

# **SISTEMA MULTICAMADA PARA PORTAS CORTA-FOGO DE MADEIRA**

**João Lucas Santana do Carmo**

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em **Engenharia Industrial**, ramo  
Engenharia Mecânica.

Junho de 2023



# **SISTEMA MULTICAMADA PARA PORTAS CORTA-FOGO DE MADEIRA**

**João Lucas Santana do Carmo**

Dissertação apresentada à **Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Bragança** para obtenção do Grau de **Mestre em Engenharia Industrial**, no âmbito da Dupla Diplomação com a **Universidade Evangélica de Goiás**.

Trabalho orientado por:

Prof.º Dr. Luís Manuel Ribeiro Mesquita

Junho de 2023

*Esta tese foi desenvolvida no âmbito do Projeto NORTE-01-0247-FEDER-072225: HiFireDoor - Desenvolvimento de Portas Decorativas Corta-Fogo de Madeira com Elevado Desempenho, cofinanciado pelo Programa Operacional Regional do Norte (NORTE 2020), através do Portugal 2020 e do Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER).*



## **Agradecimentos**

Primeiramente gostaria de agradecer a Jeová Deus, pelo discernimento e faculdades mentais que me proporcionaram ter aptidão para realizar a presente dissertação. Também a minha família que sempre me apoiou.

Agradecer a minha mãe, Marcilene que foi uma grande incentivadora e apoiadora, ao longo de todas as fases da minha vida, que foi uma grande amiga e companheira para várias situações, que nunca deixou de estar presente e pronta a me ajudar quando necessário. Agradeço também ao meu pai Moacir que também esteve me apoiando, além de sempre se manter próximo e sempre preocupado comigo.

Agradecer também meu orientador, Professor Doutor Luís Mesquita, por todo os ensinamentos, tempo disponibilizado e orientações que me guiaram para conseguir desenvolver minha pesquisa. Também ao Instituto Politécnico de Bragança e também a Universidade Evangélica de Goiás que me proporcionaram poder realizar o meu sonho de fazer um intercâmbio.

Aos meus amigos Marcelo, Heuler, Victor, Thales, Iasmim, Candatti, Madu, Joãozinho, Guedes, Pacheco, Pissaia, Diego e a todos os outros amigos próximos que estiveram comigo nessa jornada, que proporcionaram muitos momentos inesquecíveis e deixaram tudo mais leve. Também aqueles que apesar da distância foram incentivadores e sempre deixaram claro que estavam comigo, e prontos a ajudar no que fosse preciso, obrigado a todos que deixaram um pouco de si em mim e levaram um pouco de mim.

## **Resumo**

As portas corta-fogo são elementos fundamentais para a segurança contra incêndios em edificações. Elas são projetadas e construídas para suportar altas temperaturas e impedir a propagação do fogo de um ambiente para outro. Em caso de incêndio, as portas corta-fogo atuam como barreiras físicas, retardando a progressão das chamas e fumaça, permitindo assim que as pessoas tenham mais tempo para evacuar o prédio e para que os bombeiros possam atuar no combate às chamas. Além disso, as portas corta-fogo são um elemento obrigatório em muitas normas e legislações de segurança contra incêndios, o que reforça a sua importância na prevenção de tragédias e na preservação de vidas e patrimônio.

A presente dissertação teve como objetivo a resistência térmica de painéis multicamadas de madeira e derivados de madeira, tipo sanduíche, constituídos por MDF + Lã de rocha + MDF, expostos a ação da curva de incêndio padrão ISO834. Ademais, dimensionar as menores espessuras desse painel que suportasse os tempos regulamentados de proteção contra incêndios de I<sub>130</sub>, I<sub>160</sub> e I<sub>190</sub> minutos respectivamente, através de simulação numérica em regime transiente, assistida por computador. Com o auxílio do software Ansys Workbench, foram elaborados os modelos de porta que seriam a base do processo de otimização.

O primeiro modelo de porta a ser gerado foi baseado em um estudo experimental que utilizou uma construção de um painel sanduíche com os mesmos materiais, para a validação da simulação numérica desenvolvida. Demonstrando que o sistema numérico tinha uma grande proximidade com os resultados alcançados no estudo de caso realizado em laboratório, a otimização foi aceita e realizada.

Foi realizado os ensaios de otimização do painel folha da porta com o objetivo de achar as menores espessuras ótimas que satisfazem os tempos de resistência padronizados, além de encontrar a folha da porta com menor massa. Onde para uma classificação I<sub>130</sub>, I<sub>160</sub> e I<sub>190</sub> a espessura mínima foi de 38, 57 e 68 mm respectivamente. A partir dessa otimização avaliar o comportamento da folha da porta, integrada no sistema bloco porta, o qual tem os elementos circundantes como batente, dobradiça e paredes, para assim avaliar se os critérios de isolamento do calor, pelo tempo determinado seriam afetados.

**Palavras-chave:** Porta corta-fogo, Resistencia térmica, painéis multicamadas, Ansys, otimização e simulação numérica.



## **Abstract**

Fire doors are fundamental elements for fire safety in buildings. They are designed and constructed to withstand high temperatures and prevent the spread of fire from one environment to another. In case of fire, fire doors act as physical barriers, slowing down the progression of flames and smoke, thus allowing people more time to evacuate the building and firefighters to act in extinguishing the fire. In addition, fire doors are mandatory in many safety regulations and legislation concerning fire safety, which reinforces their importance in preventing tragedies and preserving lives and property.

The present dissertation aimed to investigate the thermal resistance of multilayer wood and wood-derived sandwich panels composed of MDF + Rockwool + MDF, when exposed to the standard ISO834 fire curve. Additionally, the objective was to determine the minimum panel thickness that would meet the regulated fire protection times of I130, I160, and I190 minutes, respectively, through computer-assisted numerical simulations using Ansys Workbench software. Models of door panels were developed as the basis for the optimization process.

The first door model generated was based on an experimental study that used a sandwich panel construction with the same materials for validation of the developed numerical simulation. The results showed that the numerical system closely matched the laboratory study, and thus the optimization was accepted and performed.

The optimization tests for the door panel leaf were performed in order to find the thinnest optimal thicknesses that meet the standardized resistance times, as well as to find the door leaf with the lowest mass. For classifications I<sub>130</sub>, I<sub>160</sub> and I<sub>190</sub>, the minimum thickness was 38, 57, and 68 mm, respectively. Based on this optimization, the behavior of the door leaf integrated into the door block system, which includes surrounding elements such as the door frame, hinges, and walls, was evaluated to determine if the heat insulation criteria over the specified time would be affected.

**Key-words:** Fire doors, Thermal resistance, multilayer panels, Ansys, optimization, and numerical simulation.



# SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1. OBJETIVOS.....	2
1.2. ESTRUTURA DA TESE .....	2
<b>2. CLASSIFICAÇÃO DE RESISTÊNCIA AO FOGO .....</b>	<b>4</b>
2.1. INCÊNDIO .....	4
2.1.1. <i>Modelo de incêndio natural</i> .....	5
2.1.2. <i>Curvas de incêndio Nominais</i> .....	6
2.2. COMPARTIMENTAÇÃO AO FOGO .....	10
2.2.1. <i>Compartimentação Horizontal</i> .....	10
2.2.2. <i>Compartimentação Vertical</i> .....	11
2.3. CLASSIFICAÇÃO DOS MATERIAIS EM RELAÇÃO AO FOGO .....	12
2.4. DESCRIÇÃO DOS ELEMENTOS ESTUDADOS.....	15
2.4.1. <i>Portas convencionais</i> .....	15
2.4.2. <i>Portas Corta-fogo</i> .....	16
2.4.3. <i>Resistência ao fogo das portas corta-fogo</i> .....	16
2.4.4. <i>Desempenho Térmico</i> .....	17
2.5. A UTILIZAÇÃO DA MADEIRA .....	18
2.6. TIPOS DE PAINÉIS DE MADEIRA .....	19
2.6.1. <i>Madeira Sólida</i> .....	19
2.6.2. <i>Placa de fibra de média densidade (MDF)</i> .....	19
2.6.3. <i>Aglomerado de densidade média (MDP)</i> .....	20
2.6.4. <i>Aglomerado de partículas de madeiras longas e orientadas (OSB)</i> .....	20
2.7. PROCESSO DE IGNIÇÃO E COMBUSTÃO DA MADEIRA .....	20
<b>3. COMPORTAMENTO TÉRMICO DOS MATERIAIS .....</b>	<b>23</b>
3.1. CONCEITOS FUNDAMENTAIS .....	23
3.1.1. <i>Taxa de liberação de calor</i> .....	23
3.1.2. <i>Pirólise da Madeira</i> .....	24
3.1.3. <i>Ignição</i> .....	25
3.2. MECANISMOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR .....	25
3.2.1. <i>Condução</i> .....	26
3.2.2. <i>Convecção</i> .....	27
3.2.3. <i>Radiação</i> .....	28
3.3. PROPRIEDADES TÉRMICAS DOS MATERIAIS.....	29
3.3.1. <i>Condutividade térmica</i> .....	29
3.3.2. <i>Calor Específico</i> .....	30

3.3.3.	<i>Emissividade</i> .....	32
3.4.	VARIAÇÃO DAS PROPRIEDADES EM RELAÇÃO A TEMPERATURA .....	32
3.5.	PROPRIEDADES DOS MATERIAIS .....	43
<b>4.</b>	<b>MODELO MULTICAMADA EM ESTUDO</b> .....	<b>47</b>
4.1.	ENSAIO EXPERIMENTAL NO FORNO .....	47
4.2.	MODELO DE BENCHMARK .....	49
4.3.	MODELO NUMÉRICO DE OTIMIZAÇÃO .....	50
4.4.	PROCESSO DE OTIMIZAÇÃO .....	54
4.4.1.	<i>Modelos de refinamento de resultados</i> .....	54
4.4.2.	<i>Função objetivo</i> .....	55
4.4.3.	<i>Constrangimentos</i> .....	55
4.4.4.	<i>Casos que cumprem ou não os requisitos de otimização</i> .....	56
4.5.	CONDIÇÕES DE FRONTEIRA .....	59
4.6.	BLOCO PORTA CORTA-FOGO .....	59
<b>5.</b>	<b>ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS</b> .....	<b>63</b>
5.1.	ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DA MALHA .....	63
5.2.	ENSAIO FEITO NO FORNO .....	66
5.2.1.	<i>Análise experimental</i> .....	66
5.2.2.	<i>Análise numérica do ensaio experimental</i> .....	68
5.3.	RESULTADOS DA OTIMIZAÇÃO .....	70
5.3.1.	<i>Ensaio de 30 minutos</i> .....	70
5.3.2.	<i>Ensaio de 60 minutos</i> .....	72
5.3.3.	<i>Ensaio de 90 minutos</i> .....	74
5.4.	RESULTADOS BLOCO PORTA .....	75
5.4.1.	<i>Análise dos resultados comparados aos modelos de otimização</i> .....	75
5.4.2.	<i>Análise dos pontos do Bloco porta corta-fogo</i> .....	78
<b>6.</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>80</b>
6.1.	CONCLUSÃO .....	80
6.2.	TRABALHOS FUTUROS .....	81
<b>7.</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>82</b>

## Lista de figuras

Figura 2.1: Tetraedro do fogo. ....	4
Figura 2.2: Curva de incêndio natural, (COSTA E SILVA 2002).....	5
Figura 2.3: Gráfico de evolução da temperatura das curvas padrão.[8].....	9
Figura 2.4: Compartimentação horizontal de resistência à incêndio,[12].....	11
Figura 2.5: Compartimentação vertical de Resistencia à incêndio, [12].....	12
Figura 2.6: Resultado da análise termogravimétrica da madeira de eucalipto, [20]. ....	21
Figura 2.7: Pontos onde ocorrem mudanças dos regimes de queima. 1 - Início da pirólise, 2 – Pico HRR, 3 - combustão na parte inferior da madeira, 4 – incandescência, [21].....	22
Figura 3.1: Amostra de madeira após sofrer combustão, [25]. ....	25
Figura 3.2: Condutividade térmica para a madeira e a camada de carvão, [35], [36].....	34
Figura 3.3: Calor específico para a madeira e a camada de carvão, [35], [36]. ....	34
Figura 3.4: Relação de densidade da madeira e da camada de carvão, [35], [36]. ....	35
Figura 3.5: Condutividade térmica em função da temperatura do OSB, madeira compensada, aglomerado e painéis de fibra, [35]. ....	36
Figura 3.6: Calor específico em função da temperatura para o OSB, madeira compensada, aglomerados e painéis de fibra, [35]. ....	36
Figura 3.7: Relação de densidade do OSB, madeira compensada, aglomerados e painéis, [35]. ....	37
Figura 3.8: Condutividade térmica em função da temperatura para a lã mineral, [35].....	38
Figura 3.9: Calor específico em função da temperatura para a lã mineral, [35]. ....	38
Figura 3.10: Relação de densidade da lã mineral, [35]. ....	39
Figura 3.11: Propriedades térmicas dependentes da temperatura do Concreto, segundo Eurocódigo 1992-1-2, [37]. ....	40
Figura 3.12: Propriedades térmicas dependentes da temperatura da Alvenaria, segundo Eurocódigo 1996-1-2 de 2005, [39]. ....	41
Figura 3.13: Propriedades térmicas do aço, [38]. ....	42
Figura 4.1: Localização dos termopares do modelo, a) lado exposto; b) lado não exposto, em mm, [15]. ....	48
Figura 4.2: Dimensões da espessura dos sistemas multicamadas: a) MDF + lã de rocha + MDF; b) pinho + lã de rocha + pinho, em mm, [15]. ....	48
Figura 4.3: Modelo de MDF ensaiado: a) Lado exposto; b) lado não exposto instalado na estrutura do forno, com paredes de tijolos e aro de pinho, [15]. ....	49

Figura 4.4: Modelo de MDF; a) Seção transversal do modelo ensaiado no forno, [15]; b) Seção transversal no Ansys.....	50
Figura 4.5: Modelo multicamadas numérico; a) Modelo completo para otimização, todas medidas em milímetros;	
b) detalhamento dos materiais componentes do lado direito da porta.	51
Figura 4.6:Modelo multicamadas da porta, usado para otimização. ....	52
Figura 4.7: Propriedades do MDF inseridas para a modulação do modelo segundo realidade, a) Materiais utilizados para montagem do modelo; b) Seleção da propriedade a ser visualizada; c) Tabela de Temperatura densidade; d) Gráfico gerado a partir da tabela c. ....	53
Figura 4.8: Representação dos pontos que cumprem em cores, e pontos que não cumprem as exigências do problema, em cinza acima da marca de 160 °C. ....	57
Figura 4.9: Pontos de otimização em relação a T_NE, a) Isolamento de Lã de rocha; b) MDF. ....	58
Figura 4.10: a) Representação bloco porta; b) Detalhe batente e parede esquerdo; c) Detalhe batente e parede direito; .....	60
Figura 4.11: a) Bloco porta modelado no Ansys para o teste de 30 minutos; b) Detalhamento de malha da porção esquerda, com parede e dobradiça. ....	61
Figura 5.1: Definição do número de divisões da malha por elemento, a) 2+3+2; b) 3+3+3; c) 3+4+3; d) 4+5+4. ....	65
Figura 5.2: Gráfico das curvas de desenvolvimento da temperatura não exposta, com variação nos incrementos de tempo. ....	66
Figura 5.3: Gráfico para avaliação do teste experimental de tempo resistente do sistema multicamada MDF + Lã de Rocha + MDF, [15]. ....	67
Figura 5.4: a) Carbonização completa da placa de MDF ao fim do ensaio no forno, b) Interior do forno após o ensaio.....	68
Figura 5.5: Comparação do ensaio experimental e do modelo numérico da superfície não exposta.....	69
Figura 5.6: Resultados para a modelagem de 30 minutos.....	70
Figura 5.7:Gradiente de temperatura 30 minutos, a) Gradiente da folha da porta completa; b) Corte com mais zoom do elemento. ....	71
Figura 5.8: Resultados para a modelagem de 60 minutos.....	72
Figura 5.9: Gradiente de temperatura 60 °C, a) Gradiente da folha da porta completa; b) Corte com mais zoom do elemento. ....	73
Figura 5.10: Resultados otimização de 90 minutos, com pontos do sistema de otimização....	74

Figura 5.11: Gradiente de temperatura do modelo de 90 minutos, a) Gradiente da folha da porta completa; b) Corte com mais zoom do elemento. ....	75
Figura 5.12: Pontos de análise de resultados do Bloco porta; a) Midpoint; b) Porta-batente; c) parede; d) dobradiça. ....	76
Figura 5.13: Temperaturas dos ensaios para 30, 60 e 90 minutos, com as respectivas configurações geométricas dos resultados do processo de otimização. ....	77
Figura 5.14: Gradiente de temperaturas do bloco porta, a) Bloco completo; b) Corte da conexão porta dobradiça. ....	78

## Lista de tabelas

Tabela 2.1: Classificação de resistência ao fogo.....	17
Tabela 3.1: Condutividade térmica de diversos materiais a 27 °C, [31]. .....	30
Tabela 3.2: Calor Específico médio de alguns materiais, [33].....	31
Tabela 3.3: Emissividade de diversos materiais de construção .....	32
Tabela 3.4: Propriedades térmicas dependentes da temperatura para madeira e a camada carbonizada para membros de madeira e painéis de madeira maciça, segundo o Eurocódigo 1995-1-2 de 2020, [35].....	33
Tabela 3.5: Propriedades térmicas dependentes da temperatura do OSB, madeira compensada, aglomerados e painéis de fibra, [35]. .....	35
Tabela 3.6: 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> , [35].	37
Tabela 3.7: Propriedades térmicas dependentes da temperatura do Concreto, segundo Eurocódigo 1992-1-2, [37].....	40
Tabela 3.8: Propriedades térmicas dependentes da temperatura da Alvenaria, segundo Eurocódigo 1996-1-2 de 2005, [39]. .....	41
Tabela 3.9: Propriedades térmicas dependentes da temperatura da Aço, segundo Eurocódigo 1993-1-2 de 2005, [38].....	42
Tabela 3.10: Propriedades da madeira de pinho bravo, adaptado, [35]. .....	43
Tabela 3.11: Propriedades físicas dependendo da temperatura do MDF, adaptada.....	44
Tabela 3.12: Propriedades térmicas da lã de rocha com evolução da temperatura. ....	44
Tabela 3.13: Propriedades físicas dependendo da temperatura do concreto, adaptado. ....	45
Tabela 3.14: Propriedades físicas da Alvenaria em relação a temperatura. ....	46
Tabela 3.15: Propriedades físicas da fita intumescente dependente da temperatura. ....	46
Tabela 5.1: Análise de sensibilidade da malha de elementos finitos. ....	64
Tabela 5.2: Resultados dos ensaios criados pela otimização, e feito com medidas de espessura comercial para 30 minutos. ....	70
Tabela 5.3: Resultados dos ensaios criados pela otimização, e feito com medidas de espessura comercial para 60 minutos. ....	73
Tabela 5.4: Resultados dos ensaios criados pela otimização, e feito com medidas de espessura comercial para 90 minutos. ....	74
Tabela 5.5: Diferença entre os resultados do bloco porta e otimizados, para mesmos tempos resistentes. ....	77

Tabela 5.6: Temperaturas dos pontos de análise do bloco porta..... 79

## **Abreviaturas e Símbolos**

ISO	Organização Internacional para Padronização
ASTM	Sociedade Americana de Testes e Materiais
EN	Norma europeia
RT-SCIE	Regulamento técnico de segurança contra incêndio
MDF	Painel de fibras de media densidade
MDP	Aglomerado de densidade média
OSB	Aglomerado de partículas de madeira longas e orientadas
TGA	Análise termogravimétrica
HRR	Taxa de liberação de calor
PCI	Poder calorífico

# 1. INTRODUÇÃO

Os incêndios têm consequências significativas e de grande alcance, especialmente quando resultam em perda de vidas e danos materiais. De acordo com dados da Associação Nacional de Proteção contra Incêndios (National Fire Protection Association, em inglês), só nos Estados Unidos, ocorreram cerca de 1,3 milhão de incêndios em 2019, resultando em 3.704 mortes e prejuízos econômicos de mais de US\$ 14,8 bilhões. No Brasil, a Associação Brasileira de Sprinklers (ABSpk) relata que ocorrem mais de 100 mil incêndios no país anualmente, com prejuízos estimados em mais de R\$ 1 bilhão.

Além do impacto imediato, os incêndios também podem ter consequências a longo prazo nas comunidades e indivíduos afetados. As pessoas podem ser deslocadas de suas casas e comunidades, enfrentar dificuldades financeiras e sofrer trauma emocional. As empresas podem perder ativos importantes e enfrentar interrupções em suas operações, com consequências econômicas significativas. É essencial investir em prevenção e educação sobre segurança contra incêndios, bem como em medidas de proteção e resposta, para minimizar as consequências dos incêndios e reduzir o risco de sua ocorrência.

Um aspecto importante que deve ser levado em conta na hora de projetar uma estrutura como um prédio ou edifício, é o tipo de sistemas de proteção contra o fogo que essa estrutura pode suportar em caso de incêndios. Projetar estruturas já levando isso em conta, é de extrema importância, que em casos de acidentes com fogo, o ambiente possa ser facilmente evacuado e garantindo a estanqueidade, para que o fogo demore passar de um ambiente para outro no interior da edificação.

Em situações de incêndio um elemento que é de extrema importância para garantir segurança em casos de incêndio, são as portas corta-fogo ou resistentes ao fogo, esta é composta por folha, aro e acessórios, incluindo dispositivos automáticos de fecho. Se bem fabricada e instalada, evita a propagação do fogo, como também da fumaça e radiação, durante um período predeterminado e verificado através de ensaios normalizados feitos em laboratórios.

A proteção passiva contra incêndio em edifícios tem base na utilização de produtos de construção que tenham propriedades de resistência a reação ao fogo, de acordo com a aplicação e o nível de risco, com o objetivo de limitar a propagação e desenvolvimento generalizado do

incêndio, garantindo a estabilidade e integridade do edifício durante o incêndio, também criando zonas seguras para a evacuação dos ocupantes e atuação dos bombeiros.

## **1.1. Objetivos**

Nos últimos anos, com as políticas e normatizações ecológicas e ambientais, a madeira e seus derivados, assim como elementos estruturais de madeira vem sendo colocados como matéria prima ecologicamente sustentável e renovável, tendo um papel positivo em comparação com outros produtos usados nas construções como o aço e concreto, em relação as reduções de emissão de dióxido de carbono.

Este estudo tem por objetivo principal desenvolver um sistema multicamadas de painéis de madeira e derivados, ligados por adesivos ou fixação mecânica, além de definir por métodos numéricos a menor espessura de materiais deve ser empregada para que o elemento porta corta-fogo multicamadas possa ter um desempenho que satisfaça as especificações de norma de resistência a incêndio de elementos de construção. Assim realizando as simulações numéricas assistidas por computador, através do software Ansys.

## **1.2. Estrutura da tese**

A presente dissertação está estruturada em cinco capítulos.

No **Capítulo 1**, é apresentada uma introdução, com os objetivos e a metodologia adotada no decorrer do trabalho.

No **Capítulo 2**, compreende as definições que serão importantes para o entendimento do trabalho, assim como os elementos de estudo e suas aplicações.

No **Capítulo 3**, são apresentados os conceitos térmicos fundamentais do estudo, como o comportamento da madeira, derivados e isolante térmico diante da variação de temperatura.

Durante o **Capítulo 4**, é apresentado o modelo experimental, que fornece validação para a análise numérica, que será desenvolvida ao longo da dissertação, através do software *Ansys Workbench*, para ensaiar a transferência de calor no sistema multicamadas de porta corta-fogo.

No **Capítulo 5** são apresentados os resultados obtidos dos ensaios experimentais e numéricos, afim de comparar seus resultados e avaliar a qualidade e aceitação do modelo, e por fim no **Capítulo 6**, são apresentadas as conclusões e possibilidades futuras de pesquisa.

## 2. CLASSIFICAÇÃO DE RESISTÊNCIA AO FOGO

### 2.1. Incêndio

A combustão é uma reação química exotérmica de oxidação que libera luz e calor; e é através dela juntamente com um comburente que surge, o que hoje chamamos de fogo. Para essa reação acontecer e se manter, são necessários quatro elementos: combustível, o comburente, o calor e a reação em cadeia, [1]. Esses fatores formam o tetraedro do fogo, representado a seguir na Figura 2.1.

Um incêndio, por sua vez, é a ocorrência de fogo que se encontra fora de controle e consome materiais indevidos, causando danos a vida, propriedades e meio ambiente devido às suas chamas, calor e fumaça, [1].



Figura 2.1: Tetraedro do fogo.

Um incêndio tem diferentes fases que podem ser demonstradas mediante uma curva que fornece a temperatura dos gases de um ambiente em função do tempo. Gases que são provenientes da combustão e reações exotérmicas causadas por ela, que transferem calor a estrutura e componente por meio de irradiação e convecção, [2].

### 2.1.1. Modelo de incêndio natural

O modelo de incêndio natural é representado graficamente por uma curva de temperatura-tempo, composta por três fases: fase de ignição, aquecimento e resfriamento. A construção desta curva é realizada por meio de estudos analíticos, experimentais e computacionais, que simulam a situação real de um compartimento em chamas. Esses ensaios são realizados em ambientes com aberturas que simulam janelas, mas sem a possibilidade de propagação para o exterior, devido às propriedades de isolamento térmico, resistência ao fogo e estanqueidade dos elementos de vedação aplicadas como condições de contorno, [3]. A evolução do incêndio pode ser descrita em 3 fases assim como representado na Figura 2.2.

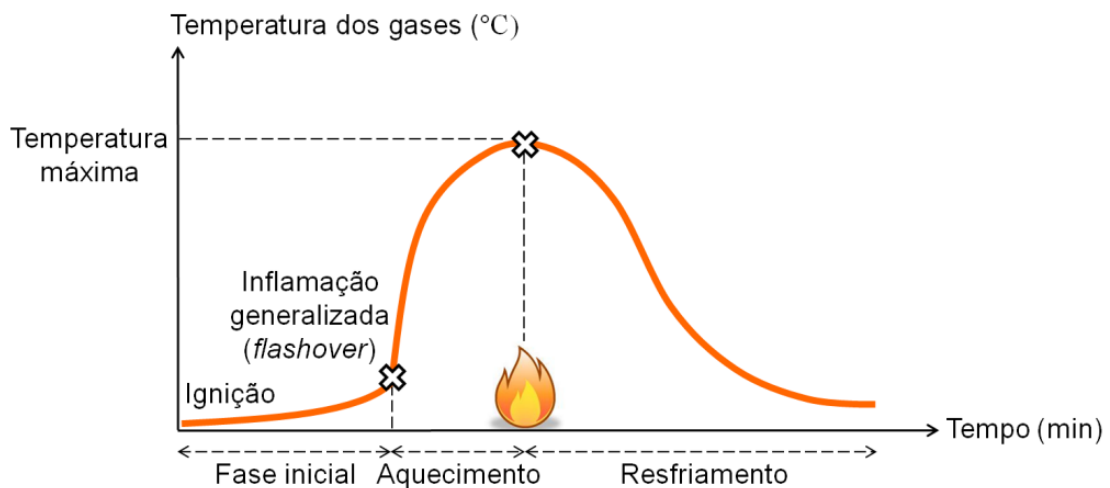


Figura 2.2: Curva de incêndio natural, (COSTA E SILVA 2002).

Na parte inicial da curva, temos a zona de ignição de algum elemento combustível presente no local, e sua energia térmica aquece lentamente os outros materiais inflamáveis, assim, a temperatura permanece relativamente baixa, sendo que, se o sinistro for interrompido nesta fase não haverá grandes danos estruturais. Essa é a fase denominada “*pré-flashover*”, ou fase de ignição, sendo muito delicada por representar grandes riscos a vida humana, através da liberação de gases tóxicos e asfixiantes liberados pelo material em combustão [3]. A extinção do fogo sob essas circunstâncias ocorre através de sistemas de proteção ativa de combate ao fogo.

