

# **AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO AO FOGO DE SISTEMAS CONSTRUTIVOS LIGHT WOOD FRAME**

**Yuranick Ivoaltino De Carvalho Duarte - a41740**

Dissertação para obtenção do grau de **Mestre em**  
**Engenharia Mecânica**

**Janeiro de 2026**

# **Avaliação do Comportamento ao Fogo de Sistemas Construtivos Light Wood Frame**

**Yuranick Ivoaltino De Carvalho Duarte - a41740**

Dissertação apresentada à Escola Superior de Tecnologia e Gestão do  
Instituto Politécnico de Bragança para obtenção do **Grau de Mestre em  
Engenharia Mecânica**

Orientador do Instituto Politécnico de Bragança:

**Luís Manuel Ribeiro Mesquita**

**Janeiro de 2026**

*Dedico este trabalho aos meus pais, Ivete e Otílio,  
e aos meus queridos irmãos.*

# Agradecimentos

Começo por manifestar o meu profundo agradecimento ao meu orientador, Professor Doutor Luís Manuel Ribeiro Mesquita, pela incansável ajuda e incentivo dados à realização deste trabalho.

À Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Bragança Portugal que teve fundamental importância na conceção deste trabalho, disponibilizando todas as ferramentas necessárias.

Um agradecimento também especial à Engenheira Luísa Barreira responsável pelo Laboratório de Estrutura e Resistência dos Materiais, dedicou horas a acompanhar a realização dos ensaios práticos e cedendo ferramentas e técnicas para a conceção das amostras utilizadas neste trabalho e ao Engenheiro Matheus Alves, por toda ajuda e paciência.

Agradeço à minha família, amigos e namorada, cujo apoio incondicional, paciência e encorajamento foram imprescindíveis ao longo dessa jornada académica.

# Resumo

A crescente procura por soluções construtivas sustentáveis tem impulsionado a utilização de sistemas em madeira, como o Light Wood Frame (LWF), no setor da construção. Este processo destaca-se pela sua eficiência térmica, leveza estrutural e reduzida pegada ecológica, sendo constituído por madeira maciça e painéis derivados, em combinação com materiais isolantes, nomeadamente a lã de rocha. No entanto, a resistência ao fogo destas estruturas continua a ser um dos principais desafios para a sua ampla aplicação, exigindo investigações aprofundadas sobre o seu comportamento térmico e mecânico em condições de incêndio.

Neste trabalho é avaliado o comportamento ao fogo de paredes de sistema Light Wood Frame constituídas por painéis multicamada, compostos por revestimentos em MDF, estrutura em madeira de pinho-abeto e isolamento em lã de rocha, através de ensaios experimentais de resistência ao fogo realizados em duas configurações distintas de parede, complementados por modelação numérica.

Os ensaios realizados permitiram avaliar o desempenho ao fogo das paredes analisadas, nomeadamente ao nível do tempo de resistência ao fogo, da evolução da temperatura no lado não exposto e da carbonização dos elementos estruturais, observando-se diferenças entre as duas configurações ensaiadas. Os resultados experimentais foram utilizados na calibração e validação de um modelo numérico desenvolvido de acordo com o Eurocódigo 5 (EN 1995-1-2), tendo-se verificado concordância entre os resultados experimentais e numéricos.

Palavras-chave: Light Wood Frame, Resistência ao fogo, Comportamento ao fogo, Painéis multicamada, Ensaio experimental, Modelação numérica.

# Abstract

The growing demand for sustainable construction solutions has driven the use of wood-based systems, such as Light Wood Frame (LWF), in the construction industry. This process stands out for its thermal efficiency, structural lightness, and reduced ecological footprint, consisting of solid wood and wood-based panels combined with insulating materials, namely rock wool. However, the fire resistance of these structures remains one of the main challenges for their widespread application, requiring in-depth research into their thermal and mechanical behavior under fire conditions.

This study evaluates the fire behavior of Light Wood Frame system walls consisting of multilayer panels, composed of MDF coatings, pine-spruce wood structure, and rock wool insulation, through experimental fire resistance tests carried out on two different wall configurations, complemented by numerical modeling.

The tests carried out made it possible to evaluate the fire performance of the walls analyzed, namely in terms of fire resistance time, temperature evolution on the unexposed side, and charring of structural elements, with differences observed between the two configurations tested. The experimental results were used to calibrate and validate a numerical model developed in accordance with Eurocode 5 (EN 1995-1-2), with agreement between the experimental and numerical results.

**Keywords:** Light Wood Frame, Fire resistance, Fire behavior, Multilayer panels, Experimental testing, Numerical modeling.

# Índice

---

<b>Agradecimentos</b> .....	<b>i</b>
<b>Resumo</b> .....	<b>ii</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>iii</b>
<b>Índice</b> .....	<b>iv</b>
<b>Lista de figuras</b> .....	<b>viii</b>
<b>Lista de tabelas</b> .....	<b>xii</b>
<b>Nomenclatura</b> .....	<b>xiii</b>
<b>Capítulo 1: Introdução</b> .....	<b>8</b>
1.1. CONTEXTO E MOTIVAÇÃO.....	8
1.2. OBJETIVOS PROPOSTOS .....	9
1.3. ORGANIZAÇÃO DA TESE .....	10
<b>Capítulo 2: Estado da Arte</b> .....	<b>12</b>
2.1. INTRODUÇÃO .....	12
2.2. O SISTEMA CONSTRUTIVO LIGHT WOOD FRAME .....	12
2.2.1. FUNDAÇÃO.....	13
2.2.2. SISTEMA DE PISOS.....	14
2.2.3. SISTEMA DE PARADES .....	15
2.2.4. PLACAS DE FECHAMENTO .....	16
2.2.5. ESTRUTURA DE COBERTURA.....	17
2.2.6. LIGAÇÕES .....	17
2.2.6.1. LIGAÇÕES PREGADAS .....	18
2.2.6.2. LIGAÇÕES PARAFUSADAS .....	18
2.2.6.3. CHAPAS DE DENTES ESTAMPADOS.....	19
2.3. SEGURANÇA DA EDIFICAÇÃO EM LWF CONTRA INCÊNDIO .....	20
2.4. CLASSIFICAÇÃO DA MADEIRA .....	20
2.4.1. ESTRUTURA DA MADEIRA E ELEMENTOS CONSTITUINTES.....	21

2.5. PROPRIEDADES MECÂNICAS DA MADEIRA .....	21
2.5.1. PINHO-ABETO (Picea abies) .....	22
2.5.1.1. RESISTÊNCIA AO FOGO DA MADEIRA PINHO-ABETO .....	23
2.6. PAINÉIS DERIVADOS DE MADEIRA .....	24
2.6.1. FIBRAS DE MÉDIA DENSIDADE (MDF) .....	25
2.6.1.1. PROCESSO DE FABRICO DOS PAINÉIS DE MDF.....	26
2.6.1.2. MDF RESISTENTE AO FOGO .....	27
2.6.2. AGLOMERADO DE PARTÍCULAS LONGAS E ORIENTADAS (OSB).....	28
2.6.2.1. PROCESSO DE FABRICO DOS PAINÉIS DE OSB.....	29
2.6.2.2. AGLOMERADO DE PARTÍCULAS RESISTENTE AO FOGO .....	31
2.7. SISTEMAS DE ISOLAMENTO .....	31
2.7.1. LÃ DE ROCHA .....	31
2.7.2. GESSO (PLACA DE GESSO-GB).....	32
2.7.2.1. APLICAÇÃO EM SISTEMAS LWF .....	33
2.7.2.2. RESISTÊNCIA AO FOGO DA PLACA DE GESSO-GB.....	33
2.8. EUROCÓDIGO 5 - PARTE 1-2 .....	34
<b>Capítulo 3: Comportamento ao Fogo .....</b>	<b>36</b>
3.1. REAÇÃO AO FOGO DA MADEIRA E DERIVADOS.....	36
3.2. CURVA DE INCÊNDIO NATURAL .....	37
3.3. CURVA DE INCÊNDIO PADRÃO.....	38
3.4. COMPORTAMENTO TÉRMICO DA MADEIRA .....	39
3.4.1. PIRÓLISE .....	40
3.4.2. ESPESSURA DE CARBONIZAÇÃO.....	40
3.5. PROPRIEDADES DE REAÇÃO AO FOGO.....	42
3.5.1. TEMPO DE IGNIÇÃO (TI).....	42
3.5.2. TAXA DE LIBERTAÇÃO DE CALOR (HRR) .....	43
3.5.3. CLASSIFICAÇÃO DE REAÇÃO AO FOGO .....	44
3.6. PROPRIEDADES TÉRMICAS .....	44
3.7. PROPRIEDADES MECÂNICAS.....	45

3.7.1. PERDA DE MASSA.....	45
3.7.2. PRODUÇÃO DE FUMO E TOXICIDADE DA FUMAÇA.....	46
3.8. CLASSIFICAÇÃO DE RESISTÊNCIA AO FOGO.....	47
3.8.1. CAPACIDADE RESISTENTE (R).....	47
3.8.2. INTEGRIDADE (E).....	48
3.8.3. CRITÉRIO DE ISOLAMENTO (I).....	48
<b>Capítulo 4: Paredes Leves em Madeira.....</b>	<b>50</b>
4.1. INTRODUÇÃO.....	50
4.2. COMPOSIÇÃO DAS PAREDES.....	50
4.2.1. ESTRUTURA EM MADEIRA DE PINHO-ABETO.....	52
4.2.2. REVESTIMENTO EM MDF.....	52
4.2.3. ISOLAMENTO EM LÃ DE ROCHA.....	54
4.2.4. CONFIGURAÇÃO DAS PAREDES.....	54
4.2.5. SISTEMA DE LIGAÇÃO DAS PAREDES.....	55
<b>Capítulo 5: Ensaios Experimentais.....</b>	<b>57</b>
5.1. ENSAIO EXPERIMENTAL NO FORNO.....	57
5.1.1. ISOLAMENTO.....	57
5.1.2. MEDIÇÕES DE TEMPERATURA.....	58
5.2. RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....	61
5.2.1. OBSERVAÇÕES RELATIVAS À CARBONIZAÇÃO (ENSAIO 1).....	67
5.2.2. OBSERVAÇÕES RELATIVAS À CARBONIZAÇÃO (ENSAIO 2).....	71
5.2.3. REGISTOS TERMOGRÁFICOS DOS ENSAIOS.....	74
5.2.3.1. COMPARAÇÃO DOS REGISTOS TERMOGRÁFICOS E ENSAIO EXPERIMENTAL.....	76
<b>Capítulo 6: Método Numérico.....</b>	<b>80</b>
6.1. INTRODUÇÃO.....	80
6.2. ELEMENTO FINITO.....	80
6.3. DEFINIÇÃO DO MODELO NUMÉRICO.....	81
6.3.1. GEOMETRIA DO MODELO.....	81

6.3.2. PROPRIEDADES DOS MATERIAIS .....	82
6.3.2.1. LÃ DE ROCHA .....	82
6.3.2.2. MDF .....	83
6.3.2.3. PINHO-ABETO .....	83
6.3.3. CONVERGÊNCIA DA MALHA .....	84
6.3.3.1. CONTINUIDADE DA MALHA E NODE MERGE .....	85
6.3.4. CONDIÇÕES DE FRONTEIRA .....	86
6.3.4.1. CONVECÇÃO .....	86
6.3.4.2. RADIAÇÃO .....	87
6.3.5. PONTOS DE MONITORIZAÇÃO NUMÉRICA .....	89
6.4. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	90
6.4.1. REPRESENTAÇÃO DO CAMPO TÉRMICO .....	90
6.4.2. COMPARAÇÃO DO ENSAIO EXPERIMENTAL E MÉTODO NUMÉRICO..	92
<b>Capítulo 7: Conclusão e Trabalhos Futuros .....</b>	<b>99</b>
7.1. CONCLUSÃO .....	99
7.2. TRABALHOS FUTUROS .....	99
<b>Referências .....</b>	<b>101</b>
<b>Anexos .....</b>	<b>108</b>

# Lista de figuras

---

Figura 1. Construção em madeira, [3].....	8
Figura 2. Diagrama dos componentes, [4]. ....	9
Figura 3. Composição de uma casa em LWF, [2].....	13
Figura 4. Travamento entre painéis de parede, [46].....	15
Figura 5. Esquema simplificado do quadro estrutural do modelo LWF, [45]. ....	15
Figura 6. Quadro estrutural com aberturas de portas e janelas, [47].....	16
Figura 7. Fechamento em OSB, [45].....	17
Figura 8. Tipos de pregação entre as ossaturas e os montantes, [45].....	18
Figura 9. Tipos de parafuso auto-atarraxantes, (a) cabeça chata, (b) cabeça arredondada, (c) cabeça sextavada, [53].....	19
Figura 10. Direções do conector CDE, em relação à direção da força, [45].....	19
Figura 11. Direções dos eixos principais, [12].....	22
Figura 12. Fluxograma representativo dos diferentes tipos de painéis de madeira, [18]. ....	25
Figura 13. Representação da diferença de densidade no MDF: A) camada externa. B) região de transição entre camadas, [24]. ....	27
Figura 14. Processo de produção industrial do MDF, [25]. ....	27
Figura 15. Disposição das camadas do painel OSB: a) Orientação perpendicular à camada interna, b) Orientação aleatória da camada interna, [27]. ....	29
Figura 16. Esquema de parede LWF com isolamento lã de rocha, [71]. ....	32
Figura 17. Os componentes de uma parede com estrutura de madeira GB, [88].....	33
Figura 18. Ciclo de vida de combustão, [56]. ....	36
Figura 19. Fases de um incêndio natural, [65]. ....	37
Figura 20. Curva temperatura-tempo conforme a ISO 834, [82]. ....	39
Figura 21. Zonas de degradação numa secção de madeira, [66].....	39
Figura 22. Espessura de carbonização, [50]. ....	40
Figura 23. Espessura de carbonização numa direção e em várias direções, [68].....	41
Figura 24. Curvas de HRR típicas para diferentes comportamentos, [63].....	43
Figura 25. Fator de redução dependente da temperatura $K_{\Theta}$ para resistência e rigidez paralelas ao grão, [77]. ....	45
Figura 26. Taxa de perda de massa nos painéis de MDF, [64]. ....	46

Figura 27. Dimensões da espessura do sistema multicamada: MDF + Lã de rocha + Pinho, a) ensaio 1 e b) ensaio 2. ....	51
Figura 28. Dimensionamento da madeira pinho-abeto. ....	52
Figura 29. Estrutura de montantes de pinho-abeto (Ensaio 2). ....	52
Figura 30. Dimensionamento do painel MDF. ....	53
Figura 31. Estrutura de pinho revestida com MDF (Ensaio 1). ....	53
Figura 32. Composição do painel LWF com isolamento em lã de rocha. ....	54
Figura 33. Esquema de fixação do painel multicamada, ensaio experimental. ....	55
Figura 34. Referência técnica do parafuso. ....	56
Figura 35. Lado não exposto instalado na estrutura do forno, correspondente ao modelo de parede LWF ensaiado (Ensaio 1). ....	57
Figura 36. Etapas de preparação do painel (Ensaio 1): a) posicionamento da lã de rocha no interior da estrutura e b) aplicação da placa de revestimento de um dos lados durante a fase de pré-processamento. ....	58
Figura 37. Localização dos termopares inseridos nos modelos: a) lado não exposto e b) lado exposto, em mm. ....	59
Figura 38. Localização dos termopares nas vistas superior, intermédia e inferior. ....	59
Figura 39. Vista exterior do forno de ensaio de resistência ao fogo. ....	60
Figura 40. Evolução da temperatura medida pela TPlaca (temperatura do forno) em comparação com a curva padrão ISO 834. ....	61
Figura 41. Evolução da temperatura no lado exposto (BT) e comparação com a curva ISO 834 e Termo placa. ....	62
Figura 42. Evolução da temperatura no montante de madeira durante a exposição ao fogo. ...	63
Figura 43. Temperaturas no lado exposto (BT) e nas interfaces entre painel de MDF e lã de rocha. ....	64
Figura 44. Evolução da temperatura no lado não exposto (DT), incluindo temperatura máxima e média. ....	65
Figura 45. Evolução da temperatura nas interfaces internas entre painel MDF e lã de rocha, bem como no interior da camada de isolamento, da face exposta ao fogo. ....	66
Figura 46. Comparação entre as temperaturas no lado não exposto (DT) e nas interfaces próximas da face não exposta. ....	67
Figura 47. Libertação de chamas durante o Ensaio 1. ....	68
Figura 48. Face exposta imediatamente após o Ensaio 1. ....	68
Figura 49. Painel após desmontagem, com carbonização periférica e central. ....	68

Figura 50. Montante com carbonização avançada (Ensaio 1).....	69
Figura 51. Medição da profundidade de carbonização no montante central.....	69
Figura 52. Secção transversal do montante carbonizado. ....	69
Figura 53. Interior da cavidade após remoção da lâ de rocha (Ensaio 1). ....	70
Figura 54. Medição da espessura carbonizada do MDF interno. ....	70
Figura 55. Lã de rocha preservada junto ao montante carbonizado. ....	71
Figura 56. Evolução térmica do painel durante o Ensaio 2.....	71
Figura 57. Face exposta do painel após o Ensaio 2.....	72
Figura 58. Montante de madeira após o Ensaio 2. ....	72
Figura 59. Lã de rocha após o Ensaio 2. ....	73
Figura 60. Deformação côncava do MDF no lado não exposto após o Ensaio 2.....	73
Figura 61. Medição da deformação do painel com régua rígida no lado não exposto.....	73
Figura 62. Sequência termográfica do Ensaio 1, mostrando a evolução do aquecimento superficial entre 15 e 60 minutos e a formação de zonas quentes devido à perturbação térmica. ....	74
Figura 63. Registos termográficos do Ensaio 2 entre 15 e 120 minutos, evidenciando a evolução do aquecimento superficial e o desenvolvimento progressivo de zonas de maior intensidade térmica. ....	75
Figura 64. Comparação das temperaturas obtidas via câmara termográfica (IR) e dos termopares (DT), considerando emissividade 0,90.....	76
Figura 65. Comparação das temperaturas obtidas via câmara termográfica (IR) e dos termopares (DT), considerando emissividade 0,95.....	77
Figura 66. Determinação do tempo de resistência ao fogo considerando emissividade 0,90. .	77
Figura 67. Determinação do tempo de resistência ao fogo considerando emissividade 0,95. .	78
Figura 68. Geometria do PLANE293, Ansys Help, [86]. ....	81
Figura 69. Representação geométrica bidimensional (2D) dos painéis multicamada ensaiados. ....	82
Figura 70. Detalhe da malha de elementos finitos na região central do painel.....	84
Figura 71. Evolução da temperatura no ponto de referência (T = 1 h) em função do número de elementos da malha. ....	85
Figura 72. Condições de convecção aplicadas no modelo numérico do Ensaio 1, A- Face exposta e B- Face não exposta. ....	87
Figura 73. Condições de radiação aplicadas no modelo numérico do Ensaio 1, A- Face exposta e B- Face não exposta.....	89

Figura 74. Implementação dos pontos de monitorização através de sistemas de coordenadas, correspondentes às posições dos termopares experimentais, Ensaio 1. ....	90
Figura 75. Campo térmico obtido por simulação numérica para o Ensaio 1 (60 min). ....	91
Figura 76. Campo térmico obtido por simulação numérica para o Ensaio 2 (120 min). ....	92
Figura 77. Comparação entre os resultados experimentais e numéricos da evolução temporal da temperatura nos termopares BT1 e BT2. ....	93
Figura 78. Comparação entre os resultados experimentais e numéricos da evolução temporal da temperatura nos termopares T1, T2 e T3. ....	94
Figura 79. Comparação entre os resultados experimentais e numéricos da evolução temporal da temperatura nos termopares TI2 e TI5. ....	95
Figura 80. Comparação entre os resultados experimentais e numéricos da evolução temporal da temperatura nos termopares DT1, DT2 e DT5. ....	96
Figura 81. Comparação entre os resultados experimentais e numéricos da evolução temporal da temperatura. ....	97

# Lista de tabelas

---

Tabela 1. Composição e espessura das camadas do painel multicamada. ....	51
Tabela 2. Siglas dos tipos de termopares de cada região representativa do espécime. ....	59
Tabela 3. Tempo de resistência ao fogo e classificação segundo o critério de isolamento térmico (I). ....	79
Tabela 4. Tempo de resistência ao fogo e classificação segundo o critério de isolamento térmico (I), ....	98

# Nomenclatura

---

## Letras maiúsculas do alfabeto latino

$K_{\theta}$	Fator de redução dependente da temperatura
T	Temperatura
$T_0$	Temperatura inicial
$T_{ign}$	Tempo de ignição

## Letras minúsculas do alfabeto latino

$d_{char,0}$	Espessura da camada de carbonização numa direção
$d_{char,n}$	Espessura da camada de carbonização que incorpora o feito do canto da secção
$c_0$	Constante do material
$c$	Calor específico
$h_g$	Fluxo de calor incidente
$h_p$	Espessura do painel
$k_h$	Fator de correção relacionado à humidade
$k_{\rho}$	Fator de correção relacionado à densidade
t	Tempo de exposição ao fogo

## Letras maiúsculas do alfabeto grego

## Letras minúsculas do alfabeto grego

$\beta_0$	Taxa de carbonização na direção do fogo
$\beta_n$	Taxa de carbonização nas diferentes direções do fogo
$\rho_k$	Massa específica
$\lambda$	Condutividade térmica
$\rho/\rho_{20}$	Relação de densidade

## **Siglas**

CLT - Cross Laminated Timber

GB - Gypsum Board

GLULAM - Glued Laminated Timber

HRR - Taxa de libertação de calor

HPL - High Pressure Laminate

LWF - Light Wood Frame

MDF - Medium Density Fiberboard

MDI - Diisocianato de difenilmetano

MOE - Módulo de Elasticidade

MOR - Resistência à flexão

MUF - Melamina Ureia Formaldeído

OSB - Oriented Strand Board

PF - Fenol formaldeído

PHRR - Peak Heat Release Rate

pMDI - Diisocianato de difenilmetano polimérico

PVA - Álcool polivinílico

REACH - Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals

RF - Placas de gesso resistente ao fogo

RU - Placas de gesso resistente à humidade

SBI - Single Burning Item

ST - Placas de gesso comum

TI - Tempo de ignição

UF - Ureia formaldeído

# Capítulo 1: Introdução

---

## 1.1. CONTEXTO E MOTIVAÇÃO

A madeira tem sido utilizada no setor da construção ao longo da história, desempenhando um papel fundamental na edificação de estruturas habitacionais e comerciais, [1]. No entanto, com o avanço da industrialização, os materiais convencionais, como o betão e o aço, passaram a dominar o setor da construção devido à sua disponibilidade e percepção de maior resistência mecânica e durabilidade. Nos últimos anos, contudo, tem-se verificado um crescente interesse pelo uso da madeira em soluções construtivas sustentáveis, impulsionado pela necessidade de promover a sustentabilidade no setor da construção e pela evolução dos materiais derivados de madeira, [2].

Neste contexto, o sistema construtivo Light Wood Frame surge como uma alternativa viável e eficiente, amplamente adotado em diversos países devido à sua leveza, rapidez de execução e bom desempenho energético. Este método de construção é baseado na utilização de perfis de madeira leve interligados, formando painéis estruturais que garantem estabilidade e resistência. A composição dos elementos estruturais inclui madeira maciça e derivados, como painéis OSB (Oriented Strand Board), MDF (Medium Density Fiberboard) e isolamento em materiais como lã mineral ou espuma de poliuretano, conferindo ao sistema boas propriedades térmicas e acústicas, [3]. A Figura 1 representa construção feita em madeira.



Figura 1. Construção em madeira, [3].

Apesar das vantagens associadas ao LWF, um dos principais desafios que limitam sua ampla adoção é a resistência ao fogo. A madeira, por ser um material combustível, apresenta um comportamento complexo em situações de incêndio, onde fatores como a taxa de

carbonização, a integridade estrutural e a propagação das chamas desempenham um papel crucial na segurança das edificações. Diante disso, torna-se essencial compreender e avaliar detalhadamente o desempenho ao fogo desses sistemas, garantindo sua viabilidade e conformidade com as normas de segurança vigentes, tais como o Eurocódigo 5 (EN 1995-1-2) para estruturas de madeira, [68].

A estrutura básica do LWF é composta por montantes verticais e guias horizontais de madeira, formando uma grelha que suporta as cargas da estrutura. Esses elementos são geralmente feitos de madeira maciça, como o pinho, tratada para resistir a fungos, térmitas e intempéries, principalmente nas peças que ficam em contato com o cimento, [4].

As paredes são constituídas por perfis de madeira, espaçados regularmente, e revestidas com chapas de OSB/MDF, HPL (High Pressure Laminate) e outros materiais, que atuam como elemento de rigidez, garantindo estabilidade à estrutura. O espaço entre os montantes é preenchido com materiais isolantes, como lã mineral (lã de rocha), proporcionando isolamento térmico e acústico, [5].

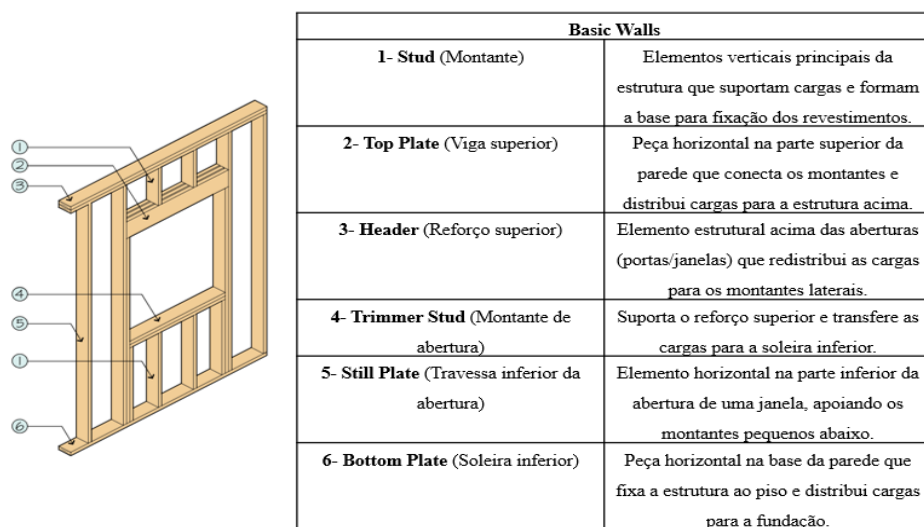


Figura 2. Diagrama dos componentes, [4].

## 1.2. OBJETIVOS PROPOSTOS

O presente trabalho tem como objetivo avaliar a viabilidade do sistema construtivo Light Wood Frame (LWF) como uma alternativa sustentável para o setor da construção. Para isso, pretende-se analisar a resistência estrutural, o comportamento ao fogo e a eficiência térmica dos materiais utilizados neste sistema. O estudo envolve a investigação de painéis

derivados de madeira, como o MDF e madeira de pinho-abeto, em conjunto com sistemas de isolamento de lã de rocha, formando um painel multicamada. A resistência ao fogo destas estruturas será um dos principais focos, considerando a segurança e a durabilidade do sistema em condições de incêndio.

Será realizada uma análise bibliográfica sobre as propriedades térmicas e mecânicas da madeira e dos seus derivados, com base em métodos simplificados dos Eurocódigos. Além disso, serão efetuados ensaios experimentais ao fogo, visando caracterizar o comportamento termomecânico dos painéis de madeira e validar modelos numéricos para simulação do seu desempenho estrutural sob condições extremas.

Com esta abordagem, espera-se contribuir para um maior entendimento das vantagens e desafios da aplicação do Light Wood Frame na construção, fornecendo dados relevantes para a otimização do sistema e o cumprimento das normas de segurança contra incêndios.

### **1.3. ORGANIZAÇÃO DA TESE**

A presente dissertação é genericamente dividida em 7 capítulos, com a seguinte descrição:

- **Capítulo 1 - Introdução**

Está presente uma breve introdução geral ao tema que está sendo abordado de sistemas construtivos Light Wood Frame, bem como a organização da tese e os objetivos propostos.

- **Capítulo 2 - Estado da arte**

Neste capítulo vai ser abordado a descrição de estado da arte e propriedades mecânicas dos painéis e materiais utilizados MDF, lã de Rocha e Pinho-abeto.

- **Capítulo 3 - Comportamento ao Fogo**

Apresenta a reação ao fogo da madeira, dos painéis derivados de madeira e lã de rocha, juntamente com as respectivas propriedades térmicas e mecânicas.

- **Capítulo 4 - Paredes Leves em Madeira**

Aborda os sistemas de estudo e configurações multicamada. Fez-se necessário apresentar um desenvolvimento teórico sobre os sistemas LWF, os painéis de madeira e, em particular, os tipos utilizados nesta investigação.

- **Capítulo 5 - Ensaios Experimentais**

No presente capítulo será apresentada a metodologia e a execução dos ensaios experimentais destinados à determinação da resistência ao fogo de painéis derivados de madeira, sob condições de incêndio controlado.

- **Capítulo 6 - Método Numérico**

Desenvolvimento de um método numérico para o comportamento termomecânico de painéis de derivados de madeira em condições de incêndio.

- **Capítulo 7 - Conclusão e Trabalhos Futuros**

São apresentadas as principais conclusões alcançadas com o estudo e sugestões de trabalho para serem investigados futuramente, com vista a uma melhor compreensão do comportamento deste tipo de sistema construtivo.

# Capítulo 2: Estado da Arte

---

## 2.1. INTRODUÇÃO

Este capítulo tem como objetivo apresentar uma visão geral sobre a madeira, abordando as suas propriedades físicas e mecânicas, bem como a sua utilização ao longo da história.

A madeira tem sido amplamente utilizada na construção desde a antiguidade, sendo um dos materiais predominantes em diversas civilizações, tanto primitivas como desenvolvidas, abrangendo o Oriente e o Ocidente. Com o advento da Revolução Industrial, houve uma mudança significativa nos métodos e materiais construtivos. O surgimento do betão e do aço como alternativas permitiu a construção de edifícios mais altos e resistentes ao fogo, levando a um declínio na utilização da madeira, especialmente em áreas urbanas. No entanto, nos últimos anos, a madeira tem vindo a recuperar espaço devido à crescente preocupação com a sustentabilidade e a necessidade de reduzir a pegada de carbono no setor da construção.

Madeira é o único material de construção proveniente de uma fonte renovável: a floresta, apresenta um balanço ambiental positivo quando comparada com outros materiais. A sua capacidade de armazenar carbono e a possibilidade de reutilização e reciclagem fazem dela um material atrativo no contexto atual de transição para uma construção mais sustentável. Além disso, a inovação tecnológica tem permitido o desenvolvimento de produtos processados como a madeira lamelada colada (GLULAM), a madeira laminada cruzada (CLT) e os painéis estruturais avançados, que ampliam as aplicações da madeira na construção de edifícios de grande porte, [6].

## 2.2. O SISTEMA CONSTRUTIVO LIGHT WOOD FRAME

As estruturas feitas em madeira possuem diversas características que a tornam atraentes frente aos outros modelos construtivos disponíveis no ramo da construção. Entre estas, são frequentemente apontados o baixo consumo de energia para seu processamento, a elevada resistência mecânica, as boas características de isolamento térmico e elétrico, bem como a facilidade de maquinagem do material, [21].

O modelo de edificação em Light Wood Frame, é amplamente difundido nas regiões da América do Norte e da Europa, garantindo a este modelo, a solução habitacional mais comum dentre as demais técnicas construtivas realizada nesses países, [39].

O termo conhecido como LWF pode ser traduzido como “estruturas leves em madeira”. É a combinação de elementos estruturais, composto por seções de madeira (parte estrutural), revestido por chapas de painéis tipo OSB/MDF que funcionam como contraventamento da estrutura, gerando o “frame”. Este conjunto produz rigidez necessária para resistir às cargas verticais e horizontais, [40]. A composição de uma casa em LWF pode ser organizada da seguinte forma: (A) Telhados; (B) Estruturas, (C) Pavimentos, (D) Fundação e (E) Paredes, (Figura 3).

O diferencial desse sistema construtivo reside na forma como as paredes são fabricadas e estruturadas. Os sistemas leves tipo LWF são sistemas construtivos cuja principal característica é serem estruturados por peças de madeira maciça serrada, com revestimentos em chapas delgadas. Esta estrutura é composta por paredes (internas e externas) que incluem os seguintes elementos:

- (1) Placa de gesso cartonado,
- (2) Estrutura em madeira serrada tratada,
- (3) Chapas tipo OSB/MDF para contraventamento,
- (4) Materiais isolantes acústicos e térmicos;
- (5) Travamentos em madeira,
- (6) Revestimento da parede exterior (placa cimentícia, alvenaria, entre outros).

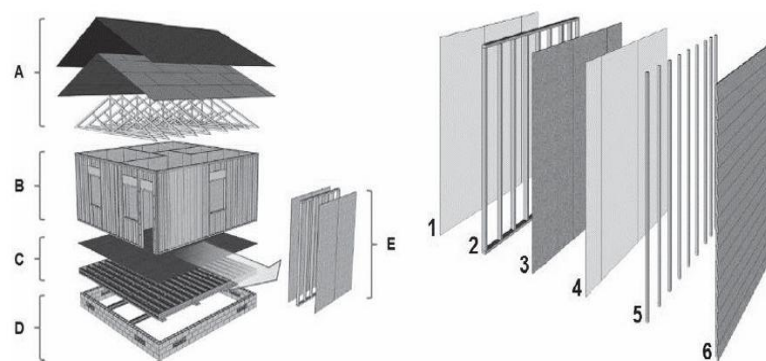


Figura 3. Composição de uma casa em LWF, [2].

### 2.2.1. FUNDAÇÃO

A fundação é o elemento construtivo que garante, que as cargas provenientes da estrutura sejam transmitidas até o solo evitando efeitos de recalques, fissuras ou defeitos que possam causar desconforto ao usuário. As fundações são classificadas em dois tipos, as superficiais e as profundas. Superficiais são aquelas cuja base se encontra a uma profundidade inferior ao dobro da menor dimensão da fundação, transmitindo as tensões distribuídas que equilibram a carga aplicada. Por sua vez, as fundações profundas transmitem as cargas para camadas mais profundas do solo, através da base, da superfície lateral ou de ambas. Estas fundações caracterizam-se por uma profundidade superior a oito vezes a menor dimensão da fundação e, no mínimo, por três metros de profundidade, [42].

No sistema LWF, a outra função da estrutura de fundação é de manter a construção acima do nível do solo, protegendo as estruturas de madeira de micro-organismos e da humidade, ambas extremamente prejudiciais à vida útil da madeira.

Segundo a TecVerde Engenharia S/A (2014), para terrenos mais acidentados ou com composição de solo com resistência muito baixa, a fundação deve ser definida em função de uma análise de solo. Para construção em LWF, que estão localizadas em terrenos planos ou levemente acidentados, o uso do radier é a solução de fundação mais utilizada, por garantir mais velocidade na execução da etapa construtiva, [44].

O radier é uma fundação superficial sobre uma camada de brita, com rigidez necessária para receber e distribuir as cargas da estrutura, normalmente com 12 a 15 cm de espessura. Uma vantagem é que neste caso a própria estrutura de fundação serve como piso para empreendimento construído, [43].

### **2.2.2. SISTEMA DE PISOS**

A execução dos pisos no sistema LWF é realizada por meio de elementos construtivos compostos por viga de suporte, viga de distribuição e contrapiso. As vigas de suporte têm como função receber todos os esforços atuantes nos pisos e transmiti-los às estruturas verticais portantes, como colunas, paredes ou diretamente para as fundações. Estas vigas podem ser fabricadas com diversos materiais, sendo a madeira maciça uma das opções mais comuns.

Nestes casos, a espessura habitual varia entre 10 e 15 cm de largura, e 15 a 35 cm de altura. Em pisos que contenham vãos técnicos (como shafts (eixo) de passagem), é necessário proceder à adaptação da zona envolvente, reforçando-a estruturalmente. Uma ilustração exemplificativa desta solução construtiva encontra-se apresentada no Anexo (A25), [43].

A superfície estrutural plana fixada no topo das vigas LWF é designada por contrapiso. Geralmente é feito de madeira compensada ou por Oriented Strand Board (OSB), mas também pode ser feito de outros materiais. O contrapiso tem como função fechar e nivelar o ambiente, além de preparar a estrutura para os tratamentos de impermeabilização do piso em áreas molhadas ou para a instalação dos revestimentos. Uma representação exemplificativa deste elemento construtivo encontra-se apresentada no Anexo (A26), [44].

### 2.2.3. SISTEMA DE PARADES

As paredes constituintes do sistema construtivo em LWF são feitas de painéis compostos por montantes verticais de madeira, espaçados entre si de 40 a 60 cm, garantindo a conformidade com placas de OSB. Os painéis então são fechados com guias de madeira superior e inferior nos montantes de madeira, [46], ilustrado na Figura 4.

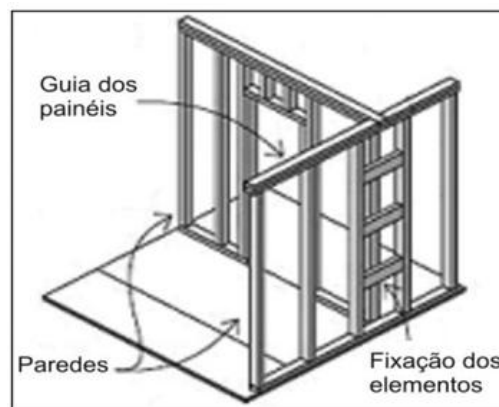


Figura 4. Travamento entre painéis de parede, [46].

O quadro estrutural da parede é composto por elementos verticais (montantes) e por elementos horizontais (soleira inferior e superior), [45], conforme representado na Figura 5.

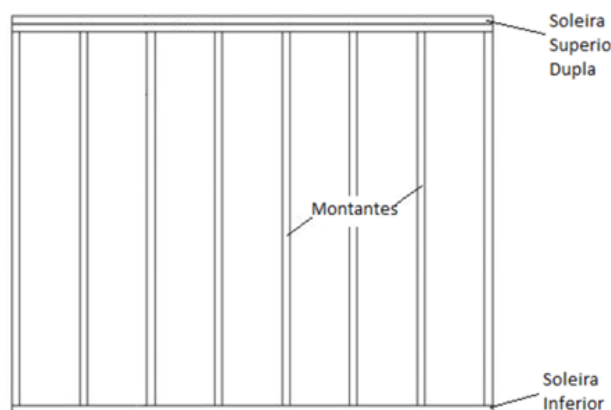


Figura 5. Esquema simplificado do quadro estrutural do modelo LWF, [45].

Os quadros estruturais são formados por peças de madeira maciça serrada, denominadas montantes, travessas, vigas, caibros, umbrais, ripas e sarrafos, com alta resistência natural ao ataque de organismos xilófagos ou tratados quimicamente sob pressão, [47].

