



# **AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA TÉRMICA DAS PLACAS DE SILICATO DE CÁLCIO A TEMPERATURAS ELEVADAS**

**Marcos César Ulbinski Novais de Oliveira**

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em:

**Engenharia Industrial**

Ramo Engenharia Mecânica

**Fevereiro de 2021**



# **AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA TÉRMICA DAS PLACAS DE SILICATO DE CÁLCIO A TEMPERATURAS ELEVADAS**

**Marcos César Ulbinski Novais de Oliveira**

Dissertação apresentada à  
**Escola Superior de Tecnologia e Gestão**  
**Instituto Politécnico de Bragança**

Para a obtenção do grau de Mestre em  
**Engenharia Industrial**  
Área de Especialização de Engenharia Mecânica  
No âmbito da Dupla Diplomação com a  
**Universidade Tecnológica Federal do Paraná**

Orientador (IPB):  
**Prof. Dr. Luís Manuel Ribeiro de Mesquita**

Coorientador (UTFPR):  
**Prof Dr. Thiago Antonini Alves**

**Fevereiro de 2021**

*Ao meu Pai Marcos e minha mãe Margarida,  
pelo grande amor e apoio sem tamanho.*

# Agradecimentos

Eu gostaria de agradecer primeiramente à minha mãe, Margarida Ulbinski, por ter sido sempre uma mulher guerreira, batalhadora e que se mantém firme, independente das adversidades e agradeço por ter me apoiado e se preocupado enormemente com este novo desafio em minha vida, o qual foi ter a oportunidade de estudar fora do país. Agradeço também ao meu pai, por ser uma pessoa que sempre consegue transmitir palavras de apoio e tranquilidade, mesmo nos dias mais desafiadores e por fim todos os meus familiares que sempre acreditaram em mim.

Agradeço ao meu orientador, Professor Doutor Luís Mesquita, por todos os ensinamentos transmitidos neste último ano, por sempre ser paciente para passar seu conhecimento para os alunos e por me ajudar a concluir esta fase tão importante da minha vida, um mestrado em Portugal. Ao meu coorientador, professor Doutor Thiago Antonini Alves, por ter me orientado tanto durante o mestrado quanto como professor da UTFPR-Ponta Grossa durante a minha graduação em Engenharia Mecânica.

Agradeço de coração também à Vitória Ceccato, por todo o apoio, carinho, dedicação e conselhos durante esta época, você foi fundamental para mim neste momento da minha vida e por isso serei eternamente grato. Ao meu colega de curso, amigo e posteriormente “irmão” Pedro Chebensi Junior, por ser uma pessoa muito presente, parceira e sempre disposto a ouvir e aconselhar sobre muitos momentos da minha vida, aprendi muito com você e quero que nossa amizade continue e seja de longa data.

Por último, gostaria de agradecer todos os meus colegas, amigos e professores que estiveram presentes em minha graduação no Brasil, sem a ajuda de cada um de vocês, eu não teria realizado esta tese de mestrado em Portugal.

## Resumo

Para a proteção de casas, prédios e estruturas metálicas, existem tanto proteções passivas (utilização de selantes para vedações, materiais retardantes de chamas, etc), quanto proteções ativas (Sprinklers, hidrantes e extintores). O foco deste trabalho é abordar as características térmicas dos materiais de proteção a incêndio e caracterizar as propriedades térmicas das placas de Silicato de Cálcio, material muito importante no papel em retardar a propagação de chamas e calor em construções.

Para isso, foram feitos estudos para entender quais são as principais variáveis que afetam a condução de calor no material e sua respectiva condutividade térmica efetiva. Para entender estes fenômenos, foi realizado o ensaio de secagem, conforme a ASTM C1498-01, para identificar o percentual de teor de água presente no material. Essa característica é importante, pois após o aquecimento do material, este tende a evaporar a água livre dentro do material e dar origem a porosidades, as quais vão afetar diretamente a condutividade térmica efetiva do material. Além disso, foi utilizado de um artigo de referência para determinar as demais reações que ocorrem com a elevação da temperatura no material, todas elas influenciando na porosidade e na liberação (ou absorção) de calor pela devida reação.

Foi realizado também o ensaio no calorímetro de cone, justamente para simular uma situação de incêndio, sendo este ensaio baseado na ISO 5660. Com isso, é possível obter principalmente o campo de temperaturas dentro do material (posicionando termopares em pontos estratégicos) e a perda de massa total. Levando em consideração a variação de massa específica, calor específico a pressão constante, condutividade térmica efetiva e porosidade, em função da temperatura e do tempo, pode-se então desenvolver um modelo numérico para o problema de condução de calor para finalmente obter-se as curvas de temperatura semelhantes as obtidas no método experimental.

Esse ajuste das curvas entre experimental e numérica foi realizada graças a utilização do algoritmo modificado de Levenberg-Marquadt, onde foi utilizado como variável de otimização a condutividade térmica do sólido, para conseqüentemente obter a condutividade térmica real do nosso estudo. A solução numérica, como será apresentado neste trabalho, apresentou resultados satisfatórios e com esse estudo como base, podemos utilizar das ideias de trabalhos futuros para refiná-lo e posteriormente aplicar para outros materiais de proteção a incêndio.

*Palavras Chave: Materiais de proteção ao fogo; Condutividade térmica; Calorímetro de Cone; reação ao fogo; Silicato de Cálcio, Incêndio.*

## **Abstract**

For the protection of houses, buildings and metallic structures, there are both passive protections (fences, flame retardant materials, etc), as well as active protections (Sprinklers, hydrants and extinguishers). The focus of this work is to address the thermal characteristics of fire protection materials and after that, characterize the thermal properties of Calcium Silicate plates, which is a very important material in retarding the spread of flames and heat in buildings.

Studies were made to understand the main variables that affect the heat conduction in the material and hits effective thermal conductivity. In order to understand these phenomena, the drying tests were carrying out, according to ASTM C1498-01, to identify the percentage of water content present in the material. This characteristic is important, because after heating the material, it tends to evaporate the free water inside the material and start to produce porosities, which will directly affect the effective thermal conductivity of the material. In addition, a reference article was used to determine the other reactions that occur with the elevation of the temperature in the material, all of them influencing the porosity and the release (or absorption) of heat by the due reaction.

The cone calorimeter test was also carried out, to simulate a fire situation based on ISO 5660. After doing this test, it was possible to obtain mainly the temperature field inside the material (placing thermocouples at discrete points) and the total mass loss. Taking into account the variation in specific mass, specific heat at constant pressure, effective thermal conductivity and porosity, as a function of temperature and time, a numerical model for the heat conduction problem could be developed to obtain temperature fields similar to those obtained in the experimental method.

The adjustment of the curves between experimental and numerical results were performed with the modified Levenberg-Marquadt optimization algorithm. The thermal conductivity of the solid was used as an optimization variable, in order to obtain the material effective thermal conductivity. Our numerical solution, as it will be presented in this work, presented satisfactory results and can be applied for other fire protection materials.

*Keywords: Fire Safety materials; Thermal Conductivity; Calorimeter Cone Test; reaction to fire; Calcium Silicate, fire;*

# Índice

---

<b>AGRADECIMENTOS .....</b>	<b>IV</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>V</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>VII</b>
<b>ÍNDICE.....</b>	<b>VIII</b>
<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>XI</b>
<b>LISTA DE TABELAS .....</b>	<b>XIV</b>
<b>NOMENCLATURA .....</b>	<b>1</b>
<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>4</b>
1.1. CONTEXTO E MOTIVAÇÃO .....	4
1.2. OBJETIVOS DA INVESTIGAÇÃO .....	6
1.3. ORGANIZAÇÃO DA TESE .....	7
<b>2. ESTADO DA ARTE .....</b>	<b>9</b>
2.1. INTRODUÇÃO.....	9
2.2. PROTEÇÃO AO INCÊNDIO .....	11
2.2.1. <i>Proteção ativa – PACI</i> .....	11
2.2.2. <i>Proteção passiva – PPCI</i> .....	12
2.3. MATERIAIS DE PROTEÇÃO PASSIVA .....	15
2.3.1. <i>Tintas e revestimentos intumescentes</i> .....	15
2.3.2. <i>Argamassas projetáveis</i> .....	17
2.3.3. <i>Tipo Placa</i> .....	19
2.4. MÉTODO DE PRODUÇÃO, CONSTITUIÇÃO E CLASSIFICAÇÕES DAS PLACAS DE SILICATO DE CÁLCIO .....	20
2.5. PROPRIEDADES TÉRMICAS DAS PLACAS DE SILICATO DE CÁLCIO .....	23
2.5.1. <i>Condutividade térmica</i> .....	23
2.5.1.2 <i>Influência da massa específica das placas de silicato de cálcio na condutividade térmica</i> .....	28
2.6. SILICATO DE CÁLCIO APLICADO A PROTEÇÃO AO FOGO .....	30
2.7. MODELOS NUMÉRICOS PARA DETERMINAÇÃO DA EVOLUÇÃO DA TEMPERATURAS UTILIZANDO O MÉTODO DE DIFERENÇAS FINITAS .....	33

2.8. ANÁLISE INVERSA DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR NA DETERMINAÇÃO DE PROPRIEDADES DE PROBLEMAS TÉRMICOS .....	34
<b>3. CARATERIZAÇÃO DO TEOR DE ÁGUA E DA REAÇÃO AO FOGO.....</b>	<b>37</b>
3.1. ANÁLISE DA PERDA DE MASSA DO MATERIAL .....	37
3.1.1. <i>Introdução</i> .....	37
3.1.2. <i>Determinação do teor de água conforme a ASTM C 1498-01</i> .....	40
3.1.3. <i>Análise da influência das reações térmicas na perda de massa</i> .....	46
3.2. REAÇÃO AO FOGO DOS MATERIAIS.....	49
3.2.1. <i>Introdução</i> .....	49
3.2.2. <i>Conceitos fundamentais</i> .....	49
3.2.3. <i>Classificação normativa</i> .....	53
3.3. ENSAIO REALIZADO NO CALORÍMETRO DE CONE.....	55
3.3.1. <i>Metodologia do ensaio</i> .....	55
3.3.2. <i>Calibração básica do calorímetro de cone</i> .....	56
3.3.3. <i>Parâmetros de entrada e cuidados com a amostra</i> .....	57
3.3.4. <i>Resultados Experimentais</i> .....	59
<b>4. MODELO NUMÉRICO DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR PELO MÉTODO DAS DIFERENÇAS FINITAS .....</b>	<b>63</b>
4.1. INTRODUÇÃO AO MODELO DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR E MASSA .....	63
4.2. MÉTODO ANALÍTICO PARA PERDA DE MASSA.....	67
4.3. CÁLCULO DA POROSIDADE DE UM MATERIAL .....	72
4.4. MÉTODO DAS DIFERENÇAS FINITAS .....	72
4.4.1. <i>Método Explícito</i> .....	75
4.4.2. <i>Método Implícito</i> .....	77
4.4.3. <i>Método Combinado</i> .....	78
4.5. SOLUÇÃO NUMÉRICA DO MÉTODO DAS DIFERENÇAS FINITAS UTILIZANDO-SE DO MÉTODO IMPLÍCITO 78	
4.5.1. <i>Modelo de condutividade térmica efetiva do material</i> .....	85
4.6. VALIDAÇÃO DA SOLUÇÃO NUMÉRICA – MÉTODO IMPLÍCITO X SOLUÇÃO ANALÍTICA .....	87
4.6.1. <i>Caso 1 – Placa com fluxo de calor constante e lado adiabático</i> .....	87
4.6.2. <i>Caso 2 – Placa com geração de calor interna e fronteiras adiabáticas</i> .....	90
4.7. IMPLEMENTAÇÃO DO ALGORITMO DE LEVENBERG-MAQUARDT – ANÁLISE INVERSA DO PROBLEMA DE CONDUÇÃO DE CALOR.....	93
4.8. RESULTADOS OBTIDOS E DISCUSSÕES .....	97
4.8.1. <i>Aplicação do método direto com a condutividade térmica do fabricante</i> .....	97
4.8.2. <i>Análise inversa de transferência de calor com um sensor e utilizando o Método de Levenberg-Marquadt.</i> .....	99
4.8.3. <i>Análise inversa de transferência de calor com três sensores e utilizando o Método de Levenberg-Marquadt</i> .....	107

4.9.	CONCLUSÕES .....	111
<b>5.</b>	<b>CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>112</b>
5.1.	CONCLUSÕES GERAIS .....	112
5.2.	LINHAS FUTURAS DE INVESTIGAÇÃO .....	113
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>115</b>

## Lista de figuras

---

Figura 1 – Incêndio no Museu Nacional do Rio de Janeiro,[2].....	5
Figura 2 - Sistemas de proteção ativa contra incêndio, [9]. .....	12
Figura 3 – Vedação de dutos e tubulações entre andares,[10].....	12
Figura 4 - Corte transversal de um material revestido por tinta intumescente,[13]. .....	15
Figura 5 - Teste da argamassa utilizando tocha de corte a gás,[17]. .....	17
Figura 6 - Calandra cilíndrica e autoclave respectivamente,[25].....	21
Figura 7 – Diagrama de fases do sistema CaO-SiO <sub>2</sub> ,[23].....	21
Figura 8 – Análise da porosidade de uma placa de silicato de cálcio hidratada após exposição a 1000°C,[34].....	26
Figura 9 – Influência da massa específica na condutividade térmica das placas de silicato de cálcio, [39]. .....	28
Figura 10 – Condutividade térmica calculado x Condutividade térmica da literatura, [39]. .....	29
Figura 11 – Condutividade térmica de alguns materiais utilizados para proteção,[28]. .....	31
Figura 12 - Vigas protegida por placas de Silicato de Cálcio,[41].....	32
Figura 13 - Campo de temperaturas do silicato de cálcio exposto a altas temperaturas,[41]. .....	32
Figura 14 – Amostra em análise,[42]. .....	33
Figura 15 – Resultados obtidos por diferenças finitas, elementos finitos e MVF,[42]. .....	34
Figura 16 – Fluxograma representativo da análise inversa de transferência de calor,[44]. .....	35
Figura 17– Surgimento de poros pela evaporação da água, imagem ilustrativa,[45].....	38
Figura 18 – Comportamento do material exposto a um processo de secagem, [46]. .....	39
Figura 19 – Amostras de Promatect-H e Promatect-200.....	41
Figura 20 – Amostras colocadas ao forno e forno utilizado para os testes a 105°C .....	43

Figura 21 – Dessecador de vidro utilizado.....	43
Figura 22 - Gráficos representativos da liberação de calor em função do tempo,[55]. .....	51
Figura 23 - Principais componentes de um calorímetro de cone e painel eletrônico de controle.....	56
Figura 24 – Calibração do fluxo de calor na amostra .....	57
Figura 25 - Vista superior da amostra, face exposta (em branco) e face coberta (em preto). .....	58
Figura 26 - Vista lateral da amostra. ....	58
Figura 27 – Massa da amostra em função do tempo. ....	60
Figura 28 – Massa da amostra, em percentual, em função do tempo. ....	60
Figura 29 – Campo de temperaturas em função do tempo.....	61
Figura 30 – Alpha para cada reação por temperatura para Promatect-H .....	69
Figura 31 - Velocidade das reações por temperatura para Promatect-H.....	70
Figura 32 - Perfil da perda de massa total por temperatura para Promatect-H .....	70
Figura 33 – Passo a passo do método de diferenças finitas, [67].....	73
Figura 34 – Representação da malha e nós, método explícito. ....	76
Figura 35 - Representação da malha e nós, método implícito. ....	77
Figura 36 – Balanço de massa em um volume de controle.....	81
Figura 37 – Representação dos fenômenos térmicos em um calorímetro de cone, Adaptado, [69].....	83
Figura 38 – Representação esquemática do caso em análise,[71].....	87
Figura 39 – Comparação entre campo de temperaturas numérica e analítica – Caso 1.....	89
Figura 40 – Geração de calor interna e superfícies adiabáticas,[72].....	90
Figura 41 – Comparação entre campo de temperaturas numérica e analítica.....	92
Figura 42 – Fluxograma do modelo numérico proposto,[16]. ....	94
Figura 43 – Representação dos sensores ao longo da espessura do material,[16]. ....	94
Figura 44 - Campo de temperaturas para a condutividade térmica fornecida pelo fabricante.....	97

Figura 45 – Campo de temperaturas para a condutividade térmica otimizada do sensor 1. .....	100
Figura 46 – Condutividade térmica efetiva em função da temperatura.....	101
Figura 47 – Porosidade em função da temperatura. ....	101
Figura 48 – Perda de massa numérica e experimental em função do tempo.....	101
Figura 49 - Campo de temperaturas para a condutividade térmica otimizada do sensor 2. .....	103
Figura 50 - Condutividade térmica efetiva em função da temperatura. ....	103
Figura 51 - Porosidade em função da temperatura. ....	104
Figura 52 - Perda de massa (%) numérica e experimental em função do tempo. ....	104
Figura 53 - Campo de temperaturas para a condutividade térmica otimizada do sensor 3. .....	105
Figura 54 – Condutividade térmica efetiva em função da temperatura.....	106
Figura 55 - Porosidade em função da temperatura. ....	106
Figura 56 - Perda de massa (%) numérica e experimental em função do tempo. ....	106
Figura 57 – Temperatura numérica e experimental em função do tempo. ....	107
Figura 58- Condutividade Térmica Efetiva em função da temperatura. ....	109
Figura 59 – Porosidade em função da temperatura. ....	109
Figura 60 - Perda de massa (%) numérica e experimental em função do tempo. ....	110

## Lista de tabelas

---

Tabela 1 – Dados de perdas diretas e mortes em decorrência a incêndios,[4] .....	6
Tabela 2 - Fatores de redução para aço carbono em altas temperaturas,[7].....	10
Tabela 3 - Tempos requeridos de tempo de resistência ao fogo, em minutos,[8].....	13
Tabela 4 - Classificação das edificações quanto à sua operação,[8].....	14
Tabela 5 -Temperatura média da placa e da intumescência e espessuras ao longo do tempo para diferentes espessuras e fluxos de calor iniciais,[13].....	16
Tabela 6 – Argamassas comerciais e suas respectivas composições químicas,[18].....	18
Tabela 7 – Exigências internacionais para padronização das argamassas comerciais,[19]. .....	18
Tabela 8 - Composição das placas de Silicato de Cálcio conforme patente americana,[24].....	20
Tabela 9 – Variação de entalpia e massa para as placas de Silicato de Cálcio,[5]. .....	26
Tabela 10– Propriedades das placas Promatect-H e Promatect-200, [29]. .....	29
Tabela 11 – Massa das amostras antes do teste de secagem. ....	42
Tabela 12 – Massa das amostras antes e após teste de secagem. ....	45
Tabela 13 – Teor de água das placas de silicato de cálcio Promatect-H e Promatect-200 .	45
Tabela 14 – Comparação entre teor de água médio obtido nesta tese e obtido por Abdelkader. ....	46
Tabela 15 – Perda de massa real das placas Promatect-H.....	48
Tabela 16- Perda de massa real das placas Promatect-200 .....	48
Tabela 17 – Dados obtidos do ensaio de calorímetro de cone. ....	59
Tabela 18 – Valores de energia de ativação, fator pré-exponencial e constante dos gases. .....	71
Tabela 19 – Entalpia de reação das placas de Silicato de Cálcio, [5]. .....	82

Tabela 20 – Maior erro relativo entre solução numérica e solução analítica – Caso 1. ....	89
Tabela 21 - Maior erro relativo entre solução numérica e solução analítica – Caso 2.....	92
Tabela 22 - Erro relativo para condutividade do fabricante no sensor 1 .....	98
Tabela 23 - Erro relativo para condutividade do fabricante no sensor 2.....	98
Tabela 24 - Erro relativo para condutividade do fabricante no sensor 3.....	98
Tabela 25 – Condutividade térmica do sólido otimizado para cada sensor e fornecido pelo fabricante. ....	99
Tabela 26 - Resultado numérico e experimental para o Sensor 1 a 18mm da base.....	108
Tabela 27 - Resultado numérico e experimental para o Sensor 2 a 15mm da base.....	108
Tabela 28 – Resultado numérico e experimental para o Sensor 3 a 5mm da base.....	108



# Nomenclatura

---

## Letras maiúsculas do alfabeto Latino

$A$	Fator pré-exponencial ligado à característica do material analisado
$E$	Energia de ativação da reação
$U$	Teor de água presente na amostra
$K$	Condutividade Térmica
$I$	Irradiância
$R$	Constante universal dos gases
$T$	Temperatura
$T_{\infty}$	Temperatura ambiente

## Letras minúsculas do alfabeto latino

$m_0$	Massa inicial da amostra
$m_f$	Massa final da amostra
$t$	Tempo de exposição do material;
$q$	Fluxo de calor

## Letras maiúsculas do alfabeto grego

## Letras minúsculas do alfabeto grego

$\zeta$	Porosidade
$\Theta$	Grau de implicitação

$\sigma$	Coeficiente de Stefan-Boltzmann
$\phi$	Fator de massividade
$\rho$	Massa específica
$\varepsilon$	Emissividade do material

### **Siglas**

<i>ASTM</i>	American Society for Testing and Materials
<i>APSEI</i>	Associação Portuguesa de Segurança
<i>CO</i>	Monóxido de Carbono
<i>CO<sub>2</sub></i>	Dióxido de Carbono
EDO	Equação Diferencial Ordinária
EDP	Equação Diferencial Parcial
EN	European Normatization
<i>FDM</i>	Finite Difference Method
HRR	Heat Release Rate
ISO	International Organization for Standardization
MLR	Mass Loss Rate
NBR	Norma Técnica Brasileira
PIB	Produto Interno Bruto
PACI	Proteção Ativa contra incêndios
PHRR	Peak Heat Release Rate
PPCI	Proteção Passiva contra incêndios
SCIE	Segurança Contra Incêndio em Edifícios
SEM	Scanning electron microscope
<i>TGA</i>	Thermogravimetric Analysis
TLC	Taxa de libertação de calor

THR	Total Heat Release
TRRF	Tempo requerido de resistência ao fogo
TTI	Time to Ignition
$t_{ig}$	Tempo de ignição
UV	Ultravioleta

# 1. Introdução

---

## *1.1. Contexto e motivação*

O fogo sempre esteve presente em nosso planeta Terra, seja com o manejo pelo ser humano ou mesmo antes da existência da humanidade. A origem do fogo vem em conjunto com a origem das plantas, pois essas são responsáveis por dois de três elementos essenciais para a existência do fogo: oxigênio e combustível. O terceiro elemento, para formar o conhecido triângulo do fogo, é o calor, o qual pode surgir com raios, vulcões ou impactos de meteoros no planeta,[\[1\]](#).

Sabendo-se da existência do fogo e de seus princípios para sua existência, é de suma importância aprender a controlá-lo e principalmente, aprender a minimizar os efeitos e consequências que este pode trazer, evitando-se assim diversos eventos catastróficos que fazem parte da história da humanidade.

Dois episódios memoráveis do século XXI foram o incêndio no museu Nacional do Rio de Janeiro e o incêndio que ocorreu na Catedral de Notre Dame, em Paris. O primeiro incêndio, conforme Figura 1, ocorrido em 2018, levou a chamas um local onde já morou um rei e dois imperadores, queimando-se a maior parte do acervo, onde possuía mais de 20 milhões de artigos entre fósseis, múmias, registros históricos e obras de arte, justamente por falta de reformas e obras, (implementação de materiais que diminuem o alastro de calor e fogo, aumento de hidrantes e Sprinklers) e falta de estrutura para atuação dos bombeiros, [\[2\]](#).



Figura 1 – Incêndio no Museu Nacional do Rio de Janeiro,[2].

Já no segundo exemplo, a Catedral de Notre Dame, símbolo do poderio e influência da Igreja Católica na Idade Média, entrou em chamas e concluiu-se no relatório oficial duas causas possíveis: um cigarro mal apagado ou falhas elétricas,[3]. Para o primeiro caso, uma maior utilização de materiais de proteção ao incêndio poderia ter retardado a proliferação de chamas e diminuído este grande desastre, sendo o foco deste estudo caracterizar um material utilizado com a finalidade de retardar a propagação de chamas e calor.

Além destes desastres, em um estudo realizado pela The Geneva Association,[4], conseguiu-se verificar os prejuízos que os incêndios trazem para os principais países do mundo, a sua porcentagem em relação ao produto interno bruto (PIB) e a quantidade de mortes que estão relacionadas diretamente aos incêndios ocorridos nestes respectivos países, como pode-se observar na Tabela 1.

Tabela 1 – Dados de perdas diretas e mortes em decorrência a incêndios,[4] .

País	Perdas diretas (em bilhões de euros)				Mortes			
	2005	2006	2007	% PIB	2005	2006	2007	Mortes/1000 habitantes
<b>Alemanha</b>	2,9	3,3	3,4	0,13	605	510	-	0,68
<b>Estados Unidos</b>	8,3	9,0	11,4	0,10	4000	3550	3750	1,23
<b>França</b>	3,4	3,3	3,4	0,19	660	620	605	1,02
<b>Reino Unido</b>	2,1	1,8	1,8	0,30	515	515	465	0,82
<b>Japão</b>	2,3	2,4	2,1	0,12	2250	2100	2050	1,67

Sabendo-se desses grandes prejuízos, financeiros e principalmente humano, é de suma importância trabalhar em cima de novos métodos construtivos, entender a fundo materiais que podem atuar na proteção ao incêndio, além do investimento em proteções ativas em casas e edifícios, como será citado posteriormente nesta tese. Uma das maneiras que se pode garantir a segurança das estruturas e das pessoas é alvo desta tese, o estudo profundo de um material de proteção passiva ao incêndio, para evitar o alastramento de incêndios e catástrofes.

O correto dimensionamento dos materiais de proteção ao incêndio é de fundamental importância e para isso, além das propriedades térmicas a temperatura ambiente, é muito importante caracterizar essas propriedades a temperaturas elevadas, para que a estrutura seja construída com alta confiabilidade e segurança.

### **1.2. Objetivos da investigação**

O objetivo desta tese é principalmente atuar na caracterização térmica das placas de silicato de cálcio, importante material que vem sendo utilizado cada vez mais para proteção de estruturas de edifícios e construções em geral. Entendendo como se dá a perda de massa deste material ao longo do tempo, como formam-se as porosidades, as reações de decomposição presentes e utilizando-se de modelos teóricos de condutividade térmica para materiais porosos, podemos entender como tudo isso irá influenciar no campo de temperaturas ao longo da espessura do material.

Com isso em mente, deve ser modelado numericamente as equações que regem o fenômeno de transferência de calor quando um material está exposto ao incêndio. Para isso, será utilizado um aparato, o calorímetro de cone, para simular um incêndio e posteriormente será comparado e validado os resultados deste ensaio real com a solução numérica das equações analíticas propostas, para assim utilizar-se desta solução numérica geral como base para futuros estudos em diferentes materiais.

### ***1.3. Organização da tese***

Este trabalho encontra-se dividido em 6 capítulos. No capítulo 1 apresenta-se brevemente as motivações, objetivos da investigação e como a tese encontra-se organizada.

No capítulo 2, encontra-se o estado da arte onde é apresentado um breve referencial teórico sobre alguns conceitos importantes da área de proteção ao incêndio, bem como também características do material analisado e uma breve explanação sobre propriedades térmicas importantes a serem analisadas em materiais de proteção ao incêndio, além de métodos numéricos para solução destes problemas.

O capítulo 3 inicia-se com o estudo da análise de perda de massa do material, sendo apresentado a sua importância, os ensaios realizados baseados na norma ASTM C 1498-01 para determinação da quantidade de massa perdida na primeira reação, devido a evaporação. Posteriormente, utilizando como base um artigo de Dale Bentz,[5], o qual caracteriza as demais reações, foi possível definir também as demais reações e respectivas perdas de massa e faixas de temperatura que estas ocorrem, podendo-se assim utilizar desses dados para formular a simulação numérica do comportamento das placas de silicato de cálcio perante a um incêndio. Além da caracterização do teor de água, este capítulo apresenta os conceitos teóricos fundamentais sobre as principais propriedades analisadas em um material que está exposto a um incêndio, sendo estas denominadas como propriedades de reação ao fogo dos materiais, fazendo-se necessárias para uma total compreensão do ensaio no calorímetro de cone e do capítulo 5 que vem a seguir.

No capítulo 4 apresenta-se todas as equações utilizadas para realizar a simulação numérica de um material exposto a um incêndio, utilizando-se da Equação de Fourier, método das diferenças finitas centrais, o método implícito e o algoritmo de Levenberg-

Maquardt para otimização. Com isso, é possível obter finalmente o campo de temperaturas ao longo da espessura do material, para assim identificar a condutividade térmica efetiva do mesmo, sendo de suma importância para finalmente ser identificado a eficácia do material perante a ambientes extremos.

Para finalizar, o capítulo 5 apresenta as conclusões deste estudo e sugestões para futuros trabalhos, linhas de pesquisa e investigação.

## 2. Estado da arte

---

### 2.1. Introdução

As placas de isolamento de silicato de cálcio são produzidas a partir do cálcio básico e silício. Com essa combinação, consegue-se um material que oferece um excelente produto para aplicações à prova de fogo. As placas de silicato de cálcio são utilizadas em tubos e equipamentos térmicos, central elétrica, fundição industrial e fornos industriais, além das aplicações em construções como material para proteção ao incêndio e altas temperaturas, [6].

Esta é especialmente utilizada na área de construção civil para realizar a proteção de estruturas metálicas. A norma Europeia Eurocode 3 – EN 1993-1-2, [7], norma a qual é responsável por apresentar o dimensionamento de estruturas de aço expostas ao fogo, apresenta um método simplificado, muito utilizado em projetos estruturais a fim de determinar o gradiente de temperatura em materiais empregados para proteção de estruturas, sendo a Equação (2.1) muito importante para determinação da temperatura que a estrutura se encontrará em função do tempo.

$$\Delta T_s = \frac{K_p A_p / V (T_g - T_s)}{c_s \rho_s d_p (1 + \frac{\phi}{3})} \Delta t - (e^{\frac{\phi}{10}} - 1) \Delta T_g \quad \Delta T_s \geq 0 \geq \Delta T_g \quad (2.1)$$

Com:

$$\phi = \frac{c_p \rho_p d_p A_p}{c_s \rho_s V} \quad (2.2)$$

Onde  $\Delta T_s$  representa a taxa de variação de temperatura no aço durante o incêndio no instante  $t$ ,  $K_p$  é a condutividade térmica do material,  $A_p$  é a área apropriada do material de proteção por unidade de comprimento,  $A_p/V$  é o fator de seção das estruturas de aço,  $T_g$  é a

temperatura do gás,  $\rho_s$  é a massa específica do material,  $T_s$  a temperatura do material,  $\phi$  é o fator de massividade,  $c_s$  é o calor específico do aço,  $c_p$  o calor específico do material de proteção,  $d_p$  é a espessura do material de proteção,  $\Delta t$  é a variação de tempo e o acréscimo de temperatura no gás durante o intervalo de tempo  $\Delta T_g$ . Ao longo deste capítulo será mostrado diferentes modelos e variáveis que influenciam a condutividade térmica do material, pois não podemos considerá-la constante em um projeto onde envolve materiais expostos a temperaturas elevadas.

Além disso, a norma Europeia Eurocode 3 – EN 1993-1-2, [7], mostra-nos que o aço, até a temperatura de 400°C, possui o limite de escoamento inalterado, sendo essa uma propriedade importante para dimensionamento de estrutura. Já aos 500°C, o aço estrutural perde 22% da resistência tensão de escoamento em comparação com sua resistência em temperatura ambiente e aos 600°C perde 53% da sua resistência total, podendo-se assim causar falha da estrutura em um caso de incêndio.

Tabela 2 - Fatores de redução para aço carbono em altas temperaturas, [7].

Temperatura do aço ( $\Theta$ )	Fatores de Redução ( $f_y$ ) para temperatura ( $\Theta$ ) em relação a temperatura de 20°C		
	Fator de redução para o limite elástico efetivo	Fator de redução para o limite de proporcionalidade	Fator de redução para o módulo de elasticidade (E)
	$f_y = L_{esc(\Theta)} / L_{esc(T.amb)}$	$f_y = L_{pr.(\Theta)} / L_{pr.(T.amb)}$	$f_y = E_{(\Theta)} / E_{(T.amb)}$
20°C	1,000	1,000	1,000
100°C	1,000	1,000	1,000
200°C	1,000	0,807	0,900
300°C	1,000	0,613	0,800
400°C	1,000	0,420	0,700
500°C	0,780	0,360	0,600
600°C	0,470	0,180	0,310
700°C	0,230	0,075	0,130
800°C	0,110	0,050	0,090
900°C	0,060	0,038	0,068
1000°C	0,040	0,025	0,045
1100°C	0,020	0,013	0,023
1200°C	0,000	0,000	0,000

É imprescindível ter conhecimento sobre os tipos de proteção que podemos realizar e estudar como o material analisado é constituído e fabricado, pois assim podemos entender suas principais propriedades termofísicas e, conseqüentemente, entender o efeito do aumento de temperatura neste material.

## **2.2. Proteção ao incêndio**

O incêndio é um grande inimigo das edificações e obras de engenharia no mundo. Existem inúmeros casos no mundo que servem de inspiração para o estudo da proteção ao incêndio, tanto pela ocorrência de casos como referente a morte de dezenas de pessoas pela produção de fumo tóxico na Boate Kiss em 2013 (Santa Maria, Brasil), quanto pela destruição de estruturas, sendo grandes exemplos o desastre de Chicago em 1871 (Chicago-EUA), o qual resultou em mais de 17 mil estruturas queimadas e 90 mil pessoas desabrigadas, como mais recentemente a Torre de NotreDame em 2018 (Paris, França).

Com isso em mente, pode-se criar uma série de técnicas para tentar evitar o dano causado pelo início de um incêndio, propagação e conseqüente ruptura de estruturas e produção de fumo tóxico. Podemos separar a proteção ao incêndio em duas vertentes: proteção ativa e proteção passiva.

### **2.2.1. Proteção ativa – PACI**

A proteção ativa contra incêndios (PACI) tem como objetivo combater e controlar de imediato um incêndio que encontra-se em andamento, para assim evitar a propagação das chamas e calor para o restante da estrutura.