Os meios de proteção ativa sendo de acionamento manual ou automático, são muito importantes, pois são responsáveis pela identificação de um foco de incêndio e o primeiro combate, como também possibilitam a rápida desocupação do local. Dentre eles se destacam:

alarme de incêndio, sprinkler (chuveiro automático), extintores, hidrantes, detectores de calor e fumaça e iluminação de incêndio.

Caso o fogo não seja controlado em sua fase inicial, as temperaturas começam a se elevar até o momento em que toda a carga de incêndio entre em ignição, quase simultaneamente, gerando um aumento considerável da transmissão de calor e tomando o ambiente em chamas. Esse instante fica conhecido como “*flashover*” ou inflamação generalizada, sendo mais crítico para as estruturas, pois é quando o ambiente está completamente tomado pelas chamas. Admite-se assim que, durante esta fase, o incêndio atinge a sua temperatura máxima [2].

Nesta fase, os meios de proteção ativa não conseguem mais extinguir as chamas, passando a ser efetivas somente apenas a proteção passiva, que é o conjunto de medidas incorporadas ao sistema construtivo da edificação, que reage passivamente ao desenvolvimento do incêndio, não permitindo a sua propagação e alastramento, garantindo a resistência ao fogo, facilitando a fuga dos usuários [4].

Posteriormente na última fase, toda a carga de incêndio já foi consumida, não existindo mais liberação de calor, causando uma queda da temperatura média dos gases e no esfriamento dos elementos estruturais.

### **2.1.2. Curvas de incêndio Nominais**

Os modelos parametrizados de incêndios são ferramentas matemáticas avançadas que simulam o comportamento do fogo em um determinado ambiente. Estes modelos se baseiam em equações físicas e químicas para prever como o fogo se desenvolverá em termos de temperatura, pressão, velocidade e outras variáveis relevantes. Em termos de resistência ao fogo, a curva ISO 834 é amplamente utilizada como referência mundial, mas de acordo com a parte 1-2 do EC1, existem duas outras curvas nominais, a curva de incêndio para elementos exteriores e a curva de incêndio de hidrocarbonetos, [4]. As curvas de incêndio nominais são funções analíticas que representam a temperatura em função do tempo. E são chamadas de nominais devido ao fato dessas curvas não representarem a realidade de um incêndio, já que consideram fatores resumidos do que seria a totalidade de elementos que influenciam no aumento de temperatura durante a evolução de uma situação de incêndio.

## Curva ISO 834

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 R834, 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) [5].

As normas utilizadas para a elaboração da ISO 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, [6]. Nesta é apresentada a equação da evolução de temperatura da curva de incêndio padrão, segundo a equação (2.1).

$$\theta_g - \theta_{g0} = 345 * \log (8 * t + 1) \quad (2.1)$$

Onde:

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

$\theta_{g0}$  é a temperatura da atmosfera do compartimento no instante  $t = 0$  [°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, sendo assim a equação (2.1) fica da seguinte forma:

$$\theta_g = 345 * \log(8 * t + 1) + 20 \quad (2.2)$$

## Curva de incêndio para elementos exteriores

O Eurocódigo 1 (EN 1991-1-2) define uma curva para elementos construtivos externos ao compartimento onde está ocorrendo o incêndio, que também sofram com o ataque das chamas, através da equação (2.3).

$$\theta_g = 660 \cdot (1 - 0,687 \cdot e^{-0,32 \cdot t} - 0,313 \cdot e^{-3,80 \cdot t}) + 20 \quad (2.3)$$

No cenário de incêndio para o uso da curva de incêndio externo (*external fire curve*), conforme o EN 1991-1-2 (2002) leva em consideração algumas hipóteses como: a carga de incêndio do compartimento é constituída de materiais celulósicos e a temperatura da atmosfera exterior, onde se encontra a estrutura tenha uma temperatura inferior àquela dentro do compartimento, [5].

Para projetos de elementos de fachada de edifícios, assim como de elementos exteriores a como paredes e janelas, são bem representados pelas curvas de incêndio externo, já que as chamas podem se propagar para os espaços abertos atingindo esses elementos que se encontram fora do compartimento de incêndio. Salienta-se que paredes estruturais e marquises possuem uma dupla funcionalidade: manter a estabilidade estrutural e compartimentar, [3].

### **Curva de incêndio de materiais hidrocarbonetos (H)**

Segundo [5], as curvas padrão de incêndio de materiais hidrocarbonetos são amplamente utilizadas no projeto de ambientes industriais e túneis, onde a maioria das cargas de incêndio é composta por hidrocarbonetos, ou seja, compostos químicos que consistem em átomos de carbono (C) e hidrogênio (H), e podem ou não estar combinados com átomos de oxigênio (O), nitrogênio (N) e enxofre (S). Exemplos de tais materiais incluem petróleo, gás natural, óleo mineral, solventes, óleos derivados e ceras.

Como esses materiais são altamente inflamáveis, os Estados Unidos começaram a estudar as características de incêndios envolvendo esses materiais no início dos anos 80. Além disso, na década de 70, as indústrias petroquímicas já haviam iniciado testes para investigar as condições nas quais os incêndios por materiais inflamáveis eram produzidos, [7]. Observou-se o colapso de elementos estruturais quando expostos a incêndios envolvendo materiais derivados de petróleo.

Existem duas grandes diferenças entre os incêndios de materiais hidrocarbonetos e o incêndio de materiais celulósicos que ficam evidentes: a taxa de aquecimento e o fluxo de calor liberado durante a combustão, [5]. Quando o incêndio é derivado de materiais hidrocarbonetos, a temperatura chega aos 1100 °C em apenas 5 minutos de incêndio, enquanto que para os materiais celulósicos a temperatura chega aos seus 880 °C somente após 40 minutos em média. Fazendo a comparação entre os fluxos de calor correspondentes, os incêndios de materiais celulósicos é, de aproximadamente, 100 kW/m<sup>2</sup>, contra 200 kW/m<sup>2</sup> do incêndio de hidrocarboneto, [7].

Dessa forma a curva “H”, foi inicialmente desenvolvida para aplicação em projetos de segurança contra incêndios em indústrias petroquímicas e offshore. Atualmente, ela é recomendada para projetos de túneis. De acordo com CANER et al. (2005), a curva "H" é adequada para materiais derivados do petróleo que podem causar incêndios de pequena escala.

O Eurocódigo 1, EN 1991-1-2 (2002) fornece a eq. (2.4), para a curva

$$\theta_g = 1080 \cdot (1 - 0,33 \cdot e^{-0,17 \cdot t} - 0,313 \cdot e^{-2,50 \cdot t}) + 20 \quad (2.4)$$

Portanto na Figura 2.3, descreve graficamente essas curvas nominais de incêndio em função do tempo de incêndio.

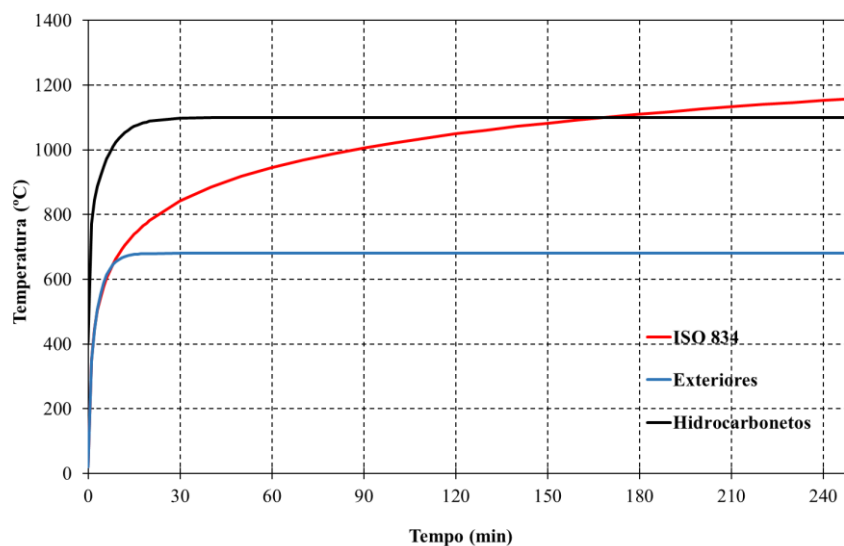


Figura 2.3: Gráfico de evolução da temperatura das curvas padrão.[8].

Além dessas curvas acima citadas também existem outras curvas-padrão para materiais inflamáveis (ASTM E1529 (1993), RWS, RABT) que foram modeladas em função da severidade e características do incêndio, sendo recomendadas para algumas situações especiais, [9].

## **2.2. Compartimentação ao fogo**

A compartimentação é definida como a divisão horizontal e vertical de edifícios através de barreiras resistentes ao fogo, formando compartimentos estanques ao fogo e aos seus subprodutos. Esta técnica tem como objetivo impedir a propagação do incêndio para áreas adjacentes.

A avaliação da resistência ao fogo dos elementos de compartimentação baseia-se na capacidade de manter a integridade física desses elementos por um período pré-determinado, visando garantir a segurança das pessoas durante a evacuação, [3].

A compartimentação pode incluir aberturas, tais como portas, janelas e caixilhos, que devem ter características corta-fogo, incluindo isolamento térmico, estabilidade e estanqueidade. De acordo com ROSSO (1975) [10], a compartimentação é uma medida de proteção passiva de responsabilidade direta do arquiteto, que é responsável por definir os compartimentos de permanência, refúgio e saídas de emergência dos usuários, bem como os materiais de construção dos elementos de vedação e a arquitetura favorável ao confinamento do sinistro ao seu local de origem.

Segundo o decreto de Lei nº 64/90, de 21 de fevereiro de 2022 em Portugal [11], a compartimentação corta-fogo dos edifícios deve ser garantida pelos pavimentos, ademais em edifícios com grandes plantas horizontais precisam ter paredes corta-fogo, delimitando as áreas em partes iguais ou superiores à 1250 m<sup>2</sup>, sendo uma medida das faces internas das paredes de cada parte. Também em edifícios que tenham áreas duplex, tendo áreas de escadas privativas não é obrigatória a compartimentação guarda-fogo entre os pavimentos, no entanto sendo necessária a contabilização de sua área cumprir.

### **2.2.1. Compartimentação Horizontal**

Compartimentação horizontal é garantida através de alguns dispositivos de proteção, como por exemplo paredes divisórias corta-fogo para subdivisão de grandes áreas de pavimentos, do piso ao teto e vedando suas aberturas, portas corta-fogo nas aberturas das paredes destinadas a circulação de pessoas e equipamentos, assim como registros corta-fogo nos dutos de ventilação que transpassam as paredes, além de selos corta-fogo nas passagens de cabos elétricos e tubulações [12].

Ademais, quando se trata de compartimentação horizontal tem que ser levado em conta que as áreas mínimas para aplicação desta dependem do tipo de ocupação e também da altura da edificação [12]. Na Figura 2.4, pode-se ver como seria essa compartimentação para compartimentos horizontais.

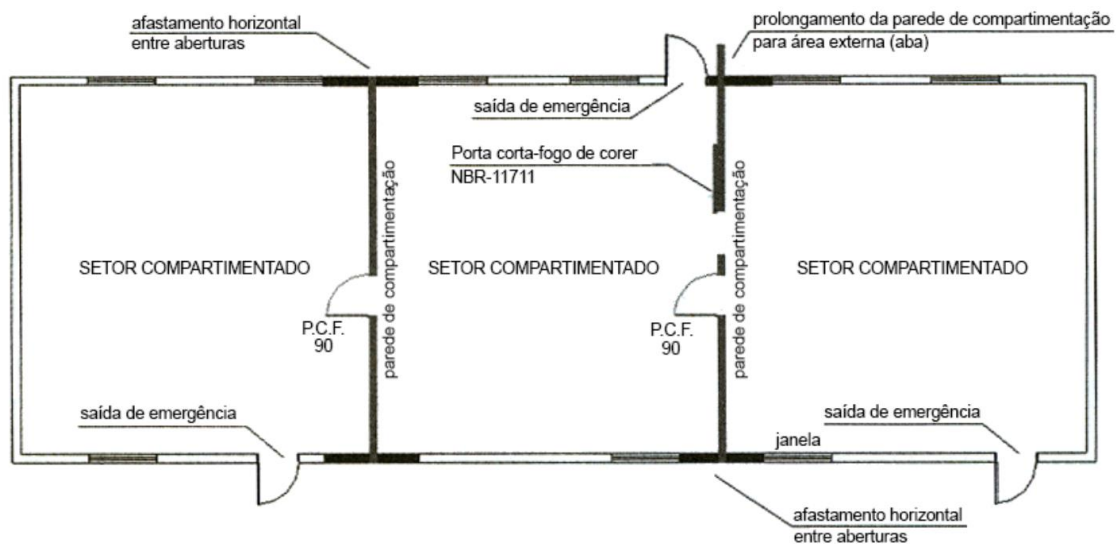


Figura 2.4: Compartimentação horizontal de resistência à incêndio,[12].

### 2.2.2. Compartimentação Vertical

A compartimentação vertical destina-se a impedir a propagação do fogo entre pavimentos adjacentes, garantindo assim que cada um seja um sistema isolado em relação aos demais. Normalmente as chamas se propagam para os andares a cima do sinistro inicial, sendo assim alguns dispositivos podem garantir o isolamento da área atingida sendo todos de natureza corta-fogo, como selos nas passagens de cabos e tubulações, os entrepisos que dificultam a passagem do fogo, enclausuramento de escadas com paredes e portas corta-fogo e dispositivos de enrolar corta fogo [12]. Estes métodos atrasam a passagem das chamas entre os pavimentos, o que permite uma resposta ativa mais eficaz, já que essas características retardam a propagação do sinistro, na Figura 2.5, pode ser visualizado exemplos de compartimentação vertical.

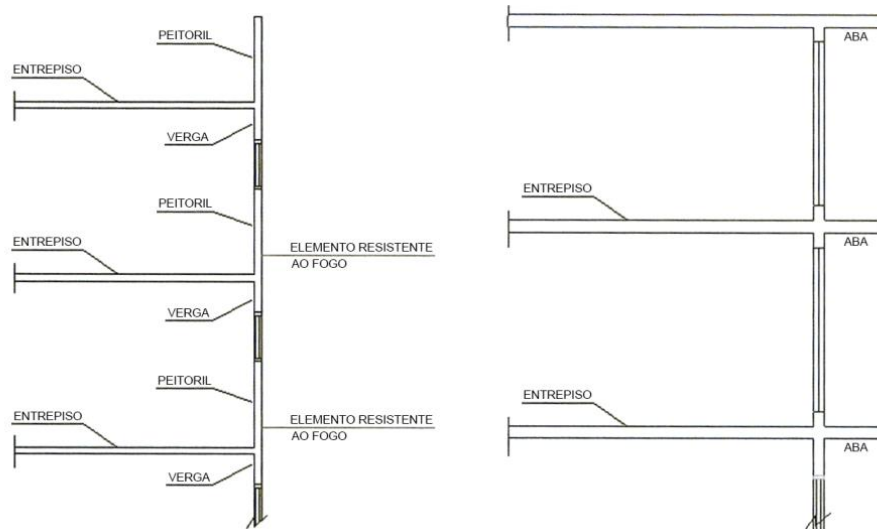


Figura 2.5: Compartimentação vertical de Resistencia à incêndio, [12].

### 2.3. Classificação dos materiais em relação ao fogo

Os estudos do comportamento de materiais em relação ao fogo, torna-se necessário classificá-los de acordo com sua combustibilidade. Nas normas de construção são regulamentados os requisitos de segurança contra incêndio, onde são classificados todos os materiais de construção, assim como os materiais de revestimentos de paredes, pisos e tetos. A finalidade dessa legislação é permitir uma evacuação segura dos ocupantes de um espaço fechado em situação de incêndio.

Os países da união europeia usavam testes diferentes para fazer essa avaliação de reação ao fogo dos materiais de construção, o que dificultava muito a comparação de determinado material, se este era avaliado usando métodos diferentes. Sendo assim, para acabar com esses transtornos que geravam barreiras comerciais entre países diferentes, foi implantada uma norma para substituir os diferentes sistemas de classificação, [13], [14].

Os padrões europeus para classificação de materiais em relação ao risco de incêndio constituem um conjunto de normas de teste aceitas pelos países europeus. Essas normas permitem que fabricantes produzam ou importem produtos que foram testados seguindo um padrão comum. Isso evita que sejam necessários testes diferentes para o mesmo material ou produto em cada um dos países onde ele é comercializado, [13].

No seguinte caso de estudo da resistência ao fogo, existem normas específicas que regem cada tipo de ensaio, quando são os experimentais no forno, regulamentado pela norma EN 1363-1, a EN 1634-1 e EN 1634-3 guiam os ensaios de resistência ao fogo para conjuntos de portas e sistemas de fecho, foco do presente estudo. Ademais a EN 13501-1 classifica os elementos de construção em função do seu comportamento face a exposição ao fogo, [15].

Para se fazer a classificação dos produtos e materiais de construção em relação ao fogo é preciso determinar duas importantes características: a resistência do material ao fogo e a sua reação ao fogo. Sendo que a primeira define a capacidade do elemento de resistir ao fogo, já a segunda determina como o material se comporta durante o incêndio, como este contribui para a propagação e sua contribuição na evolução do fogo.

A EN 13501-1 define a classificação da reação e resistência ao fogo dos produtos de construção e determina cinco testes para classificar os materiais, sendo eles: teste de inflamabilidade do material (ISO 11925-2), que regulamenta a facilidade de um produto entrar em ignição, sob a influência de uma chama piloto; teste de incombustibilidade (ISO 1182), que identifica os materiais e produtos que não contribuem significativamente para a evolução do incêndio; o teste de calor de combustão (ISO 1716), que determina o poder calorífico superior e inferior de um determinado material, por intermédio de uma bomba calorimétrica, que torna possível determinar o calor máximo que poderá ser liberado durante um incêndio; teste do elemento isolado (EN 13823), que é um método desenvolvido para determinar a reação dos produtos de construção ao fogo quando exposto a um objeto isolado em combustão e o teste do comportamento de parâmetros em relação ao fogo proveniente de uma fonte radiante de calor (ISO 9239-1), que é utilizado para pavimentos e revestimentos, [16].

A norma EN 13501-1:2018 define a classificação da reação ao fogo para produtos de construção, incluindo os produtos incorporados em elementos de construção. Essa classificação é estabelecida em sete classes de reação ao fogo, denominadas "Euroclasses", que vão da classe A1 até a classe F. A classe A1 representa os materiais que apresentam o menor risco de contribuir para o desenvolvimento do fogo, enquanto a classe F representa os materiais com maior contribuição para o fogo, [14].

Essa classificação permite avaliar o desempenho dos produtos de construção e compará-los entre diferentes fabricantes e países da União Europeia. Para atribuir essa classificação, utiliza-se uma combinação de ensaios que simulam diferentes cenários de incêndio, avaliando a extensão do dano, a propagação da chama, a liberação de calor, a produção de fumo e a queda

de partículas ou gotas inflamadas. À medida que se sobe na escala de classificação, os ensaios tornam-se mais exigentes. As sete classes são:

- A1, materiais que não contribuem para nenhuma fase do incêndio, mesmo quando esse está totalmente desenvolvido, cumprindo todos os requisitos das classes inferiores. É analisado com muita rigorosidade os resultados dos testes EN ISO 1716 e EN ISO 1182.
- A2, materiais que não favorecem significativamente para a carga e desenvolvimento do incêndio, satisfazendo todos os requisitos da classe B. Um produto que se aplica a essa classe deve ser testada conforme EN ISO 1182 e EN ISO 1716.
- B, materiais cuja a influência para a evolução e aumento da carga de incêndio é bem limitada, satisfazendo os requisitos da classe C, porém com mais rigor na obtenção dos resultados dos testes das EN 13823 e EN ISO 11925-2.
- C, são os materiais que tem uma contribuição para a evolução do incêndio relativamente limitada, satisfazendo os critérios da classe D, com um grau a mais de rigor nos resultados. Os testes são regidos pelas normas EN 13823 e EN ISO 11925-2, que são realizados com requisitos mínimos para seus resultados.
- D, materiais com uma contribuição relativamente significativa para o incêndio, cumprindo todos os requisitos da classe E, com capacidade superior de resistir por um tempo maior ao ataque de uma chama de pequenas dimensões sem que ocorra uma propagação substancial. Ademais consegue suportar o ataque térmico de um elemento isolado em combustão com uma liberação de calor suficientemente limitada e retardada. São feitos os testes ISO 11925-2 com exposição de 30s e EN 13823, com requisitos mínimos para os resultados;
- E, para materiais com uma contribuição significativa para o incêndio. Devem ser capazes de resistir por um curto período de tempo ao ataque de uma chama de pequenas dimensões sem que ocorra uma propagação substancial da chama;

Os requisitos mínimos estão descritos na Tabela 1 da EN 13501-1. Também existe a classificação de acordo com a produção de fumo do material, que é representado pela letra s e conforme a liberação de partículas e gotas inflamadas, pela letra d. A produção de fumo tem três classes: a s3 sem restrições para a produção de fumo, a classe s2 tem um limite da produção total de fumo, assim como a taxa de liberação de fumo e a classe s1 que abrange os critérios de classificação da s2, só que com aspectos mais rigorosos. Além do mais, tem a classificação de

acordo com a produção de partículas/gotas inflamadas, d0, onde não ocorre a produção de partículas/gotas, d1, quando não há essa produção de partículas por um determinado período de tempo e d2, que não tem restrições quanto a produção dessas partículas,

## **2.4. Descrição dos elementos estudados**

### **2.4.1. Portas convencionais**

As portas convencionais são elementos importantes na construção civil há séculos. Desde a antiguidade, os seres humanos têm construído portas para controlar o acesso a espaços interiores, para a segurança, para o isolamento térmico e acústico, além de outras finalidades. A história das portas convencionais é longa e rica, e a evolução dos seus aspectos é notável, [17].

As primeiras portas convencionais foram construídas com madeira e outros materiais orgânicos, como o couro, para obter uma barreira eficaz contra o clima e os invasores. Na Grécia Antiga e em outras culturas, a decoração nas portas era comum, com esculpidas obras de arte que embelezavam as entradas. Na Idade Média, as portas dos castelos eram fortificadas para impedir invasores, com fechaduras e chaves rudimentares para proteger os tesouros das fortificações.

Com o tempo, as portas convencionais evoluíram para incluir novos materiais, como o aço e o vidro. O uso desses materiais modernos permitiu que as portas se tornassem mais seguras, mais duráveis e mais eficientes em termos de isolamento térmico e acústico. Além disso, novos designs foram desenvolvidos, permitindo que as portas convencionais se tornassem mais funcionais e esteticamente atraentes, [17].

Nos últimos anos, a tecnologia também tem desempenhado um papel importante na evolução das portas convencionais. As portas automatizadas, por exemplo, usam sensores para abrir e fechar automaticamente, aumentando a conveniência e a segurança para os usuários. As portas corta-fogo, que foram desenvolvidas para evitar a propagação de incêndios, também são uma evolução importante das portas convencionais.

Além disso, as portas convencionais também estão se tornando mais ecológicas. Materiais sustentáveis, como o bambu, estão sendo utilizados cada vez mais na fabricação de portas

convencionais. O uso desses materiais renováveis é uma forma de ajudar a reduzir o impacto ambiental da construção civil.

Em resumo, a história das portas convencionais é longa e rica, e a evolução dos seus aspectos é notável. Desde as portas rudimentares da antiguidade até as portas modernas automatizadas e ecologicamente corretas, as portas convencionais continuam a ser elementos fundamentais na construção civil. Com a tecnologia em constante evolução, é provável que as portas convencionais continuem a evoluir e a se adaptar às necessidades em constante mudança da sociedade.

#### **2.4.2. Portas Corta-fogo**

Porta corta fogo é um elemento muito importante na prevenção e combate a incêndio, feita para conter as chamas e impedir que a fumaça passe para o ambiente utilizado como rota de fuga. São fabricadas em material completamente resistente ao fogo, com os mesmos componentes de uma porta não resistente, fechadura, dobradiças e mola, responsável pelo fechamento automático da porta, que regula a velocidade para a porta se fechar após a passagem pedonal.

As portas também são dispostas de barra antipânico, onde exista uma grande concentração de público, estas acionam o destravamento automático da porta por meio de pressão feita na abertura, o seu funcionamento tem que atender as normas regulamentadoras do país, assim todas portas deverão passar por um processo de teste de conformidade após instalação.

As portas corta-fogo são um elemento crucial em edifícios comerciais e residenciais, pois são projetadas para impedir a propagação de incêndios. Essas portas têm sido utilizadas por mais de um século, e sua história está intimamente ligada ao desenvolvimento da arquitetura moderna e à necessidade de proteger vidas e propriedades.

#### **2.4.3. Resistência ao fogo das portas corta-fogo**

Segundo a legislação Europeia de desempenho ao fogo, as portas resistentes ao fogo são classificadas levando em conta as propriedades:

- Estanqueidade (E) – É a capacidade do elemento de construção com a função de compartimentação impedir a passagem de quaisquer chamas ou gases quentes durante

o período determinado para o tipo de porta, sendo eles de 30, 60, podendo chegar a 240 minutos de resistência.

- Isolamento térmico (I) – É a capacidade da folha da porta de suportar o aumento de temperatura, de forma que a face não exposta, não ultrapasse uma temperatura média de 140°C somada a temperatura ambiente ou uma temperatura máxima de 180°C num ponto;
- Controlo de radiação (W) – capacidade de redução da energia radiada pela face não exposta às chamas;
- Fecho automático (C) – propriedade de um elemento de construção tomar ou retomar à posição fechada sem intervenção humana.

A classificação das portas resistentes ao fogo resulta da combinação das propriedades anteriormente mencionadas e é determinada através de ensaios de fogo normalizados, segundo a legislação europeia podem ser classificadas da seguinte maneira:

*Tabela 2.1: Classificação de resistência ao fogo.*

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

NOTA:  
 Norma de Ensaio aplicável: EN 1634-1  
 Norma de Classificação aplicável: EN 13501-2

Para se saber quais tipos de se portas resistentes ao fogo são obrigatórias em cada tipo de edifício deve-se consultar o regulamento Técnico de Segurança contra Incêndio em Edifícios (RT-SCIE) aprovado pela portaria n.º 1532/2008, de 29 de dezembro, [18]. Essa legislação Portuguesa exige que as portas resistentes ao fogo tenham pelo menos uma classificação, que corresponda a metade do tempo de resistência da parede em que se inserem, com algumas exceções definidas na norma.

#### **2.4.4. Desempenho Térmico**

As portas resistentes ao fogo também podem ser classificadas em relação ao seu desempenho térmico, que é aplicado em situações onde é necessário criar uma barreira entre dois espaços

climatizados de formas diferentes, assim proporcionando maior conforto e elevado desempenho energético do espaço ou edifício. Quanto menor o nível de coeficiente de transmissão térmica, melhor é a performance térmica da porta.

A madeira tem 4 propriedades térmicas muito importantes, são elas:

- **Condutividade térmica:** taxa de fluxo de calor através da madeira submetida a um gradiente de temperatura, expressa em Kcal/mh°C;
- **Calor específico:** representa a quantidade de energia térmica necessária para causar a mudança em uma unidade de temperatura em uma unidade de massa do material, expressa em kcal/ kg °C;
- **Transmissão térmica:** representa a medida do quão rápido um material pode absorver temperatura de suas imediações, expressa em m<sup>2</sup>/h;
- **Coefficiente de expansão térmica:** representa a medida da troca de dimensão causada pela troca de temperatura, expressa em mm/°C.

## 2.5. A utilização da madeira

A história da técnica e arte de trabalhar a madeira tem evoluído significativamente desde a antiguidade. Inicialmente, o processo era manual e primitivo, mas evoluiu para uma indústria moderna e engenhosa. A madeira é um recurso natural que tem sido acessível ao homem desde os tempos remotos, e ele sempre soube aproveitá-lo para a criação de diversos objetos e produtos. A madeira foi um dos primeiros materiais utilizados pelo homem para diversas finalidades, incluindo defesa, aquecimento, cozinhar, iluminar e construção de abrigos, jangadas e barcos. Com o passar do tempo, a madeira começou a ser utilizada para a construção de cabanas e choupanas, com paredes feitas de ramos entrelaçados, rebocadas ou não com terra argilosa. Mais tarde, a madeira foi substituída por pedra ou tijolo cozido ao sol, e passou a ser utilizada somente na cobertura, portas e janelas, bem como na decoração interna e externa, [19].

