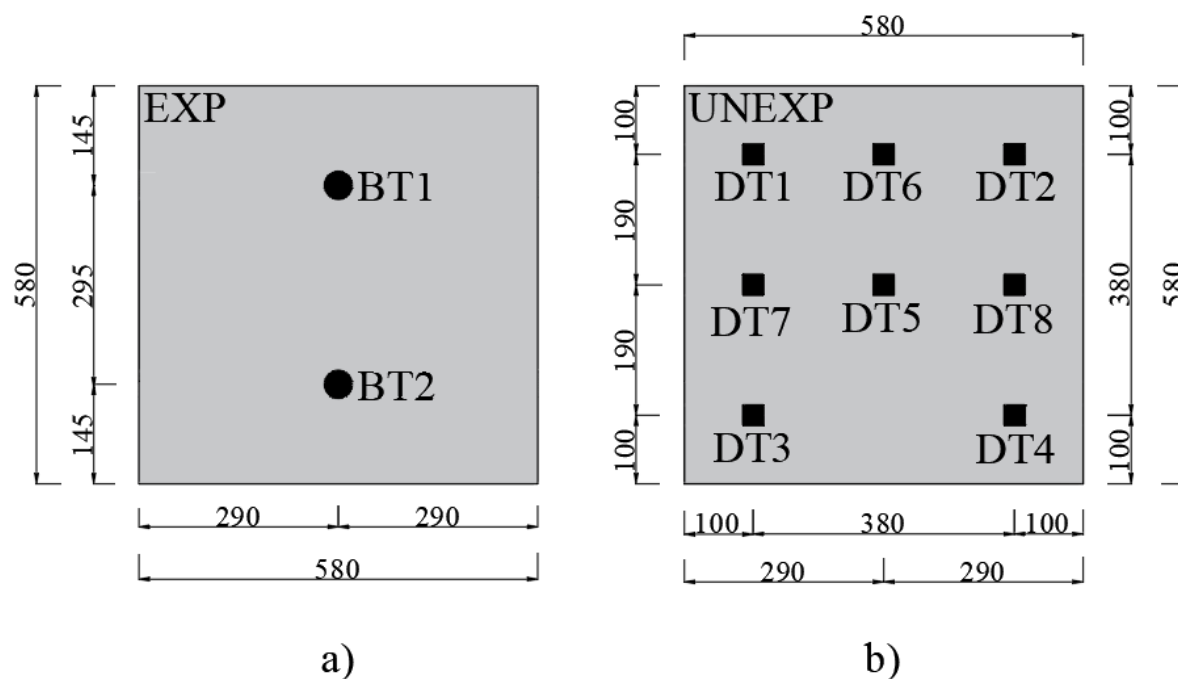


Figura 4.7: Localização dos termopares inseridos nos modelos: a) lado exposto; b) lado não exposto, em mm.

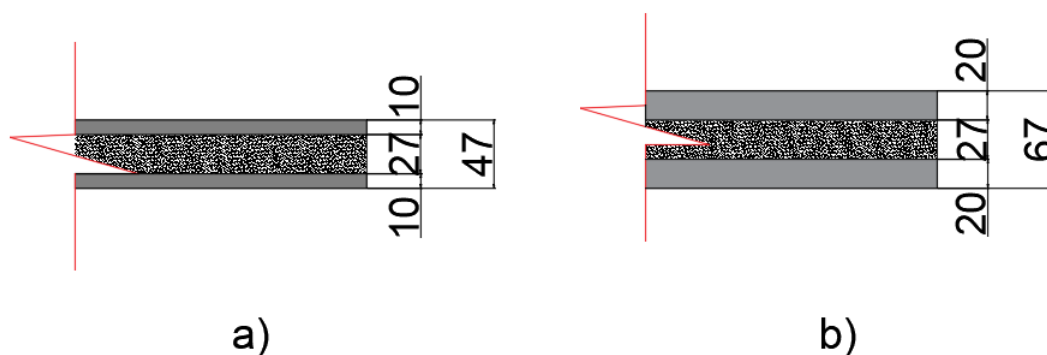


Figura 4.8: Dimensões da espessura dos sistemas multicamadas: a) MDF + lã de rocha + MDF; b) pinho + lã de rocha + pinho, em mm.

O primeiro ensaio realizado contou com o sistema multicamada de MDF + lã de rocha + MDF e o segundo com pinho + lã de rocha + pinho. As Figuras 4.9, 4.10, 4.12 e 4.11 representam a construção efetiva dos sistemas ensaiados.



Figura 4.9: Seção transversal do modelo de MDF ensaiado.



Figura 4.10: a) Lado exposto do modelo de MDF ensaiado, b) Lado não exposto instalado na estrutura do forno do modelo de MDF ensaiado.



Figura 4.11: a) Lado exposto do modelo de pinho ensaiado, b) Lado não exposto instalado na estrutura do forno do modelo de pinho ensaiado.



Figura 4.12: Seção transversal do modelo de pinho ensaiado.

4.2.3 Resultados experimentais e discussões

A elevação de temperatura imposta em ambos os sistemas ensaiados seguiu a curva ISO834. Para isso, foi inserido um termopar de placa dentro do forno para controlar a temperatura baseado na curva de incêndio padrão.

A temperatura dentro do forno, a curva imposta pela Equação 2.3 e os resultados das temperaturas medidas pelos termopares inseridos no lado exposto do sistema estão representadas na Figuras 4.13 e 4.15 e os resultados obtidos pelos termopares instalados na amostra no lado não exposto estão representados nos gráficos abaixo, descritos pelas Figuras 4.14 e 4.16.

Para fins de análise de isolamento, os gráficos representados pela Figura 4.17 e 4.18 permitem avaliar o tempo resistente dos dois ensaios, para posterior classificação.

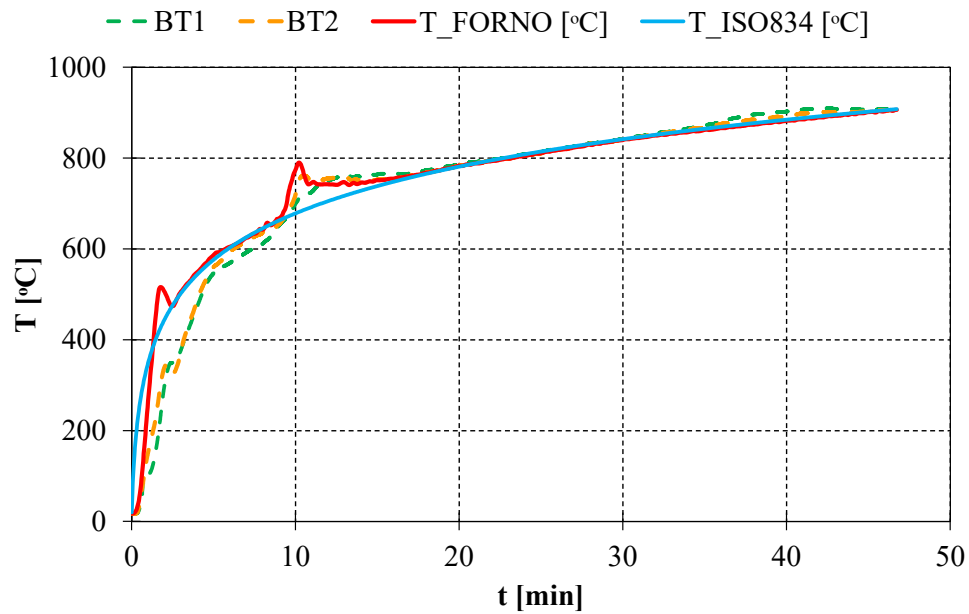


Figura 4.13: Gráfico da elevação da temperatura do forno, da curva ISO834 de acordo com a Equação 2.3 e das temperaturas medidas pelos termopares na região exposta da amostra de MDF.

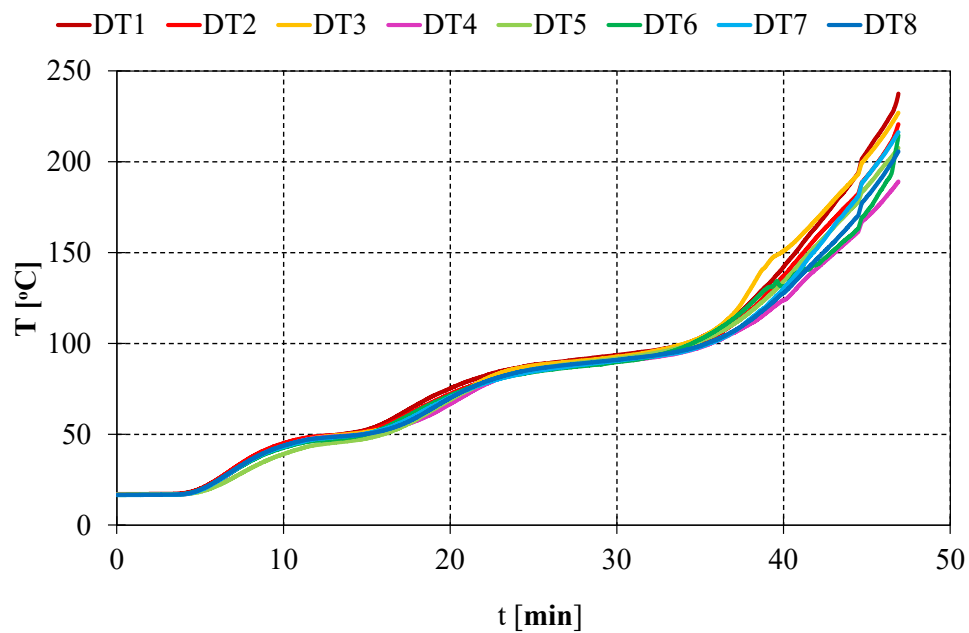


Figura 4.14: Gráfico da elevação da temperatura nos termopares instalados na face não exposta do modelo de MDF.

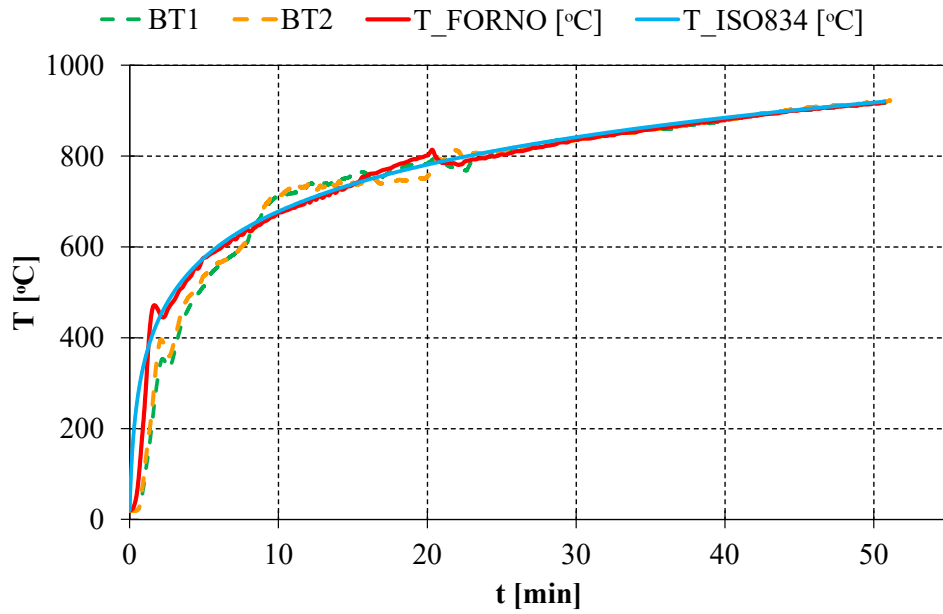


Figura 4.15: Gráfico da elevação da temperatura do forno, da curva ISO834 de acordo com a Equação 2.3 e as temperaturas medidas pelos termopares na região exposta da amostra de pinho.

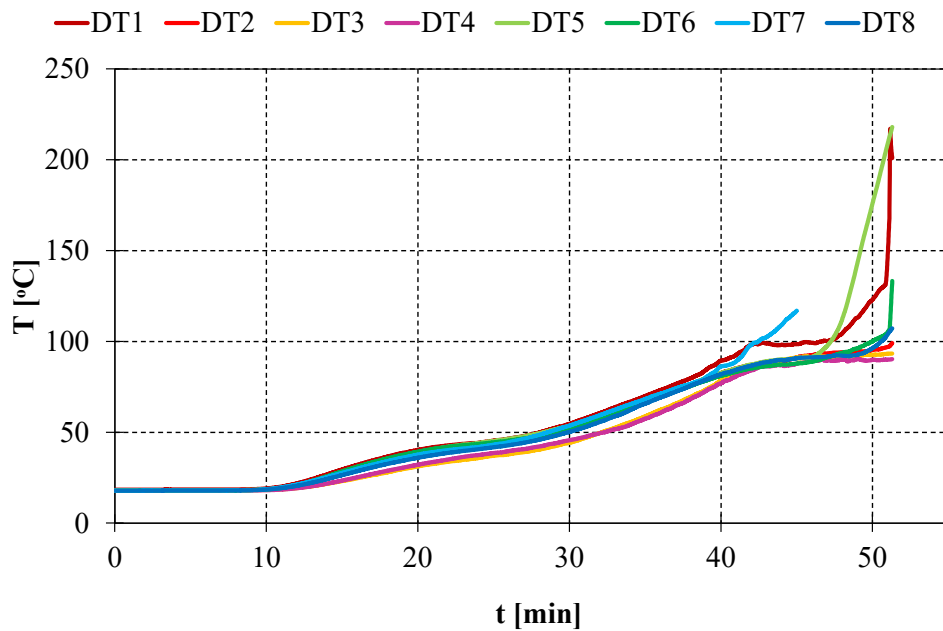


Figura 4.16: Gráfico da elevação da temperatura nos termopares instalados na face não exposta do modelo de pinho.

