



CARACTERIZAÇÃO TÉRMICA DE MATERIAIS DE PROTEÇÃO AO FOGO

THIAGO BOER DE OLIVEIRA

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em:

Engenharia Industrial

ramo Engenharia Mecânica

Novembro de 2018

Dedicatória

À Lucélia Boer, José Oliveira e Matheus Boer

Agradecimentos

Este trabalho não poderia ser considerado devidamente concluído sem que nele expressasse o meu profundo sentimento de gratidão por todos aqueles que contribuíram de alguma forma para esta grande conquista.

Primeiramente à Deus por guiar meus passos e iluminar o meu caminho.

Aos meus pais José e Lucélia que batalharam a vida toda para garantir uma educação de qualidade aos filhos. Por todo amor, carinho e apoio que me deram durante toda minha vida. Muito obrigado por acreditarem em mim, por serem meu alicerce e motivação. Ao meu irmão Matheus por todo companheirismo e aprendizado.

Um agradecimento especial ao meu orientador Prof Luís Mesquita que nunca mediu esforços para garantir o bom desempenho deste trabalho. Sou muito grato pelos ensinamentos e pela seriedade que demonstrou durante todo período de supervisão desta dissertação, por acompanhar de perto e estar sempre disposto a me auxiliar em todas as vezes que busquei ajuda. Muito obrigado pela paciência, dedicação e incentivo.

Ao meu coorientador Prof Thiago Antonini, que de antemão aceitou a proposta de trabalhar em conjunto com o IPB e se dispôs a acompanhar e auxiliar esta dissertação. Muito obrigado pelos ensinamentos e conselhos.

Toda comunidade da UTFPR que foi extremamente importante para minha formação, a qual possibilitou a conquista de uma dupla diplomação e sempre prestou todo auxílio necessário durante minha graduação. Aos professores desta academia, em especial ao Irapuan, Reginaldo, Guataçara, Luís M, Thiago.A e Marcelo.

A toda comunidade do IPB, que acolheu os alunos da UTFPR com toda solicitude, por proporcionar uma experiência bastante enriquecedora, tanto profissionalmente quanto culturalmente.

À engenheira Luisa Barreira, responsável pelo laboratório de ensaios e resistência dos materiais, obrigado por toda prestatividade, auxílio e simpatia durante todos os ensaios realizados. Ao André Seca, por me ajudar a preparar as amostras no laboratório de manutenção sempre que necessário.

À Lessandra da Silva, que sempre me incentivou e apoiou a correr atrás dos meus objetivos. Muito obrigado por estar sempre ao meu lado, dando carinho, amor, força e por toda paciência nos momentos difíceis, você foi muito importante pra essa conquista.

Por fim, minha total gratidão aos meus familiares e amigos, que juntos formam minha base. Principalmente ao Fernando, João, Herivton, Nadson e meus primos que ao longo dos anos foram essenciais para o meu desenvolvimento pessoal. Em especial ao meu amigo Lucas Ferle, que desde o início participou e contribuiu continuamente acerca da minha formação pessoal e profissional.

Resumo

O método mais comum para se obter a resistência ao fogo requerida regulamentarmente é através de sistemas passivos de proteção contra incêndio, nos quais os materiais mais comuns utilizados são os revestimentos intumescentes, placa de gesso e de silicato de cálcio e argamassas projetáveis. A aplicação destes materiais retarda o aumento da temperatura na superfície dos elementos estruturais em situações de incêndios, preservando as propriedades mecânicas da estrutura para evitar o colapso total durante a operação de resgate e o combate contra as chamas.

Conhecer informações precisas sobre os efeitos que as elevadas temperaturas originam na condutividade térmica dos materiais de proteção ao fogo é um requisito fundamental para desenvolver um projeto de engenharia de segurança contra incêndio. Esta informação é ainda mais relevante na perspectiva do projeto baseado no desempenho, mas também essencial na aplicação dos métodos simplificados de cálculo.

Assim, uma investigação com diferentes materiais de proteção passiva foi realizada para demonstrar como a condutividade térmica é afetada quando o material de proteção é submetido a elevadas temperaturas. É apresentada uma abordagem experimental e outra numérica, baseada num algoritmo de otimização, para a determinação da condutividade térmica de duas placas de silicato de cálcio distintas utilizadas como material de proteção passiva contra incêndio. São utilizadas duas metodologias e os seus resultados para a determinação das propriedades à temperatura ambiente e temperaturas elevadas: (i) regime estacionário (Guarded Hot Plate); (ii) regime transiente, Transient Plane Source (HotDisk).

Os resultados obtidos revelam que a condutividade térmica das placas de silicato de cálcio possui elevada dependência com a temperatura, mediante as duas técnicas foi possível observar que o seu valor oscila conforme a temperatura e o tipo de reação térmica. Além disso, percebeu-se que o seu valor também é influenciado pela porosidade e o tipo de gás que envolve o material durante o aquecimento, tais aspetos são extremamente relevantes no âmbito dos cálculos da condutividade térmica do material.

Palavras Chave: condutividade térmica, materiais de proteção passiva, placa de gesso e de silicato de cálcio, Transient Plane Source (TPS), Guarded Hot Plate (GHP).

Abstract

The most common method for obtaining the required fire resistance is through passive fire protection materials, in which the most common materials used are the calcium silicate and gypsum boards and intumescent coatings. By using this material, it is possible to slow down the temperature increase on the structural elements surface during a fire situation, preserving the mechanical properties of the structure to avoid the total collapse during the rescue operation and the combat against the flames.

Knowing accurate information about the effects that high temperatures originate towards the thermal conductivity of fire protection materials is a fundamental prerequisite for developing a fire safety engineering design. This data is even more relevant in the perspective of those projects based on the performance, but also essential in the application of simplified calculation methods. The magnitude of this thermal property has a significant influence on the analysis of temperature distribution and heat flow which depends essentially on the thermal properties of the protection material.

Therefore, an investigation of different passive protection materials has been performed to demonstrate how the thermal conductivity is highly affected when those materials are exposed to high temperatures. A set of experimental tests and a numerical approach, based on an optimization algorithm are presented. The tests were conducted in different techniques such as: The Transient Plane Source (TPS) and the Guarded Hot Plate (GHP).

The results achieved confirm that the thermal conductivity of the calcium silicate boards has a high temperature dependence, both techniques had demonstrated that its value rates according to the temperature and thermal reaction. Moreover, it has been noted that the porosity and the type of gas that surrounds the material during its heating are aspects extremely relevant to determine the effective thermal conductivity of fire protection materials.

Keywords: Thermal conductivity, insulated materials, calcium silicate boards, Transient Plane Source (TPS), Guarded Hot Plate (GHP).

Índice

AGRADECIMENTOS	III
RESUMO.....	IV
ABSTRACT.....	V
ÍNDICE.....	VI
LISTA DE FIGURAS.....	VIII
LISTA DE TABELAS	XII
NOMENCLATURA	14
CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO	17
1.1 CONTEXTO E MOTIVAÇÃO	17
1.2 OBJETIVOS DA INVESTIGAÇÃO	19
1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO.....	19
CAPÍTULO 2: ESTADO DA ARTE	21
2.1 INTRODUÇÃO.....	21
2.2 MATERIAIS DE ISOLAMENTO DO TIPO PLACA	23
2.3 REVESTIMENTOS INTUMESCENTES	32
2.4 ARGAMASSAS PROJETÁVEIS	34
CAPÍTULO 3: DINÂMICA DOS INCÊNDIOS E EXIGÊNCIAS REGULAMENTARES	39
3.1 INTRODUÇÃO.....	39
3.2 CURVAS DE EVOLUÇÃO DA TEMPERATURA	43
3.2.1 <i>Curvas nominais</i>	43
3.2.2 <i>Curvas paramétricas</i>	44
3.3 MECANISMOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR.....	45
3.3.1 <i>Transferência de calor por convecção</i>	46
3.3.2 <i>Transferência de calor por radiação</i>	46
3.3.3 <i>Transferência de calor por condução</i>	47
CAPÍTULO 4: MATERIAIS DE PROTEÇÃO PASSIVA.....	48
4.1 INTRODUÇÃO.....	48
4.2 TIPOS DE MATERIAIS DE PROTEÇÃO PASSIVA	49

4.2.1	<i>Tintas intumescentes</i>	49
4.2.2	<i>Argamassas projetáveis</i>	50
4.2.3	<i>Materiais de isolamento do tipo placa</i>	54
4.3	PROPRIEDADES TÉRMICAS RELEVANTES DOS MATERIAIS	55
4.3.1	<i>Emissividade</i>	56
4.3.2	<i>Calor específico</i>	57
4.3.3	<i>Condutividade térmica</i>	57
CAPÍTULO 5: TESTES EXPERIMENTAIS EM PEQUENA ESCALA DE CARACTERIZAÇÃO TÉRMICA.		61
5.1	INTRODUÇÃO	61
5.2	TESTE EM PEQUENA ESCALA NO FORNO DE RESISTÊNCIA AO FOGO	62
5.2.1	<i>Preparação dos corpos de prova e procedimento</i>	63
5.2.2	<i>Evolução da temperatura em elementos protegidos</i>	70
5.3	TRANSIENT PLANE SOURCE (TPS)	73
5.3.1	<i>Preparação dos corpos de prova e procedimento</i>	75
5.3.2	<i>Execução do experimento</i>	77
5.4	GUARDED HOT PLATE (GHP).....	86
5.4.1	<i>Preparação dos corpos de prova e procedimento</i>	88
5.4.2	<i>Execução do experimento</i>	90
5.5	COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS.....	95
CAPÍTULO 6: ANÁLISE INVERSA DO PROBLEMA DE CONDUÇÃO DE CALOR.....		99
6.1	INTRODUÇÃO	99
6.2	MÉTODO DAS DIFERENÇAS FINITAS	102
6.3	APLICAÇÃO DO MÉTODO DAS LINHAS PARA CONDUÇÃO	107
6.4	IMPLEMENTAÇÃO DO ALGORITMO MODIFICADO DE LEVENBERG-MAQUARDT.....	109
CAPÍTULO 7: CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS		117
7.1	CONCLUSÕES GERAIS.....	117
7.2	LINHAS FUTURAS DE INVESTIGAÇÃO	120
REFERÊNCIAS		121
ANEXOS		125
	1-PRINCÍPIO DA TÉCNICA TRANSIENT PLANE SOURCE (TPS) E TABELAS DE RESULTADOS.....	125

Lista de figuras

Figura 1. Comparação do comportamento da condutividade térmica do gesso em função da temperatura. a) Pesquisas feitas em 2002, [12]. b) Pesquisas feitas em 2011,[15].	23
Figura 2. Condutividade térmica e massa específica do gesso em função da temperatura, [9].	24
Figura 3. Variação da condutividade térmica efetiva do gesso em função da temperatura, [17].	25
Figura 4. Variação da condutividade térmica do gesso com a temperatura, [18].	26
Figura 5. Variação da condutividade térmica do gesso em função da desidratação,[18] ...	26
Figura 6. Variação do calor específico do gesso em função da temperatura. a) Estudo realizado por [5]. b) Estudo realizado por [17].	27
Figura 7. Variação da massa do silicato de cálcio em função da temperatura, [20]	28
Figura 8. Condutividade térmica de materiais a base de silicato de cálcio em função da densidade, [5].	29
Figura 9. Comparação da condutividade térmica das placas de silicato de cálcio com os dados da literatura, [5].	30
Figura 10 Variação da condutividade térmica de placas a base de silicato de cálcio com a temperatura, [20].	31
Figura 11. Variação da condutividade térmica da placa de silicato de cálcio. a) placa de massa específica de 339 (Kg/m ³). b) massa específica de 506 (Kg/m ³), [22].	32
Figura 12. Variação da condutividade térmica do intumescente com a temperatura para diferentes espessuras do revestimento protetivo, [30].	34
Figura 13. Variação da condutividade térmica de argamassas x temperatura, [31].	36
Figura 14. Variação do calor específico de argamassas x temperatura, [31].	36
Figura 15. Perda de massa de argamassas x temperatura, [31].	37
Figura 16. Princípio do fogo através do tetraedro, [1].	39
Figura 17. Fases de desenvolvimento de um incêndio, [7].	40

Figura 18. Etapas e normas para projetos de segurança contra incêndios, [5].	42
Figura 19. Curvas nominais de incêndio, [7].	43
Figura 20. Comparação entre as curva paramétricas e padrão ISO 834, [5].	45
Figura 21. Reação das tintas intumescentes em altas temperaturas,[30].	49
Figura 22. Argamassa projetada sobre uma estrutura de aço, [1].	51
Figura 23. Comportamento da condutividade térmica efetiva em função da temperatura das placas de silicato de cálcio, [38].	59
Figura 24. Influência da espessura do material de proteção na evolução da temperatura, [7].	60
Figura 25. Forno de resistência ao fogo.	63
Figura 26. Procedimento de corte e tipos de materiais.	63
Figura 27. Acondicionamento das amostras de silicato de cálcio.	64
Figura 28. Esquema de furação para posicionamento dos termopares.	65
Figura 29. Preparação e ajuste dos termopares nas amostras para execução dos testes no forno.	66
Figura 30. Volume de controle das placas no interior do forno.	67
Figura 31. Distribuição de temperatura da amostra Promatec_200_S1 obtida pelo forno de resistência ao fogo. a) Antes das reações químicas. b) Pós reações químicas.	68
Figura 32. Distribuição de temperatura da amostra Promatec_200_S2 obtida pelo forno de resistência ao fogo. a) Antes das reações químicas. b) Pós reações químicas.	68
Figura 33. Distribuição de temperatura da amostra Promatec_H_S1 obtida pelo forno de resistência ao fogo. a) Antes das reações químicas. b) Pós reações químicas.	68
Figura 34. Distribuição de temperatura da amostra Promatec_H_S2 obtida pelo forno de resistência ao fogo. a) Antes das reações químicas. b) Pós reações químicas.	69
Figura 35. Modelo unidimensional de fluxo de calor com elemento protetivo,[7].	70
Figura 36. Comportamento da condutividade térmica em função do tempo mediante a curva padrão de incêndio. a) SC_H. b) SC_200.	72
Figura 37. Componentes do aparato Hotdisk, [44].	74
Figura 38. Equipamentos utilizados para medir a condutividade térmica (TPS). a) TPS. b) Forno.	75
Figura 39. Sensores utilizados para o experimento: a) revestimento com mica, b) revestimento com Kapton.	75

Figura 40. Preparação das amostras de silicato de cálcio para execução dos testes. a) Procedimento para temperatura ambiente. b) Procedimento para altas temperaturas.	76
Figura 41. Preparação do teste para temperatura ambiente através do TPS.	77
Figura 42. Propriedades térmicas das placas SC-Promatec_H em temperatura ambiente..	79
Figura 43. Propriedades térmicas das placas SC-Promatec_200 em temperatura ambiente.	79
Figura 44. Preparação do teste para elevadas temperaturas através do TPS.....	80
Figura 45. Condutividade térmica x Temperatura da placa Promatec_200 através da técnica TPS.....	82
Figura 46. Condutividade térmica x Temperatura da placa Promatec_H através da técnica TPS.....	83
Figura 47. Condutividade Térmica dos gases usados no TPS. a) Azoto. b) Ar	84
Figura 48. Influência da porosidade nas placas de silicato de cálcio promatec_H medidas com o TPS.....	85
Figura 49. Influência da porosidade nas placas de silicato de cálcio promatec_200 medidas com o TPS.....	85
Figura 50. Guarded Hot Plate. (a) equipamento utilizado, (b) componentes, [48].	87
Figura 51. Principais etapas para executar os testes. (a) calibração do equipamento (zero_máquina), (b) e (c) são as etapas de preparação e inserção do suporte e peça no equipamento, (d) início do teste, aplicação da pressão adequada.	89
Figura 52. Configuração do software GHP.	90
Figura 53. Oscilação dos resultados obtidos através do GHP. a) Promatec_H. b) Promatec_200.....	92
Figura 54. Influência da porosidade na condutividade térmica das placas Promatec_H através do GHP.....	93
Figura 55. Influência da porosidade na condutividade térmica das placas Promatec_200 através do GHP.....	93
Figura 56. Comparação da condutividade térmica em temperatura ambiente através das técnicas TPS e GHP. a) Promatec_H. b) Promatec_200.....	96
Figura 57. Comparação das técnicas utilizadas neste trabalho para o comportamento da condutividade térmica em função da temperatura para as placas promatec_H.....	97
Figura 58. Comparação das técnicas utilizadas neste trabalho para o comportamento da condutividade térmica em função da temperatura para as placas promatec_200.....	97

Figura 59. Esquema de análise do método inverso.	100
Figura 60. Método das diferenças finitas, [53].....	102
Figura 61. Malha unidimensional das diferenças finitas, [53]	103
Figura 62. Tipo do espaçamento unidimensional de diferenças finitas. a) Diferenças finitas uniformes. b) Diferenças finitas não uniformes, [7].....	104
Figura 63. Fluxograma do algoritmo numérico.....	109
Figura 64. Ajuste para desidratação da placa de silicato de cálcio através do Matlab.....	110
Figura 65. Comparação das metodologias abordadas acerca da variação da condutividade térmica em função da temperatura das placas Promatec_200.	113
Figura 66. Comparação das metodologias abordadas acerca da variação da condutividade térmica em função da temperatura das placas Promatec_H.....	113
Figura 67. Evolução da temperatura real e numérica da placa Promatec_200.....	115
Figura 68. Evolução da temperatura real e numérica da placa Promatec_H.....	115
Figura 69. Circuito elétrico do sensor Hotdisk, [42, 45]	126