A madeira é um material sustentável e renovável e muito utilizado na construção civil, sendo muito utilizado ultimamente como instrumento de inovação e embelezamento de interiores e exteriores. É muito bom quanto a características estéticas, tem bom desempenho acústico e estrutural. Uma grande preocupação quanto ao uso da madeira nesses ambientes tem sido a

respeito de como é o comportamento da mesma quando exposta ao fogo, existem preconceitos por se tratar de um material combustível, no entanto a madeira tem uma proteção natural ao fogo conhecida como carbonização, onde a madeira entra em combustão numa camada externa protegendo a camada interna do fogo, mantendo assim suas características na parte central da secção.

É um material naturalmente resistente e relativamente leve, por isso é muito utilizada para aplicações estruturais e de sustentação de construções, além de estar presente em quase todas as etapas das obras de construção civil, seja em estruturas, pisos, forros, revestimentos e decoração. Seu uso ainda é indispensável para muitos arquitetos e engenheiros, por se tratar de um material que remete a sofisticação e beleza, além de oferecer isolamento térmico e acústico, [19].

As técnicas de construção com madeira vêm sendo aprimoradas e desenvolvidas cada vez mais ao longo dos anos, e pode ter a mesma resistência de uma construção feita de outro material. Além de dar conforto e bem estar, uma casa construída em madeira tem um ambiente mais estável até mesmo no inverno, devido ao seu desempenho térmico.

## **2.6. Tipos de painéis de Madeira**

### **2.6.1. Madeira Sólida**

A madeira maciça é a madeira utilizada da forma como é encontrada na natureza, sem modificações em sua estrutura física, como toras, aplicadas em vigas e pilares. Também podem ser usadas serradas sendo utilizadas em tabuas, pranchas de madeira, o problema é estarem limitadas transversalmente e a nível de comprimento quando em sua forma original.

### **2.6.2. Placa de fibra de média densidade (MDF)**

As chapas de MDF são compostas por fibras de madeira unidas por resina sintética e compactadas pela ação da pressão e calor, resultando em placas praticamente maciças e uniformes, que tem bom acabamento e durabilidade. Esse material é mais empregado na

marcenaria, pois permite variados tipos de acabamentos e pintura, mas também utilizados em painéis de parede e portas.

Existem MDF's ignífugos, com tratamento especial para que sejam mais resistentes ao fogo em diversas aplicações onde essa solicitação é necessária, um retardante é uma substância adicionada ou um tratamento aplicado a um material para atrasar a ignição ou para reduzir o nível de desenvolvimento da combustão.

### **2.6.3. Aglomerado de densidade média (MDP)**

O MDP (Painel de Partícula de Média Densidade), é resultado de prensagem de resíduos de madeira, como serragem e pó, com resina e cola. Semelhante ao MDF, a diferença é que as partículas mais finas se acumulam nas faces enquanto que as mais grossas no interior do painel, proporcionando assim um melhor acabamento superficial, além de tornar o material mais robusto e estruturado, o que o torna mais capacitado para receber carga e peso do que o MDF, sendo mais leve que esse. Mais utilizado na produção de moveis simples.

### **2.6.4. Aglomerado de partículas de madeiras longas e orientadas (OSB)**

O OSB (Oriented Strand Board, ou em Português, Painel de Tiras de Madeira Orientadas), é um material derivado da madeira, foi desenvolvido nos Estados Unidos em 1935, com a produção em larga escala se iniciando somente em 1963. Na Europa o primeiro relato de sua fabricação data de 1978, nesse momento ele já estava com aceitação no mercado e seu uso veio a se tornar somente inferior ao do MDF.

A fabricação dos painéis de OSB se dá a partir de pequenas lascas de madeira, orientadas de forma aleatória ou em angulo reto na face, que tem entre 75 a 150 [mm] de comprimento, 15 a 25 [mm] de largura e 0.3 a 0.7 [mm] de espessura coladas sob pressão e calor. [8]

## **2.7. Processo de ignição e combustão da madeira**

Existem diversos tipos de madeiras, porém o processo de ignição passa por 3 fases comuns: preliminar, principal e final.

Na fase preliminar ainda não há presença de chamas, é caracterizada pelo processo de aquecimento e pirólise da madeira. Até temperaturas próximas de 105° C ocorre a evaporação da água presente no material. Assim a maior parte do carbono formada nessa camada carbonácea é oriunda da decomposição da lignina. Após começa a ocorrer aumento da liberação de vapores e hidrocarbonetos com baixo ponto de ebulição.

Quando de fato ocorre a ignição, há o aumento considerável da taxa de liberação de calor e perda de massa, assim como a maior intensidade na formação da camada carbonácea. A fase final acontece após a temperatura da madeira passar de 500° C, onde ocorre predominantemente é formada a camada carbonácea em detrimento da liberação de vapores. É a fase onde a camada carbonácea oxida.

São feitos testes para determinação das características da madeira durante o processo de combustão. A análise termogravimétrica (TG), que pode ser utilizada na determinação de reações de decomposição e na análise de estabilidade térmica desse tipo de material, onde a perda de massa pode ser avaliada por unidade de tempo, [20]. A Figura 2.6, descreve a porcentagem de perda de massa em função do tempo para madeiras de eucalipto.

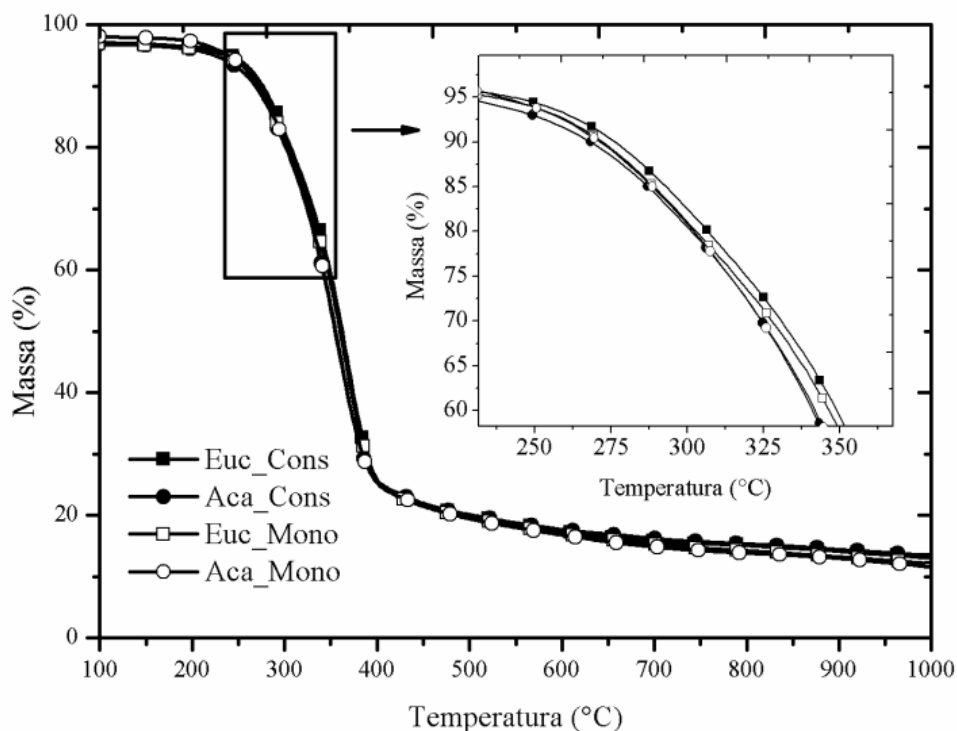


Figura 2.6: Resultado da análise termogravimétrica da madeira de eucalipto, [20].

A taxa de liberação de calor (HRR), é considerada um parâmetro importante na hora de avaliar o comportamento do fogo nos materiais. Essa avaliação é adquirida a partir do teste de calorimetria de cone, o qual avalia o comportamento ao fogo de determinado material, tendo o aquecimento controlado por um termostato que monitora o fluxo de calor transmitido à amostra, para que esse seja constante, [21]. O resultado dessa taxa de liberação de calor pode ser visto na Figura 2.7.

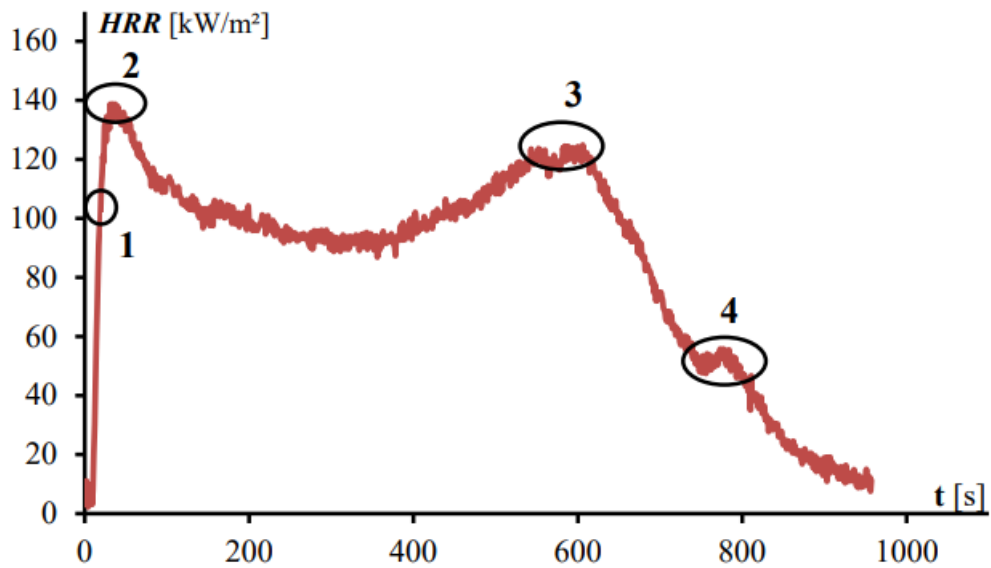


Figura 2.7: Pontos onde ocorrem mudanças dos regimes de queima. 1 - Início da pirólise, 2 – Pico HRR, 3 - combustão na parte inferior da madeira, 4 – incandescência, [21].

### **3. COMPORTAMENTO TÉRMICO DOS MATERIAIS**

Nesse capítulo será explicado as características térmicas dos materiais que serão utilizados para a constituição do painel multicamadas que dará origem a porta corta fogo, assim como os materiais que estão incluídos no Bloco Porta (porta, portal, dobradiça, parede e reboco). Mas para montar esse sistema é preciso também conhecer as características desses materiais em relação ao aumento da temperatura, já que as propriedades dos materiais não são constantes quando esses são expostos a temperaturas muito altas.

#### **3.1. Conceitos fundamentais**

Um incêndio é caracterizado pelo desenvolvimento da temperatura em função do tempo. Este desenvolvimento de temperatura depende de uma quantidade considerável de fatores, como a quantidade, distribuição e dimensões do material combustível e também as condições de ventilação do ambiente. Sendo assim cada cenário de incêndio na prática tem seu próprio modelo de desenvolvimento da temperatura. Os materiais que são escolhidos para a construção ou reabilitação de edifícios tem influência direta na segurança e impactos ambientais em situações de sinistro.

Com esse ponto em vista em 2007 a União Europeia publicou a EN 13501-1, padronizando os níveis necessários de proteção e segurança contra incêndios, com base em testes de reação ao fogo de elementos de construção civil. Para fazer essa análise do desempenho dos diferentes materiais em face do fogo, torna-se essencial esclarecer conceitos fundamentais do seu comportamento térmico, classificando e diferenciando as melhores alternativas de utilização com objetivo de garantir a segurança e durabilidade das edificações.

##### **3.1.1. Taxa de liberação de calor**

A taxa de liberação de calor (HRR), é um parâmetro de extrema importância quando se quer estudar incêndios. Segundo Barbrauskas e Peacock, [22], a taxa de transferência de calor é a variável mais importante na caracterização da inflamabilidade de um material. Este parâmetro

é um indicador da dimensão e da taxa de crescimento de um fogo, da libertação de fumo e de gases tóxicos, além de poder ser usado para estimar um potencial fuga de pessoas numa situação de incêndio. A capacidade de medir com precisão a libertação de calor de elementos presentes em um ambiente em chamas, e até mesmo o revestimento de paredes, é visto como essencial no estudo da proteção contra incêndios, [22].

A taxa de transferência de calor pode ser calculada utilizando uma das três leis fundamentais da transferência de calor: a lei de Fourier para condução de calor, a lei de Newton para transferência de calor por convecção e a lei de Stefan-Boltzmann para transferência de calor por radiação. Cada uma dessas leis é aplicável a um determinado modo de transferência de calor e fornece uma expressão matemática para calcular a taxa de transferência de calor em função de diversas variáveis, como a temperatura, a condutividade térmica e a área da superfície de transferência, [23].

A taxa de libertação de calor depende das propriedades do combustível e das condições de combustão (fluxo de ar). Pode ser calculada de acordo com a Equação (3.1) :

$$HRR = PCI \cdot \dot{m} \quad (3.1)$$

Onde:

HRR é a taxa de liberação de calor por unidade de superfície do combustível

PCI é o poder calorífico inferior do material combustível

$\dot{m}$  é a taxa de perda de massa do material em combustão por unidade de superfície do material combustível.

### **3.1.2. Pirólise da Madeira**

À medida que a madeira atinge temperaturas, os diferentes componentes químicos sofrem degradações térmicas que afetam o desempenho da madeira. Em temperaturas abaixo dos 100 °C, podem ocorrer reduções permanentes na resistência, dependendo do teor de umidade, meio de aquecimento e período de exposição. Quando a madeira na temperatura ambiente é exposta a um determinado fluxo de calor externo constante e uma fonte de ignição, acontece que após

o aquecimento do material, ocorre uma decomposição deste. Esse processo químico de decomposição da matéria orgânica através de altas temperaturas, se dá o nome de pirólise, [24].

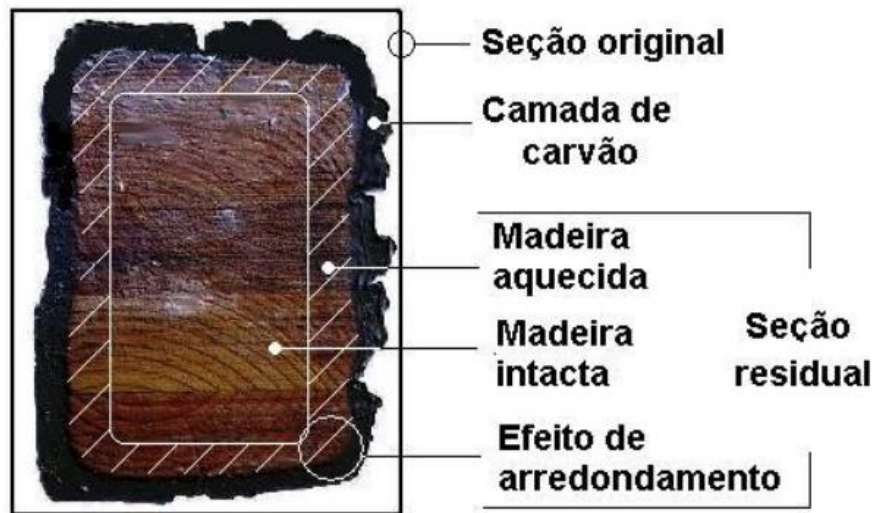


Figura 3.1: Amostra de madeira após sofrer combustão, [25].

### 3.1.3. Ignição

A combustão visual da madeira é indicativo do início da ignição alimentada pela pirólise da madeira. A pirólise é induzida pelo fluxo de calor, que pode vir de diversas fontes, como incêndios reais, combustão de outros materiais próximos à madeira ou em ensaios experimentais utilizando a temperatura de um resistor elétrico irradiando para a face do material. Esse fluxo de calor é fundamental para a indução da pirólise e, portanto, é uma condição necessária para a ocorrência da ignição, [24].

## 3.2. Mecanismos de transferência de calor

A energia existe de diversas formas na natureza, mas primeiramente o que é de interesse para esse texto é o calor. Calor é a forma de energia que pode ser transferido de um sistema para outro, como resultado da diferença de temperatura. A ciência que estuda essas formas de transferência de energia, é a transferência de calor. Essa taxa, depende diretamente da magnitude do gradiente de temperatura, ou seja, a diferença de temperaturas por unidade de comprimento ou taxa de mudança de temperatura, sempre fluindo do sistema de maior temperatura para o de menor, [26].

Quanto maior for o gradiente de temperaturas, maior será a taxa de transferência de calor. Os mecanismos básicos de transferência de calor são: condução, convecção e radiação.

A quantidade de calor transferido entre corpos pode ser definida pela Equação (3.2), que de acordo com o Eurocódigo 1995-1-2, é definida como a soma das parcelas de convecção e radiação, [27].

$$h_{net} = h_{net,c} + h_{net,r} \quad (3.2)$$

Onde:

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

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

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

Nas superfícies expostas ao fogo, o fluxo de calor líquido deve ser entendido como a energia absorvida pelos membros, por unidade de tempo e área de superfície, [27].

### 3.2.1. Condução

A transferência de calor por condução necessita de um meio material para que ocorra a troca de energia térmica. Ela ocorre à nível molecular e é definida pela energia transferida pela interação entre as partículas mais energizadas, com maior temperatura e as menos energizadas, com menor temperatura. Pode acontecer em meios sólidos, líquidos e gasosos.

Nos gases e líquidos a condução ocorre devido as colisões e difusão das moléculas durante seu movimento aleatório, já nos sólidos, é devido a combinação de vibrações das moléculas em uma rede e o transporte da energia térmica ocorre por elétrons livres, [26]. A lei de Fourier expressa pela equação:

$$\phi^{calor} = -\lambda \times \frac{dT}{dx} \quad (3.3)$$

Onde:

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

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

Os valores para condutividade térmica é uma característica própria do material como será visto mais a frente, e quantifica a capacidade de conduzir energia térmica através de seu corpo, logo torna-se fundamental conhecer esta propriedade.

### 3.2.2. Convecção

A convecção de calor é a forma de transferência de energia entre uma superfície sólida e um meio líquido ou gasoso adjacente em movimento. Quanto mais rápido o movimento do fluido, maior será a transferência de calor por convecção, porém caso esse esteja completamente parado a transferência de calor ocorre por pura condução.

Pode ser gerada por uma força externa, o que leva a uma convecção forçada, ou pelo próprio gradiente de temperaturas do fluido, que pode gerar uma variação de sua densidade de forma a ocorrer uma convecção natural, [28]. De acordo com o Eurocódigo 1991-1-2, o fenômeno de transferência de calor por convecção ( $h_{net,c}$ ) corresponde a parcela do fluxo de calor definido pela Equação (3.4).

$$h_{net,c} = \alpha_c \cdot (\theta_g - \theta_m) \quad (3.4)$$

Onde:

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

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

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

$\theta_m$  é a temperatura da superfície do elemento exposto ao fogo [ $^{\circ}C$ ];

Sendo que os valores aplicados para o coeficiente de transferência de calor convectivo têm uma variação entre  $\alpha_c = 4$  [W/m<sup>2</sup>K] para uma análise de exposição ao lado contrário ao fogo, e  $\alpha_c = 9$  [W/m<sup>2</sup>K] para análises onde os efeitos da transferência de calor por radiação são considerados,  $\alpha_c = 25$  [W/m<sup>2</sup>K] referenciando a curva de incêndio padrão ISO834 ou  $\alpha_c = 50$  [W/m<sup>2</sup>K] para curva de hidrocarbonetos.

### 3.2.3. Radiação

Uma transferência de energia que ocorre através de ondas eletromagnéticas é denominada transferência de calor por radiação. No que diz respeito as outras duas formas de transmissão de calor, a radiação não necessita de um meio material para transferir energia térmica, [29].

De acordo com o Eurocódigo 1992-1-2, o processo de transferência de calor por radiação ( $h_{net,r}$ ), corresponde a segunda parte do fluxo líquido de calor de uma superfície e pode ser definido pela equação (3.5).

$$h_{net,r} = \varphi \cdot \varepsilon_m \cdot \varepsilon_f \cdot \sigma \cdot [(\theta_r + 273)^4 - (\theta_m + 273)^4] \quad (3.5)$$

Onde:

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

$\varphi$  é o fator de forma;

$\varepsilon_m$  é a emissividade da superfície do elemento;

$\varepsilon_f$  é a emissividade do fogo;

$\sigma$  é a constante de Stephan Boltzmann [5, 67.10<sup>-8</sup>W/m<sup>2</sup>.K<sup>4</sup>];

$\theta_r$  é a temperatura de radiação efetiva do ambiente de incêndio [°C];

$\theta_m$  é a temperatura da superfície do elemento exposto ao fogo [°C];

Os valores de emissividade do fogo e do fator de forma, são especificados o Eurocódigo 1991-1-2, define que devem ser considerados iguais a 1, [27].

### 3.3. Propriedades Térmicas dos Materiais

#### 3.3.1. Condutividade térmica

Condutividade térmica é a capacidade de um material de conduzir calor. É a quantidade de calor que um material é capaz de transferir através dele por unidade de tempo, quando existe uma diferença de temperatura entre suas extremidades, [30], sendo assim é uma medida da taxa de fluxo de calor através de um material sujeito a variação de temperatura, quantificando sua habilidade de conduzir energia térmica, como descreve a equação (3.6).

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

Onde:

$\lambda$  é a condutividade térmica do material [ $W/mK$ ];

$\Delta Q$  é a quantidade de calor fornecida [ $J$ ];

$L$  é a espessura analisada [ $m$ ];

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

$\Delta t$  é o intervalo de tempo [ $s$ ];

$\Delta T$  é a variação de temperatura [ $^{\circ}C$ ]

Materiais com boas características de condutividade térmica são utilizados como dissipadores de calor, pois absorvem e liberam calor com mais facilidade, já materiais com baixa condutividade térmica são muito empregados como isolantes térmicos. Essa grandeza é uma característica específica de cada material, e depende de alguns fatores, como no caso da madeira, varia de acordo com a variação de temperatura, densidade, teor de umidade, irregularidades estruturais e ângulo das fibras, [24].

Com o objetivo de analisar a Tabela 3.1, mostra alguns valores de condutividade térmica de alguns materiais a 27 °C, [31].

Tabela 3.1: Condutividade térmica de diversos materiais a 27 °C, [31].

<b>Material</b>	<b>Condutividade Térmica (W/m.K)</b>
Prata	426
Cobre	398
Alumínio	237
Ferro	80,3
Vidro	0,72 - 0,86
Água	0,61
Tijolo	0,4 - 0,8
Madeira (pinho)	0,11 - 0,14
Fibra de vidro	0,046
Polipropileno	0,25

### 3.3.2. Calor Específico

Calor específico é a grandeza física que determina a variação térmica de um material ao receber uma quantidade de calor. Melhor descrevendo isso, se trata da quantidade de energia necessária para elevar a temperatura de um material de massa 1 [Kg] em 1 [°C]. É utilizada para informar a capacidade de um material em absorver calor de fontes externas, segundo equação (3.7), [32].

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

Onde:

$\Delta Q$  é a energia necessária para elevar a temperatura de um material [J];

$m$  é a massa do material [Kg];

$\Delta T$  é a variação de temperatura [°C];

Para efeitos de comparação a Tabela 3.2 expressa valores simplificados de calor específico de alguns materiais.

Além de variar com a temperatura, o calor específico também varia com o teor de umidade do material a ser analisado, pois quanto maior a quantidade de água presente no corpo, maior será a energia necessária para sua evaporação e conseqüentemente o aumento da temperatura do material. Por isso o calor específico para ser calculado levando em consideração a quantidade de umidade do material, torna-se necessário adicionar ao valor base, uma energia devido a reação endotérmica, devido a liberação do calor da água. Essa energia é calculada segunda a equação (3.8), [32].

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

Onde:

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

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

$\Delta T$  é a variação de temperatura [*°C*].

Na Tabela 3.2 pode ser observado o calor específico de alguns materiais.

Tabela 3.2: Calor Específico médio de alguns materiais, [33].

<b>Material</b>	<b>c [kJ/kgK]</b>
Aço	0,48
Concreto	0,18 - 0,20
Ar	0,24
Madeira	0,32
Água	1,00

Pode-se observar que o calor específico da água é bem superior ao da madeira seca, o que de fato mostra que o teor de umidade do material influencia significativamente na variação do calor específico, [32].

### 3.3.3. Emissividade

A emissividade é a grandeza térmica relacionada com a superfície do material, corresponde a capacidade de emissão de energia por radiação da superfície. A taxa de emissão é calculada pela razão entre a energia irradiada por um material qualquer e a energia irradiada por um corpo negro, que possui emissividade máxima equivalente a 1. Ela representa a habilidade relativa de uma superfície para irradiar o calor absorvido, determinando assim a quantidade de energia determinado corpo emite, sendo que quanto menor a emissividade de um corpo, menor será a energia emitida e maior será sua temperatura superficial. O valor dessa grandeza física depende de alguns fatores como comprimento de onda, direção de observação em relação a superfície, acabamento superficial e também da temperatura da superfície, [34]. Alguns materiais e suas respectivas emissividades são apresentados na Tabela a seguir.

*Tabela 3.3: Emissividade de diversos materiais de construção*

<b>Material</b>	<b>Temperatura [°C]</b>	<b>Emissividade [ε]</b>
Cobre Polido	21 - 100	0,02 - 0,03
Aço Polido	100	0,07 - 0,09
Água	38	0,67
Concreto	0 - 100	0,92 - 0,94
Madeira	-	0,80 - 0,90
Reboco	-	0,91
Tijolo vermelho	20 - 21	0,88 - 0,93
Vidro	0 -100	0,91 - 0,94

No Eurocódigo 1995-1-2 o coeficiente de emissividade para superfícies carbonizada e não carbonizadas de madeira e materiais a base de madeira, além de elementos de proteção contra incêndio é definido como 0,8, [35].

### 3.4. Variação das propriedades em relação a temperatura

Valores das propriedades térmicas discutidas anteriormente não são constantes quando os materiais são submetidos a uma situação de variação intensa de temperatura, assim como é o caso de uma ocorrência de incêndio. O Eurocódigo 1995-1-2 de 2004 apresenta valores em

relação a temperatura da variação de condutividade térmica, calor específico e densidade para a madeira e camada de carvão quando submetidas a altas temperaturas.

Com a nova proposta da norma EN 1995-1-2 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 e lã mineral.

Neste trabalho serão utilizados os fatores de correção das propriedades dos materiais utilizados para a realização dos ensaios numéricos, que precisam ser normalizados e corrigidos para garantir sua total confiabilidade.

As Tabela 3.4, Tabela 3.5 e Tabela 3.6 representam os valores das propriedades em função da elevação da temperatura da madeira, painéis de madeira e lã mineral, segundo a proposta do novo Eurocódigo, e os Gráficos Figura 3.2, Figura 3.3, Figura 3.4, Figura 3.5 **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, Figura 3.6, Figura 3.7, Figura 3.8, Figura 3.9 e Figura 3.10 representam cada uma das propriedades mencionadas acima. Sendo aplicadas para os ensaios numéricos feitos no software ANSYS, para simular a resistência que os sistemas tem em relação ao aumento da temperatura.