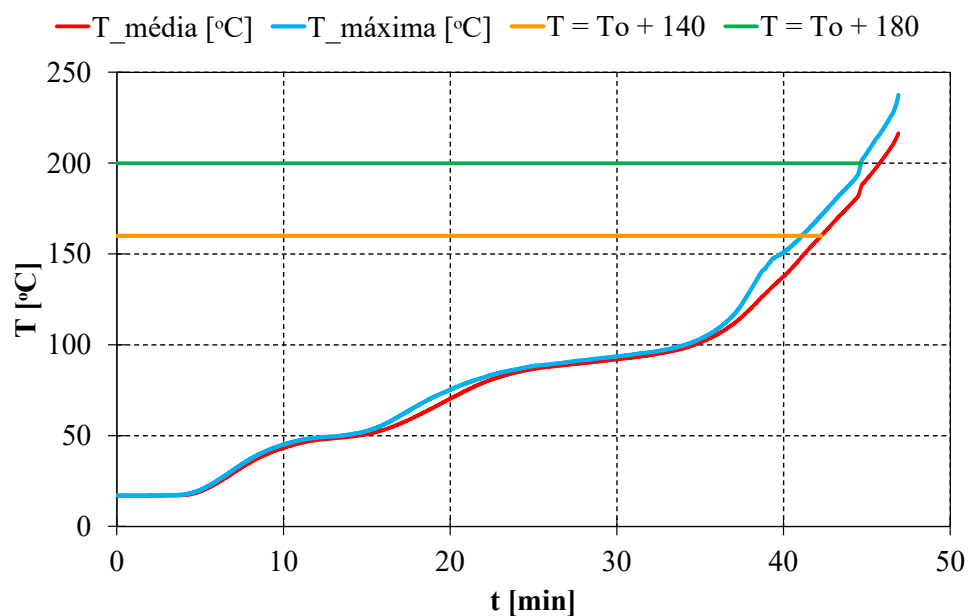


Figura 4.17: Gráfico para avaliação do tempo resistente do sistema multicamada MDF + lã de rocha + MDF.

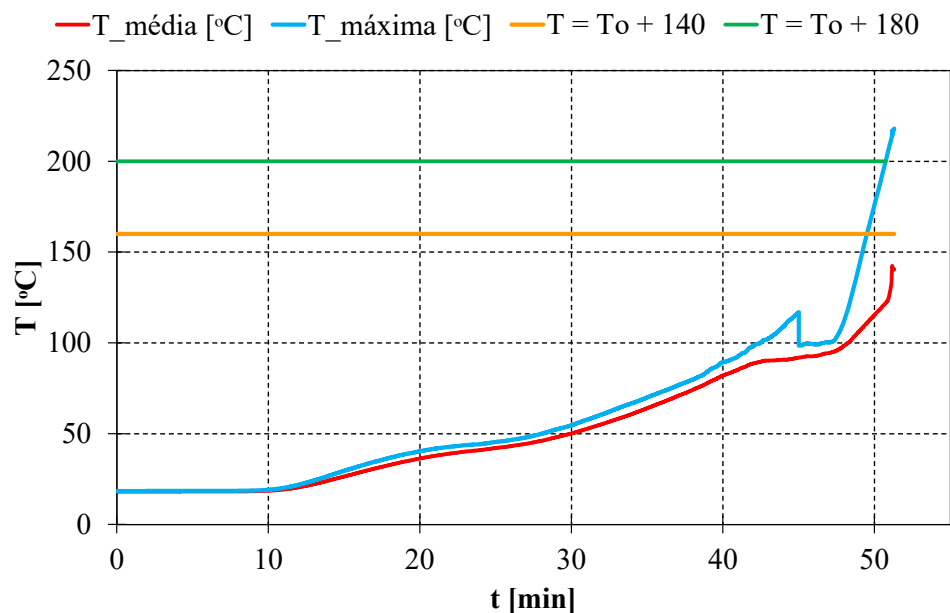


Figura 4.18: Gráfico para avaliação do tempo resistente do sistema multicamada pinho + lã de rocha + pinho.

Observando o gráfico obtido para a elevação das temperaturas nos ensaios, é possível

apontar comportamentos distintos das curvas de temperatura que podem ser explicados. Para isso, é preciso frisar que, mesmo que a curva de incêndio ISO834 seja imposta ao forno, o comportamento da temperatura dentro dele não segue exatamente esse padrão, isso porque, o aumento da temperatura do equipamento depende dos queimadores dentro dele, os quais controlam o ambiente do ensaio.

Essa questão faz com que os termopares da região exposta demorem para adquirir e estabilizar valores de temperatura. Tendo em vista que são dois painéis diferentes, os tempos em que cada fenômeno ocorre também são diferentes. O primeiro aumento súbito de temperatura, verificado nos ensaios aproximadamente após 2 minutos do início do experimento, refere-se à inércia térmica dos queimadores do forno e o segundo, aos 10 minutos para a amostra de MDF e 20 minutos para a amostra de pinho, indica a carbonização dos painéis internos e a tentativa manual dos executores do ensaio de fazer com que a temperatura se alinhe à curva de incêndio padrão. Após esses comportamentos, a curva se estabelece e volta a seguir os pontos da ISO834.

O final dos ensaios se deu pela passagem completa do fogo para a superfície não exposta do modelo, após 46,88 minutos de exposição para modelo composto por MDF e 51,30 minutos para o sistema elaborado com pinho, explicando o aumento súbito de temperatura obtida pelos termopares inseridos na região não exposta do sistema ao final de cada ensaio. O comportamento de todos os experimentos foi observado e verificou-se, no primeiro ensaio, o descolamento completo da placa de MDF da superfície exposta da amostra, aos 10 minutos de ensaio, auxiliando no aumento repentino da temperatura nessa região.

Para o segundo ensaio, após 11 minutos de ensaio observou-se o descolamento do termopar BT2, resultado também no aumento da temperatura nessa região. Ainda, aos 45 minutos de experimento, foi percebido que o termopar DT7 desgrudou da placa de pinho, fazendo com que, a partir deste tempo, a temperatura adquirida por ele fosse a temperatura ambiente ao invés da temperatura da amostra ensaiada. Por isso, todos os valores obtidos por esse termopar, após o seu descolamento da placa, foram desconsiderados. As Figuras 4.19 e 4.20 representam os resíduos carbonizados das amostras de madeira ensaiadas.



Figura 4.19: a) Carbonização completa da placa de MDF ao fim do ensaio no forno, b) Interior do forno após o ensaio.



Figura 4.20: a) Interior do forno após o ensaio do modelo de pinho; b) Região não exposta ao fogo da placa de pinho ao final do ensaio no forno.

Verifica-se, portanto, que o tempo resistente do modelo multicamada de MDF foi de 42,25 minutos, visto que o critério de temperatura média falhou primeiro. De acordo com os critérios impostos na EN 13501-2, o sistema será classificado como I_130 , [62]. Para o

segundo modelo ensaiado, verificou-se grande discrepância entre os valores medidos pelos termopares DT2, DT3, DT4, DT6 e DT8 quando comparados aos DT1 e DT5, sendo que eles continuaram aumentando, mas não na mesma proporção que os outros. Além disso, o empenamento da placa ensaiada mais visível aconteceu entre os termopares DT7 e DT3, nos 46 minutos de ensaio, o que pode ser o motivo dessas diferenças de temperatura. Tendo em vista os comportamentos citados acima, para fins de classificação, o critério da temperatura máxima entre todos os termopares considerados falhou primeiro, em 50,73 minutos de ensaio, classificando o sistema como I₁45, [62].

Capítulo 5

Modelagem numérica

5.1 Introdução

A forma mais efetiva de reproduzir um incêndio é através de testes ao fogo em escala real, sujeitando elementos ao cenário pretendido. Estas experiências requerem elevados investimentos em materiais e dispositivos de testes, além da existência de equipes científicas multidisciplinares para a definição do cenário de incêndio e instalação dos equipamentos de medida pretendidos, [35]. Tendo isso em vista, uma opção viável e eficiente para estudar e observar situações de incêndio são as simulações numéricas. Neste trabalho, elas foram realizadas com o suporte do programa Ansys Workbench, pelo método dos elementos finitos, e se enquadra na categoria de programas de Engenharia Auxiliada por Computadores (CAE), tendo como objetivo auxiliar o engenheiro nas decisões de algumas das etapas do desenvolvimento, dimensionamento e validação de projetos, dado que o programa apresenta os resultados graficamente, permitindo identificação visual da geometria e resultados. De maneira geral, o software reduz o custo e tempo necessário no processo de desenvolvimento de projetos, pela rapidez da análise, melhora a coerência do elemento antes da sua fabricação, reduzindo os custos associados ao material, e reduz a probabilidade de falha dos componentes, já que uma eventual falha pode ser deduzida

antes de sua execução, [63]. Para simulações térmicas, o elemento finito SOLID70 é utilizado. Ele opera através de funções de interpolação linear, sendo um processo de solução incremental e iterativo (não linear), tendo o critério de convergência baseado no *heat flow* com uma tolerância de 0,5% e valor de referência de 10^{-6} W. Ainda, possui oito nós com um único grau de liberdade, a temperatura, e é aplicável a uma análise térmica 3D de estado estacionário ou transiente, sendo o transiente utilizado nesta pesquisa. O elemento é definido pelas propriedades ortotrópicas inseridas no programa seguindo a direção das coordenadas globais do modelo e esta representado pela Figura 5.1.

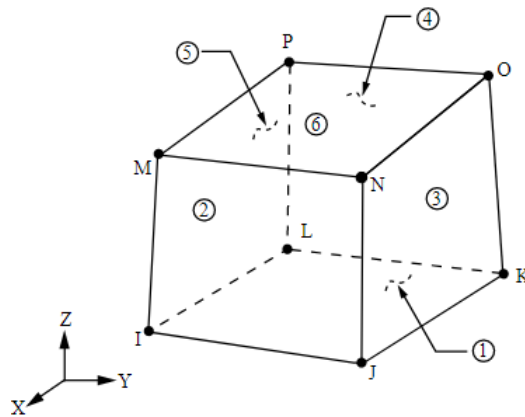


Figura 5.1: Geometria do SOLID70, *Ansys Help*.

Tendo em vista a geometria originalmente contínua do material, o software a subdivide em pequenos elementos, em uma quantidade finita, mantendo-os interligados por nós, formando o que é chamado de malha. Esse processo denomina-se discretização e compreende a subdivisão dos objetos em pequenas partes denominadas elementos e dos respectivos nós que as interligam. Sabe-se que, quanto mais refinada for a malha, mais estará próxima do contínuo e, conseqüentemente, melhores serão os resultados, porém, malhas refinadas possuem mais elementos e nós, resultando em maior quantidade de cálculos e mais tempo para obter os resultados, [63]. A análise pelo método de elementos finitos se divide em três etapas distintas: o pré-processamento, processamento e pós-processamento.

O pré-processamento é caracterizado por todas as definições e propriedades estabelecidas antes da simulação, as quais determinam o que será analisado e em que condição será

5.2. DEFINIÇÃO DO MODELO NUMÉRICO PARA OS ENSAIOS NO CALORÍMETRO DE CONE67

feita a análise. A geometria, malha, propriedades dos materiais, condições de contorno e tipo de análise devem ser definidos. Já a etapa de processamento envolve a configuração do programa para fornecer os resultados de acordo com o tipo de análise desejada. Os incrementos de tempo inicial, mínimo e máximo, adequados para a convergência desejada, são determinados nessa fase.

Por fim, na etapa de pós-processamento, obtém-se os resultados das análises previamente estabelecidas na etapa de processamento, [63].

5.2 Definição do modelo numérico para os ensaios no calorímetro de cone

5.2.1 Geometria do modelo

Para essa etapa, serão utilizados os resultados dos ensaios de amostras de pinho, com 24,99 mm de espessura, e de MDF, com 10 mm de espessura. As medidas de espessura, comprimento e largura totais para o ensaio no calorímetro de cone são fixas, seguindo o padrão do ensaio, fazendo com que o isolante térmico, o qual é um material fixo, adapte-se para o tamanho desejado, com espessura total de 40 mm, como representa a Figura 5.2.