Lista de tabelas

Tabela 1. Etapas durante a degradação do silicato de cálcio,[20].....	28
Tabela 2. Equações da condutividade térmica de alguns materiais de proteção, [5].	30
Tabela 3. Variação da condutividade térmica da placa de silicato de cálcio de baixa densidade pelo método Hot-Wire, [21].	31
Tabela 4. Condutividade térmica da argamassa de fibra projetada,[1].	35
Tabela 5. Calor específico da argamassa de fibra projetada, [1].....	35
Tabela 6. Funções da condutividade térmica para algumas argamassas, [31]	37
Tabela 7. Funções do calor específico para algumas argamassas, [31].	38
Tabela 8. Resistência padrão ao fogo de elementos estruturais para edifícios, [7].....	41
Tabela 9. Espessura da camada protetiva de tintas intumescentes para diferentes temperaturas críticas e fatores de massividade, [34].....	51
Tabela 10. Composição química das argamassas comerciais, [31].....	52
Tabela 11. Exigências de órgãos internacionais de normatização, [1].....	52
Tabela 12. Testes feitos em argamassas de baixa, média e alta densidade, [1].	53
Tabela 13. Espessura da argamassa para diferentes temperaturas críticas, [34].	53
Tabela 14. Propriedades térmicas dos principais materiais de proteção térmica, [1].	55
Tabela 15. Emissividade dos materiais típicos a 300°C,[5].	56
Tabela 16. Valores da condutividade térmica fornecida pelo fabricante.	64
Tabela 17. Parâmetros experimentais recomendados pela norma, [45].	74
Tabela 18. Propriedades térmica das placas SC-H em temperatura ambiente através do TPS.	78
Tabela 19. Propriedades térmica das placas SC-200 em temperatura ambiente através do TPS.	78

Tabela 20. Teste de calibração no Hotdisk.....	81
Tabela 21. Resumo dos resultados obtidos através do GHP das placas Promatec_H.....	91
Tabela 22. Resumo dos resultados obtidos através do GHP das placas Promatec_200.....	92
Tabela 23. Redução da condutividade térmica após as reações térmicas.....	94
Tabela 24. Comparação entre os resultados da condutividade térmica através do TPS e GHP das placas promatec_H em T_amb-23°C.....	95
Tabela 25. Comparação entre os resultados da condutividade térmica através do TPS e GHP das placas promatec_200 em T_amb-23°C.....	95
Tabela 26. Relações matemáticas da condutividade térmica das placas SC_H em elevadas temperaturas.....	97
Tabela 27. Relações matemáticas da condutividade térmica das placas SC_200 em elevadas temperaturas.....	98
Tabela 28. Variação da massa e entalpia para as reações térmicas das placas de SC,[20].....	111
Tabela 29. Resultados obtidos através do TPS das placas Promatec_H em ambiente com azoto antes das reações térmicas.....	128
Tabela 30. Resultados obtidos através do TPS das placas Promatec_H em ambiente com azoto após as reações térmicas.	130
Tabela 31. Resultados obtidos através do TPS das placas Promatec_H em ambiente com ar antes das reações térmicas.	131
Tabela 32. Resultados obtidos através do TPS das placas Promatec_200 em ambiente com azoto antes das reações térmicas.....	131
Tabela 33. Resultados obtidos através do TPS das placas Promatec_200 em ambiente com azoto após as reações térmicas.	132
Tabela 34. Resultados obtidos através do TPS das placas Promatec_200 em ambiente com ar antes das reações térmicas.	133

Nomenclatura

Abreviaturas

ART Antes de ocorrer as reações térmicas.

GHP Guarded Hot Plate.

PRT Pós reações térmicas.

SC Silicato de cálcio.

TPS Transient Plane Source.

THS Transient Hot Strip.

Letras maiúsculas do alfabeto Latino

A Área da secção transversal, fator pré exponencial.

A_m Área da superfície de um elemento por unidade de comprimento.

A_p Área do material de proteção.

A_p/V Fator de massividade.

D_1, D_2 Matrizes de diferenciação.

E_A Energia de ativação.

E_{max} Fator máximo de expansão.

J Matriz jacobiana.

K Condutividade térmica.

K^* Condutividade térmica efetiva.

K_g Condutividade térmica do gás.

K_s Condutividade térmica sólido.

L Espessura do material de proteção.

M	Número dos intervalos de tempo.
N	Número total de nós espaciais.
Q	Geração de calor.
R	Constante universal dos gases.
S	Sensores de temperatura
T_a	Temperatura instantâneas do aço.
T_g	Temperatura instantâneas do gás.
T^m	Temperatura no nó atual.
T_i^{m+1}	Temperatura no nó seguinte.
T_s	Temperatura do aço.
$\check{T}_i(\check{p}_j)$	Distribuição de temperatura através do método numérico.
Y_i	Distribuição de temperatura através do método experimental.

Letras minúsculas do alfabeto latino

b	Largura da base de uma secção transversal.
c_a	Calor específico do aço.
c_p	Calor específico do material de proteção.
d_p	Espessura do material de proteção.
e_d	Teor de desidratação da água.
e_{free}	Teor de água livre.
f_1, f_2	Fatores de correção.
h_c	Coefficiente de transferência de calor por convecção.
m	Massa atual.
m_0	Massa inicial.
m_c	Massa de carvão.
n	É o expoente que descreve a dependência de expansão de m_0 .

\dot{p}_j	Vetor dos parâmetros desconhecidos.
$\dot{q}'_{net,c}$	Calor concedido pela convecção.
$\dot{q}'_{net,d}$	Densidade de carga de incêndio.
$\dot{q}'_{net,r}$	Calor concedido pela radiação.
t	Tempo.
t_{max^*} e t^*	Tempos fictícios.

Letras maiúsculas do alfabeto grego

Δ_c	Variação do calor específico.
Δr	Expansão do revestimento intumescente.
Δ_t	Incremento de tempo.
ΔT	Variação de temperatura.
ΔT_a	Variação de temperatura no aço.
Δx	Variação no eixo x.
θ_g	Temperatura calculada do gás.
Φ	Fator de forma.
μ_k	Coefficiente de amortecimento

Letras minúsculas do alfabeto grego

α	Difusividade térmica.
$\partial \rho_v$	Variação da massa específica.
∂t	Variação do tempo.
ε_f	Emissividade do compartimento de incêndio
ε_m	Emissividade do elemento de proteção.
ρ_a	Massa específica do aço.
ρ_p	Massa específica do material de proteção.
ζ	Porosidade dos materiais de proteção.

Capítulo 1: Introdução

1.1 Contexto e motivação

Desde épocas mais remotas o fogo se faz presente na vida dos homens. Um dos grandes responsáveis pela sobrevivência e desenvolvimento da humanidade, foi usado para defesa contra os animais, preparar alimentos e se proteger das épocas gélidas. Na atualidade, o fogo segue sendo essencial, pois seu uso é requerido em incontáveis aplicações tanto no que se refere as funções mais simples, como na preparação de alimentos, quanto nas várias aplicações da engenharia. Porém, muitas vezes o homem perde o controle sobre o fogo dando origem a incêndios, resultando em danos terríveis aos bens materiais e muitas vezes também vítimas humanas.

Um dos episódios mais memoráveis ocorreu em Roma, o grande incêndio começou no núcleo comercial na noite de 18 de julho do ano de 64 d.C. O fogo alastrou-se rapidamente pelas zonas mais povoadas da cidade causando grande prejuízo. Neste período os romanos viviam em edifícios altamente inflamáveis devido sua estrutura de madeira, fato que contribui bastante para a propagação das chamas, [1].

Segundo relatos da associação internacional de incêndio e serviço de resgate, entre os anos de 1993-2015 ocorreram por volta de 4,5 milhões de incêndios que conduziram a morte de mais de 60 mil pessoas, [2]. Em relação a Europa, há registros de mais de 2 milhões de incêndios anuais, gerando em média 25 mil mortes e incontáveis feridos além de um prejuízo de 10 milhões de dólares, [3]. Por estes motivos, a atenção da sociedade relacionada com os incêndios está cada vez mais presente nos projetos de edificações, pois observa-se com frequência grandes tragédias envolvendo fogo nas construções. Sendo assim, torna-se indispensável a investigação de medidas protetivas contra incêndios, bem como a viabilidade técnica e económica destas aplicações.

No geral as ferramentas de combate contra incêndios estão subdivididas em dois grandes grupos, os materiais de proteção ativa e passiva, nas quais visam conter o fogo e impedir que as chamas se propaguem. A grande diferença é que os materiais de proteção ativa necessitam da intervenção direta do homem, seja por acionamento manual ou automático, para que se inicie o combate contra a propagação do incendio. Os materiais desta classe que são amplamente empregados são: extintores, hidrantes, chuveiros automáticos e os sistemas de alarme e evacuação.

Já os materiais de proteção passiva não requerem nenhuma intervenção do homem, sua ação contra o fogo se baseia nas propriedades isolantes e/ou químicas intrínsecas a cada material, dentre os materiais mais utilizados estão as placas de silicato de cálcio e de gesso, as tintas intumescentes e as argamassas projetáveis. Os materiais de proteção passiva são empregados para impedir a propagação das chamas e manter a temperatura mais baixa possível em um eventual ataque térmico, onde a temperatura da chama pode atingir valores entre 700 e 1000 [°C]. Porém, para alcançar bons resultados através deste método é necessário que o projeto seja realizado de forma racional no tocante ao tipo de material de proteção e espessura do mesmo, do contrário, pode-se perder a praticabilidade e/ou a eficácia na proteção das estruturas, as quais podem entrar em colapso devido à degradação da resistência mecânica dos metais em altas temperaturas,[4].

Nos dias que correm a utilização dos materiais de proteção passiva é frequentemente requerida nos projetos estruturais, contudo, há grande dificuldade na obtenção plena dos benefícios que estes materiais são capazes de proporcionar devido à falta de informações sobre a variação das propriedades térmicas quando estes são expostos a altas temperaturas. Segundo Wang a condutividade térmica é considerada a propriedade mais relevante ao analisar um fenômeno térmico, a compreensão do seu comportamento é crucial para realização satisfatória e plena dos projetos que envolvam sistemas de proteção passiva, portanto, sua dependência com a temperatura deve ser quantificada, do contrário, o projeto estará subestimando a temperatura critica conduzindo a resultados inseguros, [5].

Diante desta perspectiva, a elaboração deste trabalho incide na caracterização térmica de alguns materiais de proteção passiva, através de uma análise numérica e experimental. Serão apresentados diversos estudos com diferentes materiais sobre os principais fatores que influenciam as suas propriedades térmicas.

1.2 Objetivos da investigação

O objetivo do tema proposto respalda-se na verificação do comportamento dos materiais de proteção térmica frente ao fogo, com enfoque na caracterização da condutividade térmica de dois tipos de placas de silicato de cálcio. Serão apresentadas duas abordagens distintas, numérica e experimental, as quais partilham do mesmo propósito: demonstrar a dependência da condutividade térmica com a temperatura. Os testes experimentais evidenciarão tal dependência mostrando como essa propriedade é influenciada pela temperatura. A finalidade da abordagem numérica consiste em encontrar uma equação que contemple uma ampla faixa de temperatura, na qual o valor da condutividade térmica poderá ser determinado.

Portanto, a presente dissertação tem como meta demonstrar a importância de contabilizar a variação das propriedades térmicas nos projetos e, adicionalmente, contribuir com dados experimentais e numéricos para o preenchimento desta lacuna de valores, os quais poderão ser usados para garantir a integridade dos edifícios em situação de incêndio e assim, preservar a vida humana e os bens materiais.

1.3 Organização da dissertação

O capítulo 2 consiste na revisão bibliográfica e introdução dos principais materiais de proteção usados na engenharia de segurança contra incêndio. Apresentar-se-á um resumo das pesquisas mais relevantes relacionados com à caracterização térmica, incluindo modelos numéricos e experimentais, possibilitando ao leitor uma melhor compreensão de como as propriedades térmicas são afetadas pela temperatura e a importância de contabilizar tal variação.

No capítulo 3 são tratados assuntos importantes ligados à segurança contra incêndios. Inicialmente aborda-se a dinâmica dos incêndios, suas fases e/ou estágios. Em seguida traz-se uma análise sobre as curvas utilizadas para prever a ação térmica do fogo para efeitos de projeto estruturais, sendo elas: as curvas normais e paramétricas. Além disto, aborda-se os fundamentos e mecanismos de transferência de calor, com um enfoque específico para condições de incêndio.

No capítulo 4 serão explorados os aspetos relevantes referentes ao comportamento frente ao fogo dos principais materiais de proteção passiva. Por fim, tem-se uma análise sobre as principais propriedades térmicas dos materiais, onde são evidenciados os parâmetros mais relevantes acerca destas propriedades.

O capítulo 5 descreve as técnicas e os procedimentos experimentais que foram utilizados neste trabalho. Os testes têm o propósito de caracterizar a condutividade térmica de dois tipos de placas de silicato de cálcio. Inicialmente tem-se uma breve introdução sobre os equipamentos e uma descrição teórica de como são feitas as medições. Os ensaios foram conduzidos pelo Hotdisk (TPS), Guarded Hot Plate (GHP) e por um forno de resistência ao fogo. Durante os ensaios são tomadas algumas medições da condutividade térmica em diferentes intervalos de temperaturas. Ademais, os resultados obtidos serão discutidos e uma comparação será feita entre o modelo numérico e os testes experimentais.

O capítulo 6 é destinado para tratar sobre a análise inversa do problema de condução do calor, primeiramente discorre-se sobre os princípios básicos do método, em seguida têm-se o funcionamento do programa numérico, que consiste na aplicação do algoritmo modificado de Levenberg-Marquardt. O código foi obtido através do software Matlab com o objetivo de encontrar uma equação otimizada capaz de estimar o valor da condutividade térmica em função da temperatura.

Por fim, o capítulo 7 permitirá relatar de forma conclusiva, todos os pontos relevantes que foram observados no caso em estudo e pontuará alguns tópicos que podem ser aprimorados nos trabalhos futuros.

Capítulo 2: Estado da arte

2.1 Introdução

O estado atual do conhecimento sobre a resistência do aço quando submetido a elevadas temperaturas se encontra definido e suficientemente detalhado. Quando o aço estrutural atinge a marca de 550 [°C] sua resistência mecânica diminui cerca de 40% comparado à temperatura ambiente. Devido a este fato, no passado, os projetos eram realizados com base no método da tensão admissível, no qual a tensão máxima era considerada aproximadamente 60% da resistência a temperatura ambiente. Esta hipótese tem relação com o uso de valores referentes a temperatura máxima ou crítica que um elemento suporta na iminência de atingir o colapso, [6]. Sob esta concepção surgiu uma nova técnica designada para proteger as estruturas metálicas, a partir da aplicação de sistemas passivos de proteção, que limita a propagação das chamas e evita o superaquecimento dos elementos estruturais. Todavia, o uso destes materiais era feito de maneira não racional, resultando em custo demasiado capaz de atingir até 23% do custo total da construção, [7].

Ao empregar o uso passivo de proteção o aquecimento dos perfis protegidos ocorre unicamente por condução de calor, pois o elemento estrutural não está diretamente exposto a radiação térmica do fogo ou em contato com os gases quentes gerados pelo incêndio, [8]. O método simplificado contido no Eurocódigo 3, parte 1.2 (CEN, 2005b) é amplamente empregado nos projetos estruturais para determinar como se procede o aumento da temperatura em um conjunto estrutural envolvido por uma camada de proteção, contudo, tal simplificação não considera a variação da espessura dos elementos de proteção nem a alteração das propriedades físicas e térmicas que ocorrem durante o aquecimento do conjunto estrutural, ver equação (2.1). Consequentemente, alguns problemas podem surgir no projeto devido a não representação real de incêndio, pois a condutividade térmica,

difusividade térmica e calor específico são influenciados com a temperatura e desempenham funções importantíssimas no âmbito dos cálculos de transferência de calor e capacidade energética, [4, 5].

Um modelo teórico representado pela equação (2.2), permite estimar o comportamento da condutividade térmica efetiva para os principais materiais de proteção passiva, como as tintas intumescentes, placas de gesso e de silicato de cálcio, fibra de rocha e argamassa projetável, [5].

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

Onde, ΔT_s representa a evolução de temperatura no aço baseadas em curvas normalizadas de incêndio, K é a condutividade térmica do material de proteção, A_p é a área apropriada do material de proteção, c_a calor específico do aço, ρ_a massa específica do aço, T_g e T_a representam as temperaturas instantâneas dos gases e do aço, respetivamente e A_p/V é o fator de massividade e $\phi = c_p \rho_p d_p / c_s \rho_s \left(\frac{V}{A_p}\right)$.

$$K^* = K_s \frac{K_g \zeta^{\frac{2}{3}} + \left(1 - \zeta^{\frac{2}{3}}\right) K_s}{K_g \left(\zeta^{\frac{2}{3}} - \zeta\right) + \left(1 - \zeta^{\frac{2}{3}} + \zeta\right) K_s} \quad (2.2)$$

Onde, K^* representa a condutividade térmica efetiva que depende de K_g e K_s que são as condutividades térmicas do gás e do sólido, respetivamente e ζ é a porosidade do material.