Segundo a norma NBR 14432:2001, [8], a proteção ativa pode ser definida como “*Tipo de proteção contra incêndio que é ativada manual ou automaticamente em resposta aos estímulos provocados pelo fogo, composta basicamente das instalações prediais de proteção contra o incêndio*”, ou seja, são sistemas que atacam diretamente o foco do incêndio, seja de maneira manual como extintores e hidrantes, como também de maneira automatizada, sendo o principal exemplo os ‘sprinklers’, sistemas que contam com sensores que permitem identificar a presença de um incêndio e automaticamente liberam água para tentar atacar o fogo, retardando a sua propagação ou acabando com o fogo do incêndio, dependendo da intensidade deste, sendo esses exemplos ilustrados na Figura 2.



Figura 2 - Sistemas de proteção ativa contra incêndio, [9].

### 2.2.2. Proteção passiva – PPCI

A proteção passiva contra incêndio (PPCI) leva esse nome pois, diferentemente da proteção ativa onde o combate ao fogo é feita de maneira direta, os sistemas PPCI não combatem propriamente o foco do incêndio. Portanto, são sistemas de proteção que são desenvolvidos para, após o início de um incêndio, este tenha dificuldades de propagação, havendo-se assim tempo para as pessoas evacuarem o ambiente alvo do incêndio de maneira segura, o corpo de Bombeiros resgatar possíveis vítimas e combater o fogo, [9].

Pode-se separar a proteção passiva em duas categorias principais, como a vedação e a proteção passiva em Estruturas Metálicas. A vedação pode ser ainda sub-classificada em vedação de dutos e de passagem de cabos elétricos, porém sua aplicação é semelhante para ambos. Essas vedações, as quais são aplicadas em dutos de ventilação, tubos hidráulicos e passagem de cabos elétricos, é necessária, pois são realizadas aberturas verticais entre andares para permitirem a passagem destes dentro de um prédio. Essa vedação é necessária justamente para evitar que o calor e o incêndio de um andar se alastrem para os demais,[10]. Os exemplos dessas vedações podem ser visualizadas na Figura 3.



Figura 3 – Vedação de dutos e tubulações entre andares,[10].

Já a proteção passiva em estruturas metálicas, é de extrema importância, pois como citado na introdução deste capítulo, o aço a partir dos 400°C começa a perder resistência, podendo-se assim facilitar a sua ruptura e levar o sistema em colapso conseqüentemente. Para isso, realiza-se testes de resistência ao fogo por um período determinado, como por exemplo 30, 60, 90 ou 120 minutos, sendo esse tempo conhecido como TRRF (tempo requerido de resistência ao fogo). Os tipos de proteção e materiais utilizados para proteção passiva serão abordados com maiores detalhes na seção 2.3.

Segundo a norma brasileira NBR 14432:2001, [8], a TRRF é “o tempo mínimo de resistência ao fogo, preconizado por esta Norma, de um elemento construtivo sujeito ao incêndio-padrão”. Essa norma, como diversas outras normas europeias (EN 13501-2, EN 1365-1, EN 1992-1.2), apresentam tempos mínimos de resistência ao fogo conforme a finalidade da construção, profundidade do subsolo e a altura da edificação, conforme a Tabela 3:

Tabela 3 - Tempos requeridos de tempo de resistência ao fogo, em minutos,[8].

Grupo	Ocupação/Uso	Divisão	Profundidade-subsolo		Altura da edificação				
			S2>10m	S1<10m	P1<6m	6m<P2<12m	12m<P3<23m	23m<P4<30m	P5>30m
A	Residencial	A1 a A3	90	60(30)	30	30	60	90	120
B	Hospedagem	B1 e B2	90	60	30	60(30)	60	90	120
C	Comércio/Varejo	C1 a C3	90	60	60(30)	60(30)	60	90	120
D	Serviços profissionais e técnicos	D1 a D3	90	60(30)	30	60(30)	60	90	120
E	Educacional	E1 a E6	90	60(30)	30	30	60	90	120
F	Locais de reunião de público	F1.F2,F5, F6 e F8	90	60	60(30)	60	60	90	120
G	Serviços automotivos	G1/G2 fechados G3 a G5	90	60(30)	30	60(30)	60/30	90/30	120/60
H	Serviço de saúde	H1 a H5	90	60	30	60	60	90	120
I	Industrial	I1 e I2	90/120	60(30)/90	30/60(30)	60(30)/30	60/90	90/120	120
J	Depósitos	J1 e J2	90/120	60(30)/90	30/60	30/60	30/60	30/120	60/120

Como é possível observar na Tabela 3, nota-se que o tempo requerido de resistência ao fogo depende da profundidade do solo ou altura da edificação e de sua aplicação, sendo essas aplicações separadas por grupos. Os grupos podem ser vistos de maneira mais detalhada na Tabela 4, onde esses são separados por estilos de edificações e dentro dessas classificações, existem subdivisões, as quais são as finalidades desses estilos de edificações.

Tabela 4 - Classificação das edificações quanto à sua operação,[8].

Grupo	Ocupação/uso	Divisão	Descrição	Exemplos
A	Residencial	A-1	Habitações unifamiliares	Casas térreas ou assobradadas, isoladas ou não
		A-2	Habitações multifamiliares	Edifícios de apartamento em geral
		A-3	Habitações coletivas	Pensionatos, internatos, mosteiros, conventos, residenciais geriátricos
B	Serviços de hospedagem	B-1	Hotéis e assemelhados	Hotéis, motéis, pensões, hospedarias, albergues, casas de cômodos
		B-2	Hotéis residenciais	Hotéis e assemelhados com cozinha própria nos apartamentos (incluem-se apart-hotéis, hotéis residenciais)
C	Comercial varejista	C-1	Comércio em geral, de pequeno porte	Armarinhos, tabacarias, mercearias, fruteiras, butiques e outros
		C-2	Comércio de grande e médio portes	Edifícios de lojas, lojas de departamentos, magazines, galerias comerciais, supermercados em geral, mercado e outros
		C-3	Centroscomerciais	Centro de compras em geral (shopping centers)
D	Serviços profissionais, pessoais e técnicos	D-1	Locais para prestação de serviços profissionais ou condução de negócios	Escritórios administrativos ou técnicos, consultórios, instituições financeiras (que não estejam incluídas em D-2), repartições públicas, cabeleireiros, laboratórios de análises clínicas sem internação, centro profissionais e outros
		D-2	Agências bancárias	Agências bancárias e assemelhados
		D-3	Serviços de reparação (exceto os classificados em G e I)	Lavanderias, assistência técnica, reparação e manutenção de aparelhos eletrodomésticos, chaveiros, pintura de letreiros e outros
E	Educativa e cultura física	E-1	Escolas em geral	Escolas de primeiro, segundo e terceiro grau, cursos supletivos e pré-universitário e outros
		E-2	Escolas especiais	Escolas de artes e artesanato, de línguas, de cultura geral, de cultura estrangeira e outras
		E-3	Espaço para cultura física	Locais de ensino e/ou práticas de artes marciais ginástica (artística, dança, musculação e outros) esportes coletivos (tênis, futebol e outros que não estejam incluídos em F-3), sauna, casas de fisioterapia
		E-4	Centros de treinamento profissional	Escolas profissionais em geral
		E-5	Pré-escolas	Creches, escolas maternas, jardins-de-infância
		E-6	Escolas para portadores de deficiência	Escolas para excepcionais, deficientes visuais e auditivos e outros
F	Locais de reunião pública	F-1	Locais onde há objetos de valor inestimável	Museus, centros de documentos históricos e outros
		F-2	Templos e auditórios	Igrejas, sinagogas, templos e auditórios em geral
		F-3	Centros esportivos	Estádios, ginásios e piscinas cobertas com arquibancadas, arenas em geral
		F-4	Estações e terminais de passageiros	Estações rodoferroviárias, aeroportos, estações de transbordo e outros
		F-5	Locais de produção e apresentação de artes cênicas	Teatros em geral cinemas, óperas, auditórios de estúdios de rádio e televisão e outros

Como pode-se observar, o campo de estudo somente para as proteções passivas é muito vasto, pois cada estilo de edificação precisa ter uma estrutura capaz de aguentar uma quantidade de tempo suficiente para que o prédio seja evacuado de maneira segura, evitando-se assim, desastres.

Em Portugal, o Decreto de Lei nº220/2008, portaria nº1532/2008, apresenta informações semelhantes a NBR 14432:2001,[8], sendo essa portaria responsável por determinar a TRRF, tamanho das vias de acesso, realizar todas as divisões e sub-divisões de classes conforme altura do edifício, tipos de construção e característica de reação ao fogo que o material exposto ao fogo deve apresentar, para assim obter uma estrutura confiável e segura,[11].

Existem diversos materiais que são utilizados para realizar a proteção de incêndio e estes precisam ser estudados de maneira profunda em suas propriedades térmicas para que estas sejam utilizadas de maneira a garantir um alto grau de confiabilidade em um projeto de engenharia. Os principais métodos e materiais utilizados para proteção passiva de estruturas são as tintas e revestimentos intumescentes, argamassas e placas.

### ***2.3. Materiais de proteção passiva***

#### *2.3.1. Tintas e revestimentos intumescentes*

As tintas e revestimentos intumescentes são retardantes de chamas que são utilizados como uma barreira resistente ao calor na proteção do material estrutural exposto a altas temperaturas,[12]. Esse tipo de tinta e revestimento pode expandir em até 40x ou mais que sua espessura original, criando uma manta leve que cria um escudo em volta do material revestido, como pode ser visto na Figura 4.



Figura 4 - Corte transversal de um material revestido por tinta intumescente,[13].

No estudo realizado por Mesquita,[13], nos casos mais extremos, foi possível visualizar um crescimento de até 38.41x da tinta intumescente, sendo a espessura inicial de 0.49mm resultando em uma camada de até 19.6mm, como pode ser visto na Tabela 5.

Tabela 5 - Temperatura média da placa e da intumescência e espessuras ao longo do tempo para diferentes espessuras e fluxos de calor iniciais,[13].

Referência do provete	DFT				Temp. média da placa			Intumescência dp(t) [mm]		
	[μm]				900[s]	1800[s]	2700[s]	900[s]	1800[s]	E=dp(t)/DFT
	A 35 4 0,5 1.-3	545	255,3	270,6	280,2	15,89	16,46	30,22		
A 35 4 0,5 2.-3	615	264,3	286	293,1	10,73	14,03	24,36			
A 35 4 0,50 3	528	--	--	--	12,55	12,55	23,78			
A 35 4 1,50 1	1670	199,2	220,6	235,6	15,13	17,81	10,12			
A 35 4 1,5 2	1610	201,2	219,9	228,6	24,99	25,89	15,97			
A 35 4 1,5 3	1450	203,9	221,8	238	24,53	26,94	18,39			
A 35 4 2,5 1.-2	2530	184,7	215,3	235,1	20,21	22,75	9,07			
A 35 4 2,5 2	2590	178,2	202,4	219,2	21,34	23,53	9,17			
A 35 4 2,5 3.-2	2680	174,3	200,9	219,5	20,97	23,97	8,82			
A 75 4 0,5 1	549	300,7	350,9	394,5	13,68	14,75	26,83			
A 75 4 0,5 2.-2	586	270,1	302,6	341,7	13,08	15,83	28,28			
A 75 4 0,5 3	582	297,4	352,1	384	11,47	12,03	21,1			
A 75 4 1,5 1	1510	240,1	284,8	314,9	19,43	23,12	17,08			
A 75 4 1,5 2	1530	238	280,6	303,7	19,76	22,68	16,11			
A 75 4 1,5 3	1620	231,3	267,7	291,9	18,34	21,51	16,08			
A 75 4 2,5 1	2590	199,4	231,8	257,8	22,3	26,37	10,68			
A 75 4 2,5 2	2590	203,9	237,2	266,5	19,53	23,29	9,79			
A 75 4 2,5 3	2530	199,3	234,7	264,2	20,54	24,07	10,65			
A 35 6 0,5 1	476	238,8	263,8	276,4	11,89	13,68	28,75			
A 35 6 2,5 1	2420	166,3	194	217	16,9	22,18	9,24			
A 75 6 0,5 1	494	270,4	317,4	359,1	19,6	18,99	38,41			
A 75 6 2,5 1	2490	183,7	218,6	242,5	19,32	23,7	10,37			

Onde DFT representa a espessura inicial, o qual varia entre 0.5mm, 1.5mm e 2.5mm e dp(t) é a espessura da intumescência em função do tempo.

O aquecimento do perfil estrutural acontece principalmente pela transferência de calor por condução, pois o aço não se encontra diretamente exposto a radiação do fogo ou em contato com os gases,[14]. Pela tinta intumescente ser um material leve, com baixa condutividade térmica e, além disso, criar uma camada com uma espessura considerável (e a transferência de calor por condução está interligada com a espessura do material), as tintas intumescentes são uma alternativa cada vez mais utilizada para proteção passiva de estruturas, para assim aumentar o tempo de resistência ao fogo das estruturas.

### 2.3.2. Argamassas projetáveis

O objetivo das argamassas projetáveis é envolver o material estrutural a ser protegido com uma argamassa que tenha características importantes de resistência ao fogo, permitindo-se retardar os efeitos das temperaturas elevadas. A argamassa pode ser constituída por diversos materiais, podendo ser de natureza cementícia ou gesso, inertes de baixo peso como a vermiculite e a perlite e pode conter aditivos com capacidade de absorção térmica,[15].

A argamassa normalmente possui vantagens e desvantagens comparados com os outros métodos. Ela apresenta como vantagem a sua facilidade de aplicação, visto que não é necessário um grande cuidado em sua aplicação, porém por outro lado, apresenta uma superfície com acabamento estético mais rugoso e as argamassas agregam maior peso estrutural, podendo haver casos que não sejam interessante a utilização da mesma[16]. A Figura 5 apresenta um material com argamassa sendo ensaiado utilizando tocha de corte a gás.



Figura 5 - Teste da argamassa utilizando tocha de corte a gás,[17].

Existe uma gama de argamassas que podem ser utilizadas com esse intuito e foi apresentado no estudado de Kodur et al,[18], as principais composições químicas das argamassas comerciais, podendo ser visualizado na Tabela 6.

Tabela 6 – Argamassas comerciais e suas respectivas composições químicas,[18].

CAFCO 300		Carboline tipo SMD		Tyfo WR-AFP	
Composição	Porcentagem máxima [%]	Composição	Porcentagem menor que [%]	Composição	Porcentagem máxima [%]
Gesso	50-75	Gesso	70	Gesso	30-40
Vermiculite	15-35	Vermiculite	30	Vermiculite	25-35
Celulose	1,0-10	Celulose	5	Celulose	>10
Carbonato de Cálcio	1,0-10	Carbonato de Cálcio	5	Carbonato de Cálcio	30-40
Quartzo	0-5	Quartzo	1	Quartzo	10

Além da composição das argamassas seguirem um padrão de composições químicas no mercado, existem normativas que regulamentam certas características e propriedades que as argamassas devem seguir para haver segurança em sua utilização. O estudo de André Gerken apresenta a Tabela 7 com algumas exigências dos órgãos internacionais,[19]:

Tabela 7 – Exigências internacionais para padronização das argamassas comerciais,[19].

Propriedades físicas	Argamassa projetada		
	Baixa densidade	Média densidade	Alta densidade
Densidade seca (mínima)	240Kg/m <sup>3</sup>	350Kg/m <sup>3</sup>	640Kg/m <sup>3</sup>
Aderência ao aço	16.2KPa	94.5KPa	472KPa
Compressão (10% deformação máxima)	68.9KPa	476KPa	3790KPa
Erosão ao ar 24Km/h	Não apresentou erosão	Não apresentou erosão	Não apresentou erosão
Erosão ao ar 46Km/h	Não apresentou erosão após 4 horas	Não apresentou erosão	Não apresentou erosão
Corrosão	Não contribuiu	Não contribuiu	Não contribuiu
Impacto-aderência	Não apresentou	Não apresentou	Não apresentou
Deformação	Não apresentou	Não apresentou	Não apresentou
Resistência a penetração	3.3cm <sup>3</sup>	-	-
Resistência a abrasão	8.3cm <sup>3</sup>	-	-
Resistência a fungos	Não apresentou fungos	Não apresentou fungos	Não apresentou fungos

Com esses estudos levados em consideração, consegue-se então utilizar a argamassa projetável com eficácia e segurança em projetos com o objetivo de aumentar o tempo de resistência ao fogo.

### *2.3.3. Tipo Placa*

As placas caracterizam-se pela utilização de painéis pré-fabricados resistentes ao fogo. A espessura da placa irá variar conforme as características do perfil a ser protegido (normalmente perfis estruturais feitos de aço), como a temperatura crítica e a massividade, sendo essa última representada pela razão entre a área da superfície lateral do perfil de aço exposto ao fogo e o volume do elemento exposto ao fogo,[\[7\]](#), representando assim a resistência de um determinado perfil metálico em uma situação de incêndio.

A norma EAD 350142-00-1106, publicada em 2017 através da European Assesment Document,[\[20\]](#), especifica como realizar o dimensionamento e utilizar-se de placas para proteção ao incêndio de estruturas, separando o dimensionamento conforme a sua utilização, a durabilidade esperada, em quais cenários serão utilizados (baixa ou alta umidade, exposto a ambiente interno ou externo) e como o material será fixado a estrutura.

Conseguindo-se enquadrar o material para cada caso mostrado anteriormente, é possível então separar os materiais e as características necessárias para: segurança em caso de fogo, segurança em caso de higiene, saúde e meio ambiente (contéudo e possível emissão de substâncias perigosas), segurança e acessibilidade para uso (resistência de parafusos e juntas, resistência a impacto, carga excêntrica e adesão), proteção contra barulho e economia de energia e retenção de calor,[\[20\]](#).

Segundo artigo publicado pela Associação Portuguesa de Segurança,[\[15\]](#), os principais materiais utilizados são o silicato fibroso ou de cálcio, betão, fibrocimento, vermiculite, perlite e gesso. Essas placas, apesar de configurar um maior peso estrutural em relação as demais soluções, tem como grande vantagem poder ser utilizado também para conferir uma maior resistência a impacto, abrasão, isolamento acústico e podem ser implementados em prédios já em utilização.

#### **2.4. Método de produção, constituição e classificações das placas de silicato de cálcio**

O silicato de cálcio é um material que provém de compostos do sistema CaO-SiO<sub>2</sub>, incluindo a wollastonita, a qual é gerada na natureza a partir da mistura do calcário e sílica,[21]. A utilização da wollastonita se dá pela sua composição, sendo, essa composta por 51.4% de dióxido de sílica (SiO<sub>2</sub>), 46,1% de óxido de cálcio (CaO) e o valor restante, 0.3%, referente a outros materiais e impurezas como Fe, Al, Na,K,Ti,Mg, e Mn,[22].

O estudo da wollastonita começou a ter um grande aumento a partir de meados de 1970, acontecendo isso por duas razões principais: o surgimento de variações na qualidade de matérias primas e principalmente, pela sua eficiente contribuição para a economia de energia de processos industriais,[23].

Para entender a produção das placas de Silicato de Cálcio, podemos nos basear em uma patente americana que determina um dos métodos de fabricação das placas,[24]. As placas de silicato de cálcio são compostas por cristais hidratados de silicato de cálcio, sulfato de cálcio anidro (desidratado), fibras de reforço (polpa de madeira, dolomita e wollastonita). Para formação dos cristais, é preciso de insumos como ácido silícico e cal. Processando estes por meio do processo de cura por autoclave, para assim ligar diversos materiais em um único, formam-se assim os cristais. As proporções de cada componente para atingir um bom desempenho são também especificados por essa patente, pela Tabela 8:

Tabela 8 - Composição das placas de Silicato de Cálcio conforme patente americana,[24].

<b>Composição</b>	<b>Porcentagem aceitável [%]</b>	<b>Porcentagem ideal [%]</b>
Sulfato de Cálcio Anidro	10-35	20-30
Dolomita	5-30	10-25
Wollastonita	5-30	10-25

Com os cristais formados, adiciona-se água e fibras de reforço e feito isso, utiliza-se de uma máquina de calandra cilíndrica para formação de uma placa crua. Para finalizar a fabricação, novamente a placa passa por um processo de cura autoclavada, com a pressão e tempo conforme o produto final que quer ser produzido (pressão entre 0.6MPa e 1.5Mpa, durante 3 a 20 horas). Pode-se visualizar os maquinários utilizados na Figura 6.



Figura 6 - Calandra cilíndrica e autoclave respectivamente,[25].

Com a composição anteriormente citada e o diagrama de fases do sistema óxido de cálcio e dióxido de sílica, podemos observar todas as fases presentes na Figura 7, conforme a temperatura do material e a concentração de CaO e SiO<sub>2</sub>.

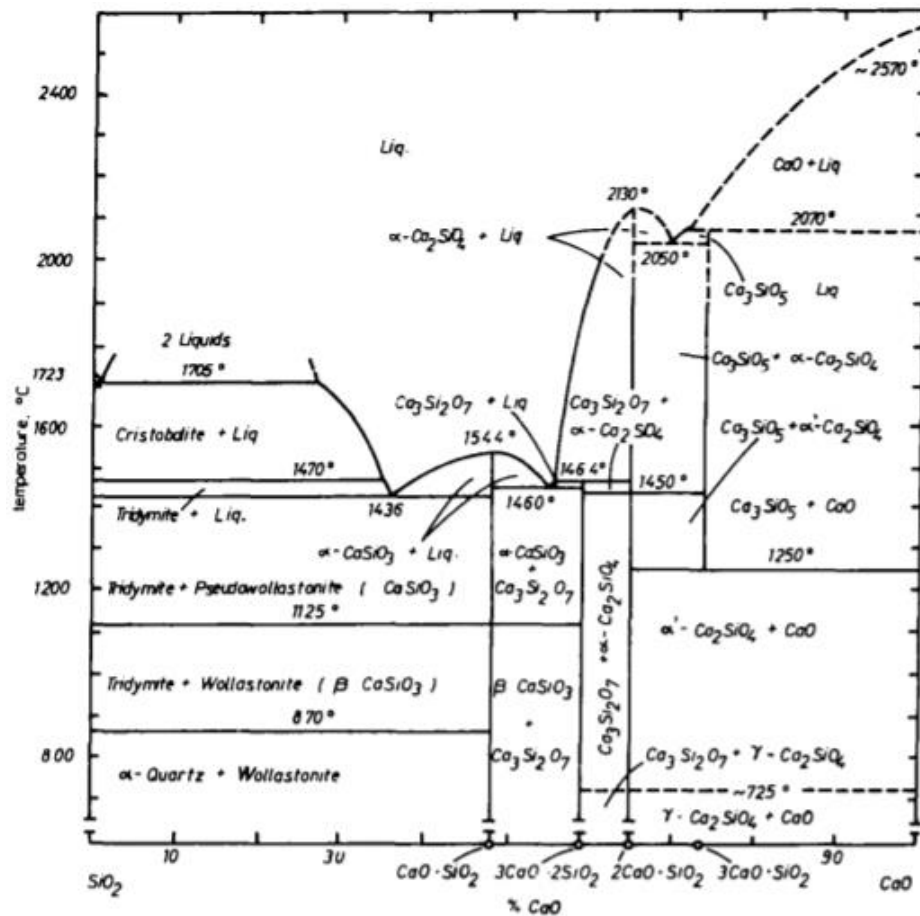


Figura 7 – Diagrama de fases do sistema CaO-SiO<sub>2</sub>,[23].

Como pode-se observar no diagrama de fases da Figura 7, o material possui pontos de fusão diferentes conforme a quantidade de óxido de cálcio e dióxido de sílica presente no material. Independente disso, a sua mudança de fase ocorre apenas em temperaturas muito elevadas, justificando a utilização deste material.

Como citado no capítulo 2.1, o aço estrutural tem uma queda abrupta do limite de escoamento e resistência conforme o aumento da temperatura e a queda dessa resistência pode levar o sistema ao colapso. Quando um material estrutural atinge a temperatura onde põe o sistema em colapso, essa temperatura é denominada de temperatura crítica,[26]. Essa temperatura crítica pode ser calculada relacionando-se o fator de projeto com o fator de redução apresentado na Tabela 2. Como estudado por Mesquita,[27], a temperatura de crítica é dependente essencialmente do grau de utilização e se o elemento está sujeito a fenômenos de instabilidade ou não. Portanto, busca-se dimensionar estruturas com temperatura crítica alta suficiente para, em um caso de desastre, haja tempo suficiente para evacuação, como mostrado na Tabela 3.

Além disso, é possível encontrar nos catálogos fornecidos pela fabricante de placas de silicato de cálcio uma indicação da faixa de temperatura a qual o material é indicado. Segundo o catálogo do fornecedor,[28], acima de 1100°C o material começa a sinterizar, então é recomendado que essa temperatura seja a temperatura limite de utilização. Além disso, as suas melhores variações de placas de silicato de cálcio são capazes de suportar uma exposição contínua a 1000°C.

Após estudar os diagramas de fases para o material de proteção e o material a ser protegido, podemos concluir que olhando apenas por essa ótica, as placas de silicato de cálcio são ótimas candidatas para um material de proteção. Além disso, existem vários outros fatores e propriedades importantes para a seleção de um material de proteção, os quais serão abordados adiante.

Outro ponto importante a ser salientado é a sua classificação conforme a densidade do material. Segundo a Promat,[28], fabricante de placas de silicato de cálcio, estas podem ser agrupadas em 3 classes diferentes. A primeira classe se refere às placas de silicato de cálcio de “densidade baixa”, sendo elas utilizadas principalmente para isolamento térmico, com densidades que variam entre 200 até 500kg/m<sup>3</sup>, Já as placas de “densidade média” se enquadram nesta categoria pois são utilizadas principalmente para isolamento estrutural, com densidades que variam entre 500 até 1000kg/m<sup>3</sup>,[28]. Para finalizar, existem as placas de densidade alta, sendo elas utilizadas para moldagem de peças estruturais, conferindo um

ótimo isolamento térmico (mas com desempenho inferior as categorias anteriores), porém com melhores propriedades mecânicas. Em nosso estudo de caso, ambas as placas que estão sendo analisadas são consideradas de densidade média, pois a Promatect-H possui uma densidade de  $870\text{kg/m}^3$  e a Promatect-200 possui uma densidade de  $835\text{kg/m}^3$ , [29].

### ***2.5. Propriedades térmicas das placas de silicato de cálcio***

As placas de silicato de cálcio são muito utilizadas para proteção ao incêndio, por apresentarem ótimas propriedades térmicas, sendo estas muito importantes na prevenção a incêndios e catástrofes. Por exemplo, a norma europeia EN13501-1 implementa um sistema de classificação em relação as propriedades de reação ao fogo, mais especificamente em relação a quantidade de calor que é liberado pelo material exposto a uma situação de incêndio. Portanto, segundo esta norma, as placas de silicato analisadas pertencem a classe A1, caracterizando-se como um ótimo material para a proteção ao incêndio.

Além disso, outro ponto positivo para as placas de silicato de cálcio é a baixa condutividade térmica, sendo essa propriedade responsável pela velocidade da transferência de calor de um ponto para outro. Assim, ela tende a retardar a transferência de calor e conseqüentemente, o aumento da temperatura do aço estrutural, protegendo-se assim a estrutura revestida pela placa de silicato de cálcio.

#### ***2.5.1. Condutividade térmica***

Para existir a transferência de calor de um ponto/meio/material para outro, sabe-se que isso só pode ocorrer naturalmente caso tenhamos um gradiente de temperatura entre ambos, ou seja, deve existir uma diferença de temperatura entre os materiais. Além disso, para cada material existe uma propriedade importante o qual é uma constante de proporcionalidade, nomeada como K, sendo essa a *medida de capacidade do material de conduzir calor*, a qual se chama condutividade térmica, [30].

Por exemplo, a condutividade térmica da água é  $k=0,607\text{W/m.K}$  e para o cobre é  $160 < k = 390\text{W/m.K}$ , ambos em temperatura ambiente, [31]. Isso significa que, dependendo da classe do cobre, este pode transferir calor até aproximadamente 642x mais rápido que a

água, logo pode-se ver que o cobre é um ótimo condutor de calor e a água é um mau condutor de calor, sendo a água então um ótimo armazenador de calor, visto que esta substância tem dificuldades em transferir calor.

Para a grande maioria dos materiais, é comum que o aumento de temperatura de um meio material favoreça o crescimento do seu coeficiente de condutividade térmica. Esse é um dos pontos positivos das placas de silicato de cálcio, pois além de ser um ótimo exemplo de material que possui baixa capacidade de transferência de calor, ela tem esse efeito minimizado, pois com o aquecimento do material, grande parte do calor que deveria ser transferido para o material protegido pela placa é utilizado na evaporação das moléculas de água presente no material.

Isso tem como consequência a formação de pequenas fendas e fissuras no material pela falta de preenchimento dele ocorrido pela evaporação da água. O surgimento dessas fissuras dificulta a transferência de calor por condução, pois com a presença de zonas livres de material, a transferência de calor é fornecida por condução pelo ar (caso houvesse movimentação do fluido líquido ou gasoso nessas fissuras, o fenômeno seria de transferência de calor por convecção, o qual não é o caso).

Os principais fatores que influenciam a condutividade térmica das placas de silicato de cálcio: massa específica, teor de água e porosidade do material, sendo os últimos dois correlacionados.

#### *2.5.1.1 Influência da porosidade na condutividade térmica*

A porosidade pode ser definida como a razão de volumes, sendo no numerador o volume de espaço poroso e no denominador o volume total (volume de Bulk) de um corpo sólido, [32].

$$\zeta = \frac{V_p}{V_t} \quad (2.3)$$

Onde  $\zeta$  representa a porosidade,  $V_p$  o volume do espaço poroso e  $V_t$  o volume total da amostra. Como o volume total sempre será maior que o volume do espaço poroso, o valor da porosidade sempre será um valor entre 0 e 1 (ou 0% a 100%).

Os fenômenos de transferência, tanto de calor quanto de massa, são muito influenciados pela geometria porosa, sendo essa uma fase vazia conexas no interior de uma fase sólida, onde ocorrem esses fenômenos, [33]. O processo de transferência de calor em materiais não porosos é mais simples, pois é preciso focar apenas no fenômeno de condução de calor, sendo um fenômeno com um nível de complexidade menor.

Já em materiais porosos, pode-se observar diversos fenômenos, tanto para um material seco ou para um material com teor de água, sendo que em um material seco, ocorre transferência de calor por condução na área sólida do material, condução e/ou convecção (caso haja movimentação de fluido) e radiação através da superfície sólida. Em um material exposto a umidade e com teor de água em sua composição, substituindo a área gasosa por líquido, os fenômenos são os mesmos, porém verifica-se que a taxa de transferência de calor é maior, pois a condutividade térmica do líquido tende a ser muito superior ao do gás. Além disso, existem os processos de evaporação, migração de vapor e condensação sucessivamente, que constitui também em transporte de calor e massa,[33].

Para análise da porosidade por exemplo, das placas de silicato de cálcio, pode ser utilizado como base o estudo de Dale Bentz,[34]. O autor determinou a porosidade de dois materiais que tem como base o silicato de cálcio e seus respectivos tamanhos de poros, sendo esta última informação de suma importância para a determinação do raio de circunferência do poro para respectivo cálculo da condutividade. Para isso, foi realizado um ensaio de microscopia eletrônica de varredura, utilizando-se do protocolo Scanning electron microscope (SEM) para caracterização da microestrutura do material e concluiu-se que nestes 2 materiais, o tamanho dos maiores poros foi de diâmetro igual a 95 $\mu\text{m}$  e 108 $\mu\text{m}$ . Como é conhecido na literatura, quando existe diversos tamanhos de poros, utiliza-se o maior para referência no cálculo da condutividade térmica efetiva, pois assim estaremos levando em consideração o pior cenário, pois quanto maior o tamanho do poro, maior a condutividade térmica do material, logo utilizamos 108 $\mu\text{m}$  como referência. Na Figura 8 é possível visualizar a imagem deste ensaio.

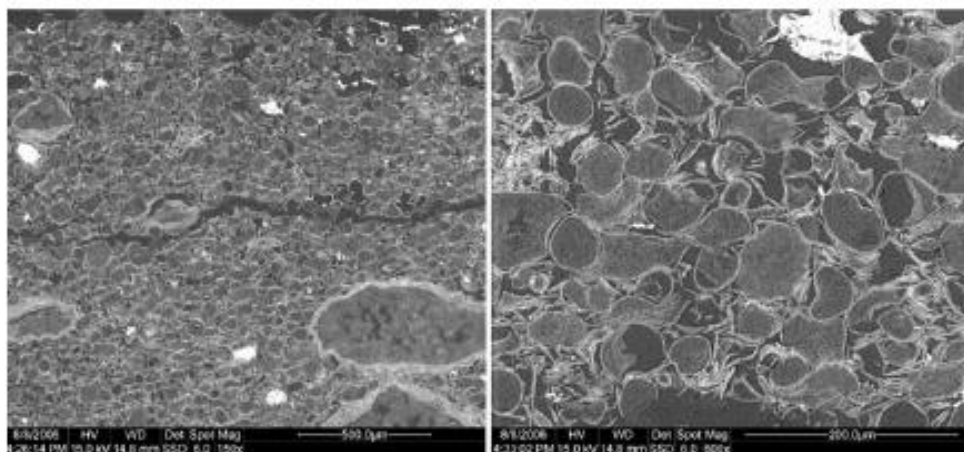


Figura 8 – Análise da porosidade de uma placa de silicato de cálcio hidratada após exposição a 1000°C,[34].

Pela característica do material e da fabricação, é natural que exista uma porosidade inicial associada a isso. Porém, outro aspecto muito importante é analisar o porquê existe o aumento do tamanho dos poros e da porosidade do material com o aumento da temperatura. Esse fenômeno está associado às reações endotérmicas que são originadas pelo aumento da temperatura do material, onde estas reações absorvem calor e liberam gases para o ambiente externo, formando-se assim espaços vazios ainda maiores dentro do material e diminuindo-se assim sua massa. Para as placas de silicato de cálcio, foi estudado por Bentz e Prasad,[5], as 4 reações que ocorrem nas placas de silicato de cálcio, conforme a Tabela 9.

Tabela 9 – Variação de entalpia e massa para as placas de Silicato de Cálcio,[5].