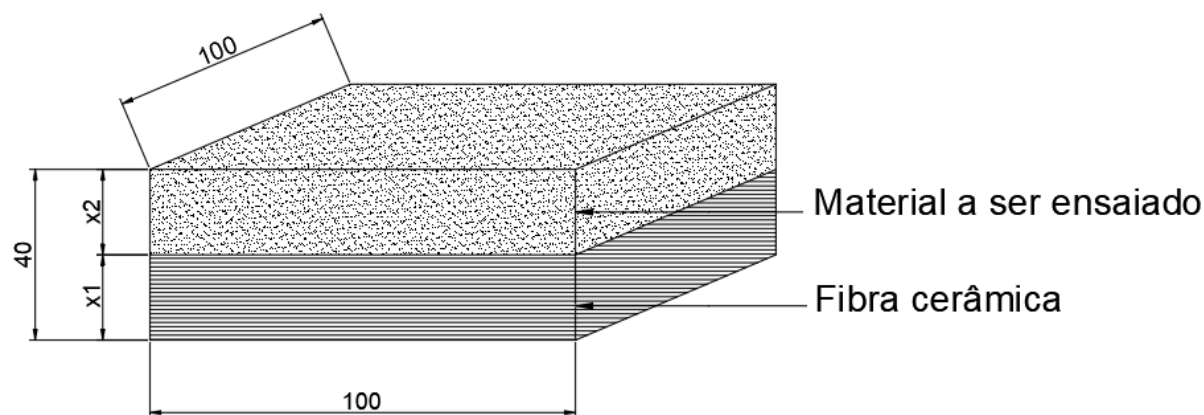


Figura 5.2: Modelo 3D das amostras ensaiadas, em milímetros.

5.2.2 Propriedades dos materiais

As propriedades necessárias para a análise térmica dos materiais foram fundamentalmente extraídas da nova proposta do Eurocódigo 1995-1-2 de 2020 e estão apresentadas nas Tabelas 5.1, 5.2 e 5.3.

Madeira sólida

A madeira sólida estudada neste trabalho foi o pinho de 24,9mm de espessura, com 8,12% de umidade, medida de acordo com a Norma EN 322:1993, apresentada na seção 2.7.1. A densidade do material foi obtida de acordo com as médias das densidades medidas no ensaio base, [61], e foi adaptada de acordo com a umidade medida, como apresentado na Seção 3.4.4. Além disso, o calor específico também foi corrigido, de acordo com a Equação 3.8.

Tabela 5.1: Propriedades físicas do pinho a 8,12% de umidade, adaptado, [31].

T [C°]	λ [W/mK]	c [J/kgK]	ρ [kg/m ³]
20	0,12	1530,00	667,42
99	*	1770,00	667,42
100	*	10166,20	667,42
120	*	10128,83	667,42
121	*	10091,45	615,32
200	0,15	2120,00	615,32
250	*	2000,00	573,84
300	*	1620,00	470,13
350	0,07	710,00	318,03
400	*	850,00	235,07
500	0,09	1000,00	*
600	*	1400,00	172,84
800	0,35	1650,00	159,02
1200	1,50	1650,00	*

MDF

O painel de madeira utilizado foi o MDF com 10 mm de espessura e com 5,95% de umidade, medida de acordo com a Norma EN 322:1993, apresentada na seção 2.7.1. A

5.2. DEFINIÇÃO DO MODELO NUMÉRICO PARA OS ENSAIOS NO CALORÍMETRO DE CONE69

densidade do material foi obtida de acordo com as médias das densidades medidas no ensaio base, [61], e foi adaptada de acordo com a umidade, como apresentado na Seção 3.4.4. Além disso, o calor específico também foi corrigido, de acordo com a Equação 3.8.

Tabela 5.2: Propriedades físicas do MDF a 5,95% de umidade, adaptado, [31].

T [C°]	λ [W/mK]	c [J/kgK]	ρ [kg/m ³]
20	0,12	1790	875,92
100	0,30	1790	875,92
110	0,23	8528	849,64
120	0,15	1790	823,36
200	0,18	1790	823,36
275	0,14	6170	508,03
350	0,09	690	201,46
500	0,23	690	183,94
800	0,74	690	148,91
1200	4,20	690	96,35

Fibra cerâmica

As propriedades do isolante térmico padrão utilizado nos ensaios de calorímetro de cone foram extraídas da ficha técnica do fabricante, [64].

Tabela 5.3: Propriedades físicas da fibra cerâmica, adaptado, [64].

T [C°]	λ [W/mK]	c [J/kgK]	ρ [kg/m ³]
20	0,05	995	128
200	0,05	1017	128
400	0,08	1030	128
600	0,12	1068	128
800	0,18	1093	128
1000	0,25	1130	128
1200	0,3	1140	128

5.2.3 Malha de elementos finitos

Para definir a malha de elementos finitos utilizada nesse modelo, foram elaboradas estratégias para equilibrar a qualidade de bons resultados e o tempo de espera para

obtê-los. A discretização com a definição de forma, tamanho, posição e quantidade de elementos foram definidas priorizando o refinamento da malha na seção longitudinal do elemento, sendo que, para uma única geometria base, o pinho de 24,9 mm, realizou-se testes de convergência e, atendendo as limitações computacionais, adotou-se a malha que apresentou menos interferência nos resultados, sendo a padrão para todas as simulações posteriores.

Inicialmente, foram feitas análises sucessivas com malhas de 1, 2, 3, 4 e 5 mm na seção longitudinal do elemento, mantendo 5mm na malha da seção transversal e da fibra cerâmica, verificando a ocorrência da convergência de resultados. Para fins de clareza na visualização, a Figura 5.3 demonstra um exemplo com a malha de 1 mm.

Mesh
14/02/2022 23:17

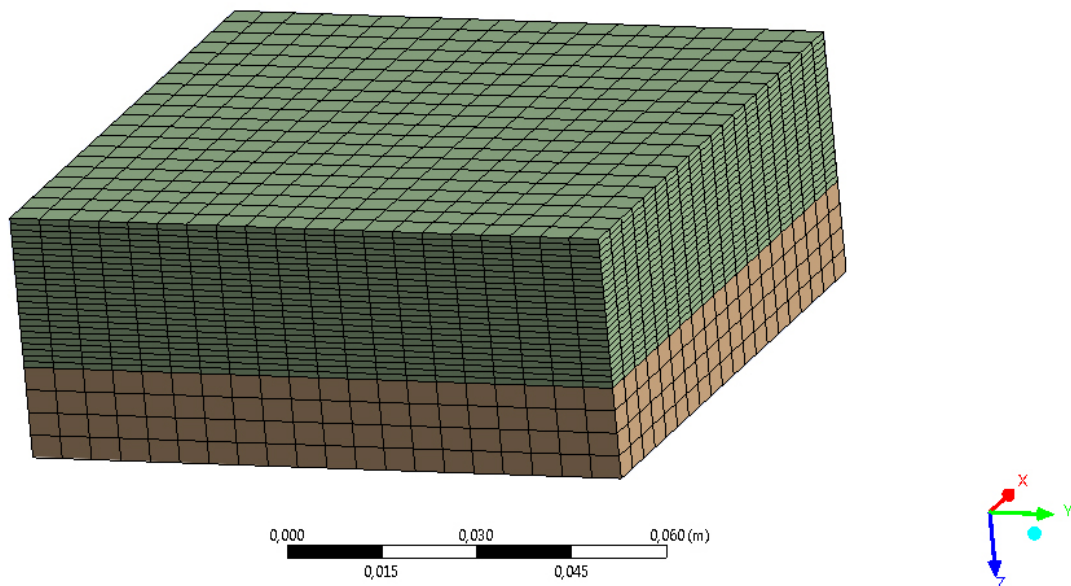


Figura 5.3: Exemplo de implementação da malha de elementos finitos.

Para otimizar essas análises, utilizando a ferramenta *design points* fornecida pelo software, foi possível verificar a temperatura máxima no local escolhido para a comparação, sendo o ponto de encontro do pinho com a fibra cerâmica, exatamente no meio, por ser um local que permite grande variabilidade de medições de temperaturas por meios numéricos. A Figura 5.4, representa a região descrita.

5.2. DEFINIÇÃO DO MODELO NUMÉRICO PARA OS ENSAIOS NO CALORÍMETRO DE CONE71

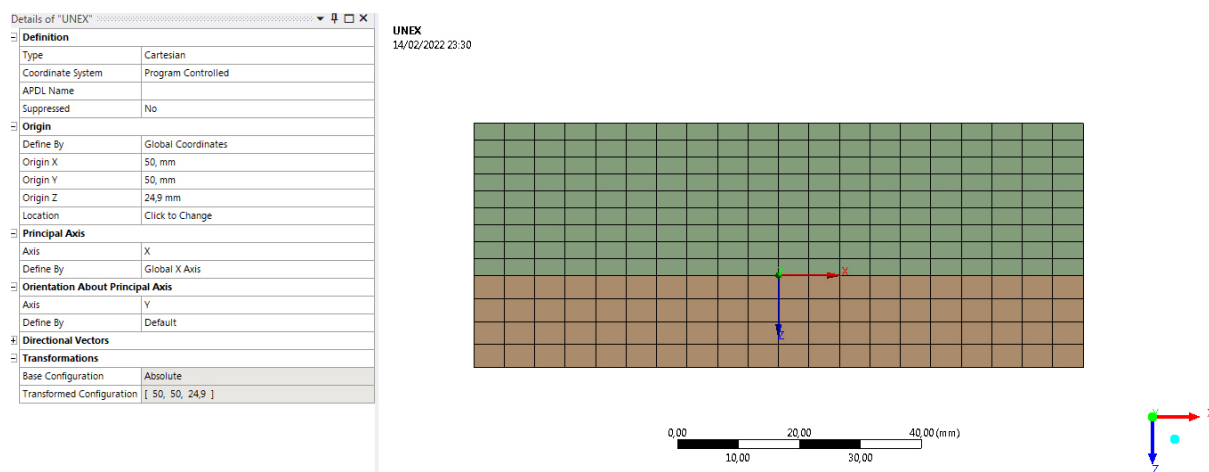


Figura 5.4: Local de análise da temperatura para definição da malha.

Além das dimensões da malha, o incremento de tempo inicial, máximo e mínimo também apresentaram grande diferença na convergência dos resultados. Os resultados das simulações estão apresentados na Tabela 5.4.

Tabela 5.4: Análise da qualidade da malha de elementos finitos.

Malha (mm)	1	2	3	4	5
dt máx 5s, dt inicial 1s e dt mín. 0,01s	*	*	304,14	284,44	272,15
dt máx 5s, dt inicial 1s e dt mín. 0,001s	299,91	299,86	304,14	284,44	272,15
dt máx 60s, dt inicial 1s e dt mín. 0,01s	*	*	318,05	308,78	304,85
dt máx 60s, dt inicial 1s e dt mín. 0,001s	267,49	323,95	318,05	308,78	304,85
dt máx 1s, dt inicial 1s e dt mín. 0,001s	305,82	303,79	299,22	295,65	285,22
dt máx 5s, dt inicial 5s e dt mín. 0,01s	301,22	304,83	292,84	284,87	279,16
dt máx 5s, dt inicial 10s e dt mín. 0,1s	301,22	304,83	292,84	284,87	279,16
dt máx 60s, dt inicial 5s e dt mín. 0,01s	262,40	320,04	401,37	312,70	207,81
dt máx 60s, dt inicial 10s e dt mín. 0,1s	262,40	320,04	401,37	312,70	207,81
*Limitações computacionais					
**Todos os valores representados nesta tabela são de temperaturas em graus celsius					

Antepondo o equilíbrio mencionado anteriormente e levando em consideração que o

modelo ensaiado é um modelo simples, a malha escolhida como padrão foi a de 3 mm, com incrementos de tempo máximo e inicial de 1 s e mínimo de 0,001 s, garantindo a convergência das propriedades dos materiais e a otimização do tempo de simulação.

5.2.4 Condições de fronteira

O estudo em que o modelo numérico base se fundamentou, [61], sujeita as amostras de madeira à um fluxo de calor do calorímetro de cone de 75 kW/m². Para efeitos de perda de calor, foi considerado uma convecção normal, visto que o ar em que a amostra estará perdendo calor está em repouso. As Equações 5.2 e 5.1 traduzem esse comportamento e estão adaptadas para esse caso. Para efeitos de convecção, o coeficiente de convecção adotado foi de $\alpha_c=4$ W/m²K, de acordo com o Eurocódigo 1991-1-2, [54]. Ainda, a temperatura ambiente para a convecção do pinho foi adotada como 25,53°C e do MDF como 26,99°C, ambas baseadas nas temperaturas iniciais do estudo base, medidas em laboratório.

$$h_{conv} = \alpha_c \times (\theta_g - \theta_m) \quad (5.1)$$

Onde:

h_{conv} é o fluxo de calor líquido devido à convecção [W/m²];

α_c é o coeficiente de transferência de calor por convecção [W/m²];

θ_g é a temperatura da superfície do elemento exposto ao fogo [°C];

θ_m é a temperatura do gás que envolve o membro exposto [°C].