*Tabela 3.4: Propriedades térmicas dependentes da temperatura para madeira e a camada carbonizada para membros de madeira e painéis de madeira maciça, segundo o Eurocódigo 1995-1-2 de 2020, [35].*

T [°C]	$\lambda$ [W/mK]	c [kJ/kgK]	$\rho/\rho_{20}$ [kg/m <sup>3</sup> ]
20	0,12	1,53	1
99	*	1,77	1
100	*	13,6	1
120	*	13,5	1
121	*	2,12	0,89
200	0,15	2	0,89
250	*	1,62	0,83
300	*	0,71	0,68
350	0,07	0,85	0,46
400	*	1	0,34
500	0,09	*	*
600	*	1,4	0,25
800	0,35	1,65	0,23
1200	1,5	1,65	0

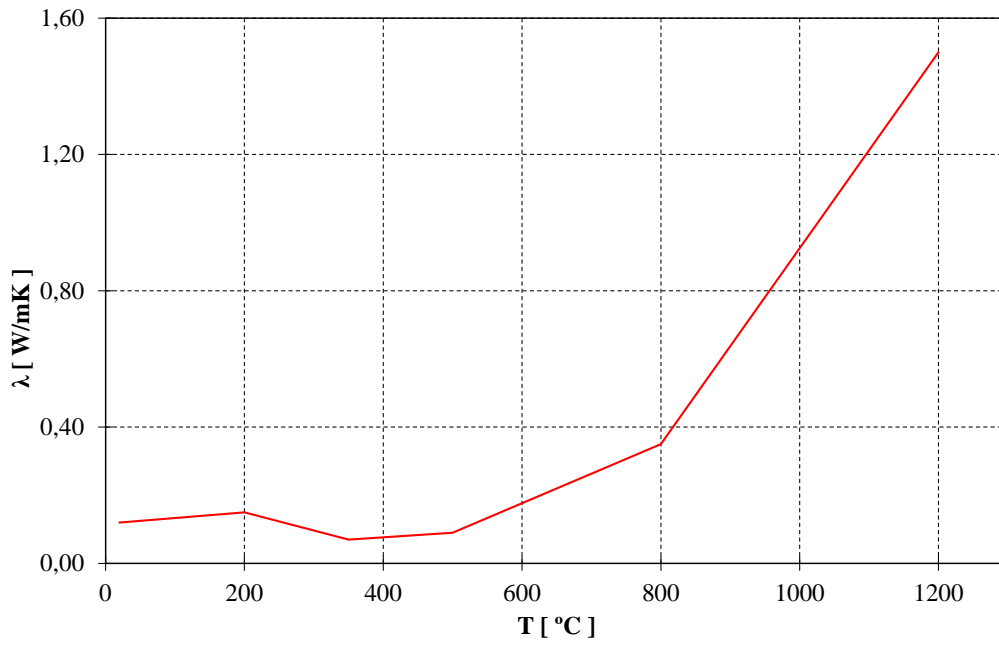


Figura 3.2: Condutividade térmica para a madeira e a camada de carvão, [35], [36].

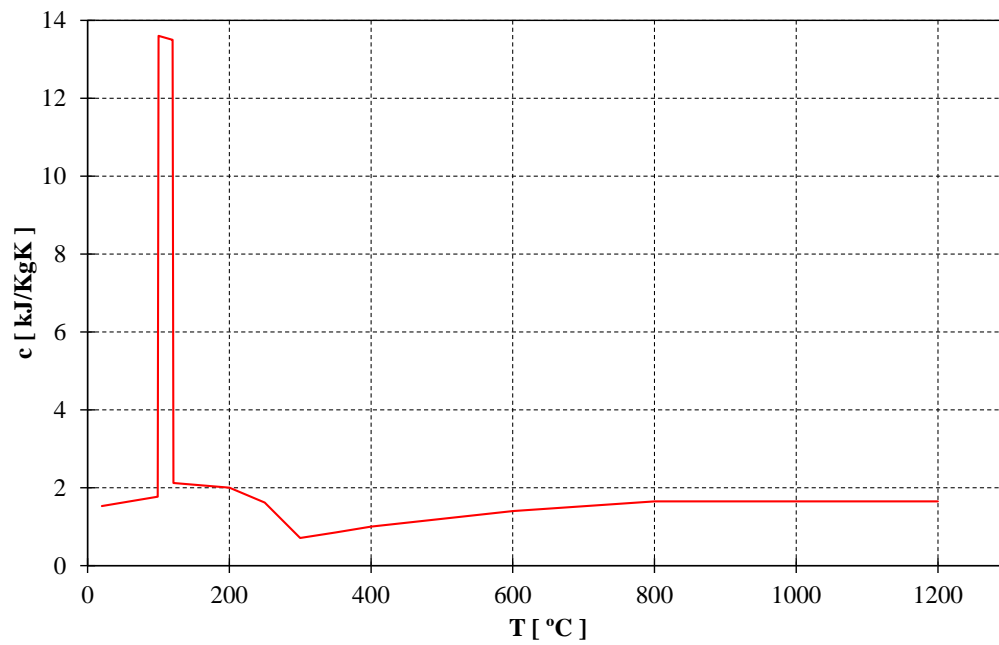


Figura 3.3: Calor específico para a madeira e a camada de carvão, [35], [36].

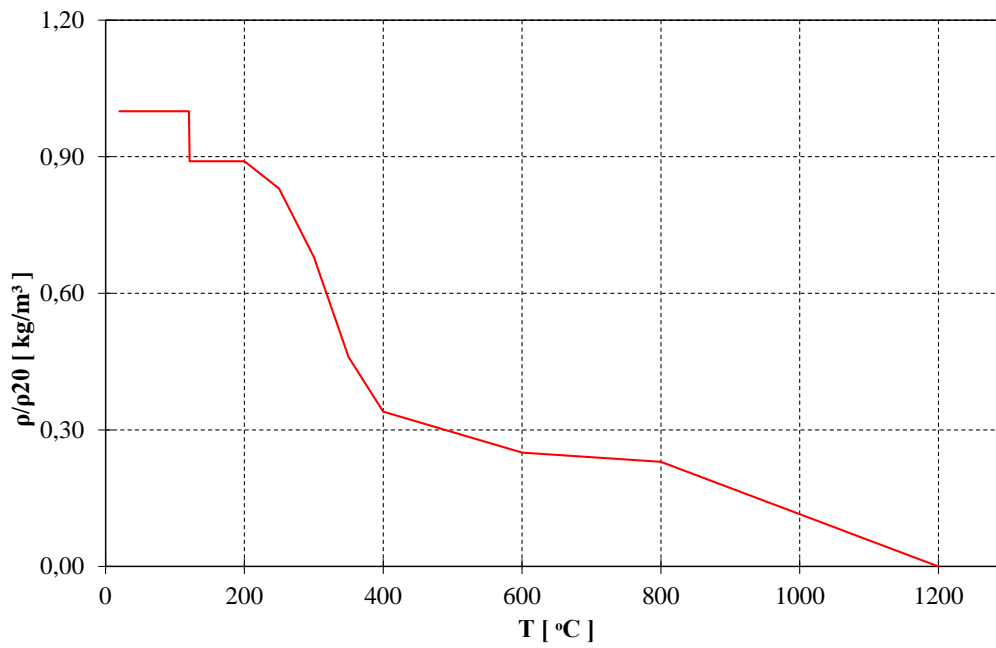


Figura 3.4: Relação de densidade da madeira e da camada de carvão, [35], [36].

Tabela 3.5: Propriedades térmicas dependentes da temperatura do OSB, madeira compensada, aglomerados e painéis de fibra, [35].

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

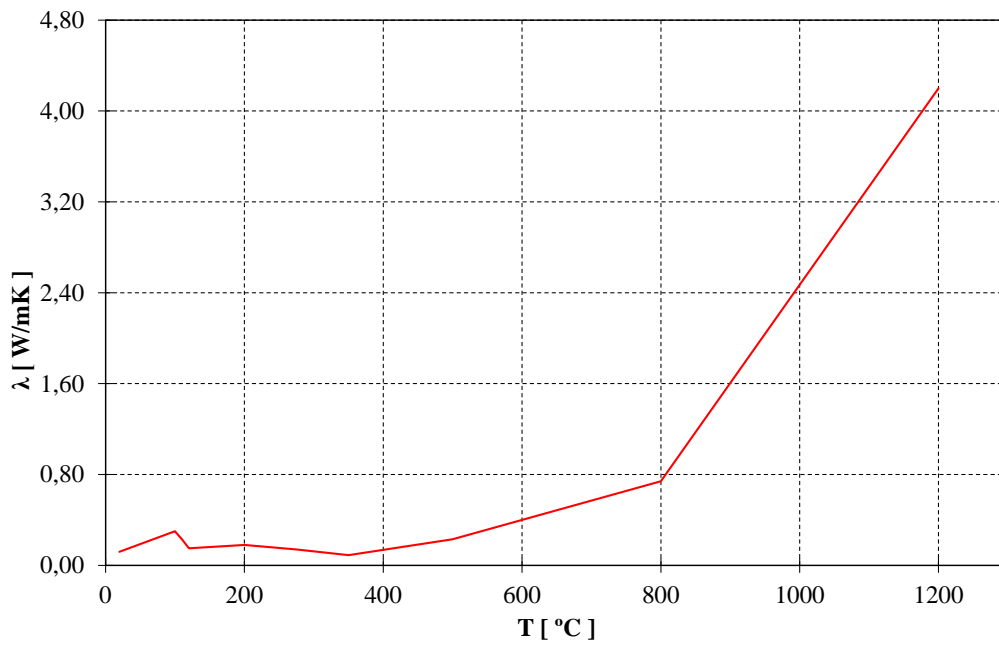


Figura 3.5: Condutividade térmica em função da temperatura do OSB, madeira compensada, aglomerado e painéis de fibra, [35].

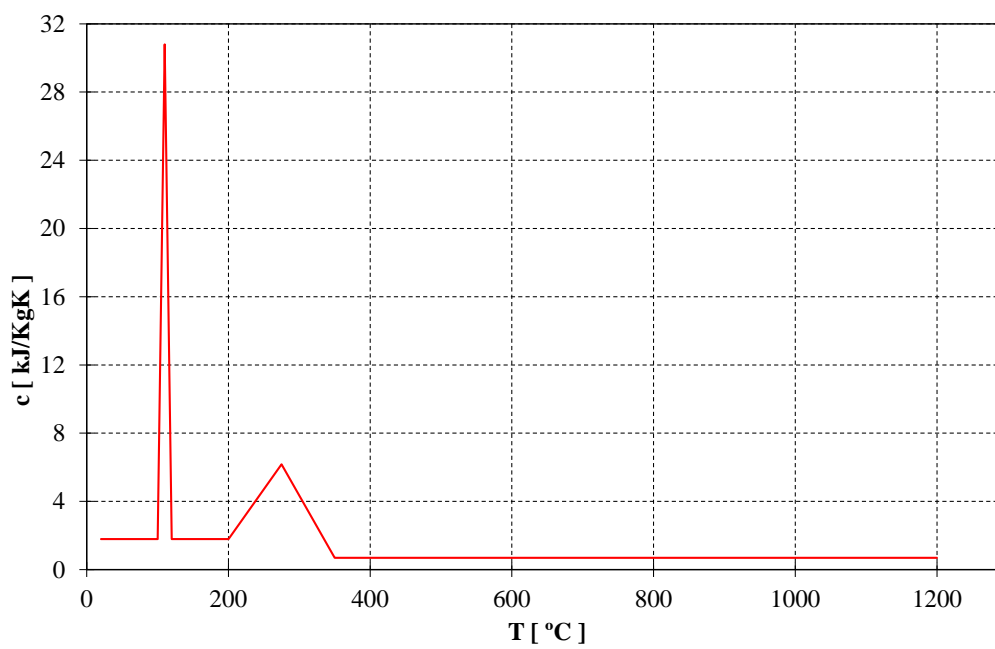


Figura 3.6: Calor específico em função da temperatura para o OSB, madeira compensada, aglomerados e painéis de fibra, [35].

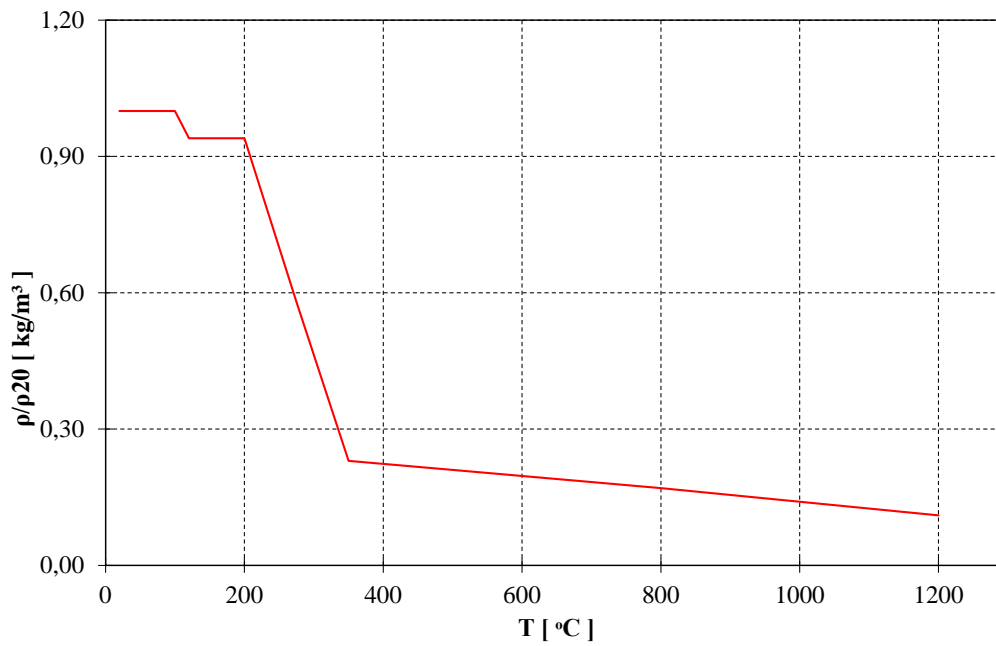


Figura 3.7: Relação de densidade do OSB, madeira compensada, aglomerados e painéis, [35].

Tabela 3.6: Propriedades térmicas dependentes da temperatura da lã mineral do tipo manta ou fosca com isolamento com nível de proteção 1 (PL1) e densidade superior a 26 kg/m³, [35].

T [°C]	$\lambda$ [W/mK]	c [kJ/kgK]	$\rho/\rho_{20}$ [kg/m]
20	0,036	0,88	1
100	0,047	1,04	1
200	*	1,16	0,98
400	$0,09 \times (11 \times e^{0,05 \times p_{20}} + 1,9)$	1,28	0,977
600	$0,15 \times (11 \times e^{0,05 \times p_{20}} + 1,9)$	1,355	0,973
800	$0,23 \times (11 \times e^{0,05 \times p_{20}} + 1,9)$	1,43	0,97
925	$0,30 \times (11 \times e^{0,05 \times p_{20}} + 1,9)$	1,477	0,96
1200	$0,45 \times (11 \times e^{0,05 \times p_{20}} + 1,9)$	1,58	0,887

\* Os dados da evolução da densidade, para fins de comparação foram utilizados segundo o  $\rho_{20}$  da lã de rocha aplicada nesse projeto.

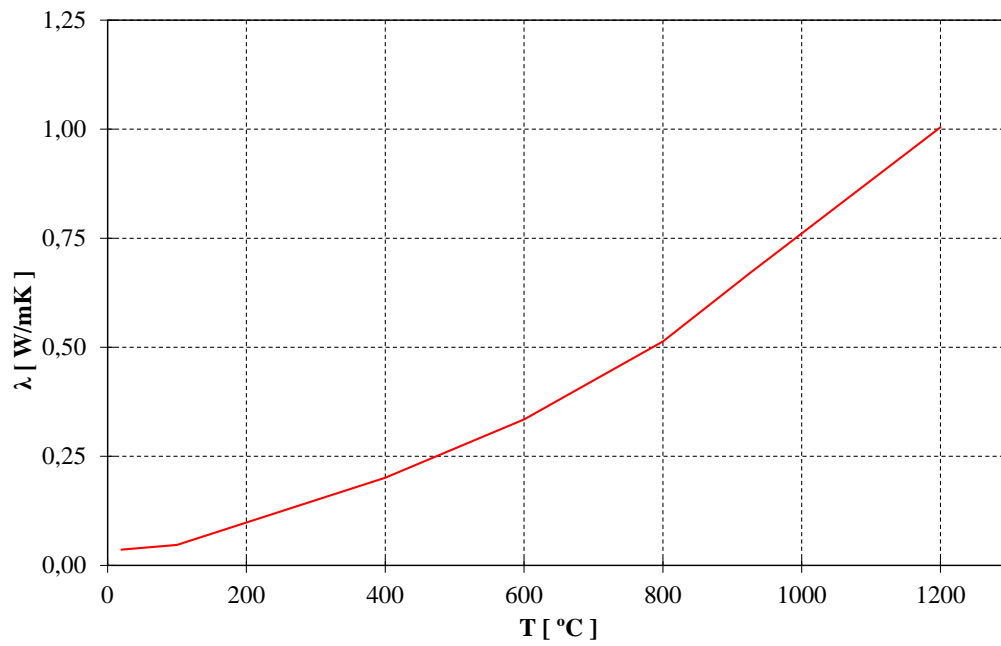


Figura 3.8: Condutividade térmica em função da temperatura para a lã mineral, [35].

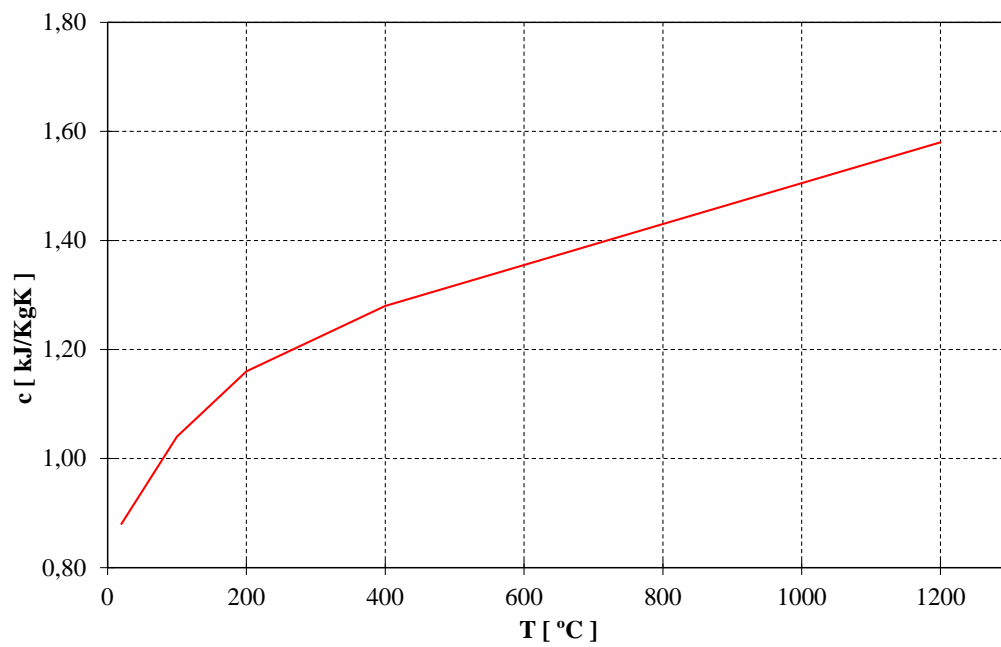


Figura 3.9: Calor específico em função da temperatura para a lã mineral, [35].

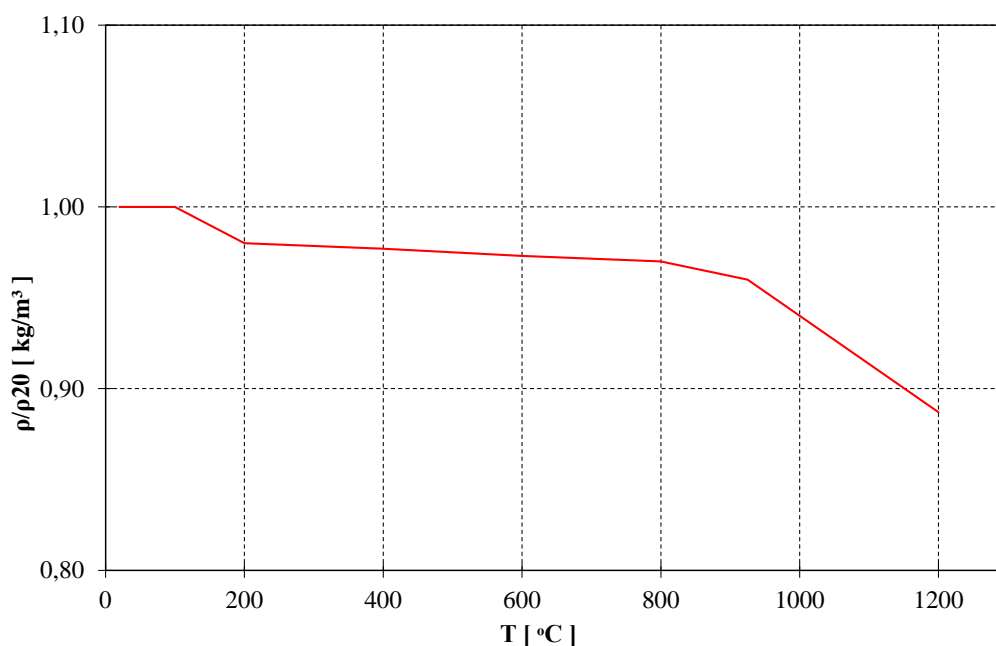


Figura 3.10: Relação de densidade da lã mineral, [35].

Na construção do modelo também será considerada a existência do bloco porta, composto pelas paredes, portal e dobradiça da porta, para isso é necessário aplicar os dados das propriedades desses materiais como entradas para o modelo. Portanto foram analisadas essas propriedades nas normas.

O Eurocódigo 1992-1-2 – Projetos de estruturas de concreto, expostas ao fogo, nos dá as propriedades do concreto em relação a evolução da temperatura em situação de incêndio, [37]. A dobradiça da porta é produzida em aço, assim sendo as especificações para esse elemento foram retiradas do Eurocódigo 1993-1-2, e a parede que é o suporte do bloco porta, é constituída de alvenaria, que tem a relação de suas propriedades apresentadas no Eurocódigo 1996-1-2, [38], [39].

Cada material apresenta características específicas diante da evolução de um incêndio. Portanto, a análise de um sistema multicamadas para a fabricação de uma porta corta-fogo requer a obtenção dos dados relacionados ao comportamento de suas propriedades físicas nessa situação específica. Os Eurocódigos estabelecem esses valores por meio de experimentos, a fim de garantir que, ao utilizar tais materiais em aplicações reais ou em estudos acadêmicos, os testes possam ser conduzidos de acordo com um conjunto padrão de variáveis de entrada. Isso possibilita a replicação e aceitação dos resultados pela comunidade científica.

Tabela 3.7: Propriedades térmicas dependentes da temperatura do Concreto, segundo Eurocódigo 1992-1-2, [37].

T [°C]	$\lambda$ [W/mK]	c [kJ/kgK]	$\rho/\rho_{20}$ [kg/m]
20	1,95	0,9	1
99	1,77	0,9	1
100	1,77	0,9	1
120	1,72	0,92	0,999
121	1,72	0,921	0,997
200	1,55	1	0,977
250	1,45	1,025	0,973
300	1,36	1,05	0,965
350	1,27	1,075	0,958
400	1,19	1,1	0,950
500	1,04	1,1	0,941
600	0,91	1,1	0,933
800	0,72	1,1	0,915
1200	0,60	1,1	0,880

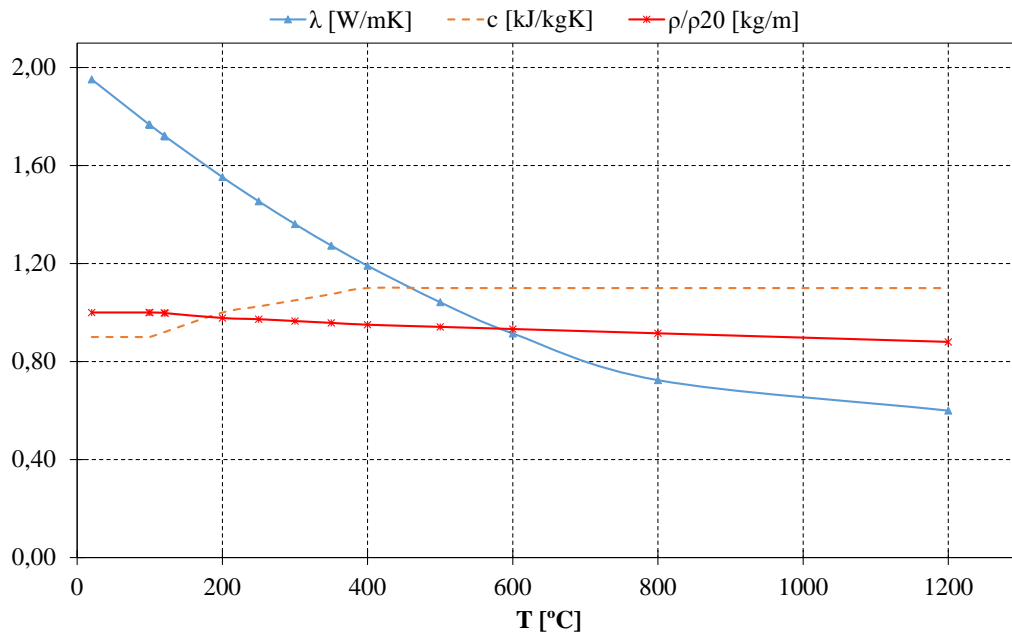


Figura 3.11: Propriedades térmicas dependentes da temperatura do Concreto, segundo Eurocódigo 1992-1-2, [37].

Tabela 3.8: Propriedades térmicas dependentes da temperatura da Alvenaria, segundo Eurocódigo 1996-1-2 de 2005, [39].

T [°C]	$\lambda$ [W/mK]	c [kJ/kgK]	$\rho/\rho_{20}$ [kg/m]
20	0,42	0,56	1
95	0,8	0,56	1
100	0,80	10,72	1
200	1,26	2,82	1
300	1,26	2,59	1
400	1,26	2,37	1
500	1,26	2,14	1
600	1,26	1,92	1
700	1,26	1,69	1
800	1,26	1,47	1
900	1,26	1,24	1
1000	1,26	1,02	1
1100	1,26	0,79	1
1200	1,26	0,56	1

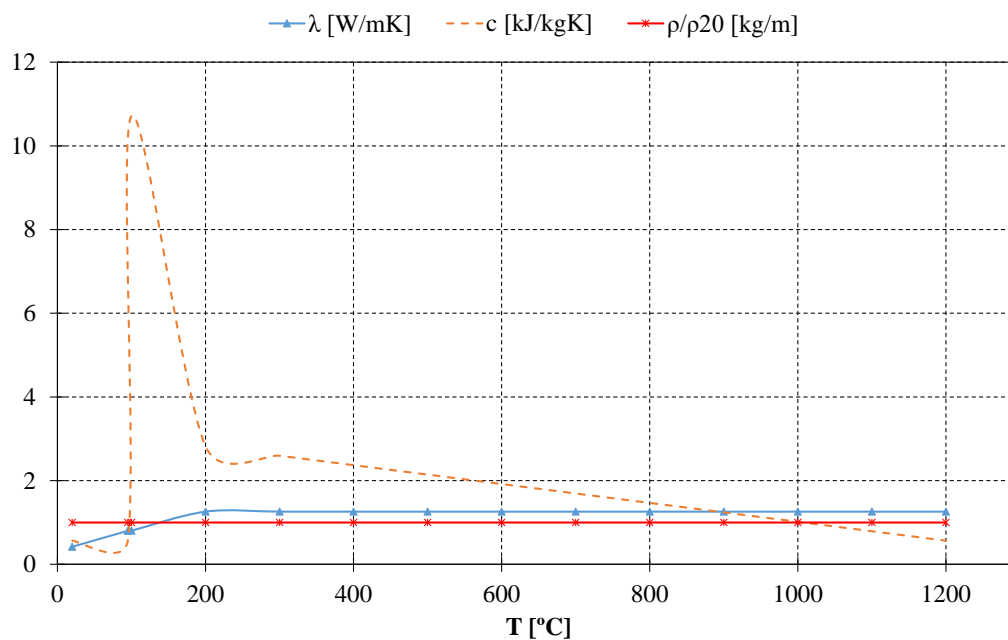


Figura 3.12: Propriedades térmicas dependentes da temperatura da Alvenaria, segundo Eurocódigo 1996-1-2 de 2005, [39].

Tabela 3.9: Propriedades térmicas dependentes da temperatura da Aço, segundo Eurocódigo 1993-1-2 de 2005, [38].