Reação	Temperatura [°C]	Temperatura de reação assumida [°C]	Perda de massa [%]	Entalpia [kJ/Kg produto]	$\Delta m$ total [%]
Evaporação da água livre	25 a 100	75°C	9	2330 kJ/kg água	
Primeira fase de desidratação (Hidrato)	100 a 400	125°C	23,5	1440 kJ/kg água	12
Segunda fase de desidratação (Hidróxido)	400 a 600	450°C	21,5	5660 kJ/kg água	
Descarbonização	600 a 1000	750°C	46	3890 kJ/kg CO <sub>2</sub>	

Para o cálculo da taxa de variação de temperatura, é preferível que não seja considerado a condutividade térmica do material sólido e sim a condutividade térmica efetiva. Esta leva em consideração a presença de porosidade, que podem ser determinadas através dos dados da Tabela 9 e pela Equação (2.1), e, através dela, encontra-se a temperatura

da placa de silicato de cálcio em contato com o material estrutural protegido, podendo-se descobrir a temperatura em que a estrutura se encontra. Para realização deste cálculo, pode-se utilizar por um exemplo a modelação de Maxwell, a qual pode ser visualizada na Equação (2.4),[35]:

$$K_{ef} = K_s \frac{2\zeta \cdot K_s + (3 - 2\zeta)K_g}{(3 - \zeta)K_s + \zeta \cdot K_g} \quad (2.4)$$

Onde  $K_{ef}$  representa o coeficiente de condutividade térmica efetiva,  $K_s$  é o coeficiente de condutividade térmica do sólido,  $K_g$  é o coeficiente de condutividade térmica do gás e  $\zeta$  é a porosidade do material.

Essa equação é muito difundida na literatura, porém ela é utilizada apenas para níveis de porosidade altos e com a consideração que as esferas sólidas porosas estão longe o suficiente para não interagirem entre si.

Além dessa relação, há também a relação de Krupiczka,[36], o qual pode ser utilizado para formatos cilíndricos e esféricos de poros dentro de um material. Pela complexidade dessa solução perante as demais, essa torna-se menos usual pela comunidade acadêmica. Essa relação pode ser observada na equação (2.5):

$$K_{ef} = K_s \left( \frac{K_g}{K_s} \right)^{A+B \log\left(\frac{K_g}{K_s}\right)} \quad (2.5)$$

$$A=0.280-0.7571 \cdot \log(\varepsilon) \quad B=-0.057$$

Onde  $\varepsilon=0.215$  caso os poros sejam longos cilindros e  $\varepsilon=0.476$  para esferas distribuídas em uma rede cúbica.

Para finalizar, a equação mais difundida na leitura é o modelo de Russell,[37], o qual pode ser utilizado para uma alta gama de materiais e formatos de poros. A equação geral do modelo de Russell é representada pela equação (2.6):

$$K_{ef} = K_s \frac{K_g \zeta^{\frac{2}{3}} + \left(1 - \zeta^{\frac{2}{3}}\right) K_s}{K_g \left(\zeta^{\frac{2}{3}} - \zeta\right) + \left(1 - \zeta^{\frac{2}{3}} + \zeta\right) K_s} \quad (2.6)$$

O presente trabalho baseia-se nesta equação, sendo está apresentada detalhadamente no capítulo 4, juntamente com todos os cálculos necessários para determinar as curvas de temperatura no material em uma simulação de incêndio.

### *2.5.1.2 Influência da massa específica das placas de silicato de cálcio na condutividade térmica*

A massa específica ( $\rho$ ) é definida como a massa ( $m$ ) por unidade de volume ( $V$ ), sendo que um material homogêneo como o gelo e o ferro, possui a mesma massa específica em toda a sua extensão. Além disso, dois objetos feitos com o mesmo material podem ter massas e volumes diferentes mas continuarão possuindo valores iguais de massa específica, [38].

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (2.7)$$

Sabendo-se disso, é possível analisar a influência desta propriedade na condutividade térmica das placas de silicato de cálcio. Isso é importante, pois segundo estudo realizado por Wang et al, [39], a condutividade térmica das placas sofre uma grande influência da massa específica, como pode-se observar na Figura 9.

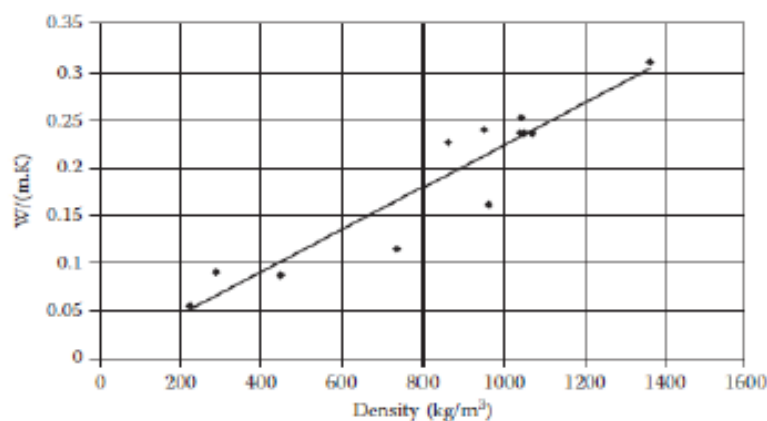


Figura 9 – Influência da massa específica na condutividade térmica das placas de silicato de cálcio, [39].

Com os valores encontrados na literatura, configurados pelos pontos marcados na Figura 9, foi possível traçar uma reta e criar uma função linear que minimiza o erro relativo entre todos os pontos. Essa reta pode ser descrita pela seguinte equação:

$$K = 0,23 \frac{\rho}{1000} \tag{2.8}$$

Com a equação (2.8), foi possível realizar o cálculo da condutividade térmica e compará-la então com a condutividade térmica obtido pela literatura, sendo o resultado deste observado na Figura 10.

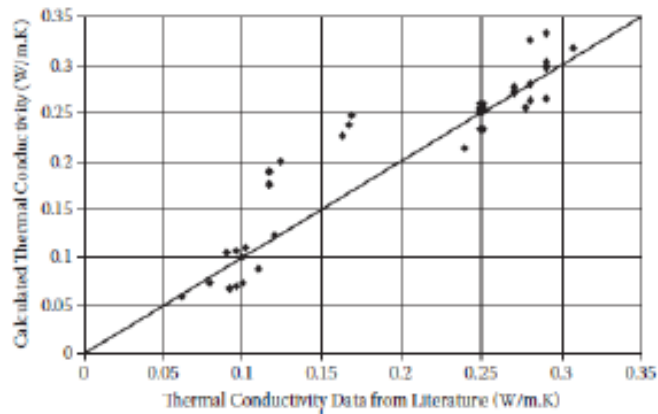


Figura 10 – Condutividade térmica calculado x Condutividade térmica da literatura, [39].

Apesar de ser uma boa estimativa, deve ser levado em consideração outros fatores, como a própria porosidade do material, abordada anteriormente. Pode haver placas de silicato de cálcio mais densas, porém com uma condutividade térmica menor, como é o caso de duas placas de silicato de cálcio do mesmo fornecedor (Promatect-H e Promatect-200). Pode-se observar isso na Tabela 10, que relaciona os dados fornecidos pelo fabricante, [29].

Tabela 10– Propriedades das placas Promatect-H e Promatect-200, [29].

Material	Massa específica (Kg/m³)	Condutividade térmica (W/m.K)	Teor de água (%)
Promatect-H	870	0,175	5 a 10
Promatect-200	835	0,189	1 a 2

A placa Promatect-H, mesmo com uma massa específica maior, apresenta uma condutividade menor. Isso pode ser explicado pelo fato desta apresentar um maior teor de água em sua composição e após sua evaporação (em torno dos 100°C), o espaço ocupado pela água em seu interior se transforma em poros.

Os poros, por sua vez, são preenchidos por ar, o qual é um ótimo isolante térmico por possuir uma condutividade térmica muito menor que da água ( $K_{H2O,300K} = 0,607W/m.K$  e

$K_{ar,300K} = 0,0263\text{W/m.K}$ , [40]). Portanto, esses poros criam uma resistência térmica maior e, conseqüentemente, a condutividade do material irá ser reduzida. Logo, como conclusão tem-se que devemos levar vários fatores em consideração para uma análise precisa de um problema de transferência de calor e mais especificamente, da análise da transferência de calor por condução.

## ***2.6. Silicato de Cálcio aplicado a proteção ao fogo***

As placas de Silicato de Cálcio, como citado na secção 2.2.2, podem ser consideradas como um material tipo placa, muito importante para a obtenção de um isolamento passivo de estruturas metálicas utilizadas na construção cívil. A sua importância está atrelada a sua grande eficiência no combate ao alastro de calor e fogo em uma situação de incêndio, devido as suas propriedades térmicas.

Uma das principais propriedades que favorecem o seu desempenho é possuir uma baixa condutividade térmica. Como essa propriedade está atrelada a capacidade do material conduzir calor, então o material ideal para a proteção ao incêndio é que este tenha a menor capacidade possível de transmissão de calor. Na Figura 11 é possível visualizar a condutividade térmica das placas de silicato de cálcio da fabricante Promat, as convencionais e de outros materiais de isolamento como lã mineral e manta de fibra.

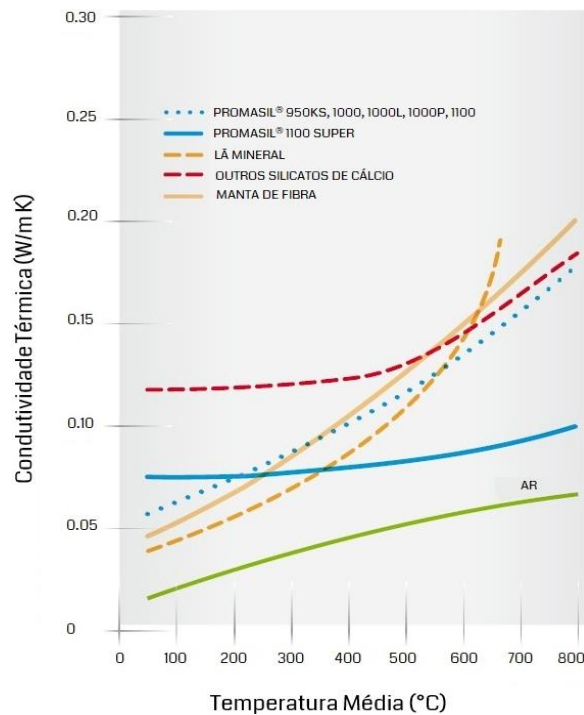


Figura 11 – Condutividade térmica de alguns materiais utilizados para proteção,[28].

Como pode ser visualizado na Figura 11, as placas de silicato de cálcio de fato apresentam um ótimo desempenho referente a condutividade térmica e, segundo a ficha técnica da Promat, isso trás valor para o consumidor, visto que quanto menor a condutividade térmica de isolamento, mais fino, leve e compacto será o material de proteção, conferindo a economia de espaço, peso e dinheiro,[28].

Para confirmar o ganho de performance na proteção de estruturas, foram realizados estudos para entender a performance das placas de silicato de cálcio quando submetidos a testes de incêndio. Em Ariyanayagam,[41], foi realizado testes de resistência ao fogo conforme a norma AS 1530.4:2005, utilizando-se de uma curva padrão de incêndio para assim testar a performance do material, sendo colocado uma placa de 20mm de silicato de cálcio em uma superfície exposta ao fogo, algumas vigas no meio e o outro lado coberto por outra placa de 20mm de silicato de cálcio, conforme Figura 12 .

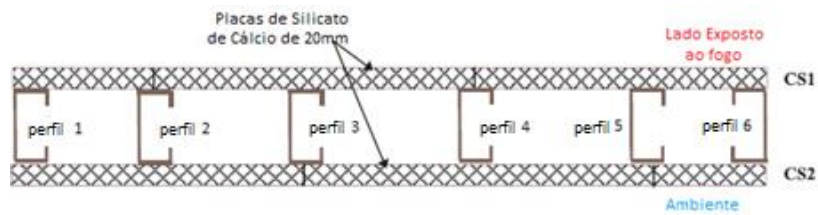


Figura 12 - Perfis protegidos por placas de Silicato de Cálcio,[41].

O resultado do teste pode ser visualizado na Figura 13.

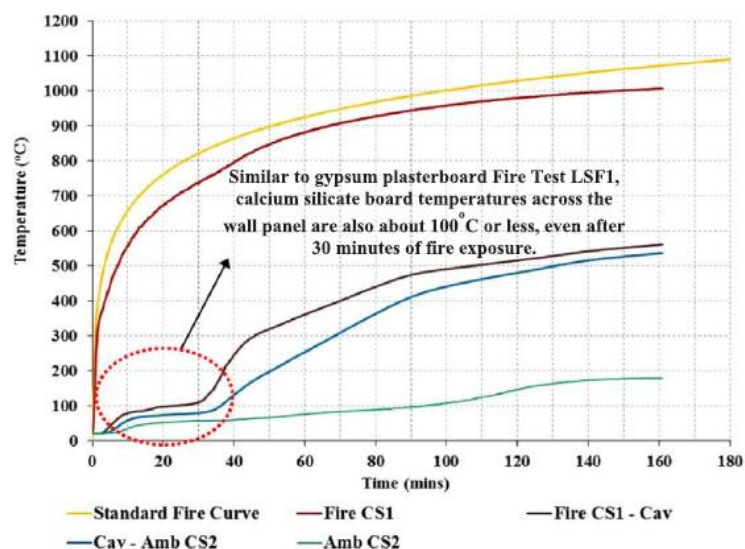


Figura 13 - Campo de temperaturas do silicato de cálcio exposto a altas temperaturas,[41].

Como é possível visualizar na Figura 13, a curva representada “Fire CS1 – Cav” é a temperatura que se encontra a superfície interna da placa exposta ao fogo e que está em contato com as perfis estruturais. Mesmo após 30min de exposição em um ambiente termo agressivo, o material ainda se encontra a menos de 100°C, retardando o alastre calor para a viga estrutural e foi necessário 70min para essa superfície atingir 400°C e 90min para o ambiente interno atingir os mesmos 400°C, mostrando assim a sua efetividade para a construção civil.

## 2.7. Modelos numéricos para determinação da evolução da temperaturas utilizando o método de diferenças finitas

Os modelos numéricos são muito utilizados para resolução de equações de problemas de transferência de calor, principalmente em regime transiente com evolução de temperaturas ao longo do tempo. Como as equações de calor unidimensional e bidimensionais são representadas por uma equação diferencial parcial, EDP, esta apresenta um grau de complexidade grande para resolução. Como publicado por Incropera,[40], em alguns casos é possível obter soluções analíticas exatas para casos estacionários e 2D. Porém, é mais frequente que existam casos onde, por problemas de geometria, modelagem e condições de fronteira, não exista soluções analíticas e exatas, justificando a importância da abordagem numérica pelo método de diferenças finitas,[40].

O modelo numérico por diferenças finitas, MDF, pode ser implementado para resolução de diversos problemas complexos, como por exemplo no estudo de Caiado,[42], onde este implementa essa metodologia e valida por meio do Ansys, para o estudo do comportamento de um incêndio no interior de uma laje em betão.

Em Caiado,[42], foi analisado um perfil retangular que suas laterais e parte superior apresentam um isolamento adiabático e a parte inferior está sofrendo influência de um fluxo de calor não constante, como pode-se visualizar na Figura 14.

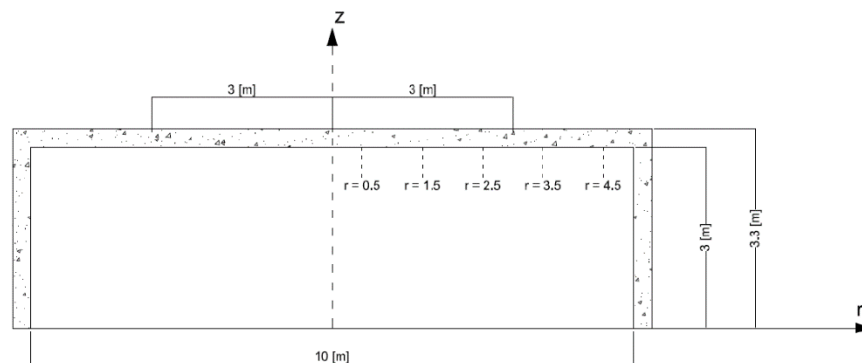


Figura 14 – Amostra em análise,[42].

Utilizando-se do modelo numérico por diferenças finitas para um problema de transferência de calor em regime transiente, unidimensional e implementando para a linguagem de programação OCTAVE (poderia ser utilizado também o Matlab ou o Scilab),

foi possível comparar os seus resultados com o software ANSYS, o qual pode ser utilizado como referência para testarmos a efetividade do método.

Além de ser utilizado o método de elementos finitos em seu trabalho, foi utilizado também o ANSYS CFD, o qual utiliza o método de volumes finitos (MVF), o mais adequado para o caso de transferência de calor por incêndio,[42]. Um dos resultados obtidos pode ser visualizado na Figura 15.

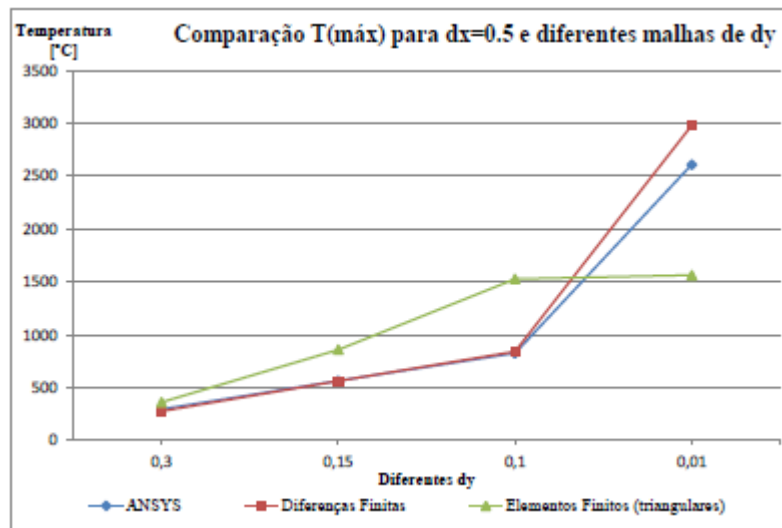


Figura 15 – Resultados obtidos por diferenças finitas, elementos finitos e MVF,[42].

Como mostrado na Figura 15, é possível notar que, em relação ao caso de referência, o método de diferenças finitas é o mais confiável para o caso específico onde há fluxo de calor pela alastração de um incêndio. O estudo mais profundo do método de diferenças finitas não é o objetivo deste capítulo, sendo o capítulo 4 dedicado ao seu estudo e implementação para um caso real.

## 2.8. *Análise Inversa de transferência de calor na determinação de propriedades de problemas térmicos*

A análise inversa de problemas são encontradas em vários ramos da ciência e engenharia, mecânica, aeroespacial e engenharia química, matemáticos, astrofísicos, geofísicos e especialistas de várias outras disciplinas, todos com suas especificidades e aplicações,[43]. No campo dos problemas de transferência de calor, este método pode ser

utilizado para estimar as condições de fronteira, como temperatura e fluxo de calor, como também as propriedades térmicas dos materiais, como condutividade térmica e capacidade térmica dos sólidos. Ele é utilizado, por exemplo, para análise do problema de condução de calor para quando tem-se o resultado de um campo de temperaturas experimental e um campo de temperaturas calculadora numericamente e queremos que esses valores convirjam e não temos controle de uma das variáveis do problema numérico e queremos otimizá-lo para obter resultados numéricos próximos ao experimental

No estudo de Agarwala,[44], foi estudado a aplicação deste método em um cilindro, o qual passa por aumento de temperatura por um fluxo de calor em sua fronteira. Neste estudo foi aplicado um fluxo de calor no material e com isso, obtido o seu campo de temperaturas experimental. Porém, não era conhecido o fluxo de calor, então foi estimado um valor inicial para realização do cálculo numérico. A partir deste valor, é realizado o cálculo do campo de temperaturas numérico e comparado com o campo de temperaturas experimental.

Utilizando-se de critérios de divergência, caso a estimativa inicial apresente um erro significativa entre o campo de temperaturas experimental e numérico, o método automaticamente sugere um novo valor de fluxo de valor, calcula o valor numérico e repete este ciclo até o erro entre temperaturas experimental e numérica seja o menor possível. É possível visualizar o fluxograma destas iterações na Figura 16.

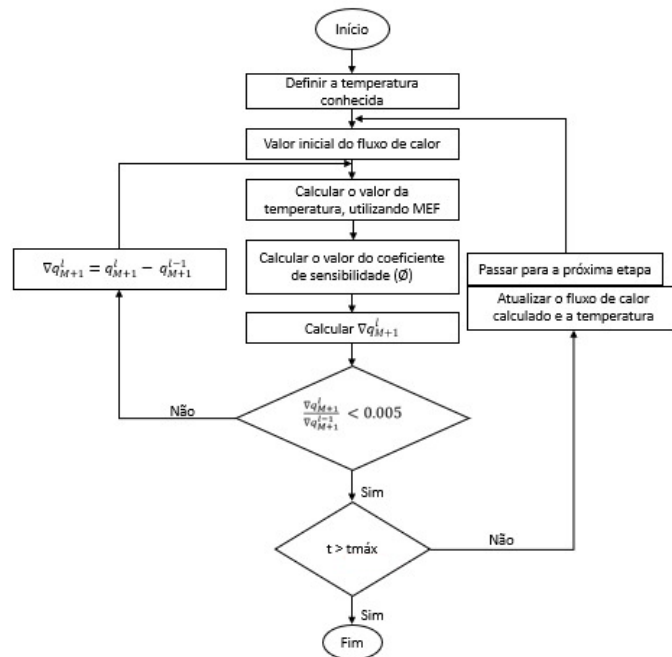


Figura 16 – Fluxograma representativo da análise inversa de transferência de calor,[44].

Para implementação da análise inversa da transferência de calor, podemos utilizar de diversos métodos, sendo os principais: Newtoniano, steepest descent e Levenberg Marquat, cada um com suas vantagens e desvantagens.

O método newtoniano apresenta uma convergência numérica rápida, porém necessita de uma ótima estimativa inicial para funcionar como esperado. Já o método steepest descent não necessita de uma boa estimativa inicial, porém este método pode tornar a sua solução inviável por convergir para um resultado mais lentamente. Já o método de Levenberg-Marquadt, como descrito por Ozisik,[43], é um método que combina o método numérico de Newton, o qual converge ligeiramente e o método numérico steepest descent, o qual não é necessário uma boa estimativa inicial.

Independentemente do método utilizado, a análise inversa permite identificar com precisão o valor de propriedades que podem ser importantes para um projeto de engenharia, onde espera-se que tenha alta confiabilidade e segurança. Com os resultados obtidos pela análise inversa em Agarwala, pode-se concluir no artigo que o método baseado nessa metodologia permitiu eliminar todas as limitações associadas as técnicas de caracterização convencional,[44].

## **3. Caracterização do teor de água e da reação ao fogo**

### ***3.1. Análise da perda de massa do material***

#### ***3.1.1. Introdução***

Como citado anteriormente no capítulo 2, as placas de silicato de cálcio possuem água em sua composição, sendo apresentado pelo catálogo da fabricante um teor de água entre 1 a 2% para Promatect-200, enquanto as placas de silicato de cálcio Promatect-H apresentam teor de água entre 5 a 10%, isso considerando em ambiente com ar seco.

Sabendo disso, é necessário levar em consideração a composição de água do material para análise da condutividade térmica, pois com o acréscimo de temperatura em um incêndio, quando o material chegar a 100°C, parte do calor absorvido pelo material nesta temperatura será liberado via evaporação de água, podendo-se visualizar uma pequena interrupção do aumento da temperatura no ensaio de calorímetro de cone realizado em uma placa de silicato de cálcio Promatect-H, sendo possível visualizar esse fenômeno na Figura 29.

Além deste efeito, pode-se observar que a perda de massa ocasionada pela evaporação de água irá afetar diretamente a condutividade térmica do material, propriedade muito importante para analisar o comportamento do aumento gradual da temperatura da placa ao longo de sua espessura. Isso ocorre pelo simples fato de a evaporação da água deste material abrir espaços para o surgimento de espaços vazios dentro do material, conhecidos também como poros, podendo-se observar isso na Figura 17.

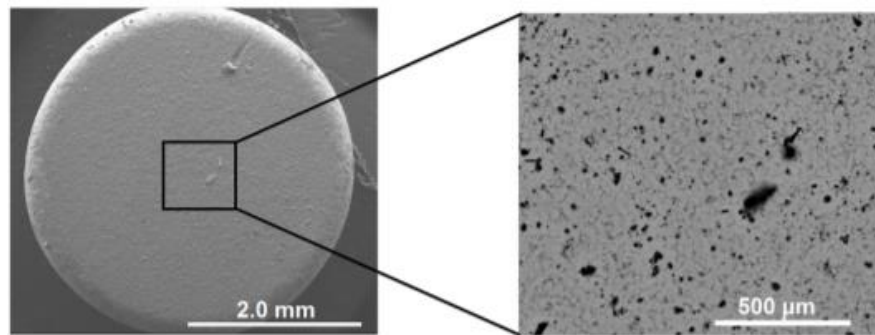


Figura 17– Surgimento de poros pela evaporação da água, imagem ilustrativa,[45].

Essa evaporação ocorre no processo de secagem pois o fenômeno de retirada de moléculas de água se dá pela movimentação do líquido presente no material para o ar. Esse fato ocorre devido a alteração da pressão parcial de vapor d'água no ar que envolve o material, favorecendo a extração de água para o ambiente que o envolve.

Esse processo de secagem pode ser separado em três períodos distintos, conforme o teor de água do produto, velocidade de secagem (ou taxa de secagem) e temperatura. Na Figura 18 podemos observar esses três períodos, sendo que a primeira curva representa o teor de água do produto, a segunda curva representa a taxa de secagem e a terceira curva representa a temperatura de secagem:

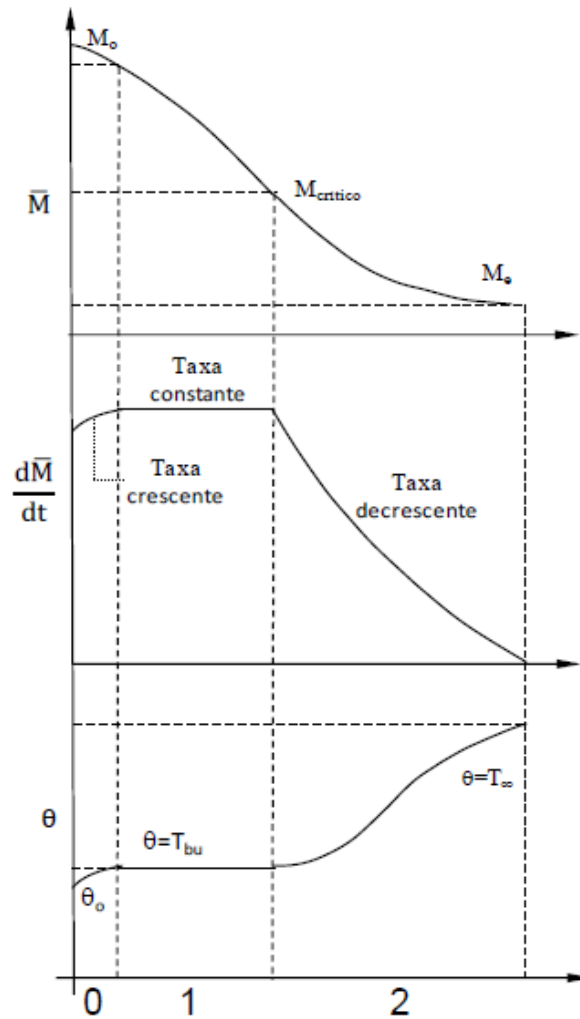


Figura 18 – Comportamento do material exposto a um processo de secagem, [46].

Para exemplificar essas etapas, esta tese baseou-se principalmente na tese de Wanderson Magno, [46], a qual explica exatamente o que acontece em cada período, sendo estes:

**Período 0:** é o período conhecido como período antes de entrar em regime operacional, ou também período de acomodação. É o período onde a temperatura do material está em uma temperatura não uniforme e abaixo da temperatura do ar, conseqüentemente temos também uma pressão parcial de vapor da água na superfície do produto baixa, levando-nos a obter velocidades de secagem e transferência de massa também baixas. Este período é insignificante perante aos demais, pois não se leva um tempo considerável para chegarmos em um equilíbrio e as taxas de transferência de massa e de taxa de secagem são também baixas.

**Período 1:** é o período onde a temperatura do ar entrou em equilíbrio com a temperatura do material e conseqüentemente temos uma pressão parcial de vapor de água na superfície que podemos considerar aproximadamente constante e é igual a pressão de vapor de água pura à temperatura do produto. Como também no período anterior, neste período ainda temos uma alta concentração de água livre no material, sendo está evaporado pela superfície do material em uma taxa constante, sendo que ela permanece desta maneira enquanto a migração de água do interior até a superfície do produto seja suficiente para acompanhar a perda por evaporação de água na superfície.

**Período 2:** é o período onde pode-se observar um decréscimo na taxa de secagem. Esse fato ocorre porque a água que chega à superfície não é suficiente para suprir a taxa de evaporação que o processo de secagem é capaz de extrair do material, gerando assim um decréscimo na taxa de secagem. Nesse período, a troca de calor do material não é mais compensada pela perda de massa, conseqüentemente o material sofre um acréscimo de temperatura, tendendo a se aproximar a temperatura do ambiente ( $T_{\infty}$ ). No final deste período, a velocidade de secagem é nula, alcançando o equilíbrio higroscópico.

Como o nosso material apresenta uma quantidade considerável de teor de água, é necessário observar os fenômenos que aparecem com o aquecimento do material.

### *3.1.2. Determinação do teor de água conforme a ASTM C 1498-01*

Para a realização dos testes de secagem para obtenção do teor de água dos materiais ensaiados foi utilizada como base a ASTM C 1498-01, “Standard Test Method for Hygroscopic Sorption Isotherms of Building Materials”,[\[47\]](#). Essa norma mostra como se deve realizar o experimento da maneira mais precisa possível. Ela pode ser utilizada para quaisquer materiais de construção existentes.

Os aparatos necessários são:

**Recipientes para o material ensaiado:** Segundo a norma utilizada, o recipiente tem que ser feito de um material não-absorvente para que este não absorva parte da água liberada pelo material. Nesta norma é citado como exemplo o vidro, sendo este mesmo utilizado para nosso experimento.

**Balança:** Na norma pede-se que seja utilizado uma balança analítica que satisfaça a condição de precisão de 1mg para pesagem dos recipientes e com precisão de  $\pm 0.1\%$  da massa da amostra para pesagem destas.

**Forno de secagem:** Foi utilizado o forno presente no laboratório de processos químicos do IPB, sendo este com a precisão pedida pela norma, a qual especifica que a variação de temperatura para temperaturas acima de  $75^{\circ}\text{C}$  deve estar dentro da faixa de  $\pm 4\text{K}$  ( $8^{\circ}\text{F}$ )

**Dessecadores (ou câmara climática):** Os dessecadores são utilizados para que o material seja arrefecido em um ambiente com temperatura controlada e principalmente, manter um ambiente com umidade extremamente baixa (por meio de soluções salinas ou com presença de sílica gel), para que o material não absorva vapor d'água do ambiente e consequentemente obter resultados mais confiáveis.

Com os aparatos em mãos, é preciso realizar o corte das amostras que serão ensaiadas. Utilizando-se da norma ASTM C1498-01, ela especifica que as amostras devem ter no mínimo 10 gramas e a quantidade mínima de amostras que devem ser analisadas são de 3, sendo utilizada nessa tese uma quantidade de 4 amostras para obter uma maior precisão. As amostras cortadas e suas respectivas massas podem ser vistas na Figura 19 e na Tabela 11.

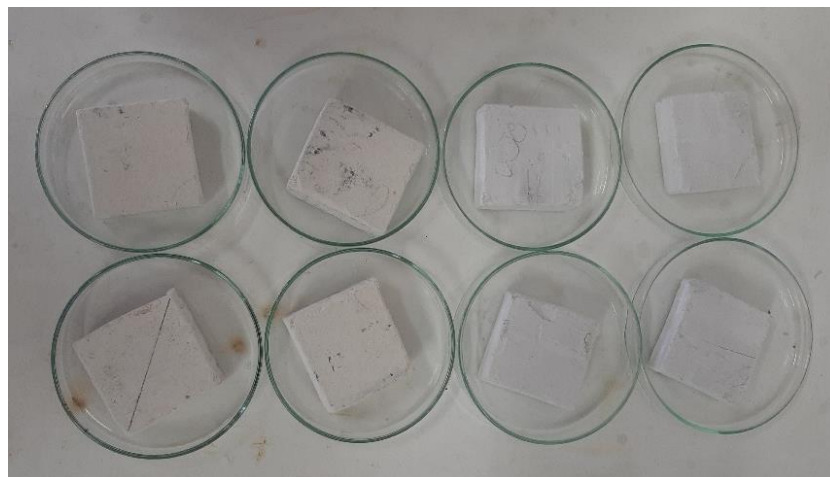


Figura 19 – Amostras de Promatect-H e Promatect-200

Tabela 11 – Massa das amostras antes do teste de secagem.

<b>Amostras</b>	<b>Material</b>	<b>Massa Inicial</b>
1		27,2565
2	Promatect-200	28,0913
3		29,8343
4		26,3413
5		42,1949
6	Promatect-H	39,5138
7		41,8426
8		42,0397

Com as amostras devidamente cortadas e pesadas, o próximo passo a ser seguido é posicionar as amostras em um forno de secagem. Como citado anteriormente, foi utilizado o forno de secagem do laboratório de processos químicos da ESTIG-IPB.

Segundo a norma utilizada para este ensaio, existem várias temperaturas que podem ser utilizadas para realizar o teste de secagem, variando conforme o tipo de material ensaiado, sendo essas:

1. Para materiais os quais não apresentam mudança de estrutura e dimensões a 105°C, como por exemplo materiais minerais, utilizar 105°C  $\pm$ 4°C (221  $\pm$ 8°F);
2. Para materiais os quais apresentam mudança de estrutura e dimensões entre 70°C (158°F) e 105°C (221°F), como alguns tipos de plásticos, utilizar 70°C  $\pm$ 2°C (158  $\pm$ 4°F);
3. Para materiais em que temperaturas elevadas trazem mudanças químicas ou físicas do material, como por exemplo água cristalina no gesso ou reações químicas em geral, utilizar 40°C  $\pm$ 2°C (104  $\pm$ 4°F).

Como para as placas de silicato de cálcio não há mudanças de estrutura, dimensões e reações químicas para a temperatura de 105°C, foi escolhido a temperatura de 105°C  $\pm$ 4°C (221  $\pm$ 8°F) para a realização dos testes de secagem.