Para efeitos de radiação, a emissividade foi considerada como 0,8, segundo o Eurocódigo 1995-1-2 e a temperatura ambiente para a radiação do pinho foi adotada como 25,53 °C e do MDF como 26,99 °C, ambas baseadas nas temperaturas iniciais do estudo base.

$$h_{rad} = \varepsilon_m \times \sigma \times [(\theta_r + 273)^4 - (\theta_m + 273)^4] \quad (5.2)$$

Onde:

5.2. DEFINIÇÃO DO MODELO NUMÉRICO PARA OS ENSAIOS NO CALORÍMETRO DE CONE73

h_{rad} é o fluxo de calor líquido devido à radiação [W/m^2];

ϵ_m é a emissividade da superfície do elemento;

σ é a constante de Stephan Boltzmann [$5,67 \cdot 10^{-8} W/m^2 K^4$];

θ_r é a temperatura de radiação efetiva da superfície do elemento [$^{\circ}C$];

θ_m é a temperatura do ambiente [$^{\circ}C$].

Ainda, foi definindo um contato perfeito entre o material ensaiado e a fibra cerâmica e, também, foi considerado um fluxo de calor igual a zero na parte inferior da amostra. Além do fluxo de calor do calorímetro de cone que chega à amostra por radiação, faz-se necessário também considerar o fluxo de calor da própria chama.

O fluxo de calor da chama é descrito como o fluxo de calor radiativo mais convectivo da chama para a superfície, afetando significativamente a taxa de queima do material, [65]. Para o pinho, Petrella, [66], ensaiou oito materiais à base de madeira, obtendo um valor de aproximadamente $30,9 \pm 11 \text{ kW/m}^2$. Para o MDF, Huang *et al*, [67], baseado no estudo de Li *et al*, [68], desenvolveu um gráfico do fluxo de calor de chama transiente medido para amostras do material. A Figura 5.5 representa os resultados obtidos.

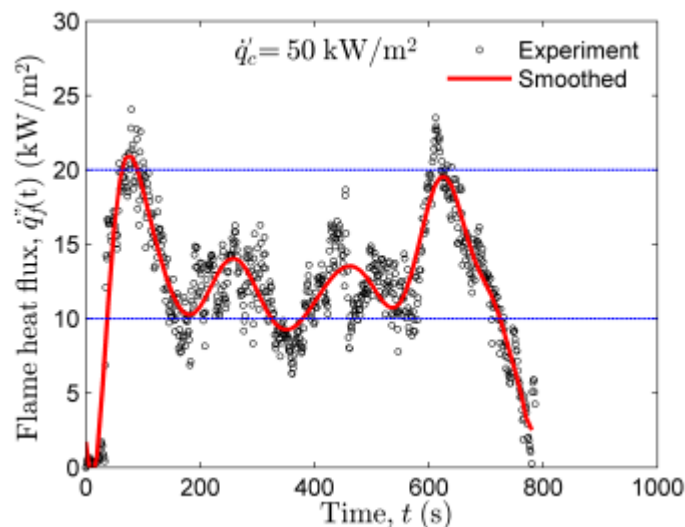


Figura 5.5: Fluxo de calor de chama transiente medido para o MDF, [67], [68].

Visto que é difícil medir o fluxo de calor da chama real para amostras no calorímetro de cone, devido à diferença desse valor para cada material e às limitações dos ensaios

experimentais quanto à essa medição, com o intuito de aproximar os valores de temperatura das simulações numéricas dos ensaios experimentais, os valores de $41,9 \text{ kW/m}^2$ e 20 kW/m^2 foram utilizado como base para o valor do fluxo de calor da chama para o pinho e MDF, respectivamente. Esse valor de fluxo adicional foi inserido no software entre o tempo de ignição até o tempo de extinção da chama obtidos no estudo base, considerando também a influência da emissividade dos materiais, adotado como 0,8, conforme discutido na Seção 3.4.3. Além disso, baseado nos gráficos obtidos no estudo base, foi observado que o MDF apresentou resistência para elevar a temperatura do termopar exposto no começo do ensaio, fazendo com que o modelo numérico se ajuste a esse comportamento inserindo o fluxo de calor da chama no tempo de ignição apenas depois que a temperatura da superfície começou de fato a ser elevada, ajustando a curva do começo da modelagem. A Figura 5.6 representa o detalhamento do começo do ensaio base do calorímetro de cone, que descreve o esse comportamento.

*Todas as abreviações "EXP" e "UNEXP" representam a face exposta e não exposta, respectivamente.

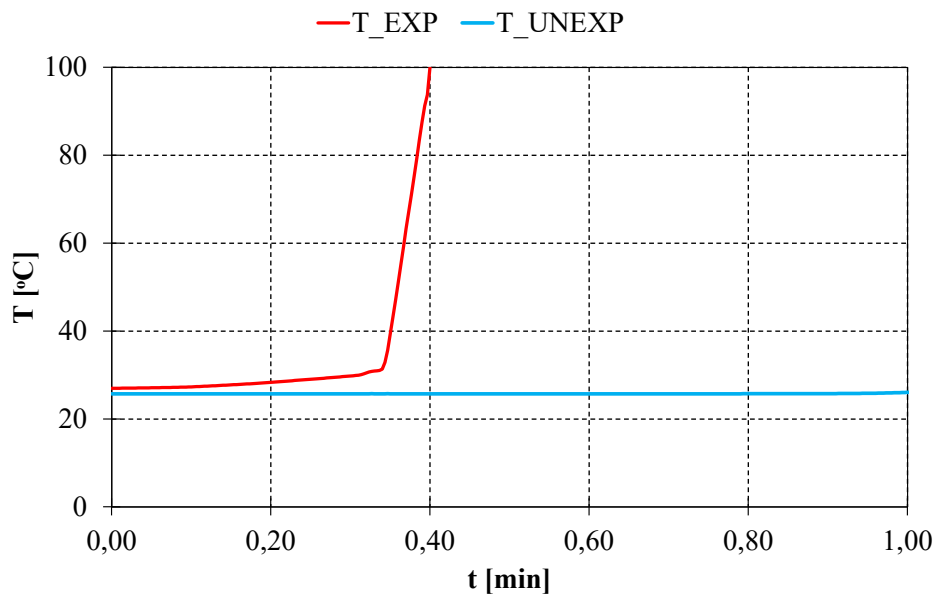


Figura 5.6: Detalhamento do início do ensaio da amostra de MDF no calorímetro de cone, [61].

Observa-se que a amostra apresentou um aumento de temperatura relevante aproximadamente por volta dos 0,35 minutos de ensaio. Portanto, para fins de modelagem numérica, o fluxo de calor do cone se iniciou exatamente nesse tempo e, posteriormente, entre o tempo de ignição e extinção, o fluxo de calor da chama foi inserido. A Figura 5.7 representa um modelo esquemático da amostra e dos fluxos de calor em que foi submetida.

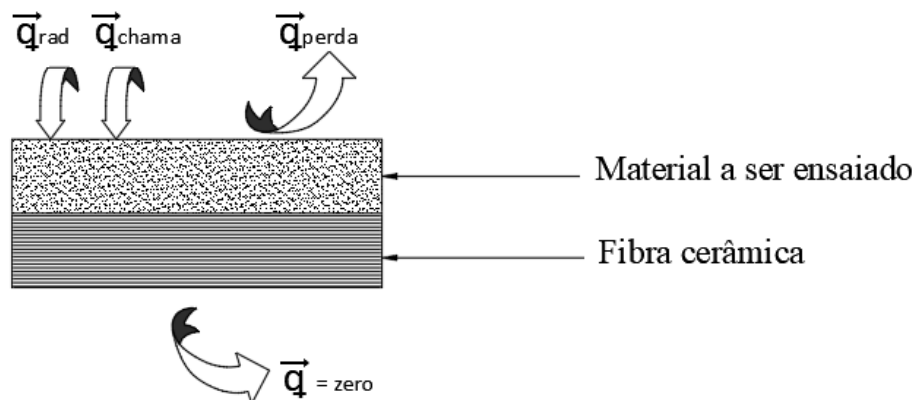


Figura 5.7: Modelo esquemático da amostra e dos fluxos de calor em que foi submetida no calorímetro de cone

Sendo que, o fluxo de calor do calorímetro de cone é dado pela Equação 5.3, o fluxo de calor da chama sendo variável para cada material, as perdas de calor dadas pela Equação 5.4 e o fluxo de calor adotado igual a zero na parte inferior da amostra.

$$q_{rad} = \epsilon \times 75 \quad (5.3)$$

$$q_{perda} = q_{rad} + q_{conv} \quad (5.4)$$

5.3 Definição do modelo numérico para os ensaios no forno

Tendo em vista que as propriedades térmicas do pinho e do MDF, materiais alvos desta pesquisa, foram determinadas e detalhadas anteriormente neste capítulo, será desenvolvido um modelo numérico para representar e prever o comportamento desses materiais

em escala real de incêndio.

Para as simulações dos sistemas multicamadas de MDF e pinho, serão adotados um tempo total padrão de modelagem de 30 minutos. Nesta etapa, serão simulados modelos multicamada de madeira e isolamento, os quais foram ensaiados no forno e detalhados geometricamente no Capítulo 4, seção 4.2.2.

5.3.1 Propriedades dos materiais

As propriedades necessárias para a análise térmica dos materiais foram apresentadas e definidas anteriormente na Seção 5.2.2. Além dos já apresentados, para o modelo multicamada final, será utilizado o isolamento lã de rocha em substituição à fibra cerâmica, por ser um isolamento comumente utilizado para fins de sistemas construtivos. Suas propriedades foram fundamentalmente extraídas do Eurocódigo 1995-1-2 de 2020 e estão apresentadas na Tabela 5.5

Tabela 5.5: Propriedades físicas da lã de rocha, adaptado, [31].

T [C°]	λ [W/mK]	c [J/kgK]	ρ [kg/m ³]
20	0,04	880	100,00
100	0,05	1040	100,00
200	*	1160	98,00
400	3,05	1280	97,70
600	0,51	1355	97,30
800	0,78	1430	97,00
925	1,02	1477	96,00
1200	1,52	1580	88,70

A densidade do material foi obtida de acordo com manual do fabricante e adaptada de acordo com a norma, [69].

5.3.2 Malha de elementos finitos

Da mesma forma como especificado e detalhado na Seção 5.2.3, a malha de elementos finitos foi implementada no modelo multicamada desenvolvido para os ensaios no forno, porém, devido a limitações computacionais, a malha precisou ser aumentada na face dos elementos, passando de 5 mm para 20 mm.

O refinamento da malha na seção longitudinal ainda foi priorizada, mantendo as dimensões de 3 mm, com incrementos de tempo máximo e inicial de 1 s e mínimo de 0,001 s. A Figura 5.8 representa a malha gerada para o modelo multicamada de MDF, mas que também será gerada com os mesmos valores para o modelo multicamada de pinho.

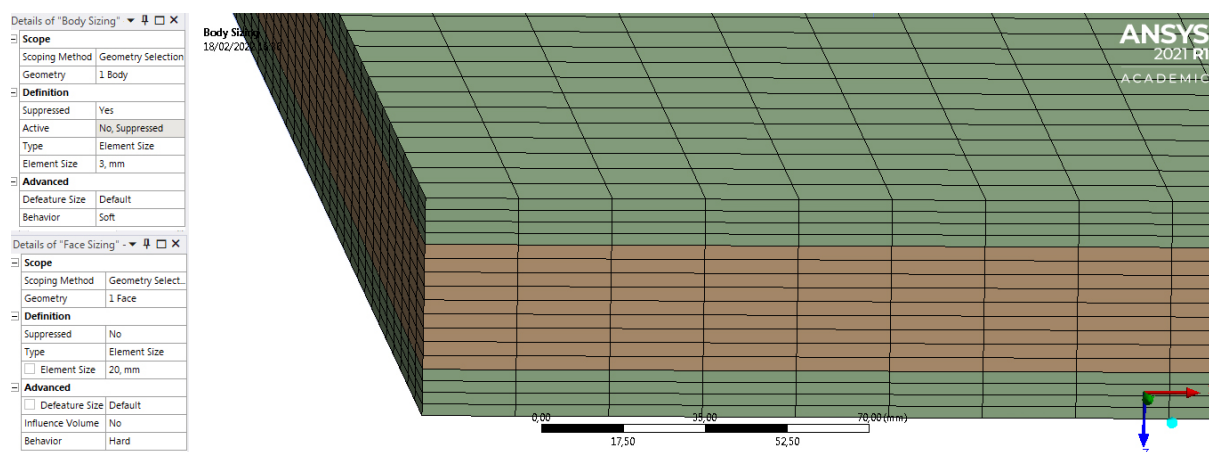


Figura 5.8: Detalhamento da malha de elementos finitos definida para o modelo.

5.3.3 Condições de fronteira

As condições de fronteira impostas para o ensaio no forno são diferentes das aplicadas para o calorímetro de cone, visto que o comportamento do ensaio apresenta um conceito diferente. As amostras ensaiadas, bem como a modelagem numérica, na superfície exposta, estarão sujeitas à elevação de temperatura baseada na curva padrão de incêndio ISO834. Na parte exposta, dentro do forno, o ambiente terá uma temperatura muito superior à amostra, fazendo com que a transferência de calor ocorra para a parte não exposta do sistema, o qual possui uma temperatura inferior, fazendo com que a face não exposta perca calor pro ambiente, fora do forno, assumindo comportamento similar às

amostras submetidas ao ensaio no cone, discutido na Seção 5.3.3. A Figura 5.9 representa o comportamento das amostras.