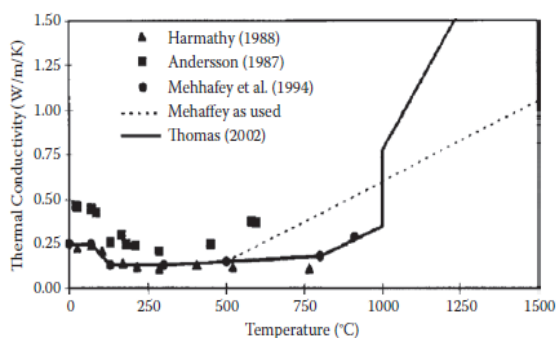
Atualmente, o número de variedades de materiais de proteção passiva é amplo no mercado, com propriedades físicas e químicas distintas, apresentando diferentes aspetos que interferem tanto no custo quanto na estética dos edifícios. Os tópicos subsequentes têm como objetivo abordar os principais estudos e descobertas feitas por diversos pesquisadores em relação aos principais materiais protetivos, sem descrever detalhadamente os princípios básicos de funcionamento de cada material, pois o capítulo 4 é dedicado inteiramente para essa finalidade.

2.2 Materiais de isolamento do tipo placa

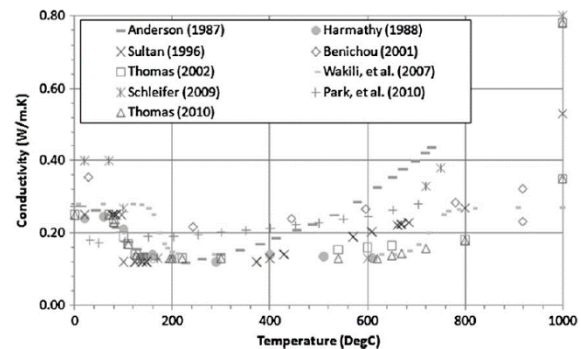
A principal característica de resistência ao fogo das placas de gesso e de silicato de cálcio é devido ao processo de desidratação. Durante esse fenômeno térmico, boa parte da energia liberada pelo fogo é destinada para evaporar as moléculas de água que estão na rede cristalina do material, [9].

O comportamento térmico e químico de desidratação desses materiais tem sido objetivo intensivo de estudo durante as últimas décadas tanto experimentalmente [10-12], quanto por modelagem numérica, [13, 14]

Em 2002, Thomas comparou inúmeros estudos realizados sobre o comportamento da condutividade térmica do gesso disponíveis na literatura, e o resultado é ilustrado na Figura 1 a). Mais tarde, Hopkin et al realizaram um trabalho mencionando as incertezas em torno das propriedades térmicas do gesso quando sujeitos a curva padrão do fogo. Segundo os autores, os estudos realizados no campo da transferência de calor através do gesso trazem informações contraditórias. Reconhecendo tal necessidade, desenvolveram um estudo numérico destacando as consequências da falta de informações sobre as propriedades térmicas do gesso. Por fim, compararam os resultados da condutividade térmica obtidas por vários pesquisadores ver Figura 1 b), [12] e concluíram que algumas propriedades da placa de gesso disponíveis na literatura não são independentes da taxa de aquecimento, sugerindo a realização de mais testes e pesquisas, [15].



a)



b)

Figura 1. Comparação do comportamento da condutividade térmica do gesso em função da temperatura. a) Pesquisas feitas em 2002, [12]. b) Pesquisas feitas em 2011, [15].

Em relação aos resultados acima, Andersson os obteve utilizando a técnica Transient Hot Strip (THS), o método mede a condutividade térmica através da resistência de uma tira de metal embutida no material de interesse. Mehaffey et al, encontraram a solução usando um medidor de condutividade térmica, o medidor usado é baseado na análise estacionária de transferência de calor, [12].

Com o auxílio de uma correlação matemática disponível em [16], Kolaitis e Founti demonstraram a variação da condutividade térmica e da massa específica em função da temperatura, como retrata a Figura 2. Um comportamento semelhante é identificado na obra numérica e experimental de Wang, neste caso, o autor determinou o comportamento da condutividade térmica efetiva através da equação (2.2),[5]. Para isso foi considerado os três modos de transferência de calor, radiação, convecção e condução bem como a condutividade térmica da placa de gesso e a condutividade térmica do ar devido a porosidade do gesso, ver a Figura 3.

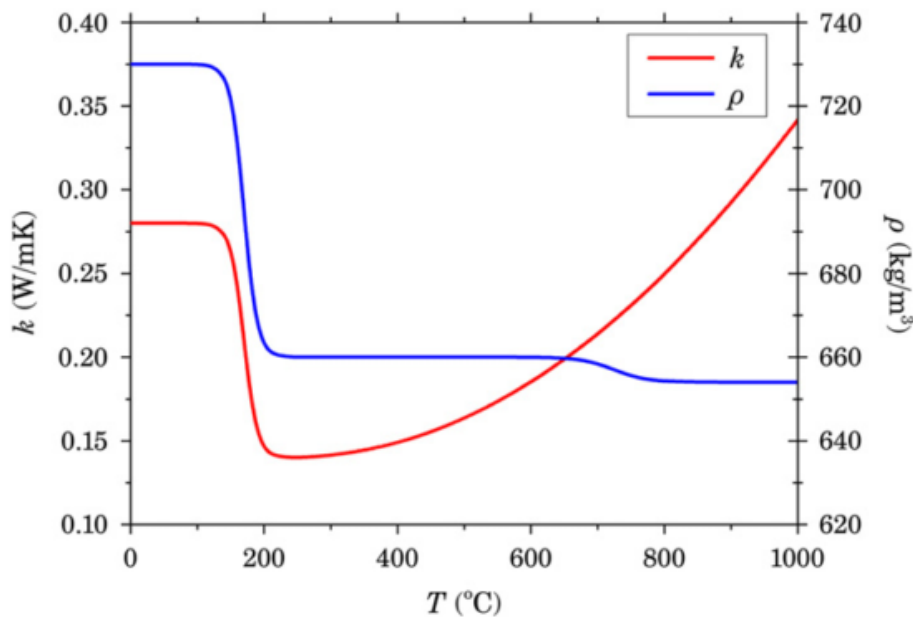


Figura 2. Condutividade térmica e massa específica do gesso em função da temperatura, [9].

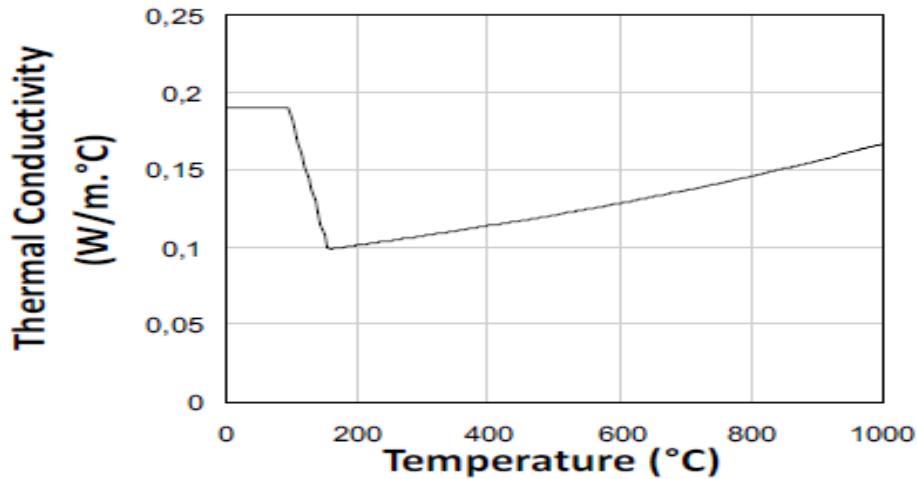


Figura 3. Variação da condutividade térmica efetiva do gesso em função da temperatura, [17].

Em 2011, Kontogeorgos et al [18], investigaram o desempenho térmico da placa de gesso durante o processo de aquecimento e desidratação, os resultados obtidos sugerem que a condutividade térmica do gesso se altera durante a transformação química, ver Figura 4. Nesta obra os autores usaram os dados medidos experimentalmente para gerar um polinómio de quarta ordem que foi normalizado com base na condutividade térmica em temperatura ambiente e assim, expressaram a equação (2.3) em função da degradação do material. A Figura 5 retrata como a condutividade térmica se altera com a perda de massa.

$$\frac{K^*}{K_{ref}} = \alpha_4 x^4 + \alpha_3 x^3 + \alpha_2 x^2 + \alpha_1 x + \alpha_0 \quad (2.3)$$

Sendo, $\alpha_4 = +2,172584 * 10^{-6}$, $\alpha_3 = +5,937607 * 10^{-6}$, $\alpha_2 = +1,458000 * 10^{-3}$, $\alpha_1 = -7,787834 * 10^{-2}$, $\alpha_0 = +9,997864 * 10^{-1}$ e $x = (1 - m/m_0) * 100$.

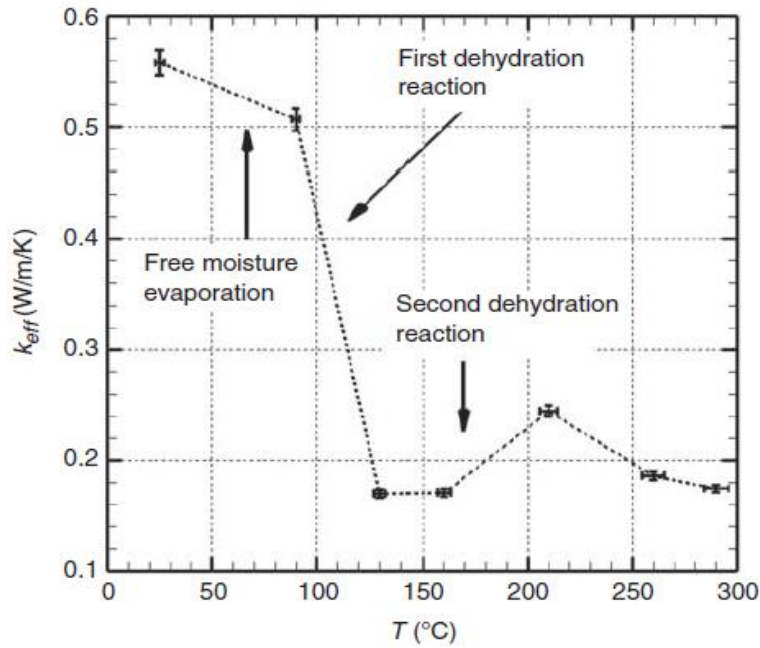


Figura 4. Variação da condutividade térmica do gesso com a temperatura, [18].

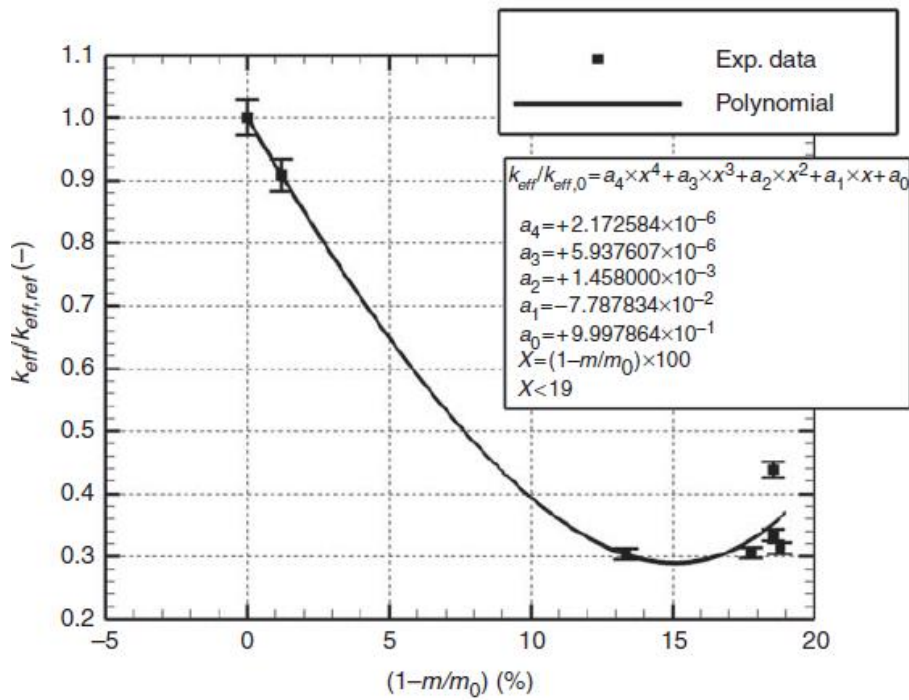


Figura 5. Variação da condutividade térmica do gesso em função da desidratação, [18]

A medida que a condutividade térmica se altera com a temperatura, o calor específico do gesso também sofre modificações em determinados pontos durante o aquecimento, Wang também demonstrou a variação desta propriedade térmica utilizando a

equação (2.4). A Figura 6 a) retrata o resultado obtido do comportamento do calor específico durante as reações químicas de desidratação do gesso, [5]. Analogamente, Rahmanian usou a mesma equação de Wang para estudar o comportamento do calor específico, contudo, os resultados obtidos revelam uma discrepância relacionada com a temperatura que ocorre a segunda reação química durante a desidratação, ver Figura 6 b).

$$\Delta_c = \frac{2,26 \times 10^6}{\Delta T} (e_{df_1} + e_{free})f_2 \quad (2.4)$$

Onde, Δ_c é a variação do calor específico, e_d representa o teor de desidratação da água, referente ao peso total, e_{free} é o teor de água livre, ΔT é a variação de temperatura e f_1, f_2 são fatores de correção.

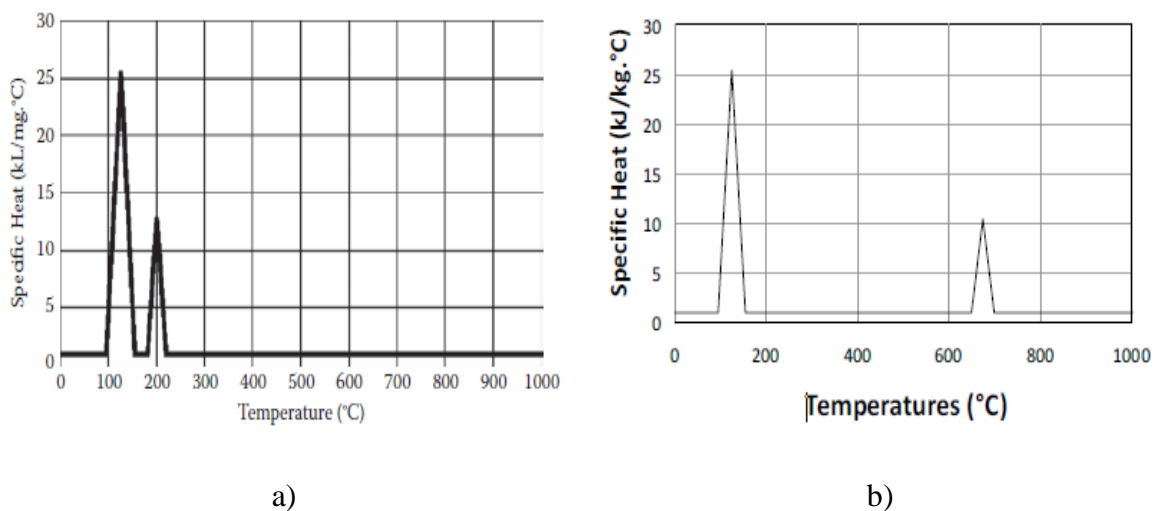


Figura 6. Variação do calor específico do gesso em função da temperatura. a) Estudo realizado por [5]. b) Estudo realizado por [17].

Mediante a figura acima, nota-se que os dois picos de alteração do calor específico do gesso ocorrem durante as duas reações químicas no processo de desidratação. Evidentemente que durante estes fenómenos necessita-se de maiores quantidades de energia para romper as ligações químicas das moléculas de água e realizar a evaporação.

Por sua vez, as placas de silicato de cálcio apresentam comportamento muito semelhante a placas de gesso. Entretanto, em um projeto que requer maior capacidade de

isolamento térmico e resistência mecânica as placas a base de silicato de cálcio exercem melhor desempenho em termos de resistência mecânica e isolamento do que as placas de gesso. Inúmeras características deste material são responsáveis pelo bom desempenho térmico, dentre elas, destacam-se uma série de reações endotérmicas que decorrem em intervalos distintos de temperatura, em complemento, há água contida na composição deste material (cerca de 5%), fato que agrega maior resistência térmica devido a desidratação, [19].