T [°C]	$\lambda$ [W/mK]	c [KJ/kgK]	$\rho/\rho_{20}$ [kg/m]
20	53,33	0,44	1
50	52,34	0,46	1
100	50,67	0,49	1
200	47,34	0,53	1
300	44,01	0,56	1
400	40,68	0,61	1
500	37,35	0,67	1
550	35,69	0,71	1
600	34,02	0,76	1
650	32,36	0,81	1
700	30,69	1,01	1
730	29,69	2,29	1
735	29,52	5,00	1
800	27,30	0,80	1
900	27,30	0,65	1
1000	27,30	0,65	1
1100	27,30	0,65	1
1200	27,30	0,65	1

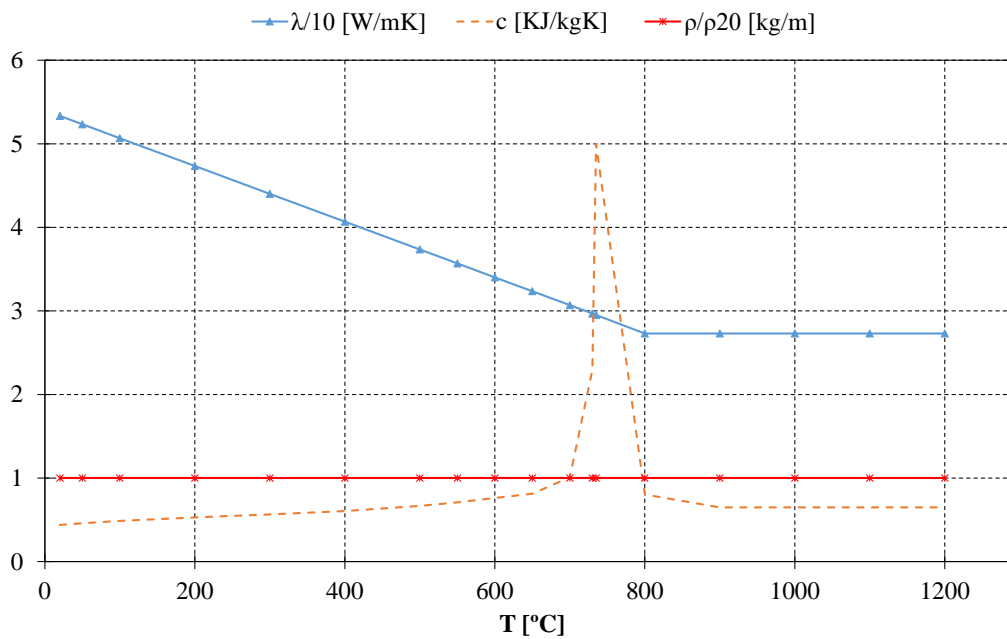


Figura 3.13: Propriedades térmicas do aço, [38].

### 3.5. Propriedades dos materiais

As propriedades necessárias para a análise térmica dos materiais foram fundamentalmente extraídas das novas propostas dos Eurocódigos 1995-1-2, para elementos de madeira, derivados e isolamentos, Eurocódigo 1992-1-2 para elementos de concreto, a EN 1993-1-2 para os elementos de aço e também a EN 1196-1-2, que define as propriedades para a alvenaria, [35], [37] – [39].

#### Madeira Sólida

A madeira sólida utilizada nesse trabalho foi o pinho, usado para compor o montante da porta, conferindo estabilidade estrutural do modelo, como também aplicado no batente da porta, sendo que a densidade do modelo foi obtida conforme estudo de ensaio não destrutivo, [40]. O calor específico também foi corrigido, segundo equação (3.8).

Tabela 3.10: Propriedades da madeira de pinho bravo, adaptado, [35].

T [°C]	$\lambda$ [W/mK]	c [J/kgK]	$\rho/\rho_{20}$ [kg/m <sup>3</sup> ]
20	0,12	1530	565
99	*	1770	565
100	*	13600	565
120	*	13500	565
121	*	2120	502,85
200	0,15	2000	502,85
250	*	1620	468,95
300	*	710	384,2
350	0,07	850	259,9
400	*	1000	192,1
500	0,09	*	*
600	*	1400	141,25
800	0,35	1650	129,95
1200	1,5	1650	0

## MDF

O painel de derivado de madeira utilizado foi o MDF, para a construção do modelo foi utilizado nas faces da folha da porta, a densidade foi obtida de acordo com especificado no catálogo do fabricante, [41]. O calor específico foi corrigido conforme equação (3.8).

Tabela 3.11: Propriedades físicas dependendo da temperatura do MDF, adaptada.

T [°C]	$\lambda$ [W/mK]	c [J/kgK]	$\rho/\rho_{20}$ [kg/m <sup>3</sup> ]
20	0,12	1790	820
100	0,3	1790	820
110	0,23	30800	795,4
120	0,15	1790	770,8
200	0,18	1790	770,8
275	0,14	6170	475,6
350	0,09	690	188,6
500	0,23	690	172,2
800	0,74	690	139,4
1200	4,2	690	90,2

## Lã de rocha

O painel de Lã de rocha também foi aplicado no interior do modelo da porta para dificultar a passagem da temperatura para o lado não exposto, sendo assim suas características foram aplicadas segundo norma, para densidade foi assumida segundo catálogo do fabricante, [42]. O calor específico foi corrigido segundo Equação (3.8).

Tabela 3.12: Propriedades térmicas da lã de rocha com evolução da temperatura.

T [°C]	$\lambda$ [W/mK]	c [kJ/kgK]	$\rho/\rho_{20}$ [kg/m]
20	0,04	0,88	70
100	0,05	1,04	70
200	*	1,16	68,6
400	0,20	1,28	68,39
600	0,33	1,355	68,11
800	0,51	1,43	67,9
925	0,67	1,477	67,2
1200	1,00	1,58	62,09

## Concreto

O concreto é muito utilizado na construção civil, sendo aplicado como elemento estrutural e ligante entre materiais aplicados em paredes, sendo que para o presente estudo este será aplicado na interligação entre o batente das portas, assim como suas propriedades serão utilizadas para modular o comportamento térmico do reboco das paredes, do bloco porta. Suas propriedades foram obtidas conforme a norma EN 1992-1-2, [37].

Tabela 3.13: Propriedades físicas dependendo da temperatura do concreto, adaptado.

T [°C]	$\lambda$ [W/mK]	c [J/kgK]	$\rho/\rho_{20}$ [kg/m]
20	1,95	900	2300
99	1,77	900	2300
100	1,77	900	2300
120	1,72	920	2297
121	1,72	921	2294
200	1,55	1000	2248
250	1,45	1025	2237
300	1,36	1050	2220
350	1,27	1075	2202
400	1,19	1100	2185
500	1,04	1100	2165
600	0,91	1100	2145
800	0,72	1100	2105
1200	0,60	1100	2024

## Alvenaria

A alvenaria compõe parte importante do bloco porta, pois as paredes tem o papel de compartimentar horizontalmente pavimentos, além de que são nelas que as portas são apoiadas para sua instalação. A alvenaria tem função importante na construção civil, seja ela de caráter resistente, compartimentação e até mesmo fundação, [43]. A alvenaria será o material empregado para a construção do modelo de bloco porta corta-fogo, e sua densidade, condutividade térmica e calor específico serão extraídas do Eurocódigo 6, [39].

Tabela 3.14: Propriedades físicas da Alvenaria em relação a temperatura.

T [°C]	$\lambda$ [W/mK]	c [J/kgK]	$\rho/\rho_{20}$ [kg/m]
20	0,42	564	1200
95	0,8	564	1200
100	0,80	10716	1200
200	1,26	2820	1200
300	1,26	2594	1200
400	1,26	2369	1200
500	1,26	2143	1200
600	1,26	1918	1200
700	1,26	1692	1200
800	1,26	1466	1200
900	1,26	1241	1200
1000	1,26	1015	1200
1100	1,26	790	1200
1200	1,26	564	1200

### Fita Intumescente

Uma fita intumescente é um tipo de material usado em construção civil e proteção contra incêndios. É geralmente uma fita de espuma ou material composto que é instalada em juntas ou aberturas em elementos de construção, como paredes, pisos ou dutos, com o objetivo de fornecer isolamento térmico e proteção contra a propagação do fogo e fumaça em caso de incêndio. A fita intumescente é projetada para se expandir quando exposta ao calor, formando uma camada isolante que retarda a propagação do fogo e protege as aberturas contra a penetração de gases quentes e fumaça. Ela pode ser usada em combinação com outros materiais de proteção, como selantes, vernizes e revestimentos retardadores de chama, [44].

Tabela 3.15: Propriedades físicas da fita intumescente dependente da temperatura.

T [°C]	$\lambda$ [W/mK]	c [kJ/kgK]	$\rho/\rho_{20}$ [kg/m]
20	0,1	1000	1250
100	0,06	1000	1250
250	0,02	1000	1250
300	0,02	1000	375
400	0,02	1000	375
600	0,025	1000	375
800	0,08	1000	375

## **4. MODELO MULTICAMADA EM ESTUDO**

### **4.1. Ensaio experimental no forno**

Foi desenvolvido um sistema multicamadas de madeira e derivados, com isolante térmico, afim de estabelecer um modelo funcional e com resistência térmica, de acordo com as classificações normativas, esse estudo foi feito num trabalho anterior, afim de classificar esse sistema quanto ao isolamento, [15]. Onde todos os testes foram regidos pelas respectivas normas europeias de resistência ao fogo.

Sendo que o objetivo da determinação da resistência ao fogo é avaliar o comportamento do material de construção quando submetido a condições específicas de aquecimento e pressão, tirando as informações da capacidade do elemento de resistir a altas temperaturas. Esses testes requerem que uma amostra que represente o elemento construtivo. É conhecido que cada elemento se comporta de maneira diferente em relação ao fogo, assim sendo, alguns critérios são definidos para classificar esses elementos segundo a norma EN 1363-1, são baseados nos seguintes parâmetros, aplicados de forma individual e/ou combinados.

Foi realizada uma análise comparando duas opções de painéis tipo sanduíche multicamada de madeira e derivados de madeira. Esses painéis foram instalados em uma parede de tijolos e suportados por um aro de madeira. A seleção dessas alternativas foi fundamentada nos materiais existentes no LERM e suas respectivas espessuras, [15].

Nos testes existem as duas faces do material e para se avaliar os valores das temperaturas, foram instalados termopares nos dois modelos ensaiados, sendo que os designados por “BT”, designam do lado exposto ao fogo, e “DT” do lado não exposto ao fogo. Colocados dois termopares na região interna e mais oito deles na face não exposta as chamas. É bem representado nas figuras Figura 4.1 e Figura 4.2 as dimensões dos dois modelos construídos e a localização dos termopares.

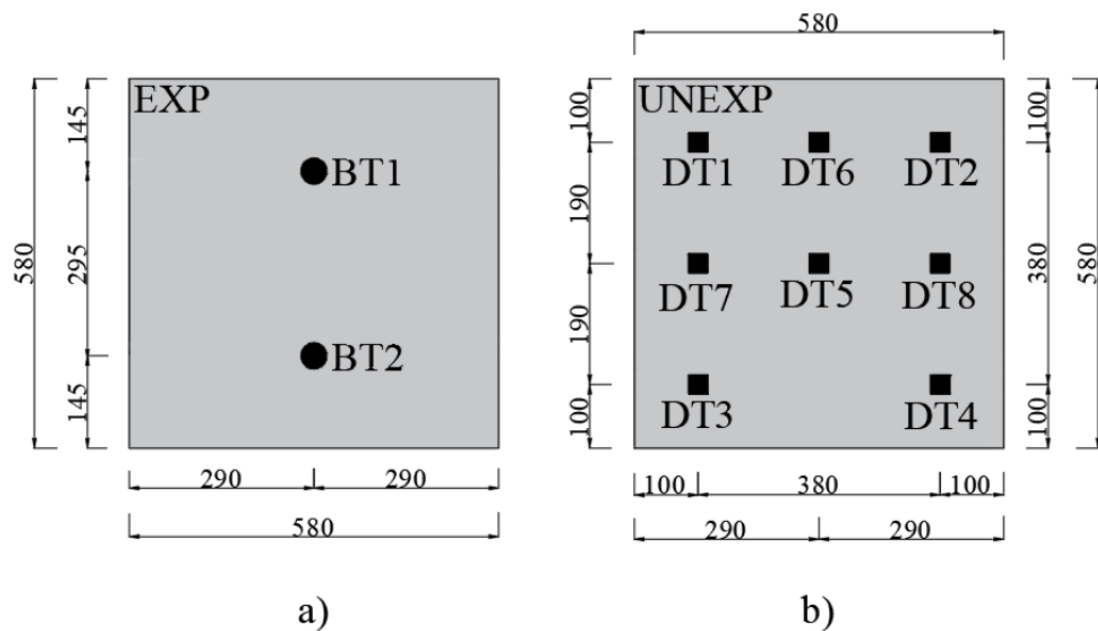


Figura 4.1: Localização dos termopares do modelo, a) lado exposto; b) lado não exposto, em mm, [15].

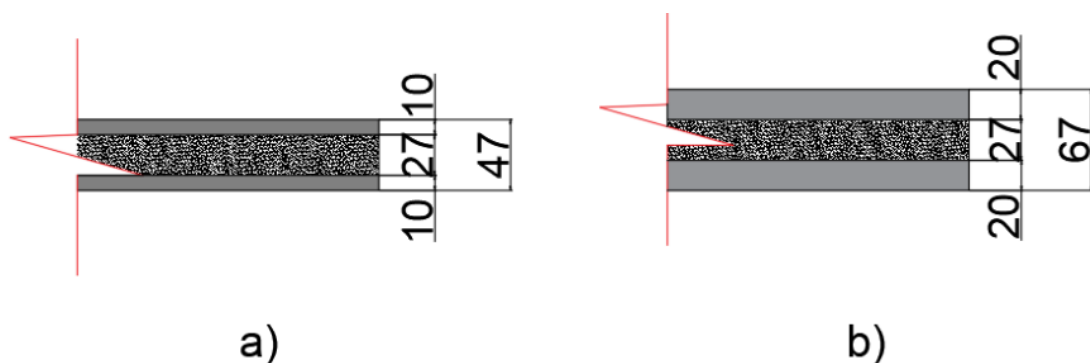


Figura 4.2: Dimensões da espessura dos sistemas multicamadas: a) MDF + lã de rocha + MDF; b) pinho + lã de rocha + pinho, em mm, [15].

Os dois modelos foram montados em uma parede de tijolos acoplada ao forno, para que pudessem ser realizados os ensaios de resistência ao fogo, sendo que o ambiente interno do forno seria o local responsável por simular uma situação de sinistro. Foi induzido a chama de aquecimento do equipamento, que proporcionasse uma evolução de temperaturas seguindo a curva padrão de incêndio ISO834. Para se conseguir realizar um controle do aquecimento interno do sistema, foi inserido um termopar de placa dentro do forno. E a montagem dos sistemas foi definida da forma como mostra a Figura 4.3, onde é até mesmo mostrado as ligações dos termopares usados para realização do experimento.



Figura 4.3: Modelo de MDF ensaiado: a) Lado exposto; b) lado não exposto instalado na estrutura do forno, com paredes de tijolos e aro de pinho, [15].

## 4.2. Modelo de benchmark

Com o objetivo de criar um modelo que realmente representasse o comportamento real do painel sanduíche, exposto a situação de incêndio, foi elaborado um modelo numérico baseado nas especificações do experimental, com auxílio do Ansys Workbench. Foi montado um modelo 2D, sendo possível calibrar o modelo de forma a conseguir uma correspondência de resultados o mais próximo possível.

Foram utilizadas as espessuras detalhadas do modelo experimental, conforme Figura 4.2 a), para serem aplicadas no modelo ensaiado no computador, a partir disso foi feito o projeto do painel e adicionadas as condições para que o comportamento do ensaio fosse condizente com o real.

A simulação numérica em regime transiente feita no Ansys foi fiel a construção real da montagem de MDF + Lã de rocha + MDF, onde foi aplicada a função de aumento da temperatura em uma das faces conforme curva padrão de incêndio ISO834. Da mesma forma como o ensaio feito no forno, onde foi controlado o aumento da temperatura também segundo a curva padrão, [6]. O sistema foi submetido inicialmente a um tempo de ensaio de 60 minutos, tempo superior ao que foi medido em laboratório, para ser avaliado quando que o critério de

temperatura média deixaria de ser atendido, então finalizando o ensaio. Na Figura 4.4, pode-se ver a seção transversal do sistema estudado e sua representação no software.

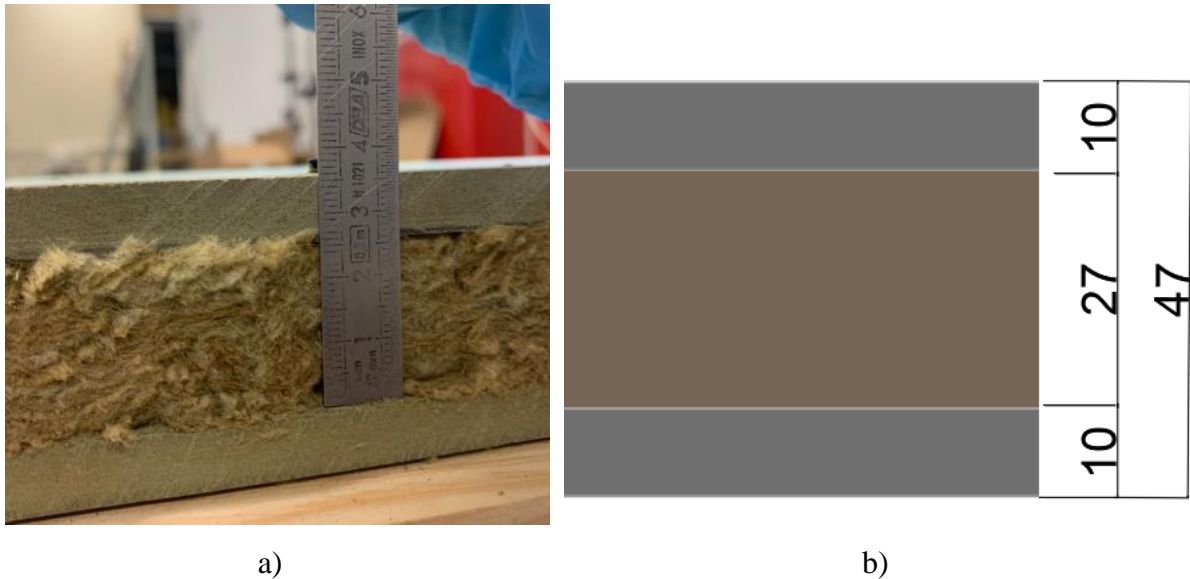


Figura 4.4: Modelo de MDF; a) Seção transversal do modelo ensaiado no forno, [15]; b) Seção transversal no Ansys.

### 4.3. Modelo numérico de otimização

Para criar um modelo multicamadas de porta corta fogo fabricado em madeira e derivados de madeira, com isolamento térmico em seu interior, é preciso seguir alguns passos. Primeiramente é necessário selecionar os materiais adequados para cada camada do painel da porta. A camada externa pode ser feita de madeira maciça ou derivados de madeira, como MDF ou compensado, que oferecem boa resistência e durabilidade. Já a camada interna, responsável pelo isolamento térmico, pode ser composta por materiais como lã de rocha, lã de vidro ou espuma de poliuretano, que são materiais isolantes térmicos.

Com o objetivo desse projeto na obtenção da mínima espessura de um painel multicamada capaz de resistir aos tempos normatizados de resistência de isolamento do calor, foi desenvolvido no software Ansys, sistemas modelos que poderiam suportar os tempos de 30, 60 e 90 minutos respectivamente, [14].

O modelo foi desenvolvido com a utilização do processo de otimização disponível na interface do Ansys Workbench, onde através de cálculos matemáticos, ensaia o sistema com base nas

condições de fronteiras adequadas para cada simulação. O sistema multicamadas desenvolvido pode ser observado na Figura 4.5.

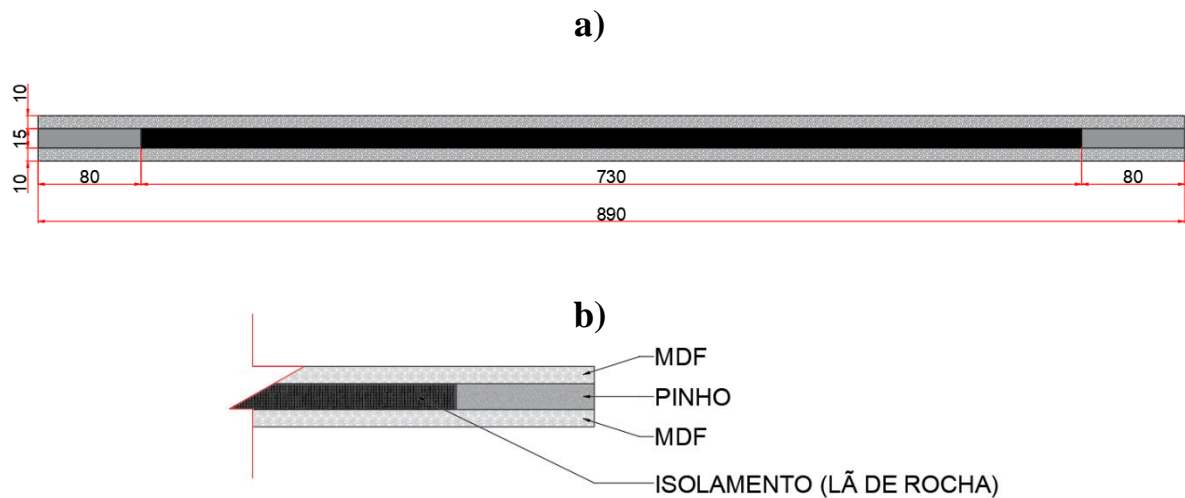


Figura 4.5: Modelo multicamadas numérico; a) Modelo completo para otimização, todas medidas em milímetros; b) detalhamento dos materiais componentes do lado direito da porta.

Esse modelo foi o montado para representar a folha da porta corta-fogo empregado para o processo de otimização. Assim como no detalhamento b) da Figura 4.5, que mostra o lado esquerdo do modelo, também existe a mesma constituição de pinho na porção central do modelo, isso se dá pelo fato de ser um elemento maciço de madeira, acaba por conferir estabilidade estrutural ao modelo da porta.

A norma EN 1363-1, define os testes a serem feitos para fim de classificação de uma porta corta-fogo, que deve ser resistente ao fogo além de ter função de compartimentação, essa classificação é mensurada por tempos definidos como ótimos para uma situação de sinistro, [45]. Sendo assim para a criação do modelo foi inicialmente projetado, o que seria importante para a criação dessa porta em situação real, e foi visto que a mesma precisava ter os seguintes componentes:

Montante – proporciona a porta segurança estrutural para suportar suas diferentes camadas de materiais.

Lã de rocha – Compõe a camada interna da porta, com função de dificultar a transmissão térmica da temperatura da face exposta para a não exposta.

MDF – Compondo as duas faces do elemento das porta multicamadas, sendo a região direta de ataque das chamas.

Essa construção pode ser observada no detalhamento a seguir na Figura 4.6.

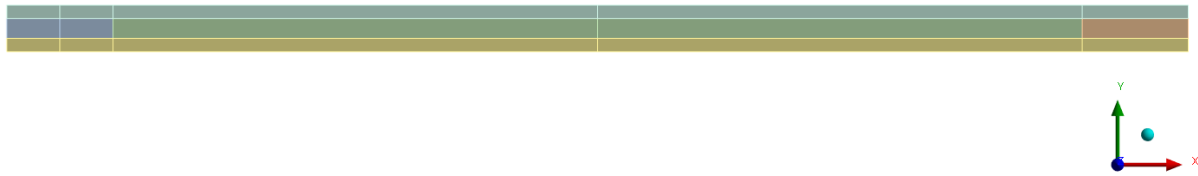


Figura 4.6: Modelo multicamadas da porta, usado para otimização.

Para se fazer a simulação numérica em regime transiente no software Ansys, temos duas opções, a primeira é fazer um teste estático, e a segunda é o modo transiente, que será utilizado nesse estudo, já que esse método permite ao utilizador definir que as propriedades térmicas dos materiais se alteram conforme o aumento de temperatura. Isso aproxima o teste numérico do comportamento real, pois as propriedades explicadas na secção [2.7 a 2.9], não são constantes, com essa variação que seguirá a curva padrão ISO834.

Sendo assim, as propriedades térmicas foram retiradas dos Eurocódigo 5, que normaliza a madeira, derivados e elementos isolantes em caso de exposição ao fogo, [35]. As informações dos materiais são adicionadas na biblioteca de materiais do Ansys, para que durante as simulações sejam calculados os processos com a maior autenticidade possível, assim como podem ser observados na Figura 4.7.

Outline of Schematic B2, C2: Engineering Data		
	A	B
1	Contents of Engineering Data	
2	Material	
3	LA_ROCHA	
4	MDF	
5	PINHO	
6	Structural Steel	
*	Click here to add a new material	

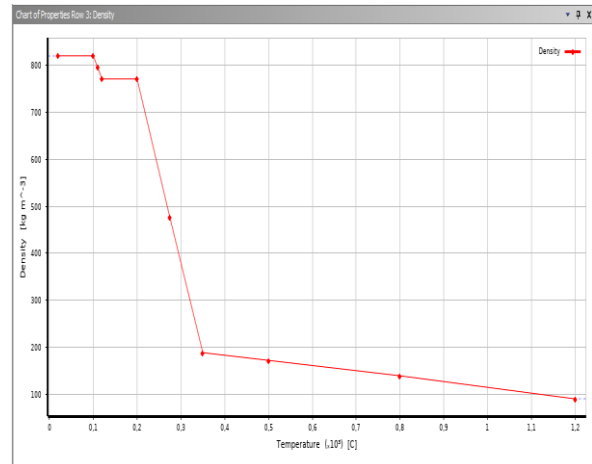
a)

Properties of Outline Row 4: MDF	
	A
1	Property
2	Material Field Variables
3	Density
6	Isotropic Thermal Conductivity
9	Specific Heat Constant Pressure, $C_p$

b)

Table of Properties Row 3: Density		
	A	B
1	Temperature (C)	Density (kg m <sup>-3</sup> )
2	20	820
3	100	820
4	110	795,4
5	120	770,8
6	200	770,8
7	275	475,6
8	350	188,6
9	500	172,2
10	800	139,4
11	1200	90,2
*		

c)



d)

Figura 4.7: Propriedades do MDF inseridas para a modulação do modelo segundo realidade, a) Materiais utilizados para montagem do modelo; b) Seleção da propriedade a ser visualizada; c) Tabela de Temperatura densidade; d) Gráfico gerado a partir da tabela c.

O projeto foi modelado utilizando o software Ansys e as características dos materiais foram aplicadas na seção correspondente do modelo. Posteriormente, foram estabelecidas as condições de fronteira necessárias para garantir que a simulação ocorra de forma precisa e possa ser comparada com os resultados obtidos na realidade.

Para a montagem de um modelo de porta otimizado, foi utilizado como ponto de partida a montagem já realizada para comparação com o teste feito em laboratório, a partir da qual foram criados os parâmetros que deveriam ser otimizados. Esses parâmetros foram definidos com base em critérios técnicos, levando em consideração aspectos como a resistência e isolamento da porta. Com base nesses critérios, foram definidos os parâmetros de interesse na otimização:

- T\_UNEXP, que é a representação da temperatura máxima na face não exposta.
- ESP\_TOTAL, que é a medida da espessura total da folha da porta.
- T\_EXP, que é a temperatura da face exposta a curva de incêndio ISO834.

Sendo assim, foi configurado a modelagem de Otimização, onde são definidos os processos que o programa levará em conta para criar uma folha de porta ótima. Nesta etapa são definidos o intervalo de medidas que os painéis do elemento podem ter, isso dá ao programa a liberdade de testar variações de medidas e informar quais são as T\_UNEXP, de saída como resultado.

Com esses cálculos em que são criados pontos de teste, denominados pontos candidatos, com combinações de medidas do MDF e da Lã de rocha e o software define uma resposta de qual é

a interferência para os resultados de cada camada. A seguir são definidos os objetivos que devem ser levados em consideração para otimizar o modelo, sendo que pra esse estudo, os pontos importantes são: a temperatura da face não exposta ao incêndio não ultrapassar o valor da temperatura ambiente somados a 140 °C de temperatura média, segundo a EN 1363-1, (para exposição ao fogo da curva padrão temperatura versus tempo). Associado a esse fator, o interesse é obter a menor espessura da folha da porta de maneira que o requisito da temperatura média seja satisfeito.