Essa norma utilizada como base para os testes de secagem, ASTM C1498-01, não específica o período de tempo que se deve deixar a amostra no forno nas condições de temperatura especificada no parágrafo anterior. Dito isso, foi utilizado como base uma outra norma de secagem, obtendo assim uma melhor estimativa de tempo que as amostras devem permanecer no forno, sendo está a ASTM C533-95, utilizada para testes de secagem de

blocos de silicato de cálcio, [48]. Essa norma específica que para blocos de silicato de cálcio com espessura menor que 51mm devem permanecer no forno por aproximadamente 24h, sendo está então o tempo utilizado para secagem do material, podendo ser observado o forno com as amostras na Figura 20.



Figura 20 – Amostras colocadas ao forno e forno utilizado para os testes a 105°C

Após feito isso, a norma ASTM C1498 orienta que a amostra seja colocada em um dessecador. O Dessecador de vidro é um recipiente fechado que dentro deste há um agente de secagem, conhecido também como dessecante,[49]. Este aparato é utilizado principalmente para armazenar e secar amostras com baixa umidade, sendo soluções salinas e sílica-gel os principais dessecantes. No teste de secagem foi utilizado um dessecador de vidro também presente no laboratório de Processos Químicos do IPB para arrefecer a amostra e estabilizá-la antes de realizar a pesagem das amostras, conforme Figura 21.



Figura 21 – Dessecador de vidro utilizado.

Como a norma utilizada como base para nosso ensaio (ASTM C1498) não especifica o tempo que a amostra deve permanecer no dessecador e a norma que foi utilizada como base para o tempo de secagem (ASTM C533) apenas cita que a amostra deve ficar no dessecador até a amostra estar em temperatura ambiente, utilizamos então desta última premissa e a amostra arrefeceu por 2 horas no dessecador de vidro.

Após isso, foi realizada a pesagem das amostras para obtenção da massa final da amostra. Como o material foi secado no forno de secagem na temperatura de 105°C, e o ponto de ebulição da água é de 100°C, teoricamente é possível dizer que a diferença entre a massa antes do teste e após o teste, é a quantidade de água presente no material, sendo este dito como teor de água do material.

Porém, existe a possibilidade de que um ciclo de secagem não seja suficiente para retirar toda a água do material. Para obtenção de resultados mais confiáveis, é preciso realizar essas mesmas etapas, as quais são de maneira resumida, colocar as amostras novamente no forno por 24h, deixar estas amostras por 2h no dessecador e após isso pesá-las, até conseguir atingir um valor de massa constante. A norma ASTM C533 define como massa constante uma variação entre pesagens sucessivas de no máximo 0.2%.

Sabendo-se disso, foi realizado este procedimento 3 vezes, sendo que já na segunda tentativa foi obtido resultados dentro da margem de 0.2%, porém optou-se por realizar uma terceira rodada de testes para realmente confirmar que toda a água da amostra foi evaporada e sendo assim, obter resultados mais confiáveis.

Com os resultados em mãos, sendo estes as massas iniciais e finais, podemos enfim calcular o teor de água presente em nossas amostras. Para isso, ambas as normas se utilizam da Equação (3.1) para realizar o cálculo do teor de água:

$$U = \left[ \frac{(M - M_o)}{M_o} \right] * 100 \quad (3.1)$$

Onde U é o teor de água presente na amostra, M a massa inicial das amostras e mo a massa média final. Na Tabela 12 pode-se ver todos os resultados obtidos e na Tabela 13 os resultados mais importantes obtidos no ensaio.

Tabela 12 – Massa das amostras antes e após teste de secagem.

Amostras	Material	Massa inicial (g)	Massa final 1 (g)	Massa final 2 (g)	Massa final 3 (g)
1		27,2565	22,8053	22,796	22,8107
2	Promatect-200	28,0913	23,4802	23,489	23,5228
3		29,8343	24,893	24,9278	24,9413
4		26,3413	22,0202	22,0347	22,0697
5		42,1949	40,9233	41,0053	41,034
6	Promatect-H	39,5138	38,3556	38,4033	38,4367
7		41,8426	40,5849	40,6404	40,6573
8		42,0397	40,7482	40,8283	40,8448

Tabela 13 – Teor de água das placas de silicato de cálcio Promatect-H e Promatect-200

Amostras	Material	Massa inicial (g)	Massa final média (g)	Teor de água (%)	Teor médio (%)
1		27,2565	22,8040	16,336%	
2	Promatect-200	28,0913	23,4973	16,354%	16,371%
3		29,8343	24,9207	16,470%	
4		26,3413	22,0415	16,323%	
5		42,1949	40,9875	2,861%	
6	Promatect-H	39,5138	38,3985	2,822%	2,880%
7		41,8426	40,6275	2,904%	
8		42,0397	40,8071	2,932%	

Como pode-se observar nas tabelas acima, foi obtido um teor de água médio para as placas de Promatect-200 de 16.371%, com as amostras variando entre 16.323% e 16.470% e para as placas de Promatect-H obteve-se um teor de água médio de 2.880%, com as amostras variando entre 2.822% e 2.932%.

Segundo Abdelkader [50], o qual estudou os mesmos materiais em sua tese de mestrado, este obteve os valores de 15.9% e 3% para as placas de silicato de cálcio Promatect-200 e Promatect-H. A comparação entre estudos pode ser observada na Tabela 14.

Tabela 14 – Comparação entre teor de água médio obtido nesta tese e obtido por Abdelkader.

<b>Material</b>	<b>Teor de água Abdelkader</b>	<b>Teor de água obtido</b>
Promatect-H	3%	2,880%
Promatect-200	15,9%	16,371%

Como pode-se ver na tabela acima, foram obtidos valores realmente próximos ao estudo do Abdelkader. A diferença pequena entre valores pode ser atrelada ao fato de ter sido realizado em diferentes condições de ambiente, estação (consequentemente temperatura e umidade) e com maquinários levemente diferentes (modelos de forno, dessecadores, etc.), sendo essa pequena diferença considerada normal.

Os resultados obtidos são satisfatórios pois para ambas as placas podemos observar uma variação de valores de teor de água muito baixos, podendo ser afirmado que chegou-se em resultados padrões e precisos, que podem e serão levados em consideração na resolução da equação de Fourier.

### *3.1.3. Análise da influência das reações térmicas na perda de massa*

Na grande maioria dos materiais pode-se observar uma alteração de diversas propriedades em relação a sua temperatura, seja suas propriedades físicas (como massa, volume, massa específica), quanto em nosso caso de estudo as propriedades térmicas (Coeficiente de calor específico, condutividade térmica, entre outras).

Porém a perda de massa ocorre em grande parte dos materiais pelo aumento gradual da temperatura, desencadeando reações, as quais podem ser exotérmicas ou endotérmicas. Os processos que realizam a absorção de calor do sistema são chamados de endotérmicos, como o processo de fusão do gelo, o calor flui da vizinhança para dentro do sistema,[\[51\]](#). Já um processo que libera calor para fora do sistema é chamado de processo exotérmico, como a combustão da gasolina que libera calor para fora do sistema direto para sua vizinhança,[\[51\]](#).

As placas de silicato de cálcio também apresentam estes fenômenos, conforme o aumento gradual de sua temperatura, sendo todas elas de ordem endotérmica, absorvendo assim a energia fornecida em uma situação de incêndio. Como visto anteriormente neste

capítulo, um destes processos é o da perda de massa do material por evaporação. Para a evaporação desta água retida nas placas de silicato de cálcio, é necessário fornecer uma determinada quantidade de calor (em torno de 2330kJ/Kg água),[5], para que essa reação seja consumada por completo.

Pode-se utilizar o modelo de Bentz para analisar a perda de massa das demais reações como base para a nossa pesquisa, como pode ser visto na Tabela 9, porém a perda de massa total dependerá muito do fabricante das placas de silicato de cálcio, pois o material base costuma ser o mesmo (ou com variações desprezíveis), com exceção a quantidade de água, que dependerá do fabricante e de sua respectiva aplicação, por isso foi realizado o ensaio de secagem do material, pois descobrindo o teor de água e sabendo a perda de massa pelas demais reações, é possível traçar um ótimo perfil de perda de massa em função da temperatura e do tempo, os quais são de suma importância para a solução numérica da equação de Fourier.

Partindo desta premissa, deve-se modelar teoricamente a perda de massa total de nosso material considerando a perda de massa obtida nos testes de secagem anteriormente apresentados adicionando também a perda de massa pela primeira fase de desidratação (Hidrato), a qual ocorre entre 100°C e 400°C, a perda de massa pela segunda fase de desidratação (Hidróxido), a qual ocorre entre 400°C e 600°C e pela descarbonatação, a qual ocorre entre 600°C e 1000°C.

Em todas as 3 etapas, será levado em consideração a perda de massa obtida por Bentz em sua respectiva fase, multiplicada pela  $\Delta m$  total, para identificação da quantidade de massa que é perdida em cada momento, sendo assim apresentado a Equação (3.2) para este cálculo:

$$PM(\%) = PM_{fase} \Delta m_{total} \quad (3.2)$$

Sendo assim, foi possível obter a Tabela 15 para perda de massa total das placas Promatect-H:

Tabela 15 – Perda de massa real das placas Promatect-H

<b>Reação</b>	<b>Perda de massa Bentz [%]</b>	<b>Perda de massa real [%]</b>	<b>Perda de massa total [%]</b>	<b><math>\Delta m</math> total [%]</b>
Evaporação da água livre	9	20,87	2,88	
Primeira fase de desidratação (Hidrato)	23,50	20,43	2,82	13,80
Segunda fase de desidratação (Hidróxido)	21,50	18,70	2,58	
Descarbonização	46	40	5,52	

Obteve-se igualmente a Tabela 16 para a perda de massa total das placas Promatect-200:

Tabela 16- Perda de massa real das placas Promatect-200

<b>Reação</b>	<b>Perda de massa Bentz [%]</b>	<b>Perda de massa real [%]</b>	<b>Perda de massa total [%]</b>	<b><math>\Delta m</math> total [%]</b>
Evaporação da água livre	9	60	16,37	
Primeira fase de desidratação (Hidrato)	23,50	10,33	2,82	27,29
Segunda fase de desidratação (Hidróxido)	21,50	9,45	2,58	
Descarbonização	46	20,22	5,52	

Com isso, conclui-se que as placas Promatect-H e Promatect-200, após serem expostas a uma intensidade de incêndio suficientemente grande para que o material atinja uma temperatura uniforme de 1000°C, estas placas tendem a perder em média 13,80% e 27,29% de massa sucessivamente.

As informações de perda de massa em cada etapa e em quais temperaturas ocorrem são de suma importância para a modelagem numérica, e serão abordada no capítulo 4.

## **3.2. Reação ao fogo dos materiais**

### *3.2.1. Introdução*

Para a realização de uma obra confiável de Engenharia, o projeto de Segurança Contra Incêndio em Edifícios (SCIE) é de suma importância e, para obter uma alta confiabilidade, o projeto precisa englobar a prevenção, contenção, detecção e evacuação, principalmente em obras maiores, como em edifícios residenciais, repartições públicas, hotéis, fábricas, entre outras aplicações. Dentro dos objetivos dessa pesquisa, busca-se analisar a reação ao fogo das placas de silicato de cálcio e entender como um incêndio afeta as propriedades térmicas e de reação ao fogo. Procura-se estudar a fundo o efeito do incêndio em um material, utilizando-se do calorímetro de cone para simulação deste efeito. Nesse ensaio busca-se principalmente posicionar sensores termopares e com estes sensores, caracterizar a condutividade térmica efetiva do material e também analisar sua perda de massa devido as reações desencadeadas. Porém este ensaio também é muito utilizado para determinação da taxa de libertação de calor (HRR), tempo de ignição, taxa de produção de fumo e calor total liberado durante o incêndio pelo material (THR).

### *3.2.2. Conceitos fundamentais*

A fim de se realizar a análise da reação ao fogo de um material, é necessário estar ciente dos conceitos e propriedades que afetam e auxiliam o início, o desenvolvimento e consequente propagação do incêndio. Com isso, é possível selecionar os melhores materiais e geometrias possíveis para um projeto de segurança contra incêndio, sendo os principais conceitos:

#### *3.2.2.1 Reação ao fogo*

Segundo o Manual de Segurança contra Incêndio em Edifícios, [52], a reação ao fogo é a contribuição do produto em sua própria degradação, tanto para o início quanto para o desenvolvimento de um incêndio, levando em conta a liberação de fumaça e gases perigosos, além da taxa de liberação de calor pelo material exposto. Estas propriedades devem ser avaliadas tendo como base um conjunto de ensaios normalizados e padronizados, sendo as propriedades principais explicadas a seguir.

### 3.2.2.2 Taxa de liberação de calor (HRR)

A taxa de liberação de calor é muitas vezes visto por fabricantes e consumidores do produto apenas como mais uma informação a ser coletada, porém, de fato, é uma das mais importantes variáveis na caracterização da inflamabilidade de um material exposto a altas temperaturas e, conseqüentemente, no risco de incêndio, [53].

Essa grandeza pode ser definida como a energia térmica liberada pelo incêndio do material analisado em função do tempo por unidade de área de superfície, podendo-se resumir, de maneira simplificada, como uma grandeza que define o tamanho do incêndio. O valor do pico da taxa de liberação de calor (PHRR) costuma ocorrer em um período de tempo muito curto em boa parte dos materiais, geralmente logo após a ignição (podendo-se determinar assim muitas vezes o tempo de ignição), sendo o PHRR um indicativo de inflamabilidade máxima de um material, [54].

Segundo Mesquita,[13], a taxa de liberação de calor não é somente uma propriedade intrínseca do material, visto que o comportamento tanto físico quanto químico do material, quando exposto a um ambiente de incêndio ou com excesso de calor, não é apenas dependente do material, mas também das condições de utilização do equipamento e da própria amostra.

A taxa de liberação de calor geralmente realiza uma trajetória de crescimento acelerado, o qual pode ser acompanhado anteriormente por um momento de indução com crescimento desprezível,[55]. Após isso, o gráfico de HRR em função do tempo pode apresentar duas configurações diferentes, podendo ser visualizado na Figura 22:

1. Primeiramente ocorre a extinção da chama, antes mesmo do pico de liberação de calor, seguido de um pico de liberação de calor e posteriormente decaimento abrupto da taxa de liberação de calor, até chegar na última fase onde ainda existe calor sendo liberado, decaindo de maneira lenta até o seu completo esgotamento;

2. Nesta configuração ocorre a extinção da chama após o pico de liberação de calor, gerando-se assim um crescimento acelerado da taxa de liberação de calor até o pico. Após, há uma taxa de liberação de calor constante até o esgotamento da queima, acompanhado por um decaimento abrupto desta taxa, concluindo-se da mesma maneira que a primeira configuração.

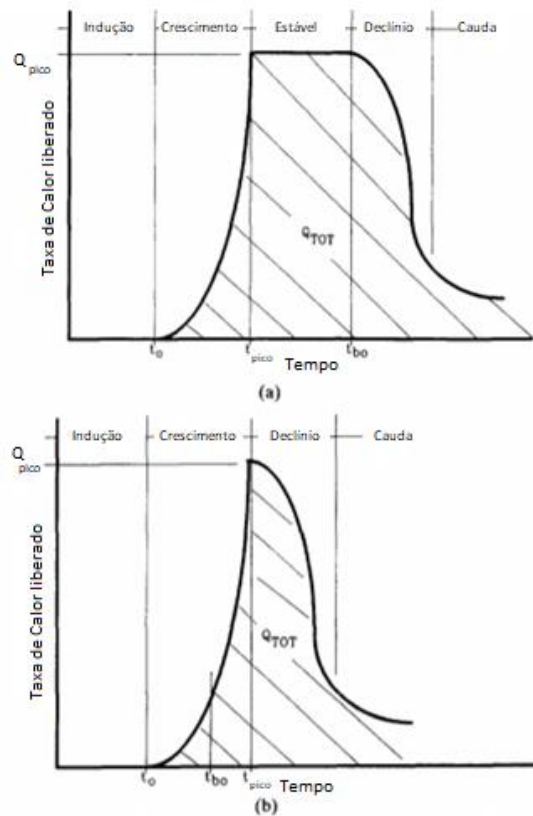


Figura 22 - Gráficos representativos da liberação de calor em função do tempo,[55].

Os dois gráficos da Figura 22 são representações ilustrativas de grande parte dos materiais quando expostos a um incêndio, porém muitos produtos, principalmente os compósitos, possuem curvas de comportamento mais complexa que as ilustradas anteriormente. Os principais exemplos são compósitos de madeira como MDF e madeiras compensadas, pois esse tipo de material, com o aumento gradual de sua temperatura em um incêndio, pode apresentar reações exotérmicas secundárias como a liberação de calor de suas resinas colantes, que são utilizadas na fabricação destes materiais.

### 3.2.2.3 Calor total liberado (THR)

O calor total liberado, comumente conhecido como THR (Total Heat Release), nada mais é que a quantidade de calor liberado por um material que está exposto a uma situação de incêndio. Utilizando-se da definição da ISO 5660, [56], o calor total liberado é a “quantidade total de calor liberado por unidade de área durante o teste inteiro”, sendo assim, a unidade desta grandeza é dada pela razão entre a quantidade de energia liberada (Mega Joules) por unidade de área ( $m^2$ ), sendo assim  $Q_a$  ( $MJ/m^2$ ).

No teste realizado pela ISO 5660, a qual é utilizada para a realização de testes de reação ao fogo no calorímetro de cone (podendo se obter resultados para diversas propriedades como taxa de calor liberada, produção de fumo, perda de massa e etc), obtém-se um gráfico semelhante ao gráfico já apresentado na Figura 22, sendo o eixo das abscissas e das ordenadas representados pelo tempo de ensaio e pela taxa de liberação de calor, respetivamente. A fim de quantificar com precisão o calor total liberado, devemos calcular a área do gráfico, através de uma integração ou da realização do somatório apresentado na Equação (3.3):

$$q'' = \sum_i q_i''(t) \Delta t \quad (3.3)$$

Onde  $q''$  é considerado o calor total liberado,  $q_i''(t)$  é a taxa de calor liberada em um instante de tempo e  $\Delta t$  é a variação do tempo entre medições de  $q_i''(t)$ .

Nesta equação, a fim de calcular o somatório, devemos relacionar o primeiro valor positivo de liberação de calor observado no início do ensaio e realizar a soma até o final do ensaio, [57]. Também podemos utilizar de softwares que podem realizar o cálculo automaticamente para facilitar o desenvolvimento da pesquisa.

#### 3.2.2.4 *Tempo de Ignição (TTI)*

O tempo de ignição, também conhecido como TTI (Time to ignition), é uma importante propriedade, pois define a velocidade em que ocorre a combustão flamejante de um material, quando este está exposto a uma fonte de calor, [58].

Com esta propriedade é possível determinar o início de combustão dos materiais, sendo que normalmente a ignição ocorre quando a superfície de um material é exposta a uma situação de incêndio e a superfície é aquecida até a temperatura de decomposição endotérmica, a qual tem relação com a temperatura de ignição, [54].

Para a determinação do tempo de ignição, geralmente utiliza-se métodos experimentais, visto que como existem uma infinidade de materiais e coberturas que reagem de maneiras diversas com a presença de um incêndio, o equacionamento desta variável torna-se inviável.

Mesmo assim, foram desenvolvidos diversas equações e metodologias para determinar o tempo de ignição de modo numérico. Um deles é apresentado por Babrauskas et al, [59], que pode ser observado na Equação (3.4):

$$t_{ig} = \pi K \rho c \left( \frac{T_{ig} - T_0}{2 \varepsilon I} \right)^2 \quad (3.4)$$

Onde o K é a condutividade térmica do material (kW/K.m),  $\rho$  é a densidade (kg/m<sup>3</sup>), c é o calor específico (kJ/kgK),  $T_{ig}$  é a temperatura da superfície em ignição (K),  $T_0$  é a temperatura ambiente (K),  $\varepsilon$  é a emissividade do material e I é a irradiância (kW/m<sup>2</sup>).

Também foi desenvolvido por Lyon et al, um modelo para entender a ignição de alguns materiais poliméricos. Neste estudo é relatado que a ignição ocorre quando há energia suficiente em uma superfície suficiente à decomposição térmica, com fluxo de combustível sólido para gasoso. Para determinação do tempo de ignição, utiliza-se da Equação (3.5), [60]:

$$t_{ig} = \sqrt{\frac{T_0 h_g}{c_o}} \quad (3.5)$$

Onde o  $T_0$  é a temperatura ambiente,  $c_o$  é a capacidade calorífica do material em temperatura ambiente e  $h_g$  é o calor de gaseificação por unidade de massa. Para finalizar este capítulo, iremos falar sobre as classificações normativas para os materiais utilizados para proteção ao incêndio.

### 3.2.3. Classificação normativa

Para realizar a classificação normativa dos materiais utilizados para proteção ao incêndio podemos utilizar a norma europeia EN 13501-1,[61]. A classificação da reação ao fogo é assim avaliada de acordo com os resultados dos testes:

- Teste de incombustibilidade (ISO 1182): Utilizado para determinar os produtos que não são significativos para o fogo, sendo relevante para as classes A1, A2, A1<sub>fl</sub>, A2<sub>fl</sub>, A1<sub>L</sub> e A2<sub>L</sub>;

- Teste de calor de combustão (EN ISO 1716): Determina o potencial máximo de calor liberado de um produto quando completamente queimado e também permite a determinação do Poder Calorífico Superior (PCS) e o Poder calorífico inferior (PCI) do material, sendo relevante para as classes A1, A2, A1<sub>fl</sub>, A2<sub>fl</sub>, A1<sub>L</sub> e A2<sub>L</sub>;
- Teste do elemento isolado (EN 13823): Permite identificar a potencial contribuição de um produto para o desenvolvimento do fogo durante a simulação de um incêndio, sendo relevante para as classes A2, A2<sub>L</sub>, B, B<sub>L</sub>, C, C<sub>L</sub>, D, D<sub>L</sub>;
- Teste de inflamabilidade (EN ISO 11925-2): permite identificar a facilidade de um determinado material entrar em ignição, sendo relevante para as classes B, C, D, E, B<sub>fl</sub>, C<sub>fl</sub>, D<sub>fl</sub>, E<sub>fl</sub>, B<sub>L</sub>, C<sub>L</sub>, D<sub>L</sub> e E<sub>L</sub>;
- Teste do comportamento em relação ao fogo através da ação de calor radiante (ISO 9239-1): determina o valor crítico de calor radiante no qual as chamas não se propagam em uma superfície horizontal, sendo relevante para pavimentos e revestimentos das classes A2, B<sub>fl</sub>, C<sub>fl</sub>, D<sub>fl</sub>.

Com a realização destes testes, deve-se separar os materiais em sete diferentes classes principais, sendo elas:

- Classe F: Um material se enquadra nesta classe quando o seu comportamento perante ao fogo é desconhecida;
- Classe E: Os materiais são classificados nesta classe quando é conhecido que este material tem uma grande contribuição para a propagação do fogo. A fim de quantificar essa contribuição, é realizado o teste de inflamabilidade, o qual expõe o material durante 15s a uma determinada intensidade de chama, determinando-se assim sua classe conforme o seu desempenho;
- Classe D: Os materiais se enquadram nesta classe quando estes cumprem os requisitos da classe E, sendo aplicados o teste de ataque térmico proposto pela ISO 11925-2 e pelo teste de elemento isolado proposto na ISO 13823;
- Classe C: Já nesta classe, a propagação do fogo neste tipo de material acontece em uma menor intensidade. Os testes aplicados são os mesmos apresentados na classe D, porém esta classe contém requisitos mínimos mais exigentes que a anterior;
- Classe B: Nesta classe a propagação do fogo é ainda mais restrita. Essa classe realiza os mesmos testes das classes C e D, porém com requisitos mínimos maiores que as demais classes acima;
- Classe A2: São considerados materiais que não contribuem para o desenvolvimento de um incêndio, sendo ótimos isolantes térmicos. São

realizados os testes da EN 13823, ISO 1716 e EN ISO 1182, com requisitos mínimos mais rigorosos que os demais;

- Classe A1: Diferentemente da classe A2, esta classe não afeta termicamente nenhuma fase de um incêndio. Ela cumpre todos os requisitos da classe A2 e para ser considerada classe A1, o material deve apresentar resultados melhores que a classe anterior.

O foco do presente estudo não é detalhar todos os métodos para definição das classes e sim realizar um trabalho numérico no Matlab, comparando as curvas de temperatura em uma situação mais próxima a real (ensaios de reação ao fogo em um calorímetro de cone) com a solução numérica obtida através da solução analítica da equação de Fourier.

Porém pode ser encontrado facilmente os pré-requisitos de cada classe na Tabela 1 da norma EN 13501-1. Além disso, existem subclassificações conforme o valor da taxa de produção de fumo e da liberação de partículas/gotas inflamadas, sendo utilizada as letras “s” e “d” para classifica-las respectivamente.

Utilizando-se a classificação da norma EN 13501-1 e também o catálogo do fornecedor das placas de silicato de cálcio Promatect-H e Promatect-200, ambos os materiais são classificados como materiais da classe A1,[\[29\]](#), sendo ótimos materiais para serem utilizados em construções, evitando-se a propagação de fogo e calor.

### ***3.3. Ensaio realizado no Calorímetro de Cone***

#### ***3.3.1. Metodologia do ensaio***

Segundo a ISO 5660, principal norma que especifica a metodologia do ensaio de calorímetro de cone, o princípio de funcionamento está na observação que o balanço de calor por combustão do material tem correlação direta com a quantidade de oxigênio requerido pela combustão, conseguindo-se assim obter valores de HRR para a amostra ensaiada,[\[56\]](#).

Apesar de serem obtidos os resultados de todas as variáveis citadas anteriormente, o objetivo deste trabalho é observar a taxa de perda de massa, a qual influenciará na porosidade do material, e inserir termopares dentro do mesmo para observar a evolução

da temperatura ao longo da espessura com o passar do tempo. Para iniciarmos, como identificado por Ferle,[54], precisamos identificar os componentes principais do equipamento, sendo estes: (1) termopilha com calibração por meio de três termopares, (2) resistência elétrica cônica, (3) sistema de suporte do medidor de fluxo de calor, (4) suporte das amostras, (5) sistema de ignição 6) célula de carga. A unidade de controle é composta por: (7) interruptores de ignição, (8) controlador da célula de carga e (9) controlador de temperatura, conforme Figura 23.

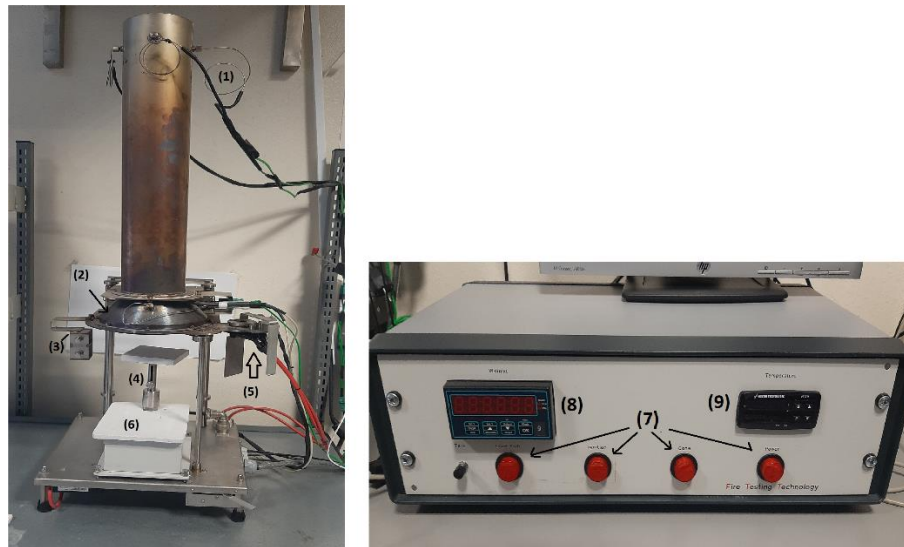


Figura 23 - Principais componentes de um calorímetro de cone e painel eletrônico de controle.

Após entender o funcionamento básico e seus componentes, pode-se então trabalhar na calibração do equipamento e realizar os testes necessários.

### *3.3.2. Calibração básica do calorímetro de cone*

Primeiramente, é preciso se atentar ao componente 6, a célula de carga, pois está explícito na norma ISO 5660 que esta precisa ter uma precisão de 0.1g e estar devidamente calibrada para fazer os testes, conforme a metodologia da norma,[56].

Além disso, para determinação do fluxo de calor desejado no material para analisar a reação ao fogo, é possível utilizar a mesma norma, ISO 5660,[56], que recomenda ensaios com valores de 25kW/m<sup>2</sup>, 35kW/m<sup>2</sup> e 50kW/m<sup>2</sup>. Foi utilizado o último valor,

visto que seria o cenário mais agressivo e quando se trata de preservar vidas, precisamos estar preparados para o pior cenário.

Para garantir que este fluxo de calor chegará ao material, como também explicado pela norma, é preciso posicionar um medidor de fluxo de calor a 25mm da base do cone e ajustar a temperatura do cone até ser identificado pelo nosso aparato que naquela distância, o fluxo de calor pretendido é atingido para posteriormente posicionar a amostra com exatamente a mesma distância da base do cone, conforme Figura 24.

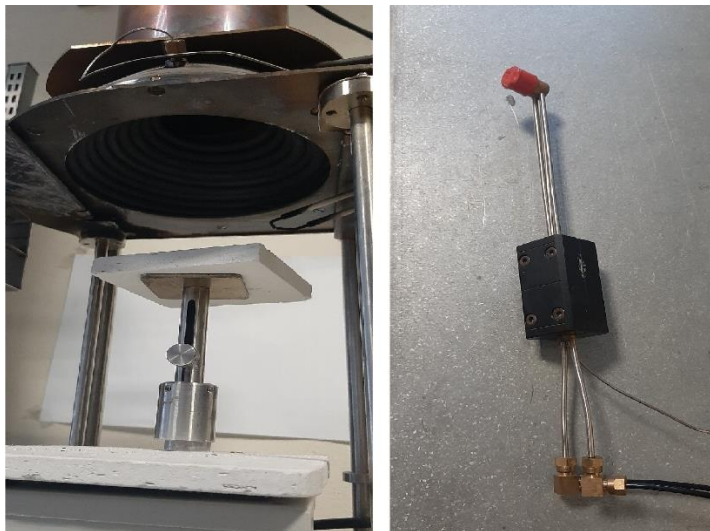


Figura 24 – Calibração do fluxo de calor na amostra

Uma outra calibração importante é a calibração da medição da taxa de liberação de calor, o qual não é de suma importância para o presente trabalho, porém foi realizada a fim de que todos os parâmetros sejam ajustados adequadamente. Na ISO 5660,[\[56\]](#), e em Ferle,[\[54\]](#), pode-se encontrar detalhadamente este procedimento, no qual consiste na utilização de um queimador padrão para a mesma distância que ensaiaremos a amostra. Com isso, realizaremos várias medições de fluxo de calor e caudal de metano em combustão para criarmos uma reta de calibração consistente.

### *3.3.3. Parâmetros de entrada e cuidados com a amostra*

Com noções de metodologia, funcionamento e calibração, agora é preciso conhecer como preparar a amostra para o ensaio. Para isso, a norma ISO 5660 impõe restrições

para o tamanho da amostra. Segundo a ISO 5660, as peças devem ter uma dimensão quadrada ( $100+0,-2$ ) mm. Porém apenas um quadrado de ( $95+0,-2$ ) mm na superfície do material revestido será exposto, enquanto as outras faces serão isoladas termicamente, para evitar troca de calor com o ambiente externo.

Na amostra foi posicionado três sensores termopar em pontos estratégicos para descobrir o campo de temperaturas dentro do material: S1, S2 e S3, sendo suas distâncias da base (parte inferior da Figura 26) são de 5, 15 e 18mm respectivamente. Sendo assim, é possível averiguar a influência da incidência da radiação do calorímetro de cone nas camadas próximas e distantes da superfície. Essa metodologia pode ser exemplificada pela Figura 25 e Figura 26.

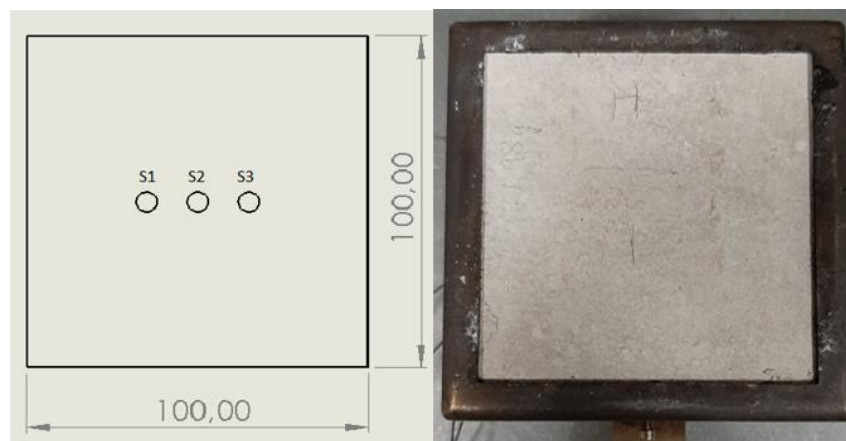


Figura 25 - Vista superior da amostra, face exposta (em branco) e face coberta (em preto).

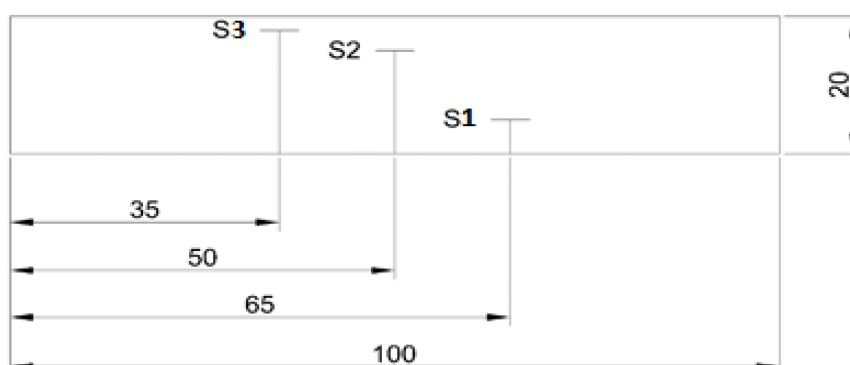


Figura 26 - Vista lateral da amostra.