Por consequência da desidratação, a massa nas placas de silicato de cálcio sofre variação durante seu aquecimento. Para verificar tal fenômeno, Dale e Kuldeep, submeteram alguns materiais de proteção em elevadas temperaturas. Os resultados da degradação são fornecidos na Figura 7 e foram subdivididos em 4 etapas que são descritas conforme a Tabela 1.

Tabela 1. Etapas durante a degradação do silicato de cálcio,[20].

Reação	Temperatura [° C]	Perda de Massa [%]	Δm total [%]
Evaporação da água livre	25 to 100	9	12
Primeira fase de desidratação (Hidrato)	100 to 200	23,5	
Segunda fase de desidratação (Hidróxido)	400 to 600	21,5	
Descarbonatação	600 to 1000	46	

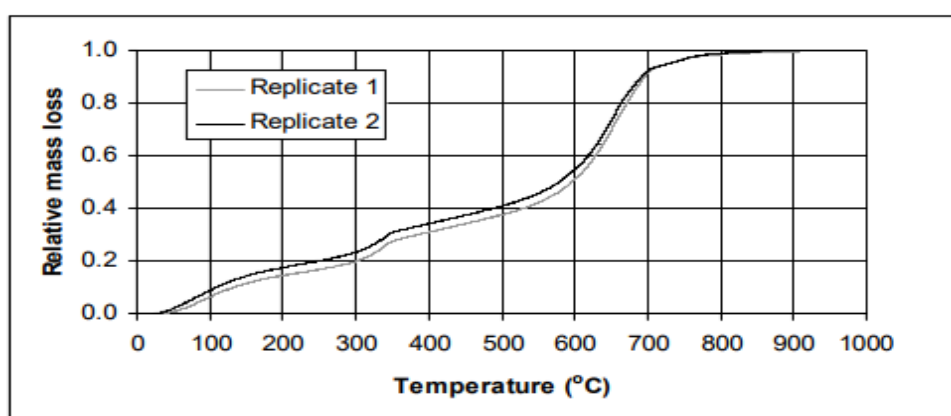


Figura 7. Variação da massa do silicato de cálcio em função da temperatura, [20]

Em conclusão, os autores afirmaram que recorreram a uma análise simplificada para estimar a degradação do material e ainda enfatizaram que existe a possibilidade de haver reações adicionais que podem cooperar com o fenómeno, [20].

A condutividade térmica das placas a base de silicato de cálcio é bastante influenciada pela massa específica, como ilustra a Figura 8, [5].

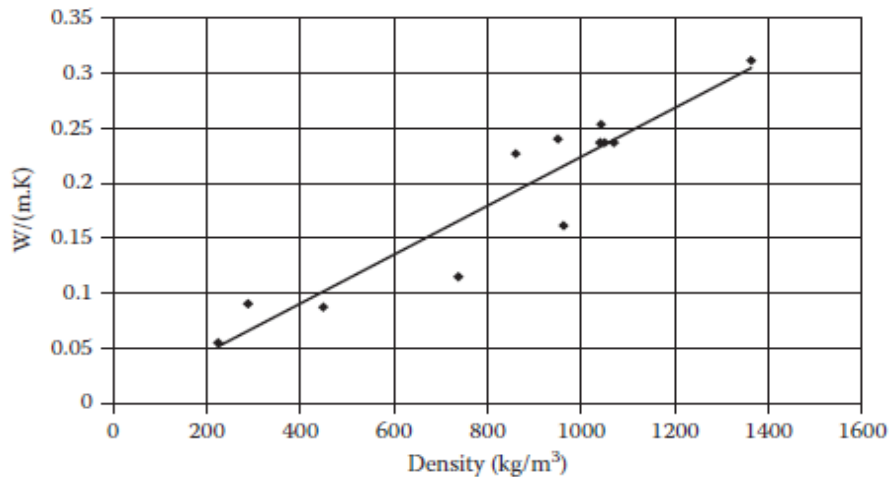


Figura 8. Condutividade térmica de materiais a base de silicato de cálcio em função da densidade, [5].

Em conformidade com a Figura 8, é razoável admitir que esta propriedade térmica varia conforme uma função linear. Assim sendo, Wang et al, assumiram uma função de primeira ordem para estimar os valores da condutividade térmica com relação a massa específica, ver equação (2.5).

$$K^* = 0,23 \frac{\rho}{1000} \quad (2.5)$$

Onde, ρ é a massa específica.

Posteriormente, os autores compararam os valores da condutividade térmica obtidos com a equação (2.5) com os dados encontrados na literatura, ver Figura 9.

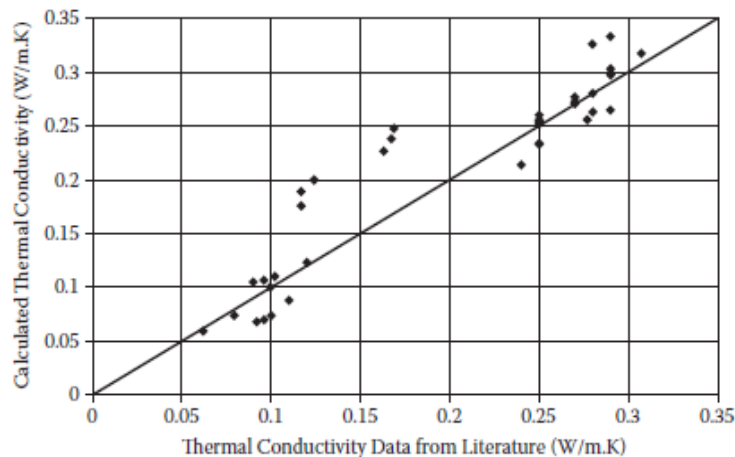


Figura 9. Comparação da condutividade térmica das placas de silicato de cálcio com os dados da literatura, [5].

A Tabela 2 apresenta o resumo de alguns dados teóricos e correlações que podem ser empregadas para projetos de engenharia contra incêndio, excetuando os casos que os fabricantes dos materiais de proteção disponibilizam as propriedades necessárias em altas temperaturas.

Tabela 2. Equações da condutividade térmica de alguns materiais de proteção, [5].

Material	Massa específica [Kg/m ³]	Calor específico [J/Kg °C]	Condutividade térmica [W/mK]
Fibra de rocha	155-180	900	$K=0,022+0,1475x(T/1000)^3$
Lã mineral	165	840	$K=0,03+0,2438x(T/1000)^3$
Silicato de cálcio	Variada	900	$K=K^*+C(T^3)$
			$K^*=0,23x(\rho/1000)$
			$C=0,08x(2540-\rho)/1000$
Vermiculite	Variada	900	$K=K^*+C(T^3)$
			$K^*=0,27x(\rho/1000)$
			$C=0,18x(1000-\rho)/1000$

Ao longo dos anos, vários laboratórios e pesquisadores desenvolveram testes experimentais para caracterizar a condutividade térmica das placas de silicato de cálcio em função da temperatura através de diferentes técnicas, tais como: o Guarded Hot Plate e Hotwire. Porém, de acordo com Salmon, em virtude das divergências e incertezas a cerca dos dados sobre a condutividade térmica disponível na literatura, tem-se bastante

dificuldade em validar os resultados, a Tabela 3 resume os resultados obtidos pelo autor através do Hotwire, [21].

Tabela 3. Variação da condutividade térmica da placa de silicato de cálcio de baixa densidade pelo método Hot-Wire, [21].

Temperatura [°C]	Condutividade térmica [mw/mK]	Desvio padrão [mw/mK]
25	97	8
250	108	7
500	132	9
700	155	10
900	184	12

Em 2007, Dale e Kuldeep desenvolveram pesquisas com foco no desempenho e caracterização dos materiais de proteção passiva. A fim de determinar a condutividade térmica efetiva das placas de silicato de cálcio os autores utilizaram um calorímetro de cone, o resultado é representado pela Figura 10. Diante das leituras obtidas pelo experimento expressaram a equação (2.6), que estabelece a relação entre a condutividade térmica efetiva e a temperatura (T), [20].

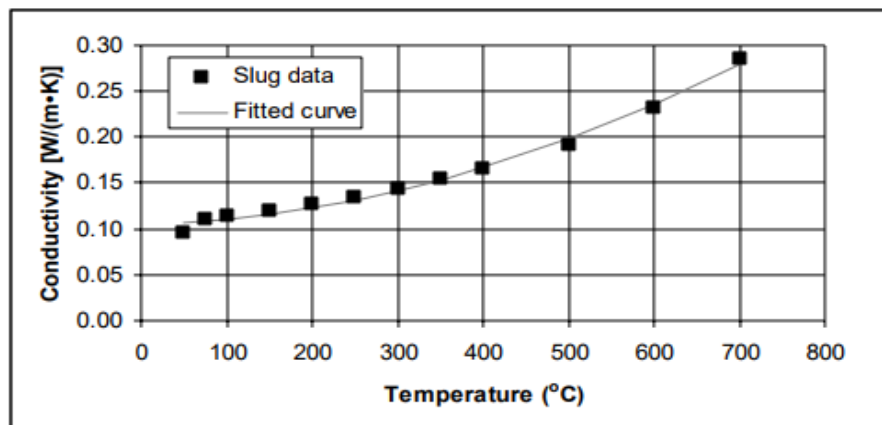


Figura 10 Variação da condutividade térmica de placas a base de silicato de cálcio com a temperatura, [20].

$$K^* = 0,119 - 0,00014T + (3,13 * 10^{-7})T^2 \quad (2.6)$$

Recentemente, Dale desenvolveu pesquisas com o intuito de verificar a variação da condutividade térmica em função da temperatura, considerando a massa específica e a porosidade do material. Os testes foram conduzidos pela técnica Transient Plane Source (TPS), o autor utilizou o modelo teórico de Russell e resultados de outras pesquisas para efeitos de comparação. A Figura 11 a) ilustra a variação da condutividade térmica para uma placa de silicato de cálcio de 339 (Kg/m^3) e a Figura 11 b) diz respeito à mesma análise, porém, com uma placa de massa específica de 506 (Kg/m^3). Como já era esperado, o material com maior massa específica possui maior condutividade térmica devido a menor quantidade de poros, pois estes apresentam efeitos com impacto direto na transferência de calor e conseqüentemente na condutividade térmica efetiva, [22].

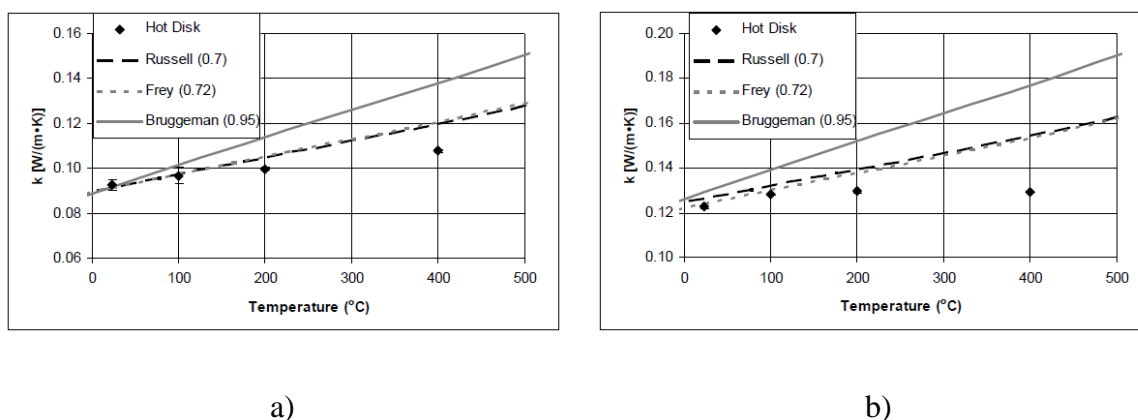


Figura 11. Variação da condutividade térmica da placa de silicato de cálcio. a) placa de massa específica de 339 (Kg/m^3). b) massa específica de 506 (Kg/m^3), [22].

2.3 Revestimentos intumescentes

As tintas intumescentes são empregadas em estruturas para atuarem como barreiras térmicas em situação de incêndio. Quando o revestimento é exposto ao calor o material se expande de forma complexa devido ao fenômeno de pirólise, criando uma camada isolante [23]. Conforme o material é aquecido ocorrem mudanças de fases que são definidas por: inicial, pastosa e camada carbonosa, [7]. Segundo estudos recentes, a composição básica deste material não sofreu alteração, sendo composta por uma fonte acida, carbonados, sais de fósforo, de amidos e resinas orgânicas [24].

Na literatura são encontrados diversos modelos referentes ao comportamento deste material para tratar os problemas de transferência de calor. Em virtude da complexidade

envolvendo a decomposição das tintas intumescentes e as particularidades de cada tinta, os modelos existentes são baseados em considerações simplificadoras.

De acordo com Mesquita et al, a taxa de decomposição de materiais intumescentes não ocorre somente na superfície externa mas também no interior do material, onde a função de Arrhenius pode ser utilizada para descrever a taxa de variação da massa em função do tempo ver (2.7),[25].

$$\frac{\partial \rho_v}{\partial t} = -\rho_v A_0 \exp\left(-\frac{E_A}{RT}\right) \quad (2.7)$$

Onde, $\partial \rho_v$ representa a variação da massa em função do tempo (t), E_A é a energia de ativação, A_0 é um fator exponencial e R é a constante universal dos gases.

A expansão do revestimento intumescente está associada com a perda de massa, [26], e pode ser determinada conforme a equação (2.8).

$$\Delta r = \Delta r_0 \left(1 + (E_{max} - 1) \left(\frac{m_0 - m}{m_0 - m_c} \right)^n \right) \quad (2.8)$$

Sendo m a massa atual, m_0 , a massa inicial do material, m_c a massa de carvão, E_{max} , o fator máximo de expansão e n o expoente que descreve a dependência de expansão de m_0 .

Diante da necessidade de descrever com mais precisão os fenômenos que ocorrem no processo de intumescência, Di Blassi desenvolveu pesquisas considerando a pirólise e todos os mecanismos de transferência de calor que envolve o material de proteção. Por fim, afirma que devido as altas temperaturas e porosidades alcançadas houve um acréscimo da contribuição da radiação na condutividade térmica efetiva do revestimento, [27, 28].

Mesquita et al, realizaram um conjunto de experimentos em escala real com aço revestido por tintas intumescentes, com este trabalho os autores demonstraram que a condutividade térmica se altera em função da temperatura. Para isso, os autores reorganizaram os termos contidos na equação do Eurocódigo 3 [29] , resolvendo para a condutividade térmica conforme a equação (2.9). Paralelamente os autores verificaram a influência que a espessura do material de proteção desempenha sobre o comportamento da condutividade térmica, ver figura 12.

$$K = \left[\frac{c_a \rho_a (1 + \phi/3)}{(T_g - T_a) \Delta t} \frac{d_p}{A_p/V} \right] [\Delta T_a + (e^{\phi/10} - 1) \Delta T_g] \quad (2.9)$$

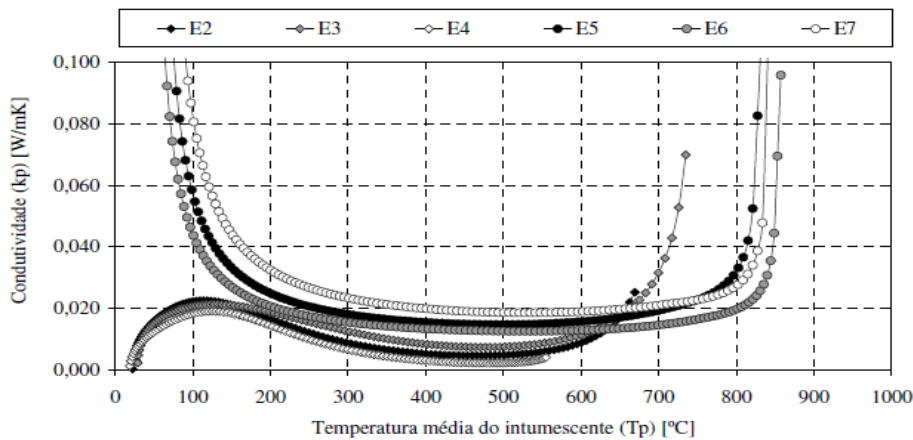


Figura 12. Variação da condutividade térmica do intumescente com a temperatura para diferentes espessuras do revestimento protetivo, [30].

A figura acima evidencia a importância de realizar um projeto adequado no que diz respeito a espessura do material de proteção, pois o comportamento da evolução da temperatura é rigorosamente influenciado pela espessura da camada de proteção.

2.4 Argamassas projetáveis

As argamassas projetáveis são materiais de proteção passiva, dentre as principais características deste material destaca-se o bom desempenho no isolamento térmico aliado com o baixo custo, contudo em relação ao acabamento estético tem desvantagem em relação aos materiais citados anteriormente, [1].

Similarmente aos outros materiais de proteção, as propriedades térmicas dos revestimentos de argamassa também são afetadas com o aumento da temperatura, humidade e composição química. Gerken realizou pesquisas sobre materiais de proteção térmica para sistemas construtivos, em suma, o autor apresentou tabelas que mostram a alteração da condutividade térmica (Tabela 4) e do calor específico (Tabela 5) da argamassa de fibra projetada submetida a altas temperaturas, [1].