O contraventamento pode ser feito com peças de madeira (montantes, travessas ou diagonais) ou chapas de madeira e derivados (OSB/MDF ou madeira compensada), entre outros materiais. A Figura 6 mostra os componentes do quadro estrutural do painel.

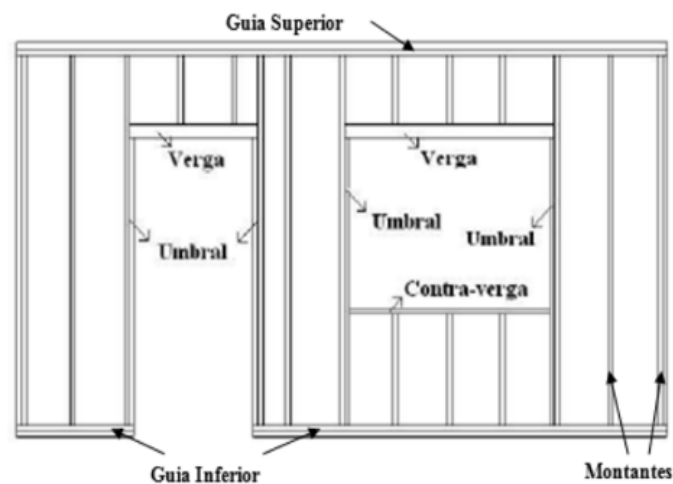


Figura 6. Quadro estrutural com aberturas de portas e janelas, [47].

No sistema Light Wood Frame, as instalações de portas e janelas podem ser executadas de maneira similar aos sistemas convencionais, onde se utiliza espuma de poliuretano ou parafusos. Contudo, as juntas entre painéis devem ocorrer sobre um montante ou outro elemento vertical, [45].

#### 2.2.4. PLACAS DE FECHAMENTO

As placas de fechamento no sistema LWF fazem parte dos componentes que mais evoluíram tecnologicamente nos últimos anos, sendo exemplo disso o OSB, a placa cimentícia e o gesso cartonado, [48]. Os painéis em OSB são produzidos a partir de partículas de madeira com a incorporação de resina a prova de água e parafina. Estas partículas por sua vez, são orientadas em direção fixa, para o processo de prensagem a quente, garantindo ao OSB grande resistência mecânica e estabilidade dimensional. Pode-se ter como exemplo a Figura 7 como representação do fechamento feito em OSB, junto ao quadro estrutural da parede.



Figura 7. Fechamento em OSB, [45].

Em paredes internas por sua vez é feita a fixação de placas de gesso cartonado sobre as placas OSB, para acabamento da edificação, as placas de gesso são comumente comercializadas em uma espessura de 9,5 mm, 12,5 mm e 15 mm, sendo estas disponibilizadas como placas standard para áreas secas (ST), placas resistentes à humidade (RU) e placas resistentes ao fogo (RF), [45].

### **2.2.5. ESTRUTURA DE COBERTURA**

A cobertura é constituída por elementos leves em madeira, podendo ser executada em diferentes formatos e com a utilização de diversos tipos e modelos de telhas. Sobre as paredes do último piso da edificação são, geralmente, posicionadas treliças industrializadas de madeira com conectores do tipo chapas de dentes estampadas. Para confecção da cobertura nesse sistema construtivo, são aplicadas treliças pré-industrializadas, com seu espaçamento variando de 60 a 120 cm, de acordo com o tipo de telha que será utilizada. O uso da cobertura industrializada reduz em até 40% do peso da cobertura, se comparada ao método tradicional. Uma ilustração exemplificativa deste sistema construtivo é apresentada no Anexo (A27), [49].

### **2.2.6. LIGAÇÕES**

As conexões que são utilizadas para conectar os painéis de revestimento aos membros de estrutura, são amplamente utilizadas na construção de LWF, pois essas conexões têm grande influência no comportamento estrutural, [51]. Além de dissipar energia quando sujeito a cargas

sísmicas, as conexões entre os membros de estrutura e os painéis de revestimento servem a outro propósito importante, são a principal fonte de resistência e rigidez ao corte das paredes estruturais de LWF, [45]. A edificação pode contar com uma ampla variedade de ligações, executadas com pregos, parafusos, grampos ou chapas com dentes estampados.

### 2.2.6.1. LIGAÇÕES PREGADAS

As ligações pregadas são aquelas que utilizam prego como conector, sendo este cravado na peça por meio de impacto manual ou por pistola de pregos pneumática. Existem dois tipos de pregação entre as ossaturas e os montantes na construção em LWF, os quais se adaptam a situações específicas consoante a metodologia construtiva utilizada.

A pregação em ângulo, chamado de “toe nail”, é utilizada apenas em casos onde não é possível realizar a pregação no topo, chamada de “end nail”, [49], conforme a Figura 8.

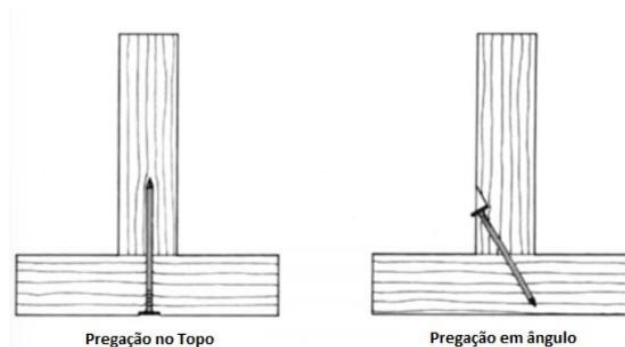


Figura 8. Tipos de pregação entre as ossaturas e os montantes, [45].

A representação das conexões entre os diferentes elementos estruturais, incluindo as principais uniões utilizadas no sistema construtivo, encontra-se apresentada no Anexo (Tabela A7).

### 2.2.6.2. LIGAÇÕES PARAFUSADAS

Os parafusos diferenciam-se entre si pela forma da rosca, que pode ser total ou parcial, bem como pela forma da haste, da cabeça e do tipo de acionamento. Os parafusos utilizados em ligações estruturais dividem-se, essencialmente, em dois tipos: rosqueados auto-atarraxantes e passantes com porcas e anilhas, [52]. Os parafusos auto-atarraxantes são utilizados quando é necessária uma resistência superior à proporcionada pelos pregos e apresentam,

adicionalmente, maior facilidade de remoção, [53]. Devem ser sempre instalados por roscagem e tal como os pregos, requerem pré-furação. Os tipos mais encontrados são mostrados na Figura 9.

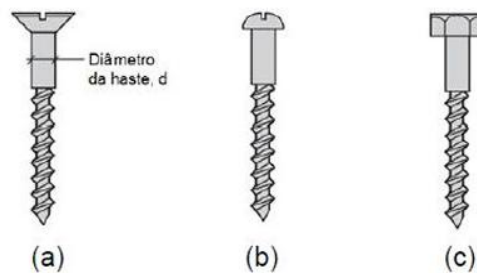


Figura 9. Tipos de parafuso auto-atarraxantes, (a) cabeça chata, (b) cabeça arredondada, (c) cabeça sextavada, [53].

Os parafusos com porcas e anilhas, são normalmente, utilizados em ligações estruturais e apresentam formato cilíndrico, com uma extremidade dotada de cabeça e a outra com rosca e porca. As anilhas são utilizadas para reduzir a pressão de apoio, [52]. A norma EN ISO 4016 (2000), [89] determina a geometria dos parafusos, enquanto a norma EN ISO 898-1 (1999), [90] define as características do aço empregado no parafuso.

### 2.2.6.3. CHAPAS DE DENTES ESTAMPADOS

As chapas dentadas ou com dentes estampados, são utilizadas em ligações estruturais de madeira por oferecerem resistência à tração, flexão e corte. Por esse motivo, não necessitam de acessórios adicionais, como os parafusos, que nas suas ligações, requerem anilhas para garantir a fixação das barras de madeira, [45]. A chapa metálica com dentes estampados (CDE) apresenta duas direções, longitudinal e transversal, em relação à direção da aplicação da força, conforme ilustrado na Figura 10.

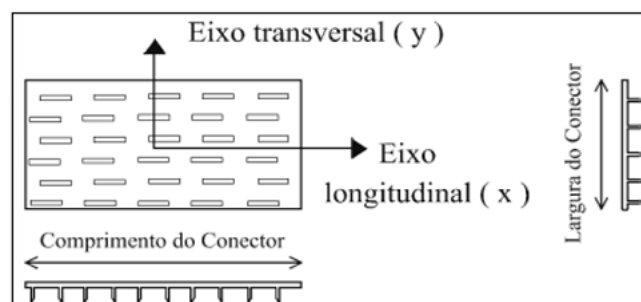


Figura 10. Direções do conector CDE, em relação à direção da força, [45].

As principais características das ligações por chapas de dentes estampados são:

- A resistência necessária é obtida pela escolha adequada da dimensão da chapa, sendo sempre usada aos pares nas ligações,
- Melhor aproveitamento do material,
- Qualidade técnica dos projetos,
- Controle de Qualidade,
- O sistema apresenta bom comportamento estrutural para grandes vãos de estruturas, em até 20 m.

Entretanto, a variação da humidade das peças de madeira, no momento da prensagem, influencia significativamente na resistência e na rigidez das ligações e de maneira diferenciada de acordo com a espécie de madeira utilizada, [45].

### **2.3. SEGURANÇA DA EDIFICAÇÃO EM LWF CONTRA INCÊNDIO**

No que se refere à construção de casas de madeira, a principal restrição em termos legais, em muitos países, deve-se, principalmente, ao risco de incêndio, sendo que tais limitações foram introduzidas há mais de meio século, numa época em que não havia recursos como materiais retardantes, pinturas intumescentes e aditivos resistente ao fogo, [60].

Em termos estruturais, quando comparada a outros materiais, também utilizados em construção como, por exemplo, o concreto e o aço, a madeira apresenta um excelente comportamento em situação de incêndio. Elementos estruturais de madeira, quando expostos ao fogo, carbonizam primeiramente o seu perímetro externo, ficando o interior da madeira praticamente intacta, [59].

De uma maneira geral, a principal preocupação dos órgãos normativos com a ocorrência de incêndio não está ligada ao interesse de preservar o patrimônio, mas sim de garantir que a edificação permaneça com sua capacidade resistente preservada por um período suficiente para garantir a total evacuação das pessoas, [60].

### **2.4. CLASSIFICAÇÃO DA MADEIRA**

Para otimizar a utilização da madeira, é essencial caracterizar as suas propriedades, tais como massa volúmica, teor de humidade, características mecânicas, térmicas e acústicas, [7].

As árvores possuem diferenças estruturais tanto a nível anatómico como botânico, sendo classificadas em dois grupos principais: Gimnospérmicas, também conhecidas como Resinosas, Coníferas ou madeiras macias, que se originam de plantas sem flores e Angiospérmicas, denominadas Folhosas, madeira estrutural ou madeira dura provenientes de plantas com flores, [8]. As Gimnospérmicas são subdivididas em quatro subgrupos, porém somente o subgrupo das coniferopsidas e das conifíerales podem ser utilizadas na construção como material estrutural, devido a sua alta resistência à compressão e à tração. Enquanto, as Angiospérmicas são divididas em dois subgrupos: as monocotiledóneas, com baixa resistência estrutural e as dicotiledóneas, com alta resistência estrutural, [8].

As imagens ilustrativas correspondentes aos principais grupos botânicos da madeira encontram-se apresentadas no Anexo (A24).

#### **2.4.1. ESTRUTURA DA MADEIRA E ELEMENTOS CONSTITUINTES**

A madeira é um material natural e heterogêneo, composto por diversos tipos de células que desempenham funções específicas na árvore. Essas células estão organizadas ao longo dos sentidos longitudinal, radial e tangencial da madeira, e estão interligadas por meio da lignina, formando o tecido lenhoso, [9]. Os principais componentes químicos da madeira são a celulose, a hemicelulose, a lignina e os extrativos em geral, cujas percentagens se encontram apresentadas no Anexo (Tabela A5).

Os tecidos vegetais são predominantemente compostos por celulose, tanto nas angiospermas quanto nas gimnospermas. As hemiceluloses são polissacarídeos que se ligam à celulose na parede celular. Embora apresentem cadeias poliméricas menores do que a celulose, elas ainda desempenham um papel importante, proporcionando suporte mecânico às fibras de celulose. A lignina, por sua vez, forma uma malha tridimensional com ligações cruzadas, possuindo uma estrutura macromolecular distinta da celulose e da hemicelulose. Ela atua como um adesivo entre os diversos tecidos da madeira, conferindo-lhes resistência e rigidez, além de ser a principal fonte de compostos aromáticos. Além disso, a madeira contém diversos extrativos em sua composição, [9].

#### **2.5. PROPRIEDADES MECÂNICAS DA MADEIRA**

As propriedades mecânicas são fundamentais para classificar e caracterizar a madeira, especialmente no que diz respeito à sua estabilidade estrutural e durabilidade. A madeira é um material anisotrópico, o que significa que suas propriedades variam nas direções dos três eixos perpendiculares entre si: tangencial, radial e longitudinal. O eixo tangencial é perpendicular às fibras e tangente aos anéis de crescimento, o eixo radial é normal aos anéis de crescimento e o eixo longitudinal é paralelo às fibras e ao tronco da árvore, conforme ilustrado na Figura 11, [12].

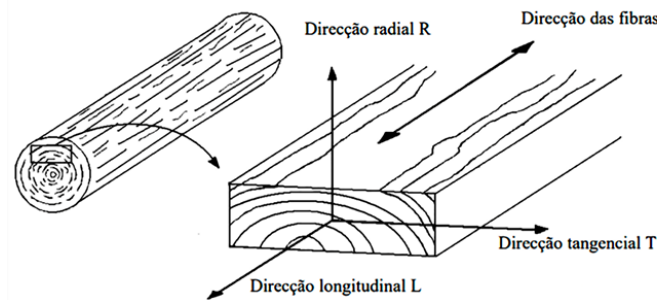


Figura 11. Direções dos eixos principais, [12].

À medida que o corte é realizado no elemento de madeira, ela pode apresentar maior resistência em uma direção ou em outra. Isso ocorre devido ao fato de as direções mencionadas (radial, tangencial e longitudinal) exibirem comportamentos, características, propriedades físicas e mecânicas específicas. A diferença nas propriedades entre as direções radial e tangencial é geralmente de menor importância, sendo fundamental apenas distinguir as propriedades na direção das fibras paralelas e na direção perpendicular a essas fibras, [13].

A exposição da madeira a temperaturas elevadas pode causar efeitos temporários ou permanentes, dependendo do tempo de exposição e da temperatura alcançada. Os efeitos temporários resultam do aquecimento da madeira por curtos períodos, levando a uma redução provisória da resistência mecânica, que é recuperada após o resfriamento do material. Já os efeitos permanentes, por sua vez, não desaparecem mesmo após a temperatura voltar ao normal e ocorrem quando a madeira é exposta a temperaturas superiores a 65°C, [9].

### 2.5.1. PINHO-ABETO (*Picea abies*)

O pinho-abeto é uma árvore pertencente ao gênero *Picea*, que faz parte da família das Pináceas. Apesar da designação comum “pinho”, trata-se de uma espécie distinta das do gênero *Pinus* (pinheiros). Esta madeira é especialmente conhecida pela sua tonalidade clara, estrutura

homogénea e boa qualidade, tornando-se uma escolha frequente para diversas aplicações, como construção, mobiliário, papel e celulose. Adicionalmente, o pinho-abeto é amplamente utilizado em sistemas de construção em madeira, nomeadamente em estruturas do tipo Light Wood Frame, devido à sua boa relação resistência/peso, disponibilidade comercial e comportamento previsível em situação de incêndio. O seu crescimento ocorre principalmente em regiões de clima temperado a frio, sendo predominante na Europa, sobretudo na Europa Central e do Norte, [31].

A madeira de pinho-abeto é classificada como uma madeira de densidade média, com valores típicos variando entre 350 e 470 [ $kg/m^3$ ], dependendo da espécie e das condições de crescimento. A sua estrutura celular caracteriza-se por uma predominância de traqueídeos (células alongadas e ocas), responsáveis pela condução da seiva e pelo suporte mecânico, conferindo-lhe uma boa resistência mecânica. Do ponto de vista do processamento o pinho-abeto destaca-se pela facilidade de corte, entalhe e acabamento. Esta característica deve-se à sua composição anatómica, que apresenta textura homogénea e baixa dureza em comparação com outras madeiras coníferas, [32].

O tipo de madeira para aplicações estruturais deve considerar fatores como resistência mecânica e durabilidade natural. Para reforçar a sua durabilidade, a madeira de pinho pode ser tratada para aumentar a sua resistência a agentes biológicos, como fungos e insetos, tornando-se uma opção viável para ambientes com maior exigência de durabilidade, [33].

#### **2.5.1.1. RESISTÊNCIA AO FOGO DA MADEIRA PINHO-ABETO**

Do ponto de vista do comportamento ao fogo, a madeira de pinho-abeto apresenta características típicas das madeiras macias de densidade média. A sua taxa de carbonização situa-se geralmente entre 0,60 e 0,80 [mm/min], dependendo da densidade, teor de humidade, direção do grão e condições de exposição. O Eurocódigo 5 (EN 1995-1-2), [68] estabelece para madeiras coníferas uma taxa de referência de  $\beta_0 = 0,65$  [mm/min], podendo atingir valores nominais  $\beta_n$  entre 0,70 e 0,80 [mm/min] quando considerados os efeitos de arredondamento dos cantos e degradação acelerada, em condições de exposição ao fogo.

A camada carbonizada formada à superfície atua como uma barreira térmica natural, retardando a penetração de calor para o interior, embora comprometa a integridade estrutural da secção remanescente. Fatores como a densidade, o teor de humidade e a composição química

(teores de celulose, hemicelulose e lenhina) influenciam diretamente o tempo de ignição e a propagação das chamas, [68].

Estudos experimentais reforçam que o pinho-abeto, apresenta um comportamento ao fogo semelhante ao de outras coníferas estruturais, embora com tendência a carbonizar mais rapidamente quando comparado a materiais derivados, como MDF. Ensaios apresentados em Dagort (2022) mostram que a taxa de carbonização do pinho é superior à do MDF, devido à menor densidade e maior proporção de lume acessível, o que se traduz numa evolução mais rápida da frente de pirólise, [33].

Barreira (2010) confirma estes resultados ao modelar numericamente o comportamento térmico da madeira maciça, demonstrando que a espessura carbonizada aumenta de forma aproximadamente linear com o tempo de exposição ao fogo e que a integridade térmica depende significativamente da humidade inicial da madeira, da densidade e da orientação das fibras, [66].

O pinho-abeto é amplamente utilizado como elemento estrutural em sistemas Light Wood Frame, onde a sua resistência ao fogo pode ser substancialmente aumentada através da inclusão de proteção passiva, como placas de gesso cartonado ou painéis derivados com propriedades ignífugas. Estudos sobre paredes LWF mostram que a proteção com gesso ou painéis compósitos pode prolongar significativamente o tempo de resistência ao fogo, reduzindo a taxa de aquecimento interno e atrasando a carbonização dos elementos estruturais, [84]. As propriedades da madeira de pinho em situação de incêndio encontram-se apresentadas no Anexo (Tabela A8).

## **2.6. PAINÉIS DERIVADOS DE MADEIRA**

O ciclo de carbono nos produtos de construção em madeira desempenha um papel essencial na sustentabilidade ambiental, contribuindo para a redução do  $CO_2$  na atmosfera. As florestas atuam como reservatórios naturais de carbono, capturando este gás durante o crescimento das árvores. Após a extração, a madeira é transformada em produtos como madeira serrada, painéis derivados e pasta de papel. Quando utilizada na construção, continua a armazenar carbono, prolongando esse benefício ao longo da sua vida útil. Mesmo após o uso, a madeira pode ser reciclada, mantendo o carbono retido por mais tempo. No final do ciclo, os resíduos de madeira podem ser aproveitados para a recuperação de energia, reduzindo a

necessidade de combustíveis fósseis. Contudo, ao longo das etapas de produção, transporte e decomposição, há emissões de  $CO_2$  para a atmosfera, [16].

Os painéis à base de madeira são um termo que abrange diversos tipos de placas fabricadas a partir de fibras, partículas ou lascas de madeira, apresentando propriedades de engenharia excepcionais. O E49, [17] é um órgão responsável por monitorizar diversos aspetos da indústria e do setor à base de madeira. Entre as suas funções, está a avaliação do desempenho de painéis de madeira, adesivos, revestimentos e coberturas. Além disso, estabelece que um produto é classificado como painel derivado de madeira quando a sua espessura é consideravelmente menor do que a sua largura ou comprimento, [18]. Estes produtos são classificados conforme a sua configuração física, categorizando-se em: painéis laminados, painéis de fibras e painéis de partículas aglomeradas (consultar Figura 12).

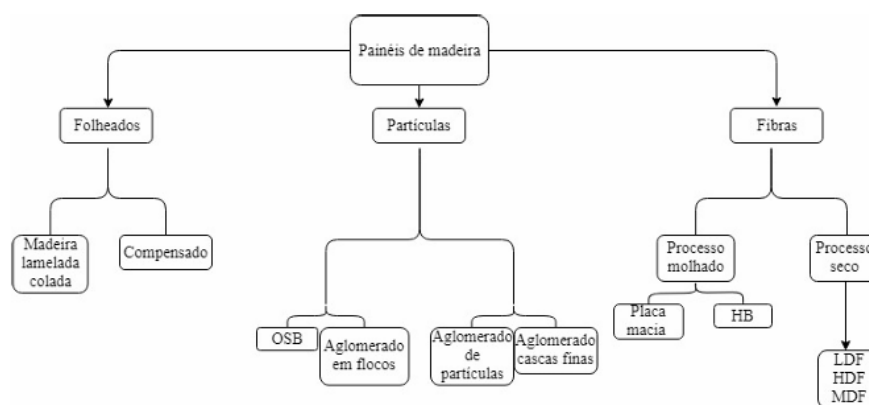


Figura 12. Fluxograma representativo dos diferentes tipos de painéis de madeira, [18].

Os produtos derivados de madeira resultam da desintegração da madeira e da sua reconstituição sob pressão, temperatura e outros parâmetros de processamento, com adição de resinas sintéticas, aglutinantes minerais e aditivos, [19]. Exemplo de produtos derivados de madeira apresentados no Anexo (A28).

### 2.6.1. FIBRAS DE MÉDIA DENSIDADE (MDF)

Os painéis de MDF (Medium Density Fiberboard) foram inicialmente desenvolvidos nos Estados Unidos da América. A sua produção baseava-se essencialmente num processo húmido, o qual gerava elevados volumes de águas residuais poluídas, exigindo tratamento prévio à sua descarga. Na década de 1950, a introdução de processos semi-secos permitiu a fabricação de painéis com menor impacto ambiental, tornando a produção mais ecológica. Na

Europa, a primeira unidade industrial foi instalada na antiga República Democrática Alemã em 1973, marcando o início de uma expansão exponencial da produção de MDF, que perdura até à atualidade, [18].

A produção de painéis MDF representa aproximadamente 70% do mercado total de painéis de fibras na Europa. Segundo dados recentes, a capacidade produtiva do setor nos países membros da Federação Europeia dos Painéis Derivados de Madeira (EPF) atingiu 14,7 milhões de metros cúbicos ( $m^3$ ) em 2016, tendo sido efetivamente produzidos cerca de 12 milhões de ( $m^3$ ) nesse mesmo ano. Na Europa, fabricam-se diversos tipos de MDF adaptados a distintas aplicações: ambientes secos, ambientes húmidos, MDF com retardante de chama para aplicações com requisitos de segurança e MDF flexível para aplicações em curvaturas e moldagens. Estes painéis apresentam variações significativas nas suas características técnicas e propriedades físicas, consoante a sua destinação final, conforme ilustrado no Anexo (A29), [21].

O MDF é composto essencialmente por fibras finas lignocelulósicas, unidas por resinas sintéticas, como a ureia-formaldeído (UF) e a melamina-ureia-formaldeído (MUF), que garantem a uniformidade dimensional da superfície e a adesão eficiente entre as fibras. Além disso, a resina pMDI (polimerico dissociado de difenilmetano) confere ao material uma elevada resistência à humidade. O processo existe através de calor, pressão e são fabricados numa vasta faixa de espessuras, de 2 a 100 [mm] com densidades de 500 a 900 [ $kg/m^3$ ], [22].

#### **2.6.1.1. PROCESSO DE FABRICO DOS PAINÉIS DE MDF**

O processo de fabrico do MDF é composto por várias fases, desde o descascamento e fragmentação da madeira até à prensagem das fibras, resfriamento e acabamento. Uma das primeiras fases é a aquisição de pedaços de madeira, que são em seguida fragmentados em partículas menores, chamadas cavacos. Os cavacos com tamanhos semelhantes são colocados num reservatório, onde ficam em repouso por 24 horas submersos em água. Depois, são secos e, com o aumento da temperatura no reservatório, a lignina, que é uma cola natural da madeira, amolece, resultando em fibras mais resistentes e flexíveis.

Os cavacos passam por um desfibrador, onde são transformados em fibras, que em seguida passam por uma centrifugadora para serem ligadas a resinas, catalisadores ou aditivos. Neste processo, acabam por reter uma elevada humidade, o que pode ocasionar uma série de problemas. Posteriormente, os cavacos são secos num compartimento com a injeção de ar seco

e quente. Já secos, são entrelaçados e unidos para formar pequenos blocos de aglomerado, que serão direcionados para a pré-prensagem, evitando que as fibras da manta se separem e deslizem durante a prensagem a quente. Durante esta etapa, os painéis são submetidos a calor e pressão, o que resulta num painel com densidades distintas no interior e exterior, tornando-o mais denso na parte externa, [23], conforme ilustrado na Figura 13.

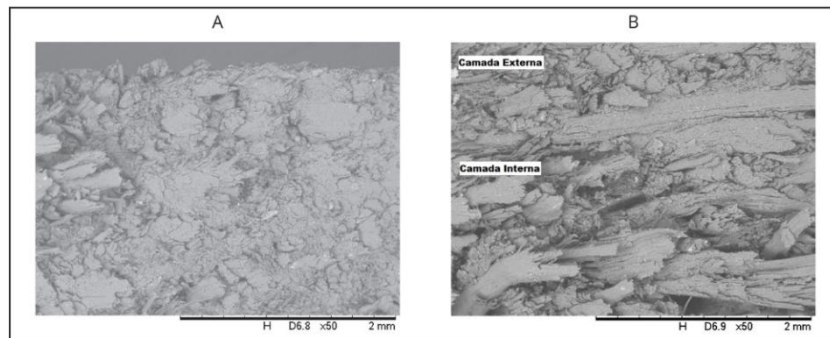


Figura 13. Representação da diferença de densidade no MDF: A) camada externa. B) região de transição entre camadas, [24].

No final os painéis são arrefecidos normalmente à temperatura ambiente cortadas e depois armazenadas, [23]. A Figura 14 apresenta a sequência do processo de fabricação do MDF, [25].



Figura 14. Processo de produção industrial do MDF, [25].

### 2.6.1.2. MDF RESISTENTE AO FOGO

O MDF retardante de chama (FR-MDF) é uma categoria específica de MDF desenvolvida para reduzir a propagação do fogo e melhorar a segurança em caso de incêndio.

Este material é amplamente utilizado em edifícios públicos e outras infraestruturas onde é necessário cumprir rigorosas normas de segurança contra incêndios. Para melhorar o seu

desempenho ao fogo, são incorporados aditivos retardadores de chama, como fosfatos, boratos e sulfatos, em concentrações de 15-20% (base seca). Estes compostos são aplicados diretamente nas fibras durante o processo de sopro do refinador, antes da resinagem. Normalmente, são formulados em soluções aquosas, com um teor de sólidos compreendido entre 40% e 60%, [21].

Entre os retardadores de fogo mais comuns na indústria de MDF destacam-se o fosfato monoamônico, o fosfato diamônico, o ácido bórico e o bórax. No entanto, futuras alterações nos regulamentos europeus poderão restringir ou proibir o uso do ácido bórico em aplicações na madeira. Em geral, os retardadores de chama utilizados são compostos não corrosivos e isentos de halogéneos, uma vez que substâncias à base de bromo e cloro foram proibidas na Europa pela diretiva REACH. Atualmente, a produção de MDF resistente ao fogo na Europa utiliza exclusivamente colas do tipo MUF (melamina-ureia-formaldeído), com um teor de melamina entre 15% e 18% e rácios molares de 1,20 a 1,25.

Na Europa, o teste do item de combustão único (SBI) é o método normalizado harmonizado para avaliar a reação ao fogo de painéis de MDF e aglomerado de partículas tratados com retardadores de chama, conforme a norma EN 13823:2002. Atualmente, todos os produtos de construção comercializados no mercado europeu são classificados segundo este ensaio, que avalia o comportamento ao fogo de materiais de construção (exceto pavimentos) quando expostos a uma fonte térmica específica, como um queimador de caixa de areia alimentado a propano, de acordo com a norma EN 13501-1, [21].

### **2.6.2. AGLOMERADO DE PARTÍCULAS LONGAS E ORIENTADAS (OSB)**

O painel OSB (Oriented Strand Board) surgiu nos Estados Unidos no ano de 1960 como uma alternativa mais barata e eficiente ao compensado convencional. Conforme a procura foi crescendo, a partir dos anos de 1996 e 1997 surgiram indústrias de painéis OSB na Europa, Ásia e China. Uma das principais vantagens do OSB é sua alta resistência mecânica e estabilidade dimensional, que o torna um material muito versátil e adequado para diversas aplicações estruturais. Além disso, o OSB é um material sustentável, pois utiliza madeira de reflorestamento e resinas sintéticas que não agredem o meio ambiente, [26].

O OSB é um painel estrutural composto por fibras de madeira em formato retangular, unidas por resinas sintéticas e emulsões de parafina. As fibras são dispostas de forma perpendicular à superfície do painel e consolidadas por meio de prensagem a quente, conferindo-lhe resistência e estabilidade.

O processo de fabrico dos painéis de fibras longas e orientadas ocorre em cinco etapas principais. Inicialmente, a madeira bruta é descascada e cortada no sentido das fibras. Posteriormente, passa por um processo de secagem e recebe a aplicação de resinas resistentes à humidade, bem como emulsão de parafina. A disposição das fibras segue um padrão de camadas cruzadas, o que melhora a estabilidade dimensional e as propriedades mecânicas do material. Essas camadas podem ser organizadas perpendicularmente à camada externa ou de forma aleatória, [27] conforme ilustrado na Figura 15. Apesar de não ter sido incluído nos ensaios experimentais, o OSB é frequentemente utilizado em sistemas Light Wood Frame, pelo que é apresentado aqui como referência comparativa.

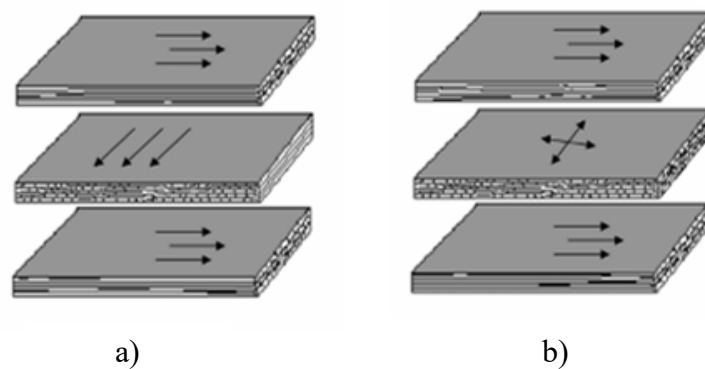


Figura 15. Disposição das camadas do painel OSB: a) Orientação perpendicular à camada interna, b) Orientação aleatória da camada interna, [27].

#### 2.6.2.1. PROCESSO DE FABRICO DOS PAINÉIS DE OSB

São várias as etapas pelas quais os painéis de fibras longas e orientadas passam durante o processo produtivo. Primeiramente, toda a madeira bruta é descascada e cortada ao longo das suas fibras de acordo com as suas especificações, seguidamente passando por um processo de secagem e aplicação de resinas como pode ser o fenol-formaldeído (PF) ou isocianato (MDI-dissocianato de difenilmetano) e emulsão de parafina. Depois, é feita a formação do colchão, que passa por um processo de orientação das partículas, tanto na camada externa como na interna. Esses fatores são importantes para a estabilidade dimensional e a resistência à flexão do painel. De seguida, realiza-se a prensagem a altas temperaturas e pressões. Após a prensagem, os painéis são cortados conforme as dimensões desejadas, [26].

Os painéis de aglomerado de partículas longas e orientadas (OSB) apresentam excelentes propriedades mecânicas, sendo ideais para a construção, onde podem ser utilizados em estruturas, paredes, pisos e componentes de vigas, entre outras aplicações. Além disso,

oferecem uma vantagem significativa em relação à madeira maciça, uma vez que permitem um elevado aproveitamento dos toros, reduzindo o desperdício. No entanto, a sua principal limitação está na baixa estabilidade dimensional. Quando exposto à humidade, o OSB tende a apresentar maior inchamento em espessura e expansão linear. Para mitigar esse fenómeno, diversas pesquisas têm sido desenvolvidas, abordando soluções como a modificação química, o preenchimento e o tratamento térmico, [28].

A norma EN 300 (2002), [29] fornece especificações detalhadas sobre a fabricação e classificação dos painéis de OSB, que são compostos por tiras de madeira de comprimento superior a 50 mm e espessura inferior a 2 mm, unidas por adesivos. Estes painéis são categorizados em quatro tipos, com base na sua aplicação e desempenho em diferentes condições ambientais:

- OSB1: Utilizado para fins gerais em interiores, como na fabricação de mobiliário, sendo adequado para ambientes secos,
- OSB2: Painéis estruturais, adequados para uso em ambientes secos, mas com exigências específicas de resistência estrutural,
- OSB3: Painéis estruturais projetados para suportar condições de ambiente húmido, sendo indicados para áreas com maior exposição à humidade,
- OSB4: Usado em estruturas com elevada capacidade de carga, sendo especificado para ambientes húmidos e condições rigorosas de carga e durabilidade.

Essas categorias são importantes para determinar a aplicabilidade dos diferentes tipos de OSB em sistemas de construção, especialmente no contexto de sistemas Light Wood Frame.

No Eurocódigo 5 (EN 1995), as condições de serviço para a utilização da madeira são definidas com base em três classes de serviço, que correspondem a diferentes níveis de exposição à humidade e temperatura, [30].

- Classe de serviço 1: Refere-se a condições ambientais secas, onde a temperatura ambiente é de 20°C e a humidade relativa não excede os 65%, exceto durante algumas semanas ao longo do ano. Este ambiente ocorre tipicamente em interiores secos, como salas de estar, escritórios e outros espaços residenciais ou comerciais controlados, onde há pouca variação de humidade.
- Classe de serviço 2: Caracteriza-se por condições ambientais moderadas, também com temperatura de 20°C, mas onde a humidade relativa pode superar os 85% durante algumas semanas do ano. É comum em interiores como cozinhas, casas

de banho e outras áreas sujeitas a flutuações sazonais de humidade, devido à presença de fontes de água ou ventilação limitada.

- Classe de serviço 3: Corresponde a condições muito húmidas, onde a humidade relativa permanece acima dos 85% durante grande parte do ano. Este ambiente é típico de áreas exteriores, instalações industriais ou estruturas expostas diretamente à chuva, como telhados e fachadas. Nestas condições, a madeira requer proteção adicional contra a humidade constante e as condições climáticas severas.

#### **2.6.2.2. AGLOMERADO DE PARTÍCULAS RESISTENTE AO FOGO**

O aglomerado de partículas resistente ao fogo é uma versão do aglomerado convencional, projetada para reduzir a propagação de chamas e atender aos requisitos de segurança contra incêndios em edifícios públicos. Embora o volume de produção desta variante represente uma pequena percentagem do mercado total (cerca de 1-2%), tem-se observado uma tendência crescente no desenvolvimento e na adoção deste material, especialmente em projetos onde a resistência ao fogo é um fator crucial.

Os painéis de aglomerado de partículas resistente ao fogo são fabricados utilizando adesivos MUF (melamina-ureia-formaldeído), com uma concentração de melamina entre 13% a 20%. A escolha deste tipo de adesivo é fundamental, pois a melamina confere propriedades ignífugas ao material, retardando a propagação das chamas. O rácio de formaldeído (UF) destes adesivos é tipicamente entre 1,25 e 1,30, o que resulta em painéis classificados na classe E1 em relação ao formaldeído, atendendo aos regulamentos ambientais e de saúde. Além disso, a proporção de cola utilizada na produção destes painéis é entre 14% e 16%, o que permite uma combinação eficaz de propriedades mecânicas e resistência ao fogo, [21].

### **2.7. SISTEMAS DE ISOLAMENTO**

#### **2.7.1. LÃ DE ROCHA**

A lã de rocha é um material de isolamento feito de minerais naturais, como basalto ou diabásio e é conhecida como lã mineral. Obtêm-se fibras finas fundindo os minerais a uma

temperatura muito alta, normalmente em torno de 1500°C e em seguida girar ou soprar o material derretido. Essas fibras são então unidas usando um aglutinante ou por meio de entrelaçamento mecânico. O isolamento de lã de rocha é conhecido por suas propriedades térmicas e acústicas de alta qualidade. É frequentemente utilizado em sistemas construtivos LWF para garantir isolamento e otimizar a eficiência energética de edifícios. Usado como enchimento entre os montantes de madeira e os painéis de OSB/MDF, funcionando como barreira térmica, acústica e adicionalmente como elemento de proteção ao fogo, retardando a ignição da madeira e aumentando a segurança global do sistema.

É um material versátil que pode ser encontrado em diversas formas, como mantas, preenchimento solto e placas rígidas, e aplicado em paredes, telhados e pisos para melhorar o isolamento acústico e reduzir a transferência de calor. O isolamento de lã de rocha é resistente ao fogo, o que é uma vantagem, pois não libera vapores tóxicos nem derrete em temperaturas elevadas, graças ao seu alto ponto de fusão. A lã de rocha apresenta excelente comportamento ao fogo, sendo classificada como incombustível (classe A1 segundo a norma europeia EN 13501-1), [76].

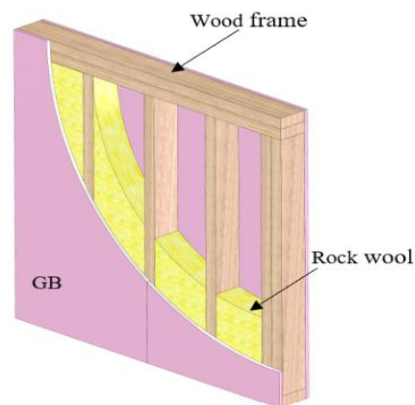


Figura 16. Esquema de parede LWF com isolamento lã de rocha, [71].