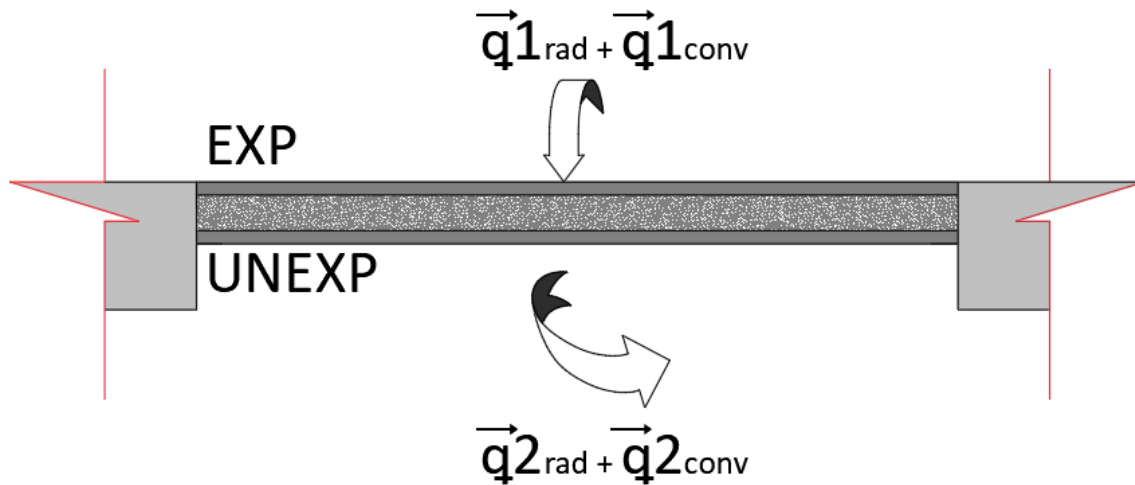


Figura 5.9: Comportamento das amostras ensaiadas no forno.

As condições de contorno para esse modelo numérico envolvem a aplicação da convecção e radiação nas superfícies expostas ao fogo. Para a região exposta, a Equação 2.3 descreve o aumento de temperatura dentro do forno, tanto para efeitos de convecção quanto para radiação.

Para efeitos de convecção, o coeficiente adotado foi de $\alpha_c=25 \text{ W/m}^2\text{K}$, para a curva de ISO834, [31]. A Equação 5.5 representa essa parcela de transferência de calor.

$$h_{conv} = \alpha_c \times (\theta_g - \theta_m) \quad (5.5)$$

Onde:

h_{conv} é o fluxo de calor líquido devido à convecção [W/m^2];

α_c é o coeficiente de transferência de calor por convecção [W/m^2];

θ_g é a temperatura do gás que envolve o membro exposto [$^{\circ}\text{C}$];

θ_m é a temperatura da superfície do elemento exposto ao fogo [$^{\circ}\text{C}$].

5.4. COMPARAÇÃO NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DOS TESTES REALIZADOS NO CONE79

Para efeitos de radiação, a emissividade foi considerada como 0,8, [31]. A Equação 5.6 representa essa parcela de transferência de calor.

$$h_{rad} = \varepsilon_m \times \sigma \times [(\theta_r + 273)^4 - (\theta_m + 273)^4] \quad (5.6)$$

Onde:

h_{rad} é o fluxo de calor líquido devido à radiação [W/m^2];

ε_m é a emissividade da superfície do elemento;

σ é a constante de Stephan Boltzmann [$5,67 \cdot 10^{-8} W/m^2 K^4$];

θ_r é a temperatura do ambiente [$^{\circ}C$];

θ_m é a temperatura de radiação efetiva da superfície do elemento [$^{\circ}C$].

Para a região não exposta ao fogo, a perda de calor ocorre por convecção e radiação, sendo que será considerado uma convecção normal, visto que o ar em contato com a região não exposta está em repouso. Para efeitos de radiação, a emissividade foi considerada como 0,8, tendo a temperatura ambiente fixada como 20 $^{\circ}C$, [37], [31]. Esse procedimento é representado pelas Equações 5.2 e 5.1.

5.4 Comparação numérica e experimental dos testes realizados no cone

A análise inicial se restringiu à comparação entre as temperaturas expostas e não expostas do sistema modelado numericamente sob a mesma exposição que os ensaios previamente realizados no calorímetro de cone por 30 minutos, e das amostras efetivamente ensaiadas. Com isso, foi possível analisar as curvas da evolução da temperatura no material, ajustando as propriedades dos materiais para valores o mais próximo possível do real.

5.4.1 Resultados e discussões

Baseando-se nos resultados obtidos de temperaturas do ensaio base, foi possível elaborar dois gráficos, comparando os ensaios numéricos e os experimentais. Em posse desses dados, foi possível obter um gráfico de comparação entre os dois, bem como os erros médios e absolutos associados a eles. A Figura 5.10 representa os comportamentos obtidos.

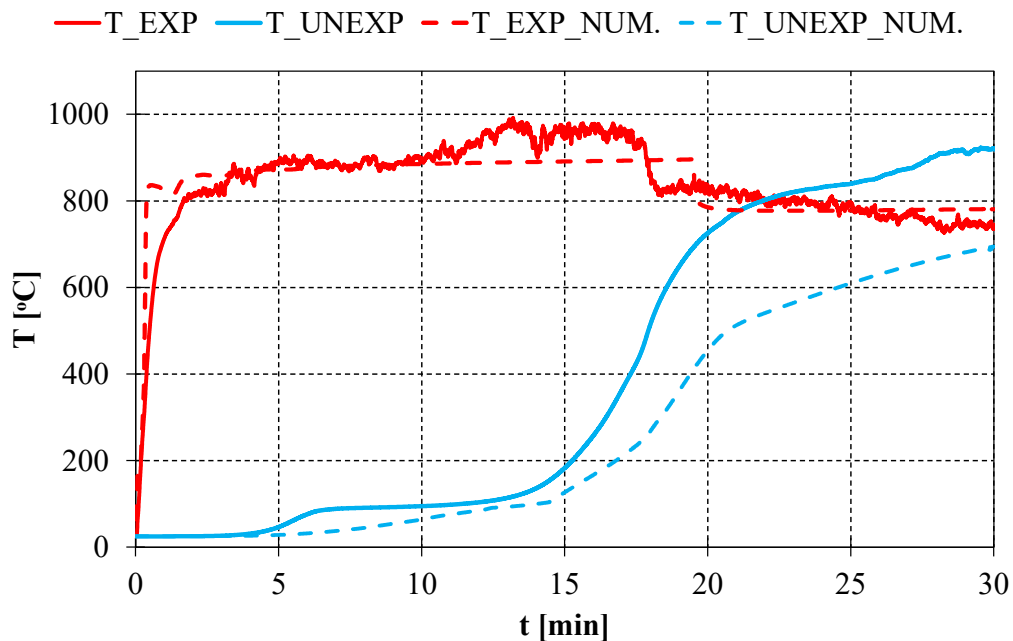


Figura 5.10: Gráfico de comparação da temperatura da face exposta e não exposta dos ensaios numéricos e experimentais da amostra de pinho.

Para fins de comparação, procurou-se analisar temperaturas em diversas fases de aquecimento, sendo elas:

- 16 segundos, tempo de ignição da amostra;
- 5 minutos;
- 10 minutos;
- 1170 segundos, tempo de extinção da chama;
- 20 minutos;
- 30 minutos.

5.4. COMPARAÇÃO NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DOS TESTES REALIZADOS NO CONE81

O resultados da análise e os erros associados a ela estão representados na Tabela 5.6.

Tabela 5.6: Resultados das temperaturas obtidas nos tempos pré-definidos nos ensaios experimentais do calorímetro de cone e na modelagem numérica referente ao sistema composto por pinho.

		Tempo					
		16 s	5 min	10 min	1170 s	20 min	30 min
Temperatura [$^{\circ}$ C]	EXP.	294,34	888,40	899,26	831,43	833,03	738,83
	EXP_NUM.	324,56	872,50	885,38	880,79	785,52	781,01
	UNEXP.	25,02	46,61	94,90	692,91	725,94	919,76
	UNEXP_NUM.	25,53	28,43	63,96	411,23	453,72	689,31
Erro relativo [%]	T_EXP	9,31	1,82	1,57	5,60	6,05	5,40
	T_UNEXP	2,00	63,97	48,38	68,50	60,00	33,43
Erro médio [$^{\circ}$ C]	T_EXP	31,87					
	T_UNEXP	160,47					

Observa-se que os resultados possuem semelhança quanto ao aumento de temperatura nas faces analisadas. Na região exposta ao fogo do ensaio experimental, é possível visualizar que, a partir dos 300 $^{\circ}$ C, a temperatura é elevada mais lentamente quando comparado à obtida pela modelagem numérica, resultado da carbonização da madeira que atua como uma espécie de isolante, impedindo a rápida saída dos gases inflamáveis e a propagação de calor para o interior da seção.

Ainda, o erro médio calculado para a face não exposta da amostra foi muito superior à região exposta, o que pode ser justificado pela dificuldade de controlar a região no ensaio experimental, podendo haver uma mudança na posição do termopar instalado sem que seja percebido pelo executor do ensaio e a camada carbonizada da madeira pode criar tensões adicionais que interferem na temperatura obtida.

Da mesma forma do que para o pinho, em posse dos dados obtidos experimentalmente e numericamente para o MDF, foi possível obter um gráfico de comparação entre eles. A Figura 5.11 representa esta comparação.

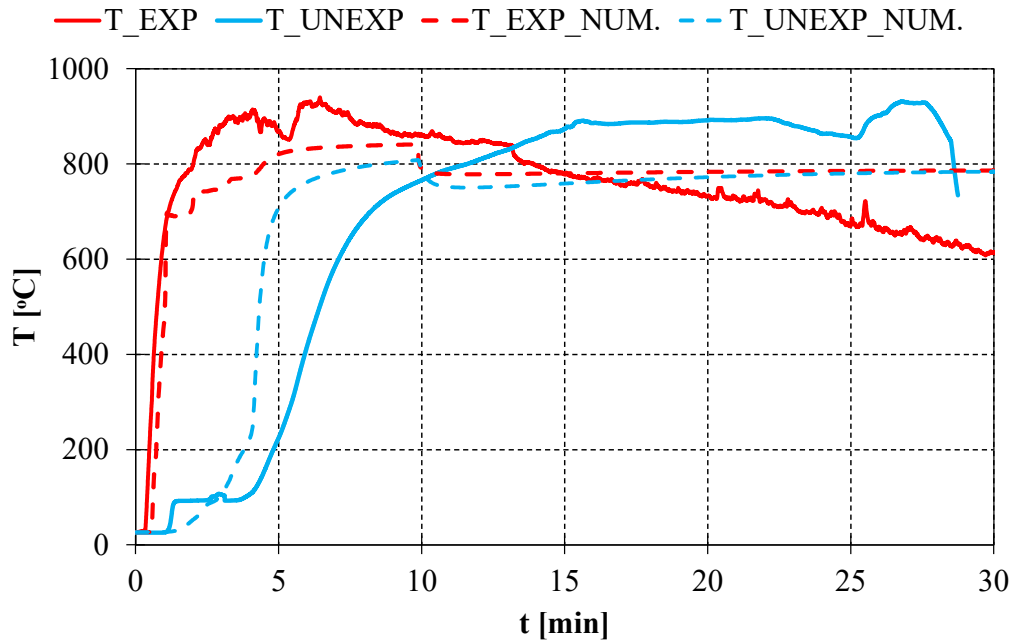


Figura 5.11: Gráfico de comparação da temperatura da face exposta e não exposta dos ensaios numéricos e experimentais da amostra de MDF

O erro médio e relativo também foram calculados e, para fins de comparação, procurou-se analisar temperaturas em diversas fases de aquecimento, sendo elas:

- a) 14 segundos, tempo de ignição da amostra;
- b) 5 minutos;
- c) 592 segundos, tempo de extinção da chama;
- d) 10 minutos;
- e) 20 minutos;
- f) 30 minutos.

A Tabela 5.7 representa os resultados obtidos, bem como os erros associados a eles.

5.4. COMPARAÇÃO NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DOS TESTES REALIZADOS NO CONE83

Tabela 5.7: Resultados das temperaturas obtidas nos tempos pré-definidos nos ensaios experimentais do calorímetro de cone e na modelagem numérica referente ao sistema composto por MDF.

		Tempo					
		14 s	5 min	592 s	10 min	20 min	30 min
Temperatura [°C]	EXP.	225,43	869,61	859,85	861,64	732,68	614,12
	EXP_NUM.	348,13	820,95	838,40	790,71	783,55	786,27
	UNEXP.	25,73	224,50	762,63	766,03	891,84	*
	UNEXP_NUM.	27,02	708,24	808,25	788,16	772,36	784,33
Erro relativo [%]	T_EXP	35,25	5,93	2,56	8,97	9,97	21,89
	T_UNEXP	4,78	68,30	5,64	2,81	0,82	*
Erro médio [°C]	T_EXP	69,74					
	T_UNEXP	198,53					

No caso do MDF, verifica-se uma diferença significativa de temperaturas na face exposta e não exposta da amostra no início do ensaio, o que pode ser justificado pela resistência do material a elevar a temperatura do termopar, como comentado anteriormente nesse capítulo na Seção 5.3.3.