Tabela 4. Condutividade térmica da argamassa de fibra projetada,[1].

Temperatura [°C]	Condutividade térmica [W/mK]
100	0,061
200	0,080
400	0,112
482	0,147
600	0,173
1093	0,208

Tabela 5. Calor específico da argamassa de fibra projetada, [1]

Temperatura [°C]	Calor específico [J/Kg °C]
96	2093
104	837
150	1675
482	2303
1093	2512

Kodur e Shakya investigaram o efeito da temperatura nas propriedades das argamassas projetáveis. Para esse fim, os autores utilizaram 3 tipos distintos de materiais e empregaram a técnica TPS com o equipamento Hot Disk TPS 2500S, o dispositivo foi configurado para medir a condutividade térmica e o calor específico em 8 temperaturas diferentes, partindo de 100 [°C] até 800 [°C] com um incremento de 100 após cada medição, [31]. Os resultados observados por Kodur e Shakya estão representados nas Figura 13, Figura 14 e Figura 15. Os resultados indicam que a temperatura tem efeito significativo na condutividade térmica e calor específico em argamassas projetáveis.

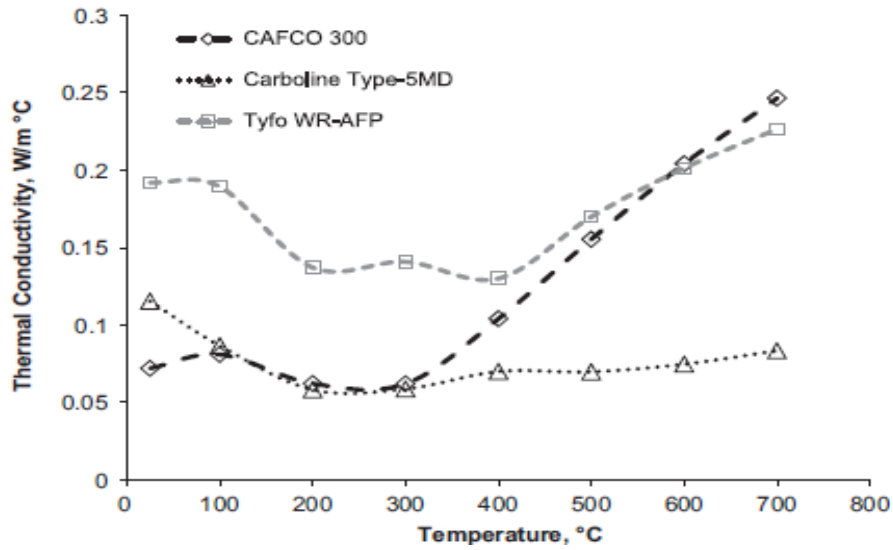


Figura 13. Variação da condutividade térmica de argamassas x temperatura, [31].

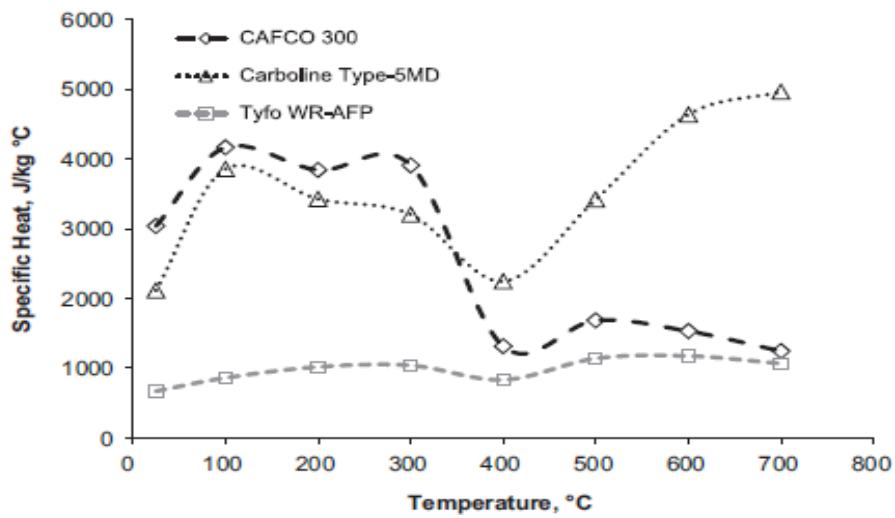


Figura 14. Variação do calor específico de argamassas x temperatura, [31].

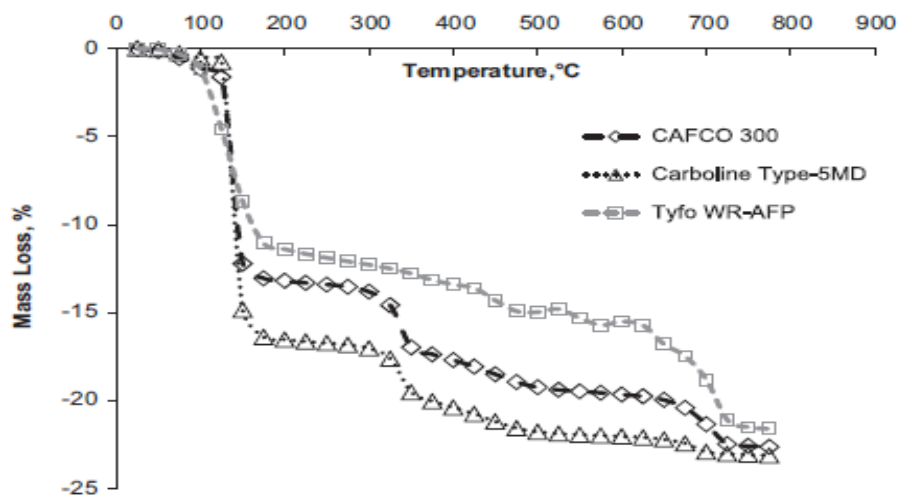


Figura 15. Perda de massa de argamassas x temperatura, [31].

Através dos dados experimentais, o autor gerou funções matemáticas para expressar a dependência de algumas propriedades térmicas em função da temperatura. A Tabela 6 expõe funções lineares correlacionadas com a condutividade térmica dos respectivos materiais analisados para alguns intervalos de temperatura, enquanto a Tabela 7 demonstra de maneira análoga funções matemáticas em relação ao calor específico dos 3 tipos de argamassas ensaiadas.

Tabela 6. Funções da condutividade térmica para algumas argamassas, [31] .

Condutividade térmica [W/mK]		
Material	Equação	Intervalo de confiança
CAFCO 300	$K=0,0778-0,000054T$	20 [°C]<T<300 [°C]
	$K=-0,08+0,000469T$	300 [°C]<T< 700 [°C]
Carboline -5MD	$K=0,121-0,000319T$	20 [°C]<T<200 [°C]
	$K=0,0468+0,000050T$	200 [°C]<T< 700 [°C]
Tyfo WR-AFP	$K=0,207-0,000318T$	20 [°C]<T<200 [°C]
	$K=0,147-0,000035T$	200 [°C]<T< 400 [°C]
	$K=0,0054+0,000321T$	400 [°C]<T< 700 [°C]

Tabela 7. Funções do calor específico para algumas argamassas, [31].

Calor específico [J/Kg °C]		
Material	Equação	Intervalo de confiança
CAFCO 300	$C_p=3236+4,16T$	20 [°C]<T<200 [°C]
	$C_p=6815-12,6T$	200 [°C]<T< 400 [°C]
	$C_p=1645-0,36T$	400 [°C]<T< 700 [°C]
Carboline -5MD	$C_p=1627+22,3T$	20 [°C]<T<100 [°C]
	$C_p=4446-5,05T$	100 [°C]<T< 400 [°C]
	$C_p=-1336+9,37T$	400 [°C]<T< 700 [°C]
Tyfo WR-AFP	$C_p=643+1,93T$	20 [°C]<T<200 [°C]
	$C_p=1241-0,924T$	200 [°C]<T< 400 [°C]
	$C_p=195+1,71T$	400 [°C]<T< 600 [°C]
	$C_p=1826-1,08T$	600 [°C]<T< 700 [°C]

De acordo com a revisão do estado atual de conhecimentos acerca do comportamento dos materiais de proteção passiva em elevadas temperaturas, percebe-se que todas as propriedades térmicas variam extensivamente com a temperatura, ficou evidenciado a necessidade de realizar mais testes e pesquisas sobre estes materiais devido a incompatibilidade dos resultados comparados na literatura. Ademais têm-se a importância e benefícios que a aplicação desta ferramenta de proteção é capaz de proporcionar. Para isto, é forçoso fazer uso correto de suas propriedades térmicas para evitar as grandes catástrofes e prejuízos decorrentes de incêndios, os quais poderiam ser evitados se os projetistas considerassem tais variações em função da temperatura.

Por fim, devido a falta de informações sobre o comportamento das propriedades térmicas destes materiais em condições de incêndio torna-se dificultoso encontrar soluções otimizadas de projeto, no que tange os fenômenos térmicos e mecânicos, resultando muitas vezes em projetos sobre dimensionados que geram custos desnecessários ou em projetos subdimensionados que colocam em risco a segurança dos ocupantes das edificações.

Capítulo 3: Dinâmica dos incêndios e exigências regulamentares

3.1 Introdução

Nos dias atuais a teoria do fogo é mais bem explicada pelo diagrama do tetraedro, que envolve os três elementos essenciais que o fogo precisa, o combustível, o comburente e o calor, os quais reagem na reação em cadeia originando o fogo, ver Figura 16.

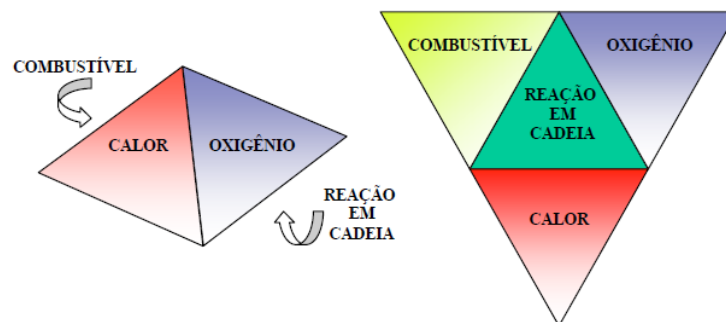


Figura 16. Princípio do fogo através do tetraedro, [1].

Para criar um projeto eficiente de segurança contra o fogo é necessário conhecer como a temperatura se desenvolve durante um incêndio. Em suma os parâmetros que governam os incêndios são complexos. O tipo de combustível que há no compartimento é um dos fatores que mais contribuem para potencializar os incêndios, outros elementos como ventilação e área do local também influenciam, [32].

Os incêndios que ocorrem em ambientes fechados são caracterizados por 5 fases durante seu desenvolvimento: ignição, propagação, flashover, combustão e arrefecimento. A Figura 17 ilustra a variação da temperatura ao longo do tempo em função destas fases.

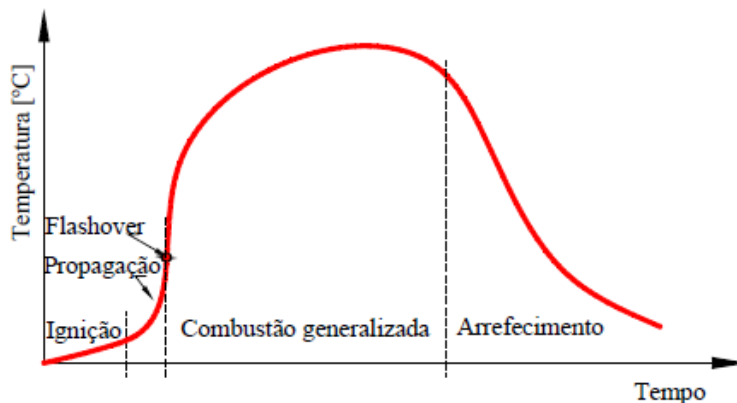


Figura 17. Fases de desenvolvimento de um incêndio, [7].

A fase de ignição representa o começo do incêndio, basta existir um elemento combustível e oxigênio para o fenómeno evoluir até a aparição das chamas. Nesta fase, percebe-se um suave acréscimo da temperatura aliada com o aumento das chamas que dependem exclusivamente do tipo combustível envolvido. Existindo combustível e oxigênio suficiente, o fogo se propaga para outros materiais causando a ignição gradativa de mais combustível, dando sequência na fase de propagação e intensificação do incêndio. O flashover ocorre na medida que há renovação do ar no compartimento em chamas, é um fenómeno bastante complexo que ocorre por volta de 500 [°C], usualmente está associado com a falha dos elementos de compartimentação ou com a quebra dos vidros para que ocorra o fluxo de ar. A fase crítica de um incêndio transcorre durante a combustão, onde a taxa de libertação de calor assume o seu valor máximo, a duração dessa fase é controlada pelo grau de ventilação, havendo aberturas no local, os gases de combustão deixam o compartimento através da convecção natural. A medida que o combustível se esgota o incêndio perde intensidade, conseqüentemente a temperatura e a produção de chamas diminui, resultando na fase de arrefecimento, [7].

Relacionando o poder do fogo com a necessidade de proteger as pessoas e os bens materiais, o tópico sobre a segurança contra incêndios tem tomado local de destaque a nível mundial, exigindo maior concentração tanto das autoridades quanto dos profissionais da construção civil, que objetivam trazer a conformidade nas obras de engenharia e assim, garantir os requisitos mínimos e essenciais para assegurar a resistência mecânica e estabilidade.

No caso da construção civil, onde normalmente as estruturas são feitas de aço podem ocorrer graves acidentes decorrentes da perda de 40% da resistência mecânica deste

material em elevadas temperaturas. Por esse motivo a segurança dos ocupantes de edificações em situação de incêndio é uma das principais preocupações dos engenheiros ao realizar um projeto. Um dos meios de proporcionar mais segurança é inibindo a propagação do fogo através de sistemas passivos de proteção, isso garante mais tempo para a equipa de resgate e preserva as propriedades mínimas do material de construção evitando o colapso da estrutura.

Os regulamentos de segurança contra incêndio estabelecem que os elementos estruturais devem ter uma resistência ao fogo suficiente para impedir o colapso da estrutura durante a evacuação das pessoas e o combate contra o incêndio. Em edifícios de habitação comum, por exemplo, os elementos estruturais que suportam o edifício devem ter uma resistência ao fogo mínima de 30 minutos, qualificada por (R30), ou no caso de áreas destinadas ao uso de estacionamentos cobertos que ocupam parte do edifício, a qualificação requerida é (R180), [30].

No caso de Portugal, o regulamento técnico de segurança contra incêndio em edifícios, (Portaria nº 1532/2008 de 29 de dezembro de 2008) estabelece a resistência mínima padrão em relação ao fogo que os elementos estruturais devem possuir. Para isso indica alguns critérios baseados na capacidade de suporte de carga (R), estanqueidade a chamas e gases quentes (E) e isolamento térmico (I), ver Tabela 8, a qual fornece a classificação de risco para diferentes categorias em função da utilização do edifício e do perigo. Segundo a norma Europeia de classificação dos elementos estruturais e produtos de construção, EN13501-2 (CEN, 2002b), os elementos empregados para suporte de carga sem função de compartimento podem possuir uma classificação entre: R15, R20, R30, R45, R60, R60, R90, R120, R180, R240 ou R360. [7].

Tabela 8. Resistência padrão ao fogo de elementos estruturais para edifícios, [7].

Utilizações-tipo	Categorias de Risco				Função do Elemento
	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	
I, III, IV, V, VI,	R 30	R 60	R 90	R 120	Suporte
VII, VIII, IX e X	REI 30	REI 60	REI 90	REI 120	Suporte e Compartimentação
II, XI e XIII	R 60	R 90	R 120	R 180	Suporte
	REI 60	REI 90	REI 120	REI 180	Suporte e Compartimentação

O Eurocódigo 3 parte 1.2 fornece aos projetistas um conjunto de métodos simplificados para o dimensionamento e verificação da segurança dos elementos estruturais confeccionados em aço sob a ação do fogo. A verificação pode ser feita no domínio da resistência, domínio da temperatura ou do tempo. O objetivo específico desta norma consiste em limitar os riscos com relação aos indivíduos e propriedades no caso da ocorrência de um incêndio [7, 29]. A Figura 18 ilustra as etapas em que um projetista deve estar atento ao conceber um projeto estrutural.