### 2.7.2. GESSO (PLACA DE GESSO-GB)

A segurança contra incêndios é uma consideração crítica no projeto de edifícios modernos, exigindo o desenvolvimento de materiais que não só inibam a propagação do fogo, mas também protejam os ocupantes e mantenham a integridade estrutural durante incidentes de incêndio. Um dos métodos mais comuns de proteção contra incêndios para elementos de madeira é a aplicação de um GB (placa de gesso), que atua como uma barreira térmica através

de uma reação endotérmica durante a desidratação, que retarda a penetração do calor e reduz a taxa a que os elementos de madeira atingem temperaturas críticas, [69].

São materiais de revestimento mais utilizado em conjuntos de estruturas LWF devido às suas propriedades térmicas adequadas, isolamento acústico, relação custo-benefício e apelo estético. Desempenha um papel fundamental na melhoria da resistência ao fogo, uma vez que compartimenta as cavidades, atrasa o início da carbonização em montantes ou vigas e previne a rápida propagação do fogo no interior dos conjuntos, [70].

### 2.7.2.1. APLICAÇÃO EM SISTEMAS LWF

Os conjuntos leves com estrutura de madeira consistem em montantes ou vigas de madeira, geralmente separados por 400-600 mm, com revestimento de diferentes painéis, como painéis de madeira, painéis compósitos ou placas de gesso de cada lado. O canal de resiliência (CR), que fixa os GB (placa de gesso) aos montantes/vigas, é utilizado para reduzir a transmissão sonora nas paredes e tetos. As cavidades entre montantes podem ser vazias ou preenchidas com materiais isolantes, como fibra de vidro, lã de rocha ou fibra de celulose, melhorando o desempenho térmico e acústico. Uma parede LWF típico, composto por vigas de madeira, isolamento de cavidades, canais resilientes e camada de GB, é apresentado na Figura 17.



Figura 17. Os componentes de uma parede com estrutura de madeira GB, [88].

### 2.7.2.2. RESISTÊNCIA AO FOGO DA PLACA DE GESSO-GB

As propriedades de resistência ao fogo do GB (placa de gesso) são atribuídas aos seus cristais de gesso, que contêm moléculas de água livres e cristalizadas que absorvem calor nas

fases iniciais de um incêndio, mostrando efetivamente o aumento da temperatura da parede. No entanto, à medida que os incêndios se intensificam, o GB perde umidade, encolhe e racha, levando ao desprendimento do painel e à redução do isolamento térmico, expondo os montantes internos a temperaturas extremas e correndo o risco de falha da parede, conforme ilustrado no Anexo (A30), [71].

Apesar da louvável resistência ao fogo da placa de gesso, as suas propriedades mecânicas não são ideais, sendo propensas a danos durante o processamento, transporte e montagem. Além disso, as juntas GB afetam negativamente a resistência ao fogo das paredes LWF. Ariyanayagam et al. observaram temperaturas mais elevadas nas juntas GB em paredes com estrutura de aço leve (LSF) sob altas temperaturas, destacando os efeitos prejudiciais das juntas, [72].

Sultan et al. descobriu que a eliminação das juntas GB aumentou a resistência ao fogo das paredes de 25 para 40 minutos, [73]. Piloto et al. investigaram o efeito de diferentes sistemas de carga e revestimentos na resistência ao fogo de paredes LWF, revelando que as paredes com estrutura de madeira de camada dupla apresentavam maior resistência ao fogo do que as de camada única e que os níveis de carga influenciavam significativamente a resistência ao fogo, com uma redução de 46% na capacidade de carga quando apenas uma camada de GB era utilizada, [74]. Piloto et al. também analisaram os efeitos da profundidade e do espaçamento dos montantes na resistência ao fogo de paredes LWF revestidas com GB, constatando um impacto mínimo na resistência ao fogo com o aumento do espaçamento dos montantes e uma correlação positiva entre a espessura da secção transversal dos montantes e o desempenho da resistência ao fogo, [75].

## **2.8. EUROCÓDIGO 5 - PARTE 1-2**

O Eurocódigo 5 constitui o principal referencial normativo europeu para o dimensionamento e verificação de estruturas de madeira, contemplando igualmente a avaliação do seu comportamento em situação acidental de incêndio. A EN 1995-1-2 estabelece os princípios aplicáveis ao projeto estrutural em situação de fogo, complementando as regras gerais de dimensionamento e articulando-se com as normas europeias relativas às ações térmicas e aos ensaios de resistência ao fogo, [77].

No enquadramento da resistência ao fogo, a verificação do desempenho dos elementos construtivos é expressa através das funções R (capacidade resistente), E (integridade) e I

(isolamento térmico), definidas no sistema europeu de classificação, sendo a EN 1995-1-2 especificamente orientada para a verificação da função R, articulando-se com as normas de ensaio e classificação para a avaliação dos critérios E e I, [79].

O critério de isolamento térmico é definido, de acordo com as normas europeias de ensaio de resistência ao fogo, por limites máximos admissíveis para o aumento da temperatura no lado não exposto ao fogo, incluindo valores médios e pontuais. Estes limites permitem avaliar a eficácia do sistema construtivo em atrasar a propagação térmica, sendo amplamente utilizados na classificação do desempenho ao fogo de elementos separadores ensaiados em forno, [79].

Embora o Eurocódigo 5 tenha sido originalmente desenvolvido com base no comportamento de elementos maciços de madeira (viga de madeira serrada), a EN 1995-1-2 contempla igualmente a aplicação a produtos derivados de madeira e sistemas multicamada. Nestes sistemas, o desempenho ao fogo resulta da interação entre diferentes materiais, como painéis de revestimento, montantes de madeira e materiais isolantes, não podendo ser descrito apenas através das taxas de carbonização da madeira maciça, [77].

No caso de sistemas multicamada com cavidade isolada, como o painel analisado nesta dissertação, constituído por painéis derivados de madeira, montantes de pinho e isolamento em lã de rocha, o critério de isolamento térmico é fortemente influenciado pelas propriedades térmicas dos materiais constituintes, pela espessura das camadas e pela continuidade do isolamento. A presença de isolamento mineral contribui para a redução da transferência de calor, retardando o aumento de temperatura no lado não exposto ao fogo e prolongando o tempo de cumprimento do critério I, [77].

A EN 1995-1-2 admite que, para sistemas construtivos não padronizados ou de configuração complexa, a avaliação do desempenho ao fogo possa ser realizada através de ensaios experimentais ou métodos avançados de cálculo, desde que adequadamente validados. Esta abordagem é particularmente adequada quando o objetivo principal é a análise do isolamento térmico, uma vez que este depende diretamente da evolução da temperatura no interior do sistema e no lado não exposto ao fogo, [77].

Relativamente à ação térmica, a norma remete para a utilização de curvas nominais de incêndio, sendo a curva padrão ISO 834 a mais utilizada em ensaios laboratoriais. A aplicação desta curva permite comparar os resultados experimentais com os critérios normativos, constituindo a base para a avaliação do desempenho térmico e do cumprimento do critério de isolamento dos painéis multicamada ensaiados no presente trabalho, [83].

# Capítulo 3: Comportamento ao Fogo

---

## 3.1. REAÇÃO AO FOGO DA MADEIRA E DERIVADOS

Sendo um material de ampla aplicação, a utilização da madeira no setor da construção levanta algumas preocupações, especialmente no que diz respeito ao cumprimento dos requisitos de segurança contra incêndios, [54]. A madeira é, por natureza, um material combustível, devido à presença de elementos como o carbono, oxigénio e hidrogénio, fornecidos essencialmente pela celulose e pela lenhina. O processo de aquecimento da madeira inicia-se de forma endotérmica, consumindo energia para evaporar a humidade presente no seu interior.

Quando a temperatura da superfície atinge aproximadamente os 300°C, inicia-se a pirólise, e a combustão passa a ser um processo químico de reação rápida e exotérmica, com libertação visível de gases inflamáveis e calor. A densidade da madeira é um fator determinante no seu comportamento ao fogo: madeiras com maior densidade apresentam, geralmente menor facilidade e velocidade de combustão. O teor de humidade também influencia este comportamento, contribuindo para o atraso na ignição. Assim, a utilização de materiais com baixa inflamabilidade em sistemas construtivos, permite reduzir significativamente a velocidade de propagação das chamas, bem como limitar a sua contribuição para o desenvolvimento do incêndio. Caso estejam presentes materiais altamente inflamáveis, o sinistro tende a intensificar-se e a propagar-se rapidamente, [55]. O ciclo de vida da combustão depende da quantidade de calor libertado durante a combustão, quando a quantidade de calor liberado atinge um certo nível, mais combustíveis são produzidos, [56]. O ciclo é representado na Figura 18.

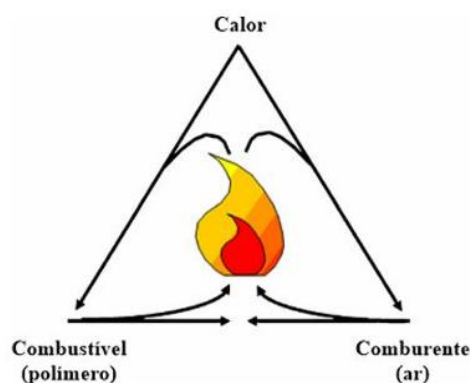


Figura 18. Ciclo de vida de combustão, [56].

### 3.2. CURVA DE INCÊNDIO NATURAL

A curva de incêndio natural representa a evolução típica do fogo durante um cenário real de incêndio. Um incêndio caracteriza-se por ser uma combustão descontrolada no espaço e no tempo, exigindo, para a sua propagação, a presença simultânea de material combustível, uma fonte de ignição e oxigênio, [11].

O comportamento natural de um incêndio é composto essencialmente por quatro fases distintas denominadas ignição, fase inicial, fase de plena combustão e fase de arrefecimento.

A Figura 19 representa o desenvolvimento da curva natural de incêndio e suas fases.

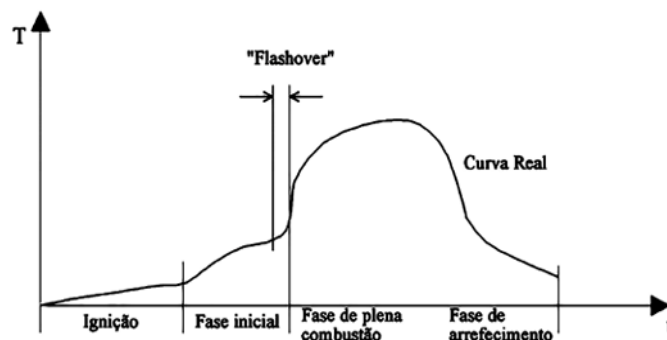


Figura 19. Fases de um incêndio natural, [65].

A fase inicial do processo corresponde à ignição do material. O elemento vai aquecendo progressivamente consoante a quantidade de calor que recebe no início da ignição, até atingir um nível de radiação suficiente para inflamar rapidamente, culminando no ponto mais crítico do incêndio, conhecido como flashover ou inflamação generalizada. Esta fase é particularmente relevante, pois a sua identificação permite adotar medidas preventivas eficazes contra a propagação do incêndio, [59].

Os fatores que controlam a ignição dos materiais são as condições atmosféricas do ambiente, a fonte de ignição, os fatores relacionados com as propriedades dos materiais e o seu desempenho quando exposto a altas temperaturas (inflamabilidade, liberação de calor, propagação das chamas e fumaças), [66].

A terceira fase caracteriza-se por uma elevação acentuada da temperatura e por uma propagação mais intensa do incêndio. Nesta etapa, regista-se uma produção significativa de chamas, atingindo-se a temperatura máxima devido à elevada disponibilidade de oxigênio no ar, que alimenta a combustão, bem como à libertação e ascensão de vapores quentes. O combate

ao incêndio nesta fase torna-se mais complexo, uma vez que a quantidade de energia térmica libertada é elevada, tornando as tentativas de extinção menos eficazes, [11].

A quarta fase de um incêndio corresponde ao seu declínio ou extinção, resultante da combustão completa dos materiais combustíveis e da ausência de fornecimento contínuo de energia térmica ao ambiente. Consequentemente, a temperatura reduz-se, interrompendo-se a cadeia de elementos indispensáveis à manutenção do fogo (calor, combustível, comburente e reação) conhecidos como o tetraedro do fogo. Nesta fase, a resistência dos materiais ao fogo revela-se fundamental para garantir a sua estabilidade durante um determinado período, [59].

### 3.3. CURVA DE INCÊNDIO PADRÃO

Em 1961, a Organization for International Standards (ISO), designou um Comitê para elaborar um conjunto de especificações que regulamentassem os ensaios de resistência ao fogo de materiais celulósicos. Esses estudos resultaram na criação da ISO 834, que foi o primeiro projeto de normatização com o objetivo de desenvolver uma curva temperatura-tempo, resultante da uniformização da curva americana ASTM E119 (1918) e da curva britânica BS 476 (1932), [82].

As normas utilizadas para a elaboração da ISO 834 foram criadas muito anteriormente, e descrevem a situação de incêndio para materiais celulósicos, em 1975 foi publicada a primeira versão da norma técnica ISO 834, [83]. Nesta é apresentada a equação da evolução de temperatura da curva de incêndio padrão, segundo a equação (1).

$$\theta_g = 20 + 345 * \log(8 * t + 1) \quad (1)$$

em que:

$\theta_g$  é a temperatura dos gases quentes (atmosfera) do compartimento em chamas [°C];

$t$  é tempo [min];

Usualmente, admite-se que a temperatura ambiente do compartimento no instante  $t = 0$ , na aproximação da ignição, é de 20°C.

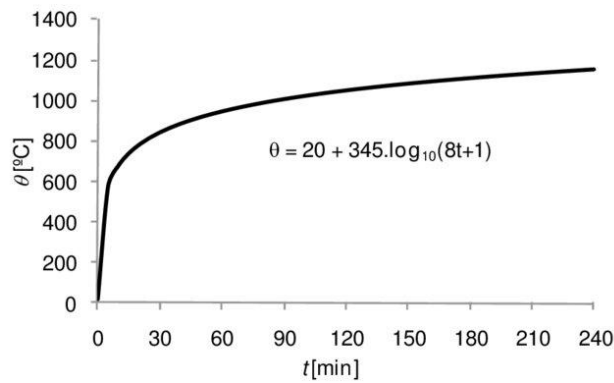


Figura 20. Curva temperatura-tempo conforme a ISO 834, [82].

### 3.4. COMPORTAMENTO TÉRMICO DA MADEIRA

A madeira apresenta uma baixa condutividade térmica, o que dificulta a elevação da temperatura nas zonas adjacentes às que estão em combustão, contribuindo também para evitar uma dilatação excessiva da estrutura. A combustão do material superficial produz uma camada de carbonização isolante que dificulta a transmissão do calor e a progressão do fogo para o interior.

Sob a camada de carbonização forma-se uma outra camada de espessura inferior, na qual a madeira já sofreu alterações, mas ainda não se encontra totalmente decomposta. Esta zona é designada por camada de pirólise. A restante secção da madeira permanece a uma temperatura mais baixa e mantém as suas propriedades originais, contribuindo assim para a resistência da estrutura, [66]. Na Figura 21 encontram-se as várias secções de madeira sujeitas a altas temperaturas.

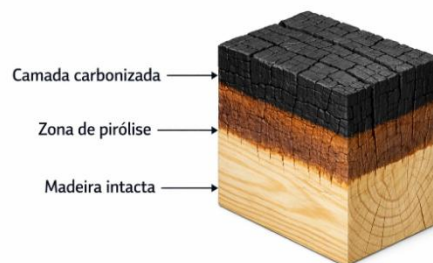


Figura 21. Zonas de degradação numa secção de madeira, [66].

O comportamento térmico da madeira pode ser descrito através dos processos de formação da zona da pirólise e pela formação da camada de carbonização.

### 3.4.1. PIRÓLISE

A degradação da madeira ocorre na ausência de oxigénio. Quando a madeira é aquecida até aos 100°C, ocorrem poucas reações químicas. Aproximadamente aos 100°C ocorre a evaporação da maior parte da humidade existente. Até aos 200°C, a camada superficial da madeira começa a ficar desidratada, libertando a restante humidade, calor e dióxido de carbono.

Entre os 200°C e os 280°C, a camada superficial deteriorada começa a deslocar-se para o interior da secção. A esta zona sucede-se uma camada na qual a pirólise se processa lentamente. A celulose da madeira começa a decompor-se no intervalo entre os 240°C e os 380°C. Entre os 280°C e os 500°C ocorrem reações exotérmicas, sob a forma de fumo, com a libertação de gases combustíveis e alcatrão, formando o carvão. Se a temperatura exceder os 500°C, pode dizer-se que a carbonização se encontra completa, [67].

### 3.4.2. ESPESSURA DE CARBONIZAÇÃO

A espessura da camada de carbonização corresponde à distância entre a superfície exterior do elemento original exposta ao fogo e a posição da linha de carbonização, conforme ilustrado na Figura 22. Devem ser consideradas todas as superfícies diretamente expostas às chamas e quando aplicável, também aquelas inicialmente protegidas mas onde a carbonização da madeira ocorre por detrás da proteção ao longo do tempo de exposição ao fogo.

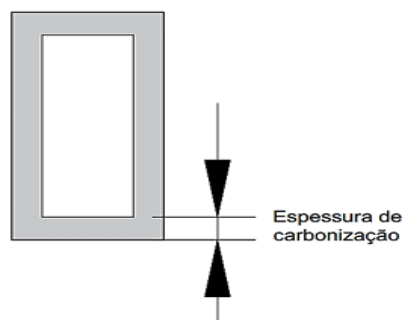


Figura 22. Espessura de carbonização, [50].

A taxa de carbonização da madeira, que representa a velocidade com que a madeira intacta se transforma em carvão, é uma propriedade fundamental para avaliar a sua resistência ao fogo. Esta taxa pode ser determinada com base em modelos experimentais e teóricos, sendo expressa em termos do avanço da carbonização [mm/min]. À medida que a carbonização

progride, ocorre uma redução da secção transversal do elemento, o que permite analisar o comportamento estrutural da madeira em situação de incêndio.

Existem alguns modelos analíticos para o cálculo da espessura da camada carbonizada da madeira, conforme proposto pelo Eurocódigo 5 1-2, [68]. A equação (2) de projeto permite determinar a espessura da camada carbonizada em função da taxa de carbonização para superfícies não protegidas, expostas ao fogo normalizado numa direção.

$$d_{char,0} = \beta_0 t \quad (2)$$

em que:

$d_{char,0}$  - Espessura da camada de carbonização numa direção [mm]

$\beta_0$  - Taxa de carbonização na direção do fogo [mm/min]

$t$  - Tempo de exposição ao fogo [min]

Quando o fogo deflagra em mais do que uma direção, os efeitos dos cantos arredondados na secção reta devem ser incluídos, Figura 23. Nesse caso, o Eurocódigo 5 1-2, [68], propõe a utilização da equação (3).

$$d_{char,n} = \beta_n t \quad (3)$$

em que:

$d_{char,n}$  - Espessura da camada de carbonização que incorpora o feito do canto da secção [mm]

$\beta_n$  - Taxa de carbonização nas diferentes direções do fogo [mm/min]

$t$  - Tempo de exposição ao fogo [min]

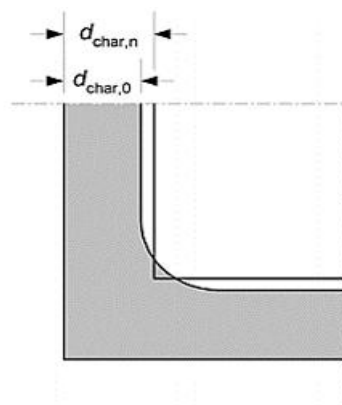


Figura 23. Espessura de carbonização numa direção e em várias direções, [68].

O Eurocódigo 5 1-2, [68] propõe ainda que os valores a considerar para a taxa de carbonização são função da massa específica da madeira, conforme apresentado no Anexo (Tabela A9).

### 3.5. PROPRIEDADES DE REAÇÃO AO FOGO

Algumas características do comportamento ao fogo são particularmente relevantes para o estudo da reação dos materiais ao fogo, nomeadamente: tempo de ignição (TI), taxa de libertação de calor (HRR), perda de massa, tempo de extinção da chama, índice de oxigénio limitante (LOI), poder calorífico, densidade e toxicidade dos fumos, bem como a propagação da chama na superfície. As propriedades mais significativas são descritas nas secções seguintes, [61].

#### 3.5.1. TEMPO DE IGNIÇÃO (TI)

A ignição é uma propriedade fundamental no estudo da reação ao fogo, pois permite determinar o momento de início da combustão dos materiais. As resinas orgânicas, frequentemente utilizadas em compósitos, podem inflamar num curto intervalo de tempo após a exposição ao fogo. Em geral, a ignição ocorre quando a superfície de uma amostra exposta ao calor atinge a temperatura de decomposição endotérmica, associada à temperatura de ignição.

O tempo de ignição é geralmente determinado de forma experimental, devido à dificuldade em modelar os mecanismos de ignição dos diferentes constituintes dos materiais. Tal complexidade deve-se às reações de decomposição das matrizes de resinas e das fibras combustíveis, que além de se degradarem quimicamente e carbonizarem, libertam gases voláteis e fumos, podendo ainda originar fendas e fenómenos de laminação.

No entanto, diversos modelos têm sido propostos para compreender o processo de ignição em determinados materiais poliméricos. Lyon et al. relatam que a ignição ocorre quando existe energia térmica suficiente na superfície do material para iniciar a sua decomposição térmica, promovendo a transição de um combustível no estado sólido para o estado gasoso. Este fenómeno é descrito em função do calor de gaseificação por unidade de massa  $h_g$ , da temperatura ambiente  $T_0$  e da capacidade calorífica do material a essa temperatura  $c_0$ , conforme representado na equação (4), [62].

$$T_{ign} = \sqrt{\left[ \frac{T_0 h_g}{c_0} \right]} \quad (4)$$

em que:

$T_{ign}$  - Tempo de ignição [s]

$T_0$  - Temperatura inicial [K]

$h_g$  - Fluxo de calor incidente [ $\text{kW}/\text{m}^2$ ]

$c_0$  - Constante do material [ $\text{kJ}/\text{m}^2\text{K}$ ]

### 3.5.2. TAXA DE LIBERTAÇÃO DE CALOR (HRR)

A taxa de libertação de calor é a propriedade de reação ao fogo mais importante, uma vez que o calor libertado por um material em combustão pode fornecer a energia térmica adicional necessária para o crescimento e propagação de um incêndio. Esta taxa corresponde à quantidade de energia térmica produzida por unidade de área da superfície, quando os produtos de decomposição inflamáveis se inflamam e entram em combustão. O valor de pico da taxa de libertação de calor (PHRR - Peak Heat Release Rate) ocorre num curto intervalo de tempo, muitas vezes logo após a ignição, sendo um indicador relevante da inflamabilidade máxima de um material.

Diferentes tipos de comportamento típico de queima dão origem a curvas características de HRR em função do tempo, alguns dos quais estão ilustrados na Figura 24. Em (a), observa-se um aumento inicial da HRR até que se forme uma camada carbonizada na superfície da amostra, à medida que essa camada se torna mais espessa, a taxa de libertação de calor diminui. Em (b), é representado o comportamento de um material não carbonizado com espessura intermédia, apresentando um valor de PHRR superior ao de materiais não carbonizados de maior espessura, situando-se entre o comportamento típico de materiais com elevada e baixa capacitância térmica. Em (c), observa-se o comportamento típico de materiais que sofrem carbonização, como a madeira e seus derivados, com um primeiro pico de HRR antes da formação da camada carbonizada e um segundo pico subsequente, à medida que a temperatura penetra em profundidade na amostra, libertando compostos orgânicos voláteis adicionais.

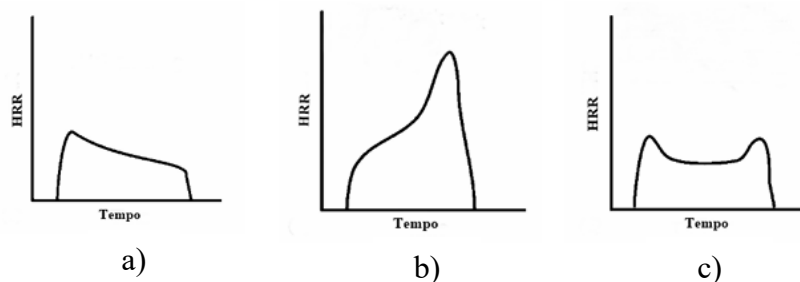


Figura 24. Curvas de HRR típicas para diferentes comportamentos, [63].

### 3.5.3. CLASSIFICAÇÃO DE REAÇÃO AO FOGO

A reação ao fogo de produtos de construção é uma característica essencial para a segurança de sistemas construtivos LWF. Este conceito refere-se ao comportamento do material quando exposto a chamas, incluindo inflamabilidade, geração de calor, produção de fumaça e eventual desprendimento de partículas em combustão.

Ao contrário da resistência ao fogo, que avalia a capacidade de um elemento construtivo manter integridade estrutural e isolamento térmico durante o incêndio, a reação ao fogo é uma propriedade intrínseca do material. A classificação de reação ao fogo segue a norma EN 13501-1, que categoriza os materiais em classes de A1, A2, B, C, D, E e F, sendo F a pior classificação. A classificação geral dos produtos em relação à reação ao fogo encontra-se apresentada no Anexo (Tabela A10).

Nesta classificação:

- Classe A1: materiais considerados não combustíveis, sem qualquer contribuição para o desenvolvimento do fogo.
- Classe A2: materiais praticamente não combustíveis, cuja contribuição para o fogo é mínima ou desprezível.
- Classe B: materiais combustíveis, mas com contribuição muito limitada para o fogo.
- Classe C: materiais combustíveis cuja contribuição para o fogo é moderada.
- Classe D: materiais combustíveis que contribuem de forma significativa para a propagação do fogo.
- Classe E: materiais combustíveis com importante participação no desenvolvimento do fogo.
- Classe F: materiais combustíveis que não se enquadram nas classes anteriores (A1-E).

Para além da classificação quanto à inflamabilidade, os materiais são avaliados em relação à produção de fumo e de gotículas incandescentes, parâmetros que influenciam diretamente o risco em caso de incêndio. Assim, a classificação s1 indica que o material contribui pouco ou praticamente nada para a geração de fumo, enquanto a classificação d0 significa que o material não produz partículas ou gotículas flamejantes quando exposto a fogo, [78].

### 3.6. PROPRIEDADES TÉRMICAS

As propriedades térmicas da madeira variam significativamente com a temperatura e são fundamentais para modelar a transferência de calor durante um incêndio. A norma EN 1995-1-2 recomenda o uso de propriedades efetivas de condutividade, calor específico e densidade, as quais incluem os efeitos da migração de umidade e fissuração.

Com a nova proposta da norma EN 1995-1-2, [77], foram adicionados também valores de variação das propriedades térmicas de derivados de madeira e isolantes, sendo eles membros de madeira ou painéis de madeira maciça, OSB, painéis de compensado e aglomerado, assim como de fibras, lã mineral e placa de gesso.

Os valores das propriedades térmicas em função da temperatura para a madeira, painéis derivados de madeira e lã mineral, de acordo com a proposta do novo Eurocódigo 5, encontram-se apresentados no Anexo (Tabela A1-A3), sendo os respectivos gráficos igualmente disponibilizados no Anexo.

### 3.7. PROPRIEDADES MECÂNICAS

O aumento da temperatura provoca uma degradação progressiva das propriedades mecânicas da madeira. A norma EN 1995-1-2 define fatores de redução aplicáveis à resistência, à compressão, tração, corte e ao módulo de elasticidade, que devem ser utilizados no dimensionamento em situação de incêndio, [77] sendo a respectiva tabela apresentado no Anexo (Tabela A4).

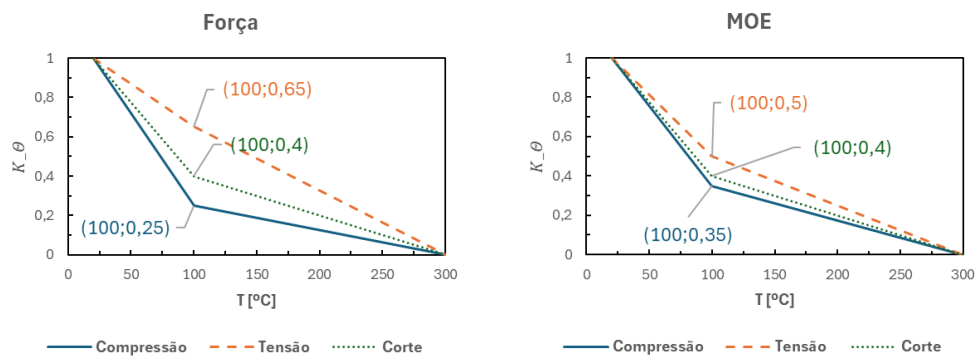


Figura 25. Fator de redução dependente da temperatura  $K_{\theta}$  para resistência e rigidez paralelas ao grão, [77].

#### 3.7.1. PERDA DE MASSA

A perda de massa é outra característica importante no estudo da reação ao fogo, fornecendo uma medida quantitativa da quantidade de material que se decompõe durante a exposição ao fogo ou a uma fonte térmica. Assim, é possível determinar a taxa de decomposição dos compostos orgânicos de um material ao longo do desenvolvimento de um incêndio, [62].

A Figura 26 apresenta curvas características de perda de massa para painéis de MDF com diferentes tipos e proporções de resinas ignífugas. Observa-se que, inicialmente, não ocorre perda de massa significativa até cerca de 200°C. A partir desse ponto, registra-se um aumento acentuado da perda de massa ao longo do tempo, como resultado da decomposição térmica da matriz polimérica. Por volta dos 600°C, verifica-se uma alteração na taxa de perda de massa, uma vez que a maior parte do material já se degradou, estabilizando-se num valor praticamente constante devido à completa degradação da matriz, [64].

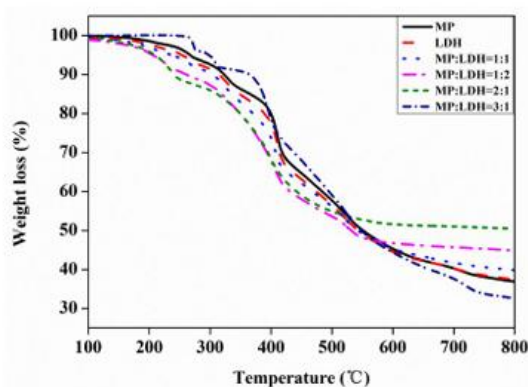


Figura 26. Taxa de perda de massa nos painéis de MDF, [64].

### 3.7.2. PRODUÇÃO DE FUMO E TOXICIDADE DA FUMAÇA

Uma das principais preocupações de segurança em compósitos poliméricos é a produção de fumo denso durante um incêndio causada pela combustão, por pequenos fragmentos de fibras e partículas de carbono ultrafinas (cinzas e fuligem). A exposição a curto prazo de pessoas exposta à fumaça não apresenta riscos sérios para a saúde, mas a densificação da fumaça faz com que reduza a visibilidade, causa desorientação e dificulta o combate ao fogo. Por esta razão de segurança, muitos materiais compostos foram caracterizados.

Apesar de a taxa de libertação de calor ser considerada o principal parâmetro na avaliação da reação ao fogo, os gases tóxicos gerados durante a combustão representam, muitas vezes, o maior risco à saúde humana. A inalação desses gases pode ser fatal, mesmo em

situações em que o fogo se encontra limitado. Por isso, a análise da composição dos gases emitidos durante a queima dos materiais é essencial para avaliar a sua perigosidade, [62].

### **3.8. CLASSIFICAÇÃO DE RESISTÊNCIA AO FOGO**

A avaliação da resistência ao fogo dos elementos de construção é realizada com base nos princípios estabelecidos na Norma Europeia EN 1363-1, [79]. Esta norma define os requisitos gerais aplicáveis aos ensaios de resistência ao fogo, especificando as condições de exposição térmica normalizada, os procedimentos de ensaio, a instrumentação a utilizar e os critérios de desempenho para a avaliação do comportamento dos elementos construtivos quando sujeitos à ação do incêndio. De acordo com a EN 1363-1, o objetivo dos ensaios de resistência ao fogo é determinar o tempo durante o qual um elemento de construção mantém as suas funções essenciais quando exposto a condições controladas de aquecimento e pressão, segundo uma curva normalizada de incêndio. A resistência ao fogo é expressa em função do tempo decorrido até à perda de desempenho face a critérios previamente definidos, [79].

A norma estabelece três critérios fundamentais de resistência ao fogo: capacidade resistente (R), integridade (E) e isolamento térmico (I). Estes critérios permitem avaliar, respetivamente, a aptidão de um elemento para manter a sua função estrutural, a sua capacidade de impedir a passagem de chamas e gases quentes, e a sua capacidade de limitar a transmissão de calor para a face não exposta, [79].

#### **3.8.1. CAPACIDADE RESISTENTE (R)**

O critério de capacidade resistente (R) aplica-se a elementos portantes, avaliando a sua capacidade para suportar o carregamento aplicado durante o ensaio sem colapso ou perda excessiva de rigidez. Segundo a EN 1363-1, a falha deste critério ocorre quando são ultrapassados limites normativos associados à deformação máxima admissível ou à taxa de deformação ou no caso de elementos verticais, quando se verificam contrações axiais superiores aos valores limite definidos, ou seja uma redução excessiva do comprimento do elemento estrutural ao longo do seu eixo, provocada pela perda de rigidez e resistência do material devido ao aumento de temperatura, indicando que o elemento já não consegue garantir a sua função resistente.

A avaliação do critério R implica a aplicação de uma carga mecânica representativa durante o ensaio e a monitorização contínua das deformações do elemento. No presente trabalho, este critério é enquadrado do ponto de vista normativo, contudo não constitui o parâmetro determinante de avaliação experimental, uma vez que o painel multicamada analisado não desempenha função estrutural portante nem é sujeito a carregamento mecânico durante os ensaios realizados, [79].

### **3.8.2. INTEGRIDADE (E)**

O critério de integridade (E) avalia a capacidade de um elemento separador manter a sua função de compartimentação, impedindo a passagem de chamas e gases quentes da face exposta ao fogo para a face não exposta. De acordo com a EN 1363-1, considera-se que o critério E deixa de ser satisfeito quando ocorre pelo menos uma das seguintes situações: ignição de um tampão de algodão aplicado na face não exposta, passagem de calibres normalizados através de aberturas formadas no elemento, ou ocorrência de chamas sustentadas na face não exposta durante um período superior a 10 segundos, [79].

Este critério está particularmente associado ao comportamento das juntas, fissuras e descontinuidades construtivas, bem como às interfaces entre diferentes materiais. No âmbito do presente estudo, o critério de integridade é abordado como enquadramento normativo do comportamento ao fogo do sistema multicamada, não constituindo, contudo, o critério dominante de avaliação experimental.

### **3.8.3. CRITÉRIO DE ISOLAMENTO (I)**

O critério de isolamento térmico (I) é um parâmetro essencial na avaliação da resistência ao fogo de elementos construtivos, representando a capacidade de uma parede, laje ou painel de limitar a temperatura na face não exposta ao fogo durante um incêndio. Este critério garante que a transmissão de calor através do elemento não atinja valores críticos que possam provocar a ignição de materiais adjacentes ou comprometer a segurança dos ocupantes.

Segundo as normas, o critério I é normalmente avaliado através de ensaios padronizados, que medem a temperatura média e máxima na face não exposta ao fogo. O tempo de resistência ao fogo corresponde ao intervalo, em minutos completos, durante o qual o

elemento mantém a sua função separadora sem ultrapassar os limites de temperatura definidos, [79].

De acordo com a norma EN 1363-1, o critério de isolamento térmico é atingido quando a face não exposta do elemento:

- não registar um aumento da temperatura média superior a 140°C em relação à temperatura inicial média, ou
- não apresentar, em qualquer ponto individual (incluindo o termopar móvel), um aumento de temperatura superior a 180°C em relação à temperatura inicial.

A temperatura inicial média corresponde à temperatura da face não exposta no início do ensaio. Determinados elementos construtivos podem, contudo, possuir limites específicos de aumento de temperatura, aplicáveis à totalidade ou a partes do elemento, conforme definido em normas de ensaio particulares. Quando o elemento incorpora zonas com diferentes características de isolamento térmico, estas devem ser avaliadas separadamente segundo os critérios de temperatura média e máxima estabelecidos, [79].

Nos sistemas Light Wood Frame, o cumprimento do critério de isolamento térmico (I) depende fortemente da composição e da disposição das camadas que constituem o elemento construtivo. Os painéis estruturais, como o OSB e o MDF, atuam como barreiras iniciais à transferência de calor, enquanto a estrutura em madeira de Pinho apresenta uma taxa previsível de carbonização, que retarda a propagação térmica para o interior do sistema. O isolamento em lã de rocha, material classificado como A1 segundo a EN 13501-2, [85], desempenha um papel fundamental ao reduzir o aumento de temperatura na face não exposta, prolongando o tempo necessário para que o elemento atinja os limites definidos pela norma. Assim, a correta seleção e combinação destes materiais permite que as paredes do sistema LWF alcancem classificações de resistência ao fogo adequadas, garantindo integridade, estabilidade estrutural e isolamento térmico eficaz durante o período de exposição ao fogo.

Os tempos de resistência ao fogo determinados com base no critério de isolamento térmico (I), definido na EN 1363-1, [79] podem ser posteriormente expressos sob a forma de classes normalizadas de resistência ao fogo, de acordo com a Norma Europeia EN 13501-2. Esta classificação permite traduzir os resultados dos ensaios de resistência ao fogo em patamares temporais normalizados, utilizados para efeitos de comparação e enquadramento regulamentar. As classes de resistência ao fogo associadas ao critério de isolamento térmico (I), segundo a EN 13501-2, encontram-se apresentadas no Anexo (Tabela A11), [85].

# Capítulo 4: Paredes Leves em Madeira

---

## 4.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo apresenta-se o painel multicamada desenvolvido para o estudo experimental e numérico do comportamento ao fogo de sistemas construtivos Light Wood Frame. O objetivo é descrever a composição, os materiais constituintes e a configuração estrutural do painel, concebido de forma a representar a constituição típica das paredes deste sistema.

Conforme descrito no Capítulo 2, as paredes do sistema LWF são formadas por uma estrutura leve em madeira, revestida por painéis derivados e complementada com materiais de isolamento térmico e acústico. Seguindo este princípio, foi desenvolvido um painel multicamada representativo, composto por uma camada estrutural de madeira de pinho-abeto, um revestimento em MDF e uma camada de isolamento em lã de rocha. A seleção destes materiais teve em consideração a sua disponibilidade comercial, propriedades térmicas e mecânicas, bem como o seu comportamento conhecido em situações de incêndio.