Feito os furos e a inserção dos sensores termopares nestas posições, procede-se então para o software Fire Testing Technology (FTT) para colocar as seguintes informações de entrada: a massa inicial de 171.98g, a área superficial de  $88.4\text{cm}^2$ , o fluxo de calor de

50kW/m<sup>2</sup>, a espessura de 20mm, a distância do cone de 25mm e o intervalo de tempo entre cada iteração de 5s. Com o conhecimento da metodologia e a inserção dos dados de entrada, pode-se finalmente realizar os ensaios e extrair os resultados para análise dos mesmos.

### *3.3.4. Resultados Experimentais*

Os resultados obtidos neste ensaio foram utilizados como base para o desenvolvimento numérico, pois com ele foi possível extrair dados importantes, principalmente a perda de massa do material durante o ensaio. Além disso, o campo de temperaturas obtido para cada sensor será utilizado como base comparativa ao método numérico, onde implementaremos o método de Levenberg-Marquadt para otimização do parâmetro de condutividade térmica, sendo essa parte explicada com detalhes no capítulo 4.7 desta tese.

A fim de realizar uma análise mais aprofundada dos fenômenos presentes, realizou-se um ensaio no calorímetro de cone e os dados obtidos estão registrados na Tabela 17.

Tabela 17 – Dados obtidos do ensaio de calorímetro de cone.

<b>Ensaio - Promatect H</b>	
<b>Densidade (kg/m<sup>3</sup>)</b>	870
<b>Dimensões (m)</b>	100x100x20
<b>Massa inicial (g)</b>	171,98
<b>Massa final (g)</b>	148,34
<b>Temperatura máxima sensor 1 (°C)</b>	497,71
<b>Temperatura máxima sensor 2 (°C)</b>	542,055
<b>Temperatura máxima sensor 3 (°C)</b>	565,62
<b>Temperatura inicial média da amostra (°C)</b>	30,67

Esses são os dados apresentados de maneira clara e simplificada. Para ter uma noção maior de como ocorreu a evolução da perda de massa e das temperaturas em cada sensor, pode-se então plotar gráficos para analisar com maiores detalhes cada fenômeno. A perda de massa pode ser visualizada pela Figura 27 e Figura 28.

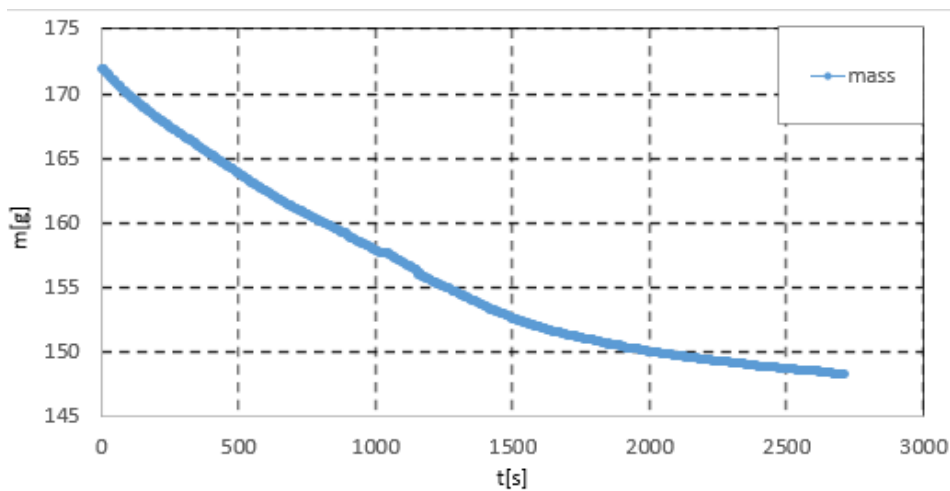


Figura 27 – Massa da amostra em função do tempo.

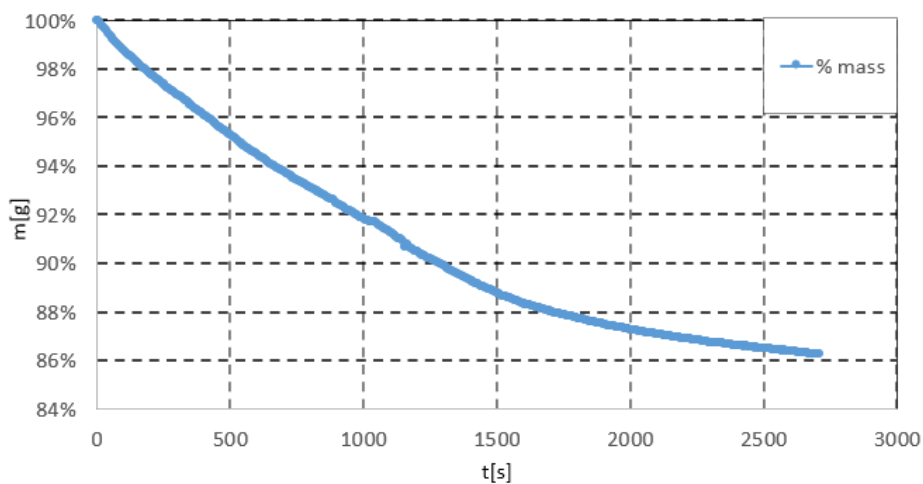


Figura 28 – Massa da amostra, em percentual, em função do tempo.

A perda de massa do material apresenta um padrão linear, onde este apresentou uma perda de massa total final de 14,38%. Esse dado será de suma importância para o capítulo posterior, onde levaremos em consideração esse perfil de perda de massa para o cálculo de porosidade, o qual influencia diretamente a condutividade térmica efetiva, como já visto no Capítulo 2.5.1 e que será abordado com maiores detalhes na solução numérica da simulação de incêndio em um calorímetro de cone.

Outro dado importante obtido foi o campo de temperaturas ao longo do tempo exposto ao calorímetro de cone. Como explicado anteriormente, utilizamos 3 sensores termopares para medição do campo de temperaturas. O resultado para este experimento pode ser visto na Figura 29:

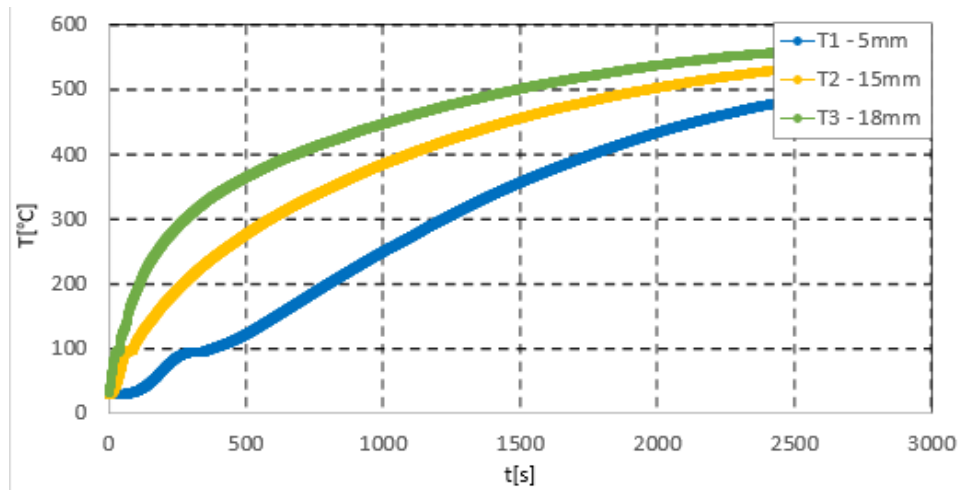


Figura 29 – Campo de temperaturas em função do tempo.

Como era de se esperar, os sensores que estavam mais distantes da face exposta ao calorímetro de cone, são os que apresentaram um menor acréscimo de temperatura ao longo do tempo, sendo assim a curva do sensor 3 abaixo da curva do sensor 2, acontecendo o mesmo fenômeno entre o sensor 2 e o sensor 1.

Além disso, é possível notar que o gradiente de temperatura em função do tempo diminui ao longo do tempo. Esse fenômeno ocorre justamente pelo fenômeno de transferência de calor ser maior quando há uma maior diferença de temperaturas e o contrário é verdadeiro, quanto menor a diferença de temperaturas entre o calorímetro de cone e a amostra, menor será o acréscimo da temperatura da amostra em função do tempo, até o sistema chegar em equilíbrio (regime permanente). Inclusive, isso justifica o porquê de ter sido utilizado o tempo de amostra de 45min, pois foi notado a estabilização da temperatura da amostra e o calorímetro de cone.

Além disso, seria possível neste tempo realizar a análise de prédios com subsolos de até 10m de profundidade e altura até 12m, onde a maioria dos segmentos descritos pela NBR 14432:2001,[\[8\]](#). Como por exemplo prédios de hospedagem, varejo, serviços profissionais e educacionais (todas as categorias apresentadas na Tabela 3, originadas dessa norma), onde estes segmentos necessitam de um tempo requerido de resistência ao fogo (TRRF) de 30min para evacuação do prédio em uma situação de incêndio. Além disso, com um modelo numérico de campo de temperaturas que se adeque ao campo de temperaturas obtidos em 45min de ensaio experimental, este modelo pode ser utilizado

para uma extensão maior de tempo, podendo-se analisar então para todos os demais casos.

## 4. Modelo numérico de transferência de calor pelo método das diferenças finitas

---

### 4.1. Introdução ao modelo de transferência de calor e massa

Para entender como modelar um problema de transferência de calor, primeiramente é necessário entender os princípios dos diferentes modos de transferência de calor. Podem-se separar os fenômenos de transferência de calor em 3 partes: condução, convecção e radiação.

A condução pode ser entendida como a transferência de energia das partículas mais energéticas para as menos energéticas de uma substância devido as interações entre as partículas,[40]. O fenômeno de condução geralmente ocorre em sólidos ou em fluídos em repouso. Os fatores que contribuem para o fenômeno de transferência de calor por condução são: a espessura do material, a diferença de temperatura entre pontos analisados e a condutividade térmica, sendo esta última já abordada no capítulo 2.5.1.

Já a convecção é um mecanismo de transferência de calor que engloba dois fenômenos: o movimento molecular aleatório (difusão) e a energia também transferida pelo movimento global de um fluído, sendo que na existência de um fluxo de moléculas movendo-se coletivamente e de um gradiente de temperatura, estes fatores contribuem para uma transferência de calor por convecção, [40]. Os fatores que contribuem para o fenômeno de transferência de calor por convecção são: o coeficiente convectivo, sendo este dependente do tipo de fluído, tipo de superfície e tipo do escoamento, a área que existe o contato com o fluído e a diferença de temperaturas entre a superfície exposta ao fluído e do próprio fluído.

Por último temos a radiação térmica, sendo esta a energia emitida pela matéria que se encontra a uma temperatura não-nula e como não é possível atingir o conhecido “Zero Kelvin”, de fato todo e qualquer material e superfície emitem radiação, em maior ou menor quantidade. Quando se pensa em radiação, geralmente remete-se a emissão por uma superfície ou sólido, porém este efeito também ocorre em líquidos e gases,[40]. A grande diferença entre a transferência de calor por radiação para os demais é que este modo de transferência de calor não requer um meio material para se propagar, sendo esta

a grande razão por recebermos energia térmica (ou calor) do sol em nossa superfície terrestre, pois consegue-se transmitir energia térmica mesmo no vácuo.

Os fatores que contribuem para o fenômeno de transferência de calor por radiação são: Constante de Boltzmann, o fator de forma (que é dependente do formato da superfície do material), a emissividade do material, a qual é uma medida de eficiência na qual uma superfície transmite energia em relação ao corpo negro, a área de emissão e as temperaturas do corpo radiante e do corpo que está a receber o calor proveniente da radiação.

Após este breve resumo sobre os métodos de transferência de calor, pode-se visualizar as suas respectivas Equações (4.1), (4.2) e (4.4):

$$Q_{cond} = k \frac{dT}{dx} \quad (4.1)$$

Onde  $Q_{cond}$  é considerada a transferência de calor por condução,  $k$  é o coeficiente de condução de calor e  $\frac{dT}{dx}$  é a taxa de variação de temperatura em relação ao espaço.

$$Q_{conv} = h_{cone}(T_{superf.} - T_{\infty}) \quad (4.2)$$

Onde  $Q_{conv}$  é considerada a transferência de calor por convecção,  $h_{cone}$  é o coeficiente convectivo,  $T_{superf.}$  é a temperatura da superfície da amostra e  $T_{\infty}$  é a temperatura do ambiente.

Para modelar de maneira mais confiável o coeficiente convectivo do ambiente, nesta tese foi utilizada como base o artigo de Dietsberger, [62], o qual realizou estudos para modelar o coeficiente convectivo do ar justamente para os ensaios de calorímetro de cone.

Pensando nisso, pode-se extrair deste artigo a Equação (4.3), a qual leva em consideração a quantidade de calor cedida pelo cone para a amostra ensaiada.

$$h_{cone} = 14.33 + 0.133 x Q_{cone} \quad (4.3)$$

Onde  $Q_{\text{cone}}$  é o calor fornecido pelo cone para a amostra ensaiada.

Para finalizar, a equação para o calor transmitido pelo fenômeno de radiação da amostra para o ambiente pode ser definida como:

$$Q_{\text{rad}} = F\sigma \epsilon (T_{\text{superf.}}^4 - T_{\infty}^4) \quad (4.4)$$

Onde  $F$  representa o fator de forma,  $\sigma$  a constante de boltzmann, igual a  $5.67 \cdot 10^{-8}$  W/m<sup>2</sup>.K e  $\epsilon$  a emissividade do material. O fator de forma leva em consideração o formato da peça que está sendo ensaiada.

Com o conhecimento dos fenômenos básicos envolvidos, é possível utilizar a equação (4.5), desenvolvida por Henderson et al e utilizada também como base no trabalho de Wang, [63, 64], sendo ela desenvolvida a partir da Equação de Fourier, sendo seus outros 2 termos complementares responsáveis pela transferência de calor por difusão mássica (proveniente da pirólise do material) e a energia proveniente da reação de decomposição respectivamente.

$$\frac{d}{dt}(\rho(T) \cdot h(T))_{pl} = \frac{d}{dx} \left( K(T) \frac{dT}{dx} \right) - \frac{d}{dx} (m' \cdot h(T))_g - Q \frac{d\rho}{dt} \quad (4.5)$$

Onde  $\rho_{pl}(T)$  representa a massa específica do material,  $h_{pl}(T)$  é a capacidade térmica da placa a pressão constante,  $K(T)$  é a condutividade térmica em função da temperatura,  $m_g'$  o fluxo mássico de gás,  $h_g$  a entalpia do gás gerado pelo aquecimento da amostra e  $Q$  é a entalpia de reação.

Para realização de simplificações nessa equação, foi utilizado técnicas de derivação matemática, as quais resultam em:

$$\frac{d}{dt}(\rho(T) \cdot h(T))_{pl} = h_{pl}(T) \frac{d\rho}{dt} + \rho_{pl}(T) \frac{dh}{dt} \quad (4.6)$$

$$\frac{d}{dx} (m' \cdot h(T))_g = m_g' \frac{dh_g}{dx} + h_g(T) \frac{dm_g'}{dx} \quad (4.7)$$

$$m'_g \frac{dh_g}{dx} = (m' \cdot C_p)_g x \frac{dT}{dx} \quad (4.8)$$

As equações (4.6), (4.7) e (4.8) foram obtidas aplicando as devidas regras de derivação (regra da cadeia ou simplesmente retirando os termos que são constantes de dentro da derivada). Para finalizar, foi desenvolvida também por Henderson et al e utilizada no trabalho de Wang, [63, 64], a equação (4.9):

$$\frac{dm'_g}{dx} = - \frac{d\rho}{dt} \quad (4.9)$$

Com isso, podemos substituir as equações (4.6), (4.7), (4.8) e (4.9) na equação (4.5) e obter então abaixo a equação geral que será utilizada ao longo desta tese.

$$(\rho(T)C_p)_{pl} \frac{dT}{dt} = \frac{d}{dx} \left( K(T) \frac{dT}{dx} \right) - m g' C_{pg} \frac{dT}{dx} - \frac{d\rho}{dt} (Q + h_{pl}(T) - h_g(T)) \quad (4.10)$$

Onde  $C_{ppl}$  é a capacidade térmica da placa a pressão constante e  $C_{pg}$  é a capacidade térmica do gás a pressão constante. Para implementação desse equacionamento, foi necessário realizar algumas considerações.

A primeira consideração é que a porosidade de cada diferença finita é integralmente gerada pela perda de massa de gás gerada pelas reações de decomposição, independente do fluxo mássico dos nós vizinhos.

A segunda consideração é necessária por ter sido utilizado o método “lagging one time step” para algumas variáveis dependentes do tempo, utilizando-se assim a temperatura do instante anterior para cálculo de condutividade térmica, massa específica, porosidade e calor específico atual.

A terceira consideração é referente as condições de fronteira. A primeira delas está no topo do material, sendo este exposto ao calor fornecido do cone e transmitindo calor por convecção e radiação. Já a segunda condição fica na base do material, onde este é isolado termicamente, então foi considerado um sistema adiabático (que não troca calor com o ambiente).

Por fim, a quarta consideração é por não ter sido possível a modelação da geometria dos ao longo do tempo, realizamos a consideração mais comum (poros esféricos), como

fez Bentz em seu artigo sobre a porosidade das placas de silicato de cálcio e consideramos o maior tamanho de poro encontrado neste mesmo estudo para análise da radiação e convecção envolvida dentro deste poro, [34]. Para determinar a transferência de massa e perda de massa da amostra, o próximo tópico será dedicado a modelar a perda de massa da amostra.

#### 4.2. Método analítico para perda de massa

A decomposição das placas de silicato de cálcio na presença de um ambiente termo agressivo como em um incêndio, faz com que neste material ocorra diversas reações complexas, as quais levam a formação de diversos produtos intermediários e finais. Para determinação dessas reações, existem diversos métodos, sendo o de melhor utilização e identificação das reações os métodos baseados em termogravimetria, sendo que este método permite conhecer os processos físicos e químicos envolvidos durante a degradação térmica dos materiais.

A análise termogravimétrica, também conhecida como TGA (Thermogravimetric analysis), é uma técnica que utiliza-se do monitoramento da variação de massa de uma amostra em função da temperatura ou do tempo em uma atmosfera onde estes parâmetros são devidamente controlados, [65].

Podemos também utilizar de métodos analíticos difundidos na literatura, como a perda de massa em função do parâmetro  $\alpha$ , sendo conhecido como fator de conversão. Este fator pode ser definido como a relação entre a parte sólida de perda de massa que resta a ser consumida sob a perda de massa total no final das reações ( $\Delta m / \Delta m_t$ ).

Após isso, pode-se considerar que, após um acréscimo térmico no material, iniciando-se em uma temperatura  $T_0$  e com uma elevação de temperatura de modo linear, a taxa de perda de massa, em função do tempo, pode ser calculada como apresentada na Equação (4.11).

$$\frac{d\alpha}{dt} = f(\alpha) * k(T) \quad (4.11)$$

É possível também formular o fator de conversão da seguinte maneira:

$$\alpha = \frac{(m_o - m(T))}{(m_o - m_f)} \quad (4.12)$$

Onde  $m(T)$  é a quantidade de massa total para um valor qualquer de temperatura  $T$ ,  $m_f$  é considerada a massa final após todas as reações e  $m_o$  sendo a massa inicial da amostra. O fator de conversão pode ser definida como a fração do sólido perdida por decomposição ao longo da sollicitação térmica,[13]. Por último tem-se a função  $k(T)$ , a qual tem relação direta com a temperatura do material, podendo ser modelado, para materiais sólidos, com a equação de Arrhenius:

$$k(T) = A \exp\left(\frac{-E}{RT}\right) \quad (4.13)$$

Onde  $A$  é um fator pré-exponencial utilizado para correção da curva,  $E$  é a energia ativação necessária para a reação (J/mol),  $R$  é a constante universal dos gases perfeitos (8.3145 J/mol.K) e  $T$  é a temperatura (K). O modelo numérico de Arrhenius, quando utilizado para uma reação química, a função do fator de conversão é utilizada da maneira apresentada na Equação (4.14):

$$f(\alpha) = (1 - \alpha)^n \quad (4.14)$$

Onde  $(1 - \alpha)$  representa a fração de massa que ainda está presente na amostra e não foi consumada pela reação. Substituindo as equações (4.13) e (4.14) em (4.11) , concluímos que:

$$\frac{d\alpha}{dt} = (1 - \alpha)^n A \exp\left(\frac{-E}{RT}\right) \quad (4.15)$$

Será utilizado desta equação diferencial para, com o auxílio do Matlab, formular as curvas de perda de massa do nosso material em função da temperatura, as quais serão essenciais posteriormente para o cálculo da condutividade térmica das placas de silicato de cálcio Promatect-H e Promatect-200.

Para a resolução do  $\alpha$  e  $\frac{d\alpha}{dt}$  e conseqüentemente a plotagem dos gráficos, foi utilizado a função presente no Matlab de resolução de equações diferenciais ordinárias chamada “ode15s”, sendo possível encontrar assim o valor de alpha correspondente para cada reação, para suas respectivas temperaturas. Partindo-se disso, foi obtido a equação

para determinação da massa da amostra em função da temperatura, sendo ela representada pela Equação (4.16):

$$m(T) = (m_o - m_{f1}) \alpha_1 + (m_{f1} - m_{f2}) \alpha_2 + (m_{f2} - m_{f3}) \alpha_3 + (m_{f3} - m_{f4}) \alpha_4 + m_{f4} \quad (4.16)$$

Onde  $m_o$  é a massa inicial,  $m_{f1}$ ,  $m_{f2}$ ,  $m_{f3}$ ,  $m_{f4}$  são as massas da amostra no final da primeira, segunda, terceira e quarta reação e  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $\alpha_3$ ,  $\alpha_4$  são os valores do fator de conversão para cada reação. Para concluir, é preciso calcular a taxa de perda de massa em função da temperatura, sendo esta informação muito importante para posteriormente ser implementada na equação de Fourier para simulação do comportamento do material em uma situação de incêndio, sendo esta representada pelo ensaio no calorímetro de cone. A taxa de perda de massa em função do tempo pode ser calculada por:

$$\frac{dm}{dt} = - \left[ \left( \frac{d\alpha_1}{dt} \right) * (m_o - m_1) + \left( \frac{d\alpha_2}{dt} \right) * (m_1 - m_2) + \left( \frac{d\alpha_3}{dt} \right) * (m_2 - m_3) + \left( \frac{d\alpha_4}{dt} \right) * (m_3 - m_4) \right] \quad (4.17)$$

Com a obtenção das equações de taxa de conversão, velocidade de reação e taxa de perda de massa, foi possível obter a Figura 30, Figura 31 e Figura 32 respectivamente para a placa de silicato de cálcio Promatect-H, todas em função da temperatura, representando assim um ambiente termicamente agressivo:

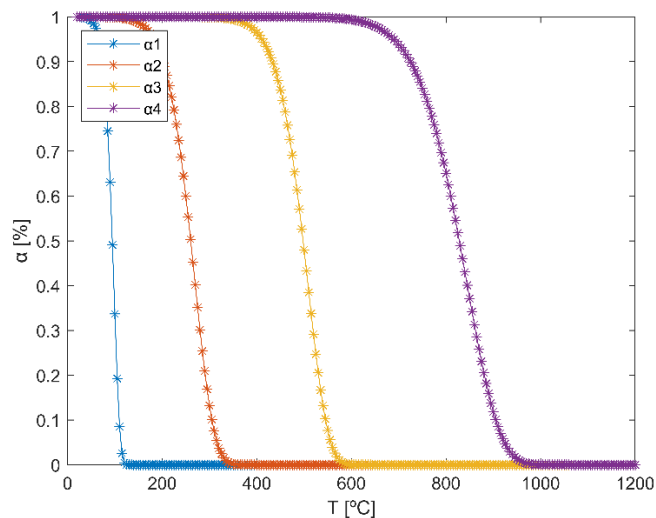


Figura 30 – Alpha para cada reação por temperatura para Promatect-H

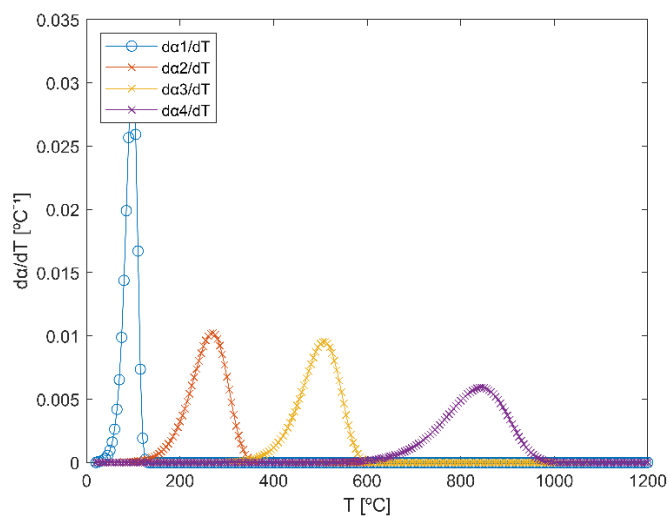


Figura 31 - Velocidade das reações por temperatura para Promatect-H

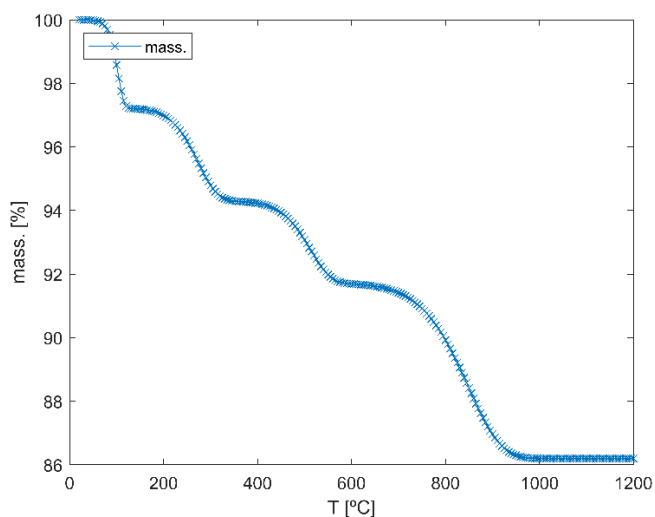


Figura 32 - Perfil da perda de massa total por temperatura para Promatect-H

Sendo que foi utilizado para cada reação os valores de  $mf_1$ ,  $mf_2$ ,  $mf_3$  e  $mf_4$ , como explicados na metodologia aplicada na Tabela 15 e na Tabela 16, para as placas Promatect-H. Os valores de energia de ativação (E), fator pré-exponencial (A), constante dos gases (R) e  $mf_1$ ,  $mf_2$ ,  $mf_3$ ,  $mf_4$  foram utilizadas conforme a Tabela 18.

Tabela 18 – Valores de energia de ativação, fator pré-exponencial e constante dos gases.

Reação	Energia de ativação (kJ/mol)	Fator pré-exponencial (adimensional)	Constante dos gases (J/mol.K)
Evaporação da água livre	60	50e7	
Desidratação do Silicato de Cálcio Hidratado	60	1.5e4	
Desidratação do Hidróxido de Cálcio	120	2.5e6	8,314
Descarbonização	150	1.5e5	

Foi utilizado como base inicial um artigo onde apresenta dados da energia de ativação para o tri-silicato de cálcio a temperatura ambiente (25°C), onde obteve-se  $E = 35$  kJ/mol, [66]. Com uma noção inicial dos valores, foi possível implementar as equações e parâmetros desse estudo para obtenção dos primeiros resultados. Posteriormente a isso, utilizou-se de tentativa e erro para encontrar o valor ideal para a energia de ativação e fator pré-exponencial para a sua respectiva reação.

Utilizando-se disso, foi descoberto que para o silicato de cálcio Promatect-H o valor da energia de ativação da primeira reação que utilizamos como base ( $E=35$ kJ/mol) era uma boa estimativa para uma primeira tentativa, mas posteriormente foi notado que a energia de ativação apresentada no artigo era inferior à que temos em nosso material ( $E_{real}=60$ kJ/mol). Isso se dá por primeiramente serem materiais com composições levemente diferentes, além da energia de ativação apresentada neste artigo ser a temperatura ambiente (25°C) e nossa energia de ativação é um valor que engloba uma variação entre o intervalo de 25°C a 100°C.

Além disso, para encontrarmos um valor ideal de fator pré-exponencial, é preciso primeiramente partir de um valor inicial, tentando encontrar como base algum material semelhante. Após alterar este valor poucas vezes, foi possível notar que quanto maior for o fator pré-exponencial, menor é a amplitude das temperaturas que ocorrem a reação, ou seja, quanto maior o fator pré-exponencial, menor será a faixa de temperaturas que o material estará se decompondo e conseqüentemente maior é a velocidade de reação.

Por exemplo, a segunda reação ocorre entre 100°C e 400°C e tem-se o valor de fator pré-exponencial igual a  $30e8$  e a terceira reação ocorre entre 400°C e 600°C e tem-se o valor de fator pré-exponencial igual a  $3e5$ . Como a segunda reação tem uma faixa de temperatura menor que a terceira reação, logo ela ocorre com uma maior velocidade

e conseqüentemente tem-se um pico de velocidade de reação maior e um fator pré-exponencial mais alto, ao contrário da terceira reação que possui uma reação mais lenta por apresentar uma faixa de temperatura maior, logo a reação é consumida com uma velocidade de reação menor e conseqüentemente menor é o valor do fator pré-exponencial. Trabalhando desta maneira, foi possível descobrir todos os valores necessários de energia de ativação e fator pré-exponencial para calcular numericamente os parâmetros necessários para a Equação de Fourier.

#### **4.3. Cálculo da porosidade de um material**

Como citado já no capítulo 2, a porosidade é considerada a razão entre volumes ( $V_{gás}/V_{total}$ ). Para melhor modelação, o volume total é dividido entre a parcela do volume pertencente ao gás, que se originou a partir das reações de decomposição formando-se assim poros, e a parcela referente ao volume do sólido, sendo assim:

$$V_{gás} = V_{total} - V_{sólido} \quad (4.18)$$

$$\zeta = \frac{V_{total} - V_{sólido}}{V_{total}} \quad (4.19)$$

Por sua vez, os volumes podem ser definidos como  $V_{total} = Adx$ ,  $V_{sól} = m(T)/\rho_{sól}$  e por sua vez a massa específica do sólido como  $\rho_{sól} = m_o/Adx$ . Partindo destas equações, podemos pôr fim concluir que:

$$\zeta = 1 - \frac{m(T)}{m_o} \quad (4.20)$$

Sendo  $m(T)$  a massa em função da temperatura, o qual foi descoberto utilizando-se dos métodos do subcapítulo anterior, 4.2, e  $m_o$  a massa inicial do material analisado.

#### **4.4. Método das diferenças finitas**

Para a análise de problemas de transferência de calor, pode-se utilizar de inúmeras ferramentas como análise experimental, analítica e numérica. O foco deste trabalho é a

realização de ensaios experimentais para determinação do campo de temperaturas presente em nosso material quando exposto a uma situação de incêndio.

Dito isso, será utilizado algumas premissas e condições de contorno para que em conjunto com a equação de calor de Fourier, obter-se um campo de temperaturas semelhante ao método experimental. Com isso em mãos, é possível analisar a condutividade térmica do material em função da temperatura do material, o qual é o objetivo de estudo desta tese.

O método de diferenças finitas (FDM) é um dos métodos comumente utilizados para discretização da Lei de Fourier. As soluções numéricas consistem inicialmente na substituição de uma Equação Diferencial Parcial (EDP) por uma aproximação discreta, [67]. Isso significa que a aproximação numérica é conhecida apenas para um número finito de pontos dentro de um domínio físico, sendo esse número finitos de pontos definidos pelo próprio usuário, sendo que geralmente quanto maior a quantidade de pontos utilizados, maior é a confiabilidade da solução numérica,[67],porém maior será a quantidade de iterações, e como consequência, será obtido uma solução numérica mais extensa. Na Figura 33 pode-se observar o passo a passo de uma solução numérica pelo método de diferenças finitas.

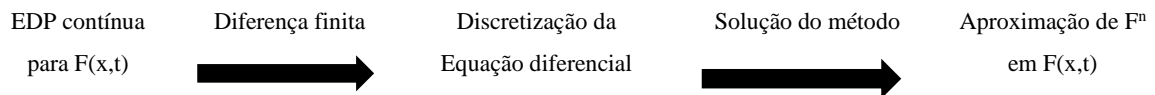


Figura 33 – Passo a passo do método de diferenças finitas, [67].