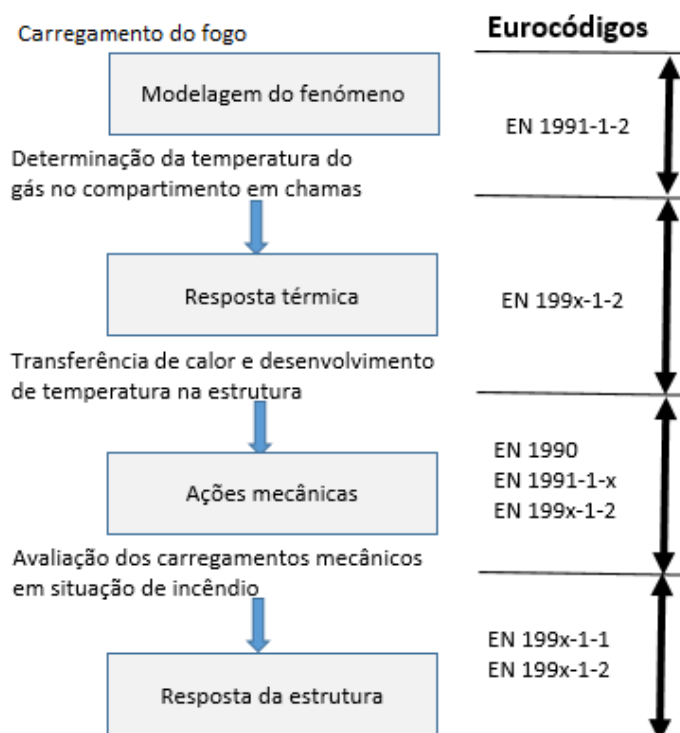


Figura 18. Etapas e normas para projetos de segurança contra incêndios, [5].

Um dos critérios mais utilizados para medir a resistência ao fogo de edifícios é o conceito de “tempo de resistência ao fogo”, esse tempo é contabilizado desde o início do incêndio até o momento que a estrutura perde a capacidade de suportar os esforços submetidos. Para isso, a metodologia empregada consiste na determinação da temperatura máxima atingida pela estrutura em função do carregamento aplicado [33].

3.2 Curvas de evolução da temperatura

3.2.1 Curvas nominais

Para efeitos de projeto, a ação térmica resultante de incêndios é normalmente representada pela curva padrão ISO 834 (1999), que representa o comportamento da temperatura em função do tempo. Neste modelo, supõe-se que a temperatura em um compartimento é uniforme e aumenta indefinidamente com o tempo seguindo uma relação logaritma. A evolução da temperatura dos gases de incêndio (θ_g) segundo a curva ISO 834 é dada pela equação (3.1), com a unidade de tempo em minutos,[5].

$$\theta_g = 20 + 345 * \log_{10}(8t + 1) \text{ (}^\circ\text{C)} \quad (3.1)$$

Existem outras curvas que podem ser utilizadas em situações específicas de incêndio, supondo um cenário que somente os elementos estruturais externos estejam submetidos ao incêndio, a curva requerida é dada pela equação (3.2).

$$\theta_g = 20 + 660 * (1 - 0,687 * e^{-32t} - 0,31 * e^{-3,8t}) \text{ (}^\circ\text{C)} \quad (3.2)$$

Por fim a curva para hidrocarbonetos é dada pela equação (3.3)

$$\theta_g = 20 + 1080 * (1 - 0,325 * e^{-0,167t} - 0,675 * e^{-2,5t}) \text{ (}^\circ\text{C)} \quad (3.3)$$

A Figura 19 retrata a evolução das três curvas, onde se verifica que para o caso de hidrocarbonetos a temperatura é mais acentuada do que a curva externa ou a ISO 834, [7].

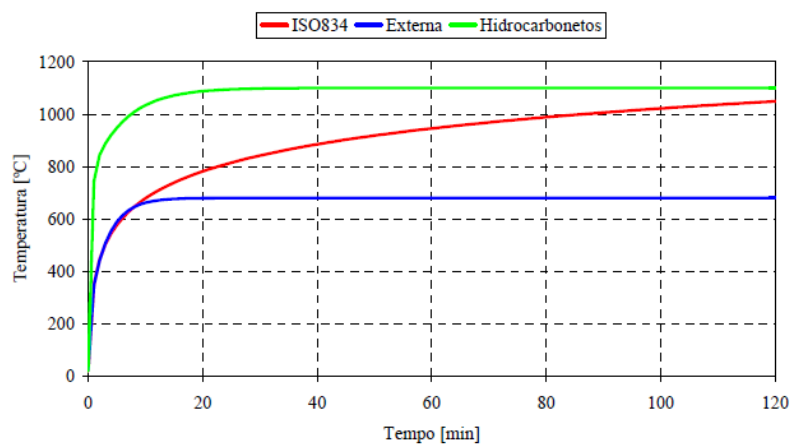


Figura 19. Curvas nominais de incêndio, [7].

As curvas nominais são usadas com bastante frequência pela maior parte dos regulamentos de segurança contra incêndios para estabelecer o conceito de “referência ao fogo regulamentar” dos elementos estruturais. Todavia, estudos comprovam que essa curva não representa com precisão um cenário real de incêndio, pois as curvas paramétricas consideram aspetos adicionais que são bastante relevantes durante um incêndio, [34].

3.2.2 Curvas paramétricas

Reconhecendo que as curvas de incêndio precedentes não representavam um padrão físico razoável, Pettersson desenvolveu um modelo capaz de prever a temperatura do gás de incêndio em compartimentos, que viria ser utilizado para contribuir com as curvas paramétricas contidas no Eurocode 1 (CEN 1991-2002). O modelo assume que a temperatura dentro de um compartimento em fogo é uniforme, considera-se que todo material inflamável contribui com a intensificação do incêndio e por fim o grau de ventilação, que se dá pela substituição dos gases quentes por frio através das aberturas do compartimento, [5, 34]. As curvas paramétricas reproduzem a evolução da temperatura média dos gases durante um cenário real de incêndio e é definida pela equação (3.4).

$$\theta_g = 20 + 1325 * (1 - 0,324e^{-0,2t^*} - 0,204e^{-1,7t^*} - 0,472e^{-19t^*}) \text{ (}^\circ\text{C)} \quad (3.4)$$

Durante a fase de arrefecimento a temperatura é calculada conforme a equação (3.5).

$$\left\{ \begin{array}{l} \theta_g = \\ \theta_g = \\ \theta_g = \end{array} \right\} \left\{ \begin{array}{ll} \theta_{max} - 625(t^* - t_{max}^*), & t_{max}^* \leq 0,5 \\ \theta_{max} - 250(3 - t_{max}^*)(t^* - t_{max}^*), & 0,5 \leq t_{max}^* \leq 2 \\ \theta_{max} - 250(t^* - t_{max}^*), & t_{max}^* \geq 2 \end{array} \right\} \text{ (}^\circ\text{C)} \quad (3.5)$$

Onde, t^* e t_{max}^* são tempos fictícios dados em horas. Com $t^* = t \cdot \Gamma$ e $\Gamma = (O/b)^2 / (0,04/1160)^2$, O e b representam o fator de aberturas. Em seguida há um fator dependente das propriedades térmicas que envolve o compartimento $(\sqrt{\rho c k}) * t_{max}^*$ onde, $t_{max}^* = (0,0002q_{t,d} \cdot \Gamma) / O$, em que $q_{t,d}$ é o valor da densidade de carga de incêndio. As equações acima são validas para compartimentos com até 500 [m²] de área em planta, sem aberturas nos telhados e altura de parede do compartimento até 4 (m), [7].

Wang realizou uma comparação considerando duas condições de ventilação através das curvas paramétricas do Eurocode. A curva padrão também foi incorporada para fins de nivelção bem como a curva de um teste experimental, ver Figura 20.

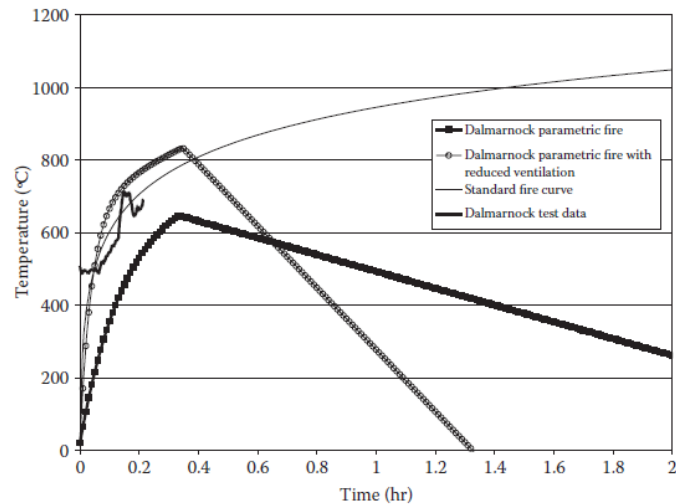


Figura 20. Comparação entre as curva paramétricas e padrão ISO 834, [5].

Encontram-se disponíveis outros modelos e mecanismos capazes de determinar a evolução da temperatura em um incêndio. Uma ferramenta muito útil para este fim são as simulações numéricas e computacionais, pois existem inúmeros softwares que representam com precisão o comportamento físico dos incêndios, que levam em consideração a geometria do compartimento, materiais que estão envolvidos no fenômeno, condições complexas de ventilação, entre outros aspetos,[5].

3.3 Mecanismos de transferência de calor

A compreensão dos modos de transferência de calor é fundamental para criar mecanismos de combate contra os incêndios, dado que, é através deste fenômeno que o fogo atingirá outras áreas do edifício.

As cargas térmicas concebidas pelos incêndios dependem da densidade de fluxo de calor que incidente na superfície dos elementos, \dot{q}'_d , onde existe uma parcela gerada pela convecção, \dot{q}'_c e outra devido à radiação, \dot{q}'_r . Por meio destes fluxos de calor é possível calcular a temperatura superficial dos elementos em função da temperatura dos gases de incêndio, [7]. A densidade de fluxo de calor é determinada conforme o Eurocódigo 1 parte 1-2 (CEN, 2002^a), ver equação (3.6).

$$\dot{q}'_d = \dot{q}'_r + \dot{q}'_c \quad \left(\frac{W}{m^2} \right) \quad (3.6)$$

3.3.1 *Transferência de calor por convecção*

A troca térmica por convecção refere-se à propagação do calor pelo movimento dos fluidos, gases ou líquidos e, em situações de incêndios, normalmente, o fenómeno se restringe nas condições da convecção natural. No decorrer de um incêndio a transferência de calor por convecção é responsável pela propagação do fogo em virtude do transporte de vapores e fumaça. Além disso, a convecção também é responsável pela ventilação caso exista orifícios abertos para o exterior do edifício.

Segundo Lewis, a taxa de aquecimento depende da velocidade do fluido na superfície do objeto, da temperatura do sólido e das propriedades térmicas do fluido e do sólido. O fluxo de calor por convecção é calculado conforme a lei de resfriamento de Newton, ver equação (3.7),[8].

$$\dot{q}_{,c} = h_c(T_g - T_m) \quad \left(\frac{W}{m^2}\right) \quad (3.7)$$

Onde, h_c representa o coeficiente de transferência de calor por convecção, obtido através das correlações empíricas da convecção. Normalmente a obtenção deste coeficiente requer a determinação do número de Nusselt, de Prandtl e Grashof, nos quais dependem do tipo de geometria envolvida no fenómeno e das propriedades do fluido na temperatura correspondente. Segundo o Eurocódigo 1 (CEN, 2002 a) para a curva de incêndio padrão pode-se adotar o valor de 25 [W/mK] para este coeficiente e 50 [W/mK] para as curvas de incêndio que ocorrem nos elementos externos, [7].

3.3.2 *Transferência de calor por radiação*

O termo radiação trata da emissão contínua de energia da superfície dos corpos, é nomeada de energia radiante e possui a forma de ondas eletromagnéticas. A energia radiante emitida por uma superfície depende da natureza do fenómeno e da temperatura do corpo,[35]. A radiação assume o mecanismo de transferência de calor mais significativo, pois o gradiente de temperatura está relacionado com a potência de quarta ordem e geralmente durante um incêndio a temperatura alcança valores superiores a 400°C. O fluxo de calor por radiação pode ser calculado pela equação (3.8), [7].

$$\dot{q}_{r} = \Phi \varepsilon_f \varepsilon_m 5.67 \times 10^{-8} \left((T_g + 273) - (T_m + 273) \right)^4 \quad \left(\frac{W}{m^2} \right) \quad (3.8)$$

Sendo, Φ o fator de forma, que depende da geometria, ε_m representa a emissividade do elemento relacionado com o material usado na estrutura e do seu revestimento, ε_f é a emissividade do compartimento de incêndio, normalmente considerada igual a 1, T_g é a temperatura que os gases quentes atingem na vizinhança e T_m equivale à temperatura na superfície do elemento.

3.3.3 *Transferência de calor por condução*

A condução ocorre em função da interação a nível molecular e atômico entre as partículas de um elemento, da região mais quente para a região mais fria. A região mais energizada possui moléculas vibrando com maior intensidade, conseqüentemente, cada molécula transfere energia para a molécula vizinha e este fenómeno ocorre sucessivamente, [35].

Este mecanismo de transferência de calor é bastante importante na perspectiva da análise térmica sobre elementos estruturais com proteção, uma vez que o aço não está diretamente exposto à radiação do fogo ou em contato com os gases, com isso, toda esta energia será transferida por condução, [8]. A Lei de Fourier pode ser aplicada para determinar a energia transferida por condução, ver equação (3.9).

$$q = K \frac{dT}{dx} \quad \left(\frac{W}{m^2} \right) \quad (3.9)$$

Onde, α é a difusividade térmica [m^2/s].

Capítulo 4: Materiais de proteção passiva

4.1 Introdução

Os materiais de proteção passiva são utilizados com abundância no ramo construtivo das edificações e são destinados para atuar no combate contra incêndios. Para estes materiais proporcionarem maior eficácia devem apresentar baixa massa específica, para não agregar peso considerável na estrutura, e baixa condutividade térmica combinada com elevado calor específico para serem capazes de servir como barreira térmica.

Em meados do século XX surgiram os primeiros materiais que foram utilizados para esse propósito, na época eram constituídos a base de alvenaria e betão. Mas sua aplicação exigia trabalho árduo e grandes espessuras, fato que reduzia a eficiência e aumentavam os custos da obra. Ao final do século XX, deu-se início a um novo material sendo constituído por uma mistura de gesso hidratado e materiais cimentícios combinado com fibras, [1].

Ao longo das últimas décadas houve uma crescente exigência sobre as medidas de segurança dos elementos e estruturas das construções civis em situação de incêndio. Pois, devido a elevada condutividade térmica dos materiais utilizados na estrutura dos edifícios aliado com a diminuição acentuada da resistência mecânica dos mesmos nessas condições é que se faz necessário cada vez mais ter cautela nos projetos,[7].

Vale ressaltar a importância da aplicação correta do material de proteção que deve cobrir toda a estrutura de forma homogênea e completa, pois o mesmo deve ser capaz de acompanhar o deslocamento da estrutura em função da dilatação térmica, sem que haja desprendimento ou fissuras. A durabilidade do material protetivo deve ser coerente com a vida útil da estrutura, sem necessidade frequente de manutenção, porém, deve permitir pequenos reparos para garantir total aderência [1].

Portanto este mecanismo de proteção é empregado para agregar resistência térmica no edifício, aumentando o tempo de resistência ao fogo das estruturas. Para este propósito, é extremamente importante compreender o comportamento desses materiais em altas temperaturas, principalmente nos aspetos relacionados às propriedades térmicas para que seja possível extrair todos os benefícios que esses materiais podem proporcionar.

4.2 Tipos de materiais de proteção passiva

4.2.1 Tintas intumescentes

O principal campo de aplicação do revestimento é direcionado para o setor construtivo onde o mesmo é usado para proteção das estruturas de aço. A aplicação de tintas intumescentes tem aumentado devido as inúmeras vantagens que o método proporciona, como: aparência atraente, potencial para aplicação fora do local e menor peso introduzido a estrutura, [23].

O comportamento das tintas intumescentes é caracterizado por uma expansão volumétrica e decomposição que ocorre em altas temperaturas, resultando numa espuma carbonosa capaz de alcançar até 200 vezes o volume inicial, ver Figura 21. Durante o processo de intumescência ocorrem transformações de fases devido à transferência de calor, que são definidas por: inicial, pastoso e uma camada carbonosa, [7].



Figura 21. Reação das tintas intumescentes em altas temperaturas,[30].

O processo de intumescência começa com a decomposição do catalisador quando a temperatura atinge 150 [°C]. Com o aumento da temperatura reações químicas ocorrem no material, caracterizada pela expansão do resíduo carbonoso que resulta na formação de uma espuma preta. A partir dos 700°C a superfície externa do revestimento se transforma numa camada cerâmica de baixa condutividade térmica,[30].

Normalmente os revestimentos são aplicados com uma espessura entre 1 e 8 mm e não dependem da forma geométrica do perfil do aço, permitindo a aplicação em designs complexos e inovadores. No entanto a aplicação em aço requer alguns cuidados como não aplicar em ambientes com temperaturas abaixo de 5°C e/ou com humidade relativa do ar superior a 80% e somente aplicar após a limpeza das superfícies do aço.

A Tabela 9 mostra a espessura necessária que a película de intumescente deve possuir na aplicação em pilares com os 4 lados expostos ao fogo considerando vários fatores de massividade e o tempo de resistência ao fogo mínimo para uma temperatura crítica $\theta_{cr} = 550^{\circ}C$.

4.2.2 Argamassas projetáveis

As argamassas projetáveis são materiais de proteção passiva de baixo custo e normalmente apresenta bom desempenho de isolamento térmico, porém comparado com as tintas intumescentes agregam maior peso na estrutura. Diferentemente dos outros materiais as argamassas são caracterizadas pela facilidade de aplicação, pois não é necessário tanta cautela e condições especiais para aplicação do produto na estrutura, por outro lado, apresenta acabamento estético rugoso o que é uma desvantagem em relação aos outros materiais de proteção. Adicionalmente algumas argamassas permitem a aplicação de acabamento superficial para melhorar o seu aspecto rugoso. A Figura 22 apresenta um perfil protegido com argamassa, [31].