## 4.2. COMPOSIÇÃO DAS PAREDES

Os sistemas construtivos Light Wood Frame caracterizam-se pela combinação de elementos estruturais em madeira leve, painéis derivados e materiais de isolamento, formando unidades estruturais modulares e otimizadas. No contexto deste estudo, o painel multicamada constitui o elemento central de análise, uma vez que representa a configuração real das paredes utilizadas neste tipo de sistema. O desempenho global do painel depende não apenas das propriedades intrínsecas de cada material, mas também da forma como as camadas interagem entre si. A transmissão de calor, a rigidez estrutural e a resistência ao fogo são fortemente influenciadas pela espessura e pela disposição das camadas, bem como pela qualidade das ligações entre elas. Assim, torna-se essencial compreender a constituição e o comportamento deste tipo de painel, de modo a permitir a sua caracterização e subsequente modelação numérica e experimental. O painel estudado neste trabalho é constituído por três componentes principais: madeira de pinho-abeto, painéis derivados de madeira (MDF) e isolamento em lã de rocha. Esta

configuração mostra como as paredes comuns do sistema LWF, combinando camadas estruturais, de revestimento e de isolamento, conforme indicado na Figura 27.

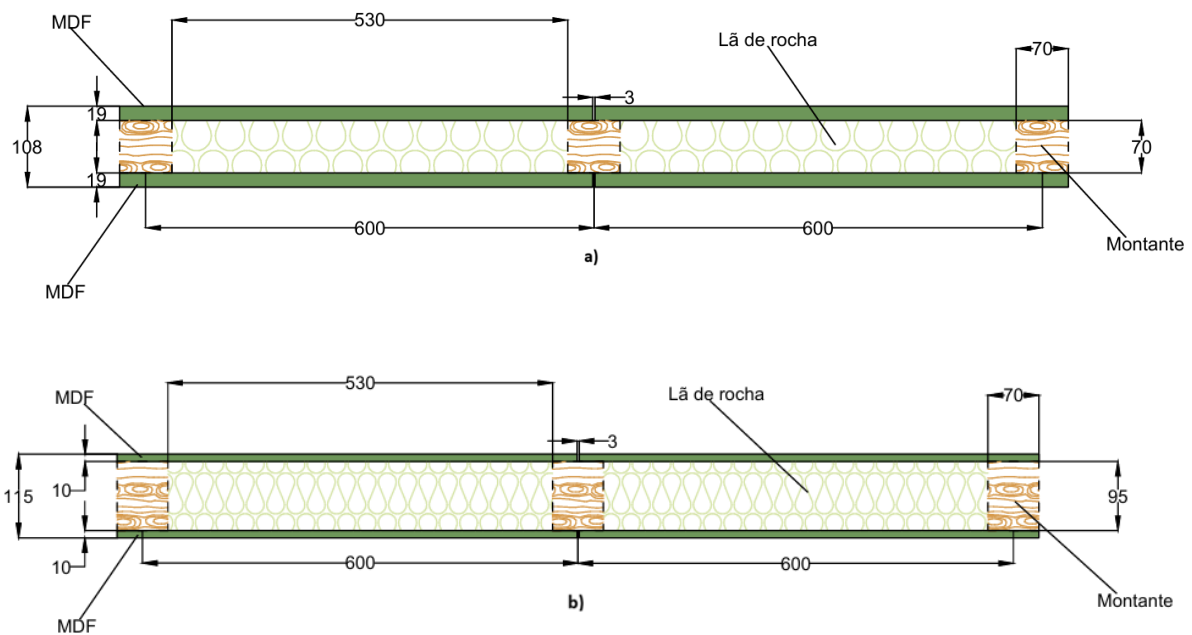


Figura 27. Dimensões da espessura do sistema multicamada: MDF + Lã de rocha + Pinho, a) ensaio 1 e b) ensaio 2.

Tabela 1. Composição e espessura das camadas do painel multicamada.

Camada	Material	Espessura
Revestimento exterior	MDF	10 e 19 mm
Isolamento intermédio	Lã de rocha	70 e 95 mm
Estrutura base	Pinho	70 e 95 mm

O painel multicamada é responsável por distribuir as cargas verticais e horizontais, bem como por conferir rigidez e estanqueidade às paredes. Além disso, desempenha um papel determinante no controlo de trocas térmicas e acústicas entre o interior e o exterior da edificação. Este tipo de solução é amplamente utilizado em paredes, pavimentos e coberturas, sendo especialmente eficaz em construções modulares ou pré-fabricadas, [80].

As vantagens associadas ao painel multicamada incluem a redução do peso estrutural, a eficiência energética e a facilidade de montagem. Por outro lado, os desafios prendem-se com a compatibilidade entre os materiais e o comportamento diferenciado das camadas sob variação de temperatura, particularmente em situações de incêndio, onde a dilatação térmica e a pirólise da madeira podem comprometer a integridade do conjunto, [84].

#### 4.2.1. ESTRUTURA EM MADEIRA DE PINHO-ABETO

A camada estrutural é formada por montantes e travessas de madeira de pinho, que conferem resistência e estabilidade ao painel. A madeira de pinho apresenta boas propriedades mecânicas à compressão e à flexão, sendo adequada para estruturas de pequena e média dimensão. Os montantes são dispostos verticalmente, com espaçamento típico de 600 mm, e secção de 70 x 70 mm no Ensaio 1 e 70 x 95 mm no Ensaio 2, conforme as exigências de carga e isolamento. Este procedimento foi aplicado a ambos os ensaios.

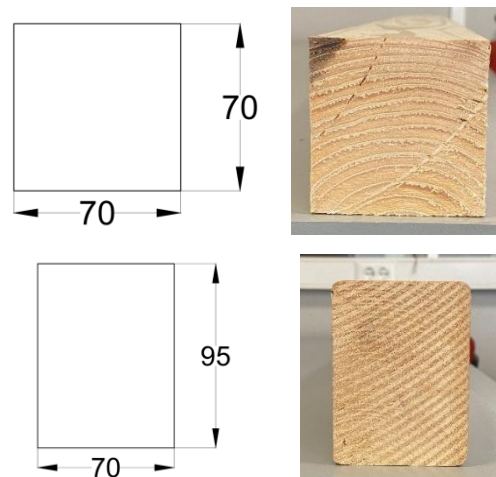


Figura 28. Dimensionamento da madeira pinho-abeto.

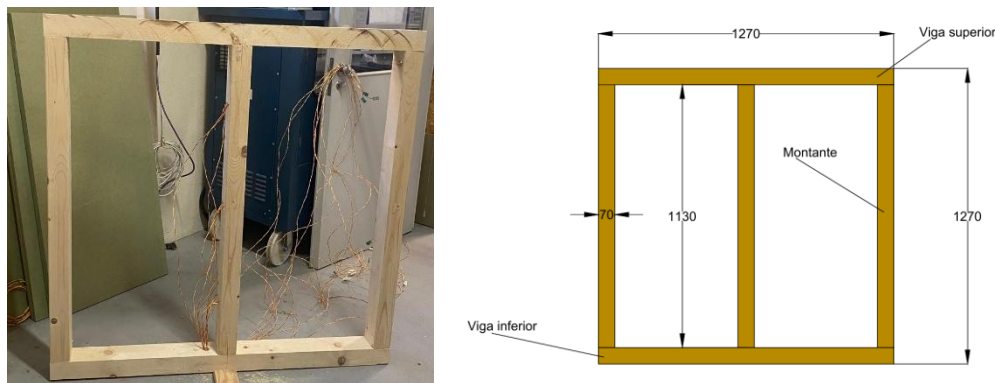


Figura 29. Estrutura de montantes de pinho-abeto (Ensaio 2).

#### 4.2.2. REVESTIMENTO EM MDF

Os painéis de MDF são utilizados como elementos de revestimento e contraventamento, proporcionando rigidez e estabilidade ao conjunto estrutural. O MDF é escolhido pela sua

superfície homogênea, boa resistência à flexão e facilidade de maquinagem, o que o torna adequado para aplicações que exigem precisão dimensional e bom acabamento superficial. No presente estudo, o ensaio é realizado exclusivamente com painéis de MDF, com espessura de 10 mm e 19 mm, e dimensão de 633,5 x 1270 mm, de forma a avaliar o seu comportamento estrutural e ao fogo neste contexto construtivo. O mesmo procedimento foi adotado para ambos os ensaios.

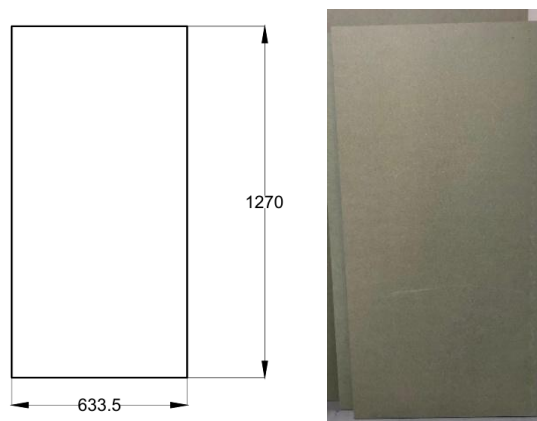


Figura 30. Dimensionamento do painel MDF.



Figura 31. Estrutura de pinho revestida com MDF (Ensaio 1).

Foi previsto um espaçamento de 3 mm entre os painéis de 633,5 x 1270 mm para acomodar as variações dimensionais dos painéis derivados de madeira, decorrentes de alterações de humidade e temperatura. Materiais como MDF, OSB ou contraplacado apresentam comportamento higroscópico, expandindo-se com o aumento da humidade e contraindo-se com a sua diminuição, [81].

Esta folga de 3 mm funciona como junta de dilatação, permitindo que cada painel se expanda livremente sem induzir tensões internas, empenamentos ou deformações na estrutura do conjunto. Esta prática está em conformidade com as recomendações do Eurocódigo 5 (EN

1995-1-2:2004), que orienta o dimensionamento e a montagem de elementos em madeira, e com os manuais de instalação de painéis estruturais, garantindo a estabilidade dimensional e durabilidade do sistema construtivo, [68].

#### 4.2.3. ISOLAMENTO EM LÃ DE ROCHA

O isolamento térmico é garantido pela camada de lã de rocha, inserida entre os montantes de madeira. Este material é incombustível, classificado como A1 segundo a norma EN 13501-1, e apresenta excelente comportamento térmico em temperaturas elevadas, mantendo as suas propriedades até cerca de 1000°C. Além da resistência ao fogo, a lã de rocha proporciona bom isolamento acústico e reduz a transferência de calor entre as faces do painel, contribuindo significativamente para o atraso do aquecimento da face não exposta ao fogo, consequentemente para o aumento do tempo de resistência global do painel.

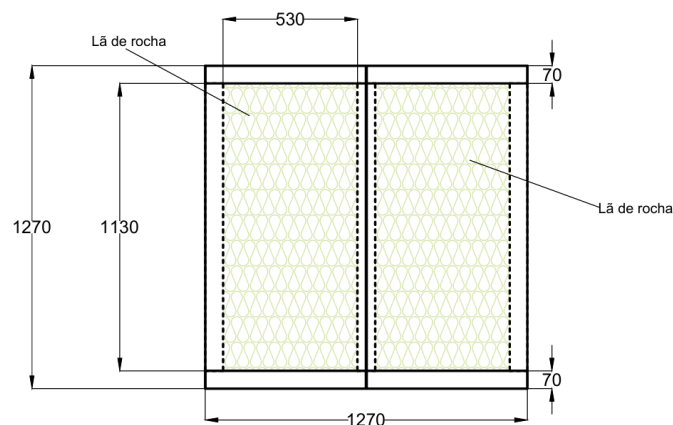


Figura 32. Composição do painel LWF com isolamento em lã de rocha.

#### 4.2.4. CONFIGURAÇÃO DAS PAREDES

A espessura total de um painel multicamada depende da aplicação e dos requisitos de desempenho térmico e estrutural. Nos sistemas LWF destinados a paredes exteriores, as espessuras típicas variam entre 100 mm e 200 mm, englobando as camadas de revestimento, a estrutura portante e o isolamento térmico.

No presente estudo, o painel multicamada analisado é constituído por uma placa de MDF, montantes de madeira de pinho-abeto e isolamento em lã de rocha, apresentando as seguintes dimensões médias:

- Painel de MDF: 633,5 x 1270 mm
- Espessura de MDF: 10 mm e 19 mm
- Montante em pinho: 70 x 70 mm e 70 x 95 mm
- Isolamento em lâ de rocha: 530 x 1130 mm

#### 4.2.5. SISTEMA DE LIGAÇÃO DAS PAREDES

A ligação entre os elementos é assegurada por meio de fixações mecânicas, nomeadamente parafusos ou pregos galvanizados, garantindo a continuidade estrutural do conjunto e a sua adequada resposta sob solicitação mecânica. A configuração adotada procura otimizar o equilíbrio entre rigidez, isolamento térmico e desempenho ao fogo, parâmetros essenciais para a avaliação do comportamento global do sistema construtivo.

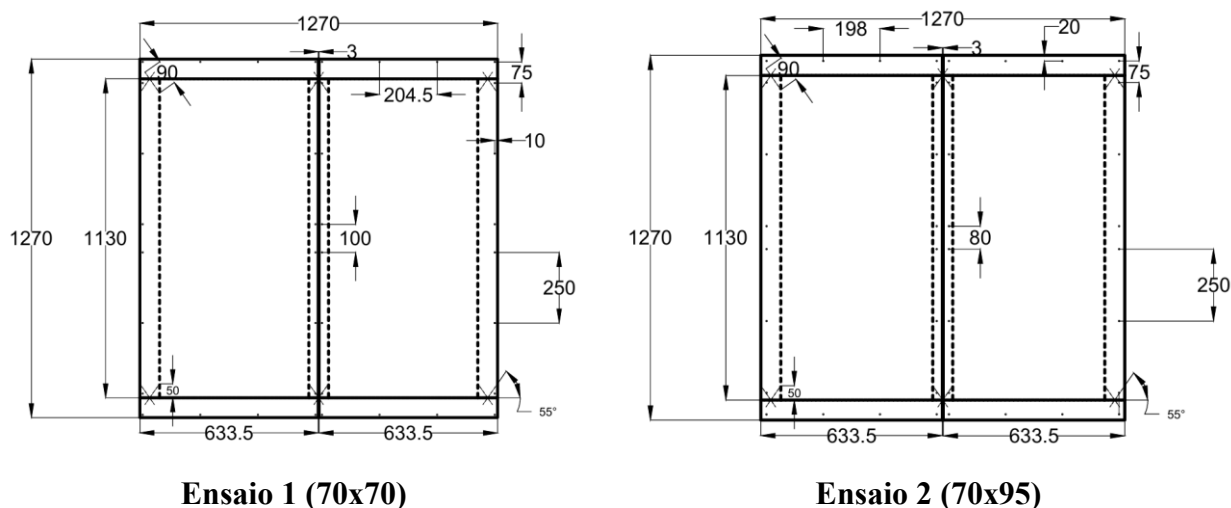


Figura 33. Esquema de fixação do painel multicamada, ensaio experimental.

Os pontos representados correspondem ao posicionamento dos parafusos de fixação entre as diferentes camadas da parede. A disposição segue critérios construtivos definidos de modo a garantir a rigidez e a estabilidade do conjunto, em conformidade com as recomendações do Eurocódigo 5 (EN 1995-1-2:2020), [77] no que respeita às ligações mecânicas em elementos de madeira.

Em ambas as configurações foram adotadas distâncias mínimas às bordas de 10 mm (ensaio 1) e 20 mm (ensaio 2), de modo a evitar a fissuração da madeira na zona de fixação. O espaçamento entre parafusos, tanto na vertical como na horizontal, foi definida de forma a garantir uma distribuição equilibrada das cargas, contudo, observa-se nas Figura 33 que as

distâncias verticais não são totalmente uniformes, o que resulta de ajustamentos locais associados à espessura das camadas e à necessidade de alinhamento das fixações com as zonas de maior rigidez do painel.

Os parafusos utilizados apresentam um diâmetro de 5 mm e comprimentos de 50 mm e 90 mm. Parte dos parafusos de 90 mm foi instalada com uma inclinação de 55°, com o objetivo de aumentar a rigidez e a resistência da ligação (parafusos a trabalhar em corte e atrito). Estas disposições foram definidas com o intuito de equilibrar os requisitos estruturais e térmicos do painel multicamada (MDF + lã de rocha + pinho) e encontram-se em conformidade com as recomendações construtivas no presente estudo.



<b>Diâmetro</b>	5 mm
<b>Comprimento</b>	50 e 90 mm
<b>Material</b>	Aço inoxidável
<b>Subfamília de produtos</b>	cabeça fresada

Figura 34. Referência técnica do parafuso.

# Capítulo 5: Ensaios Experimentais

---

## 5.1. ENSAIO EXPERIMENTAL NO FORNO

O ensaio experimental no forno teve como principal objetivo avaliar o comportamento térmico do sistema Light Wood Frame quando sujeito a um ambiente de incêndio controlado. Para tal, foi utilizado um forno de ensaio capaz de reproduzir curvas padrão de aquecimento, garantindo condições reprodutíveis e comparáveis com as prescritas nos Eurocódigos e nas normas de ensaio aplicáveis. Antes do início dos ensaios, o protótipo foi cuidadosamente preparado e instrumentado, assegurando-se que todos os elementos representativos do sistema construtivo, incluindo os painéis em MDF, os montantes em pinho e o isolamento em lã de rocha, estavam corretamente montados.

Foram ensaiados dois painéis multicamada com diferentes dimensões de montantes e espessuras de MDF, de forma a avaliar a sua influência no comportamento ao fogo do sistema LWF. Esta diferenciação entre ensaios possibilita comparar diretamente o efeito das variações geométricas e construtivas na propagação térmica e na integridade estrutural durante o ensaio de resistência ao fogo. Estes painéis foram instalados no forno como uma parede representativa do sistema LWF, sendo devidamente suportados pela estrutura do forno.



Figura 35. Lado não exposto instalado na estrutura do forno, correspondente ao modelo de parede LWF ensaiado (Ensaio 1).

### 5.1.1. ISOLAMENTO

Como material de isolamento térmico, foi utilizada lã de rocha com densidade de  $70 \text{ kg/m}^3$ , tipo A1. Para os painéis multicamada preparados para os ensaios, foram adotadas diferentes configurações de espessura, correspondentes aos ensaios experimentais.

No Ensaio 1, relativo a um painel com área útil de  $70 \times 70 \text{ mm}$ , o isolamento foi aplicado em duas camadas com espessuras de 30 mm e 40 mm, totalizando 70 mm. Ensaio 2, referente ao painel com área útil de  $70 \times 95 \text{ mm}$ , o isolamento em lã de rocha foi igualmente instalado em duas camadas, desta vez com espessuras de 50 mm + 50 mm, perfazendo 100 mm de isolamento total. As dimensões do isolamento para ambos os ensaios mantêm um comprimento de 1130 mm e uma largura de 530 mm. Esta configuração permitiu avaliar a influência da espessura do isolamento no comportamento térmico do sistema, assegurando simultaneamente a consistência da montagem em ambos os ensaios.

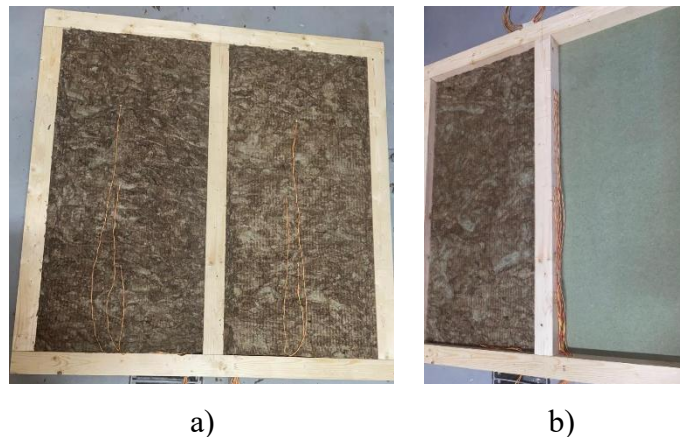


Figura 36. Etapas de preparação do painel (Ensaio 1): a) posicionamento da lã de rocha no interior da estrutura e b) aplicação da placa de revestimento de um dos lados durante a fase de pré-processamento.

### 5.1.2. MEDIÇÕES DE TEMPERATURA

Nos ensaios, foram consideradas ambas as faces do material. Para avaliar a evolução da temperatura, foram instalados termopares nos dois modelos ensaiados: os designados por “BT” foram colocados na face exposta ao fogo, os “DT” no lado não exposto, os “TI” no interior do isolamento e nas interfaces entre os painéis e a lã de rocha.

No painel não exposto, as temperaturas da superfície foram recolhidas por termopares de disco de cobre (DT) protegidos com uma almofada de fibra de silicato e localizados ao longo da linha central do painel, posicionado na parte superior e inferior, e no centro geométrico da parede, de acordo com as especificações da EN 1363-1, enquanto para o painel exposta ao fogo

foram utilizados termopares em leito (BT) a meio da altura da parede. Colocados 9 termopares na região interna do montante central, [79]. É bem representado na Figura 37, as dimensões dos dois modelos construídos e a localização dos termopares.

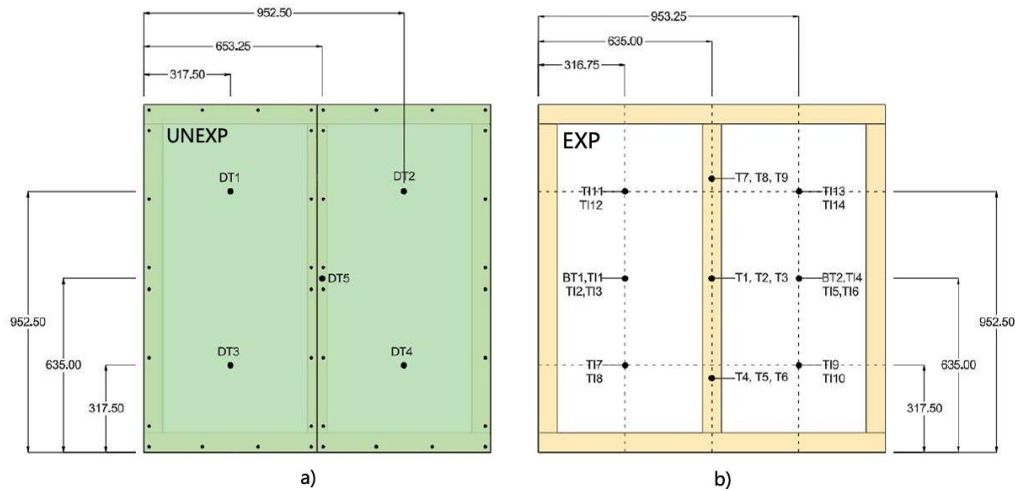


Figura 37. Localização dos termopares inseridos nos modelos: a) lado não exposto e b) lado exposto, em mm.

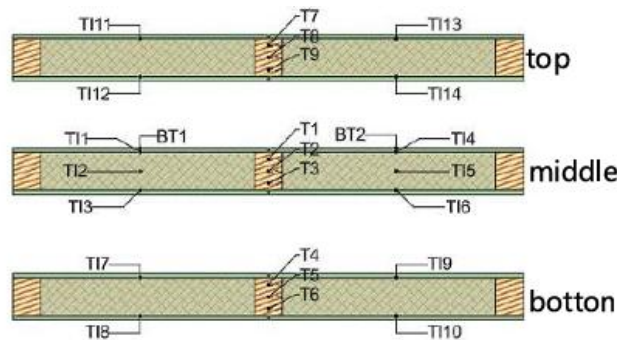


Figura 38. Localização dos termopares nas vistas superior, intermédia e inferior.

Tabela 2. Siglas dos tipos de termopares de cada região representativa do espécime.

<b>Tipo de termopar</b>	<b>Região da parede</b>
T	Na região interna do montante exposta ao fogo
TI	A interface entre os painéis MDF e lâ de rocha no lado exposto, e não exposto
BT	Superfície do painel MDF exposta
DT	Superfície do painel MDF não exposta

Também foram analisados os valores médios (IR-AVE), mínimos (IR-MIN) e máximos (IR-MAX) das temperaturas no lado não exposto, recorrendo a uma câmara infravermelha FLIR BT Series T365, instalada a 2,33 m da superfície não exposta. O equipamento operou com uma

frequência de aquisição de 1,25 Hz e permitiu registrar temperaturas até 350°C. Durante a recolha dos dados, a escala de medição foi ajustada para 20-350°C e adotou-se uma temperatura ambiente de 20°C. A emissividade atribuída ao painel variou entre 0,90 e 0,95. Estes valores são compatíveis com materiais lignocelulósicos e painéis derivados de madeira, cuja superfície apresenta elevada rugosidade e baixo brilho, características que promovem elevada capacidade de emissão térmica. Assim, a escolha deste intervalo assegura maior representatividade física do comportamento radiativo da superfície real do painel durante o ensaio, garantindo leituras fiáveis das temperaturas medidas pela câmara termográfica.

O forno utilizado nos ensaios foi concebido em conformidade com os requisitos estabelecidos na norma EN 1363-1. O compartimento de ensaio possui um volume de controlo de aproximadamente 1 m<sup>3</sup>, sendo internamente revestido com fibra cerâmica e tijolos cerâmicos, garantindo a resistência térmica necessária ao ensaio. A combustão é assegurada por quatro queimadores alimentados a gás natural, cada um com uma potência máxima de 90 kW.

A temperatura no interior do forno foi monitorizada através de um termopar de placa, permitindo verificar o seguimento da curva padrão de incêndio ISO 834, ao longo do ensaio.

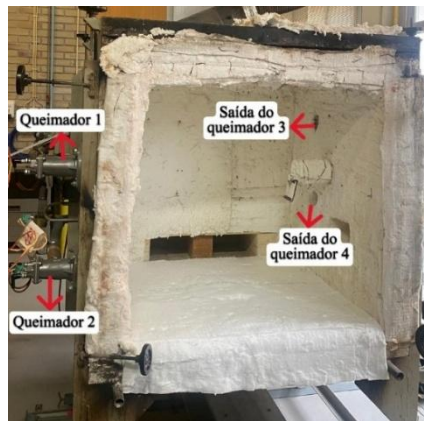


Figura 39. Vista exterior do forno de ensaio de resistência ao fogo.

A aquisição e registo dos dados foram realizados por um sistema MGC Plus (HBM), equipado com 30 canais e configurado para uma frequência de amostragem de 1 Hz, garantindo a precisão e continuidade das medições.

As amostras de parede foram consideradas como tendo falhado quando os critérios de isolamento (I) foram atingidos, quer em relação aos requisitos para a temperatura média ( $T_{ave}$ ) ou máxima ( $T_{max}$ ) na camada de proteção não exposta, conforme expresso nas seguintes equações (5 e 6), nas quais  $T_0 = 20^\circ\text{C}$ , [79].

$$T_{ave} = T_0 + 140^{\circ}C \quad (5)$$

$$T_{max} = T_0 + 180^{\circ}C \quad (6)$$

## 5.2. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

A presente secção analisa os resultados experimentais obtidos nos dois ensaios realizados em forno, com o objetivo de avaliar o comportamento térmico de um sistema multicamada constituído por MDF, lã de rocha e montantes de madeira, quando exposto à curva padrão de incêndio ISO 834. A evolução da temperatura foi monitorizada por termopares instalados em diferentes zonas do painel, sendo complementada por registos termográficos.

O Ensaio 1 teve uma duração de 1h e 04 min, enquanto o Ensaio 2 decorreu durante 2h e 02 min, condicionando a verificação dos critérios de isolamento térmico definidos na EN 1363-1. Os resultados são apresentados sob a forma de gráficos, organizados de acordo com a localização dos termopares. Salienta-se que o Ensaio 1 foi interrompido prematuramente devido à ocorrência de chamas no interior do forno, e que no Ensaio 2 se verificou a perda do termopar DT-5 na fase final, sem comprometer a análise global do comportamento térmico do sistema.

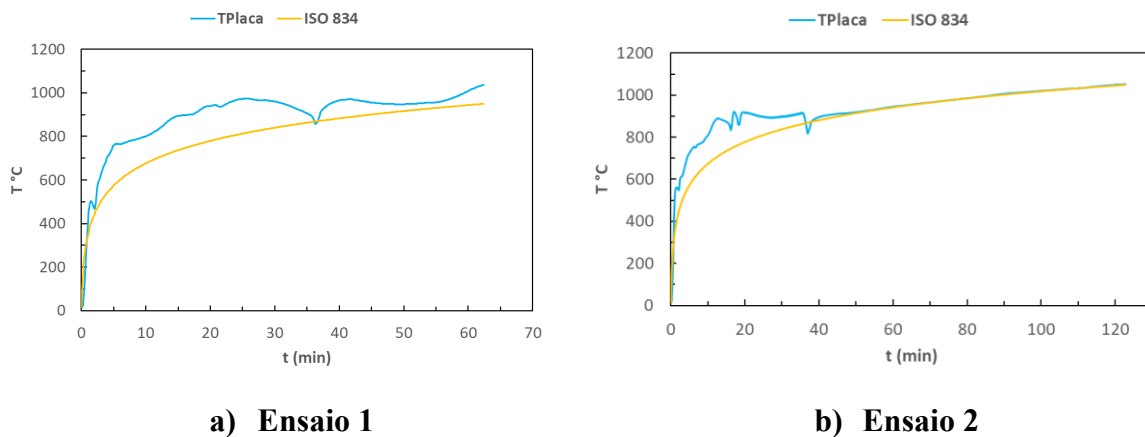


Figura 40. Evolução da temperatura medida pela TPlaca (temperatura do forno) em comparação com a curva padrão ISO 834.

A comparação entre a curva ISO 834 e as leituras registadas pela termoplaca (TPlaca) permite avaliar a conformidade entre o regime de aquecimento real do forno e a exposição normativa. Em ambos o ensaio se observa uma correspondência global adequada, particularmente nos primeiros 20-25 minutos, período associado à estabilização térmica do forno, conforme previsto na EN 1363-1, [79].

No Ensaio 1, a partir de cerca de 40 minutos, verificaram-se oscilações significativas na temperatura medida, resultantes da saída de chamas entre o painel e a porta do forno, o que perturbou a homogeneidade do aquecimento e originou desvios pontuais face à curva normalizada. Em contraste, no Ensaio 2, a evolução térmica manteve-se mais estável ao longo de todo o ensaio, apresentando boa concordância com a curva ISO 834.

As discrepâncias observadas relativamente à curva padrão estão associadas não só ao sistema de controlo do forno, mas também à libertação adicional de energia térmica decorrente da pirólise e combustão dos materiais à base de madeira. De acordo com a EN 1363-1, [79] tais variações são admissíveis desde que os critérios globais de aquecimento sejam satisfeitos. No presente estudo, este efeito foi mais evidente no Ensaio 1, enquanto no Ensaio 2 a menor influência da combustão adicional permitiu uma aproximação mais consistente à curva ISO 834, confirmando a conformidade do ensaio com os requisitos normativos.

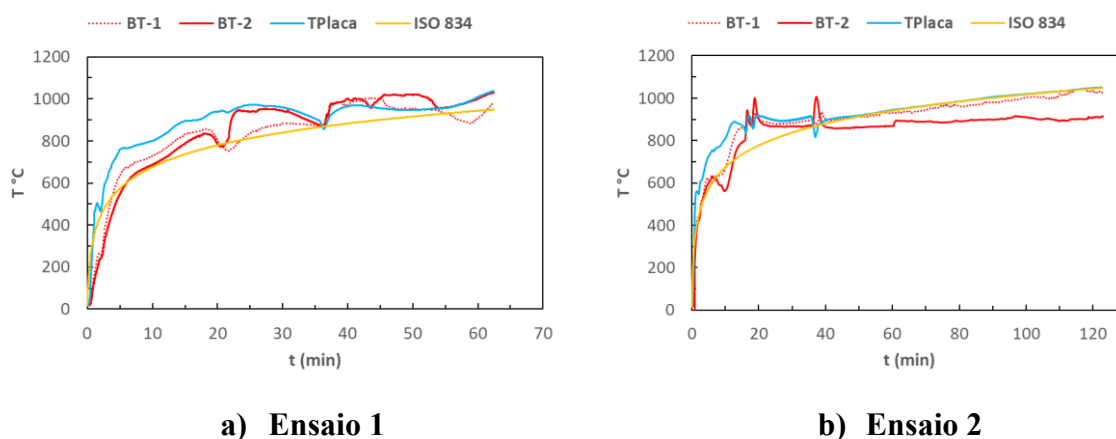


Figura 41. Evolução da temperatura no lado exposto (BT) e comparação com a curva ISO 834 e Termo placa.

As temperaturas registadas pelos termopares instalados no lado exposto (BT-1 e BT-2) evidenciam o comportamento térmico esperado para superfícies diretamente sujeitas à curva ISO 834. Em ambos o ensaio se observa um aumento rápido da temperatura nos primeiros minutos, seguido de uma aproximação progressiva à curva de referência.

No Ensaio 1, a libertação de chamas entre o painel e o forno originou instabilidade térmica após cerca de 40 minutos, resultando numa resposta irregular associada à perturbação do fluxo de gases quentes. Em contraste, no Ensaio 2, as curvas apresentam maior consistência e melhor alinhamento com o aquecimento normativo, mantendo-se relativamente estáveis após a fase inicial. As diferenças pontuais entre BT-1 e BT-2 são atribuídas a pequenas variações de posicionamento e às condições locais de convecção na superfície do painel, aspetos comuns em ensaios de fogo em escala real, [79].

Globalmente, o aquecimento superficial do painel evoluiu de forma coerente com o regime imposto pela ISO 834, assegurando condições adequadas para a avaliação da resposta térmica das camadas internas do sistema multicamada. A curva associada ao termopar BT-2 apresenta valores sistematicamente inferiores à curva ISO 834 e à TPlaca, indicando uma leitura não representativa do campo térmico do forno, compatível com uma possível deslocação do termopar ou perda de contacto com a posição de medição inicialmente prevista.

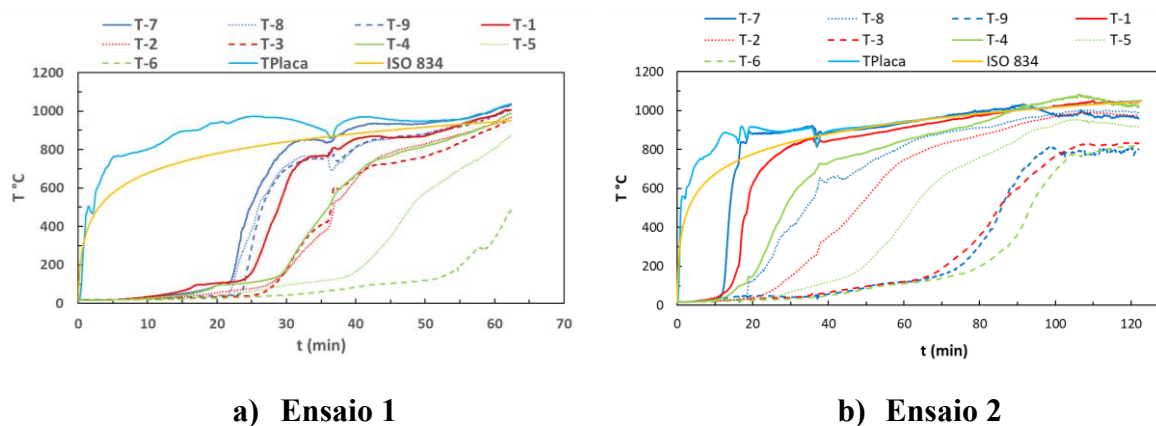


Figura 42. Evolução da temperatura no montante de madeira durante a exposição ao fogo.

A evolução da temperatura nos montantes de madeira permite avaliar a propagação térmica através do painel e o início dos fenómenos de degradação da madeira. Em ambos os ensaios, o aquecimento dos montantes foi significativamente mais lento do que no lado exposto, evidenciando a baixa condutividade térmica do pinho e o efeito isolante da lã de rocha na cavidade. Durante grande parte do ensaio, as temperaturas mantiveram-se abaixo de 250-300°C, intervalo associado ao início da pirólise e à formação da camada carbonizada, conforme indicado no Eurocódigo 5 (EN 1995-1-2), [77].

A resposta térmica foi condicionada pela espessura do MDF na face exposta, tendo o Ensaio 1 utilizado MDF de 19 mm e o Ensaio 2 MDF de 10 mm. A menor espessura no Ensaio 2 reduziu a inércia térmica do revestimento, promovendo uma transferência de calor mais precoce para a cavidade e um aumento antecipado das temperaturas nos montantes. Em contraste, no Ensaio 1, a maior espessura do MDF contribuiu para um atraso inicial na propagação térmica, embora a perturbação térmica após cerca de 40 min tenha acelerado localmente o aquecimento dos montantes.

As diferenças entre as curvas refletem a localização distinta dos termopares nos montantes e a interação com zonas sujeitas a fluxos térmicos variáveis. No conjunto, a resposta térmica observada é coerente com sistemas multicamada expostos à ISO 834, nos quais o isolamento mineral atrasa significativamente a transferência de calor para os elementos

estruturais em madeira. Os termopares T7-T9 correspondem à parte superior do montante, T1-T3 à zona intermédia e T4-T6 à parte inferior.

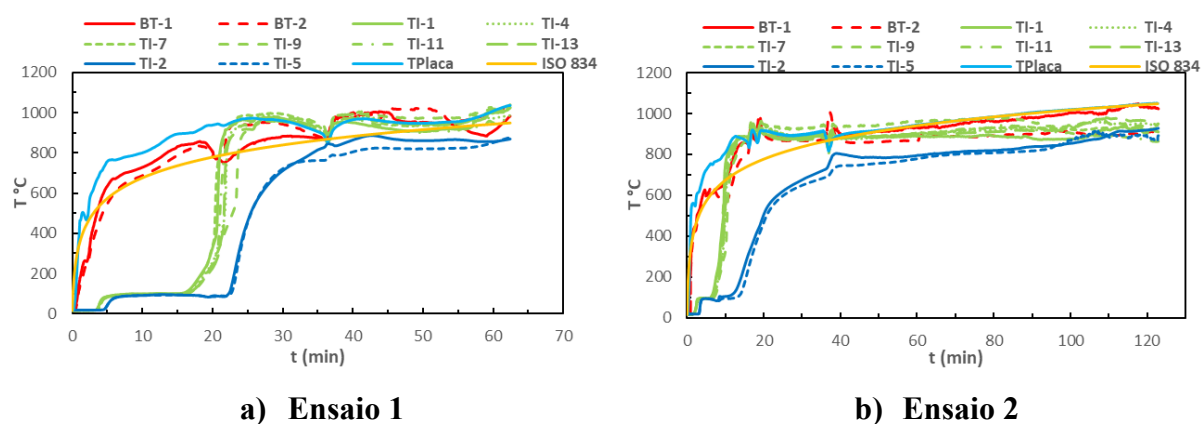


Figura 43. Temperaturas no lado exposto (BT) e nas interfaces entre painel de MDF e lâ de rocha.