#### **4.4. Processo de otimização**

A simulações foram desenvolvidas visando a melhor configuração para a composição do painel sanduiche, dimensionando as espessuras dos materiais integrantes que seriam suficientes para garantir o isolamento do ambiente sinistrado em relação ao ambiente não exposto, assegurando os critérios normativos para portas corta-fogo. Ademais, foram definidos intervalos de espessuras comerciais dos elementos, as quais o software seria responsável por variar as medidas nesse intervalo de valores, para cada material afim de satisfazer os critérios de aceitação do modelo.

Simulações numéricas foram criadas com algumas combinações de composição para que se avaliasse os resultados desses modelos, para que a partir disso se pudesse fazer rodar o sistema de otimização.

##### **4.4.1. Modelos de refinamento de resultados**

Foram criados vários modelos de configurações das composições dos painéis sanduiche, nesses eram colocados os o intervalo “dpainel” e “disol” que são as variáveis responsáveis por receber o valo da espessura de material componente do sistema multicamadas. Cada material tem uma composição e uma gama de espessuras que cada chapa de material é fabricada, o MDF é fabricado em espessuras a partir de três milímetros e podendo ser produzidas conforme a demanda dos clientes, já as placas de Lã de rocha têm uma diferença em suas dimensões, já que é um material isolante, sendo assim, normalmente é encontrada comercialmente em espessuras a partir dos quinze milímetros.

#### **4.4.2. Função objetivo**

No contexto de otimização de sistemas, a definição das funções objetivo e dos constrangimentos é essencial para alcançar soluções ótimas para o problema em questão. Essas funções e restrições desempenham um papel fundamental na formulação e resolução matemática do problema em questão.

A função objetivo é uma medida quantitativa que descreve o desempenho ou a qualidade desejada do sistema que será otimizado. Ela representa a grandeza que se deseja maximizar ou minimizar, face ao objetivo específico do problema. Sendo o objetivo da presente otimização encontrar valores ótimos de espessuras de materiais para constituição de um painel sanduiche de uma porta corta-fogo, que seja resistente ao fogo segundo os tempos de exposição normatizados.

- Descobrir as ótimas espessuras de MDF e lã de rocha, que em conjunto formando o painel sanduíche, isolem uma situação de incêndio durante os tempos mínimos de 30, 60 e 90 minutos respectivamente.
- Definir qual seria a mínima espessura desses materiais que seriam realmente necessários para isso.

Com esses objetivos, o software será o responsável por desenvolver esse painel com as menores espessuras, através de cálculos matemáticos de interpolação de valores, a partir de várias interações e combinações de dimensões de painel.

#### **4.4.3. Constrangimentos**

Os constrangimentos, são restrições que impõe limitações ou condições sobre as variáveis do problema. Ademais definir os constrangimentos é de grande importância, já que estes são responsáveis por limitar o processo de otimização, definindo alguns limites para que a otimização não saia dos parâmetros operacionais esperados.

Sendo que é de grande importância a definição adequada, pois refletem as limitações práticas ou requisitos impostos ao sistema em estudo. Em suma os constrangimentos que foram aplicados para esse problema foram:

- A temperatura de um ponto da face não exposta do painel sanduiche não poderia exceder a temperatura de 140 °C, mais o valor da temperatura ambiente de 20 °C.

Por ser uma representação em 2D da folha da porta, é que foi aplicado somente o critério de temperatura média como constrangimento do processo de otimização, pois o ponto central da folha da porta já representaria vários pontos de análise caso se considerasse o modelo em 3D.

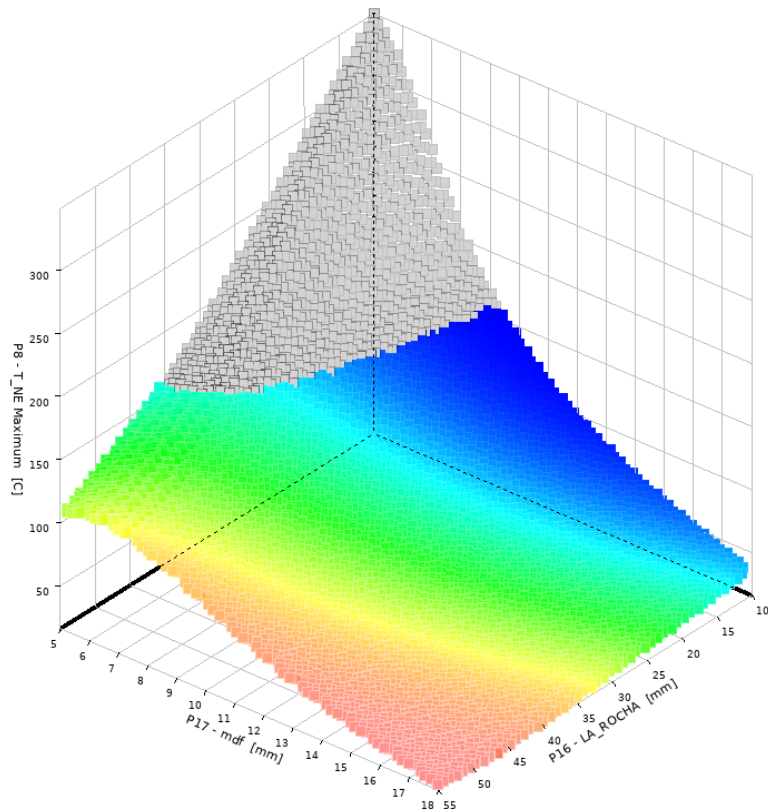
Uma vez que as funções objetivo e os constrangimentos tenham sido definidos de maneira apropriada, é possível aplicar técnicas de otimização para encontrar soluções que atendam aos requisitos do problema.

#### **4.4.4. Casos que cumprem ou não os requisitos de otimização**

A partir da definição adequada das condições de contorno da otimização, é possível encontrar soluções ótimas que melhorem o desempenho e eficiência do sistema multicamadas de madeira e derivados. Alguns dos testes numéricos cumpriram com excelência os critérios de isolamento da porta segundo o critério de isolamento térmico da face não exposta, e alguns não conseguiram. Isso se dá por diferentes fatores, como a espessura do material, suas propriedades térmicas que beneficiam ou dificultam a passagem do fluxo de calor do sistema.

Para a criação dos pontos que combinam as espessuras dos materiais empregados na geometria do painel, ocorre um processo matemático realizado pelo Ansys, que utiliza uma função polinomial de segunda ordem, para a definição dos melhores valores de espessuras, e por meio dessa curva são distribuídos os pontos criados pela otimização, assim como é mostrado na Figura 4.8.

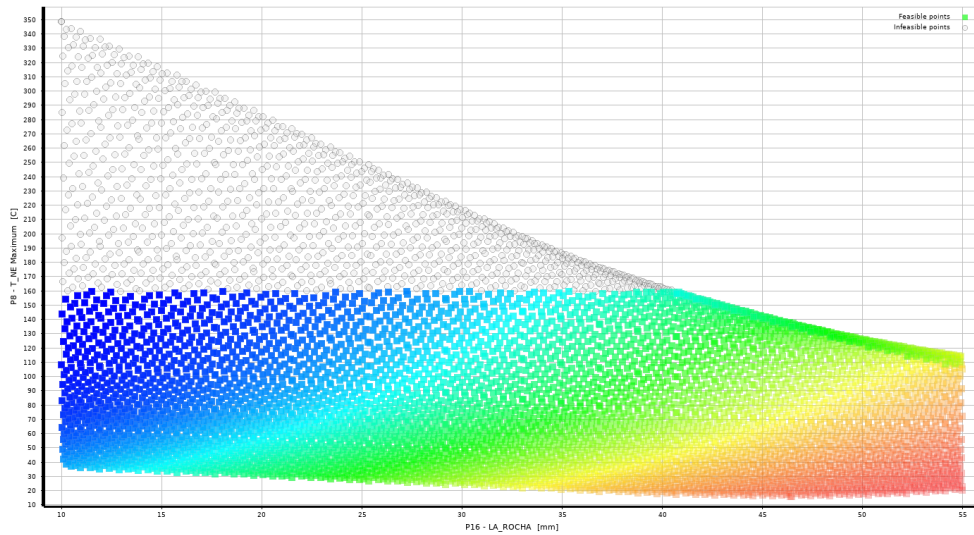
Com as definições adequadas e aplicadas ao sistema são iniciados os testes, onde se define a quantidade de teste que o sistema fará, definidas no projeto de experimentos (design of experiments – em inglês), e de dessa amostra de soluções serão retirados 3 pontos candidatos que mais se adequam a todas as exigências apresentadas no problema. A superfície de resposta pode ser observada na Figura 4.8.



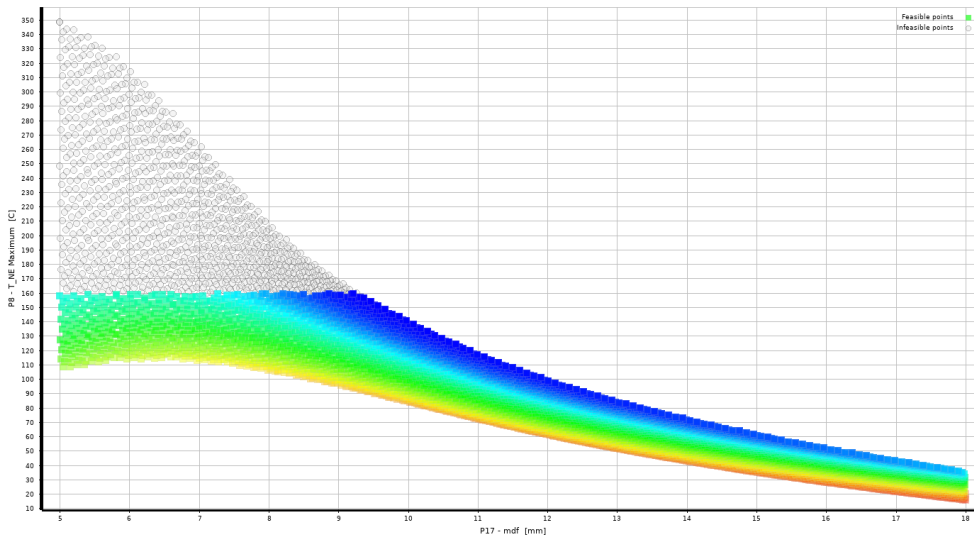
*Figura 4.8: Representação dos pontos que cumprem em cores, e pontos que não cumprem as exigências do problema, em cinza acima da marca de 160 °C.*

Através dessa imagem dos pontos em 3D, somos apresentados aos pontos que foram criados em relação a espessura do MDF e do isolamento de Lã de rocha, em relação a temperatura T\_NE (temperatura da face não exposta). Onde pode-se observar que ficam representados os pontos que cumprem todas as exigências apresentadas ao sistema, abaixo dos 160 °C em um diagrama de cores, e acima dessa marca de temperatura são representados em cinza, os casos que não cumprem de alguma maneira os requisitos de aceitação.

Com o intuito de melhorar o entendimento dos pontos que satisfazem ou não o processo de otimização é interessante visualizar os parâmetros de forma individual em relação a T\_NE na Figura 4.9.



a)



b)

Figura 4.9: Pontos de otimização em relação a  $T_{NE}$ , a) Isolamento de Lã de rocha; b) MDF.

Analisando os dados dos gráficos da figura anterior pode-se observar que o aumento da espessura dos materiais é diretamente proporcional a queda da temperatura do lado não exposto da folha da porta. Isso é facilmente explicado pela física, já que quanto maior é a espessura, mais o material representará resistência para a passagem de energia térmica.

## 4.5. Condições de Fronteira

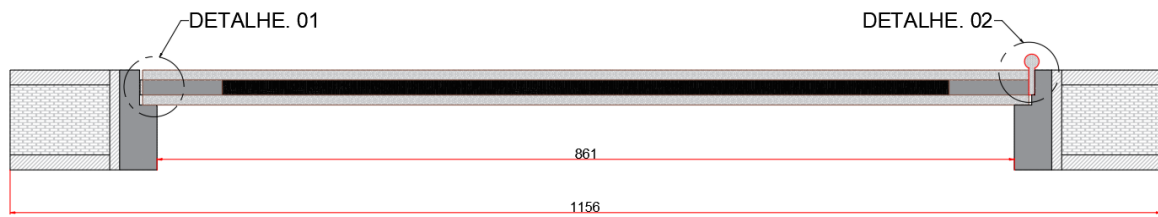
As condições de contorno para esse modelo numérico envolvem a aplicação da convecção e radiação nas superfícies expostas ao fogo. Para a região exposta, a Equação 2.3 descreve o aumento de temperatura dentro do forno, tanto para efeitos de convecção quanto para radiação. Para efeitos de convecção, o coeficiente adotado foi de  $\alpha_c=25 \text{ W/m}^2\text{K}$ , para a curva de ISO834, [35].

Para a superfície não exposta ao fogo, é assumido convecção com a temperatura ambiente e o fator de convectivo igual a  $\alpha_c= 4 \text{ W/m}^2\text{K}$ , de acordo com [35]. Para efeitos de radiação, a emissividade foi considerada como 0,82 [31]. Para a região não exposta ao fogo, a perda de calor ocorre por convecção e radiação, sendo que será considerado uma convecção normal, visto que o ar em contato com a região não exposta está em repouso. Para efeitos de radiação, a emissividade foi considerada como 0,82 tendo a temperatura ambiente fixada como  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ , [31].

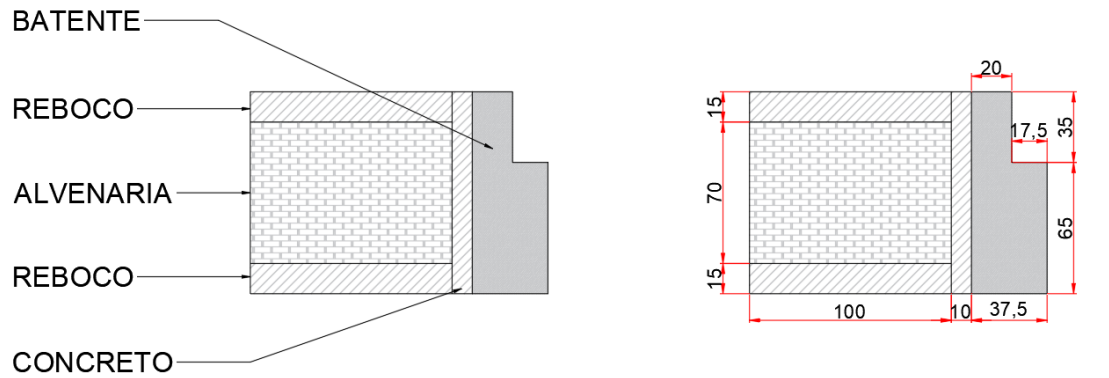
## 4.6. Bloco porta corta-fogo

Com os melhores resultados obtidos com o sistema de otimização, será construído o Bloco porta corta-fogo, constituído de paredes de alvenaria, reboco, concreto na conexão entre a parede e o batente, confeccionado em madeira de pinho, além de fita intumescente na seção intermedia do portal e porta. Essa construção demanda mais recursos computacionais, devido ao fato de o modelo ser mais complexo e com mais componentes envolvidos.

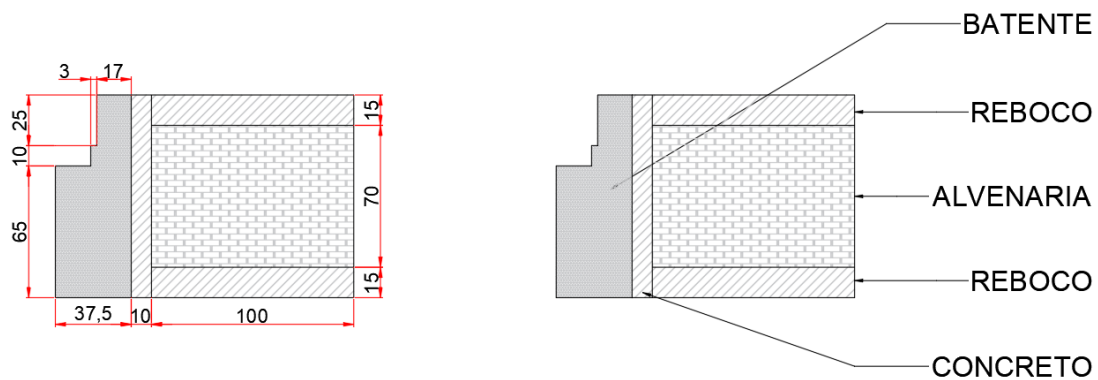
Para a criação do modelo do bloco porta corta-fogo, foi utilizada a base da folha da porta adquirida através da otimização da espessura, sendo adicionados os elementos construtivos que compõe uma porta instalada numa edificação, essa montagem é demonstrada na Figura 4.10.



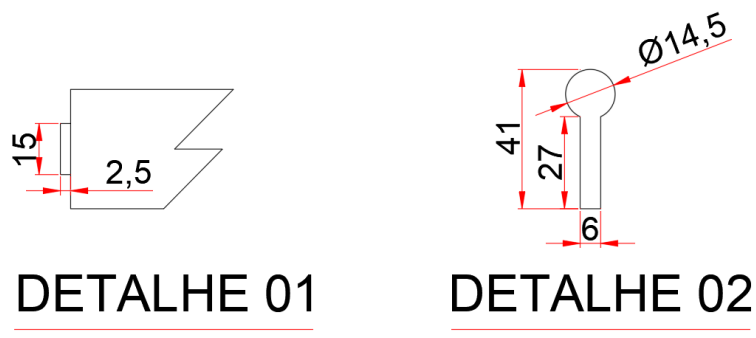
a)



b)



c)



d)

Figura 4.10: a) Representação bloco porta; b) Detalhe batente e parede esquerdo; c) Detalhe batente e parede direito;

d) Detalhamento da Fita Intumescente e da Dobradiça do sistema.

A criação de um bloco porta corta fogo por meio do software Ansys tem como objetivo avaliar o desempenho de todo o conjunto e entender se existem diferenças em relação ao modelo apenas da porta. Esse tipo de simulação é fundamental para garantir a segurança do ambiente em caso de incêndio, pois permite avaliar o comportamento da porta em relação à propagação do fogo e à resistência ao calor.

Através do software Ansys, é possível modelar todo o conjunto da porta, incluindo as fechaduras, dobradiças e outros elementos que possam afetar o desempenho da porta. Além disso, o software permite a análise de diferentes cenários, considerando variações nas condições de incêndio, como a intensidade do fogo e a presença de fumaça. Dessa forma, é possível identificar possíveis falhas no projeto e fazer ajustes para garantir que a porta corta fogo cumpra com eficácia sua função de proteger as pessoas e o patrimônio em caso de incêndio.

O modelo dentro do Ansys para o projeto de incêndio foi estruturado de acordo como a Figura 4.11, e assim realizados os testes de exposição à curva de incêndio padrão afim de validar o sistema da folha da porta otimizado.

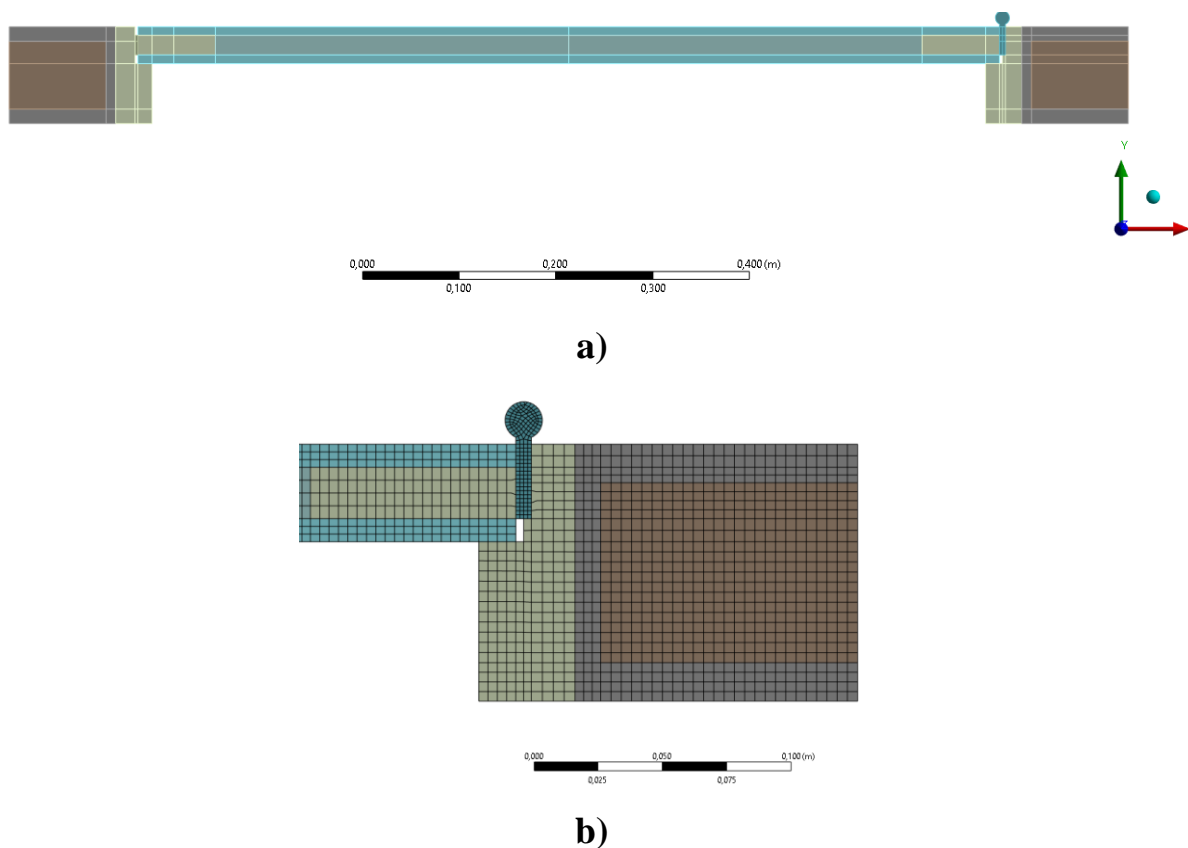


Figura 4.11: a) Bloco porta modelado no Ansys para o teste de 30 minutos; b) Detalhamento de malha da porção esquerda, com parede e dobradiça.

No desenho é possível observar que o modelo tem várias linhas que cortam suas geometrias, linhas estas que tem por objetivo dividir as faces para que a divisão de malha fique bem estabelecida, garantindo a continuidade dos nós quando a seção muda entre os materiais que apresentam colorações diferentes. Com esse método de divisão da geometria, o modelo fica com a divisão de malha aos objetivos de avaliação das temperaturas e menores espessuras capazes de garantir esses parâmetros.

Na seção b) da imagem podemos observar como é a divisão de malha na seção da parede, batente e dobradiça, sendo uma malha bem refinada com um tamanho médio definido de 4 mm o tamanho pra cada elemento da superfície. O benefício da criação das linhas de divisão de superfície se dá pelo fato de elas ajudarem a malha a se ajustar as divisões dos materiais, mantendo os pontos de conexão entre eles coincidentes, garantindo que a propagação de calor através do material aconteça da melhor maneira possível.

## **5. ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS**

Os sistemas de modelagem CAD e desenvolvimento de projetos são amplamente utilizados por empresas e indústrias devido aos diversos benefícios que oferecem. A principal vantagem desses sistemas é a capacidade de criar modelos tridimensionais precisos e detalhados de produtos, estruturas e edifícios, permitindo uma melhor visualização do projeto e identificação de problemas antes da fabricação ou construção. Além disso, os sistemas CAD possibilitam a colaboração em tempo real entre os profissionais envolvidos no projeto, aumentando a eficiência e reduzindo o tempo de desenvolvimento.

O software Ansys é uma ferramenta valiosa para simulação e análise de problemas de engenharia em diversas indústrias, como aeroespacial, automotiva, química e de energia. Com o auxílio do Ansys, as empresas podem otimizar o desempenho de seus produtos e estruturas, aumentando a segurança e reduzindo o tempo e o custo de desenvolvimento. Pode ser utilizado para a realização de simulações para testar diferentes configurações de projetos, garantir a segurança de estruturas e equipamentos em condições extremas, simular o comportamento térmico de componentes e sistemas, projetar sistemas de refrigeração e materiais resistentes a altas temperaturas, simular o comportamento de fluidos, e simular as vibrações de componentes e estruturas.

### **5.1. Análise de sensibilidade da malha**

Um fator que influencia muito na obtenção de bons resultados numa simulação, é a malha de elementos finitos, sendo que no caso de experimentos térmicos, a transferência de calor ocorre através dela, assim como a conexão entre os diferentes materiais aplicados na modelagem.

Para a definição da malha do modelo, foram utilizados métodos de análises equilibrando a obtenção de bons resultados com o tempo de espera para alcançá-los. A discretização quanto a definição de forma, tamanho dos elementos e posição de análise foi elaborada levando em conta a quantidade de elementos por camada de material, assim como a interferência que os incrementos de tempo tinham nos resultados. Sendo que o modelo montado é em 2D, sendo uma vista de um corte transversal da folha da porta. Fazendo o teste para uma geometria base

de MDF + LÃ DE ROCHA + MDF, com 10 + 15 + 10mm de espessura respectivamente. Realizados os testes de malha para obtenção de uma correspondência satisfatória entre o tamanho do elemento e a convergência de resultados, e replicando para todos os outros modelos estudados, como é definido.

O modelo de malha foi analisado segundo o número de divisões dos elementos, tendo que o número que aparece entre parênteses da Tabela 5.1, corresponde as divisões da espessura do respectivo elemento. Sendo assim definindo qual seria o melhor número de divisões dos elementos, combinados com o incremento de tempo que mais aproxima o teste da realidade. A Tabela 5.1, demonstra os modelos desenvolvidos para se descobrir qual a melhor configuração de malha.

*Tabela 5.1: Análise de sensibilidade da malha de elementos finitos.*

<b>Malha (mm)</b>	<b>1 (2+3+2)</b>	<b>2 (3+3+3)</b>	<b>3 (3+4+3)</b>	<b>4 (4+5+4)</b>
dt máx 60s, dt inicial 1 e dt mín. 0,001	145,16	152,96	154,23	154,22
dt máx 30s, dt inicial 1 e dt mín. 0,001	133,18	148,09	147,47	154,92
dt máx 10s, dt inicial 1 e dt mín. 0,001	126,75	135,75	135,57	139,77
dt máx 5s, dt inicial 1 e dt mín. 0,001	123,74	128,28	128,62	132,54
* Todos os valores representados nessa tabela são de temperatura em graus celcius				

O número de divisões tem uma interferência com os resultados no sentido de que quando o fluxo de calor é aplicado ao sistema, ele se desenvolve através dos nós de malha sendo assim poucas divisões limitam como ocorre o processo de transferência de calor, e o contrário também é evidente, o aumento dessas divisões de malha tem um limite em que já não gera resultados significativamente melhores, e a partir daí só vai dificultar o processo de processamento computacional para alcançar os resultados, por isso avaliar a sensibilidade da malha é tão importante.

Com base na Tabela 5.1, em que são mostradas as divisões de malha que foram testadas, os resultados de temperatura da superfície não exposta têm valores muito próximos nos modelos 2, 3 e 4, assim foi adotado o modelo 3, que tem as divisões de [3+4+3], definindo a quantidade de elementos na espessura da folha da porta. Esse número de divisões foi adotado para todos os modelos estudados a partir de então. Na análise da quantidade de divisões que dariam mais qualidade na obtenção dos resultados do modelo, foram feitos os testes que trouxeram os resultados. Uma visualização de como ficaram essas subdivisões de camadas, podem ser vistas na Figura 5.1.