Primeiramente, pode-se começar realizando a discretização do domínio, sendo este transformado de uma EDP para uma solução em conjunto finito de  $x$  e  $t$ . A discretização de  $x$  é realizado em um intervalo  $0 < x < L$ , sendo:

$$x_i = (i - 1) \Delta x, \text{ onde } i = 1,2,3,\dots, N_e$$

Sendo  $N_e$  o número de total de nós espaciais que se encontram da base até o topo do material e  $L$  é a espessura do material que está sendo analisado. O  $\Delta x$  é o incremento de  $x$  e pode ser equacionado como a razão entre a espessura do material e a quantidade de nós menos um, como mostrado na equação (4.21):

$$\Delta x = \frac{L}{N - 1} \quad (4.21)$$

Inicialmente, utilizamos um  $\Delta x$  de 2mm, gerando-se assim um espaçamento com 11 diferenças finitas, visto que nossa amostra possui 20mm. Posteriormente, para validação do nosso código, utilizamo-nos de um  $\Delta x$  de 1mm para refinar os nossos resultados. Obtemos exatamente os mesmos resultados, logo descobrimos que não seria necessário refinar ainda mais a nossa simulação, visto que geraria apenas maior esforço computacional sem ganhos numéricos. Da mesma maneira ocorre a discretização do tempo  $t$ , sendo este entre  $0 < t < t_{max}$ .

$$t_n = (n - 1) \Delta t, \text{ onde } n = 1, 2, 3 \dots N$$

Sendo  $n$  o número de intervalos que se pretende analisar e o  $\Delta t$  é o incremento de tempo, ou seja, a cada quanto tempo que se pretende analisar, sendo este calculado de maneira semelhante ao  $\Delta x$ .

$$\Delta t = \frac{t_{max}}{N - 1} \quad (4.22)$$

A definição das diferenças finitas vem de encontro à definição de derivada, pois com a redução de  $\Delta x$ , tem-se uma melhor representação mais precisa da curva, podendo a função ser calculada pela inclinação da reta tangente entre dois pontos, como na equação (4.23):

$$\frac{dF(x)}{d(x)} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{F(x_0 + \Delta x, y_0) - F(x_0, y_0)}{\Delta x} \quad (4.23)$$

Outra expressão importante é a expansão de Taylor. Com ela, é possível aproximar as derivadas de uma função  $f(x)$  em relação a um valor ( $x_n$ ). A expansão de Taylor para uma discretização unidimensional para diferença finita à frente apresenta a seguinte configuração:

$$f(x_n + \Delta x) = f(x_n) + \Delta x \left. \frac{df}{dx} \right|_{x_n} + \frac{\Delta x^2}{2!} \left. \frac{d^2x}{dx^2} \right|_{x_n} + \frac{\Delta x^3}{3!} \left. \frac{d^3x}{dx^3} \right|_{x_n} + \dots \quad (4.24)$$

Com essa expansão de Taylor, é possível resolvê-la para o caso da primeira derivada, resultando-se na equação (4.25) :

$$f_n = \frac{f_{i+1} - f_i}{\Delta x} + E(\Delta x) \quad (4.25)$$

Sendo que  $E(\Delta x)$  representa o erro de truncamento, associado ao erro acumulado pelo fato das aproximações numéricas e o seu valor irá depender do tamanho do espaçamento determinado em seu respetivo domínio. A expansão de Taylor pode ser manipulada de maneira análoga para obtenção das soluções também para diferença finita atrás e central, observadas respetivamente nas equações a seguir:

$$f_n = \frac{f_i - f_{i-1}}{\Delta x} + E(\Delta x) \quad (4.26)$$

$$f_n = \frac{f_{i+1} - f_{i-1}}{2\Delta x} + E(\Delta x^2) \quad (4.27)$$

Como pode ser observado nas equações que representam os 3 tipos de diferença finita (atrás, central e a frente), quanto menor o valor de incremento no espaço, mais preciso será a sua solução numérica. Além disso, é interessante notar que para valores reduzidos de incremento  $\Delta x$ , o método de diferenças finitas centrais apresenta um erro associado menor, sendo assim um método mais confiável para ser implementado.

Para o caso unidimensional de transferência de calor dependente do tempo (regime transiente), são apresentados por Osizik, [43], 3 principais métodos para transformar uma EDP contínua em uma solução numérica mais simplificada: método explícito, método implícito e o método combinado.

#### 4.4.1. Método Explícito

O método explícito é muito utilizado por ser um método mais simples, pois o caso pode ser separado em 4 nós, sendo 3 destes em posições no espaço diferente para o mesmo instante atual de tempo (com valores normalmente conhecidos), sendo o único nó desconhecido o nó pertencente ao tempo posterior, como pode-se ver na Figura 34.

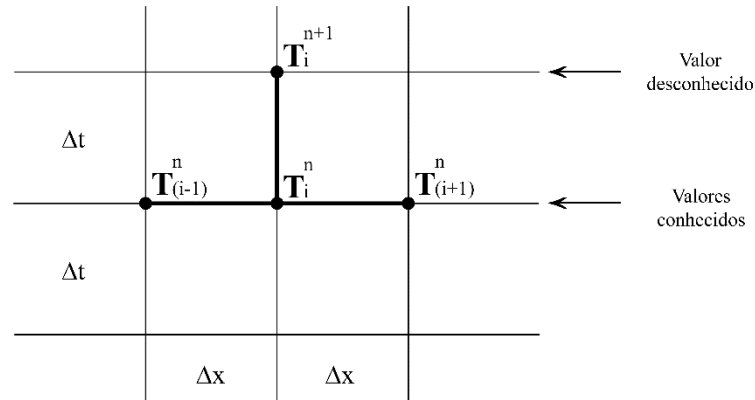


Figura 34 – Representação da malha e nós, método explícito.

Como exemplo podemos partir de um caso de condução de calor unidimensional para o regime transiente sem geração de calor interna, sendo está representada pela equação (4.28):

$$\frac{dT}{dt} = \alpha \frac{d^2T(x)}{dx^2} \quad (4.28)$$

Com isso, utiliza-se o método de diferenças finitas centrais para discretizar  $\frac{d^2T(x)}{dx^2}$  e o método de diferenças finitas a frente para discretizar  $\frac{dT}{dt}$ . Utilizando do método explícito, pode-se obter a equação (4.29):

$$\frac{T_i^{n+1} - T_i^n}{\Delta t} = \alpha \frac{T_{(i-1)}^n - 2T_i^n + T_{(i+1)}^n}{\Delta x^2} + E(\Delta t, \Delta x^2) \quad (4.29)$$

Apesar de o método explícito ser um método mais fácil de ser utilizado que os demais, ele é falho para algumas ocasiões. Uma vez o espaçamento  $\Delta x$  e as propriedades térmicas definidas, você tem um intervalo máximo de tempo  $\Delta t$  permitido que não pode exceder o valor imposto pelo critério de estabilidade, [43].

$$0 < r = \frac{\alpha \Delta t}{(\Delta x)^2} \leq \frac{1}{2} \quad (4.30)$$

Onde  $\alpha$  é representada pela difusividade térmica,  $\Delta x$  o espaçamento entre diferenças finitas e  $\Delta t$  o incremento de tempo. Quando respeitado este critério, o método

explícito é utilizado pois obtém-se resultados muito confiáveis. Já no momento que este critério passa a ser desrespeitado, os erros devidos à simplificação numérica são amplificados ao ponto de gerar resultados muito instáveis e conseqüentemente errôneos, logo devemos utilizar-nos de outros métodos, como o método implícito.

#### 4.4.2. Método Implícito

Já para o método implícito, a malha também é separada em 4 nós, sendo 3 destes nós em um instante de tempo posterior desconhecido, sendo apenas 1 nó no instante de tempo atual (e conhecido), como pode-se ver na Figura 35.

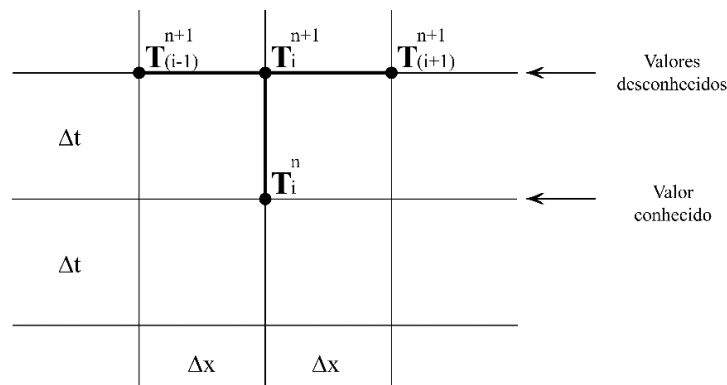


Figura 35 - Representação da malha e nós, método implícito.

Utilizando da mesma equação (4.29), é possível usar o método de diferenças finitas centrais para discretizar  $\frac{d^2T(x)}{dx^2}$  e o método de diferenças finitas a frente para discretizar  $\frac{dT}{dt}$ . Implementando o método implícito, obtém-se a equação (4.31) :

$$\frac{T_i^{n+1} - T_i^n}{\Delta t} = \alpha \frac{T_{(i-1)}^{n+1} - 2T_i^{n+1} + T_{(i+1)}^{n+1}}{\Delta x^2} \quad (4.31)$$

Como no método implícito a temperatura dos nós no instante futuro são resolvidos simultaneamente, não há um erro significativo associado a esse método.

No método explícito, quando determinado um valor de  $\Delta x$ , temos como consequência uma limitação para determinação do  $\Delta t$  (restringido pelas considerações

de estabilidade), ou seja, caso seja necessário analisar numericamente uma amostra em um tempo muito longo e estamos limitados a um valor teto de  $\Delta t$ , neste caso em específico a simulação se torna inviável pela alta quantidade de passos a serem processados.

Já no método implícito, não há restrições desta natureza, logo é possível trabalhar livremente com quaisquer valores de elemento finito, tanto em sua espessura ( $\Delta x$ ), quanto no tempo ( $\Delta t$ ).

#### *4.4.3. Método Combinado*

Além destes dois métodos citados, existe também o método combinado. Como o próprio nome diz, ele combina as equações do método implícito com a do método explícito. Sendo assim, quando obtido uma equação para temperatura em ambos os casos anteriores, pode-se fazer a junção destas duas e embutir uma constante (podemos chamar de  $\Theta$ ), resultando na equação discretizada de temperaturas para um caso de transferência de calor por condução, como pode-se ver na Equação (4.32).

$$\frac{T_i^{n+1} - T_i^n}{\Delta t} = \alpha \left[ \Theta \frac{T_{(i-1)}^{n+1} - 2T_i^{n+1} + T_{(i+1)}^{n+1}}{\Delta x^2} + (1 - \Theta) \frac{T_{(i-1)}^n - 2T_i^n + T_{(i+1)}^n}{\Delta x^2} \right] \quad (4.32)$$

Onde  $\Theta$  é o grau de implícitação. Quando o valor da constante  $\Theta$  é igual a 0, observamos a equação discretizada para o método explícito. Para  $\Theta$  é igual a 1, observamos a equação discretizada para o método implícito.

#### ***4.5. Solução numérica do método das diferenças finitas utilizando-se do Método implícito***

Dentre os métodos apresentados, foi utilizado do método implícito para a solução do nosso problema. Poderia ser optado pela utilização do método explícito, pois como dito anteriormente, é um método mais simples e fácil de ser aplicado, porém para valores

altos de  $\Delta t$  e valores baixos de  $\Delta x$ , o sistema pode cair no critério de instabilidade e o método implícito é estável para qualquer valor e intervalo de “r”.

Aplicando o método de diferenças finitas centrais de primeira ordem e segunda ordem na equação (4.10), obtém-se:

$$(\rho C_p)_{pl} \frac{dT}{dt} = \left( K_{i-1/2} \frac{T_{i-1}^{n+1} - T_i^{n+1}}{\Delta x^2} + K_{i+1/2} \frac{T_{i+1}^{n+1} - T_i^{n+1}}{\Delta x^2} \right) - mg' C_{pg} \left( \frac{T_{i+1}^{n+1} - T_{i-1}^{n+1}}{2\Delta x} \right) - \frac{d\rho}{dt} (Q + h - hg) \quad (4.33)$$

Por fim, tem-se a equação geral:

$$\frac{dT}{dt} = (A_i + D_i)T_{i-1}^{n+1} - (A_i + B_i)T_i^{n+1} + (B_i - D_i)T_{i+1}^{n+1} - E_i \quad (4.34)$$

Com:

$$A_i = \frac{K_{i-1/2}}{(\rho C_p)_{pl} \Delta x^2} \quad (4.35)$$

$$B_i = \frac{K_{i+1/2}}{(\rho C_p)_{pl} \Delta x^2} \quad (4.36)$$

$$D_i = \frac{mg' C_{pg}}{2(\rho C_p)_{pl} \Delta x} \quad (4.37)$$

$$E_i = \frac{d\rho}{dt} \left( \frac{(Q + h - hg)}{(\rho C_p)_{pl}} \right) \quad (4.38)$$

Sendo também:

$$\rho_{pl} = \rho_s(1 - \zeta) + \rho_g \zeta \quad (4.39)$$

É possível também modelar a massa específica da amostra em função da temperatura, sendo as equações utilizadas como base publicadas em um artigo escrito por Jones,[68], onde este leva em consideração a pressão e temperatura para cálculo da massa específica, calculando primeiramente o fator de aprimoramento (ou melhoria), sendo calculado por:

$$f = 1.00070 + 3.113 \times 10^{-8}P + 5.4 \times 10^{-7}t^2 \quad (4.40)$$

Calculando este fator, finalmente calcula-se a massa específica do gás pela Equação (4.41):

$$\rho = 1.1688 (1 - 0,003594f) \quad (4.41)$$

De maneira análoga a massa específica da placa, a qual foi descrita na Equação (4.39), é possível calcular o coeficiente de capacidade térmica a pressão constante, sendo:

$$(C_p)_{placa} = (C_p)_{sólido}(1 - \zeta) + (C_p)_{gás}\zeta \quad (4.42)$$

Em que  $\zeta$  é a porosidade do material, apresentada na Equação (4.20).

Para o cálculo de  $mg'$ , o qual é o fluxo mássico de gás entre diferenças finitas, é necessária a análise de balanço de massa em um volume de controle em uma diferença finita.

Foi considerado o fluxo mássico em uma diferença finita igual a diferença entre o que sai de gás do nó e a quantidade de gás que entra, em um determinado intervalo de tempo. É considerado que toda a massa de gás produzido neste intervalo de tempo em uma diferença finita é transmitida para o nó posterior, ou seja, o fluxo mássico dessa diferença finita é a diferença entre a massa de gás produzido pelo nó inferior menos a massa de gás produzido no nó atual, o qual irá sair para o nó logo acima, podendo ser representado conforme a Figura 36:

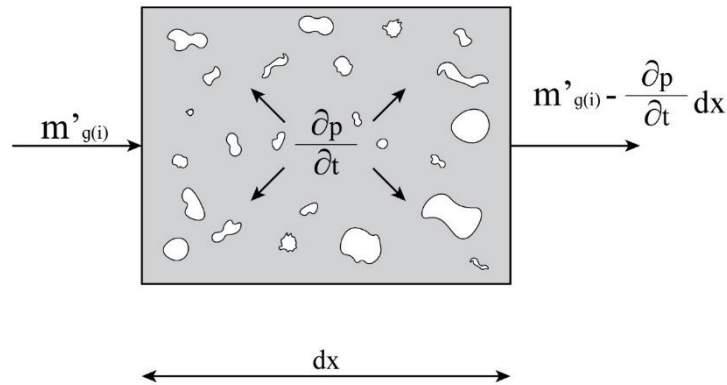


Figura 36 – Balanço de massa em um volume de controle.

O balanço de massa parte inicialmente da equação (4.14). Com ela e aplicando o método de diferenças finitas a frente, conforme abordado no livro de Ozisik,[43], para assim chegar na equação (4.43):

$$\frac{m'_g(i+1) - m'_g(i)}{dx} = - \frac{d\rho}{dt} \quad (4.43)$$

Logo, para determinação do fluxo mássico de um gás entre diferenças finitas (utilizando como exemplo o nó da base, onde  $i=1$ ), equivale-se a:

$$m'_g(2) = m'_g(1) - \frac{d\rho}{dt} dx \quad (4.44)$$

Sendo a primeira parte da equação, o valor do fluxo de mássico do nó inferior que é subtraído pela variação de massa específica dentro daquele volume de controle. Como o valor da massa específica é negativo, pois a geração de poros diminui sua massa específica, este termo torna-se positivo.

Para cálculo dessa variação de massa específica, é necessário derivar a equação (4.39) em função do tempo, sendo o resultado desta derivação a equação (4.45).

$$\frac{d\rho}{dt} = \frac{\rho_{sólido}}{m_o} x \frac{dm(T)}{dt} \quad (4.45)$$

Sabendo que  $m_0$  representa a massa inicial e a derivada da massa, a qual está em função da temperatura, em relação ao tempo, como descrito na equação (4.17), tem-se todos os ingredientes necessários para determinação desta variável.

Para finalizar todas as variáveis que serão necessárias para o cálculo da equação geral, equação (4.34), é preciso calcular a entalpia do gás, entalpia do sólido e definir as entalpias de reação para cada faixa de temperaturas.

Primeiramente, foi calculado a entalpia do gás e da placa sabendo respectivamente os seus calores específicos e temperaturas atuais. Sabendo-se delas, podemos calculá-las a partir das equações (4.46) e (4.47) logo a seguir:

$$h_g = (C_p)_g \times T \quad (4.46)$$

$$h_{pl} = (C_p)_{pl} \times T \quad (4.47)$$

Com isso em mente, é possível finalizar a definição das variáveis com a definição das entalpias de reação. Para cada reação que ocorre no material, como citado em capítulos anteriores, o material pode absorver uma determinada quantidade de energia térmica (reação endotérmica) ou pode liberar energia térmica (reação exotérmica). Sabendo disso, foi utilizado como base a Tabela 19 para definir os valores de entalpia de reação para toda a faixa de decomposição do material:

Tabela 19 – Entalpia de reação das placas de Silicato de Cálcio, [5].

<b>Reação</b>	<b>Faixa de temperatura de perda de massa e da reação</b>	<b>Temperatura assumida de reação</b>	<b>Entalpia computada (kJ/kg produto)</b>
Evaporação da água livre	25°C a 100°C	75°C	2330 kJ/kg água
Primeira fase de desidratação (Hidrato)	100°C a 400°C	125°C	1440 kJ/kg água
Segunda fase de desidratação (Hidróxido)	400°C a 600°C	450°C	5660 kJ/kg água
Descarbonização	600°C a 1000°C	750°C	3890 kJ/kg CO <sub>2</sub>

Com a fórmula geral e todas as suas variáveis bem definidas, foi aplicado as condições de fronteira, as quais estão presentes na base da placa (para o nó  $i=1$ ) e para o topo da placa (para o nó  $i=N$ ) para determinarmos as equações que as regem.

O material está sendo ensaiado em um calorímetro de cone para obter-se uma representação mais perto da realidade de um incêndio em uma estrutura. Para melhor entender os fenômenos presentes, pode-se utilizar da Figura 37 para visualização.

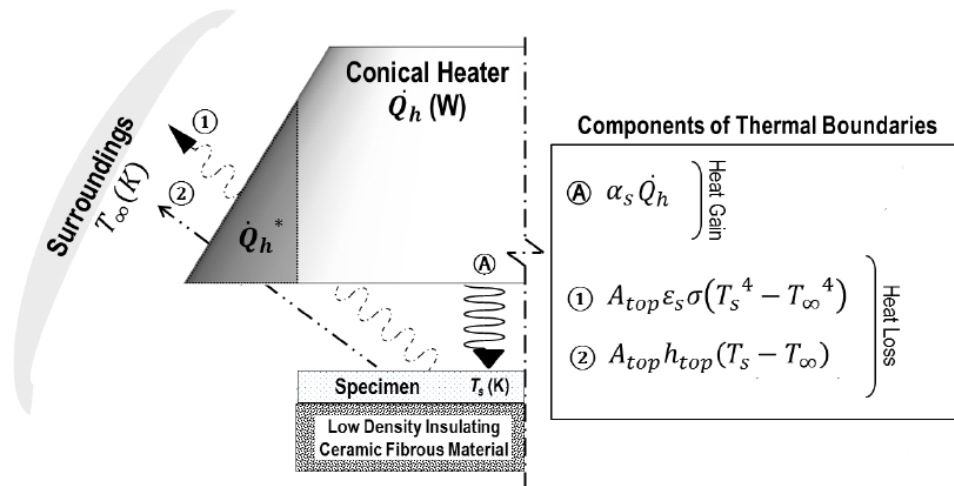


Figura 37 – Representação dos fenômenos térmicos em um calorímetro de cone, Adaptado, [69].

Sendo  $\alpha_s$  o fator que leva em consideração o calor da parte refletida, visto que o material não absorve 100% do calor recebido. Como podemos ver na Figura 37, as condições de contorno das faces laterais e a base foram consideradas superfícies adiabáticas, isso significa que não está se considerando nenhum efeito de troca de calor nas mesmas. Já a face exposta ao cone, está irá receber calor proveniente do cone e conduzi-la para o interior do material e a perda de calor por convecção e radiação. A utilização dessas condições de contorno e sua influência serão exploradas a seguir.

Para a primeira condição tem-se que:

Condição de contorno na base da amostra ( $i=1$ ):

$$K(T) \frac{dT}{dx} = 0 \quad (4.48)$$

Aplicando diferença finita central, como apresentada na Equação (4.27), para transformar a EDO em uma função  $f(x,T)$  e sabendo que  $k(T)$  é diferente de 0, concluímos que  $T_0=T_2$  para  $i=1$ . Com essa conclusão, podemos substituí-la na Equação (4.34) e chegar em uma solução particular para a base da amostra, a qual é considerada uma fronteira adiabática, sendo ela apresentada pela Equação (4.49).

$$\frac{dT}{dt} = ((A_1 + B_1) x (T_2^{n+1} - T_1^{n+1})) - E_i \quad (4.49)$$

Para o caso de fronteira  $i=N$  (superfície do material ensaiado no calorímetro de cone), devemos considerar os efeitos de radiação e convecção que saem do material e o calor fornecido pelo cone, sendo assim:

$$Q_{cond} + q'_{cone} = Q_{conv} + Q_{rad} \quad (4.50)$$

Substituindo as equações (4.1), (4.2) e (4.4), que são equações para o cálculo da transferência de calor por condução, convecção e radiação na Equação (4.50) e aplicando método de diferenças finitas centrais como na Equação (4.27), obtem-se a Equação (4.51):

$$k \left( \frac{T_{i+1}^{n+1} - T_{i-1}^{n+1}}{2\Delta x} \right) + \epsilon q'_c = h(T_N - T_\infty) + F\sigma \epsilon ((T_N^{n+1})^4 - T_\infty^4) \quad (4.51)$$

Partindo da Equação (4.51), isolando-se  $T_{i+1}^{n+1}$  e substituindo na equação (4.34), obtemos a equação final para  $i=N$ :

$$\begin{aligned} \frac{dT}{dt} = & (A_N + B_N)T_{N-1}^{n+1} + (B_N H_N - D_N H_N - A_N - B_N)T_N^{n+1} \\ & + (B_N - D_N)[G_N((T_N^{n+1})^4 - T_\infty^4) - H_N T_\infty - L_N] \end{aligned} \quad (4.52)$$

Sendo:

$$G_N = \frac{2\sigma \epsilon \Delta x}{k} \quad (4.53)$$

$$H_N = \frac{2h\Delta x}{k} \quad (4.54)$$

$$L_N = \frac{2 \epsilon q'_c \Delta x}{k} \quad (4.55)$$

Com as equações para os 3 casos (base do material em sistema adiabático, caso geral ao longo da espessura do material e topo exposto a uma condição de incêndio), torna-se possível então modelar todas essas equações e posteriormente utilizar o Método de Levenberg-Maquardt para, após simulada no Matlab essas equações, o algoritmo corrija os valores de condutividade térmica para que nossa curva de temperaturas esteja alinhada com a curva experimental e com isso obter resultados mais confiáveis.

#### 4.5.1. Modelo de condutividade térmica efetiva do material

Como já salientado nesta tese, a condutividade térmica de um material não pode ser considerado um valor fixo. Isso é verdade, pois como pode-se ver em diversos estudos, a condutividade térmica está atrelada a variáveis como temperatura, pressão, material, reações químicas existentes, porosidade, entre outras.

O foco do nosso estudo é, ao invés de se utilizar uma condutividade térmica constante como usual, utilizar de um modelo existente, o qual leva em consideração a variação de temperatura e porosidade do material, e, por consequência, as reações existentes no material. Por fim, tudo isso justifica a utilização do modelo de Russell, para obter curvas de temperatura mais confiáveis para o nosso material exposto ao incêndio, sendo esta equação apresentada no capítulo Estado da Arte, pela Equação (2.6).

Conhecendo essa equação, é necessário então saber como determinar o coeficiente de condutividade térmica do gás, sendo essa parcela proveniente do surgimento dos poros do material. Para o cálculo da condutividade térmica de um poro, é preciso levar em consideração 2 efeitos: a parcela referente a radiação que um poro transmite em sua

superfície e a parcela referente a condução que é transmitida pelo gás que circunda o poro

Sabendo-se disso, então conclui-se que:

$$K_g = K_{rad.} + K_{cond.} \quad (4.56)$$

Para determinarmos esses parâmetros, existe na literatura vários estudos que buscam entender ambos os fenômenos nos poros de um material. Para o cálculo da condutividade térmica por radiação em um material poroso, a principal referência é o estudo de Loeb,[70], o qual definiu que o  $K_{rad.}$  pode ser determinado por:

$$K_{rad} = \frac{16}{3} r \sigma \epsilon T^3 \quad (4.57)$$

Onde  $r$  é o raio da circunferência do poro,  $\sigma$  é o coeficiente de Stefan-Boltzmann,  $\epsilon$  é a emissividade do material e  $T$  a temperatura absoluta, em Kelvin.

Para determinação da condutividade térmica por condução do gás em um poro, segundo Smith,[39], a condutividade do ar pode ser calculada utilizando-se da seguinte equação:

$$K_{rad} = K_{cond,0} \left( \frac{T}{T_0} \right)^{0.8} \quad (4.58)$$

Onde temos  $T_0$  como a temperatura ambiente,  $K_{cond,0}$  como a condutividade térmica do ar a temperatura ambiente ( $K_{cond,0} = 0,0246 \text{ W/m.K}$ ) e  $T$  a temperatura no instante analisado. Assim finalizamos o cálculo de  $K_g$ , possibilitando o cálculo da condutividade térmica efetiva pelo modelo de Russell, permitindo finalmente a plotagem das curvas de temperatura ao longo da espessura do material.

Para verificarmos a veracidade do nosso código, iremos comparar as curvas de temperatura obtidas pela solução numérica com 2 casos que existem soluções analíticas na literatura. Com isso, podemos então averiguar se o método implícito utilizado neste

trabalho é efetivo ou se ele apresenta grandes erros comparado com a solução analítica de diferentes casos de problemas de transferência de calor.

#### 4.6. Validação da solução numérica – Método Implícito x solução analítica

##### 4.6.1. Caso 1 – Placa com fluxo de calor constante e lado adiabático

Para fazermos essa validação, utilizamo-nos de 2 casos diferentes de transferência de calor obtidos pelos artigos publicados no portal da Universidade de Nebraska-EUA.

O primeiro caso é referente a uma placa, sendo que está apresenta duas condições de fronteira: para  $X=0$ , a amostra está exposta a um fluxo de calor líquido e constante, parecida com o caso apresentado nessa tese. Já a segunda condição de fronteira, para  $X=L$ , o material está isolado termicamente, ou seja, é uma condição de fronteira adiabática. Na Figura 38 pode-se observar o caso proposto no artigo de Filippo Beck,[71].

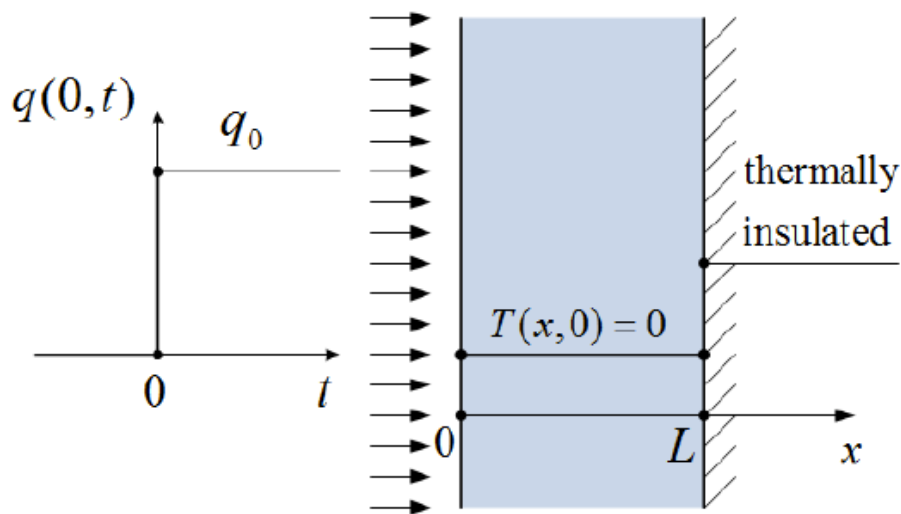


Figura 38 – Representação esquemática do caso em análise,[71].

Como o caso trabalhado nesta tese tem uma complexidade maior, ao ponto de não existir solução analítica para ele, iremos então simplificar a nossa solução numérica para está solução analítica existente, para averiguarmos a efetividade da solução numérica proposta.

Para este caso, temos como condições:

$$\frac{dT}{dt} \frac{1}{\alpha} = \left( \frac{d^2T}{dx^2} \right) \quad (0 < x < L; t > 0) \quad (4.59)$$

$$-K \left( \frac{dT}{dx} \right)_{x=0} = q_0 \quad (t > 0) \quad (4.60)$$

$$\left( \frac{dT}{dx} \right)_{x=L} = 0 \quad (t > 0) \quad (4.61)$$

$$T(x, 0) = 0 \quad (0 < x < L) \quad (4.62)$$

No artigo em questão, este fornece o código em Matlab com essas condições de fronteira levadas em consideração e a solução analítica adimensional para o campo de temperaturas, sendo esta solução representada pela Equação (4.63).

$$\tilde{T}(\tilde{x}, \tilde{t}) = 2\sqrt{\tilde{t}} \cdot \text{ierfc} \left( \frac{\tilde{x}}{2\sqrt{\tilde{t}}} \right) + 2\sqrt{\tilde{t}} \cdot \text{ierfc} \left( \frac{2 - \tilde{x}}{2\sqrt{\tilde{t}}} \right), \quad 0 \leq \tilde{t} \leq 0.15 \quad (4.63)$$

$$\begin{aligned} \tilde{T}(\tilde{x}, \tilde{t}) = & \left( \tilde{t} + \frac{\tilde{x}^2}{2} - \tilde{x} + \frac{1}{3} \right) - 2 \frac{\cos(\pi\tilde{x})}{\pi^2} \exp(-\pi^2\tilde{t}) \\ & - \frac{\cos(2\pi\tilde{x})}{2\pi^2} \exp(-4\pi^2\tilde{t}), \quad \tilde{t} > 0.15 \end{aligned}$$

Onde:

$$\tilde{T} = \frac{T}{q_0 L / k} \quad \tilde{x} = \frac{x}{L} \quad \tilde{t} = \frac{\alpha t}{L^2} \quad (4.64)$$

Em nosso caso, se considerarmos que as propriedades térmicas não variam com o aumento da temperatura (são constantes), o coeficiente convectivo é nulo, emissividade nula e desconsiderarmos os efeitos de transferência de calor e massa pelas reações envolvidas, o nosso código fica exatamente com as mesmas propriedades e condições de fronteira e, com isso, podemos utilizar dessa solução numérica para comparar com a solução analítica apresentada pelo artigo estudado.

Primeiramente, iremos comparar as curvas de temperatura que podemos obter utilizando-se de ambos os métodos. Com isso, obtemos a Figura 39 abaixo:

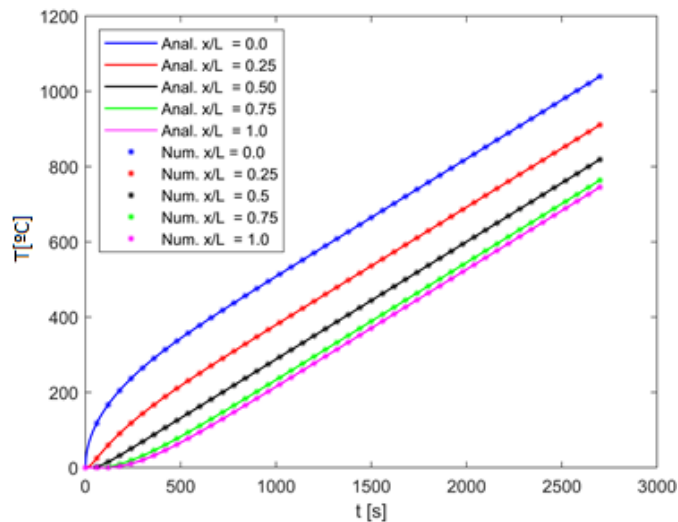


Figura 39 – Comparação entre campo de temperaturas numérica e analítica – Caso 1.

Como pode-se observar na Figura 39, a utilização da metodologia numérica do método implícito é extremamente confiável, pois todos os pontos numéricos obtidos em todas as curvas estão acima da linha analítica. Para confirmar isso, utilizamos da função max no Matlab para comparar o erro ponto a ponto e descobrir qual foi o maior erro obtido em cada curva representada. O resultado do erro obtido pode ser visto na Tabela 20.

Tabela 20 – Maior erro relativo entre solução numérica e solução analítica – Caso 1.

	Erro (%)
<b>X/L= 0</b>	1.08
<b>X/L= 0.25</b>	0.08
<b>X/L= 0.50</b>	0.04
<b>X/L= 0.75</b>	0.02
<b>X/L= 1</b>	0.02

Com isso, podemos observar que o maior erro obtido entre a solução numérica e a solução analítica é de 1.08%, sendo este valor observado quando  $X/L=0$ , ou seja,  $X=0$ . Excluindo este valor, o maior erro relativo é de 0.08%, logo pode-se observar que a nossa solução numérica está sendo implementada com sucesso e que o método implícito é de grande confiabilidade, validando assim o nosso trabalho.

#### 4.6.2. Caso 2 – Placa com geração de calor interna e fronteiras adiabáticas

Para definir um segundo caso, procuramos comparar a nossa solução numérica com um caso que tenha diferentes condições de fronteira e principalmente, que tenha uma geração de calor interna para validarmos que o efeito de absorção de calor pelas reações envolvidas na placa, estão sendo modeladas de maneira correta. Sabendo que a absorção (ou liberação) de calor pelas reações está sendo modelada de maneira correta, assim como as condições de fronteira de fluxo de calor prescrito no caso 1, podemos então concluir que realizamos um trabalho com um alto nível de confiabilidade.

Pensando-se nisso, utilizamos o artigo de James Beck, [72], o qual propõe a solução analítica de um problema de transferência de calor. Neste artigo, para ambas as fronteiras ( $X=0$  e  $X=L$ ) a condição de fronteira é representada por uma condição adiabática (sem troca de calor com o ambiente externo). Já para  $X=0$  até  $X=L_1$ , temos geração de calor interna, a qual iremos determinar o valor como constante e relacionar com a nossa tese como a quantidade de calor absorvida pela amostra. Na Figura 40 pode-se observar uma representação esquemática do problema analisado.