A evolução térmica nas interfaces entre o painel de MDF e a lâ de rocha evidencia um aquecimento mais lento quando comparado com a superfície exposta, demonstrando a função isolante do material mineral na limitação da propagação do calor para as camadas internas do sistema. No Ensaio 2 observou-se um comportamento mais estável, enquanto no Ensaio 1 se verificou um aumento mais rápido das temperaturas após cerca de 40 minutos, coerente com a anomalia ocorrida no interior do forno. As diferenças entre curvas refletem a localização dos termopares e o contacto com materiais de distintas condutividades térmicas.

Este comportamento é consistente com resultados reportados na literatura para sistemas multicamada sujeitos à curva ISO 834, nos quais o isolamento mineral contribui para uma frente de aquecimento mais lenta, [33], [66]. Adicionalmente, a transição entre o MDF e a lâ de rocha evidencia um efeito de acumulação térmica associado à descontinuidade das propriedades dos materiais, originando patamares intermédios de temperatura antes da elevação progressiva em instantes mais avançados. A diferença de espessura do MDF influencia este fenómeno, sendo o Ensaio 1 (19 mm) caracterizado por maior inércia térmica e atraso inicial, enquanto no Ensaio 2 (10 mm) a transferência de calor ocorre de forma mais precoce e gradual. O aumento mais acentuado das temperaturas em fases posteriores está ainda associado ao início dos fenómenos de degradação térmica e pirólise do MDF.

Os termopares TI-1, TI-4, TI-7, TI-9, TI-11 e TI-13 localizam-se na interface exposta ao fogo entre o painel de MDF e a lâ de rocha, enquanto os termopares TI-2 e TI-5 se encontram no interior do isolamento.

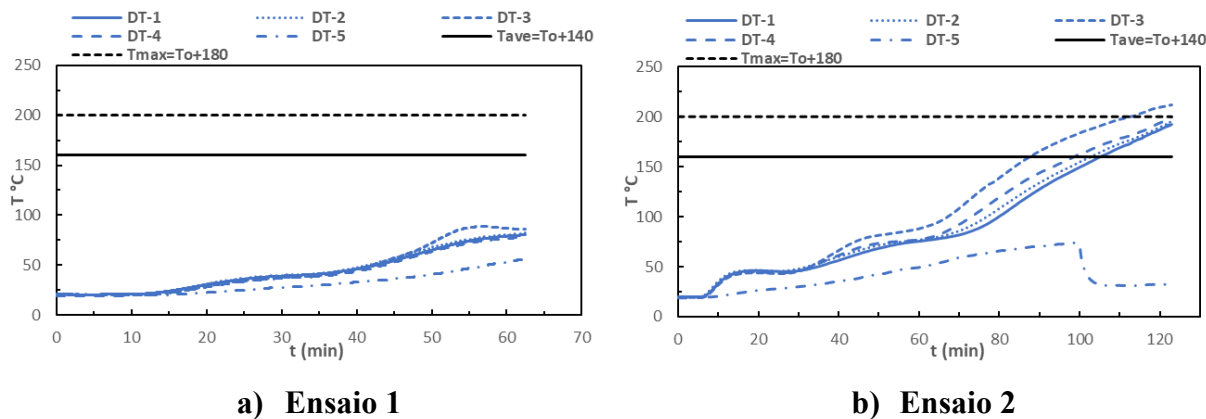


Figura 44. Evolução da temperatura no lado não exposto (DT), incluindo temperatura máxima e média.

A evolução da temperatura no lado não exposto é determinante para a verificação do critério de isolamento térmico (I), conforme definido na EN 1363-1. No Ensaio 1, a interrupção prematura do ensaio, associada à degradação anómala do painel, impediu que as curvas dos termopares DT atingissem os limites normativos, não sendo possível determinar um tempo de resistência ao fogo representativo.

No Ensaio 2, apesar da perda do termopar DT-5 na fase final, os restantes termopares apresentaram uma evolução térmica controlada durante a maior parte do ensaio. Até aproximadamente 88 minutos, a resposta térmica manteve-se globalmente controlada, com temperaturas inferiores ao limite médio definido ( $T_{ave} = T_0 + 140^{\circ}\text{C}$ ). A partir desse instante, o termopar DT3 ultrapassa o limite normativo, seguindo-se os restantes (DT4, DT2 e DT1), o que confirma a perda do critério de isolamento térmico.

Após a perda do critério I, a temperatura no lado não exposto continuou a aumentar de forma progressiva até cerca dos 110-120 minutos, comportamento típico de sistemas multicamada com núcleo isolante mineral. Nos instantes finais do ensaio, algumas curvas evidenciam uma inclinação mais acentuada, associada à degradação progressiva das camadas expostas e à redução da eficácia isolante do sistema. A perda do termopar DT-5 não compromete a análise, uma vez que os restantes pontos de medição apresentam uma resposta coerente e representativa do comportamento global do lado não exposto.

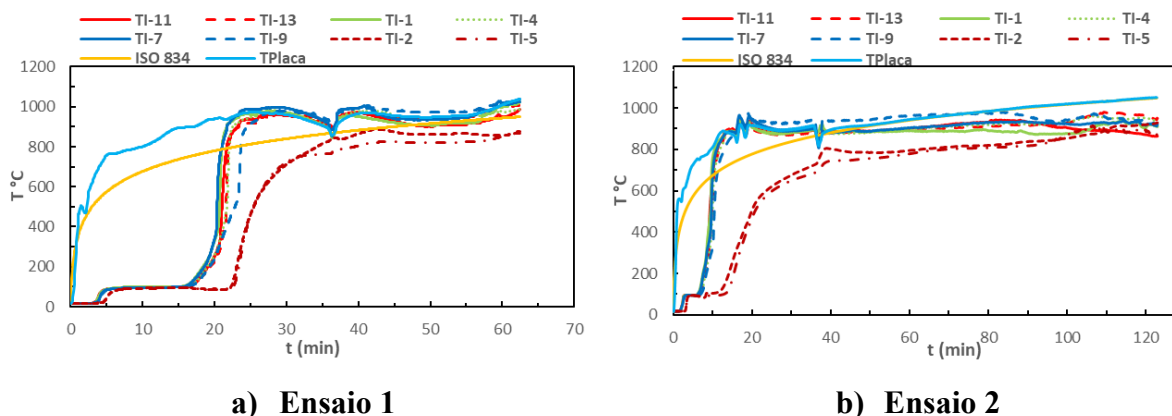


Figura 45. Evolução da temperatura nas interfaces internas entre painel MDF e lã de rocha, bem como no interior da camada de isolamento, da face exposta ao fogo.

As temperaturas medidas no interior do sistema multicamada apresentam valores significativamente inferiores aos registados no lado exposto, evidenciando o gradiente térmico ao longo da espessura do painel e a elevada capacidade isolante da lã de rocha. Este comportamento confirma que o isolamento mineral, devido à sua baixa condutividade térmica, limita eficazmente a transferência de calor para as camadas internas, atuando como a principal barreira térmica do sistema.

Ao longo do ensaio, as temperaturas no interior da lã de rocha mantêm-se relativamente baixas, aumentando apenas de forma gradual, comportamento típico de materiais fibrosos sujeitos a aquecimento padronizado. Esta resposta contribui diretamente para o desempenho do critério de isolamento térmico (I), ao atrasar o aquecimento das interfaces internas.

A diferença entre os ensaios é mais evidente nas fases iniciais, sendo o Ensaio 1 caracterizado por um atraso mais pronunciado na elevação da temperatura nas interfaces internas, associado à maior espessura do MDF. No Ensaio 2, a menor espessura do revestimento promove uma transferência de calor mais precoce para as interfaces, embora a lã de rocha continue a limitar eficazmente a progressão térmica. Mesmo em instantes avançados, o isolamento mineral mantém as temperaturas internas significativamente inferiores às da face exposta, confirmando a sua eficácia ao longo de toda a exposição ao fogo.

Os termopares TI-11 e TI-13 localizam-se na parte superior da interface MDF-lã de rocha, TI-1 e TI-4 na zona intermédia, TI-7 e TI-9 na parte inferior da interface, enquanto os termopares TI-2 e TI-5 se encontram posicionados no interior do isolamento.

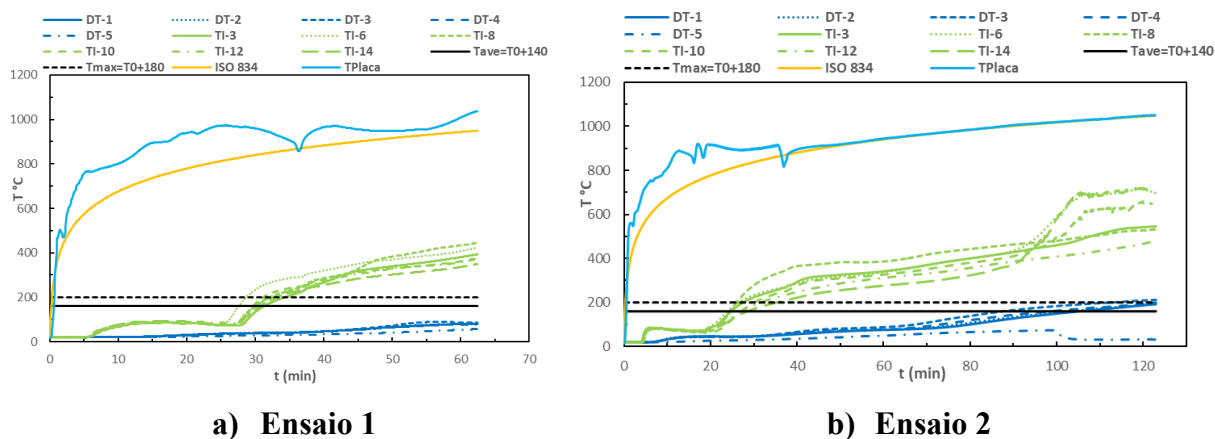


Figura 46. Comparação entre as temperaturas no lado não exposto (DT) e nas interfaces próximas da face não exposta.

A comparação entre as temperaturas registadas nos termopares DT e nos termopares posicionados nas interfaces internas próximas do lado não exposto evidencia a formação de um gradiente térmico claro entre as diferentes camadas do sistema. As temperaturas internas mantiveram-se sempre inferiores às registadas no lado exposto, confirmando que a propagação da frente térmica ocorre de forma progressiva e controlada.

Este gradiente demonstra o papel fundamental da lã de rocha na limitação da transferência de calor e no atraso do incumprimento do critério de isolamento térmico (I). Mesmo em condições prolongadas de exposição, as temperaturas nas interfaces próximas do lado não exposto permanecem significativamente inferiores aos limites normativos, indicando que o sistema multicamada mantém uma elevada capacidade isolante.

Globalmente, os resultados confirmam que a elevação de temperatura no interior do sistema é gradual e fortemente atenuada à medida que se aproxima da face não exposta, não se observando situações de aproximação crítica ao incumprimento do critério de isolamento térmico. Estes resultados reforçam a eficácia do sistema multicamada em retardar a progressão da frente térmica ao longo de toda a exposição ao fogo.

### 5.2.1. OBSERVAÇÕES RELATIVAS À CARBONIZAÇÃO (ENSAIO 1)

A análise pós-ensaio do painel multicamada permitiu caracterizar de forma detalhada o processo de carbonização ocorrido durante o Ensaio 1 e a sua relação direta com a perturbação térmica registada. A libertação de chamas pela interface do forno (Figura 47) resultou num fluxo térmico não uniforme e mais severo do que o previsto pela curva ISO 834, antecipando o aquecimento da superfície exposta e intensificando a taxa de pirólise do MDF e dos montantes.



Figura 47. Libertação de chamas durante o Ensaio 1.

A inspeção da face exposta após o término do ensaio (Figuras 48 e 49) revelou uma carbonização extensa, com colapso da camada superficial e formação de fissuras profundas. As bordas do painel apresentam carvão espesso e friável, indicativo de temperaturas elevadas e longa duração de exposição. A zona central, especialmente associada ao montante vertical, evidenciou uma degradação particularmente intensa, coerente com os incrementos abruptos de temperatura registados pelos termopares superficiais após os 40 minutos, momento em que ocorreu a perda de estanqueidade.



Figura 48. Face exposta imediatamente após o Ensaio 1.



Figura 49. Painel após desmontagem, com carbonização periférica e central.

A desmontagem do painel permitiu observar a carbonização pronunciada do montante central (Figura 50), cuja superfície apresenta textura em escamas, característica de pirólise avançada, associada a uma perda significativa de massa superficial. A observação em secção transversal do montante (Figuras 51 e 52) evidencia a formação de uma camada carbonizada contínua na face exposta ao fogo. A análise visual da secção do montante evidencia uma zona

carbonizada bem definida e uma região residual de madeira não carbonizada. Pela leitura aproximada na régua, a espessura remanescente de madeira sã é da ordem de 10 mm, o que indica uma profundidade de carbonização da ordem de 60 mm relativamente à espessura inicial do montante (70 mm). Assim, conclui-se que a carbonização afetou a maior parte da secção do montante, permanecendo apenas uma fração reduzida de madeira não afetada.

Estes valores são compatíveis com a duração do ensaio e com o efeito protetor proporcionado pelas camadas de MDF e pela lã de rocha, que retardaram a exposição direta do montante às elevadas temperaturas do forno. Observa-se, no entanto, que a carbonização se encontra localmente concentrada na região central do montante, o que poderá estar associado a fenómenos de sobreaquecimento localizado decorrentes da degradação progressiva das camadas de proteção.

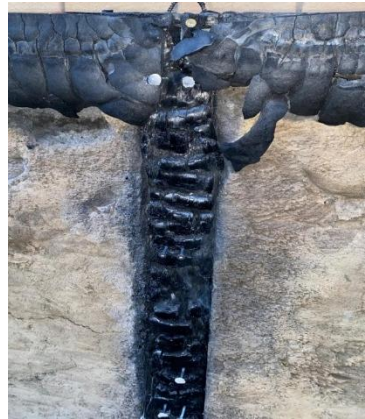


Figura 50. Montante com carbonização avançada (Ensaio 1).



Figura 51. Medição da profundidade de carbonização no montante central.



Figura 52. Secção transversal do montante carbonizado.

Apesar da presença do sistema de revestimento e do isolamento, a exposição térmica conduziu a uma degradação severa da secção do montante central de pinho (Figura 51). A

análise pós-ensaio revela que, de uma espessura inicial de aproximadamente 70 mm, subsistiram apenas cerca de 2 mm de madeira não carbonizada, indicando que praticamente toda a secção resistente foi comprometida. Este comportamento confirma que o núcleo da madeira atingiu temperaturas críticas, conduzindo à perda quase total da capacidade estrutural do elemento.

A análise do interior da cavidade (Figuras 53 e 54) confirmou que a lã de rocha desempenhou eficazmente sua função como barreira térmica. O material isolante manteve a sua coesão estrutural, sem retração volumétrica ou fusão, limitando a propagação da frente térmica para as camadas internas, mesmo sob condições experimentais adversas. Observou-se escurecimento superficial e ligeira carbonização do MDF voltado para a cavidade, porém sem perda de espessura significativa, reforçando o gradiente térmico registado pelos termopares internos.



Figura 53. Interior da cavidade após remoção da lã de rocha (Ensaio 1).



Figura 54. Medição da espessura carbonizada do MDF interno.

A interação entre o montante carbonizado e o isolamento mineral (Figura 55) revela um comportamento coerente com sistemas multicamada expostos a ações térmicas intensas:

- a madeira sofreu pirólise profunda nas regiões afetadas pela fuga de chamas,
- a lã de rocha permaneceu funcional e limitou a transferência de calor,
- a carbonização interna foi superficial e uniforme,
- o lado não exposto não atingiu temperaturas críticas, conforme registado pelos termopares DT.

Em síntese, o Ensaio 1 demonstrou que a falha de estanqueidade do forno influenciou diretamente o padrão de carbonização, aumentando localmente a taxa de pirólise e a profundidade carbonizada nos montantes. Ainda assim, o sistema multicamada manteve a sua

função térmica principal, graças ao desempenho da lã de rocha e à capacidade isolante da camada carbonizada formada no MDF e na madeira estrutural.



Figura 55. Lã de rocha preservada junto ao montante carbonizado.

### 5.2.2. OBSERVAÇÕES RELATIVAS À CARBONIZAÇÃO (ENSAIO 2)

O Ensaio 2 decorreu sob condições térmicas estáveis, sem ocorrência de libertação de chamas para o exterior do forno, permitindo avaliar de forma representativa o comportamento de carbonização do sistema multicamada quando exposto à curva padrão ISO 834. Durante o aquecimento (Figura 56), observaram-se apenas focos localizados de chama nas extremidades, atribuíveis à ignição de gases pirolíticos, sem que tal interferisse na estanqueidade ou alterasse significativamente o regime térmico interno.



Figura 56. Evolução térmica do painel durante o Ensaio 2.

Após o término do ensaio, a remoção da face exposta revelou um padrão de carbonização moderado e uniforme (Figura 57), claramente distinto do observado no Ensaio 1. A camada superficial de MDF apresentou escurecimento generalizado e fissuração típica da pirólise progressiva, mas sem perda massiva de material. A carbonização concentrou-se nas bordas do painel e ao longo das zonas correspondentes aos montantes, formando uma camada

de carvão relativamente fina e estável. A integridade do MDF manteve-se até fases avançadas do ensaio, o que contribuiu para a limitação da transmissão de calor para a cavidade interna.



Figura 57. Face exposta do painel após o Ensaio 2.

Os montantes estruturais (Figura 58) exibiram uma carbonização superficial contínua, com textura regular e ausência de cavidades profundas, indicando que a taxa de carbonização esteve dentro dos valores típicos previstos pela EN 1995-1-2, [77] para elementos protegidos. A ausência de sobreaquecimento localizado comprova que o aquecimento permaneceu homogêneo em toda a superfície exposta. Embora não tenha sido possível proceder ao corte dos montantes devido à maior espessura do painel, a observação visual confirma que a frente de carbonização não atingiu profundidades críticas capazes de comprometer a secção resistente.



Figura 58. Montante de madeira após o Ensaio 2.

A lâ de rocha no interior da cavidade (Figura 59) manteve a sua integridade estrutural, apresentando apenas descoloração térmica superficial e ausência de retração ou sinterização significativa. Este comportamento confirma a eficácia do isolamento mineral na limitação da condução térmica e na proteção das camadas internas, contribuindo para que as leituras dos termopares internos se mantivessem dentro de valores moderados ao longo de todo o ensaio.



Figura 59. Lã de rocha após o Ensaio 2.

A observação do lado não exposto após o Ensaio 2 revelou que a superfície permaneceu estruturalmente íntegra, apresentando apenas escurecimento térmico e uma deformação côncava para o interior da cavidade (Figuras 60 e 61). Este empeno resulta do gradiente térmico transversal entre as duas faces do painel, levando à expansão diferencial do MDF e ao deslocamento da junta vertical.

A deformação foi confirmada visualmente através da utilização de uma régua rígida, evidenciando o afastamento da superfície relativamente ao plano original. Apesar disso, não se verificaram fissuras profundas, destacamento do MDF ou sinais de carbonização, indicando que a frente térmica não atingiu níveis críticos na face oposta.

As leituras dos termopares DT permaneceram abaixo dos limites definidos pela EN 1363-1 até 88 minutos, demonstrando que apesar da deformação, o sistema manteve o desempenho adequado no critério de isolamento térmico (I). Assim, o lado não exposto apresentou apenas efeitos superficiais de aquecimento, sem comprometimento da sua função de barreira térmica.



Figura 60. Deformação côncava do MDF no lado não exposto após o Ensaio 2.



Figura 61. Medição da deformação do painel com régua rígida no lado não exposto.

### 5.2.3. REGISTOS TERMOGRÁFICOS DOS ENSAIOS

Foram obtidas imagens termográficas durante os Ensaio 1 e 2, permitindo visualizar a distribuição superficial de temperatura e comparar o comportamento térmico dos painéis ao longo da exposição ao fogo. Estes registos complementam as medições efetuadas com termopares, oferecendo uma representação visual da evolução térmica da superfície exposta.

As Figuras 62 e 63 apresentam os registos termográficos correspondentes aos instantes mais representativos de cada ensaio, evidenciando a evolução do aquecimento superficial e a formação das zonas de maior concentração térmica.

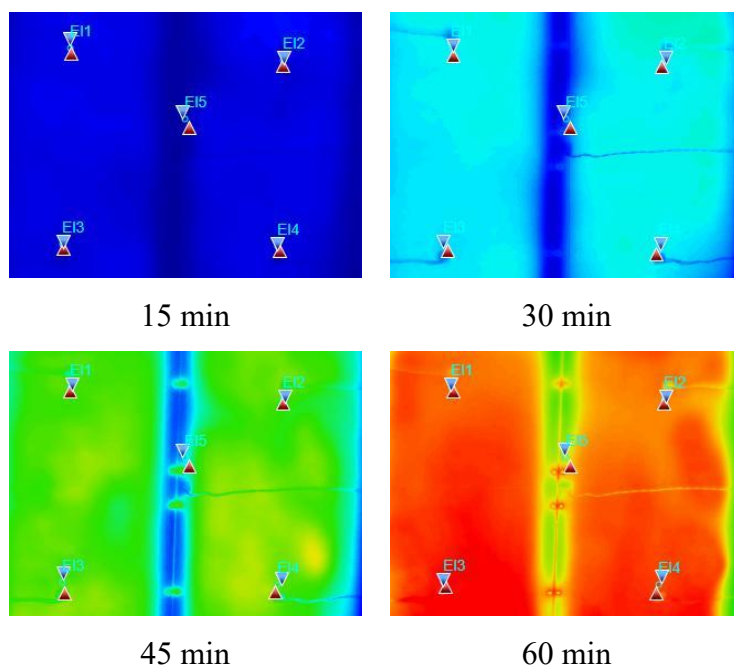


Figura 62. Sequência termográfica do Ensaio 1, mostrando a evolução do aquecimento superficial entre 15 e 60 minutos e a formação de zonas quentes devido à perturbação térmica.

A sequência de imagens termográficas apresentada na Figura 62 permite acompanhar a evolução térmica do painel durante o Ensaio 1. Nos primeiros instantes (15 e 30 min), observa-se um aquecimento inicial relativamente homogêneo, sem concentração expressiva de calor. Contudo, a partir dos 45 minutos é visível o surgimento de zonas quentes irregulares, sobretudo junto à junta vertical e à região central do painel. Esta tendência intensifica-se aos 60 minutos, refletindo o impacto da perturbação ocorrida durante o ensaio, que alterou o fluxo térmico e contribuiu para o desenvolvimento de gradientes térmicos acentuados na superfície exposta. Estas observações complementam os registos dos termopares, reforçando a interpretação da instabilidade térmica observada no Ensaio 1.

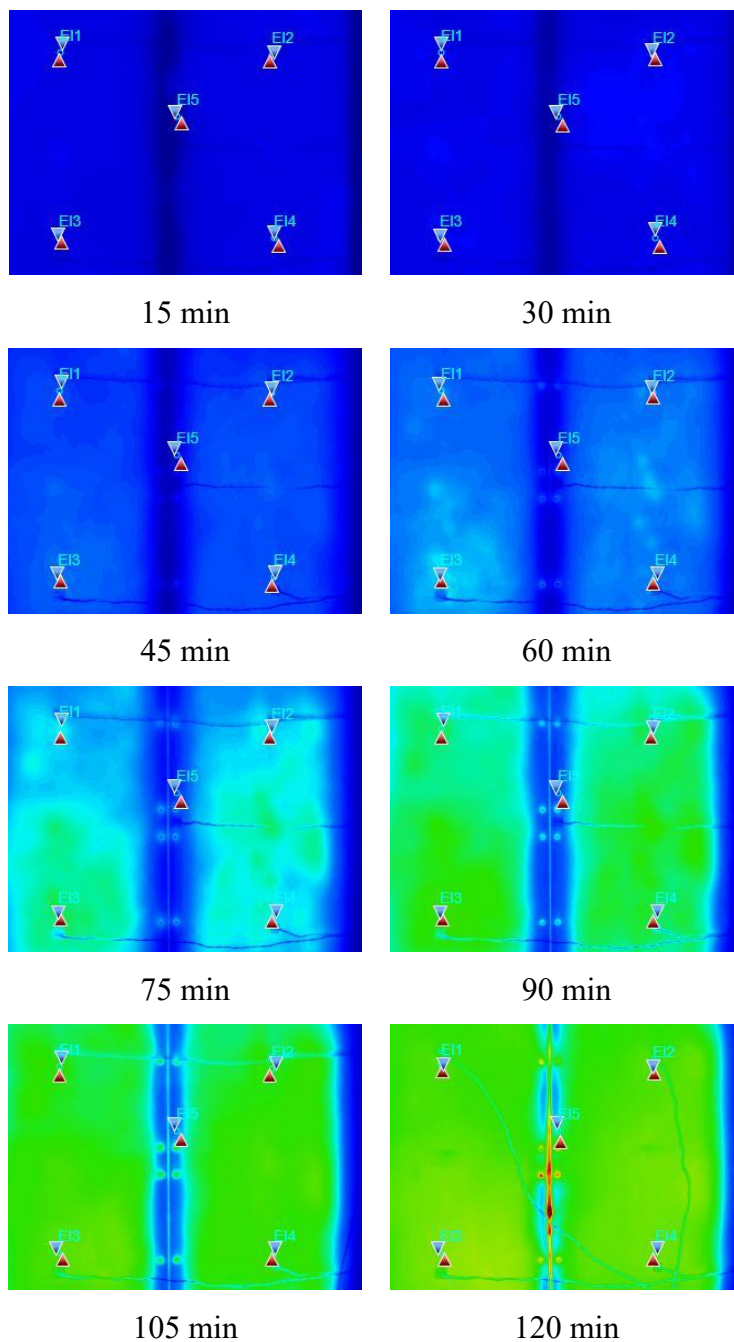


Figura 63. Registos termográficos do Ensaio 2 entre 15 e 120 minutos, evidenciando a evolução do aquecimento superficial e o desenvolvimento progressivo de zonas de maior intensidade térmica.

A sequência termográfica apresentada na Figura 63 ilustra a evolução do aquecimento superficial do painel durante o Ensaio 2. Nos primeiros 60 minutos observa-se uma distribuição térmica relativamente homogénea, característica da exposição estável à curva ISO 834. A partir dos 75 minutos surgem gradientes térmicos mais definidos, com intensificação progressiva do aquecimento junto à junta central do painel. Nos instantes finais (105-120 min) evidencia-se uma zona crítica de maior temperatura concentrada nesta região, compatível com a propagação do calor através das ligações e com o aquecimento contínuo dos montantes adjacentes. Em

conjunto, estes registos complementam as leituras dos termopares, confirmando um comportamento térmico previsível e sem perturbações externas significativas ao longo de todo o ensaio.

### 5.2.3.1. COMPARAÇÃO DOS RESGISTOS TERMOGRÁFICOS E ENSAIO EXPERIEMNTAL

No âmbito da avaliação experimental do comportamento ao fogo do painel multicamada em sistema Light Wood Frame, a temperatura da face não exposta foi monitorizada recorrendo a dois métodos complementares: termopares de contacto (DT) e termografia infravermelha (IR). A utilização conjunta destes métodos permite uma caracterização mais abrangente da evolução térmica, combinando medições pontuais com a análise do campo térmico superficial.

Os termopares de contacto constituem o método de referência, por fornecerem medições diretas nos pontos definidos segundo a EN 1363-1, sendo determinantes para a verificação do critério de isolamento térmico (I). A termografia infravermelha permite complementar esta análise, possibilitando a identificação da distribuição espacial da temperatura, gradientes térmicos e eventuais zonas localizadas de aquecimento não captadas pelos termopares.

A comparação entre ambos os métodos visa avaliar a coerência dos resultados e analisar a influência da emissividade adotada na interpretação dos registos termográficos, aspeto particularmente relevante em ensaios de resistência ao fogo, nos quais as propriedades superficiais dos materiais evoluem devido ao aquecimento e aos processos iniciais de carbonização.

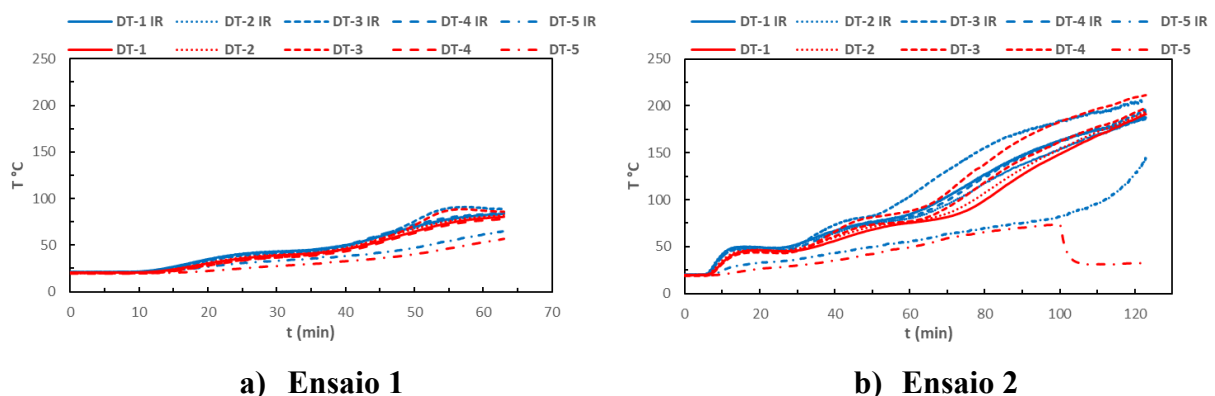


Figura 64. Comparação das temperaturas obtidas via câmara termográfica (IR) e dos termopares (DT), considerando emissividade 0,90.

A utilização de emissividade 0,90 aproxima as leituras da câmara termográfica dos valores registados pelos termopares, embora com pequenas discrepâncias esperadas devido à

textura superficial e às variações locais de emissividade. A Figura 64 demonstra que este valor fornece uma calibração razoável para análise térmica do painel.

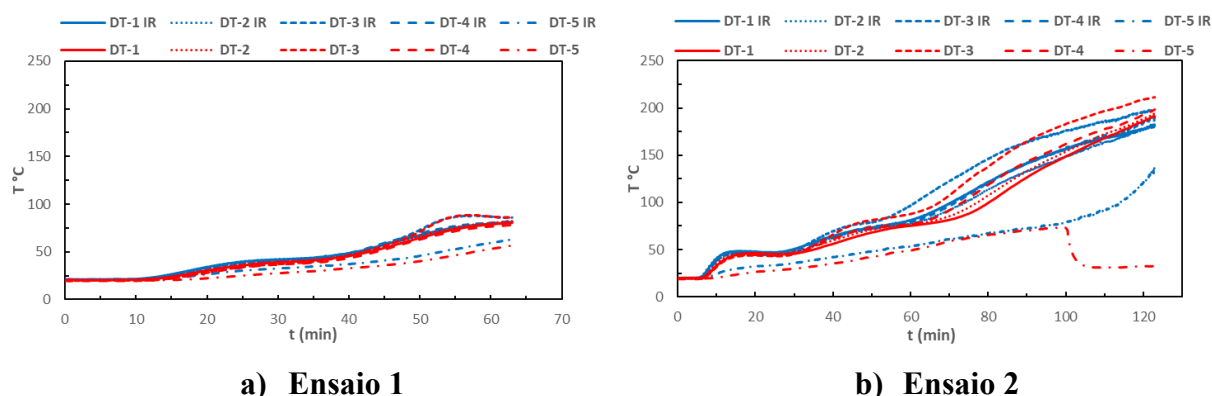


Figura 65. Comparação das temperaturas obtidas via câmara termográfica (IR) e dos termopares (DT), considerando emissividade 0,95.

Com uma emissividade de 0,95 observa-se uma maior coerência entre as curvas obtidas por termografia infravermelha e pelos termopares, sobretudo em gamas de temperatura intermédias, valor considerado adequado para superfícies escurecidas ou parcialmente carbonizadas. A comparação entre ambos o método mostrou que valores de emissividade entre 0,90 e 0,95 reproduzem de forma mais fiel o comportamento térmico real das superfícies analisadas, sendo este intervalo compatível com materiais lignocelulósicos, com o aumento de emissividade associado à carbonização e com recomendações normativas para superfícies não metálicas e heterogêneas.

O ajuste da emissividade permitiu alinhar as leituras infravermelhas com os valores registados pelos termopares, assegurando maior fiabilidade na medição remota e facilitando a comparação direta entre métodos. Importa salientar que, apesar da boa concordância obtida, a termografia infravermelha constitui um método complementar de análise.

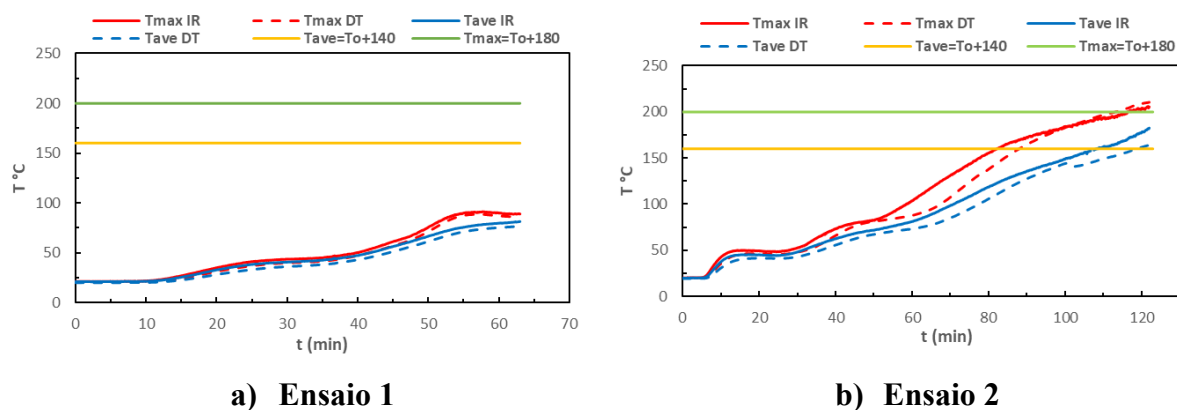


Figura 66. Determinação do tempo de resistência ao fogo considerando emissividade 0,90.

A representação do instante de incumprimento do critério de isolamento térmico baseia-se na evolução das temperaturas máxima e média do lado não exposto, calculadas com emissividade 0,90. No Ensaio 1, apesar da interrupção prematura do ensaio, foi possível estimar um tempo de resistência ao fogo com base na evolução térmica registada até ao momento da interrupção. De acordo com os critérios definidos na EN 1363-1, [79] estabelece-se para este ensaio um tempo de resistência ao fogo de 60 minutos, correspondente ao instante em que a temperatura média do lado não exposto ultrapassaria o limite regulamentar.

Segundo a EN 1363-1, o incumprimento do critério de isolamento térmico (I) ocorre quando a temperatura média no lado não exposto excede ( $T_0 + 140^{\circ}\text{C}$ ) ou quando a temperatura máxima em qualquer ponto excede ( $T_0 + 180^{\circ}\text{C}$ ), com base nas leituras dos termopares de contacto. No Ensaio 2, o primeiro limite a ser atingido corresponde à temperatura máxima medida por termopares (Tmax DT), ultrapassada aos cerca de 113 minutos, enquanto a temperatura média (Tave DT) apenas excede o limite em instantes posteriores, cerca de 118 minutos. Assim, o critério governante é o da temperatura máxima, fixando-se o tempo de resistência ao fogo do sistema em aproximadamente 113 minutos.

Importa salientar que, conforme estabelecido na EN 1363-1, a verificação do critério de isolamento térmico é realizada exclusivamente com base nas temperaturas medidas por termopares de contacto no lado não exposto do elemento ensaiado, [79].

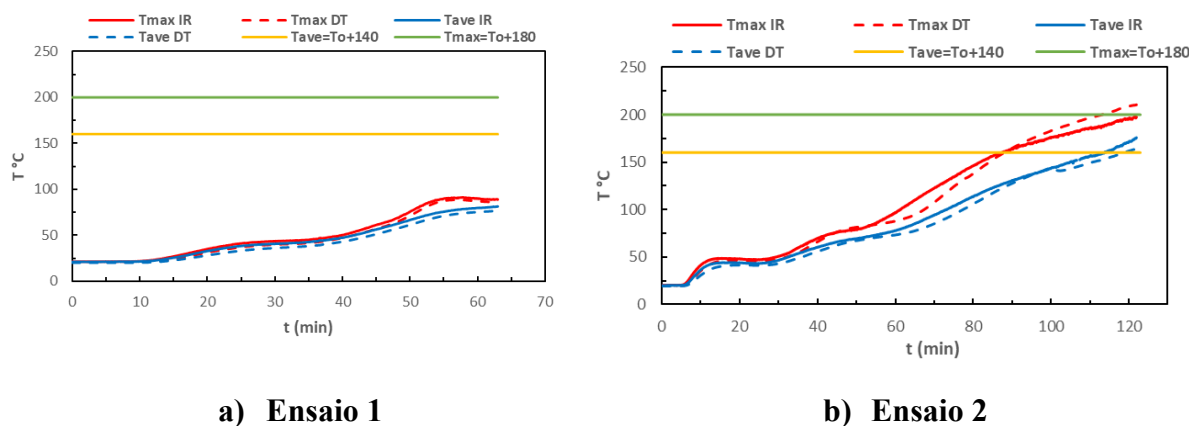


Figura 67. Determinação do tempo de resistência ao fogo considerando emissividade 0,95.

Gráfico que identifica o tempo de resistência ao fogo segundo os limites normativos da EN 1363-1, analisado com emissividade 0,95 para avaliação da sensibilidade do método.

De acordo com a EN 1363-1, o incumprimento do critério de isolamento térmico (I) ocorre quando o aumento da temperatura média no lado não exposto ultrapassa ( $T_0 + 140^{\circ}\text{C}$ ) ou quando a temperatura máxima em qualquer ponto excede ( $T_0 + 180^{\circ}\text{C}$ ), sendo esta avaliação

efetuada com base nas leituras dos termopares de contacto. No Ensaio 2, conforme evidenciado na Figura 67, o primeiro destes limites a ser atingido corresponde à temperatura máxima no lado não exposto medida por termopares ( $T_{max DT}$ ), que ultrapassa o valor regulamentar de ( $T_{max}$ ) aproximadamente aos 113 minutos, enquanto a temperatura média ( $T_{ave DT}$ ) apenas ultrapassa o limite de ( $T_{ave}$ ) em instantes posteriores, por volta dos 118 minutos. Assim, o critério governante é o da temperatura máxima, sendo o tempo de resistência ao fogo do sistema fixado em cerca de 113 minutos.

Tabela 3. Tempo de resistência ao fogo e classificação segundo o critério de isolamento térmico (I).

	<b>Tempo de resistência ao fogo (Termopar)</b>	<b>Tempo de resistência ao fogo (Termográfica)</b>	<b>Classe EN 13501-2</b>	<b>Emissividade</b>
Ensaio 1	60 min	60 min	I60	0,90 e 0,95
Ensaio 2	113 min	118 min	I90	0,90 e 0,95

Com base nos resultados do Ensaio 2, o tempo de resistência ao fogo do painel multicamada foi determinado a partir do critério de isolamento térmico (I), conforme definido na EN 1363-1. A ultrapassagem do limite associado à temperatura máxima no lado não exposto ocorre após mais de 90 minutos de exposição ao fogo, mas antes de atingir 120 minutos. Assim, de acordo com o sistema de classificação estabelecido na EN 13501-2, o desempenho ao fogo do elemento em estudo é classificado como I90, [85].