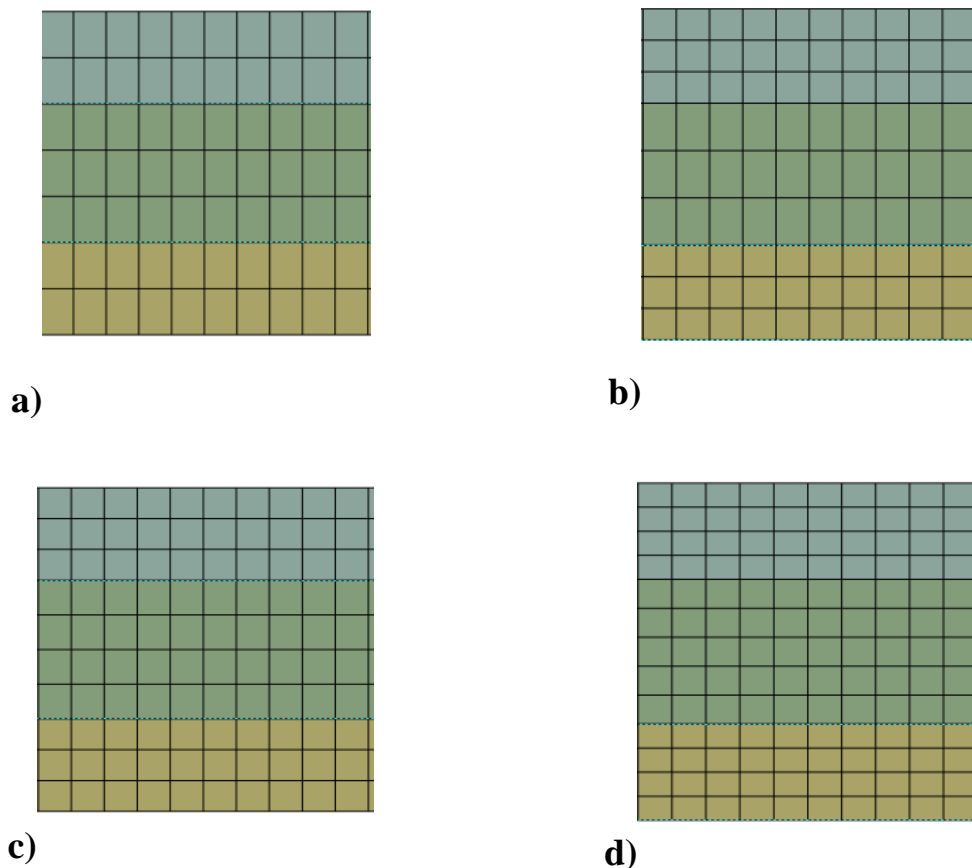


Figura 5.1: Definição do número de divisões da malha por elemento, a)  $2+3+2$ ; b)  $3+3+3$ ; c)  $3+4+3$ ; d)  $4+5+4$ .

Com as análises levando em conta os incrementos de tempo e o refinamento da malha na sua seção transversal, pode-se observar que entre  $\Delta t$  máx de 60 e 30s não existe uma grande variação da temperatura do lado não exposto, porém quando reduzimos esse parâmetro para 10s essa diferença já se torna significativa, e reduzindo para 5s conseguiu-se um melhor resultado desse valor de temperatura. Sendo assim foi aplicado o menor valor de incremento de tempo entre as obtenções de resultados o que corresponde ao  $\Delta t$  máx de 5 segundos.

Para a escolha do melhor incremento de tempo a ser utilizado nos ensaios, foi levado em conta as curvas de desenvolvimento da temperatura da superfície não exposta, Figura 5.2. Onde pode ser visto que quanto menor é o incremento de tempo entre os cálculos da simulação, mais lentamente a curva evolui. Isso deixa claro que o processo de cálculos matemáticos para obtenção das temperaturas passa por mais pontos de análise, o que leva uma evolução de temperatura mais gradual e conseqüentemente uma diferença nos valores ao fim do processo de cálculo.

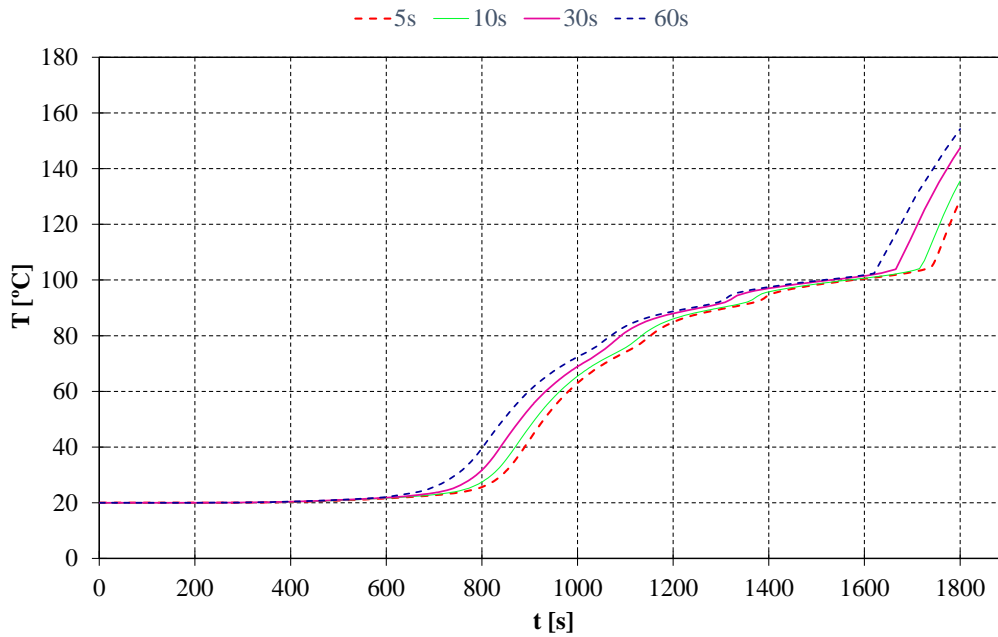


Figura 5.2: Gráfico das curvas de desenvolvimento da temperatura não exposta, com variação nos incrementos de tempo.

É possível observar que a linha vermelha tracejada que representa os incrementos de tempo de 5 segundos, tem uma suavização do seu crescimento, isso devido ao fato de que num período de tempo são retiradas mais informações de temperatura do experimento. Isso demonstra maior confiabilidade no processo de simulação, pois existem variações que podem ocorrer, num curto espaço de tempo que não seriam observáveis com grandes incrementos de tempo.

Isso acaba por garantir que o melhor incremento de tempo para aplicação no modelo de otimização é como incremento de tempo de 5 segundos, assim como o modelo 3 de divisões da malha. Definindo assim um padrão a ser seguido nas simulações efetuadas no projeto.

## 5.2. Ensaio feito no forno

### 5.2.1. Análise experimental

Para a criação de uma modelagem numérica que realmente representasse o comportamento o mais próximo da realidade possível, foi desenvolvido um modelo com as mesmas dimensões do ensaio experimental feito em laboratório. O modelo ensaiado foi o da montagem MDF + Lã de Rocha + MDF, explicado na Seção 4.1. Para o teste experimental obteve-se o seguinte gráfico de resultados.

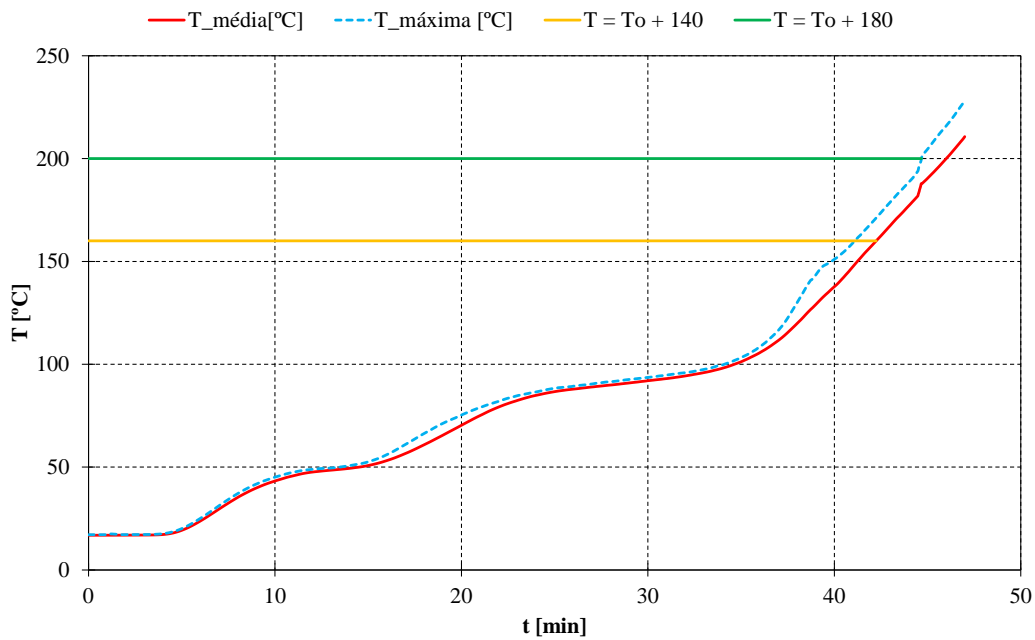


Figura 5.3: Gráfico para avaliação do teste experimental de tempo resistente do sistema multicamada MDF + Lã de Rocha + MDF, [15].

Observando o gráfico é possível avaliar alguns aspectos do teste feito no forno. Lembrando que mesmo a curva de incêndio ISO834 sendo imposta ao forno, o seu aquecimento interno não segue exatamente esse padrão, pois são os queimadores internos do forno que realizam esse aquecimento, e assim os termopares da região exposta demorem para adquirir e estabilizar os valores de temperatura.

Após aproximadamente 2 minutos do início do experimento é possível observar que acontece o primeiro aumento súbito de temperatura, indicando a inércia térmica dos queimadores do forno, o segundo aos 10 minutos indica a carbonização do painel interno e a tentativa dos executores do ensaio de manter o aumento de temperatura alinhado com a curva de incêndio padrão.

O teste foi terminado quando as chamas passaram para a superfície não exposta do modelo, isso acabou acontecendo aos 46,88 minutos para o modelo de MDF, foco desse estudo. Porém para efeito de classificação tem que ser analisado o valor médio dos valores medidos pelos termopares não podendo exceder a temperatura de 140 °C somados a temperatura ambiente  $[T_0]$  no início do experimento.



Figura 5.4: a) Carbonização completa da placa de MDF ao fim do ensaio no forno, b) Interior do forno após o ensaio.

Verifica-se que o tempo resistente do modelo de MDF, foi de 42.25 minutos, e levando em conta que o critério de temperatura média falhou primeiro. De acordo com os critérios de classificação impostos pela EN 13501-2, o sistema fica classificado como I<sub>1</sub>30, [46].

### 5.2.2. Análise numérica do ensaio experimental

O modelo numérico foi desenvolvido utilizando o software Ansys, amplamente utilizado na área de engenharia de incêndio e simulação de transferência de calor, para criação de um modelo anteriormente feito em laboratório. Para garantir a precisão de resultados o modelo foi feito com base em um experimento de incêndio conduzido em um ambiente de laboratório para estudar o comportamento da propagação de calor em um modelo multicamadas.

O modelo numérico foi construído com base nos dados experimentais e informações detalhadas sobre as propriedades do material, como condutividade térmica, capacidade térmica e densidade, [15]. O software ANSYS foi utilizado para realizar cálculos computacionais complexos, levando em consideração as equações de transferência de calor.

Para validar o modelo numérico do presente estudo, foi construído um modelo com as mesmas espessuras e especificações térmicas do ensaio experimental feito no forno, no Ansys Workbench. Essa construção serviu para avaliar a proximidade de resultado que podem ser obtidos através de um ensaio experimental e um ensaio feito por métodos computacionais.

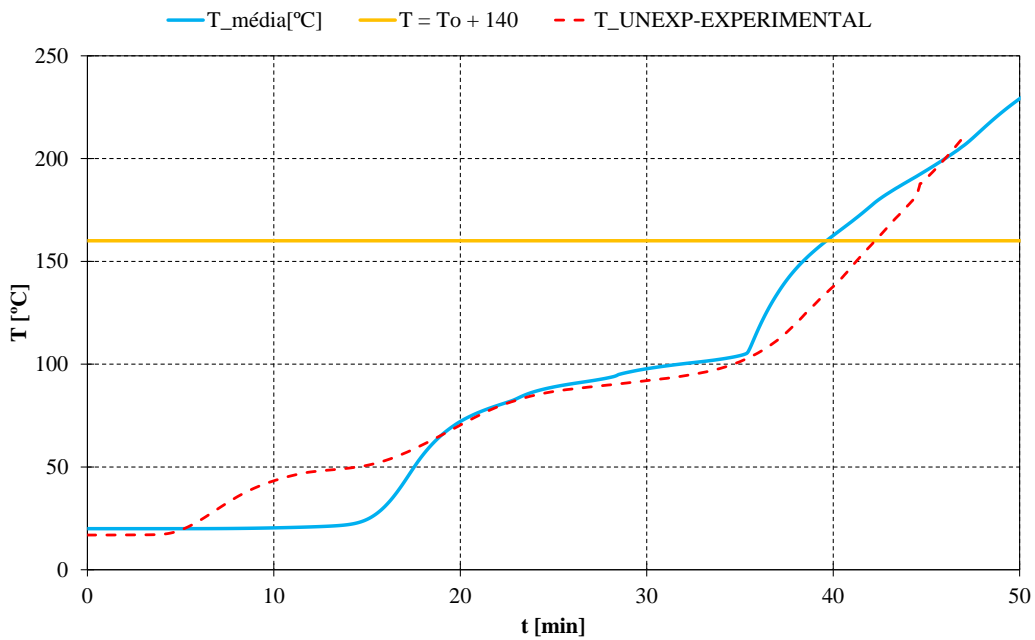


Figura 5.5: Comparação do ensaio experimental e do modelo numérico da superfície não exposta.

Pode ser observado a diferença nas curvas que representam a mesma situação de análise, sendo que a linha contínua, representa a solução numérica e a tracejada representa a solução experimental. Já de primeira é possível observar que as duas apresentam uma variação um tanto quanto diferente, pois no modelo real ensaiado, existem mais variáveis que influenciam no comportamento de aumento gradual da temperatura. Para o modelo experimental explicado na Seção 4.1, o tempo máximo resistido para a temperatura média foi de 42.25 minutos, dando uma classificação I<sub>130</sub> para o modelo.

Como o modelo numérico é feito em 2D o valor encontrado de temperatura é igual em toda a face do elemento, sendo assim, o resultado obtido é de temperatura média, o valor de um ponto médio do sistema. Para a mesma situação do ensaio desenvolvido no forno, o modelo numérico alcançou a temperatura média aos 39,73 minutos.

A variação de temperaturas finais para o modelo experimental e o modelo numérico pode ser atribuída ao fato da limitação do modelo 2D representar uma montagem tridimensional, também ao fato de que no modelo real os elementos expostos a chama sofrem um processo de carbonização e perda de material. Esses fatores não são considerados na formulação do modelo numérico, o que pode causar essas pequenas variações de resultados. Porém a aproximação do resultado numérico ao experimental com o forno foi satisfatória, assim como também alcançou a mesma classificação de resistência, I<sub>130</sub>, representando que o modelo é útil para ser feito antes de se gastar recursos financeiros para testar experimentalmente.

## 5.3. Resultados da Otimização

### 5.3.1. Ensaio de 30 minutos

Foi desenvolvido um modelo de otimização para 30 minutos, com objetivo que o sistema fosse capaz de encontrar a mínima espessura de MDF e Lã de rocha necessária para que a folha da porta suportasse uma situação de exposição ao incêndio por 30 minutos. Assim foram obtidos os seguintes resultados da evolução de temperaturas,

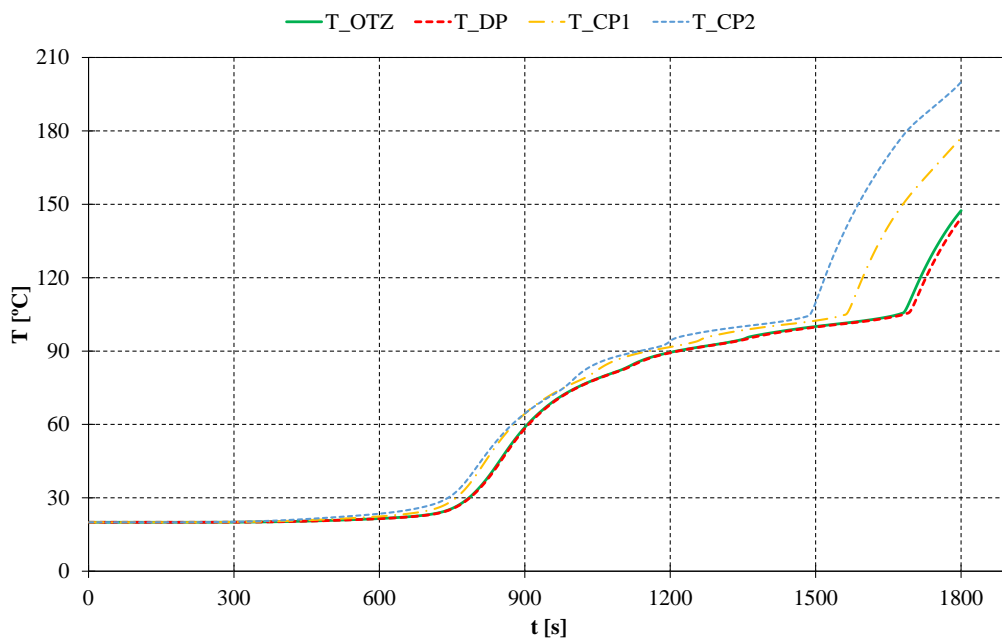


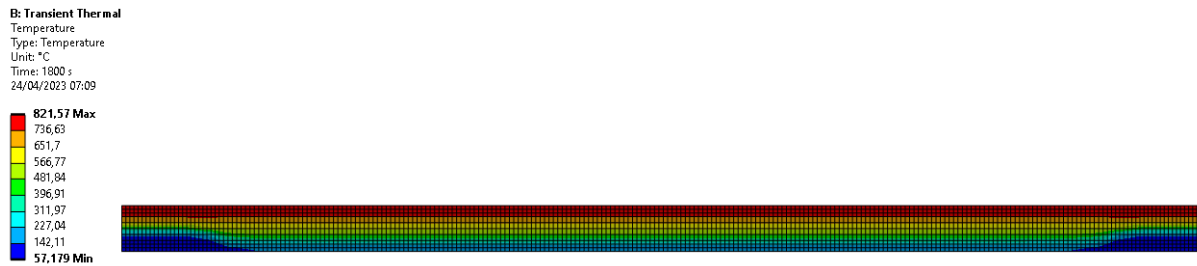
Figura 5.6: Resultados para a modelagem de 30 minutos.

Observando-se que as curvas T\_OTZ, T\_DP, T\_CP1 e T\_CP2, definem as temperaturas não expostas de otimização, do ponto de projeto gerado a partir da otimização, o ponto candidato 1 e o ponto candidato 2, respectivamente. Ademais é possível distinguir que o ponto de projeto alcançou um resultado ligeiramente inferior, ao otimizado, cumprindo sua condição de resistência pelo tempo de 30 minutos, garantindo a classificação I<sub>1</sub>30, segundo

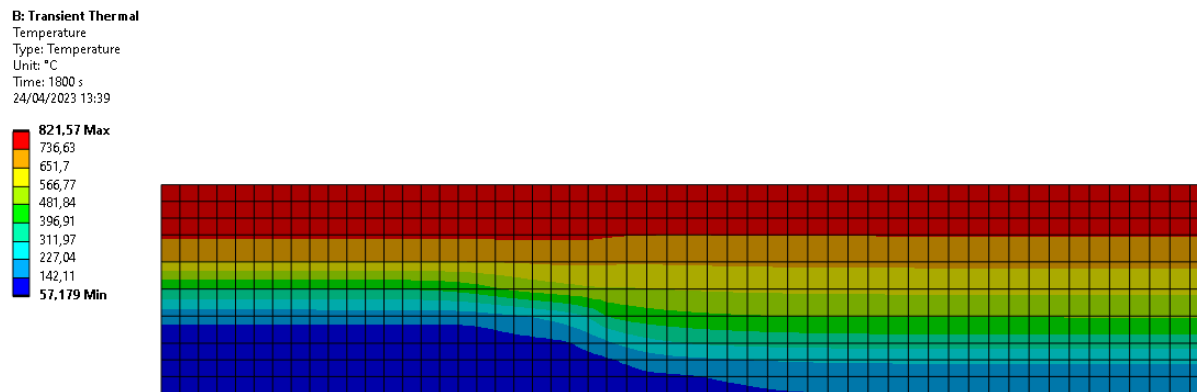
Tabela 5.2: Resultados dos ensaios criados pela otimização, e feito com medidas de espessura comercial para 30 minutos.

TAG	MDF (mm)	ISOLAMENTO (mm)	ESP_TOTAL (mm)	T_NEXP (°C)
T_OTZ	9,01	19,499	37,519	147,44
T_DP	9	20	38	144,36
T_CP1	9,12	14,9	33,14	177,05
T_CP2	9,46	10,2	29,12	199,89

Para o tempo indicado de 30 minutos, a espessura ideal encontrada pelo modelo foi de 38 mm, o que diminui em 9 mm, comparado ao modelo ensaiado no laboratório, além de uma temperatura não exposta de 144,36 °C, tendo a mesma classificação de resistência, acarretando diminuição dos custos de matéria prima e fabricação do painel multicamadas. Pelo gradiente de temperaturas também é possível ver a variação da temperatura através do sistema da porta, mostrando os vários pontos onde a temperatura é diferente, conforme Figura 5.7.



a)



b)

Figura 5.7: Gradiente de temperatura 30 minutos, a) Gradiente da folha da porta completa; b) Corte com mais zoom do elemento.

É possível observar que a temperatura na seção lateral não exposta da porta é inferior àquela observada na seção central do modelo. Esse fenômeno ocorre devido à presença de pinho maciço nessa região, que possui alta densidade e baixa condutividade térmica, dificultando a transferência de calor. No entanto, é importante salientar que essa diferença de temperatura é observada apenas em condições térmicas moderadas. Observa-se que na seção exposta da porta, a temperatura indicada é maior do que na região onde está localizada a Lã de Rocha, que apresenta temperaturas mais amenas do que a seção do pinho. Isso pode ser explicado pelo fato de que o isolamento térmico é mais eficiente em temperaturas elevadas, acima de 600 °C.

### 5.3.2. Ensaio de 60 minutos

O próximo objetivo dos testes é justamente encontrar uma espessura mínima que permita ao painel sanduiche ser capaz de suportar a 60 minutos de exposição ao incêndio, sem perder a capacidade de isolamento da superfície não exposta. Foram definidos os intervalos mínimos e máximos para os valores de espessura tanto do MDF, como Lã de rocha, assim o modelo através dos processos de otimização, chegou numa espessura que ultrapassava por pouco o critério da temperatura média, de  $140^{\circ}\text{C} + \text{temperatura ambiente}$ , como pode ser visto na curva T\_OTZ da Figura 5.8.

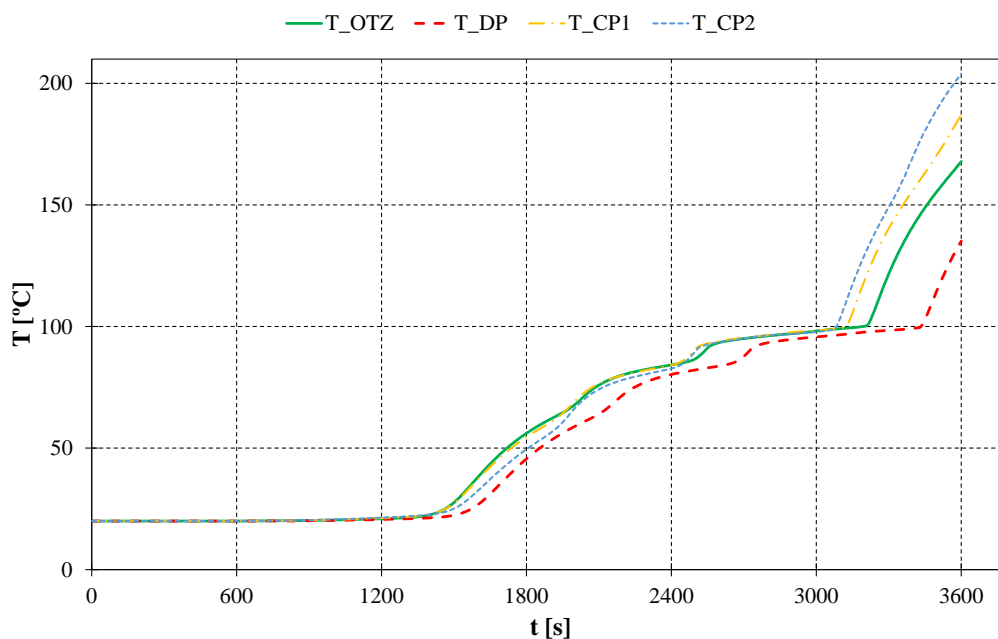


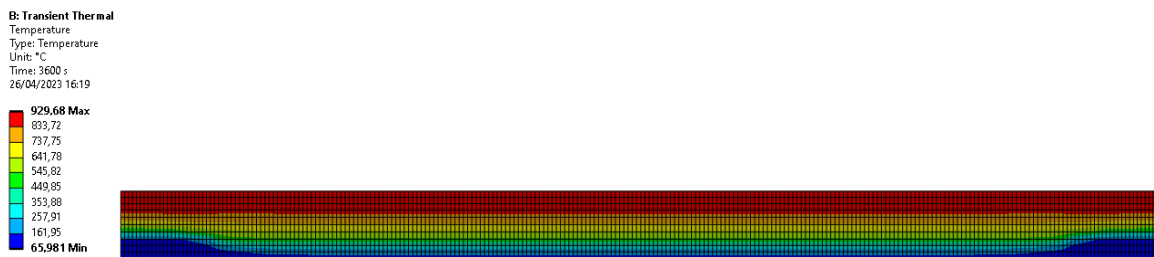
Figura 5.8: Resultados para a modelagem de 60 minutos.

No processo de otimização, o modelo é variado nos parâmetros e condições já estabelecidos, experimentando diferentes espessuras dos materiais, para que seja alcançada a o isolamento térmico pelo tempo proposto. Essas medidas encontradas pelo software via de regra, não são as medidas padrão comercializadas, e como é de interesse que esses testes tenham a possibilidade de replicação real, então foram adequadas para as medidas mais próximas dos valores encontrados na otimização, assim como pode ser visto na Tabela 5.3.

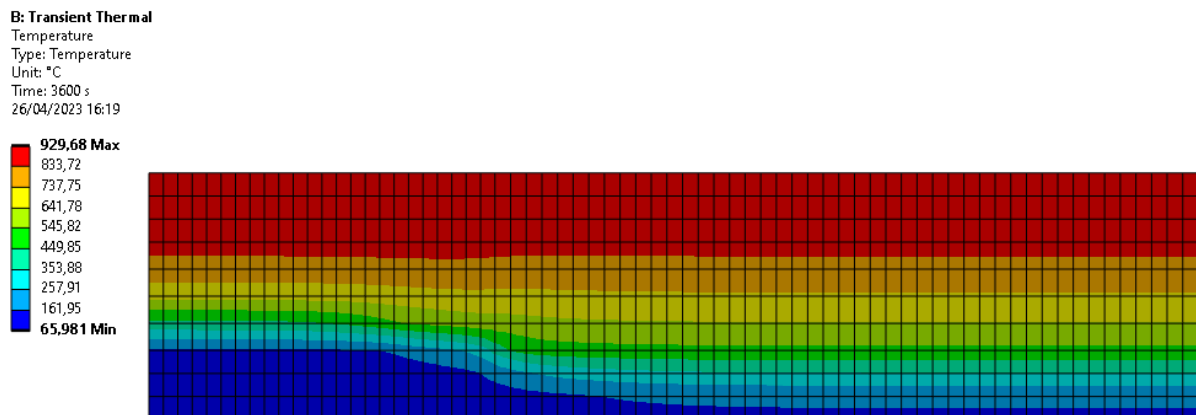
Tabela 5.3: Resultados dos ensaios criados pela otimização, e feito com medidas de espessura comercial para 60 minutos.