Tabela 9. Espessura da camada protetiva de tintas intumescentes para diferentes temperaturas críticas e fatores de massividade, [34].

Fator de massividade	TRRF (min)				TRRF (min)	
	Aplicação em ambiente externo				Aplicação em ambiente interno	
	30	60	90	120	30	60
$F-1$						
30	0,25	0,74	1,48	2,47	0,20	0,44
100	0,25	0,74	1,48	2,47	0,20	0,44
105	0,25	0,74	1,48	2,47	0,20	0,64
110	0,32	0,74	1,48	2,47	0,20	0,64
120	0,32	0,74	1,48	2,47	0,20	0,64
125	0,32	0,74	1,48	3,22	0,20	0,64
130	0,32	0,74	1,48	3,22	0,20	0,64
135	0,32	0,85	1,48	3,22	0,20	0,64
140	0,32	0,85	1,48	3,22	0,20	0,64
145	0,32	0,85	1,48	3,96	0,20	0,64
150	0,49	1,27	1,73	3,96	0,20	0,88
160	0,49	1,27	1,73	3,96	0,20	0,88
165	0,49	1,27	1,73	4,70	0,20	0,88
170	0,49	1,27	2,31	4,70	0,20	0,88
175	0,49	1,27	2,31	4,70	0,32	0,88
180	0,49	1,27	2,31	4,70	0,32	0,88
185	0,49	1,27	2,31	5,19	0,32	0,88
195	0,49	1,27	2,31	5,19	0,32	0,88
200	0,49	1,27	2,31	5,94	0,32	0,88
205	0,49	1,27	2,31	5,94	0,32	0,88
210	0,55	1,45	2,97	5,94	0,38	0,98
215	0,55	1,45	2,97	-	0,38	0,98
225	0,55	1,45	2,97	-	0,38	0,98



Figura 22. Argamassa projetada sobre uma estrutura de aço, [1].

Quanto a composição da argamassa, a mesma pode conter diferentes tipos de materiais constituintes. A Tabela 10, disponível no trabalho de Kodur e Shakya, mostra a composição química das principais argamassas disponíveis no mercado,[31].

Tabela 10. Composição química das argamassas comerciais, [31].

CAFCO 300		Carboline tipy-5MD	
material de composição	Percentagem [%]	material de composição	Percentagem [%]
Gesso(Sulfato de cálcio hidratado)	50-75	Gesso	70
Vermiculite	15-35	Vermiculite	30
Celulose	1.10	Celulose	5
Carbonato de cálcio	1.10	Calcário	5
Quartzo	0-5	Sílica microcristalina	0,7

Segundo a Cafco este tipo de proteção é o mais utilizado em todo o mundo, em estruturas metálicas, inclusive era o material que revestia o World Trade Center. Porém, seu uso requer que esses materiais obedeçam algumas exigências estabelecidas por alguns órgãos internacionais, como mostra a Tabela 11.

Tabela 11. Exigências de órgãos internacionais de normatização, [1].

Propriedades físicas	Requerimento mínimo		Metodologia de ensaio
	Baixa densidade	Média e alta densidade	
Densidade seca [Kg/m ³]	240	Não apresenta	ASTM E 65 e UBC
Aderência ao aço [Kpa]	9,6	56	ASTM E 736
Compressão [Kpa]	57	57	ASTM E 761
Erosão ao ar à 24 Km/h [g/ft ²]	0,05 (máx)	0,05 (máx)	ASTM E 859
Corrosão	Não contribui	Não contribui	ASTM E 937
Resistência a fungos	28 dias em usos gerais ou 60 dias em plenums		ASTM G21

Segundo estudos as argamassas de média e de alta densidade apresentam algumas vantagens em relação a de baixa densidade, sendo as mais relevantes a maior resistência a impactos e a humidade, ver Tabela 12, a qual compara alguns resultados observados durante a realização de testes experimentais.

Tabela 12. Testes feitos em argamassas de baixa, média e alta densidade, [1].

Propriedades físicas	Argamassas projetáveis		
	Baixa densidade	Média densidade	Alta densidade
Densidade seca [Kg/m ³]	240	350	640
Aderência ao aço [Kpa]	16,2	94,5	472
Compressão [Kpa]	68,9	476	3790
Erosão ao ar à 24 Km/h [g/ft ²]	Não apresentou erosão		
Corrosão	Não contribuiu		
Resistência a fungos	Não apresentou fungos		

A Tabela 13 mostra um estudo feito por Mendes, indicando a espessura (mm) necessária para uma argamassa composta por fibras projetadas considerando uma temperatura crítica de $\theta_{cr} = 550^{\circ}C$, variando o fator de massividade e o tempo mínimo de resistência ao fogo.

Tabela 13. Espessura da argamassa para diferentes temperaturas críticas, [34].

Fator de massividade F^{-1}	TRRF (min)			
	Aplicação em ambiente externo			
	30	60	90	120
30	10	10	10	10
40	10	10	10	12
50	10	10	11	14
60	10	10	12	16
70	10	10	14	18
80	10	10	15	20
90	10	11	16	22
100	10	12	18	24
110	10	13	19	25
120	10	13	20	27
130	10	14	21	28

140	10	15	22	30
150	10	15	23	31
160	10	16	24	32
170	10	16	25	33
180	10	17	26	34
190	10	17	26	35
200	10	18	27	36
210	10	18	28	37
220	10	19	29	38

4.2.3 *Materiais de isolamento do tipo placa*

As placas de gesso e de silicato de cálcio são amplamente utilizadas como material de revestimento para proteção térmica de elementos estruturais em caso de incêndio. A composição do cristal de gesso cru contém cerca de 21% em peso de água ligada quimicamente, como também carbonato de cálcio, de magnésio entre outros aditivos. A principal característica de resistência ao fogo desses materiais é devida ao processo de desidratação, que ocorre no intervalo de temperatura entre 100 e 250°C, [9].

Estudos comprovam que o comportamento e desempenho das montagens de parede de gesso são fortemente influenciados por diversos parâmetros, tais como: teor de humidade, permeabilidade e taxa de aquecimento [9, 15, 36].

Duas reações químicas se destacam em situação crescente de temperatura durante a desidratação, e são divididas em duas etapas. A primeira consiste na perda de 75% de água na composição do sulfato de cálcio, formando assim, o sulfato de cálcio semi-hidratado. Posteriormente, se a temperatura continuar subindo, o material semi-hidratado perde o restante da água se transformando em sulfato de cálcio anidro. Durante esse fenómeno termofísico, grandes quantidades de energia liberada pelo incêndio são destinadas para evaporar as moléculas de água que estão contidas na rede cristalina do material, [9].

4.3 Propriedades térmicas relevantes dos materiais

Entende-se por propriedade térmica de um material como sendo as características específicas e comportamentais quando são expostos ao calor, para efeitos das análises térmicas as propriedades mais relevantes são: emissividade, condutividade térmica e calor específico, [5, 37]

Conhecer informações precisas sobre os efeitos causados nas propriedades térmicas dos materiais de proteção quando são submetidos a elevadas temperaturas é, certamente, um pré-requisito importante para executar um projeto de alta performance que envolve segurança contra incêndio nas construções. Isso permite que os projetistas estejam aptos a modelar o comportamento desses materiais em diferentes cenários durante o desenvolvimento de um incêndio. Além disso, ter domínio da variação das propriedades térmicas é vital para dimensionar as espessuras dos materiais de proteção para as estruturas ou para calcular a real taxa de transferência de calor. A Tabela 14 apresenta valores para algumas propriedades térmicas de materiais de proteção em temperatura ambiente, [5].

Tabela 14. Propriedades térmicas dos principais materiais de proteção térmica, [1].

Material	Massa específica [Kg/m³]	Condutividade térmica [W/mK]	Calor específico [J/Kg °C]
Fibra mineral projetada	250-300	0,10	1100
Placas de perlita e vermiculita	300-800	0,15	1100
Folhas de silicato de amianto	800	0,15	1100
Folhas de silicato fibroso	450-900	0,15	1100
Placas de gesso	800	0,20	1700
Placas de lã mineral	120-150	0,25	1100
Concreto celular	1000	0,45	1200
Concreto leve	1600	0,80	1200
Tijolo cerâmico	2000	1,20	1200
Concreto com agregado amorfo	2200-2400	1,30	1200
Mantas de fibras minerais	100-500	0,23	1500
Mantas cerâmicas	61-92	0,10	1067
Argamassa de fibras minerais	200-350	0,08	1050
Argamassa de gesso	500-800	0,20	1700

4.3.1 Emissividade

A emissividade é uma propriedade térmica relacionada com a superfície intrínseca a cada material. Corresponde à capacidade relativa da emissão de energia por radiação da superfície. A taxa de emissão é calculada pela razão entre a energia irradiada por um material e a energia irradiada por um corpo negro que possui emissividade máxima equivalente a $\varepsilon=1$, ou seja, qualquer material que não seja um corpo negro possui emissividade menor que 1 e superior a zero. Outra propriedade relevante sobre o assunto é a absorvidade que é calculada de forma análoga à emissividade, e representa a taxa de calor incidente que é absorvido por um material e é dado pela relação de absorvidade que o corpo negro possui, [5].

Na realidade, ambos valores de emissividade e absorvidade são dependentes do comprimento de onda da radiação, contudo, para o caso específico de aquecimento por incêndio isso não é significativo, o que torna o valor da emissividade igual ao valor da absorvidade. Durante um incêndio em uma construção não é possível empregar um valor fixo para emissividade de um material decorrente de incertezas causadas pelos elementos que governam um incêndio, como por exemplo os diferentes tipos de combustíveis, a condição de ventilação e a textura das superfícies, [5]. A Tabela 15 fornece os valores da emissividade térmica dos principais materiais de proteção.

Tabela 15. Emissividade dos materiais típicos a 300°C,[5].

Material	Emissividade ε	Material	Emissividade ε
Alumínio (elevada oxidação)	0,2-0,31	Granito	0,45
Alumínio (polido)	0,039-0,057	Gesso	0,85
Alumínio duro	0,07	Alvenaria	0,93
Placa de amianto	0,96	Aço macio	0,20-0,32
Asfalto	0,93	Argamassa	0,98
Tijolo vermelho	0,93	Argamassa bruta	0,91
Tijolo refratário	0,75	Plástico	0,91
Ferro fundido	0,44	Areia	0,76
Ferro fundido tratado	0,60-0,70	Aço oxidado	0,79
Cromo polido	0,058	Aço polido	0,07
Concreto	0,85	Aço inoxidável	0,85
Concreto bruto	0,94	Aço inoxidável polido	0,075
Ladrilhos	0,63	Aço galvanizado	0,88
Vidro	0,92-0,94	Ferro forjado	0,94
Vidro pirex	0,85		

As normas europeias de engenharia contra incêndio EN1993-1-2 (Comitê de normalização Europeia (CEN) 1993-2005b) e EN 1994-1-2 (CEN 1994-2005b) estimam os valores da emissividade realizando testes baseados em curvas padrão de incêndio em forno. Para o aço estrutural e inoxidável, são usados valores constantes que equivalem à 0,7 e 0,4, respetivamente. Para superfícies de concreto, a EN 1994-1-2 assume o valor constante de 0,7, [5].

4.3.2 Calor específico

Calor específico é uma grandeza física que determina a variação térmica de um material ao receber certa quantidade de calor. Mais especificamente, é a quantidade de energia necessária para elevar a temperatura de um material de massa 1 [Kg] em 1 [°C]. Essa propriedade indica a capacidade que um material possui em absorver calor de fontes externas, sendo expressa pela equação (4.1), [1, 5].

$$c = \frac{dQ}{dT} \quad (4.1)$$

Onde, dQ é a energia exigida para produzir uma variação de temperatura.

Geralmente os materiais isolantes precisam receber elevada quantidade de energia para promover o aumento da temperatura, este fato ocorre devido sua particularidade de possuírem elevado calor específico, cujo valor é em média 3 vezes maior do que o aço, material que representa maior abundância nos projetos estruturais.

4.3.3 Condutividade térmica

Entende-se por condutividade térmica como a habilidade de cada material em conduzir calor na existência de um gradiente de temperatura. Dentre as propriedades térmicas dos materiais de proteção a condutividade térmica é considerada a mais importante para analisar o comportamento da temperatura nos elementos protegidos.

Normalmente os fabricantes de materiais de proteção disponibilizam nos catálogos técnicos os valores da condutividade térmica em temperatura ambiente, mas não é coerente usar um valor constante desta propriedade para projetos de engenharia. Pois, segundo Wang, a condutividade térmica aumenta em função da evolução da temperatura e ao

utilizar os valores fornecidos a temperatura ambiente o projeto estrutural será subestimado e conduzido a resultados inseguros. Sendo assim, a dependência da condutividade térmica em relação à temperatura deve ser quantificada. Um modelo eficiente para determinar a condutividade térmica efetiva de materiais porosos pode ser visto na equação (4.2), podendo ser utilizado para tintas intumescentes, argamassa projetáveis, placas de gesso e de silicato de cálcio, [5].

$$K^* = K_s \frac{K_g \zeta^{\frac{2}{3}} + \left(1 - \zeta^{\frac{2}{3}}\right) K_s}{K_g \left(\zeta^{\frac{2}{3}} - \zeta\right) + \left(1 - \zeta^{\frac{2}{3}} + \zeta\right) K_s} \quad (4.2)$$

A expressão leva em consideração a condutividade térmica do sólido K_s , a condutividade térmica do gás nos poros K_g e a porosidade do material ζ .

A condutividade térmica do gás é um valor relacionado com o que ocorre na transferência de calor nos poros, ao realizar tal cálculo é relevante incluir o efeito da transferência de calor radiante. Os efeitos da convecção podem ser desconsiderados se o diâmetro dos poros for pequeno <5 [mm], [5]. A equação (4.3) é usada para determinar o valor da condutividade térmica do gás.

$$K_g = K_{g,cond} + K_{g,rad} \quad (4.3)$$

Onde, $K_{g,cond}$ representa a condutividade térmica do ar decorrente da condução nos poros, $K_{g,rad}$ é a contribuição térmica da parcela de radiação.

Segundo Smith, para determinar a condutividade térmica do ar em diferentes temperaturas a equação (4.4) pode ser aplicada, [5].

$$K_{g,cond} = K_{g,0} \left(\frac{T}{T_0}\right)^{0,8} \quad (4.4)$$

Onde, T é a temperatura do gás, T_0 é a temperatura ambiente e $K_{g,0}=0,0246$ [W/Mk] que representa a condutividade térmica a temperatura ambiente.

Finalmente, o efeito da radiação na condutividade térmica do ar pode ser quantificado com o auxílio da equação (4.5).

$$K_{g,rad} = 4G\varepsilon\sigma T^3 \quad (4.5)$$

Onde, ε é a emissividade do material de proteção, σ é a constante de Stefan-Boltzmann, T é a temperatura absoluta do gás e G representa uma média proporcional das dimensões do poro na direção principal da transferência de calor, existe valores específicos para cada geometria, para poros cilíndricos com eixo normal ao fluxo de calor $G = \pi/4$, para poros esféricos $G = 2/3$. A Figura 23 ilustra o desempenho da condutividade térmica efetiva quando placas de silicato de cálcio da empresa Promat são submetidas em elevadas temperaturas.

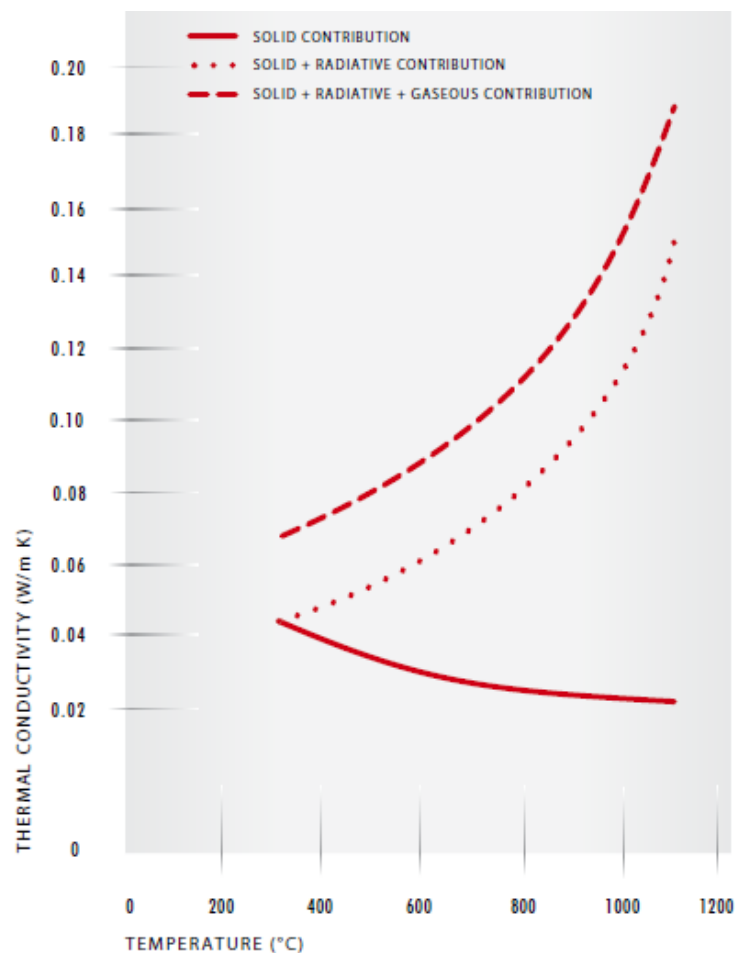


Figura 23. Comportamento da condutividade térmica efetiva em função da temperatura das placas de silicato de cálcio, [38]

A figura acima identifica os aspetos que mais influenciam a condutividade térmica efetiva durante a absorção de calor. Enquanto a temperatura sobe a condutividade térmica

do sólido diminui devido a desidratação do material e conseqüentemente ao aumento na quantidade de poros do mesmo. Em contrapartida, ao analisar em conjunto a contribuição da radiação, os efeitos dos gases mais a parcela do sólido, percebe-se um crescimento global no valor da condutividade térmica efetiva. Tal comportamento evidencia que não se pode negligenciar a variação da condutividade térmica nos projetos estruturais que envolvem o uso de materiais de proteção passiva.