Além disso, pode ser explicado pela dificuldade de controle do ambiente de ensaio, podendo haver uma mudança na posição do termopar instalado sem que seja percebido pelo executor do ensaio, comportamento utilizado como justificativa pela discrepância de valores de temperatura encontrados na região não exposta da amostra de pinho.

Para ambos os materiais modelados numericamente, baseado na elevação da temperatura em todo o sistema, foi possível calcular a taxa de carbonização dos materiais, de acordo com o que foi apresentado na Seção 3.3, baseando-se nos resultados obtidos numericamente. O Eurocódigo 5 apresenta valores médios para a taxa de carbonização da madeira, a qual tem início quando a superfície chega aos 300 °C, [30]. As Figuras 5.12 e 5.13 apresentam a relação entre a temperatura durante os 30 minutos de modelagem em relação à espessura do material em que ela foi medida.

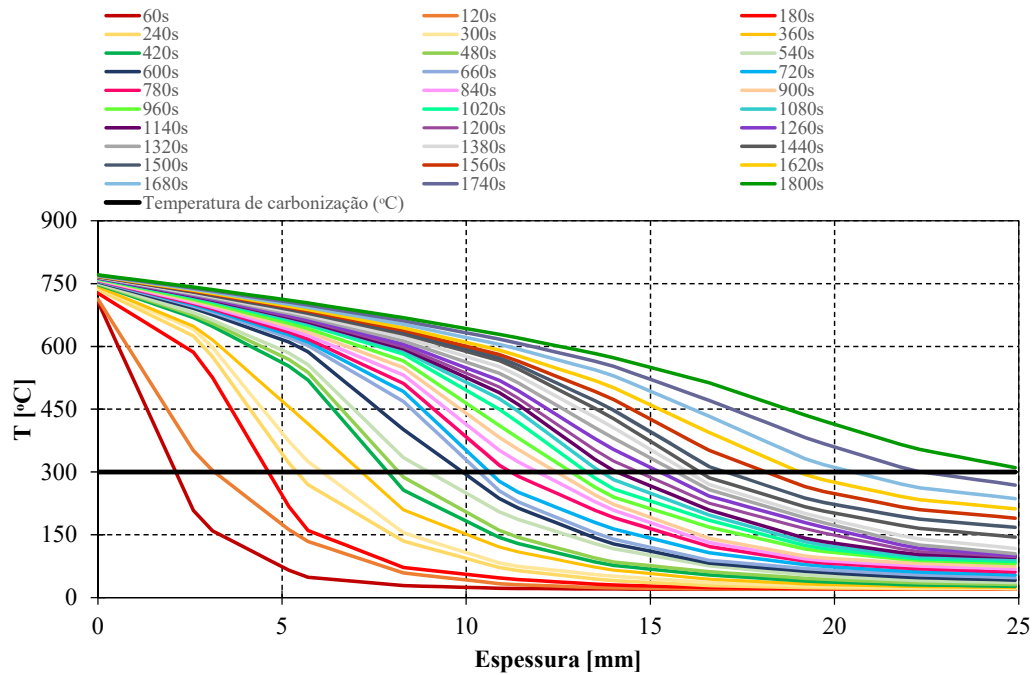


Figura 5.12: Gráfico da elevação da temperatura em relação à espessura do modelo de pinho

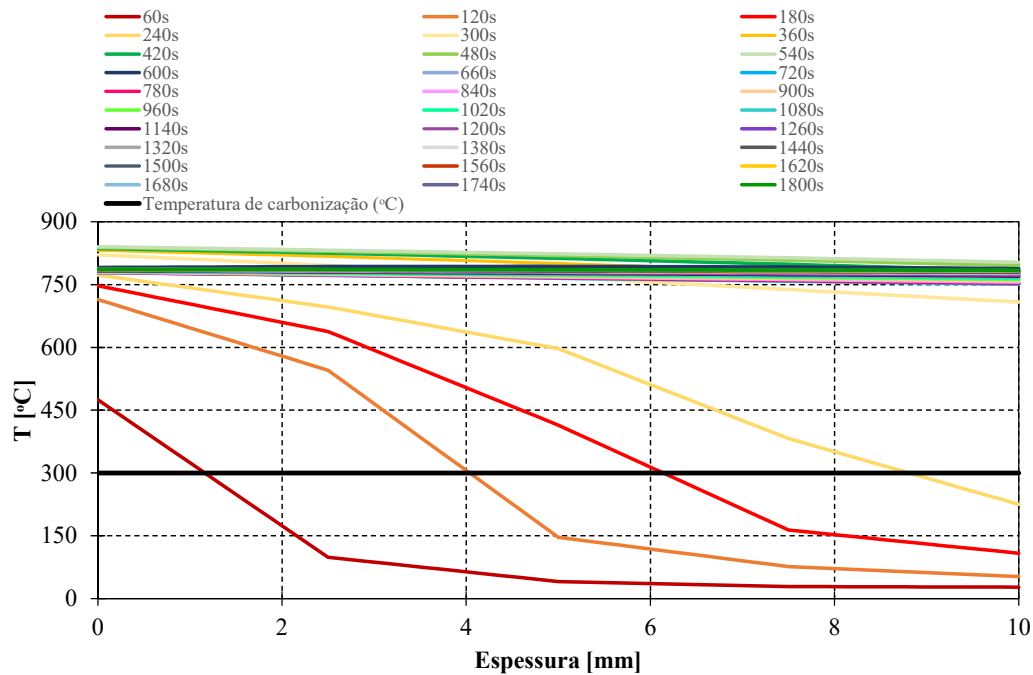


Figura 5.13: Gráfico da elevação da temperatura em relação à espessura do modelo de MDF

5.4. COMPARAÇÃO NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DOS TESTES REALIZADOS NO CONE85

Para fins de comparação, serão apresentados valores para a taxa de carbonização de diferentes espécies de madeiras com diferentes condições de ensaios. *Lawson et al*, [70], utilizaram um procedimento similar à ISO834, com um teste de 29 minutos para a espécie abeto-de-douglas e estabeleceram um valor de 0,635 mm/min, enquanto, *Frangi et al*, [71], para um tempo de exposição de 30 a 110 minutos, determinaram a taxa de carbonização igual a 0,7 mm/min. Ainda, *Lache*, [72], testou duas espécies de madeiras macias e três de madeiras duras e estabeleceu que a taxa de carbonização, para uma exposição de 60 minutos, variou dentro do intervalo de 0,55 mm/min. – 0,80 mm/min.

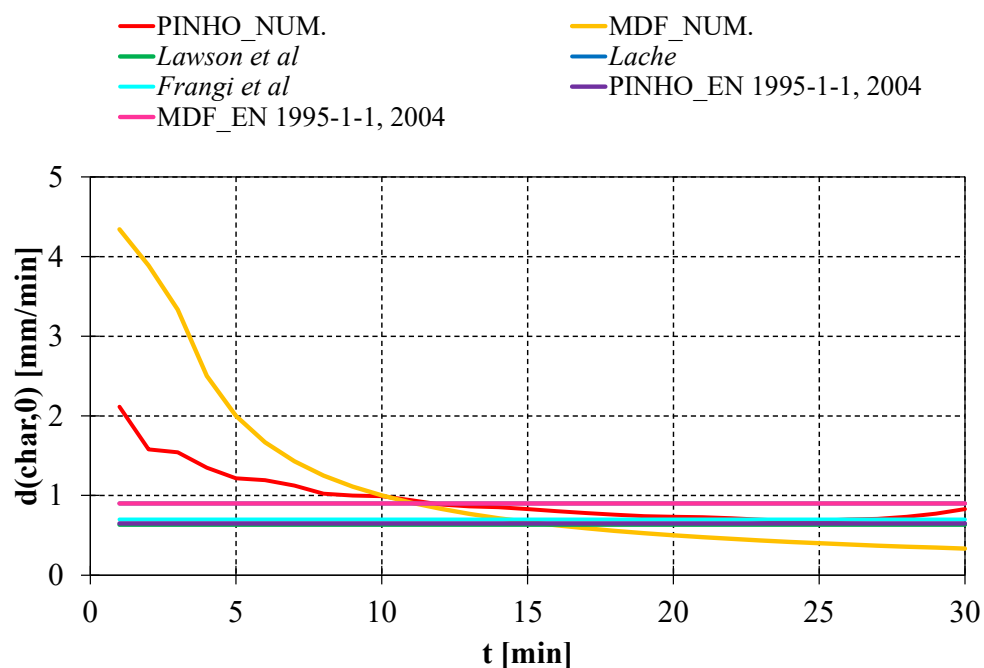


Figura 5.14: Gráfico da taxa de carbonização do estudo numérico realizado, outros valores propostos por pesquisadores e segundo a EN 1995-1-2 de 2004, [70], [72], [71], [30].

Baseado nos resultados obtidos, é possível perceber que a espessura de 10 mm do MDF é inteiramente carbonizada após 5 minutos e a espessura de 24,9 mm do pinho após 19 minutos de exposição. A taxa de carbonização é um valor importante para a avaliação da resistência da madeira ao fogo, tendo em vista que o colapso dos elementos de madeira

e derivados ocorre principalmente pela redução da área resistente, resultado da carbonização da madeira, [73]. No entanto, essa camada retarda o processo de aquecimento da madeira, atuando como um mecanismo isolante, como comentado anteriormente. Isso acontece devido a condutividade térmica desta camada ser menor do que a da madeira em estado natural, permitindo que o interior do elemento continue desempenhando sua função estrutural, [57], [45].

Segundo a EN 1995-1-2:2004, o valor da taxa de carbonização para painéis de madeira é assumido como 0,9 mm/min, com condições de densidade e espessura pré-definidas, 3.1, diferentes das utilizadas nesta pesquisa. Porém, para fins de comparação, o valor assumido pela norma é encontrado na análise após 11 minutos de exposição. Para a madeira macia, com densidade superior a 290 kg/m^3 , a taxa de carbonização é assumida como 0,65 mm/min, valor não encontrado numericamente após o tempo final de exposição, assumido como 30 minutos.

As Tabelas A.1 e A.2, descritas no Apêndice A, representam o comprimento carbonizado da seção, momento em que a região analisada chega aos $300 \text{ }^\circ\text{C}$, durante todo o período pré-definido de análise, tendo em vista que foram feitas interpolações lineares nas temperaturas para definir o comprimento exato onde a amostra chega à temperatura de carbonização da madeira. Compreendendo que a análise numérica realizada nesta pesquisa não compreende todos os fatores que podem ocorrer nas amostras ensaiadas e que diversos testes de convergência dos materiais foram realizados, corrigindo a umidade dos materiais e suas propriedades, o modelo numérico definido para o calorímetro de cone servirá como base para implementação das propriedades dos materiais utilizados posteriormente para o modelo numérico do forno.

5.5 Comparação numérica e experimental dos testes realizados no forno

Serão apresentadas a seguir, as comparações realizadas entre os resultados dos modelos numéricos, demonstrados na Seção 5.3 deste capítulo, e dos ensaios no forno, apresentados no Capítulo 4.

5.5.1 Resultados e discussões

Para fins de comparação, foram realizadas simulações numéricas impondo a elevação da temperatura pela curva ISO834 e pela elevação real dela dentro do forno, baseado nos ensaios experimentais. Para o sistema composto por pinho, a comparação dos resultados estão representadas nas Figuras 5.15 e 5.16 e para o sistema composto por MDF, a comparação dos resultados estão representadas nas Figuras 5.17 e 5.18.

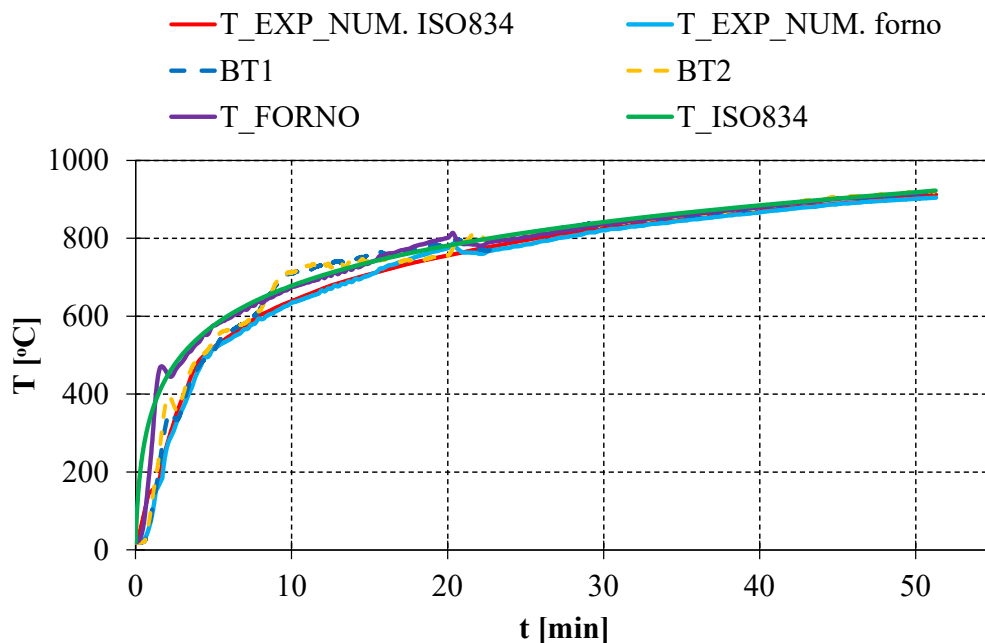


Figura 5.15: Comparação entre os resultados experimentais e numéricos da região exposta da amostra de pinho, baseados na variação de temperaturas da curva ISO834 e da curva de temperatura imposta no forno.