TAG	MDF (mm)	ISOLAMENTO (mm)	ESP_TOTAL (mm)	T_NEXP (°C)
T_OTZ	15,19	24,19	54,57	167,87
T_DP	16	25	57	135,15
T_CP1	15,6	19,99	51,19	187
T_CP2	16,25	15,29	47,79	203,96

Pode-se notar que dos valores encontrados com a otimização para aplicação com medidas comerciais os parâmetros do MDF foram acrescidos e a lã de rocha tem medidas de espessura comerciais mais intervaladas, a espessura mais próxima seria uma placa de 25 mm, isso causou um acentuado decaimento da temperatura da face não exposta. Mas também foi testado os métodos em que seria possível manter o primeiro elemento nos 15 mm e aumentar somente a espessura da lã de rocha, porém o valor de temperatura foi muito superior ao permitido para ter a classificação I<sub>1</sub>60. Por isso o que seria utilizável é o painel com placas de MDF com 16 mm e da lã de rocha com 25 mm, resultando em uma porta de 57 milímetros de espessura. O gradiente de temperaturas ao fim do teste pode ser observado a seguir na Figura 5.9.



a)



b)

Figura 5.9: Gradiente de temperatura 60 °C, a) Gradiente da folha da porta completa; b) Corte com mais zoom do elemento.

### 5.3.3. Ensaio de 90 minutos

Situações de incêndio podem durar muito tempo até que se consiga controlar e fazer o combate dessa situação, e as portas corta fogo tem uma função de extrema importância para enclausurar os ambientes de sinistro e garantir espaços por onde os ocupantes da instalação possam sair sem maiores danos a sua saúde ou vida. Por isso uma porta que resiste a 90 minutos é uma boa medida passiva de proteção. Com a otimização foi possível estipular as medidas ótimas para o tempo de ensaio, e as curvas de temperatura podem ser observadas na Figura 5.10.

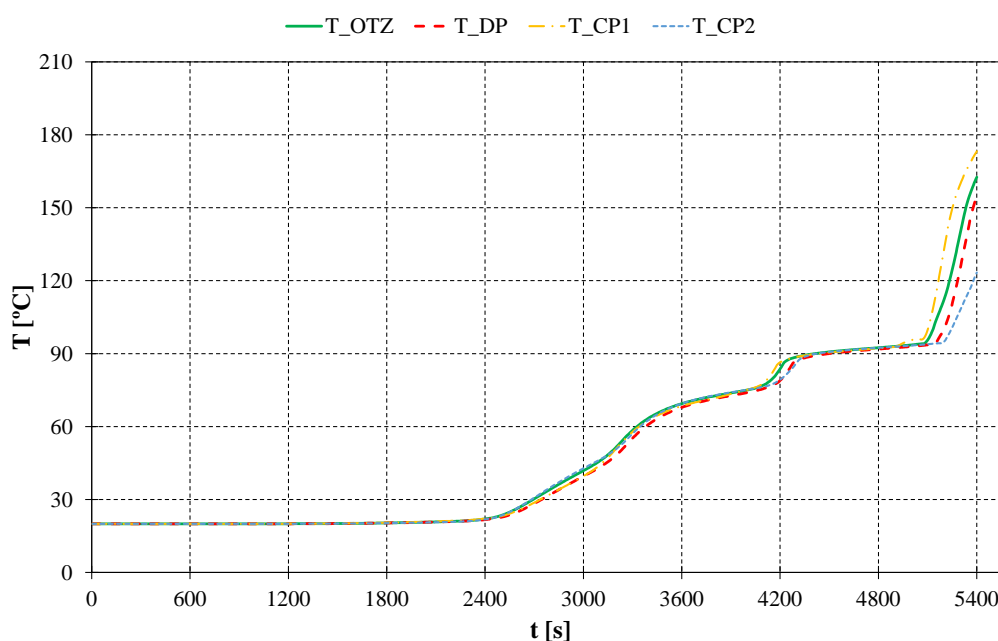


Figura 5.10: Resultados otimização de 90 minutos, com pontos do sistema de otimização.

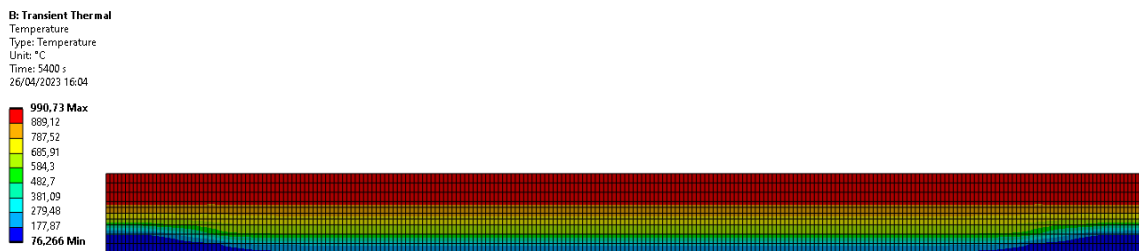
Tabela 5.4: Resultados dos ensaios criados pela otimização, e feito com medidas de espessura comercial para 90 minutos.

TAG	MDF (mm)	ISOLAMENTO (mm)	ESP_TOTAL (mm)	T_NEXP (°C)
T_OTZ	23,59	21,17	68,35	162,53
T_DP	24	20	68	154,88
T_CP1	24,25	15,59	64,09	173,2
T_CP2	23,2	25,73	72,13	123,39

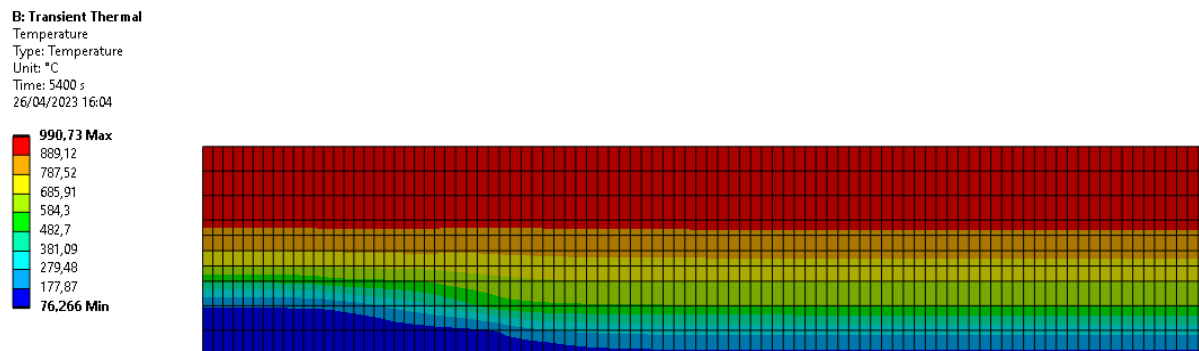
O ponto de otimização (T\_OTZ), encontrado pelo estudo, representado pela linha contínua, deu um resultado adequado ao tempo de resistência, que era aceitável por norma no processo de otimização, porém os pontos são verificados, dentro do modelo desenvolvido, pois o processo de otimização como já mencionado, parte de interpolações matemáticas. Mas mesmo o ponto

de verificação levemente acima do que era objetivo, ainda tinha o processo de adequação à valores comerciais das espessuras dos materiais.

No ponto de adequações aos valores comerciais (T\_DP), a temperatura foi perfeitamente dentro dos objetivos, resultando em numa temperatura de 154,88 °C, mostrando que as dimensões dos materiais foram suficientes e garantindo a mínima espessura necessária para esse tempo de exposição à incêndios, alcançando uma espessura mínima de 68 milímetros na folha da porta. O gradiente de temperaturas desse teste pode ser visto a seguir



a)



b)

Figura 5.11: Gradiente de temperatura do modelo de 90 minutos, a) Gradiente da folha da porta completa; b) Corte com mais zoom do elemento.

## 5.4. Resultados Bloco Porta

### 5.4.1. Análise dos resultados comparados aos modelos de otimização

O bloco porta foi desenvolvido para avaliar se a interação da folha da porta com os elementos circundantes, afetariam seu desempenho. Sendo assim todos os pontos de verificação foram

montados de acordo com os resultados obtidos nos testes de otimização, e a montagem feita conforme Seção 4.6.

A partir disso foram testados os sistemas, de 30, 60 e 90 minutos composto por todos os elementos envolventes dessas portas. Isso foi muito importante para se ter noção do que os componentes estruturais são capazes de resistir em situação de incêndio. O ponto de análise dos sistemas foi um ponto localizado exatamente no meio do modelo da folha da porta, assim como os resultados extraídos dos modelos otimizados, como é representado na Figura 5.12.

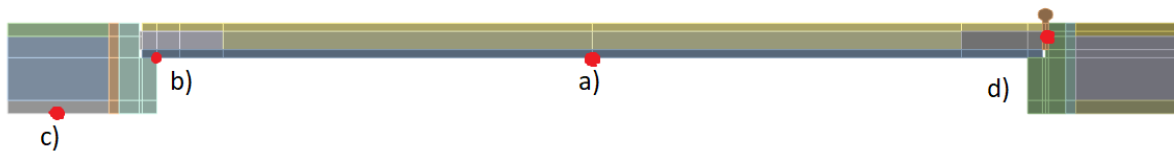


Figura 5.12: Pontos de análise de resultados do Bloco porta; a) Midpoint; b) Porta-batente; c) parede; d) dobradiça.

Foram aplicadas as mesmas condições do contorno no Bloco porta corta-fogo, assim como no modelo somente da porta, ao lado do ponto b) existe um vão em que é o espaço entre a porta e o batente em que tem a representação da fita intumescente, onde não foram aplicadas os modos de transferência de calor, já que numa situação de incêndio, essa fita se expande isolando esse vão e garantindo estabilidade a porta.

O gráfico da Figura 5.13, mostram as curvas de elevação da temperatura no bloco porta ensaiado, na seção a), que representa o meio da porta. Todas as curvas nos estudos de 30, 60 e 90 minutos respectivamente.

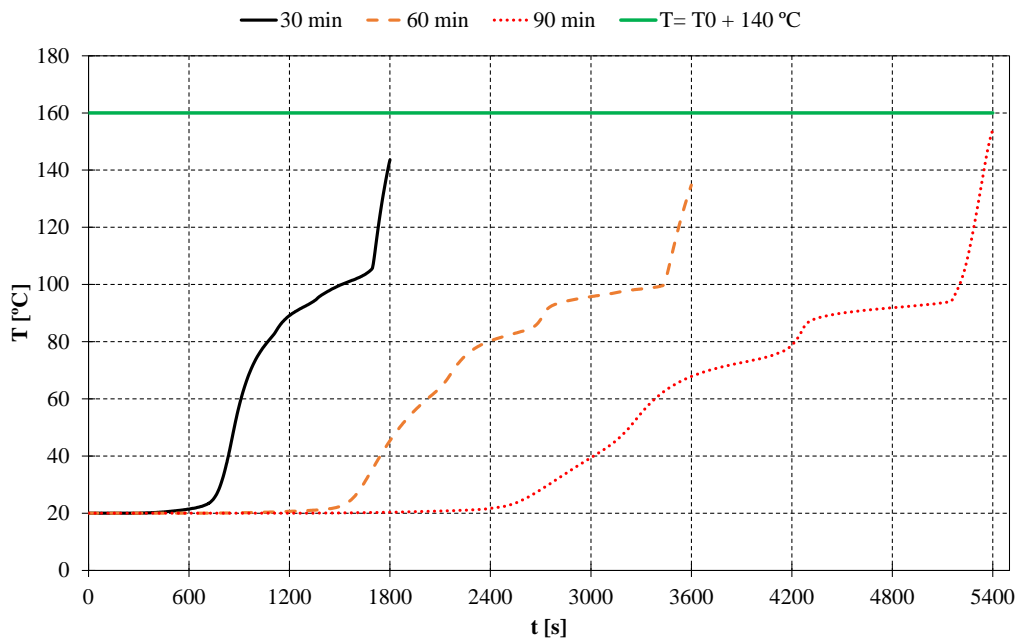


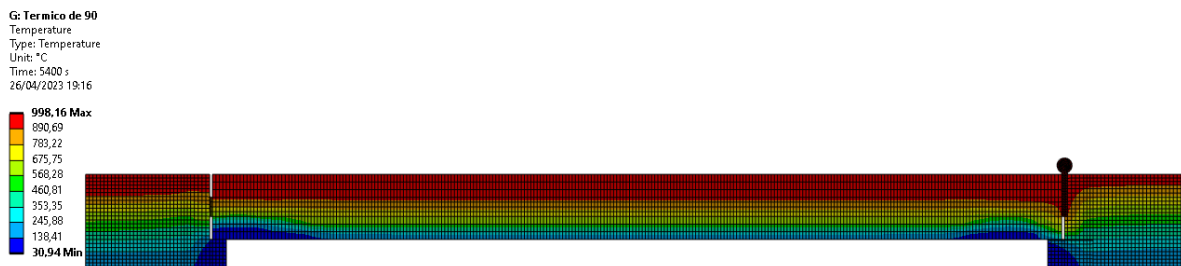
Figura 5.13: Temperaturas dos ensaios para 30, 60 e 90 minutos, com as respectivas configurações geométricas dos resultados do processo de otimização.

Foram representadas as curvas para os ensaios realizados conforme cada tempo de classificação, e os valores finais de  $T_{UNEXP}$ , foram muito próximos aos mesmos modelos criados pelo processo de otimização da folha da porta, assim como Tabela 5.5, mostra.

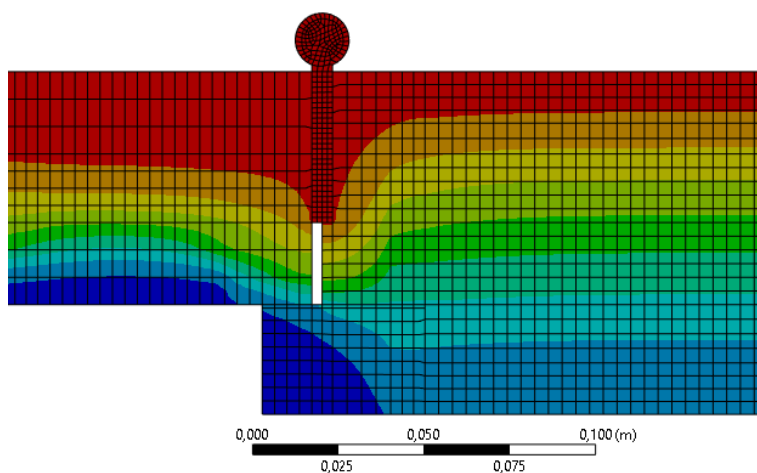
Tabela 5.5: Diferença entre os resultados do bloco porta e otimizados, para mesmos tempos resistentes.

		Tempos resistentes		
		30	60	90
$T_{UNEXP}$ (°C)	Porta otimização	144,36	135,15	154,88
	Bloco porta	143,64	134,82	154,36
	Diferença	0,72	0,33	0,52

Pode-se ver que a variação dos resultados entre o ensaio feito somente com a folha da porta e os do bloco porta, tem diferença inferior a 1 °C, o que mostra que os fatos de serem adicionados os elementos circundantes, não altera de maneira significativa o resultado de classificação. Ademais um ponto interessante a se analisar são os efeitos dos elementos ligados diretamente a porta, como a dobradiça o faz, assim como mostra



a)



b)

Figura 5.14: Gradiente de temperaturas do bloco porta, a) Bloco completo; b) Corte da conexão porta dobradiça.

É possível distinguir que em toda a folha da porta a temperatura variou de maneira uniforme, porém olhando para a região da dobradiça, podemos ver que essa teve um papel importante na transmissão de energia térmica, estando na maior faixa de temperatura do modelo. Isso ocorre, pois, a dobradiça é fabricada em aço, que tem uma alta taxa de condutividade térmica, isso acabou afetando esse lado da porta no aumento das temperaturas.

#### 5.4.2. Análise dos pontos do Bloco porta corta-fogo

Como foi mostrado na Figura 5.12, além do ponto que garante a classificação ao bloco da porta, também é interessante analisar outros pontos da construção do bloco porta. Ademais o ponto de conexão entre a porta e o batente (b), o lado oposto da parede que sustenta o sistema (c) e também a influência da dobradiça (d), para a propagação do calor pelo sistema.

#### Conexão porta e batente

Na interseção da porta e do batente no sistema bloco porta pode ser observado conforme a Figura 5.14, que a temperatura na face não exposta não atinge um valor elevado e a explicação para isso é que nessa região se encontra o montante de madeira maciça de pinho que devido a sua alta densidade dificulta um pouco mais a transmissão de calor através da folha da porta. Porém não significa que a madeira em si é melhor do que o isolante para a transferência de calor, significa somente que por estar envolta de outros materiais e também pela falta de consideração de algumas reações que ocorrem na realidade esse valor pode parecer satisfatório.

## **Parede**

A parede acaba por também passar pelo processo de aquecimento durante uma situação de incêndio, por isso é interessante analisar quais são as temperaturas que estas atingem durante esse processo. Assim sendo em cada sistema de bloco essas paredes ficaram expostas a um tempo cada vez maior de exposição, o que demonstrou temperaturas bem diferentes ao final de cada experimento.

## **Dobradiça**

A dobradiça é com clareza o objeto que mais conduziu calor em todos os modelos numéricos construídos, já que esta é fabricada em aço que é um ótimo condutor de calor por natureza, isso alterou a resposta de temperaturas nas laterais da porta, sendo que do lado em que fica a dobradiça foi muito maior a temperatura da face não exposta.

Todas as temperaturas adquiridas com as soluções dos modelos podem ser visualizadas na tabela a seguir:

*Tabela 5.6: Temperaturas dos pontos de análise do bloco porta.*

		Tempo de classificação [min]		
		30	60	90
Temperatura [°C]	Parede	38,39	101,9	186,14
	Conexão porta-batente	49,23	63,9	78,9
	Dobradiça	723,7	875,5	932,25

## 6. CONCLUSÃO

### 6.1. Conclusão

A pesquisa realizada neste trabalho permitiu avaliar a importância da madeira como um material mais sustentável na construção civil. Através da otimização realizada, foi possível identificar a capacidade da madeira em resistir ao fogo, além de sua eficiência térmica e acústica, tornando-se uma alternativa viável e mais amigável ao meio ambiente. A utilização de materiais mais sustentáveis e a adoção de práticas construtivas mais responsáveis é uma tendência crescente na indústria da construção, e a pesquisa realizada neste trabalho pode contribuir para essa tendência, fornecendo evidências para a adoção de materiais alternativos.

O ensaio de otimização realizado neste trabalho demonstrou uma grande proximidade com a realidade, conforme comparado com os resultados experimentais do modelo de calibração. Onde no modelo experimental feito no forno o sistema resistiu por 42.25 minutos, o que rendeu ao sistema uma classificação I30, ademais o modelo numérico que foi montado segundo as mesmas especificações resistiu por um tempo de 39,73 minutos, o que garante a mesma classificação de resistência. Sendo que a pequena diferença das temperaturas médias alcançadas no modelo pode ser explicada pelas limitações do modelo numérico, exemplo disso é não ser considerado o processo de carbonização.

Isso mostra que os resultados obtidos a partir da otimização são confiáveis e podem ser utilizados para orientar a adoção de práticas construtivas mais sustentáveis. A pesquisa também demonstrou que é possível alcançar resistências comparáveis aos materiais convencionais, como o aço, utilizando materiais mais sustentáveis, o que pode abrir novas oportunidades de aplicação para a madeira e outros materiais alternativos.

Nos modelos otimizados foi possível encontrar os painéis com menor espessura possível dentro das classificações e com a melhor composição de materiais. Para o caso de uma porta resistente de 30 minutos, a espessura ótima resultante da otimização foi de 38 milímetros. Isso resultando em um perfil ainda mais fino do que o do teste experimental, que tinha um perfil de 47 milímetros.

Para o tempo resistente de 60 minutos, a otimização encontrou que a melhor espessura do painel sanduiche da porta corta fogo de madeira, seria de 57 milímetros de espessura. Ademais para o ultimo tempo resistente de 90 minutos, o sistema encontrou o valor ótimo de 68 milímetros.

Por fim, a pesquisa sugere que os efeitos mecânicos de resistência dos materiais podem ser levados em consideração para tornar o modelo ainda mais realista. Essa consideração pode ser importante para fornecer uma visão mais abrangente do comportamento dos materiais e permitir a adoção de soluções construtivas ainda mais eficientes e sustentáveis. Em resumo, este trabalho contribui para a adoção de práticas construtivas mais sustentáveis, destacando a importância da madeira como um material alternativo e promovendo a responsabilidade ambiental na indústria da construção civil e dos meios de prevenção ao incêndio.

## **6.2. Trabalhos futuros**

O estudo do comportamento de materiais em situação de incêndio vem sendo cada vez mais solicitado para diminuir os riscos de sinistro, assim como a preocupação em usar materiais que sejam menos agressivos ao meio ambiente e ecologicamente melhores. Sendo assim com o intuito de dar continuidade a este estudo, alguns pontos podem ser investigados, como: fazer uma análise dos materiais, considerando suas propriedades mecânicas, já que nas simulações não são consideradas as condições físicas dos materiais, como dilatação e retração; aumentar o número de ensaios numéricos para cada tipo de exposição, assim como variar os tipos de isolantes e derivados de madeira; fazer um estudo experimental dos modelos desenvolvidos numericamente para fim de comprovação dos modelos desenvolvidos. Desenvolver um estudo

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] FLORES, Bráulio Cançado; ORNELAS, Éliton Ataíde; DIAS, Leônidas Eduardo. “Fundamentos de Combate a Incêndio – Manual de Bombeiros. Corpo de Bombeiros Militar do Estado de Goiás.” Goiânia-GO, 1ªed: 2016, 150p.
- [2] ALBUQUERQUE, G. B. DE M. L. DE. “Dimensionamento de vigas de concreto armado em situação de incêndio.” [s.l.] Universidade de Sao Paulo, Agencia USP de Gestao da Informacao Academica (AGUIA), 2012.
- [3] C. Neves Costa and V. P. Silva, “A importância da compartimentação e suas implicações no dimensionamento das estruturas de concreto para situação de incêndio.” 2005. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/340682308>
- [4] REIS, A. “Determinação de cenários de incêndio.” [s.l.] Universidade de Aveiro, 2011.
- [5] C. Neves, V. Pignatta, and E. Civil, “Revisão histórica das curvas padronizadas de incêndio.”
- [6] International Organization for Standardization, “ISO 834-1: Fire-resistance tests — Elements of building construction — Part 1: General requirements,” 1999.
- [7] T. WARD, P. GREIGGER, R. MATHESON, and B.-E. ALVEBERG, “Epoxy Intumescent Coatings Current Philosophy,” *Protective Coatings Europe – PCE Magazine*, Pittsburgh, 1996.
- [8] J. MARCATTI, H. FILHO, and J. FILHO, “Compartimentação e afastamento entre edificações,” in *Segurança contra incêndio no Brasil*, 2008.
- [9] C. Neves Costa and V. P. Silva, “Dimensionamento de estruturas de concreto armado em situação de incêndio. Métodos tabulares apresentados em normas internacionais.” 2003. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/340682861>
- [10] Rosso T, “Incêndios e Arquitetura.” 1975.

- [11] T. e C. Ministérios da Administração Interna e das Obras Públicas, “*Decreto-Lei n.º 64/90*. 1990.” Accessed: Aug. 25, 2022. [Online]. Available: <https://dre.pt/dre/detalhe/decreto-lei/64-1990-332912>
- [12] A. THIAGO, “Compartimentação de edifícios para segurança contra incêndio.” 2018.
- [13] A. Tiago, “Estudo da inflamabilidade de diversos tipos de madeiras e de cortiça usados na estrutura e na envolvente de edifícios.” Coimbra, 2015.
- [14] CEN, “EN 13501-1: British Standards Institution, Fire classification of construction products and building elements. Part 1: Classification using data from reaction to fire tests.” 2007.
- [15] M. E. Dagort, “Desenvolvimento de um sistema multicamada de madeira e derivados de madeira resistente ao fogo,” Bragança, 2022.
- [16] K. Markesinis and I. Katsampas, “Innovative and competitive chemical technology for production of fire retardant wood based panels.”
- [17] Peter Benhauer, *Atlas de detalhes construtivos - Construção Nova*, Julia Albani., vol. 1. Barcelona, 2012.
- [18] SCIE, “Regulamento Técnico de Segurança contra Incêndio em Edifícios - SCIE,” Mar. 10, 2008.
- [19] C. Roberto, “Uso da madeira na construção civil,” 2017.
- [20] F. Maria, G. Ramalho, P. Ricardo, and G. Hein, “Análise termogravimétrica de madeira de plantios consorciados e puros visando produção de carvão vegetal.” [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/282219708>
- [21] M. Amaro and F. Rocha, “Determinação experimental de propriedades de combustão de madeiras maciças brasileiras.”
- [22] V. Babrauskas and R. Peacock, “Heat Release Rate: The Single most important Variable in Fire Hazard”. 1992
- [23] Frank P, “Fundamentos de transferência de calor e de massa,” Incropera.

- [24] R. H. White, “Wood Handbook, Chapter 18: Fire Safety of Wood Construction,” 2010. [Online]. Available: [www.fire.ca.gov](http://www.fire.ca.gov)
- [25] T. H. Milhan, “Estudo numérico em vigas de madeira submetidas a altas temperaturas,” Instituto Politécnico de Bragança, Bragança , 2020.
- [26] Çengel Yunus A. and Afshin Ghajar J., “Heat and mass transfer”.
- [27] CEN, “EN 1991-1-2 - Eurocode 1 Actions on structures - Part 1-2 General actions - Actions on structures exposed to fire.”
- [28] Escola Superior de Tecnologia e Gestão, “Transferência de calor por convecção natural e forçada à volta de cilindros metálicos TP4,” 2009.
- [29] M. Jesus, “Análise da transferência de calor por radiação em combustor de turbina turbo-fan pelo método lbl.”
- [30] H. M. I. Sacht; Rossignolo, J. A. Ii; Santos, and W. N. Iii, “Avaliação da condutividade térmica de concretos leves com argila expandida,” no. 1, pp. 31–039, 2010, [Online]. Available: <http://www.materia.coppe.ufrj.br/sarra/artigos/artigo11099AutorResponsável:HelenceMariaSachtDatadeenvio:30/05/08Datadeaceite:08/03/10>
- [31] Alberto Ricardo Prass, “Constantes Físicas /Condutividade Térmica.” [https://www.fisica.net/constantas/conductividade-termica-\(k\).php](https://www.fisica.net/constantas/conductividade-termica-(k).php) (accessed Jan. 25, 2023).
- [32] Y C Wang and IAN BURGESS, “Performance-based fire engineering of structures”.
- [33] Moreschi João, “Propriedades da madeira”.
- [34] FRANCISCA VILAS LAGES ANHAS, “Emissividade de materiais de construção.” [Online]. Available: <http://www.fe.up.pt>
- [35] CEN, “prEN 1995-1-2:2020, Eurocode 5: design of timber structures - Part 1-2: General Structural fire design - 2020.”
- [36] CEN, “EN 1995-1-2:2004 Eurocode 5: Design of timber structures - Part 1-2: General - Structural fire design.”

- [37] CEN, “EN 1992-1-2: Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design,” 1992.
- [38] CEN, *EN 1993-1-2: Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design*. 1993.
- [39] CEN, “EN 1996-1-2: Eurocode 6: Design of masonry structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design,” 1996.
- [40] J. Araújo and B. Júnior, “Avaliação não destrutiva da capacidade resistente de estruturas de madeira de edifícios antigos,” 2006.
- [41] Sonae P, “Aglomerado de fibras de média densidade.” [Online]. Available: [www.sonaearauco.com](http://www.sonaearauco.com)
- [42] Rocterm, “Catálogo de Lã de Rocha.”
- [43] M. Fernando Paulo Pereira Orientador and D. J. Barroso Aguiar, “Anomalias em paredes de alvenaria sem função estrutural,” 2005.
- [44] CEN, “EN 1366-4 - Fire resistance tests for service installations - Part 4: Linear joint seals,” Belgium , 2015.
- [45] CEN, *EN 1363-1 - Fire resistance tests - Part 1: General requirements Essais*. 2004, pp. 18–22.
- [46] *Fire classification of construction products and building elements-Part 2: Classification using data from fire resistance tests, excluding ventilation services*. 2007.