# Capítulo 6: Método Numérico

---

## 6.1. INTRODUÇÃO

A realização de ensaios experimentais de incêndio em escala real constitui, em geral, um processo dispendioso e complexo, exigindo elevados recursos laboratoriais e apresentando limitações associadas à repetibilidade e à análise paramétrica de diferentes configurações construtivas. Neste contexto, a simulação numérica assume um papel fundamental como ferramenta complementar, permitindo analisar o comportamento térmico dos elementos construtivos sob exposição ao fogo de forma controlada e eficiente, [66].

No presente trabalho, a modelação numérica foi desenvolvida com recurso ao software ANSYS Workbench, utilizando o método dos elementos finitos (MEF) para a resolução de problemas de transferência de calor. Este método baseia-se na discretização do domínio em elementos interligados por nós, permitindo obter soluções aproximadas para fenómenos governados por equações diferenciais, como a condução térmica em materiais sólidos.

As simulações enquadram-se numa análise térmica transiente, uma vez que o aquecimento associado à exposição ao fogo evolui ao longo do tempo, originando gradientes térmicos significativos, particularmente nas interfaces entre materiais com propriedades distintas. A modelação numérica permite, assim, avaliar a evolução temporal da temperatura no interior do sistema multicamada, complementando os resultados experimentais e contribuindo para uma melhor compreensão dos mecanismos de transferência de calor envolvidos.

De forma geral, esta abordagem possibilita reduzir os custos e o tempo associados à realização de ensaios experimentais, bem como analisar cenários alternativos de difícil reprodução em laboratório, sendo os resultados apresentados sob forma gráfica e numérica para facilitar a comparação com os dados experimentais.

## 6.2. ELEMENTO FINITO

Para a modelação numérica do comportamento térmico do painel multicamada foi utilizado o elemento finito PLANE293, disponível na biblioteca do ANSYS Mechanical APDL e automaticamente atribuído pelo solver no ambiente ANSYS Workbench para análises

térmicas bidimensionais. Este elemento é classificado como um elemento térmico 2D de ordem superior, sendo constituído por oito nós, com um grau de liberdade por nó, correspondente à temperatura.

De acordo com a documentação oficial do ANSYS (Mechanical APDL Element Reference), o PLANE293 utiliza funções de interpolação quadráticas, permitindo uma representação mais precisa do campo de temperaturas e sendo particularmente adequado para a simulação de problemas térmicos com gradientes elevados, como os associados à exposição ao fogo, [86].

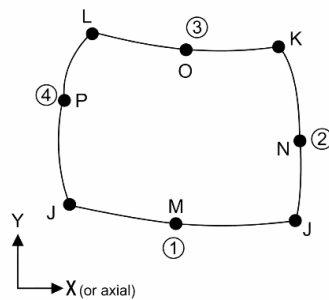


Figura 68. Geometria do PLANE293, Ansys Help, [86].

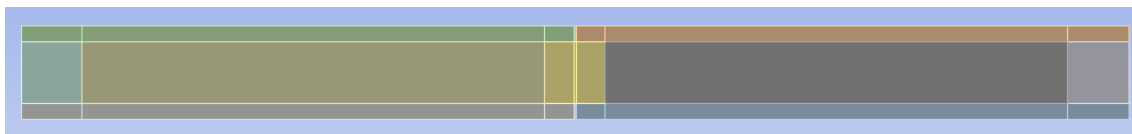
O elemento PLANE293 é aplicável a análises térmicas em regime estacionário ou transiente, permitindo a definição de propriedades térmicas dependentes da temperatura. A sua formulação bidimensional possibilita uma modelação eficiente do problema, reduzindo o custo computacional face a abordagens tridimensionais, sem comprometer a representação dos fenómenos de transferência de calor ao longo da espessura do painel, [86].

## 6.3. DEFINIÇÃO DO MODELO NUMÉRICO

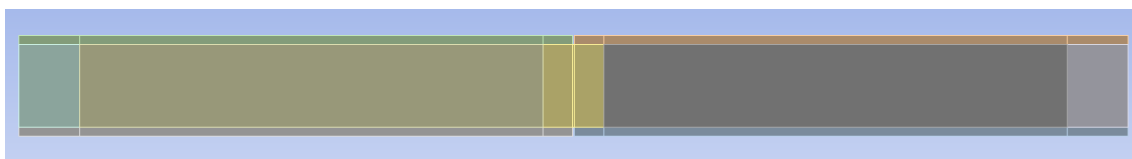
### 6.3.1. GEOMETRIA DO MODELO

A geometria do modelo numérico foi definida com base nas dimensões reais das amostras ensaiadas experimentalmente, de forma a garantir a coerência entre os ensaios laboratoriais e a simulação numérica. Atendendo à configuração do sistema e ao objetivo principal de analisar a propagação térmica ao longo da espessura do painel, foi adotada uma representação bidimensional (2D) do modelo, correspondente a uma secção transversal do elemento multicamada.

O painel modelado é constituído por camadas de MDF, isolamento em lã de rocha e montantes de madeira (pinho-abeto), reproduzindo a disposição construtiva do sistema Light Wood Frame ensaiado. A modelação em 2D permite representar adequadamente a condução de calor através das diferentes camadas do sistema, reduzindo o custo computacional relativamente a uma abordagem tridimensional, sem comprometer a análise do fenómeno térmico em estudo.



**a) Ensaio 1 (70x70) com MDF-19 mm**



**b) Ensaio 2 (70x95) com MDF-10 mm**

Figura 69. Representação geométrica bidimensional (2D) dos painéis multicamada ensaiados.

## **6.3.2. PROPRIEDADES DOS MATERIAIS**

As propriedades necessárias para a análise térmica dos materiais foram fundamentalmente extraídas da nova proposta do Eurocódigo 5 - EN 1995-1-2 (2020), [77] e encontram-se apresentadas no Anexo (Tabela A12-A14).

### **6.3.2.1. LÃ DE ROCHA**

As propriedades térmicas da lã de rocha utilizada na modelação numérica foram definidas com base nos valores apresentados na ficha técnica do material, considerando uma densidade nominal de  $70 \text{ kg/m}^3$ , correspondente ao material utilizado nos ensaios experimentais.

Na simulação numérica, a lã de rocha foi considerada como um material homogéneo e isotrópico, sendo caracterizada pelas propriedades térmicas relevantes para a análise em regime transiente, nomeadamente a condutividade térmica, o calor específico e a massa volúmica. Sempre que aplicável, estas propriedades foram definidas em função da temperatura, de forma

a representar adequadamente o comportamento térmico do material quando sujeito a exposição ao fogo. A respetiva tabela encontra-se representada no Anexo (Tabela A12).

### 6.3.2.2. MDF

As propriedades térmicas do MDF foram definidas de acordo com a ficha técnica do material utilizado, considerando que este é fornecido com um teor de humidade típico na ordem dos 7%, compatível com as condições de armazenamento e com o estado do material durante os ensaios. No modelo numérico, o MDF foi considerado homogéneo e isotrópico, sendo caracterizado pela massa volúmica ( $\rho$ ), condutividade térmica ( $\lambda$ ) e calor específico ( $c_p$ ), propriedades necessárias para a análise térmica transiente. Atendendo às diferenças de espessura dos painéis utilizados nos ensaios, foram definidos dois materiais de MDF no ANSYS, com massas volúmicas distintas conforme a espessura da placa:

- Ensaio 1: MDF com 19 mm, adotando-se  $\rho = 730 \text{ kg/m}^3$
- Ensaio 2: MDF com 10 mm, adotando-se  $\rho = 745 \text{ kg/m}^3$

As restantes propriedades térmicas ( $\lambda$  e  $c_p$ ) foram introduzidas de acordo com os valores adotados para o MDF na simulação, conforme apresentada no Anexo (Tabela A13)

### 6.3.2.3. PINHO-ABETO

Os montantes de madeira utilizados no sistema correspondem a pinho-abeto, para o qual é usualmente adotada uma massa volúmica de referência correspondente a um teor de humidade de 12%. No presente trabalho, considerou-se como valor de referência  $\rho_{12} = 450 \text{ kg/m}^3$ , de acordo com valores típicos reportados na literatura e em normas aplicáveis à madeira estrutural.

Contudo, as medições efetuadas em laboratório indicaram que a madeira apresentava um teor de humidade próximo de 7%, sendo, por isso, necessário proceder à correção da massa volúmica em função do teor de humidade, de modo a garantir a coerência entre as propriedades do material ensaiado e as propriedades introduzidas no modelo numérico.

Assumindo que a massa volúmica da madeira varia proporcionalmente com o teor de água, a relação entre a massa volúmica a um dado teor de humidade  $w$  a massa volúmica seca pode ser expressa por:

$$\rho_w = \rho_{sec} * (1 + w) \quad (7)$$

onde:

- $\rho_w$  é a massa volúmica à humidade  $w$ ,
- $\rho_{sec}$  é a massa volúmica da madeira seca (0% de humidade),
- $w$  é o teor de humidade (em valor decimal).

A partir do valor de referência a 12% de humidade, a massa volúmica seca foi determinada por:

$$\rho_{sec} = \frac{\rho_{12}}{1 + w} = \frac{450}{1,12} = 401,786 \text{ kg/m}^3 \quad (8)$$

De seguida, foi calculada a massa volúmica correspondente ao teor de humidade observado em laboratório (7%), através da expressão:

$$\rho_7 = \rho_{sec} * (1 + 0,07) = 429,911 \text{ kg/m}^3 \quad (9)$$

Assim, para efeitos da modelação numérica, foi adotado o valor  $\rho \approx 429,91 \text{ kg/m}^3$  para o pinho-abeto, correspondente ao teor de humidade real do material durante os ensaios experimentais. Esta abordagem permite representar de forma mais fiel as condições do ensaio e assegurar a coerência entre os resultados experimentais e a simulação térmica. Este procedimento é consistente com as práticas recomendadas para a consideração do efeito da humidade nas propriedades físicas da madeira.

As restantes propriedades térmicas do pinho-abeto foram definidas com base em valores reportados na literatura técnica e normas de referência, sendo apresentadas no Anexo (Tabela A14).

### 6.3.3. CONVERGÊNCIA DA MALHA

A definição da malha de elementos finitos constitui uma etapa fundamental na modelação numérica, uma vez que o tamanho dos elementos da malha influencia diretamente a precisão dos resultados e o custo computacional da simulação. Com o objetivo de garantir resultados independentes da malha, foi realizada uma análise de convergência, baseada no refinamento progressivo do tamanho característico dos elementos.

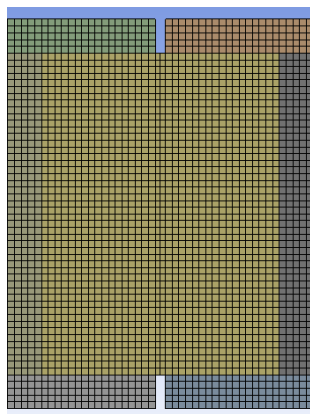


Figura 70. Detalhe da malha de elementos finitos na região central do painel.

Para esta análise, foram consideradas várias malhas com tamanhos de elemento compreendidos entre 10, 8, 5, 3, 2 e 1 mm, mantendo-se constantes as restantes condições do modelo, nomeadamente as propriedades dos materiais, as condições de fronteira e os parâmetros temporais da análise térmica transiente. A convergência foi avaliada através da temperatura num ponto de referência, num instante fixo de 1 hora de exposição, selecionado de forma a ser representativo do comportamento térmico do sistema.

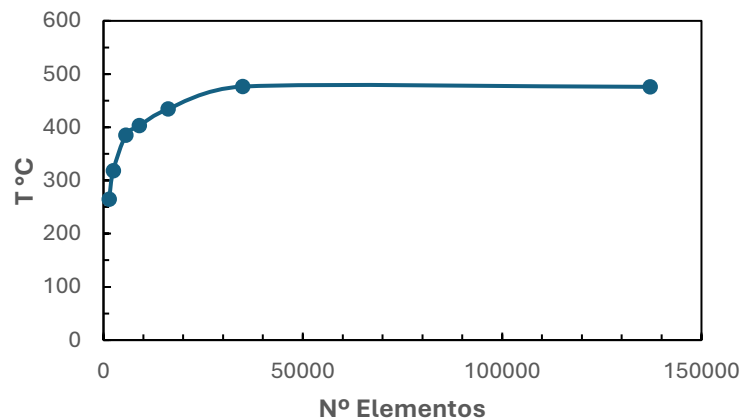


Figura 71. Evolução da temperatura no ponto de referência ( $T = 1$  h) em função do número de elementos da malha.

Os resultados obtidos evidenciam uma variação significativa da temperatura para malhas mais grosseiras, observando-se uma redução progressiva dessa variação à medida que a malha é refinada. Verifica-se que, para tamanhos de elemento inferiores a 3 mm, a diferença entre os valores de temperatura calculados diminui substancialmente, sendo praticamente desprezável entre as malhas de 2 mm e 1 mm, o que indica a convergência da solução numérica.

Tendo em consideração este comportamento, bem como o compromisso entre a precisão dos resultados e o custo computacional, foi adotada como malha final a malha com tamanho de 2 mm, uma vez que esta apresenta valores de temperatura praticamente estabilizados quando comparados com malhas mais finas, não se justificando o aumento significativo do tempo de cálculo associado a um refinamento adicional da malha. A Figura 71 apresenta, respetivamente, os valores de temperatura obtidos para as diferentes discretizações analisadas e a evolução da temperatura em função do refinamento da malha. A tabela correspondente ao gráfico encontra-se apresentada no Anexo (Tabela A6).

### 6.3.3.1. CONTINUIDADE DA MALHA E NODE MERGE

Na modelação do sistema multicamada, os diferentes materiais constituintes do painel (MDF, lã de rocha e montantes de madeira) encontram-se em contacto direto, sendo essencial garantir a continuidade térmica nas interfaces entre camadas. Para esse efeito, foi utilizado o procedimento de fusão de nós (node merge) entre as malhas adjacentes.

A utilização do node merge permite assegurar que os nós coincidentes nas interfaces entre materiais partilham os mesmos graus de liberdade, garantindo a transferência correta de calor por condução entre as diferentes camadas do sistema. Este procedimento evita a criação de descontinuidades artificiais na malha, que poderiam conduzir a resistências térmicas numéricas não físicas ou a erros na previsão dos gradientes térmicos, [86].

Adicionalmente, a fusão de nós contribui para uma melhor estabilidade numérica e convergência da solução, sendo particularmente adequada em modelos térmicos onde os materiais se encontram perfeitamente ligados, como no caso do sistema Light Wood Frame analisado no presente trabalho.

### 6.3.4. CONDIÇÕES DE FRONTEIRA

As condições de fronteira térmicas do modelo numérico foram definidas de forma a reproduzir as condições de exposição ao fogo dos ensaios experimentais realizados em forno, de acordo com a curva padrão ISO 834, conforme estabelecido na EN 1363-1, [79]. A transferência de calor entre o ambiente e a superfície do painel foi modelada considerando os mecanismos de convecção e radiação térmica.

#### 6.3.4.1. CONVECÇÃO

O fluxo de calor por convecção foi descrito através da lei de Newton do arrefecimento, dada por:

$$q_{conv} = h_c \times (\theta_g - \theta_s) \quad (10)$$

em que:

$q_{conv}$  é o fluxo de calor convectivo [ $W/m^2$ ],

$h_c$  é o coeficiente de convecção [ $W/m^2K$ ],

$\theta_g$  é a temperatura do gás envolvente [ $^{\circ}C$ ],

$\theta_s$  é a temperatura da superfície do elemento [ $^{\circ}C$ ].

No lado exposto ao fogo, foi adotado um coeficiente de convecção constante de  $h_c = 25 \text{ W/m}^2\text{K}$ , valor recomendado no Eurocódigo 1 - Parte 1-2, [87] para superfícies expostas a incêndio normalizado. A temperatura do gás foi imposta como função do tempo segundo a curva ISO 834 (Equação 12). Enquanto no lado não exposto, foi considerada convecção natural para o ambiente, com um coeficiente de convecção inferior,  $h_c = 4 \text{ W/m}^2\text{K}$ , e temperatura ambiente constante de  $20^\circ\text{C}$ , representativa das condições laboratoriais.

A utilização de coeficientes de convecção constantes constitui uma aproximação habitualmente empregue em análises térmicas normalizadas, permitindo representar de forma simplificada a transferência de calor por convecção entre os gases quentes e a superfície do elemento. Esta abordagem é consistente com o enquadramento normativo da curva ISO 834 e adequada ao objetivo do modelo numérico, que visa reproduzir o comportamento térmico global do painel, não sendo considerada a variação local do coeficiente de convecção ao longo do tempo ou da superfície, [87].

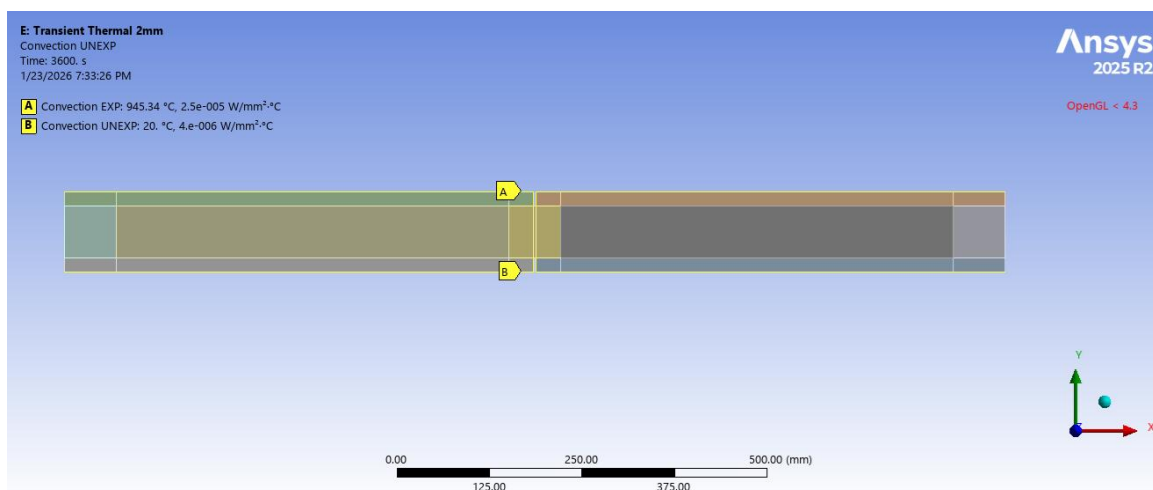


Figura 72. Condições de convecção aplicadas no modelo numérico do Ensaio 1, A- Face exposta e B- Face não exposta.

Para o Ensaio 2 foram adotadas condições de convecção idênticas às do Ensaio 1, diferenciando-se apenas a duração da exposição térmica, pelo que não se apresenta figura adicional, sendo respetiva representação incluída no Anexo (A18).

#### 6.3.4.2. RADIAÇÃO

A transferência de calor por radiação foi modelada com base na lei de Stefan-Boltzmann, expressa por:

$$q_{rad} = \varepsilon \times \sigma \times [(\theta_s + 273)^4 - ((\theta_{amb} + 273)^4)] \quad (11)$$

em que:

$q_{rad}$  é o fluxo de calor radiativo [ $W/m^2$ ];

$\varepsilon$  é a emissividade superficial do material,

$\sigma$  é a constante de Stefan-Boltzmann ( $5,67 \times 10^{-8} W/m^2K^4$ ),

$\theta_s$  é a temperatura da superfície [ $^{\circ}C$ ],

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

Foi adotada uma emissividade constante de  $\varepsilon = 0,8$ , valor recomendado para materiais à base de madeira em situação de incêndio, [87]. No lado exposto, a temperatura ambiente radiativa foi definida de acordo com a curva ISO 834 (Equação 12), enquanto no lado não exposto foi considerada igual à temperatura ambiente constante de  $20^{\circ}C$ .

$$\theta_g = 20 + 345 * \log(8 * t + 1) \quad (12)$$

em que:

$\theta_g$  é a temperatura dos gases quentes (atmosfera) do compartimento em chamas [ $^{\circ}C$ ];

$t$  é tempo [min].

A adoção de uma emissividade constante constitui uma simplificação do fenómeno físico, uma vez que, em situação real de incêndio, a emissividade da superfície pode variar com a degradação térmica da madeira e a formação da camada carbonizada. No entanto, esta abordagem é amplamente utilizada em modelos térmicos normalizados e é considerada adequada para a análise global do comportamento térmico do painel, [87].

Tal como na convecção, para o Ensaio 2 foram consideradas condições de radiação idênticas às do Ensaio 1, diferindo apenas a duração da exposição térmica, encontrando-se a respetiva representação incluída no Anexo (A19).

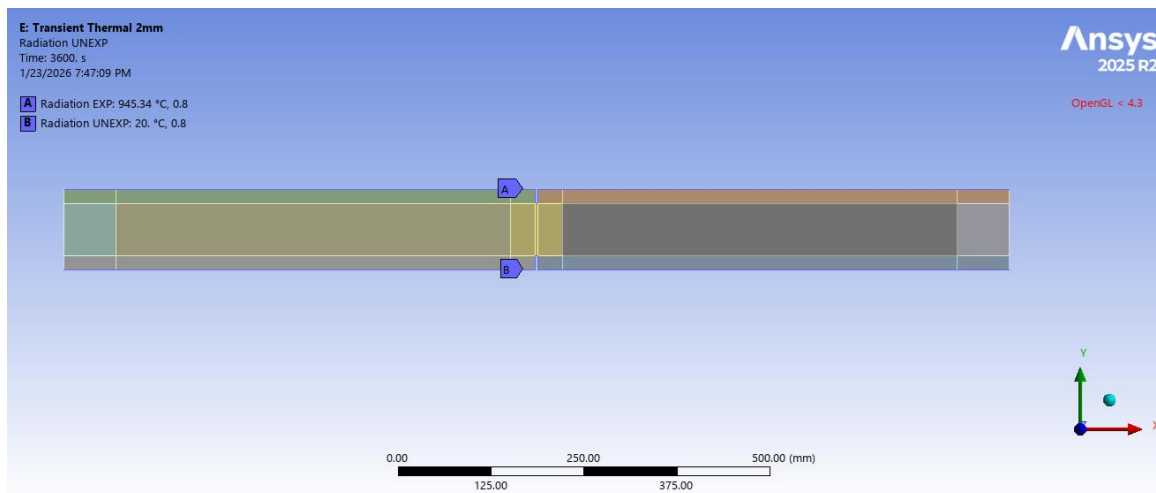


Figura 73. Condições de radiação aplicadas no modelo numérico do Ensaio 1, A- Face exposta e B- Face não exposta.

### 6.3.5. PONTOS DE MONITORIZAÇÃO NUMÉRICA

Com o objetivo de permitir a comparação direta entre os resultados experimentais e os resultados obtidos por simulação numérica, foram definidos no modelo 2D pontos de monitorização coincidentes, tanto quanto possível, com as posições dos termopares instalados durante os ensaios em forno. Estes pontos foram utilizados para registar a evolução temporal da temperatura e avaliar o desempenho térmico do painel nas zonas mais representativas do comportamento ao fogo.

No ANSYS Workbench, as localizações dos pontos de monitorização foram implementadas através da criação de sistemas de coordenadas locais (Coordinate Systems) associados às posições de interesse, permitindo a colocação consistente das sondas de temperatura (Temperature Probes) e a extração dos resultados ao longo do tempo. A seleção dos pontos incidu sobre três regiões principais: face exposta, face não exposta e interior do painel (montante e isolamento), de acordo com a instrumentação experimental em ambos os ensaios, [79].

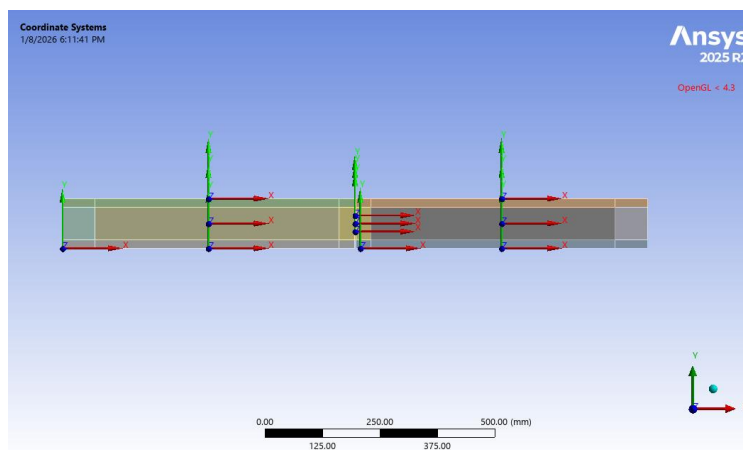


Figura 74. Implementação dos pontos de monitorização através de sistemas de coordenadas, correspondentes às posições dos termopares experimentais, Ensaio 1.

Em particular, foram considerados os pontos BT1 e BT2 na face exposta ao fogo, DT1, DT2 e DT5 na face não exposta, T1, T2 e T3 no montante central, bem como TI2 e TI5 no interior da camada de lã de rocha. Esta estratégia assegura que a comparação entre ensaio e simulação se baseia em grandezas medidas em localizações equivalentes, reduzindo a incerteza associada a diferenças de posicionamento. Os resultados numéricos foram obtidos a partir da extração da temperatura nos pontos de monitorização definidos no modelo, correspondentes às posições dos termopares utilizados nos ensaios experimentais. A evolução temporal da temperatura foi registada ao longo de toda a simulação, permitindo a comparação direta entre os resultados numéricos e experimentais. Para efeitos de análise, foram considerados tanto os valores instantâneos como os instantes correspondentes às durações dos ensaios experimentais, nomeadamente 60 minutos no Ensaio 1 e 120 minutos no Ensaio 2. As imagens ilustrativas da localização dos termopares e dos pontos de monitorização numérica encontram-se apresentadas no Anexo (A22 e A23).

## 6.4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 6.4.1. REPRESENTAÇÃO DO CAMPO TÉRMICO

Com o objetivo de caraterizar a distribuição espacial da temperatura no painel multicamada ao longo do tempo, apresentam-se nesta secção os campos térmicos obtidos por simulação numérica para instantes representativos dos ensaios realizados. A análise incide

sobre vistas central e lateral do painel, por permitirem uma leitura clara dos gradientes térmicos nas diferentes camadas constituintes (MDF, lâ de rocha e montante de madeira).

Para o Ensaio 1, com duração total de 60 minutos, os campos térmicos são apresentados para os instantes  $t = 30$  min e  $t = 60$  min, correspondentes a uma fase intermédia e ao final do ensaio. Para o Ensaio 2, com duração de 120 minutos, consideram-se os instantes  $t = 60$  min e  $t = 120$  min, permitindo uma análise consistente da evolução térmica.

A representação do campo térmico em secção transversal não é considerada, uma vez que, devido à discretização por elementos finitos e à reduzida espessura do modelo bidimensional, não se observam variações significativas nessa direção. As figuras correspondentes encontram-se apresentadas no Anexo A (A20 e A21).

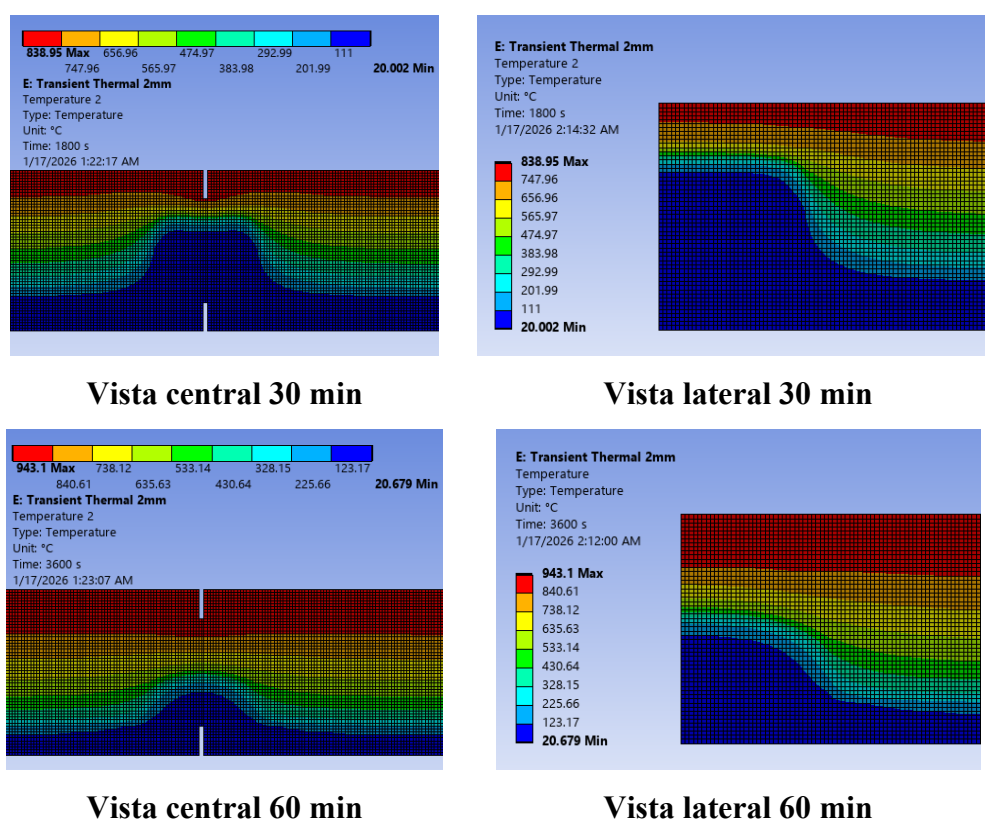
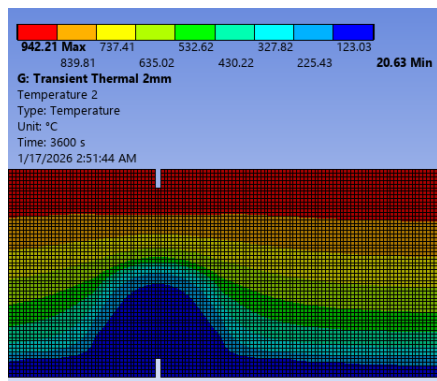
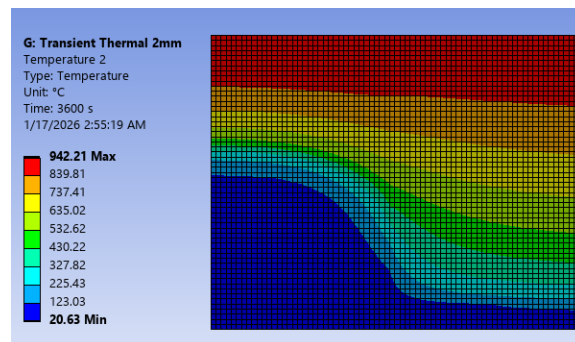


Figura 75. Campo térmico obtido por simulação numérica para o Ensaio 1 (60 min).

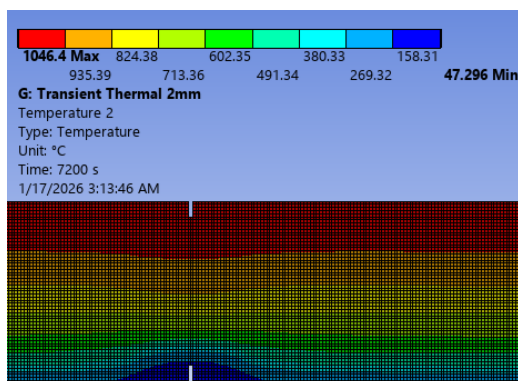
No Ensaio 1 observa-se um gradiente térmico bem definido, com temperaturas máximas na face exposta e atenuação progressiva ao longo da espessura do painel. A partir dos 30 minutos surge uma perturbação local na região do montante central, que se intensifica aos 60 minutos, associada à maior condutividade térmica da madeira, enquanto a lâ de rocha mantém uma atuação eficaz na limitação da propagação do calor.



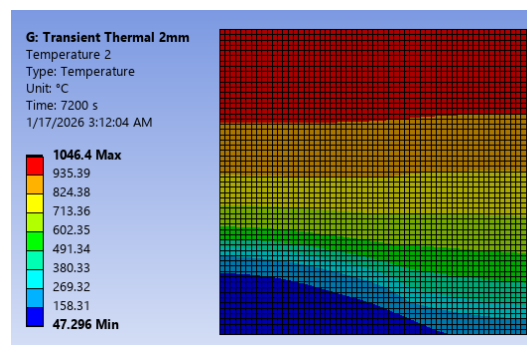
**Vista central 60 min**



**Vista lateral 60 min**



**Vista central 120 min**



**Vista lateral 120 min**

Figura 76. Campo térmico obtido por simulação numérica para o Ensaio 2 (120 min).

No Ensaio 2, a evolução do campo térmico apresenta uma intensificação significativa dos gradientes de temperatura, em particular para o instante de 120 minutos. A influência do montante central torna-se claramente visível, promovendo uma maior transferência de calor em profundidade quando comparado com o Ensaio 1. Apesar disso, o isolamento térmico continua a desempenhar um papel relevante na redução da propagação do calor para a face não exposta, sendo a diferença entre as vistas central e lateral indicativa da heterogeneidade térmica induzida pelos elementos estruturais do painel.

#### 6.4.2. COMPARAÇÃO DO ENSAIO EXPERIMENTAL E MÉTODO NUMÉRICO

Com o objetivo de avaliar a capacidade do modelo numérico em reproduzir o comportamento térmico observado experimentalmente, procede-se à comparação direta entre os resultados experimentais e os obtidos por simulação numérica, através da representação

conjunta das evoluções temporais de temperatura medidas pelos termopares e das temperaturas extraídas nos pontos de monitorização equivalentes do modelo.

A comparação é efetuada para diferentes localizações do painel, nomeadamente na face exposta (BT1 e BT2), na face não exposta (DT1, DT2 e DT5), no interior do isolamento térmico (TI2 e TI5) e no montante central de madeira (T1, T2 e T3), permitindo avaliar a resposta térmica do sistema multicamada ao longo da espessura e em zonas estruturalmente relevantes, bem como a capacidade do modelo em captar os gradientes térmicos observados experimentalmente.

Importa salientar que o modelo numérico considera condições idealizadas de exposição ao fogo e simetria geométrica do painel, enquanto nos ensaios experimentais podem ocorrer variações locais do aquecimento associadas à instabilidade das chamas, à distribuição do fluxo térmico e aos fenómenos de degradação e combustão da madeira.

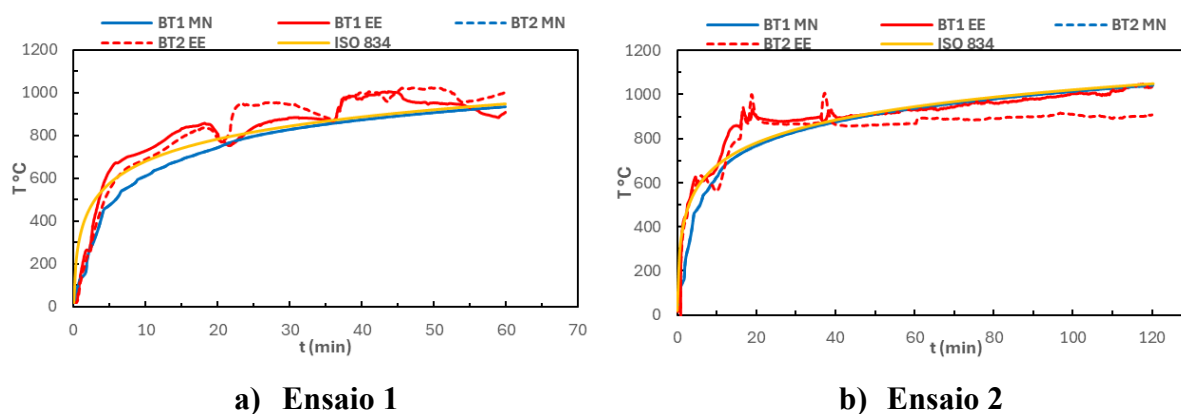


Figura 77. Comparação entre os resultados experimentais e numéricos da evolução temporal da temperatura nos termopares BT1 e BT2.

A análise conjunta dos resultados dos Ensaios 1 e 2 para os termopares BT1 e BT2, localizados na face exposta ao fogo, permite avaliar a capacidade do modelo numérico em reproduzir o aquecimento superficial do painel sob a curva padrão ISO 834. Em ambos o ensaio se observa uma boa concordância global entre os resultados numéricos e experimentais, sobretudo após os instantes iniciais de exposição.

No Ensaio 1, os registos experimentais apresentam oscilações e aumentos bruscos de temperatura nos primeiros 20-30 minutos, associados a perturbações ocorridas durante o ensaio, nomeadamente à libertação de chamas na interface entre o forno e o painel. Estas flutuações não são reproduzidas pelo modelo numérico, que assume uma exposição térmica uniforme, resultando numa evolução mais suave da temperatura. Ainda assim, nos instantes finais, observa-se uma aproximação entre as curvas numéricas e experimentais. No Ensaio 2, a

evolução térmica experimental revelou-se mais estável, verificando-se uma melhor concordância com os resultados numéricos. As diferenças observadas nos instantes iniciais, com um aquecimento ligeiramente mais rápido registado pelos termopares experimentais, podem ser atribuídas à menor espessura do painel e aos efeitos da combustão da madeira, não explicitamente considerados no modelo.

Importa salientar que, no modelo numérico, os termopares BT1 e BT2 apresentam curvas praticamente coincidentes, em virtude da simetria geométrica e térmica assumida e da aplicação de um fluxo térmico uniforme na face exposta.

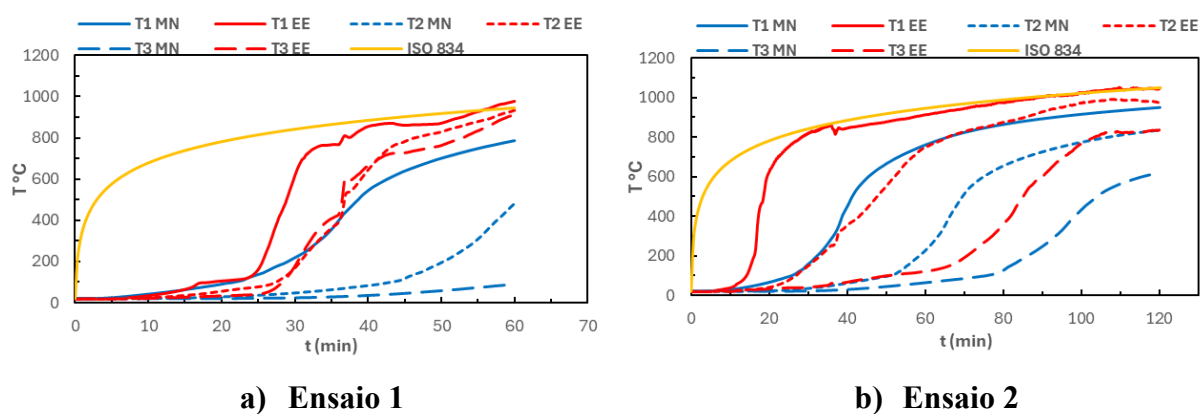


Figura 78. Comparação entre os resultados experimentais e numéricos da evolução temporal da temperatura nos termopares T1, T2 e T3.