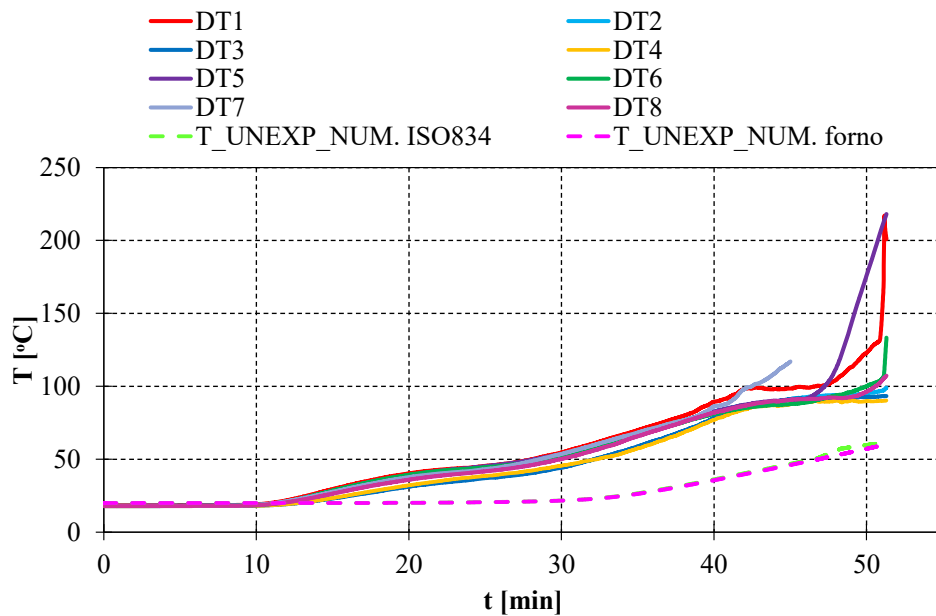


Figura 5.16: Comparação entre os resultados experimentais e numéricos da região não exposta da amostra de pinho.

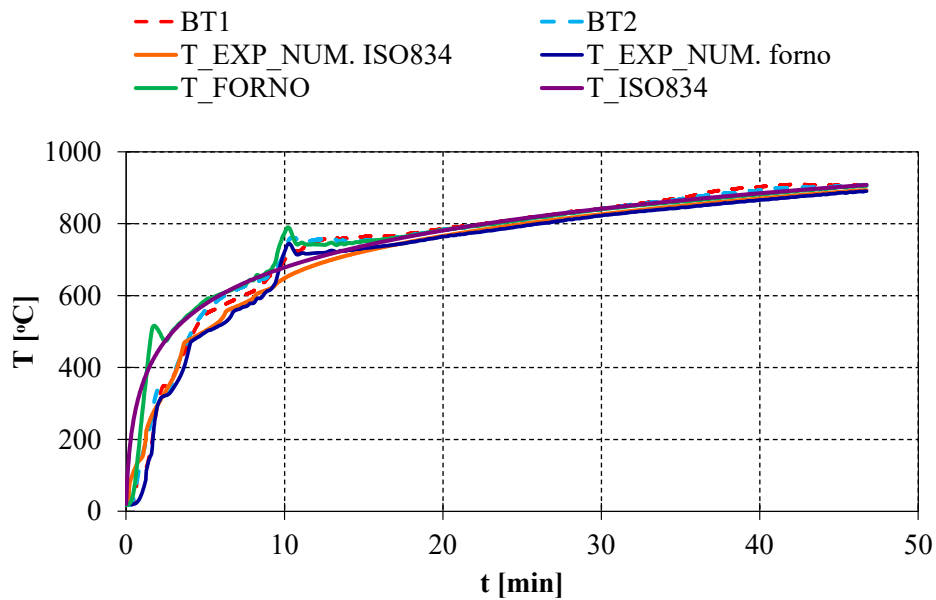


Figura 5.17: Comparação entre os resultados experimentais e numéricos da região exposta da amostra de MDF, baseados na variação de temperaturas da curva ISO834 e da curva de temperatura imposta no forno.

5.5. COMPARAÇÃO NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DOS TESTES REALIZADOS NO FORNO89

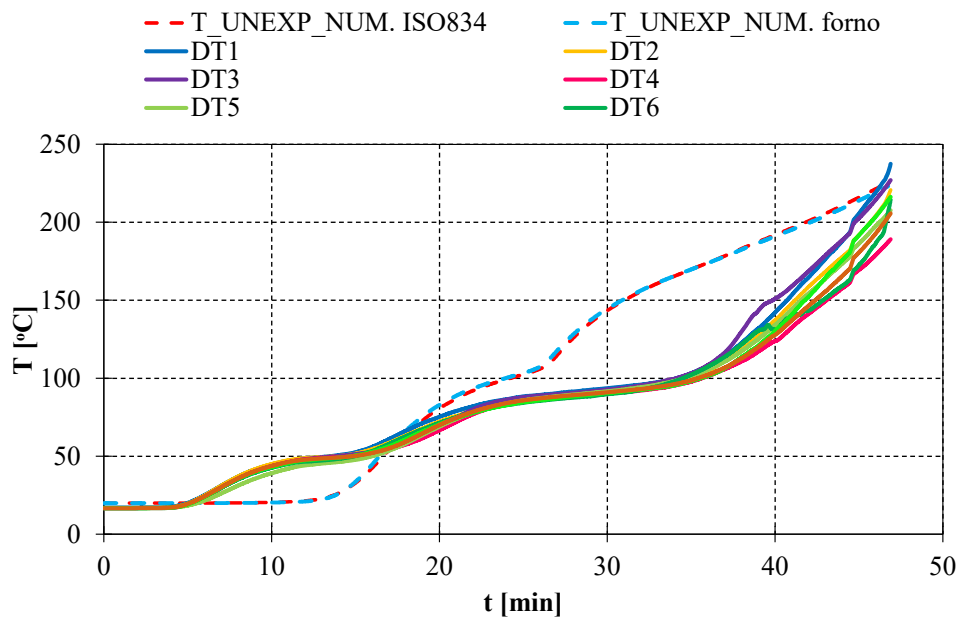


Figura 5.18: Comparação entre os resultados experimentais e numéricos da região não exposta da amostra de MDF.

As diferenças entre o modelo numérico e experimental se justificam pela análise e estudo feitos única e exclusivamente térmica dos materiais. Após os 300 °C, temperatura de carbonização da madeira, ocorre perda de massa da amostra, retração dos materiais e, conseqüentemente, dos parafusos, que mantêm o sistema em contato, criando tensões adicionais que resultam, por exemplo, no descolamento completo do painel, como observado no primeiro ensaio.

Além disso, pelo fato de a madeira sofrer diferentes tipos de decomposição, a emissividade também muda conforme a temperatura aumenta, pois ao sofrer carbonização, o material assume comportamento de um corpo negro, absorvendo muito calor, com emissividade próximo de 1, comportamentos não considerados pelo programa. Levando isso em consideração, pode-se dizer que, para fins desta pesquisa, o software não foi configurado para entender, analisar e responder a esses comportamentos mecânicos que ocorrem nos sistemas ensaiados experimentalmente.

Para o modelo envolvendo o pinho, observa-se que a curva numérica permanece durante toda a simulação com valores abaixo do experimental, reação explicada pelos fenômenos

apresentados anteriormente. Ainda, para a amostra composta por MDF, é possível observar que há uma inversão no comportamento das temperaturas experimentais da face não exposta quando comparadas às numéricas, aproximadamente aos 20 minutos de ensaio, fazendo com que a modelada numericamente se eleve numa proporção maior. Percebe-se, nessa etapa, uma estabilização no aumento das temperaturas dos termopares da região não exposta próxima aos 100 °C, o que pode ser explicado por uma variação de umidade em relação à medida em laboratório para o material em questão.

Capítulo 6

Conclusão e trabalhos futuros

6.1 Conclusão

A prevenção de incêndio deve ter início muito antes de uma emergência acontecer. Essa análise passa pelos projetos arquitetônicos, que devem levar em consideração um plano de prevenção de incêndio e também determinar quais equipamentos de prevenção serão necessários no local.

Esta pesquisa permitiu avaliar a importância da madeira como material de construção e ressaltou seu potencial como alternativa sustentável, frente a materiais construtivos mais comuns, sendo possível estudar e caracterizar detalhadamente suas propriedades térmicas. O estudo da madeira como parte de um sistema multicamada de proteção ao fogo teve como foco dois sistemas, um composto por pinho bravo e outro por painéis de MDF, sendo que, baseado nos modelos ensaiados experimentalmente e na classificação obtida nos ensaios, verificou-se um tempo resistente para o primeiro modelo de 50,73 minutos, classificando-o como I₁45, e para o segundo, de 42,25 minutos, classificando-o como I₁30.

Além da classificação do tempo resistente dos modelos ensaiados, foi verificado a importância da modelagem numérica para a tomada de decisões relacionadas à utilização dos materiais. O método utilizado apresenta muitos benefícios devido a facilidade de

executar várias simulações que preveem o comportamento de diferentes elementos, permitindo representar geometrias complexas, inserir propriedades distintas no mesmo sistema e identificar resultados localizados. Tendo em vista a dificuldade de recriar as condições exatas de um ensaio experimental e que, para fins desta pesquisa, não foram considerados comportamentos mecânicos da madeira, como a resistência dos painéis às tensões adicionais criadas pelo aumento da temperatura e perdas de massa, a análise numérica realizada forneceu uma boa noção sobre a reação ao fogo dos materiais utilizados, certificando o uso de programas baseados no método dos elementos finitos para análises térmicas, sendo um meio rápido quando comparado aos ensaios experimentais, sustentável, pela não geração de resíduos, e pela possibilidade de elaborar estratégias acerca da utilização de diferentes materiais.

Ainda, a análise numérica possibilitou uma comparação entre as taxas de carbonização obtidas na modelagem quando comparadas ao Eurocódigo 1995-1-2, o qual possui valores fixos, apresentando uma grande variação de valores em relação ao tempo de exposição. Nela, foi verificado que o pinho carboniza mais rápido que o MDF, fazendo com que a camada carbonizada dificulte a passagem de calor para o interior do elemento. Embora o sistema composto por pinho seja mais espesso e que a madeira maciça possua uma condutividade térmica inferior ao MDF quando exposto a grandes variações de temperatura, ambos os sistemas apresentaram um bom desempenho ao fogo, ficando ao lado da segurança.

A área de prevenção de incêndio na construção civil deve se desenvolver constantemente junto das inovações tecnológicas, de forma a contribuir com a qualidade de vida humana, evitando acidentes e degradação do patrimônio sócio-cultural.

6.2 Trabalhos futuros

Tendo em vista a importância do estudo do comportamento dos materiais utilizados na construção civil frente a incêndios e o crescente interesse em estudos a respeito do

assunto, propõe-se diferentes linhas futuras de investigação. Com o intuito de dar continuidade a este trabalho, situações diferentes podem ser investigadas, sendo elas: análise do comportamento frente ao fogo de diferentes tipos de espécies de madeira e de isolantes térmicos, promovendo uma variabilidade nas soluções que podem ser implementadas na segurança contra incêndio; maior número de ensaios experimentais desses sistemas, para fins de comparação; estudar amostras com a mesma espessura, para avaliar a diferença nos valores da taxa de carbonização e investigar o comportamento de elementos em madeira revestidos por material isolante expostos ao fogo, para fins de comparação entre as resistências obtidas para a exposição de um mesmo elemento sem proteção. Além disso, propõe-se uma análise térmica e mecânica que leve em consideração a retração dos painéis e perda de massa do material.

Bibliografia

- [1] Y. Wang, I. Burgess, F. Wald e M. Gillie, *Performance-based fire engineering of structures*. CRC press, 2012.
- [2] T. d. P. Pinto et al., “Gestão ambiental de resíduos da construção civil,” *Sindicato da Indústria da Construção do Estado de São Paulo (SINDUSCON-SP)*, São Paulo: *Obra Limpa/I&T/SINDUSCON*, 48p, 2005.
- [3] A. Gide, “Directive of the european parliament and of the council,” *Angewandte Chemie International Edition*, 6(11), 951–952., vol. 0203, pp. 5–24, 1967.
- [4] J. Švajlenka e M. Kozlovská, “Evaluation of the efficiency and sustainability of timber-based construction,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 259, p. 120 835, 2020.
- [5] V. Ferreira e J. de Brito, “Madeira: Um material estrutural amigo do ambiente,” 2004.
- [6] A. A. P. de Segurança Eletrónica e de Proteção contra Incêndio, *Estudo do Sector da Segurança Eletrónica e Proteção contra Incêndio em Portugal*, 2009.
- [7] J. C. Moreschi, “Propriedades da madeira,” *Curitiba: Universidade Federal do Paraná*, 2010.
- [8] LNEC E31, “Terminologia de madeiras,” Lisboa, 1955.
- [9] J. de Sousa Coutinho, “MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO,” *Artigo, FEUP*, 1999.
- [10] W. F. Smith, *Principles of Materials Science and Engineering*, 2^a ed. McGraw-Hill Education, 1990, p. 892.