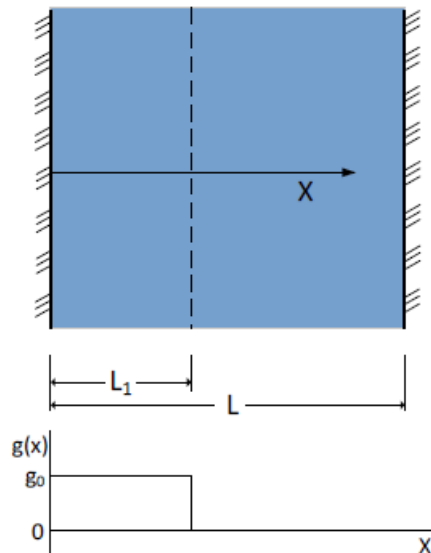


Figura 40 – Geração de calor interna e superfícies adiabáticas, [72].

Para este caso, temos como condições:

$$\frac{dT}{dt} \frac{1}{\alpha} = \left( \frac{d^2T}{dx^2} \right) + \frac{g(x)}{k} \quad (0 < x < L; t > 0) \quad (4.65)$$

$$\left( \frac{dT}{dx} \right)_{x=0} = 0 \quad (t > 0), \quad \left( \frac{dT}{dx} \right)_{x=L} = 0 \quad (t > 0) \quad (4.66)$$

$$\begin{aligned} g(x) &= g_0, \quad 0 < x < L_1 \\ g(x) &= 0, \quad L_1 < x < L \end{aligned} \quad (4.67)$$

$$T(x, 0) = 0 \quad (4.68)$$

Seguindo o exemplo do caso anterior, o artigo nos fornece o código em Matlab com essas condições de fronteira levadas em consideração e a solução analítica adimensional para o campo de temperaturas, sendo está solução representada pela Equação (4.69).

$$\begin{aligned} \tilde{T}(\tilde{x}, \tilde{t}) &= \tilde{L}_1 \tilde{t} + \frac{1}{12} \left\{ \begin{aligned} &\tilde{x}_+^3 - 3\tilde{x}_+^2 + 2\tilde{x}_+ \\ &- [\tilde{x}_-^3 - 3\text{sign}(\tilde{x}_-)\tilde{x}_-^2 + 2\tilde{x}_-] \end{aligned} \right\} \\ &\quad - 2 \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\cos(\beta_m \tilde{x}) \sin(\beta_m \tilde{L}_1)}{\beta_m^3} e^{-\beta_m^2 \tilde{t}} \end{aligned} \quad (4.69)$$

Onde:

$$\tilde{T} = \frac{T}{\frac{g_0 L^2}{k}} \quad \tilde{x} = \frac{x}{L} \quad \tilde{L}_1 = \frac{L_1}{L} \quad \tilde{t} = \frac{\alpha t}{L^2} \quad (4.70)$$

$$\tilde{x}_+ = \tilde{x} - \tilde{L}_1 \quad \tilde{x}_- = \tilde{x} + \tilde{L}_1 \quad (4.71)$$

Como fizemos anteriormente no capítulo 4.6.1, iremos adaptar a nossa solução numérica para as condições de fronteira impostas pelo artigo em estudo. Neste mesmo artigo, é apresentado um código em Matlab, o qual realiza os cálculos do campo de temperaturas para a solução analítica. Se considerarmos que o calor proveniente do cone, convecção e emissividade são nulas, desconsiderarmos os efeitos de transferência de massa e que o aumento da temperatura se dá unicamente pelo efeito do calor absorvido

pela reação de evaporação da água, conseguimos então, com leves alterações, comparar a solução numérica com a solução analítica e ver se a parte da equação referente ao calor absorvido pelas reações está sendo computado de maneira correta ou não. Com isso, obtemos a o campo de temperaturas para ambas as soluções na Figura 41.

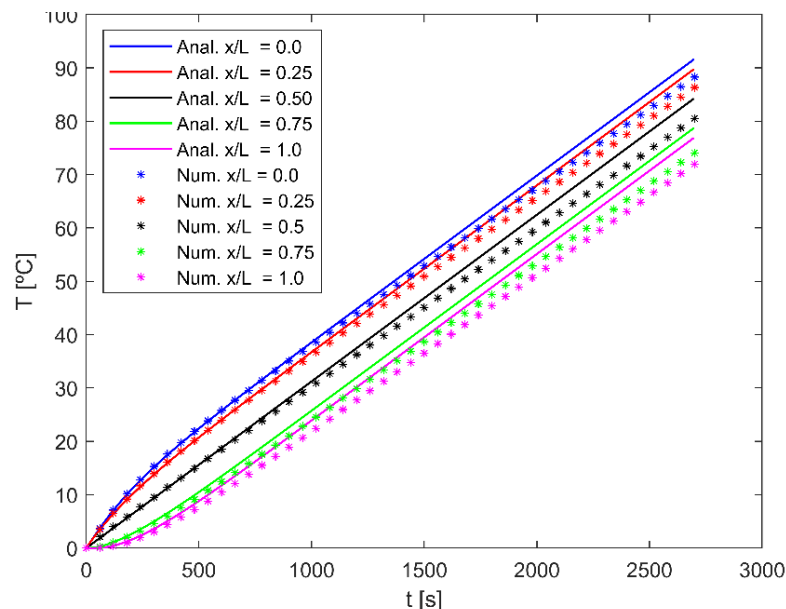


Figura 41 – Comparação entre campo de temperaturas numérica e analítica.

Como pode-se observar na Figura 41, novamente a utilização da metodologia numérica do método implícito mostra-se muito confiável, visto que as curvas numéricas estão muito próximas da solução analítica. Para ficar mais claro, iremos realizar o cálculo do maior erro relativo obtido para cada curva representada. O resultado do erro pode ser visto na Tabela 21.

Tabela 21 - Maior erro relativo entre solução numérica e solução analítica – Caso 2.

	Erro (%)
<b>X/L= 0</b>	1.96
<b>X/L= 0.25</b>	2.02
<b>X/L= 0.50</b>	2.21
<b>X/L= 0.75</b>	2.14
<b>X/L= 1</b>	2.11

O maior erro relativo obtido entre a solução numérica e a solução analítica é de 2.21%, sendo este valor observado quando X/L=0.5, ou seja, no meio da placa. Os

demais erros também ficam na casa de 2%, sendo um erro totalmente aceitável por ser insignificante e por estarmos comparando uma solução numérica com uma solução analítica, sendo assim esperado que as soluções não tivessem resultados totalmente iguais. Essa seção é de alta relevância e importância, pois podemos concluir que a nossa solução numérica é realmente confiável para as condições de contorno aplicadas e também modelamos de maneira correta a absorção de calor interna devido as reações existentes no material, validando-se então todo o nosso esforço para modelar uma solução numérica para o ensaio de calorímetro de cone.

Agora que temos todas as equações e sabemos que o nosso código tem uma alta confiabilidade, podemos então implementar o algoritmo de Levenberg-Maquardt para tentarmos encontrar um valor ideal de condutividade térmica para cada um dos sensores e o valor otimizado global da mesma.

#### ***4.7. Implementação do algoritmo de Levenberg-Maquardt – Análise Inversa do Problema de Condução de Calor***

A análise inversa do problema de condução de calor é um método ótimo para ser utilizado em conjunto com o método implícito e com resultados experimentais, pois com essa metodologia pode ser utilizada para estimar a variação de temperatura, fluxo de calor ou verificar o comportamento de propriedades térmicas em relação a variação de temperatura,[16].

Com a implementação do algoritmo de Levenberg-Maquardt, conseguimos criar um algoritmo iterativo de otimização da variável em análise, a condutividade térmica do sólido, o qual por sua vez influencia a condutividade térmica efetiva do material. Esse algoritmo é muito utilizado para quando se tem uma solução analítica/numérica teórica e uma solução experimental. Quando obtemos essas duas soluções e queremos otimizar um parâmetro de entrada na solução numérica, utilizamos deste algoritmo para soluções onde envolvem problemas de quadrados mínimos não linear,[73]. Com isso, a abordagem da tese fica exemplificada pelo fluxograma da Figura 42:

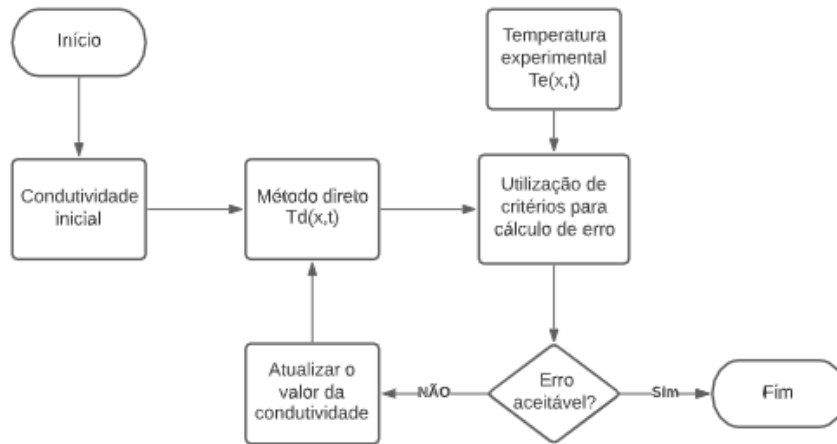


Figura 42 – Fluxograma do modelo numérico proposto,[16].

Sabendo que as medições experimentais do campo de temperaturas são inalteráveis, a ideia do algoritmo é, com um valor inicial de condutividade térmica, obter resultados numéricos e compara-los com os resultados obtidos experimentalmente. Caso os valores obtidos numericamente não corresponderem com a realidade (medição experimental), o próprio algoritmo altera o valor da condutividade térmica e por tentativa e erro, este algoritmo trabalha para atingir um valor de condutividade térmica que faça com que as curvas de temperatura resultantes tenham o menor erro atrelado possível e as condições de erro serão explicadas ainda nessa seção.

Com o conhecimento teórico da metodologia, precisamos entendê-lo na prática como se dá a implementação do mesmo. Inicialmente, sabemos pela Figura 37 e pelo modelamento matemático que estamos lidando com um caso de condução em regime transiente. Para analisar o avanço da temperatura experimental, utilizamos de termopares ao longo da espessura do material, como podemos verificar na Figura 43.

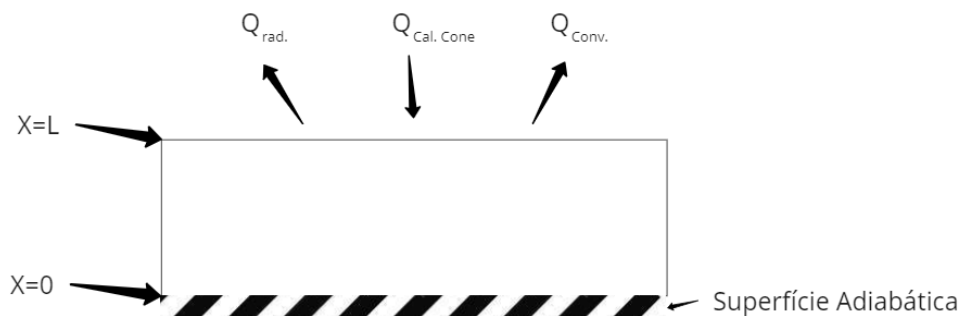


Figura 43 – Representação dos sensores ao longo da espessura do material,[16].

Onde os sensores são definidos de S1... Sm, bem como também o campo de temperaturas experimentais Yi é definido para i=1 até m e as temperaturas obtidas pelo método direto como Ti(pj),[43].

Com essas definições claras, podemos implementar o método dos mínimos quadrados como base para a solução da análise inversa, sendo essa técnica muito utilizada para minimizar a soma dos quadrados da diferença entre os valores experimentais e valores numéricos, sendo mostrado isso na Equação (4.72).

$$S(p) = \sum_{i=1}^n (Y_i - T_i(p_j))^2, \quad j = 1, 2 \dots m \quad (4.72)$$

Onde pj é o vetor com o parâmetro desconhecido que pretendemos otimizar, logo pj=(K)T. Uma técnica aprendida nas aulas de cálculo é derivar a equação e igualar a zero, para assim encontrar o ponto ótimo de S, ficando a equação descrita como (4.73):

$$\frac{dS}{dp_j} = 2 \sum_{i=1}^n \left( \frac{dT}{dp_j} \right) (T_i(p_j) - Y_i) = 0, \quad j = 1, 2 \dots m \quad (4.73)$$

$$\frac{dS}{dp_j} = 2X^T(T - Y) = 0 \quad (4.74)$$

Sendo que para a Equação (4.74), temos:

$$T = \begin{pmatrix} T_1 \\ T_2 \\ \vdots \\ T_n \end{pmatrix}, \quad Y = \begin{pmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \vdots \\ Y_n \end{pmatrix}, \quad p = \begin{pmatrix} p_1 \\ p_2 \\ \vdots \\ p_n \end{pmatrix}$$

A única variável que faltou determinar foi XT. Ela é considerada em nossa solução como a matriz sensibilidade e ela pode ser obtida pela diferenciação da matriz

temperaturas em relação ao parâmetro que pretende ser otimizado, a condutividade térmica do material, sendo assim definida como:

$$X = \frac{dT}{dp^T} = \begin{pmatrix} \frac{dT_1}{dp_1} & \dots & \frac{dT_1}{dp_m} \\ \frac{dT_2}{dp_1} & \dots & \frac{dT_2}{dp_m} \\ \vdots & & \\ \frac{dT_n}{dp_1} & \dots & \frac{dT_n}{dp_m} \end{pmatrix} \quad (4.75)$$

São importantes esses equacionamentos para sabermos realmente como se dá o funcionamento do algoritmo, para saber justamente como atuar na implementação do mesmo. O algoritmo de Levenberg-Marquadt modificado está sendo utilizado, pois ele resolve problemas não lineares e como citado no estado da arte, é o método que combina as qualidades do método de Newton e steepest descente, não necessitando boa estimativa inicial e ao mesmo tempo não demanda muito tempo para convergir para um resultado confiável. É possível visualizar a equação final logo abaixo:

$$p^{k+1} = p^k + (J^T J + \mu_k I)^{-1} J^T (Y - T) \quad (4.76)$$

Onde  $\mu_k$  é o coeficiente de amortecimento do parâmetro  $p$ . Caso  $\mu_k = 0$ , retornamos para o método numérico de Newton e para  $\mu_k = \infty$ , essa equação torna-se o método de steepest descent. No algoritmo, os cálculos começam com um alto fator de amortecimento e diminui com a convergência do resultado. Além deste fator, temos  $J$ , sendo está a matriz jacobiana, sendo ela  $J = \frac{dT}{dp^T} = X$ .

O ciclo do algoritmo de Levenberg-Marquadt repete-se até que um dos critérios de divergência seja atingida. Os critérios definidos pelo algoritmo são:

$$\begin{aligned} S^{k+1} &< \epsilon_1 \\ \frac{|S^{k+1} - S^k|}{S^{k+1}} &< \epsilon_2 \\ |p^{k+1} - p^k| &< \epsilon_3 \end{aligned} \quad (4.77)$$

Onde,  $\epsilon_1 = \epsilon_2 = \epsilon_3 = 10^{-5}$

No próximo tópico iremos então implementar essa metodologia para o nosso caso, tanto para os sensores 1, 2 e 3 separadamente, para encontrar condutividade térmica do sólido ideal para cada caso, quanto também aplicaremos o algoritmo para os 3 sensores em simultâneo, para obter o menor erro possível na amostra como um todo.

#### 4.8. Resultados obtidos e Discussões

##### 4.8.1. Aplicação do método direto com a condutividade térmica do fabricante

Com todas as metodologias em conjunto (ensaio de secagem, ensaio no calorímetro de cone, definição de todas as reações, utilizando do método implícito direto), podemos então calcular o campo de temperaturas numérico com a condutividade do fornecedor de  $0.17\text{W/m.K}$  e comparar com os resultados obtidos experimentalmente em laboratório. O resultado disso pode ser visualizado na Figura 44:

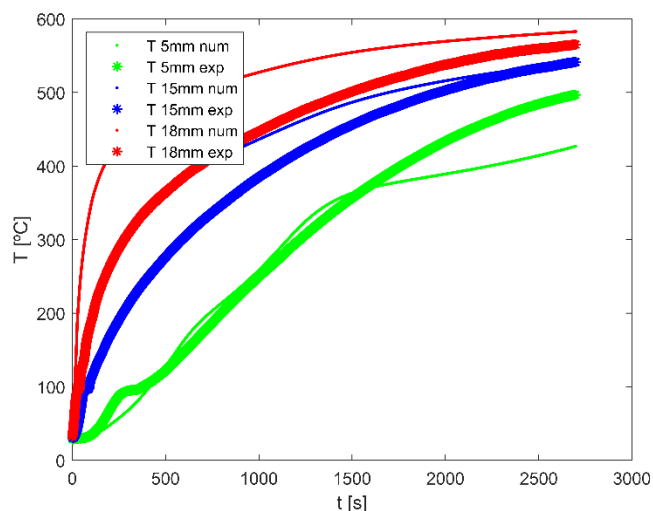


Figura 44 - Campo de temperaturas para a condutividade térmica fornecida pelo fabricante.

Como representado pela legenda, as linhas grossas são as curvas experimentais e as cores vermelho, azul e verde representam o Sensor 1, 2 e 3 respectivamente. É possível calcular o erro relativo entre o valor experimental e numérico em alguns pontos estratégicos para se observar a efetividade da nossa modelagem para a condutividade

térmica fornecido pela Promat, sendo estes erros representados pela Tabela 22, Tabela 23 e Tabela 24.

Tabela 22 - Erro relativo para condutividade do fabricante no sensor 1

<b>Tempo (min)</b>	<b>Temp. 5mm exp. (°C)</b>	<b>Temp. 5mm num. (°C)</b>	<b>Erro Relativo (%)</b>
15	434,11	520,32	19,86%
30	524,39	564,47	7,64%
45	565,57	582,89	3,06%

Tabela 23 - Erro relativo para condutividade do fabricante no sensor 2

<b>Tempo (min)</b>	<b>Temp. 5mm exp. (°C)</b>	<b>Temp. 5mm num. (°C)</b>	<b>Erro Relativo (%)</b>
15	366,61	424,68	15,84%
30	486,54	506,01	4,00%
45	541,56	542,32	0,14%

Tabela 24 - Erro relativo para condutividade do fabricante no sensor 3

<b>Tempo (min)</b>	<b>Temp. 5mm exp. (°C)</b>	<b>Temp. 5mm num. (°C)</b>	<b>Erro Relativo (%)</b>
15	225,32	235,04	4,31%
30	406,02	380,59	6,26%
45	497,02	427,07	14,07%

Como podemos observar, das 9 medições, obtemos apenas 3 medições com dois dígitos percentuais de erro relativo, isso mostra que foi obtido bons resultados com a condutividade térmica fornecida pelo fabricante. Porém, como será mostrado nas próximas secções, podemos utilizar do algoritmo de Levenberg-Marquadt para otimizar a condutividade térmica dos sensores individualmente e posteriormente dos 3 sensores em conjunto, sendo o resultado deste último que representa realmente o melhor valor de condutividade térmica para o nosso modelo proposto.

4.8.2. *Análise inversa de transferência de calor com um sensor e utilizando o Método de Levenberg-Marquadt.*

Agora nessa secção podemos utilizar também do algoritmo de Levenberg-Marquadt, gerando-se assim resultados numéricos e compara-los com os experimentais, em busca da condutividade térmica do sólido e posteriormente a condutividade térmica efetiva.

Aplicando o método de Levenberg-Marquadt, como mostrado na Figura 42, encontramos os valores de condutividade térmica otimizado para cada sensor, podendo ser visualizado os resultados na Tabela 25.

Tabela 25 – Condutividade térmica do sólido otimizado para cada sensor e fornecido pelo fabricante.

<b>Ks - S1, 18mm (W/m.K)</b>	<b>Ks - S2, 15mm (W/m.K)</b>	<b>Ks - S3, 5mm (W/m.K)</b>	<b>Ks, Promat (W/m.K)</b>
0.032	0.108	0.185	0.17

Obtemos valores distintos de condutividade térmica para cada sensor. Isso é explicado pelo nosso modelo sofrer uma alta influência da condição de fronteira agressiva imposta pelo calorímetro de cone. O objetivo é encontrarmos um valor ideal entre estes sensores que proporcionará o menor valor de erro relativo. Por isso, a próxima etapa deste capítulo é aplicar o método de Levenberg-Marquadt para os 3 sensores em simultâneo para assim propor um modelo mais próximo a realidade.

Enquanto isso, apresentaremos nas próximas etapas os resultados de campo de temperaturas, condutividade térmica do sólido, condutividade térmica efetiva em função da temperatura, porosidade e a perda de massa em função do tempo, sempre fazendo a comparação entre o resultado experimental e o resultado numérico.

Aplicando para o nosso modelo o resultado de condutividade térmica otimizado do sensor 1, ou seja,  $K_s=0.032\text{W/m.K}$ , encontramos o campo de temperaturas apresentado na Figura 45.

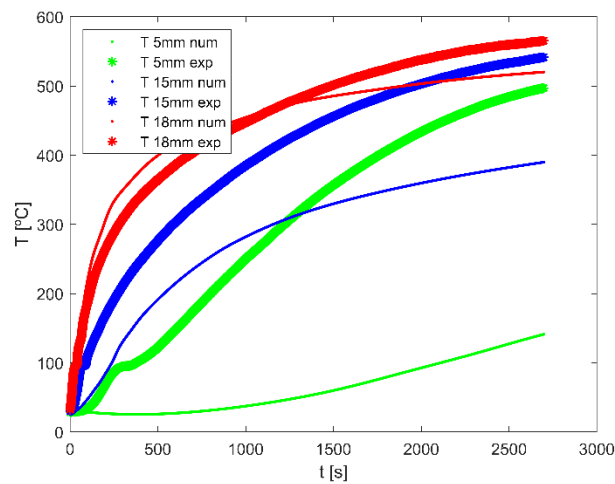


Figura 45 – Campo de temperaturas para a condutividade térmica otimizada do sensor 1.

Como a otimização da condutividade térmica foi realizada para o sensor 1 (curva vermelha), conseguimos ver que as curvas experimentais e numéricas para este sensor estão muito próximas, como esperado. Porém para os demais sensores (curva azul e verde), os resultados não são satisfatórios, pois este sensor 1, por estar a 2mm da face exposta ao calorímetro de cone, este sofre um efeito muito maior das condições de fronteira do calorímetro de cone, trazendo um efeito negativo para a nossa formulação e a otimização acaba tornando os resultados piores inclusive que os obtidos pela Figura 44, o qual está levando em consideração a condutividade térmica do fabricante. Logo, precisa-se assim analisar a otimização dos outros sensores separados e por fim em conjunto para poder-se assim obter resultados mais satisfatórios.

Para este mesmo valor de  $K_s$ , podemos obter curvas para a condutividade térmica efetiva, porosidade e massa em função do tempo, sendo essa última propriedade podendo ser comparada com a perda de massa experimental, podendo-se visualizar todas essas variáveis na Figura 46, Figura 47 e Figura 48.

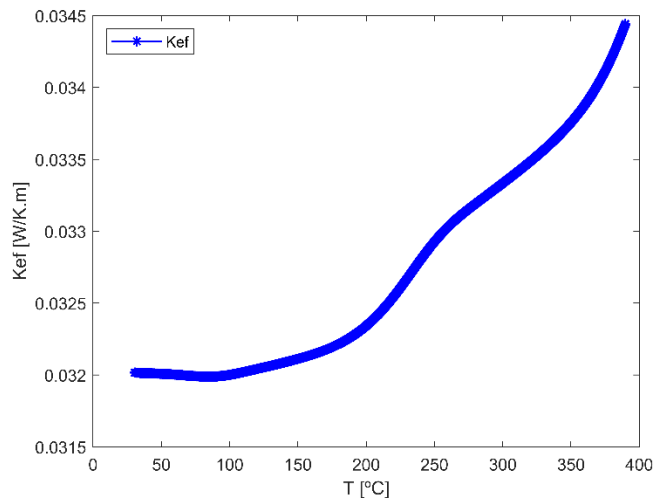


Figura 46 – Condutividade térmica efetiva em função da temperatura.

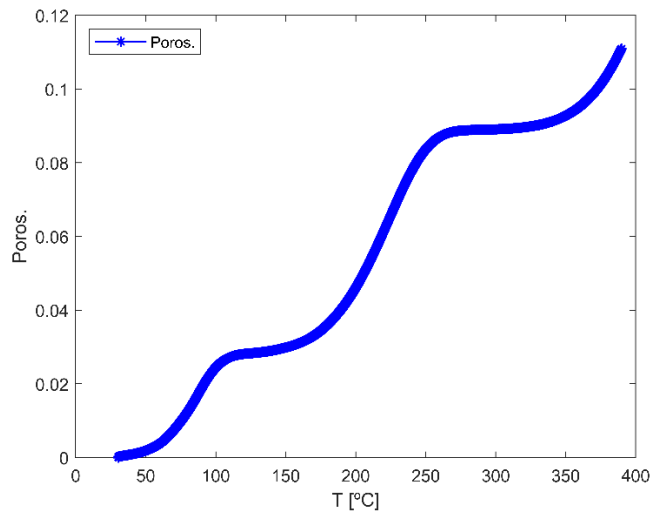


Figura 47 – Porosidade em função da temperatura.

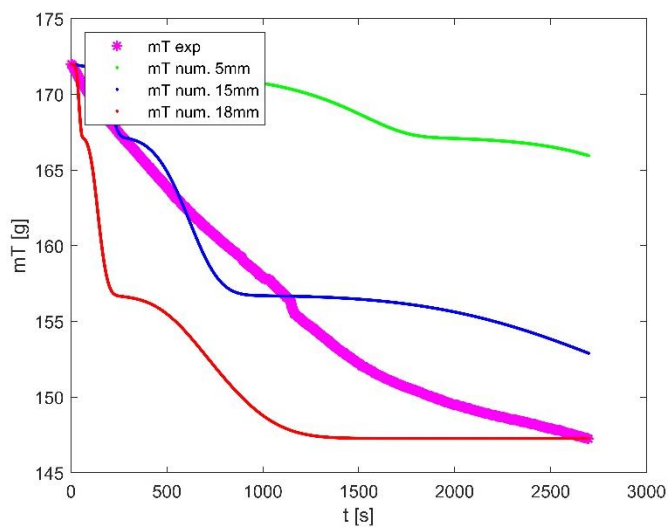


Figura 48 – Perda de massa numérica e experimental em função do tempo.

Para o cálculo da condutividade térmica efetiva, foi utilizado o modelo de Russell, como explicado no capítulo 4.5.1. Como neste modelo, ele leva em consideração a porosidade e, conseqüentemente, a condutividade térmica do poro formado ( $K_g$ ) e o valor de  $K_g$ , a partir de 107°C, torna-se maior que a condutividade térmica do sólido sem porosidade, ou seja,  $K_g > 0.032 \text{ W/m.K}$ , logo era de se esperar que a condutividade térmica efetiva do material neste modelo, a partir desta temperatura, aumenta-se e isso é claramente visualizado na Figura 46.

A porosidade, como mostrado na Equação (4.20), está em função da massa, então podemos analisar ambos como um só. A curva rosa da

Figura 48 representa a perda de massa em função do tempo da amostra propriamente ensaiada. As nossas considerações (ensaio de secagem e artigo do Bentz como referência), mostraram-se efetivas, pois temos tanto curvas que trafegam acima da curva experimental, como a do sensor 3, quanto abaixo da curva experimental, como o sensor 1, quanto a curva do sensor 2 que trafega próximo a experimental em vários pontos. Este resultado nos mostra que os pontos onde estão mais distantes do topo exposto ao calorímetro do cone, como o sensor 3, perdem menos massa que a média global (ensaio experimental), por justamente ter uma taxa de aquecimento menor, ao contrário do sensor 1 onde tem uma taxa de aquecimento maior que a média global da amostra, justificando-se assim a sua perda de massa maior que a média global do experimento.

Porém para o Sensor 2, aplicando o algoritmo de Levenberg-Marquadt para aproximar a solução numérica da solução experimental, obtivemos  $K_s=0.109 \text{ W/m.K}$ . Com este valor, podemos plotar então o campo de temperaturas ao longo do tempo, como o apresentado na Figura 49.

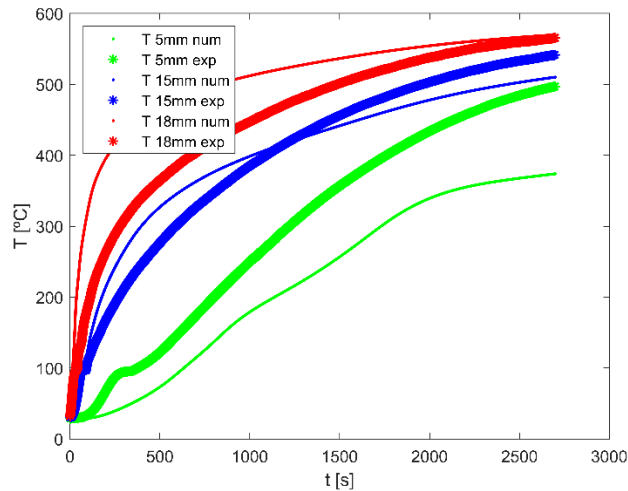


Figura 49 - Campo de temperaturas para a condutividade térmica otimizada do sensor 2.

Com essa metodologia aplicado ao sensor 2, podemos novamente, como observado na otimização do sensor 1, notar que agora a curva de temperatura referente a solução numérica do sensor 2 está com o menor erro possível em comparação com o resultado experimental do mesmo sensor, por mérito da implementação da metodologia dos mínimos quadrados.

Da mesma maneira, com esse valor de  $K_s$  otimizado, podemos visualizar os gráficos de condutividade térmica efetiva, porosidade e massa em função do tempo, na Figura 50, Figura 51 e Figura 52.

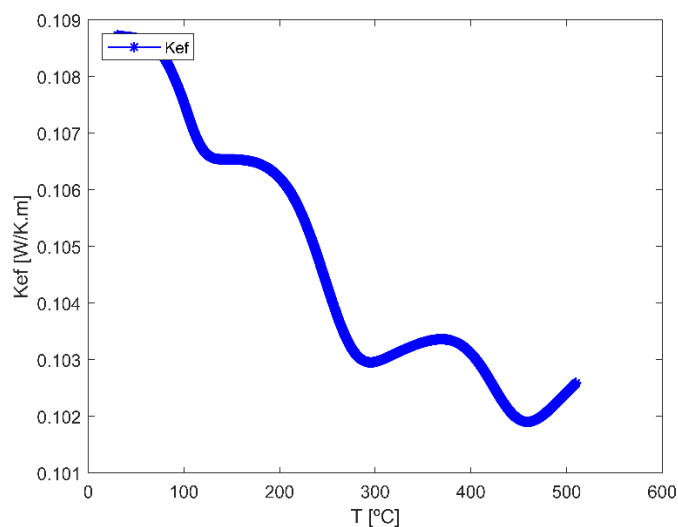


Figura 50 - Condutividade térmica efetiva em função da temperatura.

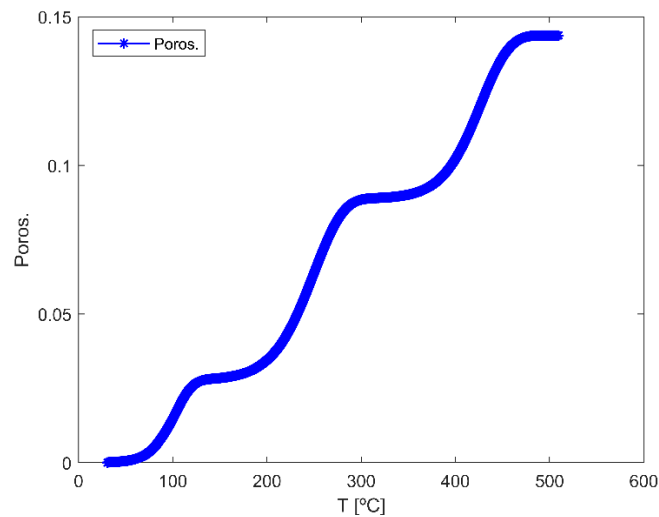


Figura 51 - Porosidade em função da temperatura.

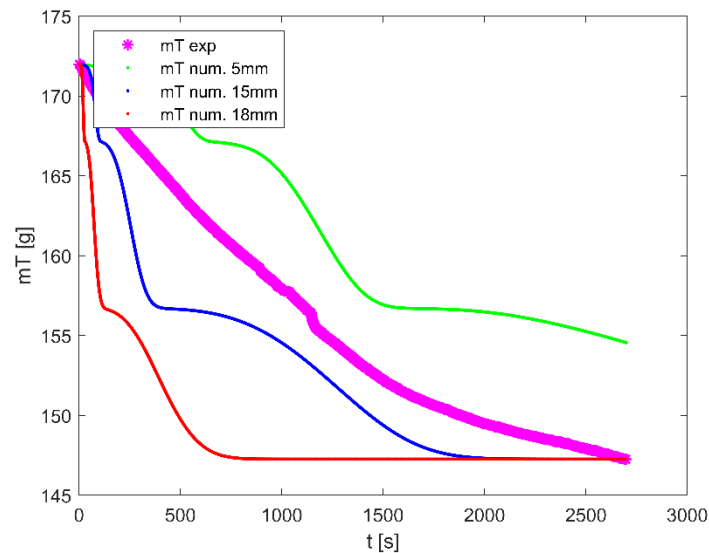


Figura 52 - Perda de massa (%) numérica e experimental em função do tempo.

Para a otimização deste sensor, o código mostra-se confiável pelo fato de  $K_g$  máximo e mínimo deste ensaio ser  $0.0263 \text{ kW/m.K}$  e  $0.0636 \text{ kW/m.K}$  respectivamente. Com isso, era de se esperar que a condutividade térmica efetiva diminui com o avanço da temperatura. Novamente, as nossas considerações para a perda de massa mostraram-se efetivas, sendo que para este valor de condutividade, fica claro para nós que estamos em um valor mais confiável, pois os sensores mais perto da face exposta claramente perdem mais massa ao longo do tempo de experimento e o sensor 3, o qual encontra-se a  $\frac{3}{4}$  de distância da face exposta tem uma perda de massa menor, visto que este tem uma taxa de aquecimento menor.

Por último, temos a análise dos dados do último sensor, o sensor 3. Como comentado e mostrado na Tabela 25, este é o sensor que sofre a menor influência da condição de fronteira pela sua maior distância a face exposta ao calorímetro de cone. Com isso, obtemos o maior valor de condutividade térmica do sólido aplicando o algoritmo de Levenberg-Marquadt, resultando em  $K_s=0.185$  W/m.K. Com isso, podemos visualizar o campo de temperaturas resultante na Figura 53.