A comparação entre os resultados experimentais (EE) e numéricos (MN) para os termopares localizados no montante central (T1, T2 e T3) mostra que o modelo numérico reproduz adequadamente a tendência global de aquecimento, apresentando, contudo, uma resposta mais regular e gradual do que a observada experimentalmente. Esta diferença é expectável, uma vez que o modelo assume condições idealizadas de exposição térmica uniforme e propriedades homogéneas, enquanto nos ensaios experimentais podem ocorrer perturbações locais associadas à instabilidade das chamas, à montagem e à natureza combustível da madeira.

No Ensaio 1, o EE evidencia um aumento muito brusco da temperatura por volta dos 20-25 minutos, particularmente em T1 e T2, associado à libertação de chamas na interface forno-painel, conduzindo a um aquecimento localizado e acelerado. Este efeito não é reproduzido no MN, que aplica condições térmicas controladas e uniformes, resultando numa evolução mais suave da temperatura. No Ensaio 2, a evolução experimental é globalmente mais estável, verificando-se uma melhor concordância com o MN, embora o EE apresente um

aquecimento ligeiramente mais precoce nos instantes iniciais, coerente com a menor espessura do MDF e a consequente facilitação da transferência de calor até ao montante central.

Em ambos os ensaios, o MN apresenta curvas previsíveis e próximas entre si, em resultado da simetria geométrica do painel e da aplicação uniforme das condições térmicas. A inclusão da curva ISO 834 nos gráficos permite enquadrar a severidade térmica imposta e confirmar que, apesar das discrepâncias locais entre EE e MN, a comparação permanece coerente com o cenário de incêndio padronizado.

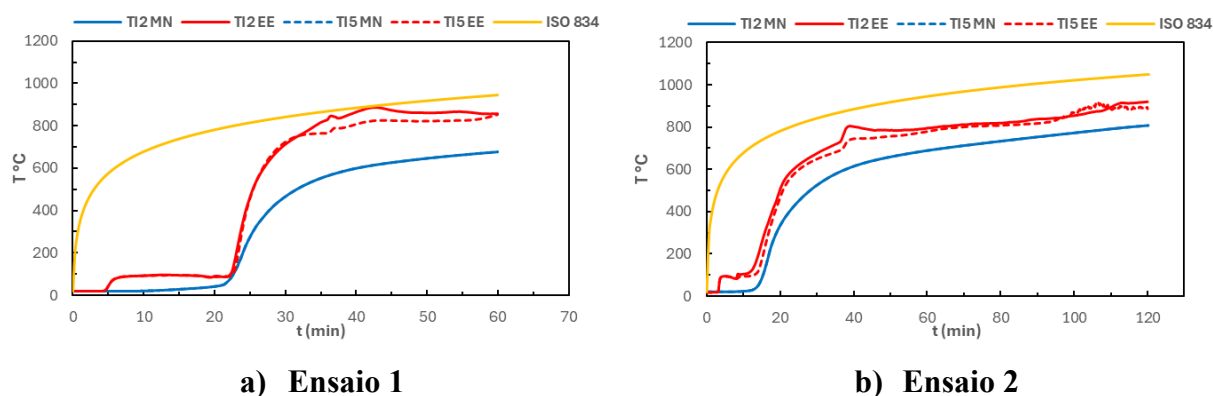


Figura 79. Comparação entre os resultados experimentais e numéricos da evolução temporal da temperatura nos termopares TI2 e TI5.

A análise conjunta dos resultados experimentais (EE) e numéricos (MN) obtidos nos termopares TI2 e TI5, localizados no interior da camada de isolamento, evidencia diferenças claras entre os dois ensaios e permite avaliar as potencialidades e limitações do modelo numérico. De um modo geral, o MN apresenta uma evolução térmica gradual e contínua, com valores semelhantes entre TI2 e TI5, resultado da simetria geométrica do painel e da aplicação de condições térmicas uniformes na simulação.

No Ensaio 1, o EE revela um aumento significativo da temperatura por volta dos 20-30 minutos, observado simultaneamente em ambos os termopares, associado à libertação de chamas e gases quentes na interface forno-painel, que promoveu uma exposição térmica direta do isolamento. Este fenómeno não é reproduzido pelo MN, originando diferenças marcadas entre os resultados experimentais e numéricos nesta fase do ensaio.

No Ensaio 2, embora as temperaturas experimentais aumentem mais cedo e mais rapidamente do que as numéricas, a discrepância entre EE e MN é menos pronunciada, refletindo a maior estabilidade do ensaio, a ausência de libertação significativa de chamas e a menor espessura do painel. Ainda assim, os valores experimentais mantêm-se superiores aos

numéricos, evidenciando a influência da combustão da madeira e de fenômenos de degradação térmica não considerados explicitamente no modelo.

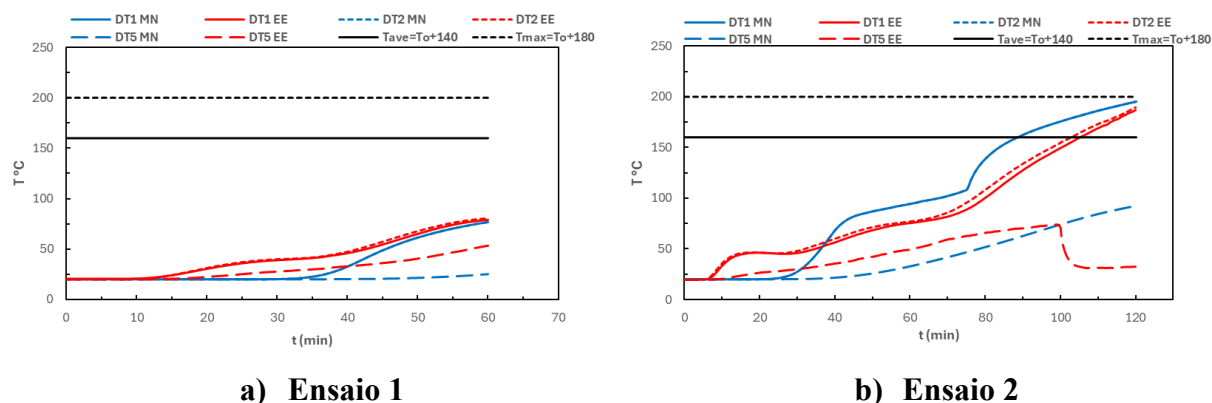


Figura 80. Comparação entre os resultados experimentais e numéricos da evolução temporal da temperatura nos termopares DT1, DT2 e DT5.

A análise dos termopares localizados na face não exposta ao fogo (DT1, DT2 e DT5) permite avaliar o critério de isolamento térmico com base na temperatura média ( $T_{ave}$ ) e na temperatura máxima ( $T_{max}$ ), sendo considerados os limites normativos  $T_{ave} = T_0 + 140^{\circ}\text{C}$  e  $T_{max} = T_0 + 180^{\circ}\text{C}$ . No Ensaio 1, tanto os resultados experimentais como os numéricos apresentam temperaturas claramente inferiores a estes limites ao longo dos 60 minutos de exposição, não se verificando incumprimento do critério de isolamento térmico. No Ensaio 2, devido ao maior tempo de exposição (120 minutos), observa-se uma evolução térmica mais severa na face não exposta. Os termopares DT1 e DT2 ultrapassam o limite de temperatura média ( $T_{ave}$ ), confirmando o incumprimento do critério de isolamento térmico, comportamento observado tanto experimentalmente como numericamente. No entanto, verificam-se diferenças nos instantes de ultrapassagem, ocorrendo no modelo numérico por volta dos 90 minutos, enquanto no ensaio experimental a ultrapassagem é registada mais tardiamente, cerca dos 104 minutos para DT2 e 107 minutos para DT1. Relativamente ao termopar DT5, o modelo numérico apresenta uma evolução progressiva e contínua da temperatura, coerente com um regime de condução idealizado. No ensaio experimental do Ensaio 2, observa-se uma queda súbita da leitura nos instantes finais, fenómeno não reproduzido numericamente e compatível com efeitos experimentais localizados, como a perda de contacto.

Em síntese, a comparação confirma que o modelo numérico reproduz adequadamente a tendência global dos termopares DT e que, no Ensaio 2, ocorre incumprimento do critério de isolamento térmico devido à ultrapassagem do limite de temperatura média na face não exposta.

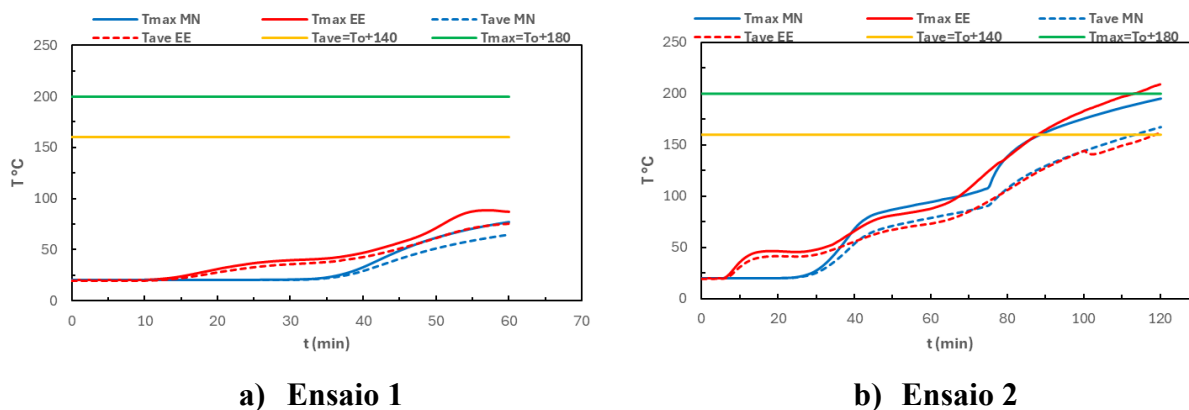


Figura 81. Comparação entre os resultados experimentais e numéricos da evolução temporal da temperatura.

A análise das temperaturas média (Tave) e máxima (Tmax) na face não exposta permite avaliar o critério de isolamento térmico (I) e determinar o tempo de resistência ao fogo do painel, sendo considerados os limites regulamentares  $Tave = T_0 + 140^{\circ}\text{C}$  e  $Tmax = T_0 + 180^{\circ}\text{C}$ .

No Ensaio 1, tanto os resultados experimentais como os numéricos apresentam uma evolução térmica moderada ao longo dos 60 minutos de exposição, mantendo-se Tave e Tmax sempre abaixo dos limites regulamentares, não se verificando incumprimento do critério de isolamento térmico e observando-se boa concordância entre ensaio e simulação. No Ensaio 2, devido ao maior tempo de exposição (120 minutos), verifica-se uma evolução térmica mais severa na face não exposta. A análise conjunta indica que o critério governante para a perda de isolamento térmico é o da temperatura máxima (Tmax), que no ensaio experimental ultrapassa o limite  $T_0 + 180^{\circ}\text{C}$  cerca dos 113 minutos, definindo o tempo de resistência ao fogo do painel.

O limite da temperatura média (Tave) é excedido em instantes posteriores, ocorrendo aproximadamente aos 115 minutos no modelo numérico e aos 119 minutos no ensaio experimental, confirmando que é a temperatura máxima que governa o critério no Ensaio 2.

De forma global, o modelo numérico reproduz adequadamente a sequência observada experimentalmente, prevendo a ultrapassagem do critério de isolamento em intervalos temporais próximos dos registados no ensaio real. As diferenças nos instantes exatos de ultrapassagem são atribuídas às simplificações do modelo e à não consideração de fenómenos locais, como a combustão da madeira e variações do fluxo térmico na superfície exposta.

Tabela 4. Tempo de resistência ao fogo e classificação segundo o critério de isolamento térmico (I),

	<b>Tempo de resistência ao fogo (EE)</b>	<b>Tempo de resistência ao fogo (MN)</b>	<b>Classe EN 13501-2</b>
Ensaio 1	60 min	60 min	I60
Ensaio 2	113 min	115 min	I90

No Ensaio 1, o critério de isolamento (I) não foi ultrapassado durante os 60 min de exposição assim, o tempo indicado corresponde à duração do ensaio/simulação (resistência  $\geq$  60 min).

A análise apresentada ao longo deste capítulo permitiu comparar, de forma detalhada, os resultados obtidos nos ensaios experimentais com os resultados da simulação numérica, para diferentes localizações no painel e diferentes tempos de exposição ao fogo. As semelhanças e diferenças observadas entre ambos os métodos fornecem uma base sólida para a interpretação do comportamento térmico do sistema e para a avaliação da adequação do modelo numérico, sendo os principais aspetos discutidos no capítulo seguinte.

# Capítulo 7: Conclusão e Trabalhos Futuros

---

## 7.1. CONCLUSÃO

A prevenção de incêndio deve ter início muito antes de uma emergência acontecer.

A presente dissertação teve como objetivo a avaliação do comportamento ao fogo de sistemas construtivos Light Wood Frame, através da realização de ensaios experimentais segundo a curva padrão ISO 834 e do desenvolvimento de um modelo numérico de transferência de calor, com enfoque no critério de isolamento térmico (I). Os resultados experimentais demonstraram que, no Ensaio 1, o sistema manteve o critério de isolamento térmico durante 60 minutos (I60), apesar da ocorrência de perturbações térmicas localizadas.

No Ensaio 2, a perda do isolamento térmico ocorreu aos 113 minutos, devido à ultrapassagem do limite de temperatura máxima, conduzindo à classificação do sistema como I90.

O modelo numérico desenvolvido apresentou uma capacidade satisfatória para reproduzir o comportamento térmico global do sistema, prevendo o instante de falha do critério de isolamento no Ensaio 2 com boa concordância face aos resultados experimentais. As discrepâncias observadas são atribuídas às simplificações inerentes ao modelo, que não reproduz explicitamente fenómenos como a pirólise da madeira e a formação da camada carbonizada.

De forma global, o sistema LWF analisado, constituído por revestimento em MDF, lâ de rocha e montantes de madeira, apresentou um desempenho ao fogo adequado, cumprindo os requisitos normativos associados ao critério de isolamento térmico (I) e confirmando a sua viabilidade para aplicações construtivas.

## 7.2. TRABALHOS FUTUROS

Os resultados obtidos neste trabalho permitem identificar várias linhas de desenvolvimento futuro que poderão contribuir para um melhor conhecimento do comportamento ao fogo de sistemas construtivos Light Wood Frame. Uma primeira vertente consiste na realização de ensaios experimentais e simulações numéricas com diferentes painéis

derivados de madeira e materiais isolantes, de modo a avaliar a sua influência na evolução térmica e no tempo de resistência ao fogo.

Adicionalmente, considera-se relevante o estudo do efeito de maiores espessuras de revestimento, tanto experimental como numericamente, uma vez que o aumento da espessura pode atrasar a propagação térmica e conduzir a classificações mais favoráveis segundo a EN 13501-2.

Do ponto de vista experimental, recomenda-se a realização de um maior número de ensaios com sistemas semelhantes, incluindo amostras com a mesma espessura, de forma a avaliar com maior rigor as diferenças na taxa de carbonização associadas a distintos materiais e configurações construtivas. A comparação entre elementos de madeira com e sem proteção isolante permitiria igualmente analisar de forma direta a eficácia dos revestimentos na melhoria da resistência ao fogo.

Por fim, sugere-se a melhoria das condições de ensaio, nomeadamente através do reforço do isolamento térmico entre o forno e o painel, com o objetivo de reduzir perturbações locais e garantir um campo térmico mais uniforme, evitando fenómenos indesejados como a libertação de chamas observada no Ensaio 1.

## Referências

---

- [1] Naardin, Filip, “A evolução da madeira como material de construção ao longo dos séculos,” 2024, 14 de fevereiro.
- [2] ESPINDOLA, Luciana da Rosa, “O wood frame na produção de habitação social no Brasil,” Tese (Doutorado em Arquitetura, Urbanismo e Tecnologia) - Instituto de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, 2017.
- [3] PEREIRA, Caio, “O que é, características, vantagens e desvantagens,” Escola Engenharia, 2018.
- [4] CasaNovaEco, “Sistema Light Wood Framing,” 2025. Disponível em: <https://www.casanovaeco.pt/lwf-light-wood-framing>. Acesso em Fev-2025.
- [5] New-Edge, “Light Wood Frame,” 2020. Disponível em: <https://www.new-edge.pt/pt/cross-laminated-timber/light-wood-frame>. Acesso em Fev-2025.
- [6] INWOODIE, J. M. Timber: Its Nature and Behaviour. 2nd ed. London: Taylor & Francis, 2000.
- [7] P. J. V. Gouveia, “Resistência ao fogo de estruturas em madeira com e sem proteção,” Tese de Mestrado, Escola Superior de Tecnologia e Gestão. Instituto Politécnico de Bragança, 2018.
- [8] P. C. B. Borges, “Caraterização das propriedades físicas e mecânicas da madeira de carvalho e de castanho do nordeste transmontano,” Tese de Mestrado, Escola Superior de Tecnologia e Gestão. Instituto Politécnico de Bragança, 2013.
- [9] M. J. M. Figueroa and P. D. Moraes, “Comportamento da madeira a temperaturas elevadas,” *Ambient. Construído*, vol. 9, no. 4, pp. 157–174, 2009.
- [10] E. M. Pinto, “Determinação de um modelo de taxa de carbonização transversal a Grã para o Eucalyptus Citriodora e Eucalyptus Grandis,” Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, 2005.
- [11] A. M. Guerra, J. A. Coelho, and R. E. Leitão, “Fenomenologia da combustão e extintores,” vol. VII. Escola Nacional de Bombeiros: Quinta do Anjinho, 2006.
- [12] J. Coutinho, *Materiais de Construção 1: Madeiras*, 1999.
- [13] R. M. L. Sousa, “Avaliação experimental da estabilidade dimensional de elementos em pinho bravo e madeira tratada termicamente,” Tese de Mestrado, Escola de Engenharia. Universidade do Minho, 2012.

- [14] Ezequiel, João, “Quercus: a grande diversidade de carvalhões em Portugal,” Florestas.pt, 30 de julho de 2021.
- [15] Paim, A, “Divisão Gimnosperma. Biologia para a vida,” 2015, setembro.
- [16] Madeiras, Jular, “Ciclo de carbono dos produtos de madeira,”. Disponível em: <https://www.jular.pt/files/pdfs/134/Ciclo-Carbono-Produtos-Madeira.pdf>. Acesso em Fev-2025
- [17] Action E49, “Processes and performance of wood-based panels,” 2004.
- [18] Thoemen, H., Irle, M., & Sernek, M., “Wood-based panels: An introduction for specialists. Brunel University Press, 2010.
- [19] Okino, E. Y. A., Souza, M. R., Santana, M. A. E., Souza, F., & Teixeira, D. E., ”Physico-mechanical properties and decay resistance of laminated veneer lumber (LVL) of rubberwood (*Hevea brasiliensis* Muell. Arg.)”. American Journal of Materials Science, vol. 4, pp. 31-36, 2014.
- [20] Sonae Arauco, “Produtos para construção e mobiliário,” 2025. Disponível em: <https://www.sonaearauco.com/pt/>. Acesso em Fev-2025.
- [21] ZENID, GERALDO JOSÉ, “Madeira na Construção Civil,” p. 01, 2015.
- [22] Mantanis, G. I., Athanassiadou, E. Th., Barbu, M. C., & Wijnendaele, K., “Adhesive systems used in the European particleboard, MDF and OSB industries,” Wood Material Science & Engineering, vol. 13, pp. 104-116, 2018.
- [23] N. M. G. Barrero, “Estudo da durabilidade de painéis de partículas de bagaço de cana-de-açúcar e resina poliuretano a base de óleo de mamona para aplicação na construção civil,” Tese de Doutorado - Faculdade de zootecnia e Engenharia de alimentos- Universidade de São Paulo, 2015.
- [24] J. Roberto Eleotério, M. Tomazello Filho, and G. Bortoletto Jr, “Propriedades físicas e mecânicas de painéis MDF de diferentes massas específicas e teores de resina,” Review. Ciência Florest., vol. 10, vol. 2, pp. 75-90, 2000.
- [25] Duran, A. J. F. P., Lopes Júnior, W. E., Pavesi, M., & Fiorelli, J., ”Avaliação de painéis de média densidade de bagaço de cana-de-açúcar,” Ciência Florestal, vol. 33(3), 2023.
- [26] Portal da Madeira, “MDF - Processo de fabrico,” 2010. Disponível em: <https://portaldamadeira.blogspot.com/2010/05/mdf-processo-de-fabrico.html>. Acesso em Mar-2025.
- [27] Gorski, L, “Painéis de partículas orientadas (OSB) da madeira de *Pinus* spp. e *Eucalyptus benthamii*,” 2014.

- [28] F. A. Pereira, "Propriedades de painéis tipo OSB, fabricados com flocos de *Eucalyptus grandis* tratados termicamente," Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, 2013.
- [29] Mendes, R., F., "Efeito do tratamento térmico sobre as propriedades de painéis OSB", Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais). Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz," Piracicaba, SP, 2010.
- [30] A. M. DE SOUZA, "Produção e avaliação do desempenho de painéis de partículas orientadas (OSB) de *Pinus sp* com inclusão de telas metálicas," no. 1, pp. 1-14, 2012.
- [31] CEN, "Eurocode 5: Design of timber structures," Proc. ICE - Civ. Eng., vol. 144, no. 2004, pp. 39-43, 2014.
- [32] Gonsales, Nicolas D., "Pinho: nome científico e suas espécies," 2024.
- [33] Dagort, Maria Eduarda, "Desenvolvimento de um sistema multicamada de madeira e derivados de madeira resistente ao fogo," MS thesis, Instituto Politécnico de Bragança, 2022.
- [34] Portillo, Germán, "Madeira de pinho: características, tipos e principais utilizações," Renováveis verdes, 2024
- [35] S. Iwakiri, A. B. M. Stingen, E. L. da Silveira, E. H. C. Zamarian, J. G. Prata, and M. Bronoski, "Influência Da Massa Específica Sobre As Propriedades Mecânicas De Painéis Aglomerados," Floresta, vol. 38, no. 3, pp. 487-493, 2008.
- [36] Almeida, P, C, "Estudo da influência da temperatura e do tempo de prensagem nas características físico mecânicas, de diferentes tipos de MDF aquando do seu revestimento por prensagem," Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre, Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior de Agronomia, 2006.
- [37] M. Integrado, P. Doutora, and M. Maria, "Análise da Problemática das Emissões de Formaldeído a partir do Aglomerado de Partículas de Madeira," 2014.
- [38] L. Zhao, Y. Liu, Z. Xu, Y. Zhang, F. Zhao, and S. Zhang, "State of research and trends in development of wood adhesives," Forestry Studies in China, vol. 13, no. 4, pp. 321-326, 2011.
- [39] Araujo, V. A., "Classification of wooden housing building systems," BioResources Technology, v.11, n. 3, p. 7889-7901, 2016.
- [40] TECVERDE. Panorama do Sistema Construtivo. Tecverde. Curitiba, 2016.
- [41] Espíndola, L. da R., "O wood frame na produção de habitação social no Brasil. Tese (doutorado- Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Urbanismo e

- Tecnologia). Instituto de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, 2017, 311p.
- [42] Associação Brasileira De Normas Técnicas (ABNT). NBR 6122: Projeto e execução de fundações. Rio de Janeiro, 2010.
- [43] THALLON, R. Graphic Guide to Frame Construction. Newtown: Taunton, 2008.
- [44] TecVerde Engenharia S/A, “Wood Frame - Sistema construtivo em estrutura de madeira,” Casa inteligente 2º Simpósio de Madeira e Construção, Brasil, 2014.
- [45] Tolomeotti, Gabriel P., “Caraterização do Sistema Construtivo em Wood Frame,” Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Departamento Acadêmico de Construção Civil. Curso de Engenharia Civil, 2021.
- [46] Sacco, Marcelo de Freitas, Stamato, Guilherme Corrêa, “Light Wood Frame - Construções com Estruturas Leve de Madeira,” Revista Técnica, São Paulo, nº140, Nov 2008.
- [47] Diretrizes para Avaliação Técnica de Produtos, “Sistemas construtivos estruturados em peças leves de madeira maciça serrada, com fechamentos em chapas (Sistemas leves tipo Light Wood Framing),” Diretriz SINAT, Brasília, 2017.
- [48] Campos, R. J. A., “Diretrizes de Projeto para Produção de Habitações Térreas com Estrutura Tipo Plataforma e Fechamento com Placas Cimentícias,” Dissertação (Mestrado em Engenharia da Edificação e Saneamento) - Universidade Estadual de Londrina, 2006.
- [49] American Wood Council, “Manual for Engineered Wood Construction,” Leesburg, 2018.
- [50] Eliana, P. Da Fonseca, “RESISTÊNCIA AO FOGO DE ELEMENTOS DE MADEIRA PELO EUROCÓDIGO 5 - ESTUDO DE CASO NA REABILITAÇÃO DE EDIFÍCIOS ANTIGOS,” Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau Mestre em Engenharia civil, Porto, 2017.
- [51] Huang, Xinlei, “Diaphragm stiffnes in wood-frame construction,” Master of applied science in the faculty of graduate studies. The University of British Columbia, 2013.
- [52] Pfeil, Walter; Pfeil, Michèle, “Estruturas de Madeira: Dimensionamento Segundo a Norma Brasileira NBR7190/97 e Critérios das Normas Norte Americana NDS e Europeia EUROCODE 5, Rio de Janeiro, TLC-Livros Técnicos e Científicos Editora, 2003.

- [53] Porteous, Jack; Kermani, Abdy, "Structural Timber Design to Eurocode 5," Blackwell Publishing, 2017.
- [54] A. L. Ferreira, "Encontro Sobre a Madeira E Suas Aplicações Nobres - Bem Utilizar a Madeira Proteção Da Madeira Contra O Fogo," 2005.
- [55] J. A. B. Júnior, "Avaliação não destrutiva da capacidade resistente de estruturas de madeira de edificios antigos," p. 208, 2006.
- [56] F. Laoutid, L. Bonnaud, M. Alexandre, J. M. Lopez-Cuesta, and P. Dubois, "New prospects in flame retardant polymer materials: From fundamentals to nanocomposites," Mater. Sci. Eng. R Reports, vol. 63, no. 3, pp. 100-125, 2009.
- [57] Lucas, Ferle C., "Avaliação da Durabilidade das Propriedades Mecânicas e Reação ao Fogo dos Painéis de Derivados de Madeira," Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Industrial. Instituto Politécnico de Bragança, 2018.
- [58] F. Özdemir and A. Tutus, "Effects of fire retardants on the combustion behavior of high-density fiberboard," BioResources, vol. 8, no. 2, pp. 1665-1674, 2013.
- [59] E. M., Pinto, "Proteção contra incêndio para habitações em madeira," Dissertação (Mestrado em Arquitetura) - Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, 2001.
- [60] Molina, Julio; Calil, Carlito, "Sistema construtivo em wood frame para casas de madeira," Article in Semina Exatas e Tecnológicas, ResearchGate, 2010.
- [61] F. Laoutid, L. Bonnaud, M. Alexandre, J. M. Lopez-Cuesta, and P. Dubois, "New prospects in flame retardant polymer materials: From fundamentals to nanocomposites," Mater. Sci. Eng. R Reports, vol. 63, no. 3, pp. 100-125, 2009.
- [62] A. P. Mouritz and A. G. Gibson, "Fire Properties of Polymer Composite Material," 2006.
- [63] B. and T. R. H. Scharrel, "Development of fire-retarded materials - Interpretation of cone calorimeter data," Finnish Swedish Flame Days 2009, no. August 2008, p. 4B, 2009.
- [64] D. Fiberboards, S. Liang, L. Zhang, Z. Chen, and F. Fu, "Flame Retardant Efficiency of Melamine Pyrophosphate with Added Mg-Al-Layered Double Hydroxide in Medium," vol. 12, pp. 533-545, 2017.
- [65] G. N. de S. Costa, "Análise térmica de lajes em madeira com e sem proteção," Tese de Mestrado, Escola Superior de Tecnologia e Gestão. Instituto Politécnico de Bragança, 2017.

- [66] L. M. da S. Barreira, “Estudo numérico do comportamento térmico e mecânico de estruturas em madeira,” Tese de Mestrado, Escola Superior de Tecnologia e Gestão. Instituto Politécnico de Bragança, 2008.
- [67] Coelho, C.C.S, “Modelo Computacional para a Avaliação Térmica e Mecânica de Estruturas de Madeira,” Dissertação de Mestrado em Engenharia da Construção, Instituto Politécnico de Bragança, 2011.
- [68] CEN, EN 1995-1-2:2004, Eurocode 5: Design of timber structures - Part 1-2: General - Structural fire design, 2004.
- [69] D. Kontogeorgos, M. Founti, “Numerical investigation of simultaneous heat and mass transfer mechanisms occurring in a gypsum board exposed to fire conditions,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 30, no. 11-12, pp. 1461-1469, 2010.
- [70] S. Ramzi, H. Hajiloo, “Evaluation of the fall-off of gypsum board in lightweight and mass timber constructions and implications in fire resistance,” *Fire Safety Journal*, vol. 156, p. 104455, 2025.
- [71] S. Wang, K. Yue, Z. Tian, C. Wei, T. Wu, P. Wu, Q. Li, Z. Zhang, “Enhanced fire resistance in light wood frame walls using gypsum-wheat-straw composites sheathing,” *Construction and Building Materials*, vol. 452, 2024.
- [72] A. Ariyanayagam, S. Kesawan, M. Mahendran, “Detrimental effects of plasterboard joints on the fire resistance of light gauge steel frame walls,” *Thin Walled Struct*, vol. 107, pp.597-611, 2016.
- [73] M. Sultan, “Temperature Measurements in Fire Resistance Tests on Insulated and Non-insulated Small Scale Wall Assemblies Protected by Type x Gypsum Board,” IRC, 1996.
- [74] P. Piloto, D. Vergara, “Light timber framed wall under fire: Effect of the load and cladding,” *Engineering Structures*, vol. 280, art. 115696, 2023.
- [75] P. Piloto, S. Rodríguez-del-Río, D. Vergara, “Fire analysis of timber-framed walls lined with gypsum,” *Materials*, vol. 15, n.º 3, art. 741, 2022.
- [76] Y. Duarte, “Caraterização da Resistência Mecânica de Painéis Multicamada Derivados de Madeira,” Licenciatura em Engenharia Mecânica, Instituto Politécnico de Bragança, 2023.
- [77] CEN, “EN 1995-1-2:2020, Eurocode 5: Design of Timber Structures - Part 1-2: General Structural Fire Design,” 2020.

- [78] Projeto NORTE-01-0247-FEDER-07225: “HiFireDoor - Desenvolvimento de Portas Decorativas Corta-Fogo de Madeira com Elevado Desempenho,” Instituto Politécnico de Bragança, 2021.
- [79] CEN, “EN 1363-1, Fire Resistance Tests - Part 1: General requirements,” 2020.
- [80] M. Moia, “Analysis of Thermal Performance of Multilayer Systems for fire doors,” Dissertation to obtain a Master’s Degree in: Industrial Engineering, Instituto Politécnico de Bragança, 2022.
- [81] G. Goli, F. Becherini, M. Tuccio, A. Bernardi e M. Fioravanti, “Thermal expansion of wood at different equilibrium moisture contents,” *Journal of Wood Science*, 2019.
- [82] C. Neves, V. Pignatta, and E. Civil, “Revisão histórica das curvas padronizadas de incêndio.”, 2006.
- [83] International Organization for Standardization, “ISO 834-1: Fire-resistance tests - Elements of building construction - Part 1: General requirements,” 1999.
- [84] K. Yue, B. Liang, J. Liu, M. Li, Y. Pu, W. Lu, Z. Han, Z. Li, “Fire resistance of light wood frame walls sheathed with innovative gypsum-particle composite: Experimental investigations,” *Journal of Building Engineering* 45, 2022.
- [85] CEN, “EN 13501-2, Fire classification of construction products and building elements - Part 2: Classification using data from fire resistance tests,” 2016.
- [86] ANSYS, “ANSYS Mechanical APDL Element Reference (secção do elemento PLANE293), 2025 R2.
- [87] CEN, “EN 1991-1-2- Eurocode 1: Actions on structures- Part 1-2: General actions- Actions on structures exposed to fire,” 2002.
- [88] G. Assis, L. Souza, L. Santos, V. Nunes, M. Reis, J. Soares, A. Carvalho e W. Boschetti, “Sistema construtivo Wood Frame”, III Congresso Brasileiro de Ciência e Tecnologia da Madeira (CBCTEM), Florianópolis, 2017.
- [89] EN ISO 4016, Hexagon head bolts: European Committee for Standardization (CEN), Brussels; International Organization for Standardization, Genebra, 2000.
- [90] EN ISO 898-1, Mechanical properties of fasteners made of carbon steel and alloy steel - Part 1: Bolts, screws and studs. International Organization for Standardization (ISO), Genebra, 1999.

# Anexos

## Alpharock Premium



### Características técnicas

Propriedade	Descrição				Norma
Densidade nominal (kg/m <sup>3</sup> )	70				EN 1602
Condutividade térmica (W/m·K)	0,033				EN 12667
Dimensões (mm)	1350 x 600 / 1350 x 400				
Reação ao fogo / Euroclasse	A1				EN 13501.1
Resistência térmica (m <sup>2</sup> ·K/W)	Espessura (mm)	Resistência térmica (m <sup>2</sup> ·K/W)	Espessura (mm)	Resistência térmica (m <sup>2</sup> ·K/W)	
	30	0.90	80	2.40	
	40	1.20	100	3.00	
	50	1.50	120	3.60	
	60	1.80	140	4.20	
Tolerância de espessura (mm)	T3				EN 823
Estabilidade dimensional a uma temperatura e umidade especificadas	DS (70,90)				EN 1604
Resistividade do fluxo de ar	AFi20	>20 KPa · s/m <sup>2</sup>		EN 29053	
Resistência à passagem do vapor de água	MU1	(μ = 1)		EN 12086	
Absorção de água a curto prazo (kg/m <sup>2</sup> )	WS	< 1,0 kg/m <sup>2</sup>		EN 1609	
Absorção de água a longo prazo (kg/m <sup>2</sup> )	WLP)	< 3,0 kg/m <sup>2</sup>		EN 12087	

Figura A1: Ficha técnica da lã de rocha

MADEIRAS NÓRDICAS

## Abeto Casquinha Branca

Madeira de Abeto ou Casquinha Branca, a aparência harmoniosa da madeira nórdica para soluções decorativas e construções em madeira.



Denominação científica	Picea abies
Tipo	Conífera
Origem	Europa e Báltico

Procure pelos nossos produtos certificados



### Informações Técnicas

Densidade a 12% de humidade	450 Kg/m <sup>3</sup>
Coefficiente contração volumétrico	0,44% Madeira estável
Relação entre contrações	2,10%
Dureza (Monnin)	1,5 Madeira macia
Resistência à flexão estática	710 Kg/cm <sup>2</sup>
Módulo de elasticidade	110.000 Kg/cm <sup>2</sup>
Resistência à compressão	450 Kg/cm <sup>2</sup>

### Mecanização

Corte	Fácil
Secagem	Rápida
Aplainamento	Fácil
Colagem	Boa
Acabamento	Fácil

### Aplicações

Carpintaria e Design de Interiores  
 Construção e Exstruturas em Madeira  
 Embalagem  
 Revestimentos Exteriores

Figura A2: Ficha técnica da madeira pinho-abeto

## FibraPan® H EZ

### DADOS TÉCNICOS

PROPRIEDADES	TESTE DE REFERÊNCIA	UNIDADES	ESPESSURAS mm									
			2,5-4	>4-6	>6-9	>9-12	>12-19	>19-30	>30-45	>45-60	>60-70	
Densidade (*)	EN 323:1993	kg/m <sup>3</sup>	880/860	855/830	825/770	765/745	745/730	730/715	715/665	660/645	635	
Tracção Interna	EN 319:1993	N/mm <sup>2</sup>	0,90	0,85	0,80	0,80	0,75	0,75	0,70	0,60	0,6	
Inchamento em água 24h	EN 317:1993	%	30	18	12	10	8	7	7	6	6	
Resistência à Flexão	EN 310:1993	N/mm <sup>2</sup>	27	27	27	26	24	22	21	19	17	
Módulo de elasticidade	EN 310:1993	N/mm <sup>2</sup>	2700	2700	2700	2500	2400	2300	2300	2200	2100	
Teste de Envelhecimento Acelerado (Opção 1). Inchamento depois do Ensaio Cíclico (V313).	EN 321:2001 / EN 317:1993	%	40	25	19	16	15	15	15	15	15	
Teste De Envelhecimento Acelerado (Opção 1). Tracção Interna Depois Do Ensaio Cíclico (V313).	EN 321:2001 / EN 319:1993	N/mm <sup>2</sup>	0,35	0,35	0,30	0,25	0,20	0,15	0,10	0,10	0,10	
Tracção Superficial	EN 311:2002	N/mm <sup>2</sup>	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	
Emissão de formaldeído	EN 717-1:2004	ppm	≤ 0,05	≤ 0,05	≤ 0,05	≤ 0,05	≤ 0,05	≤ 0,05	≤ 0,05	≤ 0,05	≤ 0,05	
Reação ao fogo	EN 13501-1:2018	Euroclasse	CWFT	CWFT	CWFT	CWFT	CWFT	CWFT	CWFT	CWFT	CWFT	
Estabilidade Dimensional Comprimento/Largura	EN 318:2002	%	0,4	0,4	0,4	0,4	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2	
Estabilidade Dimensional Espessura	EN 318:2002	%	6	6	6	6	5	5	4	4	4	
Absorção Superficial (ambas Faces)	EN 382-1:1993	mm	>150	>150	>150	>150	>150	>150	>150	>150	>150	
Conteúdo em areia	ISO 3340:1976	% Peso	≤ 0,05	≤ 0,05	≤ 0,05	≤ 0,05	≤ 0,05	≤ 0,05	≤ 0,05	≤ 0,05	≤ 0,05	
Humidade	EN 322:1993	%	7+/-3	7+/-3	7+/-3	7+/-3	7+/-3	7+/-3	7+/-3	7+/-3	7+/-3	

TOLERÂNCIA EM DIMENSÕES NOMINAIS												
PROPRIEDADES	TESTE DE REFERÊNCIA	UNIDADES	ESPESSURAS mm									
			2,5-4	>4-6	>6-9	>9-12	>12-19	>19-30	>30-45	>45-60	>60-70	
Espessuras	EN 324-1:1993	mm	+/-0,15	+/-0,15	+/-0,2	+/-0,2	+/-0,2	+/-0,3	+/-0,3	+/-0,3	+/-0,3	
Comprimento e Largura	EN 324-1:1993	mm	+/-2 mm, máx +/- 5 mm	+/-2 mm, máx +/- 5 mm	+/-2 mm, máx +/- 5 mm	+/-2 mm, máx +/- 5 mm	+/-2 mm, máx +/- 5 mm	+/-2 mm, máx +/- 5 mm	+/-2 mm, máx +/- 5 mm	+/-2 mm, máx +/- 5 mm	+/-2 mm, máx +/- 5 mm	
Esquadria	EN 324-2:1993	mm/m	+/-2	+/-2	+/-2	+/-2	+/-2	+/-2	+/-2	+/-2	+/-2	
Precisão de Topos	EN 324-2:1993	mm/m	+/-1,5	+/-1,5	+/-1,5	+/-1,5	+/-1,5	+/-1,5	+/-1,5	+/-1,5	+/-1,5	

Figura A3: Ficha técnica do MDF

Tabela A1: Propriedades térmicas dependentes da temperatura para madeira e a camada carbonizada para membros de madeira e painéis de madeira maciça, segundo o Eurocódigo 5 1995-1-2 de 2020, [77].