- [11] A. M. FABIÃO, *Árvores e Florestas*, 2^a ed. Europa América, Mem Martins, 1996, p. 228.
- [12] S. F. M. F. Martins, “Estruturas de madeira–inspecção e diagnóstico: aplicação em caso de estudo,” tese de doutoramento, 2009.
- [13] J. A. B. Júnior, “Avaliação não destrutiva da capacidade resistente de estruturas de madeira de edifícios antigos,” p. 208, 2006.
- [14] F. Lasheras Merino, “Patología y técnicas de intervención: elementos estructurales,” *Tratado de Rehabilitación. Tomo III. patología y técnicas de intervención. Elementos Estructurales*, pp. 255–276, 1998.
- [15] S. S. C. Pereira, “Avaliação experimental das principais propriedades mecânicas de peças estruturais em madeira antiga,” p. 180, 2009. URL: http://eos.fe.up.pt:1801/webclient/DeliveryManager?custom_att_2=simple_viewer&metadata_request=false&pid=57924.
- [16] J. R. HUMPHRIES C. J. ; SUTTON, *Árvores de Portugal e Europa*. Fundo Para a Protecção dos Animais Selvagens (FAPAS), Câmara Municipal do Porto, Porto., 1996.
- [17] T. H. Milhan, “Estudo numérico em vigas de madeira submetidas a altas temperaturas,” tese de doutoramento, Instituto Politécnico de Bragança, 2020, p. 152.
- [18] C. P. A. para a valorização da floresta de pinho, *Manual de boas práticas para o pinheiro-bravo*, Paula Soares, Nuno Calado e Susana Carneiro.
- [19] C. I. Campos e F. A. R. Lahr, “MDF – Processo de produção ,propriedades e aplicações,” *Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais*, p. 6, 2002.
- [20] R. S. A. Anastácio, “Especificação de protecção fogo para estruturas de madeira,” tese de doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2010.
- [21] T. E. F. Nunes, “Estudo da inflamabilidade de diversos tipos de madeiras e de cortiça usados na estrutura e na envolvente de edifícios,” tese de doutoramento, Universidade de Coimbra, 2015.

- [22] S. M. Vaz, “Avaliação técnica e económica de casas pré-fabricadas em madeira maciça,” tese de doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2008.
- [23] K. Nishi, *What is Japanese Architecture?* 1996, p. 158, ISBN: 9784770019929. URL: http://books.google.ie/books?id=oZl_yEJGtUYC.
- [24] J. M. Branco, “Casas de madeira: da tradição aos novos desafios,” 2013.
- [25] F. A. L. d. Almeida et al., “A madeira como material estrutural: projeto da estrutura da cobertura de um edifício,” 2012.
- [26] P. FREITAS, V.; PINTO, *Permeabilidade ao vapor de materiais de construção – condensações internas*, Porto, 1988.
- [27] J. C. Moreschi, “Propriedades da madeira,” *Curitiba: Universidade Federal do Paraná*, 2010.
- [28] E. C. for Standardization, “Wood-based panels — Determination of moisture content,” p. 4, 1993.
- [29] C. A. Szücs, R. F. Terezo, A. VALLE e P. D. d. MORAES, “Estruturas de madeira,” *UFSC, Florianópolis*, 2006.
- [30] European Committee for Standardization, “EN 1995-1-2:2004, Eurocode 5: design of timber structures - Part 1-2: Structural fire design,” 2004.
- [31] —, “EN 1995-1-2:2020, Eurocode 5: design of timber structures - Part 1-2: General-Structural fire design,” 2020.
- [32] A. L. Ferreira, “Encontro Sobre a Madeira E Suas Aplicações Nobres – Bem Utilizar a Madeira Protecção Da Madeira Contra O Fogo,” 2005.
- [33] A. P. Mouritz e A. G. Gibson, *Fire properties of polymer composite materials*. Springer Science & Business Media, 2007, vol. 143.
- [34] C. N. Costa e V. P. Silva, “Revisão histórica das curvas padronizadas de incêndio,” *Seminário Internacional NUTAU: Tecnologia de Durabilidade*, 2006.

- [35] L. M. R. de Mesquita, “Estudo experimental e numérico do comportamento de um material intumescente na proteção passiva de elementos estruturais submetidos a incêndio,” 2015.
- [36] E. C. for Standardization, “Fire classification of construction products and building elements - Part 1: Classification using data from reaction to fire tests,” pp. 1–53, 2007.
- [37] —, “EN 1363-1 - Fire resistance tests - Part 1: General requirements Essais,” n.º 5, pp. 18–22+95, 2004.
- [38] L. A. A. de França, “Análise da durabilidade da reação ao fogo da madeira e painéis derivados de madeira,” p. 132, 2019.
- [39] M. Kutnik, E. Suttie e C. Brischke, “European standards on durability and performance of wood and wood-based products—Trends and challenges,” *Wood Material Science & Engineering*, vol. 9, n.º 3, pp. 122–133, 2014.
- [40] C. Eurocode, “5: Design of timber structures. Part 1-1: General, Common rules and rules for buildings,” *Brussels: CEN*, 2004.
- [41] J. Julin, P. Säilä, L. Talonpoika, M. Aho, V. Kaarakka e K. Kyyrönen, “The international promotion of wood construction as a part of climate policy,” *Working Group Report*, 2010.
- [42] B. Östman, D. Brandon e H. Frantzich, “Fire safety engineering in timber buildings,” *Fire Safety Journal*, vol. 91, pp. 11–20, 2017.
- [43] F. Richter, A. Atreya, P. Kotsovinos e G. Rein, “The effect of chemical composition on the charring of wood across scales,” *Proceedings of the Combustion Institute*, vol. 37, n.º 3, pp. 4053–4061, 2019.
- [44] M. Wójcik, “Reframing wood construction: innovation in architecture through activating material properties with the use of digital technologies,” 2020.
- [45] R. H. White e M. A. Dietenberger, “Wood handbook, Chapter 18: fire safety of wood construction,” *Department of Agriculture, Madison*, 2010.

- [46] M. Spearpoint e J. Quintiere, “Predicting the burning of wood using an integral model,” *Combustion and flame*, vol. 123, n.º 3, pp. 308–325, 2000.
- [47] T. E. F. Nunes, “Estudo da inflamabilidade de diversos tipos de madeiras e de cortiça usados na estrutura e na envolvente de edifícios,” tese de doutoramento, Universidade de Coimbra, 2015.
- [48] A. Lamorlette, “Quantification of ignition time uncertainty based on the classical ignition theory and Fourier analysis,” *Comptes Rendus Mécanique*, vol. 342, n.º 8, pp. 459–465, 2014.
- [49] A. Atreya, C. Carpentier e M. Harkleroad, “Effect of sample orientation on piloted ignition and flame spread,” *Fire Safety Science*, vol. 1, pp. 97–109, 1986.
- [50] H. Thomson, D. Drysdale e C. L. Beyler, “An experimental evaluation of critical surface temperature as a criterion for piloted ignition of solid fuels,” *Fire Safety Journal*, vol. 13, n.º 2-3, pp. 185–196, 1988.
- [51] Y. A. A. J. G. Cengel, *Heat and mass transfer: fundamentals applications*, 5ª ed. McGraw-Hill Education, 2015, p. 968, ISBN: 9780073398181.
- [52] European Committee for Standardization, “EN 1991-1-2 - Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-2: General actions - Actions on structures exposed to fire,”
- [53] P. J. Oliveira, “Transmissão de Calor – Radiação,” *Radiação, Transmissão De Calor Electromecânica, Departamento Engenharia*, vol. Unico, pp. 1–13, 2014.
- [54] European Committee for Standardization, “EN 1991-1-2 - Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-2: General actions - Actions on structures exposed to fire,” 2002.
- [55] I. P. de Bragança, *Transferência de calor por convecção natural e forçada a volta de cilindros metálicos*.
- [56] G. Tomás, “Medidas da condutividade térmica numa espuma de cobre a baixa temperatura,” tese de doutoramento, 2014.
- [57] E.M.M. Fonseca, “Structural safety in wooden beams under thermal and mechanical loading conditions,” vol. 2, n.º 3, pp. 242–255, 2012.

- [58] F. Net. (2021). “Constantes físicas - Condutividade térmica,” URL: [https://www.fisica.net/constantas/conductividade-termica-\(k\).php](https://www.fisica.net/constantas/conductividade-termica-(k).php).
- [59] F. V. L. Anhas, “Emissividade de materiais de construção,” 2018, p. 56.
- [60] S. P. F. Silva et al., “Estudo das propriedades mecânicas e de reacção ao fogo de nanocompósitos poliméricos,” 2010.
- [61] Matheus Alves, Maria Dagort, Luís Mesquita, Paulo Piloto, Luísa Barreira, Débora Ferreira, Isabel Fernandes, and Maria-Filomena Barreiro, *Fire Performance of Wood and Wood-Based Panels towards the Development of Wood Fire Doors*, Prague, Czech Republic., 2021.
- [62] B. Standard, “Fire classification of construction products and building elements —,” vol. 3, 2009.
- [63] Domingod F. O. Azevedo, “Análise estrutural com Ansys Workbench,” p. 136, 2015.
- [64] M. A. Materials, *Superwool blankets*, https://www.morganthermalceramics.com/media/8946/superwool-plus-ht-blankets_eng.pdf, fev. de 2016.
- [65] B. T. Rhodes e J. G. Quintiere, “Burning rate and flame heat flux for PMMA in a cone calorimeter,” *Fire Safety Journal*, vol. 26, n.º 3, pp. 221–240, 1996.
- [66] R. Petrella, “The mass burning rate of polymers, wood and organic liquids.,” *Journal of Fire and Flammability*, 1980.
- [67] X. Huang, K. Li e H. Zhang, “Modelling bench-scale fire on engineered wood: Effects of transient flame and physicochemical properties,” *Proceedings of the Combustion institute*, vol. 36, n.º 2, pp. 3167–3175, 2017.
- [68] K. Li, D. S. Pau, J. Wang e J. Ji, “Modelling pyrolysis of charring materials: determining flame heat flux using bench-scale experiments of medium density fibreboard (MDF),” *Chemical engineering science*, vol. 123, pp. 39–48, 2015.
- [69] R. P. S.A.U, *Panel 233 - Uncoated semi-rigid board of volcanic stone wool*. Navarra, Spain.

- [70] D. Lawson, C. Webster e L. Ashton, *Fire endurance of timber beams and floors*. The Structural Engineer, 1952.
- [71] A. Frangi e M. Fontana, “Charring rates and temperature profiles of wood sections,” *Fire and materials*, vol. 27, n.º 2, pp. 91–102, 2003.
- [72] M. Lache, “Abbrandverhalten von Holz,” *Informationsdienst Holzbautechnik*, n.º 4/91, pp. 7–12, 1991.
- [73] E. M. Pinto, “Determinação de um modelo de taxa de carbonização transversal a grã para o EUCALYPTUS Citriodora E E. Grandis,” 2005, pp. 117–126.

Apêndice A

Apêndice 01

Tabela A.1: Análise da taxa de carbonização do MDF, baseado no modelo numérico desenvolvido.

Comprimento (mm)	Tempo (min)	Taxa de carbonização (mm/min)
1,16	1	1,16
4,04	2	2,02
6,14	3	2,05
8,81	4	2,20
10,00	5	2,00
10,00	6	1,67
10,00	7	1,43
10,00	8	1,25
10,00	9	1,11
10,00	10	1,00
10,00	11	0,91
10,00	12	0,83
10,00	13	0,77
10,00	14	0,71
10,00	15	0,67
10,00	16	0,63
10,00	17	0,59
10,00	18	0,56
10,00	19	0,53
10,00	20	0,50
10,00	21	0,48
10,00	22	0,45
10,00	23	0,43
10,00	24	0,42
10,00	25	0,40
10,00	26	0,38
10,00	27	0,37
10,00	28	0,36
10,00	29	0,34
10,00	30	0,33

Tabela A.2: Análise da taxa de carbonização do pinho, baseado no modelo numérico desenvolvido.

Comprimento (mm)	Tempo (min)	Taxa de carbonização (mm/min)
2,66	1	2,66
4,99	2	2,50
6,88	3	2,29
8,03	4	2,01
9,32	5	1,86
10,62	6	1,77
11,36	7	1,62
12,71	8	1,59
13,47	9	1,50
14,08	10	1,41
15,36	11	1,40
16,04	12	1,34
16,59	13	1,28
17,74	14	1,27
18,50	15	1,23
19,27	16	1,20
21,06	17	1,24
23,50	18	1,31
24,90	19	1,31
24,90	20	1,25
24,90	21	1,19
24,90	22	1,13
24,90	23	1,08
24,90	24	1,04
24,90	25	1,00
24,90	26	0,96
24,90	27	0,92
24,90	28	0,89
24,90	29	0,86
24,90	30	0,83