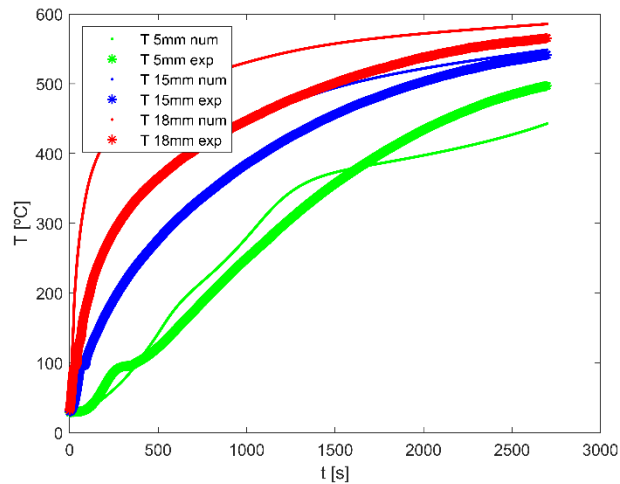


Figura 53 - Campo de temperaturas para a condutividade térmica otimizada do sensor 3.

Novamente, o sensor alvo da otimização é justamente o que apresenta a curva numérica próxima a curva experimental. É visível que todas as curvas de temperatura para  $K_s$  otimizado para o sensor 3 e o sensor 2 são os mais adequados, pois todas as curvas numéricas destes modelos apresentam uma proximidade maior com os dados experimentais do que o sensor 1. Isso é justificado pela proximidade do sensor 1 a face exposta ao calorímetro de cone, havendo-se assim uma maior influência da condição de fronteira do que o efeito de condução de calor do material em si. Logo, é esperado que quando otimizarmos os 3 sensores em simultâneo, o valor de  $K_s$  seja algo entre  $K_{s2}$  e  $K_{s3}$ .

Finalmente, temos a apresentação dos resultados da condutividade térmica efetiva, porosidade e massa em função do tempo para o valor de  $K_{s3}$ , na Figura 54, Figura 55 e Figura 56.

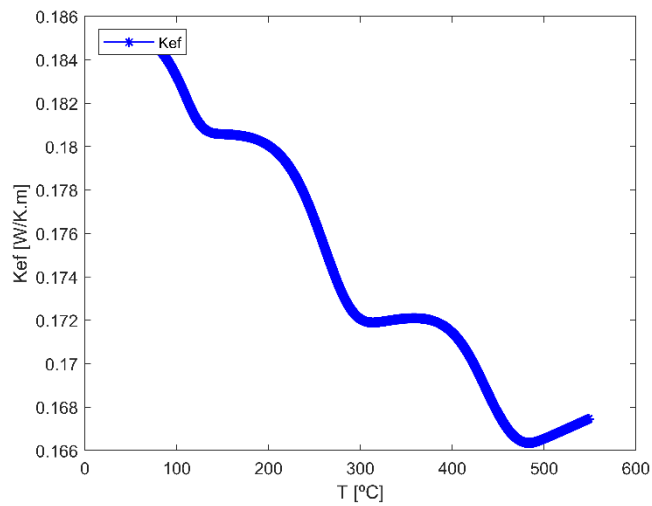


Figura 54 – Condutividade térmica efetiva em função da temperatura.

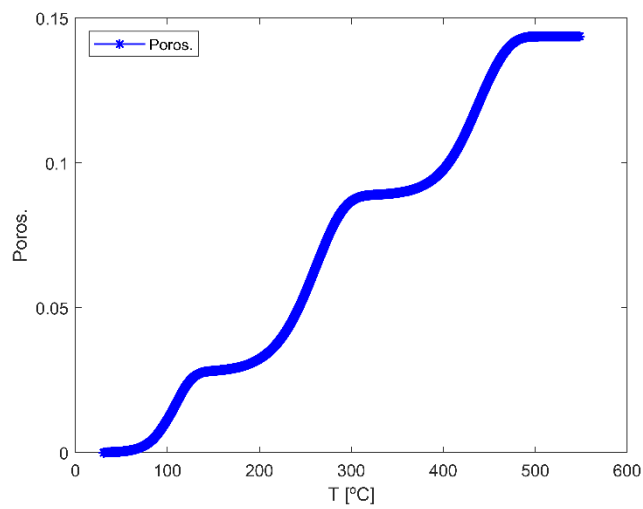


Figura 55 - Porosidade em função da temperatura.

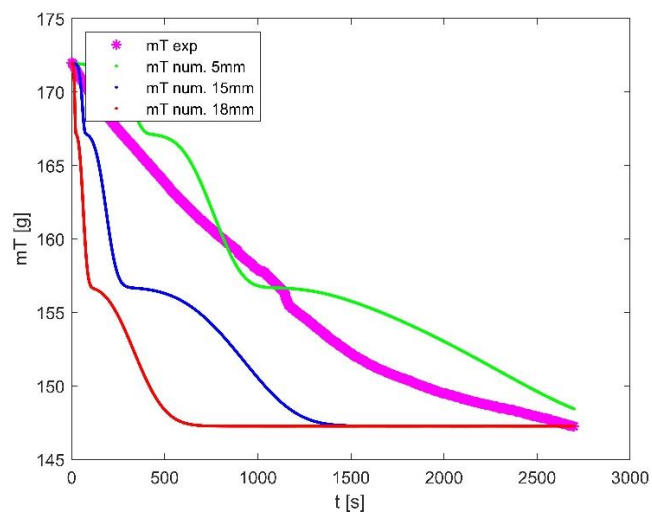


Figura 56 - Perda de massa (%) numérica e experimental em função do tempo.

Com estes dados apresentados, podemos chegar nas mesmas conclusões referente a condutividade térmica, porosidade e perda de massa do sensor 2. Agora iremos realizar a análise dos 3 sensores em simultâneo pelo algoritmo de Levenberg-Marquadt, para assim atingirmos o menor erro possível pelo método dos mínimos quadrados e então termos um valor de  $K_s$  otimizado de referência para o nosso material e compará-lo com o fornecido pelo fabricante da placa Promatect-H.

#### 4.8.3. Análise inversa de transferência de calor com três sensores e utilizando o Método de Levenberg-Marquadt

Para obtermos resultados mais confiáveis, utilizamos o método de Levenberg-Marquadt para determinar a condutividade térmica do sólido, levando em consideração os 3 sensores em simultâneo. Sendo assim, procuramos minimizar o erro global como mostrado na Equação (4.78):

$$S_1 + S_2 + S_3 = \text{mínimo} \quad (4.78)$$

Levando isso em consideração, nosso algoritmo realizou um total de 18 iterações, resultando em uma condutividade térmica do sólido  $K_s = 0.0148 \text{ W/m.K}$ . Como analisado anteriormente neste trabalho, era esperado que o valor de  $K_s$  estivesse entre a condutividade do sensor 2 e 3, o que foi confirmado na aplicação do algoritmo para os 3 sensores em simultâneo. Com esse valor de  $K_s$ , foi obtido então o campo de temperaturas da Figura 57.

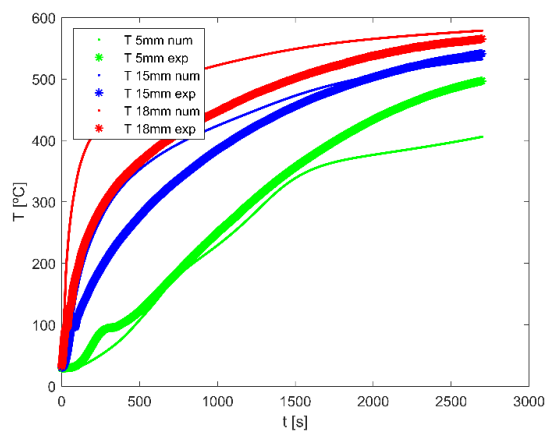


Figura 57 – Temperatura numérica e experimental em função do tempo.

Com isso, pode-se observar realmente que as curvas experimentais aparentam, de modo geral, estar mais próximas da curva numérica, em relação as Figura 45, Figura 49 e Figura 53, que representam as curvas de temperatura dos sensores 1,2 e 3 respectivamente.

Para confirmar isso, foi realizado o cálculo de erro relativo entre o valor experimental e o numérico. Com isso, obtemos as Tabela 26, Tabela 27 e Tabela 28 .

Tabela 26 - Resultado numérico e experimental para o Sensor 1 a 18mm da base

<b>Tempo (min)</b>	<b>Temp. 18mm exp. (°C)</b>	<b>Temp. 18mm num. (°C)</b>	<b>Erro Relativo (%)</b>
15	434,11	514,09	18,42
30	524,22	558,26	6,49
45	565,71	577,12	2,02

Tabela 27 - Resultado numérico e experimental para o Sensor 2 a 15mm da base

<b>Tempo (min)</b>	<b>Temp. 15mm exp. (°C)</b>	<b>Temp. 15mm num. (°C)</b>	<b>Erro Relativo (%)</b>
15	366,61	411,75	12,31
30	486,61	492,95	1,30
45	541,55	530,69	2,01

Tabela 28 – Resultado numérico e experimental para o Sensor 3 a 5mm da base

<b>Tempo (min)</b>	<b>Temp. 5mm exp. (°C)</b>	<b>Temp. 5mm num. (°C)</b>	<b>Erro Relativo (%)</b>
15	225,33	209,93	6,83%
30	406,02	366,93	9,63%
45	497,01	405,10	18,49%

Como podemos observar, das 9 medições, obtemos apenas 3 medições com dois dígitos percentuais de erro relativo. Isso mostra que obtemos resultados satisfatórios, pois isso mostra que as nossas considerações foram adequadas para o nosso caso e para futuros trabalhos, apenas precisará ser feito algumas abordagens mais aprofundadas (as quais serão apresentadas na secção de futuros trabalhos) para tornar esse erro cada vez menos significativo, resultando em um modelo de referência na área acadêmica.

Com essas análises levadas em conta, podemos então visualizar a condutividade térmica efetiva, a porosidade e a perda de massa para este caso de referência, sendo estes representados pela Figura 58, Figura 59 e Figura 60.

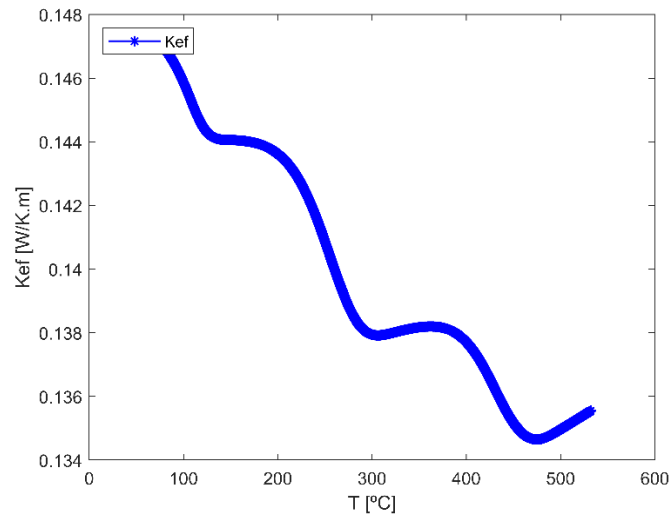


Figura 58- Condutividade Térmica Efetiva em função da temperatura.

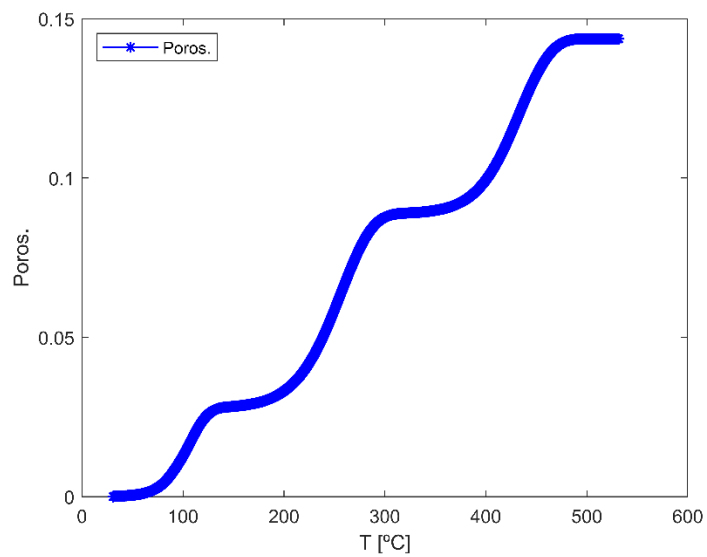


Figura 59 – Porosidade em função da temperatura.

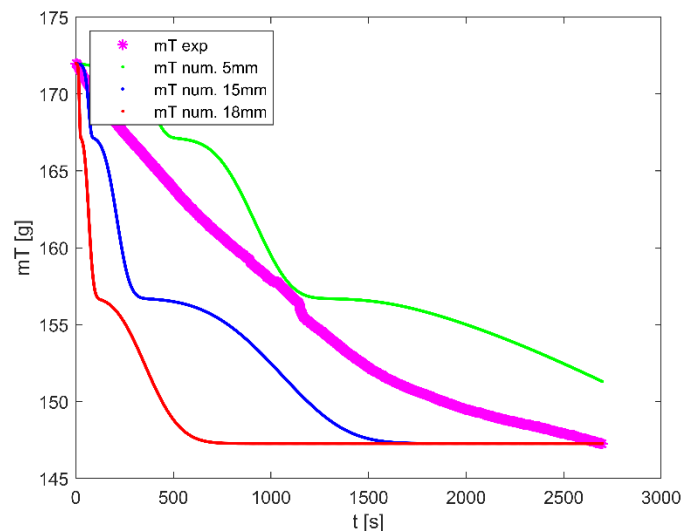


Figura 60 - Perda de massa (%) numérica e experimental em função do tempo.

Como podemos observar, a condutividade térmica efetiva do material diminui com o aumento de temperatura. Como existem reações em todos os intervalos de temperatura (até 100°C a desidratação, entre 100°C e 400°C a desidratação do hidrato de silicato de cálcio gel e entre 400°C e 600°C a desidratação do hidróxido de cálcio), e, em todas essas etapas, existem perda de massa, a porosidade é amplamente afetada.

Quando há um aumento da porosidade, é de se esperar que haja um decaimento no valor da condutividade térmica efetiva, visto que a condutividade térmica do poro é menor que a do próprio material e isso é justamente observado na Figura 58, logo nosso modelo para o cálculo da condutividade térmica mostra-se assertivo.

Analisando-se a perda de massa, podemos visualizar novamente que a curva verde, a qual representa o ponto mais longe da face exposta, está novamente acima da curva experimental, o que representa uma perda de massa menor que a média global obtida no resultado experimental. Já os sensores que estão dentro da metade mais próxima do calorímetro de cone apresentam uma perda de massa maior que a perda de massa global, visto que estes sensores aquecem mais rápido e tendem perder massa mais rapidamente que o restante da amostra.

#### **4.9. Conclusões**

Nessa análise comparativa entre resultados experimentais e as soluções numéricas propostas, fica claro para nós que a abordagem de transferência de calor para uma situação extrema como um incêndio (simulado em um calorímetro de cone), deve ser levado em consideração uma série de inúmeros fatores, como a perda de massa em cada reação (e conseqüentemente saber suas energias de ativação e fator pré-exponencial), o efeito dessa perda de massa na porosidade e na condutividade térmica efetiva, o efeito de transferência de massa entre diferenças finitas, teor de água da amostra, o calor liberado por cada reação, enfim, é um trabalho de alta complexidade pela quantidade de variáveis que precisam ser analisadas com cuidado.

Apesar disso, as nossas considerações mostraram-se efetivas, visto que para o campo de temperaturas, a maioria dos erros relativos obtidos para os 3 sensores otimizados em simultâneo estiveram abaixo dos 2 dígitos percentuais (10%), o que nos traz segurança em implementar o nosso método para os demais materiais. Além disso, o  $K_s$  numérico obtido para este caso está próximo do  $K_s$  fornecido pelo fabricante, mostrando que estamos no caminho certo ( $K_{snum} = 0.148 \text{ kW/m.K} \times K_{spromat-H} = 0.17 \text{ kW/m.K}$ ).

Porém, para futuros trabalhos (o que será abordado no próximo capítulo), será proposto estudos mais aprofundados para algumas das variáveis expostas no primeiro parágrafo deste tópico, visto que existem inúmeras placas de silicato de cálcio e em algumas dessas variáveis foram utilizadas como base referências de placas de silicato de cálcio em geral e seria interessante uma extração de dados da Promatect-H para realmente validarmos (ou descartarmos) os resultados obtidos pelos outros autores. Além disso, com o nosso modelo, apesar de validarmos o termo de geração de calor interno com um modelo analítico, mostrando que a entalpia de reação está sendo equacionada corretamente, não ficou tão claro a influência da evaporação nos gráficos de avanço de temperatura ao longo do tempo, sendo assim novamente importante uma análise mais profunda de algumas características do nosso material em específico, para diminuir ainda mais esse erro relativo entre resultado experimental e solução numérica e deixar este efeito mais aparente.

## **5. Conclusões e trabalhos futuros**

---

### **5.1. Conclusões gerais**

Nesta dissertação de mestrado concluímos que, para nos precavermos para uma situação de incêndio, é imprescindível o estudo e a implementação de proteções ativas (Sprinklers, extintores de incêndio e hidrantes) e de proteções passivas (pintura antichamas, ótimas vedações de tubulações, porta corta fogos e materiais de construção que retardem a propagação do calor e do incêndio).

Pensando neste trabalho, o nosso foco foi a caracterização térmica das placas de silicato de cálcio Promatect-H e Promatect-200, com objetivo de determinar a condutividade térmica efetiva e traçar curvas de evolução da temperatura em função do tempo, pois pensando na proteção de uma estrutura de aço, essa começa a perder suas propriedades mecânicas gradativamente a partir dos 400°C, [7].

Para realizar um modelo numérico que consiga refletir a realidade, precisamos inicialmente realizar ensaios experimentais, para conseguir assim um campo de temperaturas para nos basear. Sendo assim, conseguimos observar a quantidade de aparatos (Calorímetro de cone) e metodologias específicas (utilizada como base na ISO 5660) que são necessários para realmente chegarmos em dados confiáveis, para assim traçarmos comparações com nosso modelo numérico.

Durante vários meses de estudos, conseguimos observar e mensurar diversas propriedades que afetam o desempenho das placas de silicato de cálcio contra o incêndio, sendo de suma importância para um modelo numérico confiável ser avaliado, por exemplo, as perdas de massa por reações, entalpias de reação e respectivos fatores pré-exponenciais e energias de ativação. Analisamos também a variação da condutividade térmica dos poros em função da temperatura, sua influência na condutividade térmica efetiva, a variação de calor específico e densidade em função da temperatura, o efeito da desidratação do material, entre várias outras variáveis.

Concluimos neste estudo, utilizando-se da nossa solução numérica em conjunto com o algoritmo de Levenberg-Marquadt, o material apresenta uma condutividade térmica do sólido de  $K_s = 0.148 \text{ kW/m.K}$  e que a condutividade térmica do material em função da temperatura, varia entre  $0.135 < K_{ef} < 0.148 \text{ kW/m.K}$ , sendo estes valores uma ótima referência para os futuros projetistas que irão utilizar deste material para a construção civil com objetivo de proteger a estrutura de prédios em geral.

Porém, para um projeto ainda mais confiável, é recomendado que se utilize da Figura 58, a qual representa a variação da condutividade térmica em função da temperatura, conseguindo-se assim uma maior precisão para um projeto de engenharia de excelência.

## ***5.2. Linhas futuras de investigação***

Neste trabalho procurou-se desenvolver um modelo analítico e numérico para evolução da temperatura em uma simulação de um incêndio, com base na caracterização da condutividade térmica efetiva do material. Com este modelo numérico desenvolvido e validado, este pode ser utilizado para diversos outros materiais, podendo-se assim prever a evolução da temperatura de quaisquer materiais ao longo do tempo, contando que se tenha informações suficientes das propriedades do material em questão.

Com isso em mente, levamos em consideração diversos fatores como a densidade, porosidade e umidade do material, além da variação de todas as propriedades do material em função da temperatura e suas respectivas reações endotérmicas existentes.

Porém seria interessante, em termos de aprimoramento da nossa solução numérica, a determinação experimental dos fatores pré-exponenciais e de energia de ativação, para com isso termos valores realmente fidedignos e confiáveis. Remando nesta mesma corrente, poderia ser realizado ensaios experimentais para determinação das temperaturas de reação, a entalpia de reação e a quantidade de massa que está sendo liberada em cada reação, pois apesar de termos referências na literatura para as placas de silicato de cálcio,[5], seria interessante termos um levantamento para as placas de silicato de cálcio Promatect-H e Promatect-200, para refinarmos a nossa pesquisa e obter resultados mais fidedignos.

Para finalizar, além da comparação dos resultados experimentais com os resultados numéricos, é de extrema importância para a Engenharia da Construção, saber como o material se comporta após anos e décadas, pois assim podemos realizar um projeto de engenharia seguro para o futuro. Com isso, podemos realizar ensaios de envelhecimento artificial para o material estudado, ensaia-lo no calorímetro de cone e verificar os efeitos do envelhecimento na condutividade térmica do material, para com isso, desenvolver-se um projeto totalmente seguro para o cliente final.

## Referências

---

1. Pausas, J. and J. Keeley, *A Burning Story: The Role of Fire in the History of Life*. Bioscience, 2009. **59**: p. 593-601.
2. Livia Torres, M.R., et al. *Incêndio de grandes proporções destrói o Museu Nacional, na Quinta da Boa Vista*. 2018 [cited 2020 18-11-2020].
3. minuto, M.a. *Relatório conclui as causas prováveis para incêndio da Notre Dame*. 2019 [cited 2020 18-11-2020]; Available from: <https://www.noticiasominuto.com/mundo/1277139/relatorio-conclui-as-causas-provaveis-para-incendio-da-notre-dame>.
4. Association, T.G., *Editorial*. Bulletin World Fire Statistics, 2014. **29**: p. 18.
5. Beltz, D.P. and K.R. Prasad, *Thermal Performance of Fire Resistive Materials I. Characterization with Respect to Thermal Performance Models*. National Institute of Standards and Technology, 2007: p. 21.
6. Refratários, T. *Placas de Silicato de Cálcio*. 2019 [cited 2020 27-07-2020]; Available from: <https://termorefratarios.com/produtos/refratario-isolante/placas-de-silicato-de-calcio.html>.
7. CEN, *Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design*, in *EN 1993-1-2*. 2005, European Committee for Standardization. p. 78.
8. Técnicas, A.B.d.N., *Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações*. 2001. p. 14.
9. Rossi, F. *Proteção Passiva Contra Incêndio X Proteção Ativa Contra Incêndio*. 2018 [cited 2020 21-12-2020]; Available from: <https://pedreiro.com.br/protecao-passiva-contra-incendio-x-protecao-ativa-contra-incendio/>.
10. Engenharia, T. *Vedação de shafts*. 2020 [cited 2020 21/12/2020]; Available from: <https://www.termocom.com.br/vedacao-shafts>.
11. Segurança, A.P.d., *Decreto-Lei n.º 220/2008*, APSEI, Editor. 2008, Ministério da Administração interna: Diário da República. p. 20.
12. A. Omrane, et al., *Intumescent coating surface temperature measurement in a cone calorimeter using laser-induced phosphorescence*. Fire Safety Journal 2007. **42**: p. 7.

13. Mesquita, L.M.R., *Estudo Experimental e numérico do comportamento de um material intumescente na proteção passiva de elementos estruturais submetidos a incêndio*, in *Departamento de Engenharia Mecânica*. 2015, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. p. 294.
14. Lewis, K.R., *Fire Design of steel members*, in *School of Engineering* 2000, University of Canterbury: Christchurch, New Zealand p. 178.
15. Segurança, A.P.d. *Segurança contra incêndio*. [cited 2021 1/16/21]; Available from: <https://www.apsei.org.pt/areas-de-atuacao/seguranca-contra-incendio/revestimentos-de-protecao-contra-incendio/>.
16. Oliveira, T.B.d., *Caracterização Térmica de materiais de proteção ao fogo*, in *Engenharia Mecânica*. 2018, Instituto Politécnico de Bragança: Bragança. p. 125.
17. Pankaj Vyas, et al., *Development of novel formulation for high performance fire retardant cementitious mortars*. *Materials Today: Proceedings*, 2020. **28**: p. 9.
18. V.K.R. Kodur and A.M.Shakya, *Effect of temperature on thermal properties of spray applied fire resistive materials*. *Fire Safety Journal*, 2013. **61**: p. 10.
19. Gerken, A.L.d.R., *Materiais de proteção térmica para sistemas construtivos de baixo custo estruturados em aço*, in *Escola de Engenharia da UFMG*. 2007, Universidade Federal de Minas Gerais. p. 236.
20. Approvals, E.O.f.T., *Fire Protective Board, Slab and mat products and kits*. 2017, European Organisation for Technical Approvals: European Organisation for Technical Approvals. p. 60.
21. Leite, F.H.G., *Desenvolvimento de material de silicato de cálcio para isolamento térmico usando resíduo de lama de cal*, in *Centro de ciência e tecnologia* 2018, Universidade Estadual do Norte Fluminense UENF. p. 109.
22. Adams, G., *Wollastonita como fundente para massas cerâmicas*, in *Departamento de materiais*. 2011, UFRGS.
23. Kotsis, I. and A. Balogh, *Synthesis of Wollastonite* *Ceramics International* 15 1988: p. 85.
24. al., S.e., *Calcium Silicate Board and Method of Manufacturing Same*, U. Patent, Editor. 2000, ASK Corporation United States. p. 9.
25. Faria, R.F.J., *Construção com Painéis Sanduíche de Silicato de Cálcio, Cimento e EPS*, in *Engenharia Civil*. 2014, Universidade da Madeira. p. 116.
26. Silva, V.P. and A.R. Melão, *Temperatura crítica de perfis I de aço em situação de incêndio*. *Ambiente Construído*, 2017: p. 18.
27. Mesquita, L.M.R.d., *Instabilidade termo-mecânica de vigas submetidas a temperaturas elevadas. Estudo numérico e experimental*. 2004, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. p. 148.
28. Promat, *Calcium Silicate Insulation*. 2014: [www.promat-hpi.com](http://www.promat-hpi.com) p. 52.
29. Promat, *Promat Handbook Fire Protection of Load-bearing Steel Structures*, Promat, Editor. 2018: <https://www.promat-see.com/en/products/promatect-h>. p. 128.
30. Ghajar, Y.A.Ç.A.J., *Transferência de calor e massa*, ed. 4. 2012, New York: AMGH Editora Ltda. 902.

31. Ashby, M., *Seleção de Materiais no Projeto Mecânico*. 4 ed. 2012, Rio de Janeiro: Elsevier Editora Ltda.
32. Nunes, E.d.S., *Análise da condutividade térmica em rochas sedimentares* in *Departamento de Engenharia Mecânica*. 2013, Universidade Federal de Santa Catarina. p. 97.
33. Acerbi, L.M.C., *Correlação do teor de umidade com suas propriedades termofísicas em um meio poroso*, in *Departamento de Engenharia Mecânica*. 1995, Universidade Federal de Uberlândia. p. 93.
34. Bentz, D.P., *Microstructure and Thermal Conductivity of Hydrated Calcium Silicate Board Materials*. Journal of BUILDING PHYSICS, 2007. **31**: p. 13.
35. Maxwell, J.C., *A treatise on Electricity and Magnetism*. Clarendon Press, ed. C.p. Series. Vol. 1. 1954, Oxford. 500.
36. Tavman, I.H., *Effective Thermal Conductivity of Granular Porous Materials*. Elsevier Science Ltd, 1996. **23**: p. 7.
37. Russell, H.W., *Principles of heat flow in porous insulators*. Journal of the American Ceramic Society, 1935. **18**: p. 12.
38. Young, H.D., *Física 2: Termodinâmica e Ondas*. 12 ed. Vol. 2. 2008, São Paulo: Pearson Education do Brasil. 325.
39. Wang, Y., et al., *Performance-Based Fire Engineering of Structures*. 2012.
40. Bergman, T.L., et al., *Fundamentos de transferência de calor e massa*. Sexta Edição ed. 2008, Rio de Janeiro: LTC- Livros Técnicos e Científicos Editora S.A. 643.
41. Ariyanayagam, A.D. and M. Mahendran, *Fire tests of non-load bearing light gauge steel frame walls lined with calcium silicate boards and gypsum plasterboards*. Thin-Walled Structures, 2017. **115**: p. 14.
42. Caiado, N.G.R., *Simulação Numérica do Comportamento Térmico de Compartimentos Sujeitos a Incêndios Localizados*, in *Engenharia da Construção*. 2012, Instituto Politécnico de Bragança. p. 147.
43. Ozisik, M.N., *Heat Conduction*. 1993, New York: John Wiley & Sons, INC. 692.
44. Agarwala, S. and K.N. Prabhu, *An experimental approach based on inverse heat conduction analysis for thermal characterization of phase change materials*. Thermochemica Acta, 2020. **685**: p. 9.
45. Amanda V. Santos, et al., *O Incrível Mundo dos Materiais Porosos – Características, Propriedades e Aplicações*. Química Nova escola, 2016. **38**: p. 8.
46. Lima, W.M.P.B.d., *Transferência de calor e massa em sólidos porosos com geometria complexa via análise concentrada: Modelagem e simulação*, in *Pós-Graduação em Engenharia Mecânica*. 2017, Universidade Federal de Campina Grande: Campina Grande. p. 105.
47. International, A., *Standard Test Method for Hygroscopic Sorption Isotherms of Building Materials*. 2001: Annual Book of ASTM Standards, Volume 11.03. p. 4.
48. International, A., *Standard Specification for Calcium Silicate Block and Pipe Thermal Insulation*. 1995: Annual Book of ASTM Standards, Vol 04.07. p. 4.

49. SPLabor. *O que é e para que serve um dessecador*. 2015 [cited 2020 23 de março de 2020]; Available from: <http://www.splabor.com.br/blog/dessecador/aprendendo-mais-o-que-e-e-para-que-serve-um-dessecador/>.
50. Abdelkader, Z., *Thermal performance of fire protection Materials*, in *School of Technology and Management*. 2017, Polytechnic Institute of Bragança. p. 63.
51. L.Brown, T., et al., *Química a Ciência Central*. 9 ed. Vol. 1. 2005, São Paulo: Pearson Education do Brasil. 972.
52. Abrantes, C.F.d.C.J.B., *Manual de Segurança contra Incêndio em Edifícios*, ed. edição. 2009, Sintra: Offsetmais - Artes Gráficas, S.A. 464.
53. Babrauskas, V. and R.D. Peacock, *Heat release rate: The single most important variable in fire hazard*. *Fire Safety Journal*, 1992. **18**(3): p. 255-272.
54. Ferle, L.C., *Avaliação da durabilidade das propriedades mecânicas e reação ao fogo dos painéis de derivados de madeira*, in *Engenharia Industrial*. 2018, Instituto Politécnico de Bragança. p. 142.
55. Mowrer, F.W. and R.B. Williamson, *Methods to characterize heat release rate data*. *Fire Safety Journal*, 1990. **16**(5): p. 367-387.
56. Standardization, t.I.O.f., *Reaction-to-fire tests - Heat release, smoke production and mass loss rate - Part 1: Heat release rate (cone calorimeter method)*. 2002. p. 39.
57. Rocha, M.A.d.F., *Determinação experimental de propriedades de combustão de madeiras maciças brasileiras*. 2014, Universidade Federal do Rio de Janeiro. p. 96.
58. A.P. Mouritz, V.M.K., *Durability of Composites for Civil Structural Applications*. 2007: Woodhead Publishing. 384.
59. Babrauskas, V. and W.J. Parker, *Ignitability measurements with the cone calorimeter*. 1987. **VOL. 11**: p. 43.
60. A.P. Mouritz, A.G.G., *Fire properties of Polymer Composites Materials*, ed. G.M.L. GLADWELL. Vol. 143. 2006, Netherlands Springer.
61. EN, E.S.-. *Fire classification of construction products and building elements - Part 1: Classification using data from reaction to fire tests*. 2009, European Committee for standardization - EN. p. 53.
62. Dietenberger, M.A., *Ignitability Analysis using the cone calorimeter and lift apparatus*. *Proceedings of the international conference on fire safety*, 1996. **2**: p. 9.
63. J. B. Henderson, J.A.W., M. R. Tant, *A Model for the Thermal Response of Polymer Composite Materials with Experimental Verification*. *Journal of Composite Materials*, 1985. **19**: p. 19.
64. WANG, H.-B., *Heat Transfer Analysis of components of construction exposed to fire*, in *Department of Civil Engineering and Construction* 1995, University of Salford: Manchester. p. 193.
65. PerkinElmer, *A Beginner's Guide to Thermogravimetric Analysis*. 2010, PerkinElmer: [https://www.perkinelmer.com/CMSResources/Images/44-74556GDE\\_TGABeginnersGuide.pdf](https://www.perkinelmer.com/CMSResources/Images/44-74556GDE_TGABeginnersGuide.pdf). p. 19.
66. Huanga, L. and Z. Yanga, *Hydration kinetics of tricalcium silicate with the presence of portlandite and calcium silicate hydrate*. Elsevier, 2019: p. 11.

67. Recktenwald, G.W., *Finite-Dierence Approximations to the Heat Equation*. 2011: p. 27.
68. Jones, F.E., *The Air Density Equation and the Transfer of the Mass Unit*. JOURNAL OF RESEARCH of the National Bureau of Standards, 1978. **83**: p. 10.
69. Kang, S., et al., *Thermal Boundaries in Cone Calorimetry Testing*. Coatings, 2019: p. 20.
70. Loeb, A.L., *Thermal Conductivity: VII, A Theory of Thermal Conductivity of Porous Materials* Journal of the American Ceramic Society, 1954: p. 3.
71. Beck., F.d.M.a.J.V. *X22B10T0 Slab with jump in heat flux at one boundary, zero heat flux at other boundary and initially at zero temperature*. Exact Analytical Conduction Toolbox,, 2013. 14.
72. Beck, J.V. *X22B00T0Gx5 - Slab with partial volumetric heat source and zero heat flux at both boundaries*. Exact Analytical Conduction Toolbox,, 2014. 20.
73. Benatti, K.A. and A.A. Ribeiro, *O Método de Levenberg-Marquardt para o Problema de Quadrados Mínimos não Linear*. Simpósio de Métodos Numéricos em Engenharia, 2017: p. 7.