$T$ [°C]	$\lambda$ [W/mK]	$c$ [kJ/kgK]	$\rho/\rho_{20}$ [-]
20	0,12	1,53	1
99	*	1,77	1
100	*	13,60	1
120	*	13,50	1
121	*	2,12	0,89
200	0,15	2,00	0,89
250	*	1,62	0,83
300	*	0,71	0,68
350	0,07	0,85	0,46
400	*	1,00	0,34
500	0,09	*	*
600	*	1,4	0,25
800	0,35	1,65	0,23
1200	1,5	1,65	0

Gráficos da Tabela A1: Propriedades térmicas dependentes da temperatura para madeira e a camada carbonizada para membros de madeira e painéis de madeira maciça, segundo o Eurocódigo 5 1995-1-2 de 2020.

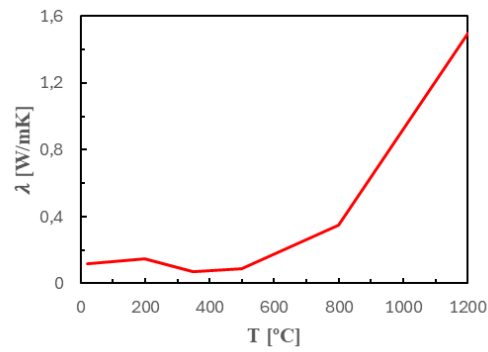


Figura A4: Condutividade térmica para a madeira e a camada de carvão, [77].

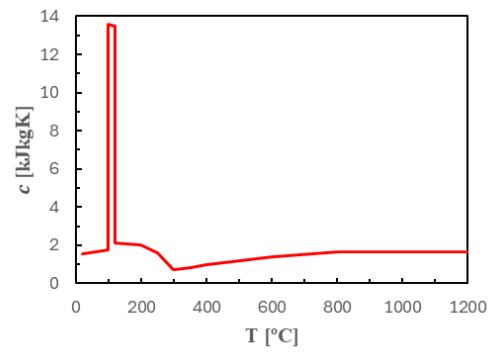


Figura A5: Calor específico para a madeira e a camada de carvão, [77].

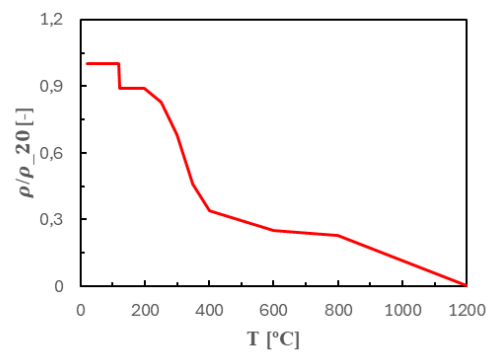


Figura A6: Relação de densidade da madeira e da camada de carvão, [77].

Tabela A2: Propriedades térmicas dependentes da temperatura do OSB, madeira compensada, aglomerados e painéis de fibra, [77].

$T$ [°C]	$\lambda$ [W/mK]	$c$ [kJ/kgK]	$\rho/\rho_{20}$ [-]
20	0,12	1,79	1,00
100	0,30	1,79	1,00
110	0,23	30,80	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	4,20	0,69	0,11

Gráficos da Tabela A2: Propriedades térmicas dependentes da temperatura do OSB, madeira compensada, aglomerados e painéis de fibra.

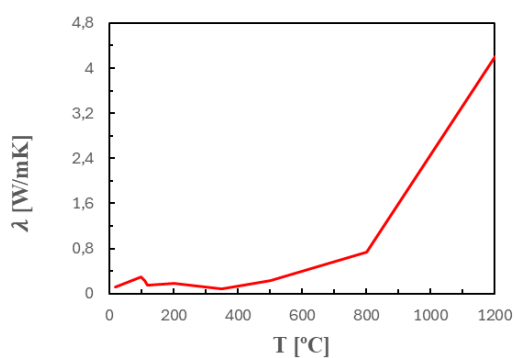


Figura A7: Condutividade térmica, [77].

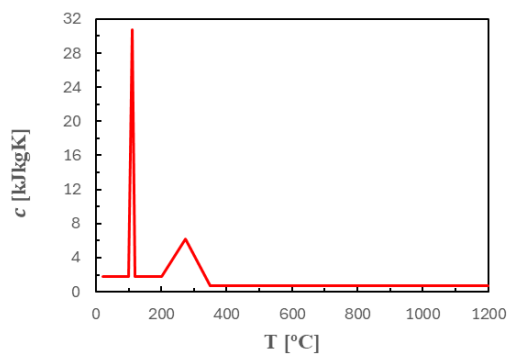


Figura A8: Calor específico, [77].

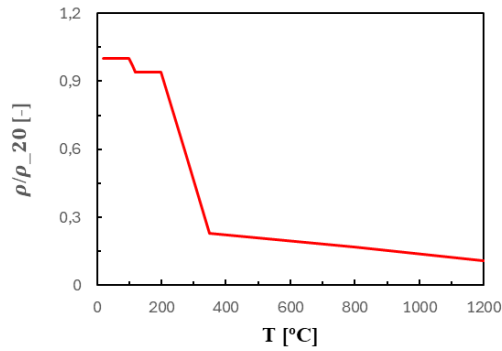


Figura A9: Relação de densidade, [77].

Tabela A3: 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<sup>3</sup>], [77].

$T$ [°C]	$\lambda_{\rho}$ [W/mK]	$c$ [kJ/kgK]	$\rho/\rho_{20}$ [-]
20	0,036	0,880	1,00
100	0,047	1,040	1,00
200	*	1,160	0,980
400	$0,09 \times (11 \times e^{-0,05 \times \rho_{20}} + 1,9)$	1,280	0,977
600	$0,15 \times (11 \times e^{-0,05 \times \rho_{20}} + 1,9)$	1,355	0,973
800	$0,23 \times (11 \times e^{-0,05 \times \rho_{20}} + 1,9)$	1,430	0,970
925	$0,30 \times (11 \times e^{-0,05 \times \rho_{20}} + 1,9)$	1,477	0,960
1200	$0,45 \times (11 \times e^{-0,05 \times \rho_{20}} + 1,9)$	1,580	0,887

Gráficos da Tabela A3: 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<sup>3</sup>].

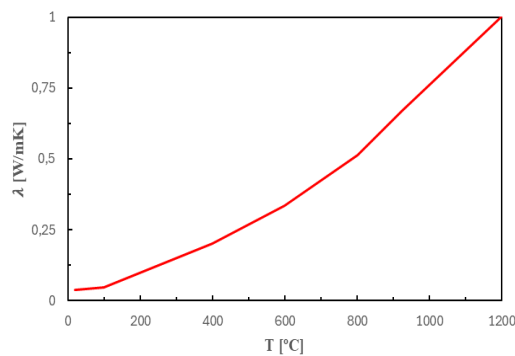


Figura A10: Condutividade térmica em função da temperatura da lã mineral, [77].

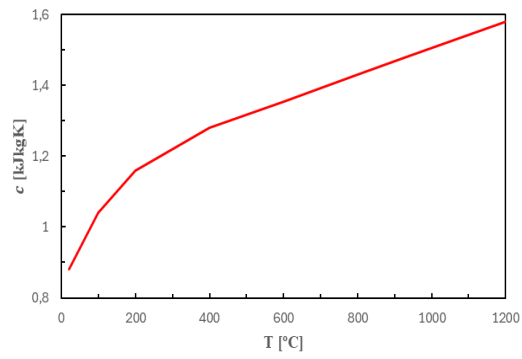


Figura A11. Calor específico em função da temperatura para a lã mineral, [77].

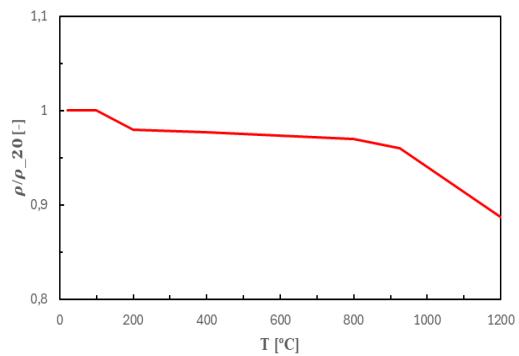
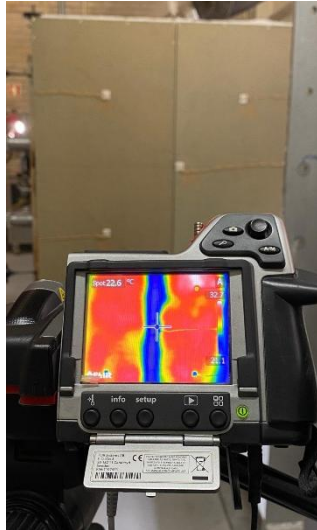


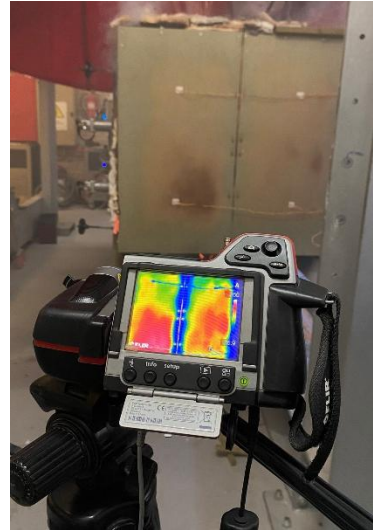
Figura A12: Relação de densidade da lã mineral, [77].

Tabela A4: Fator de redução dependente da temperatura  $K_\theta$  para resistência e rigidez paralelas ao grão, [77].

<b>T</b> [°C]	<b>Força</b>			<b>Módulo de elasticidade</b>		
	Compressão	Tensão	Corte	Compressão	Tensão	Corte
20	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
100	0,25	0,65	0,40	0,35	0,50	0,40
300	0	0	0	0	0	0



Ensaio 1



Ensaio 2

Figura A13: Registo termográfico do painel durante os ensaios.



Ensaio 1



Ensaio 2

Figura A14: Interior do forno durante os ensaios.



Figura A15: Instalação dos termopares de interface na lã de rocha durante o Ensaio 1.



Ensaio 1



Ensaio 2

Figura A16: Painéis após o ensaio ao fogo.

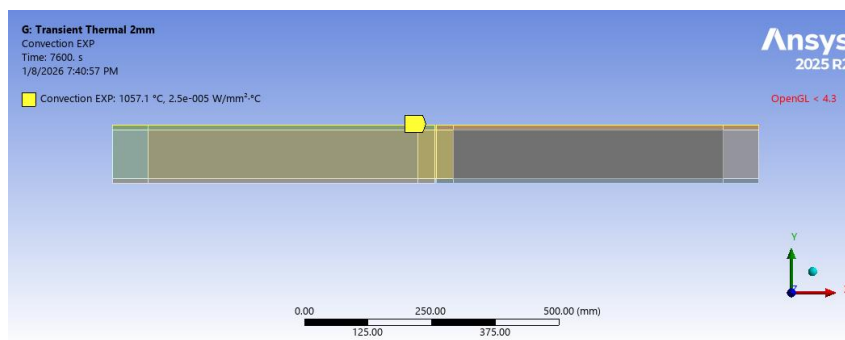


Ensaio 1

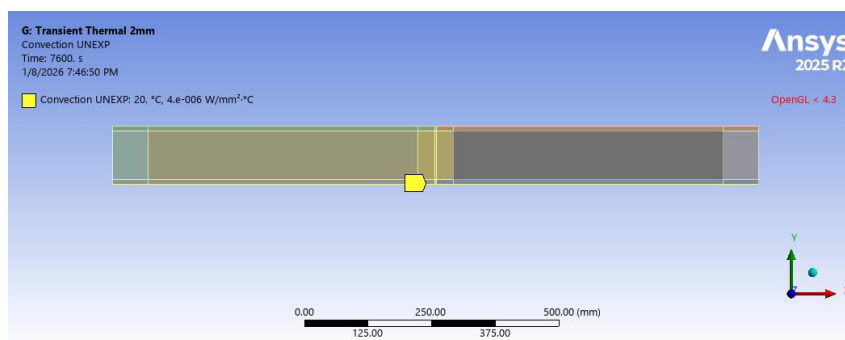


Ensaio 2

Figura A17: Estado dos painéis imediatamente após o ensaio no forno.

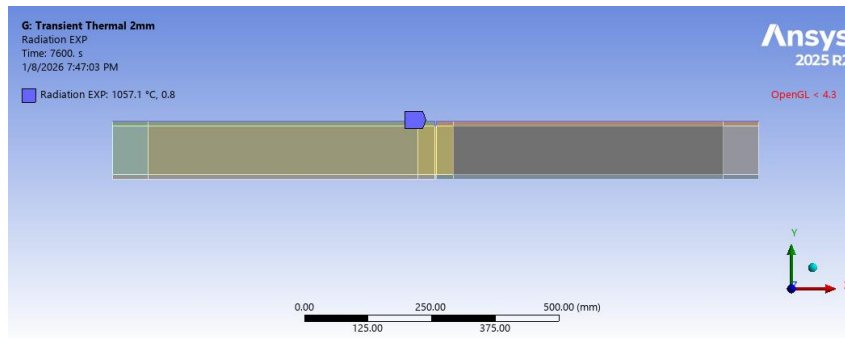


a) Face exposta

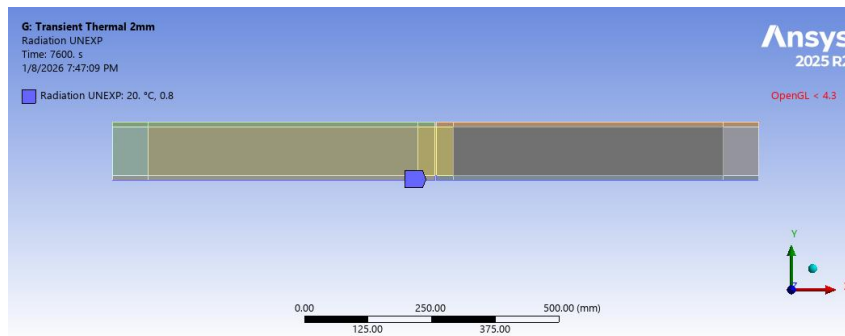


b) Face não exposta

Figura A18: Convecção aplicadas no modelo numérico do Ensaio 2.

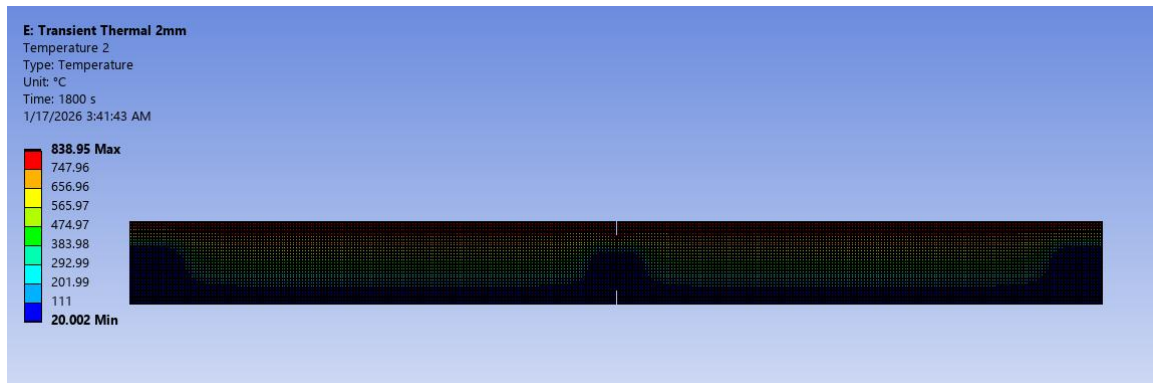


a) Face exposta

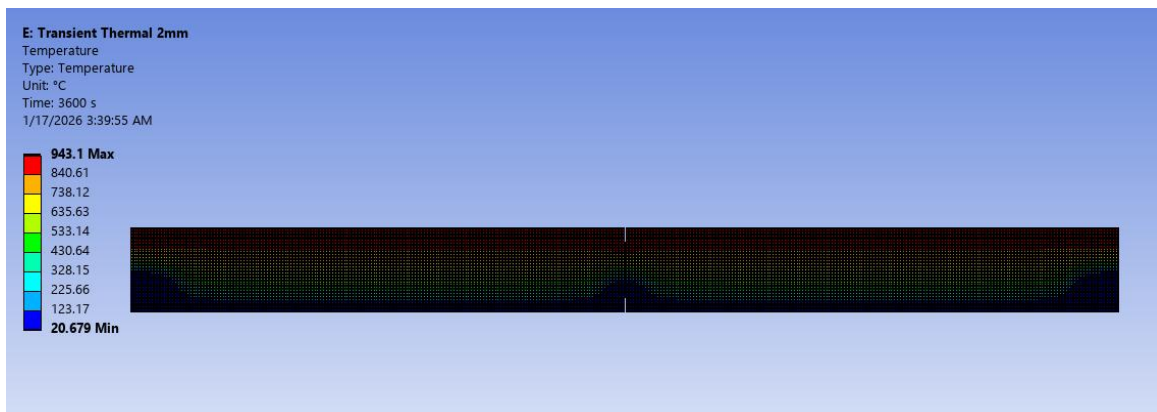


b) Face não exposta

Figura A19: Radiação aplicadas no modelo numérico do Ensaio 2.

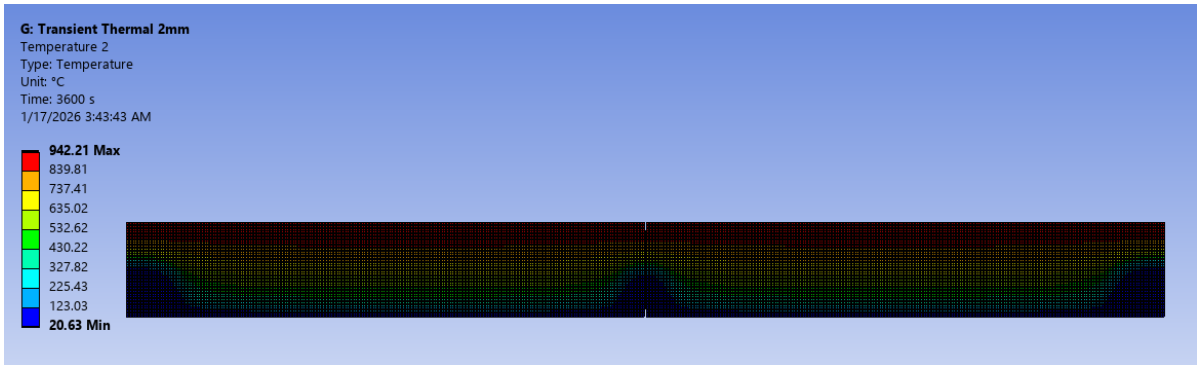


30 min

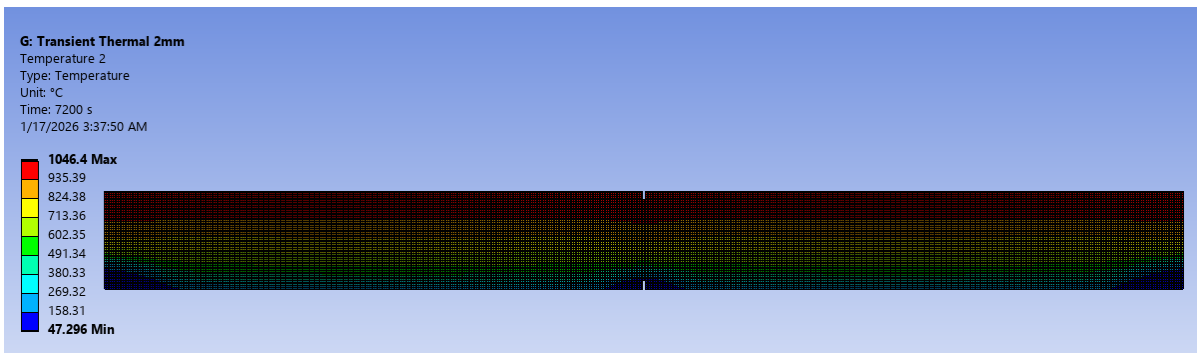


60 min

Figura A20: Campo térmico obtido por simulação numérica para o Ensaio 1 (60 min).

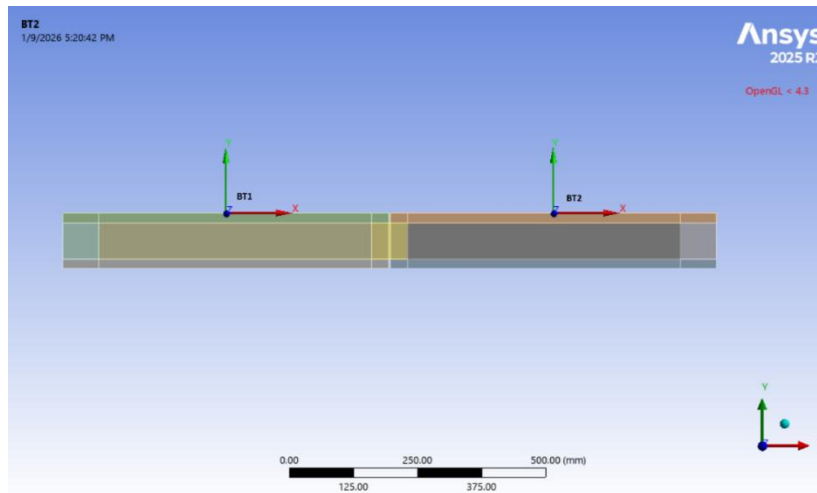


60 min

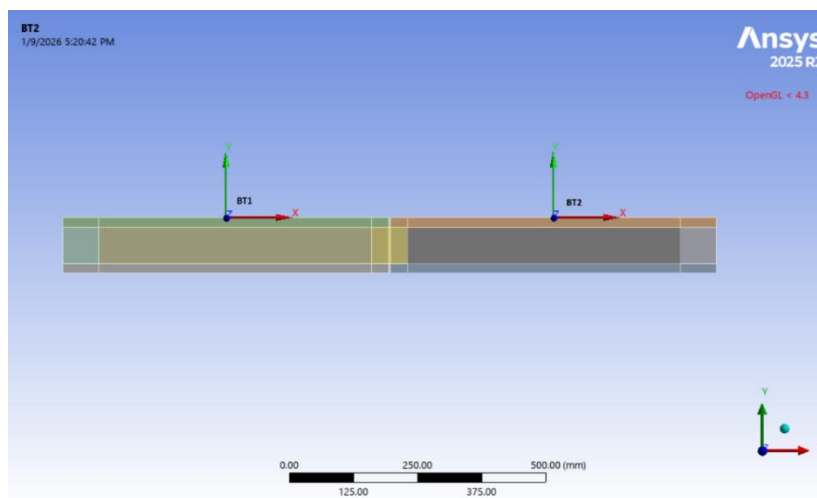


120 min

Figura A21: Campo térmico obtido por simulação numérica para o Ensaio 2 (120 min).

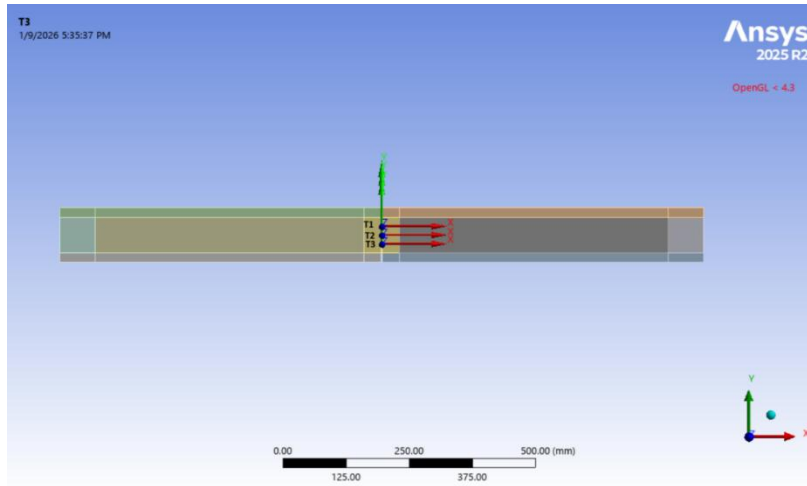


Posições do BT1 e BT2 na face exposta.

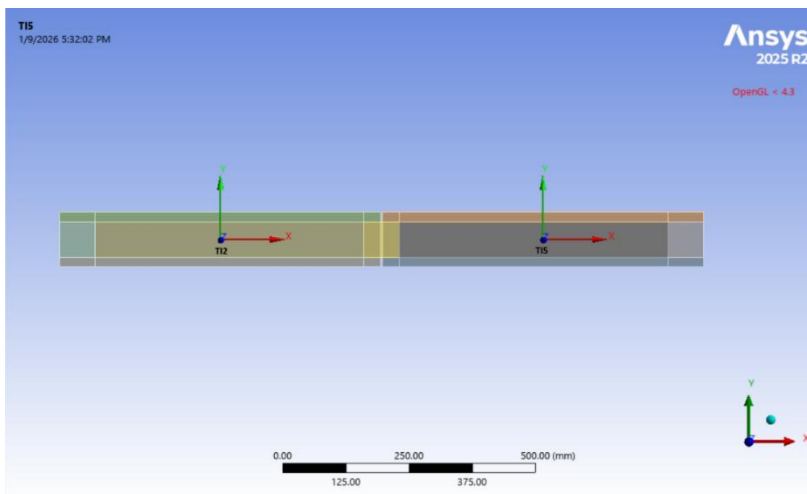


Posições do DT1, DT2 e DT5 na face não exposta.

Figura A22: Posição dos pontos de sistema de coordenadas na face exposta e não exposta ao fogo, Ensaio 1.



Posições do T1, T2 e T3 no montante central.



Posições do TI2 e TI5 no interior da lã de rocha.

Figura A23: Posição dos pontos de sistema de coordenadas no montante central e no interior do isolamento, Ensaio 1.



Madeira do Grupo  
Botânico Angiospérmicas  
(Carvalho), [14].

Madeira do Grupo  
Botânico  
Gimnospérmicas  
(Pinheiro), [15].

Figura A24: Grupos botânicos da madeira.

Tabela A5: Composição dos constituintes químicos da madeira, [10].

Constituinte	Composição [%]	Natureza polimérica	Função
Celulose	45 - 50	Molécula linear cristalina	Sustentação
Hemicelulose	20 - 25	Molécula ramificada amorfa	Matriz
Lignina	20 - 30	Molécula tridimensional amorfa	Matriz

Tabela A6: Análise de convergência da malha de elementos finitos (T = 1 h).

Malha (mm)	Números de elementos	Temperatura a 1hr [°C]
10	1415	264,7
8	2439	318,1
5	5602	385,1
4	8978	403,0
3	16212	434,2
2	34940	476,5
1	137154	476,0

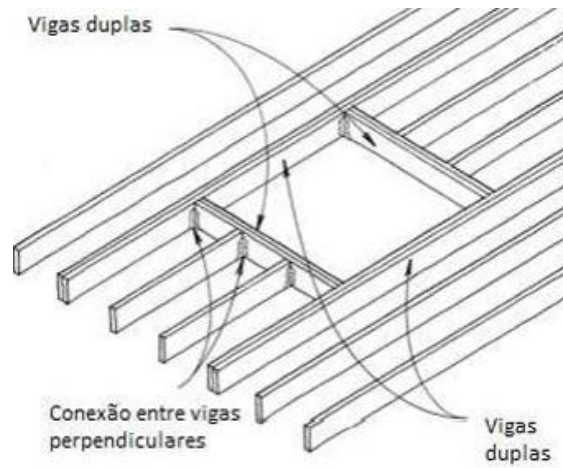


Figura A25: Reforço na região dos shafts de passagem, [43].

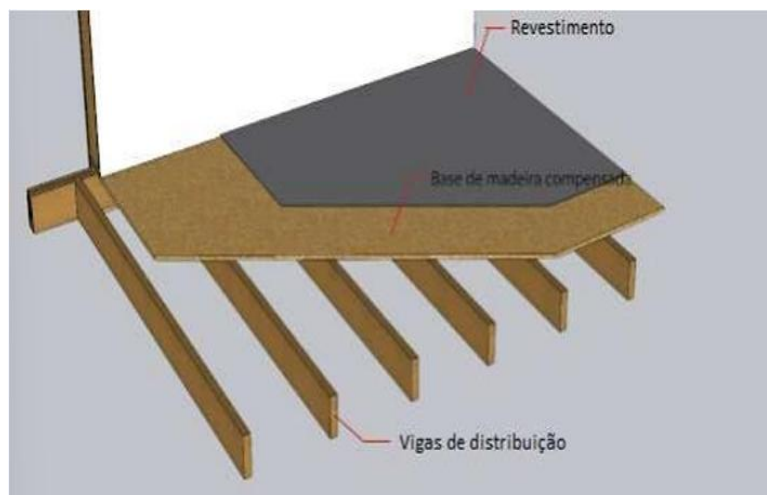


Figura A26: Esquema do piso em LWF, [45].



Figura A27: Cobertura em madeira, [50].

Tabela A7: Conexões entre elementos estruturais, [49].

<b>Conexão</b>	<b>Pregos</b>	<b>Espaçamento</b>
Soleira superior - soleira superior	2 pregos comuns 19x36	30cm
Soleira superior em interseções	4 pregos comuns 19x36	Em ambos os lados da junta
Montante - Montante	2 pregos comuns 19x36	60 cm
Montante - Soleira inferior	2 pregos galvanizados 19x36	Por conexão
Montante Soleira superior	2 pregos comuns 19x36	Por conexão
OSB - Quadro estrutural	Prego comum 17x27	15 cm nas bordas e 30 cm no interior do painel

Tabela A8: Propriedades da madeira de pinho em situação de incêndio, [84].

<b>Propriedades</b>	<b>Valor típico/Intervalo</b>
Densidade ( $\rho$ )	350 - 470 [ $kg/m^3$ ]
Teor de humidade de equilíbrio	8 - 12% (em ambiente interior)
Taxa de carbonização de referência ( $\beta_0$ )	0,65 [mm/min]
Taxa de carbonização nominal ( $\beta_n$ )	0,70 - 0,80 [mm/min]
Temperatura de ignição	250 - 300°C

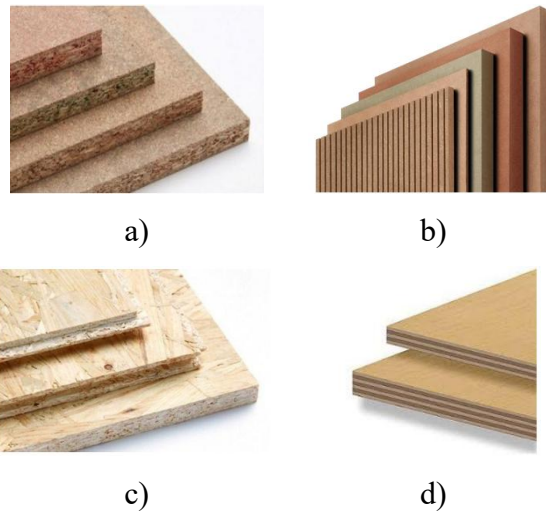


Figura A28: Exemplo de produtos derivados de madeira: a) aglomerados de partículas (PB), b) fibras de média densidade (MDF), c) aglomerados de partículas longas e orientadas (OSB), d) painel contraplacado (Plywood), [20].

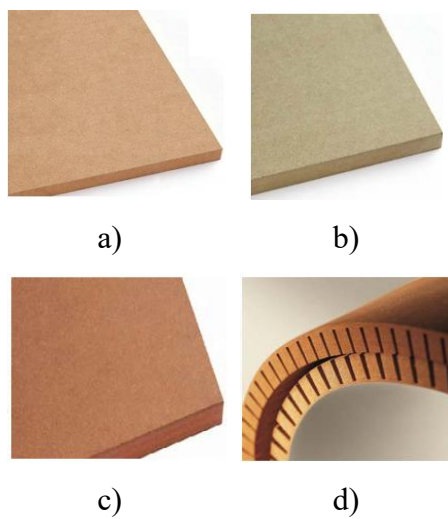


Figura A29: Tipos de MDF: a) ambiente seco, b) ambiente húmido, c) com retardante de chama, d) flexível, [20].

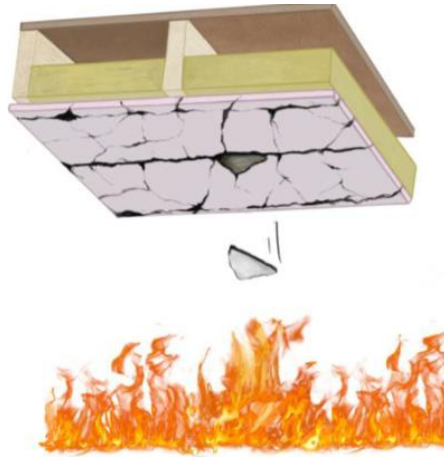


Figura A30: Queda de GB de um piso LWF sujeito ao incêndio, [70].

Tabela A9: Valores de projeto das taxas de carbonização, [68].

	$\beta_0$ [mm/min]	$\beta_n$ [mm/min]
<b>Madeira macia</b>		
Laminado colado com densidade $\geq 290\text{kg/m}^3$	0,65	0,7
Madeira maciça com densidade $\geq 290\text{kg/m}^3$	0,65	0,8
<b>Madeira estrutural</b>		
Madeira maciça ou laminado colado com densidade de $\geq 290\text{kg/m}^3$	0,65	0,7
Madeira maciça ou laminado colado com densidade de $\geq 450\text{kg/m}^3$	0,50	0,55
<b>LVL</b>		
Com densidade $\geq 480\text{kg/m}^3$	0,65	0,7
<b>Painéis</b>		
Painéis de madeira	0,9 <sup>a</sup>	-
Contraplacados	1,0 <sup>a</sup>	-
Outros derivados de madeira	0,9 <sup>a</sup>	-

<sup>a</sup> Este valor só se aplica para densidades de  $\geq 450\text{kg/m}^3$  e para espessuras de 20 mm, para outras densidades e espessuras deve-se seguir a expressão (A.1):

$$\beta_{0,\rho,t} = \beta_0 k_\rho k_h \quad (\text{A.1})$$

Com:

$$k_p = \sqrt{\frac{450}{\rho_k}} \text{ e } k_h = \sqrt{\frac{20}{h_p}} \quad (\text{A.2})$$

em que:

$\rho_k$  – Massa específica em  $[\text{kg}/\text{m}^3]$

$h_p$  – Espessura do painel em  $[\text{mm}]$

Tabela A10: Classificação de reação ao fogo dos produtos de construção, [78].

Classe	Produção de Fumo	Libertação de gotículas incandescentes	Produtos típicos
A1	-	-	Pedra, Betão
A2	s1, s2 ou s3	d0, d1 ou d2	Placas de gesso, lâ mineral
B	s1, s2 ou s3	d0, d1 ou d2	Madeira/painéis de madeira com retardante de chama
C	s1, s2 ou s3	d0, d1 ou d2	Revestimento em placas de gesso
D	s1, s2 ou s3	d0, d1 ou d2	Madeira, painéis de madeira
E	-	d2	Polímeros sintéticos
F	-	-	Nenhum desempenho determinado

Tabela A11: Classes de resistência ao fogo associadas ao critério de isolamento térmico (I) segundo a EN 13501-2, [85].

Classe	Tempo mínimo de resistência ao fogo [min]	Designação normativa
I30	$\geq 30$	O elemento mantém o isolamento térmico durante, pelo menos, 30 minutos
I60	$\geq 60$	O elemento mantém o isolamento térmico durante, pelo menos, 60 minutos
I90	$\geq 90$	O elemento mantém o isolamento térmico durante, pelo menos, 90 minutos
II20	$\geq 120$	O elemento mantém o isolamento térmico durante, pelo menos, 120 minutos
II80	$\geq 180$	O elemento mantém o isolamento térmico durante, pelo menos, 180 minutos

Tabela A12: Propriedades físicas da lã de rocha, adaptado.

$T$ [°C]	$\lambda_{\rho}$ [w/mK]	$c$ [J/kgK]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]
20	0,036	880	70
100	0,047	1040	70
200	0,061	1160	70
400	0,201	1280	70
600	0,335	1355	70
800	0,513	1430	70
925	0,670	1477	70
1200	1	1580	70

Tabela A13: Propriedades físicas do MDF a 7% de humidade, adaptado.

$T$ [°C]	$\lambda_{\rho}$ [w/mK]	$c$ [J/kgK]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ] E1=19 mm	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ] E2=10 mm
20	0,12	1790	730	745
100	0,30	1790	730	745
110	0,23	30800	708,1	722,65
120	0,15	1790	686,2	700,3
200	0,18	1790	686,2	700,3
275	0,14	6170	423,4	432,1
350	0,09	690	167,9	171,35
500	0,23	690	153,3	156,45
800	0,74	690	124,1	126,65
1200	4,20	690	80,3	81,95

Tabela A14: Propriedades físicas do pinho-abeto a 7% de humidade, adaptado.

$T$ [°C]	$\lambda_{\rho}$ [w/mK]	$c$ [J/kgK]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]
20	0,12	1530	429,91
99	*	1770	429,91
100	*	13600	429,91
120	*	13500	429,91
121	*	2120	382,62
200	0,15	2000	382,62
250	*	1620	356,83
300	*	710	292,34
350	0,07	850	197,76
400	*	1000	146,17
500	0,09	*	*
600	*	1400	107,48
800	0,35	1650	98,88
1200	1,5	1650	0