A Figura 24 representa a evolução da temperatura de um perfil protegido IPE100 com tinta intumescente e um fator de massividade igual a 387 (m^{-1}), que foi exposto a curva de incêndio ISO834. Nesta imagem também fica explícita a influência que a espessura da proteção possui para fins de isolamento térmico. Neste experimento considerou que a espessura de proteção não sofre alteração no decorrer do incêndio e $\rho_p = 1360 \left(\frac{Kg}{m^3}\right)$ e $c_p = 1000 \left(\frac{J}{KgK}\right)$, [7].

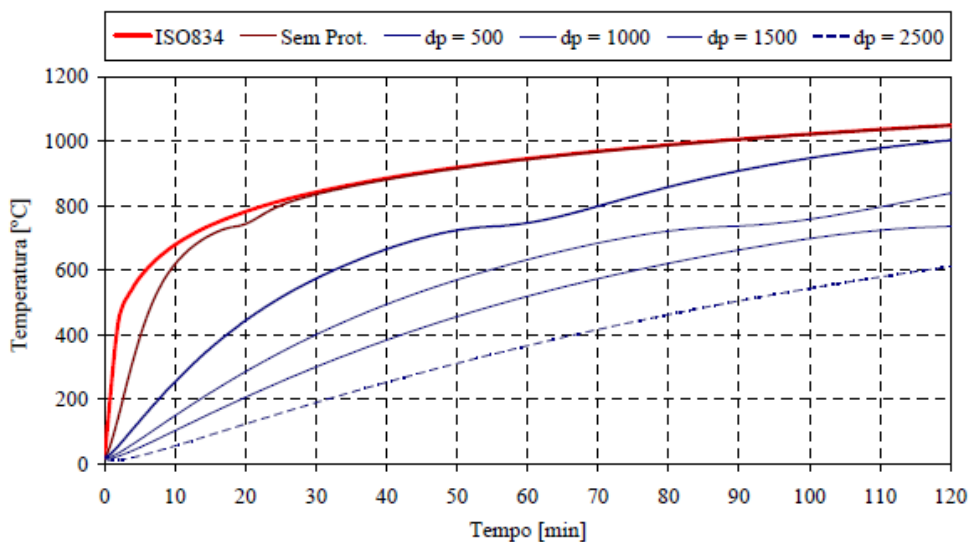


Figura 24. Influência da espessura do material de proteção na evolução da temperatura, [7].

Métodos práticos diretos e indiretos também estão disponíveis para medir a condutividade térmica em elevadas temperaturas. O Guarded Hot Plate ou o Transient Plane Source são métodos diretos usados para caracterização dos materiais, o Calorímetro de Cone ou um forno podem ser usado para o mesmo propósito de forma indireta, [5].

Capítulo 5: Testes experimentais em pequena escala de caracterização térmica.

5.1 Introdução

Nos capítulos anteriores viu-se que as propriedades térmicas dos materiais de proteção são extremamente relevantes nos projetos de engenharia contra incêndio e, dependendo do material as propriedades variam extensivamente em função da estrutura celular, massa específica, humidade e, sobretudo a condutividade térmica, que manifesta bastante dependência com a temperatura,[39]. Por consequência, numerosas técnicas experimentais, estacionárias e transientes foram desenvolvidas com o intuito de medir o valor efetivo de algumas propriedades térmicas em diferentes condições experimentais e assim verificar o comportamento dos materiais de proteção sob à ação do fogo.

Normalmente os métodos de caracterização térmica são divididos em dois tipos: ensaios de reação ao fogo e resistência ao fogo.

A reação ao fogo está associada com a velocidade que o material entra em combustão em situação de incêndio, no qual os parâmetros observados são: inflamabilidade, propagação da chama, liberação de calor e combustibilidade. Além destes, é possível quantificar e qualificar os gases tóxicos resultante do processo. O método de verificação da resistência ao fogo é aplicado para analisar as características específicas dos elementos de construção, como paredes, portas e mecanismos de proteção passiva, os quais são destinados a atuarem como barreiras térmicas,[7].

Efetivamente, não existe um método ideal para analisar as propriedades térmicas. A escolha do método sempre vai depender de fatores como, a precisão esperada do experimento, o tipo e estado do material a ser estudado entre outras condições externas. Na prática, para medir qualquer propriedade térmica, seja pelo modelo estacionário ou pelo

regime transiente, a técnica experimental escolhida deve ser capaz de encontrar a solução para a equação básica da difusão de calor, representada pela equação (5.1), [40].

$$\frac{\partial(\rho \cdot cp \cdot T)}{\partial t} = \frac{d}{dx} \left(K(T) \frac{dT}{dx} \right) \quad (5.1)$$

5.2 Teste em pequena escala no forno de resistência ao fogo

Para analisar numericamente o comportamento da condutividade térmica, utilizou-se um forno de resistência ao fogo instalado no Laboratório de Estruturas e Resistência dos Materiais do Instituto Politécnico de Bragança. Como mencionado anteriormente, os resultados obtidos através deste equipamento serão utilizados no algoritmo modificado de Levenberg-Marquardt, cujo principal propósito é fazer com que a curva de temperatura teórica convirja para a curva experimental e assim, gerar uma equação para determinar a condutividade térmica em função da temperatura.

A parte externa do forno é revestida por aço e a parte interna é isolada através de duas camadas, uma contendo tijolos refratários e estes recobertos com fibra cerâmica, deixando assim o forno com um volume útil de 1m³. O projeto e calibração deste forno foram realizados de tal forma que a evolução da temperatura experimental seja muito próxima da curva padrão ISO834. Tal curva é conseguida por meio de quatro queimadores de gás, com uma referência Kromschöder BIO 65 HM-100/35-72/8, a temperatura no interior do forno é monitorada através de um termopar do tipo placa, conforme as especificações da norma EN1363 (CEN, 199a) cumprindo todas as tolerâncias requeridas. A Figura 25 ilustra o forno de resistência ao fogo que foi utilizado neste trabalho, [7].



Figura 25. Forno de resistência ao fogo.

5.2.1 Preparação dos corpos de prova e procedimento

Para analisar o comportamento da condutividade térmica utilizou-se dois tipos de placas de silicato de cálcio, Promatec-H (humidade~10%) e Promatec-200 (humidade~2%), que foram testadas em condições térmicas prescritas pela curva ISO834 e devidamente controladas. As amostras concedidas pela empresa Promatec foram cortadas com auxílio de uma serra elétrica, Figura 26.



Figura 26. Procedimento de corte e tipos de materiais.

No caso das placas Promatec H, o fabricante fornece os valores da condutividade térmica em função da temperatura, ver Tabela 16, cujos valores serão utilizados para efeitos de comparação.

Tabela 16. Valores da condutividade térmica fornecida pelo fabricante.

K fabricante	
T [°C]	K [W/mK]
20	0,17
100	0,19
200	0,21

Antes de realizar o experimento as amostras foram acondicionadas em um ambiente a 23°C e humidade relativa de 50% até que a variação da massa fosse inferior a 1%. Para esse propósito, utilizou-se uma câmara climática para expor as amostras nas condições especificadas, onde as massas das amostras eram medidas diariamente até se verificar a constância, Figura 27.



Figura 27. Acondicionamento das amostras de silicato de cálcio.

Posteriormente, as amostras foram furadas com o auxílio de uma furadeira de bancada, onde uma broca de 1,5 [mm] foi utilizada para realizar cinco furos em diferentes posições e profundidades em função de cada tipo de material. O esquema dos furos é ilustrado na Figura 28 onde, T representa os sensores de temperatura e dp , a espessura da amostra onde foram realizadas as seguintes furações com as unidades em milímetros: $T_5 = dp - 2$, $T_4 = 3dp/4$, $T_3 = 0,5dp$, $T_2 = dp/4$ e $T_1 = 2$. No interior dos furos foram posicionados termopares do tipo K para obter a evolução da temperatura em função do tempo ao longo da espessura das amostras.

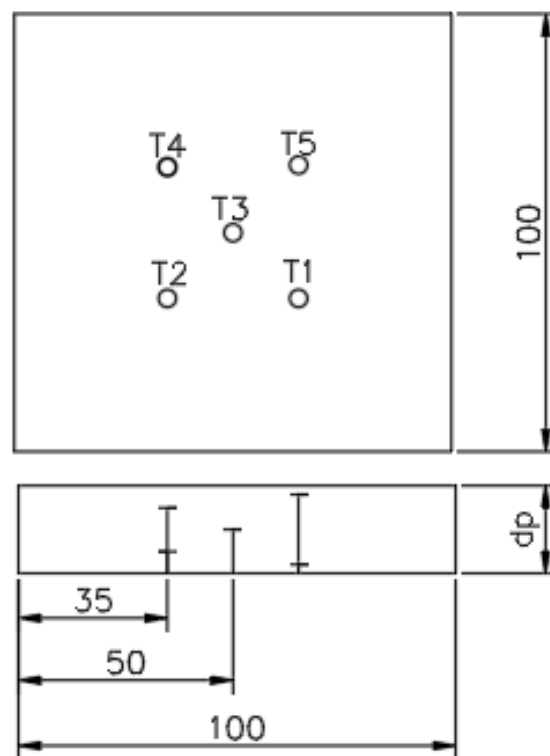


Figura 28. Esquema de furação para posicionamento dos termopares.

Uma placa de fibra cerâmica, escavada com as medidas das amostras, foi utilizada como isolante térmico e suporte para garantir que somente haja fluxo térmico na superfície exposta aos gases quentes, ver Figura 29. Furos passantes foram feitos na placa inferior para ser usada como guia e assim facilitar o ajuste correto dos termopares nas profundidades correspondentes.



Figura 29. Preparação e ajuste dos termopares nas amostras para execução dos testes no forno.

As placas de silicato de cálcio foram expostas a condições térmicas equivalentes a uma situação real de incêndio, dada pela curva ISO 834. Posto isto, para implementar numericamente o cenário e as circunstâncias que as amostras se encontram no interior do forno é necessário especificar as condições iniciais e de fronteira na superfície das amostras em contato com os gases quentes. Portanto a aplicação das técnicas utilizadas para gerar o algoritmo numérico segue as condições representada pela Figura 30.

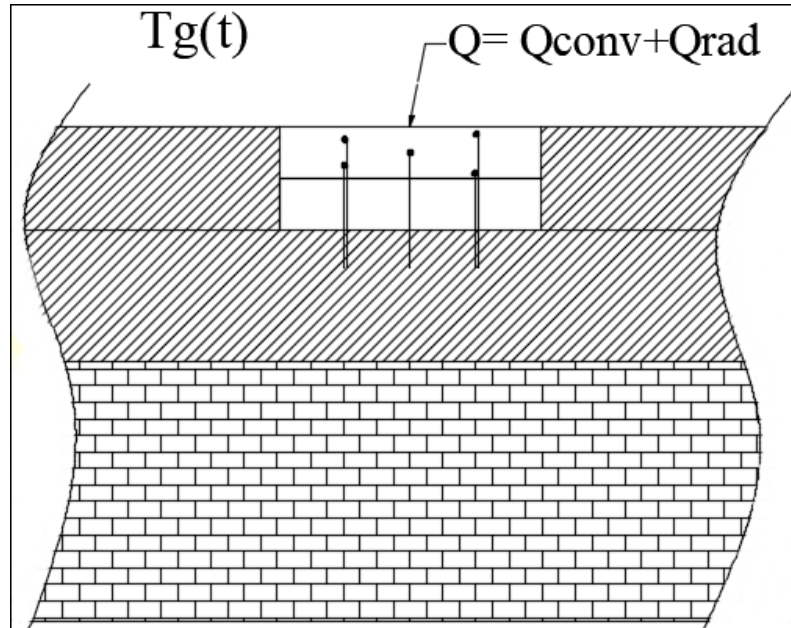


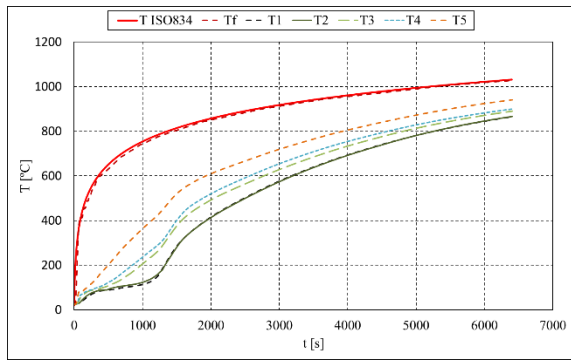
Figura 30. Volume de controle das placas no interior do forno.

A medida que a temperatura do gás T_g aumenta, dá-se o início do fenómeno de transferência de calor, o qual todo o fluxo térmico é transpassado para a amostra por radiação e convecção, conforme mostra o volume de controle ilustrado pela figura acima. Além disso, considerou-se que a transferência de calor ocorre unidimensionalmente em condições adiabáticas ideais nas faces isoladas. Sendo assim o balanço energético que corresponde a esse cenário é representado pela equação (5.2).

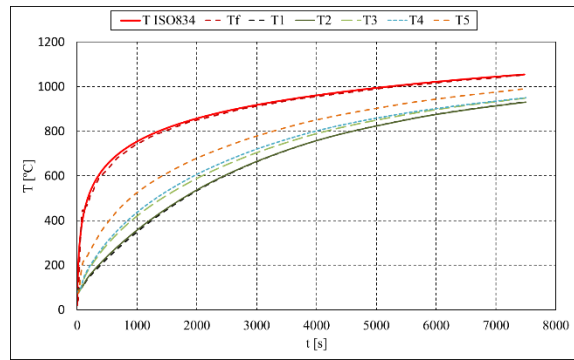
$$K \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=dp} = h_c (T_g - T_s|_{x=dp}) + \varepsilon \sigma (T_g^4 - T^4|_{x=dp}) \quad (5.2)$$

Onde, h_c representa o coeficiente de transferência de calor por convecção tendo seu valor igual a 25 [W/m^2K], T_g e T_s são as temperaturas do gás e da superfície exposta, respetivamente, ε é a emissividade das placas de silicato de cálcio considerada igual a 0,9 segundo [22] e σ é a constante de stefan-Boltzmann.

Os resultados da evolução de temperatura das amostras de silicato de cálcio conduzidas no forno são apresentados nas Figura 31, Figura 32, Figura 33 e Figura 34.

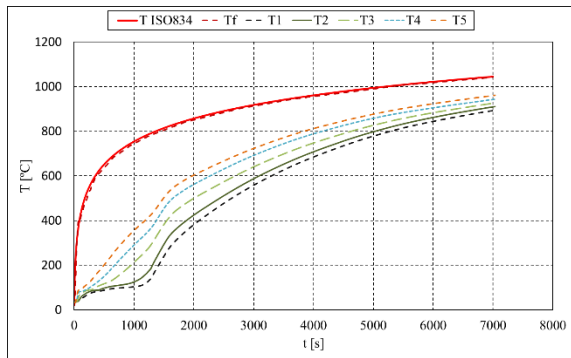


a)

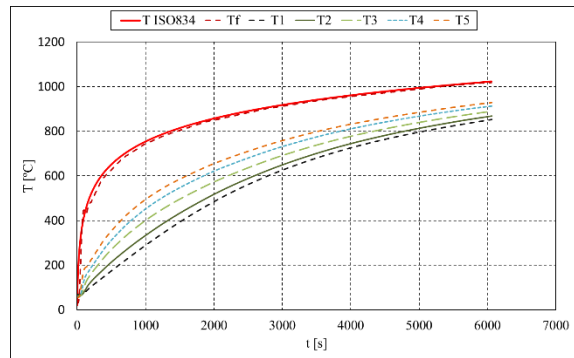


b)

Figura 31. Distribuição de temperatura da amostra Promatec_200_S1 obtida pelo forno de resistência ao fogo. a) Antes das reações químicas. b) Pós reações químicas

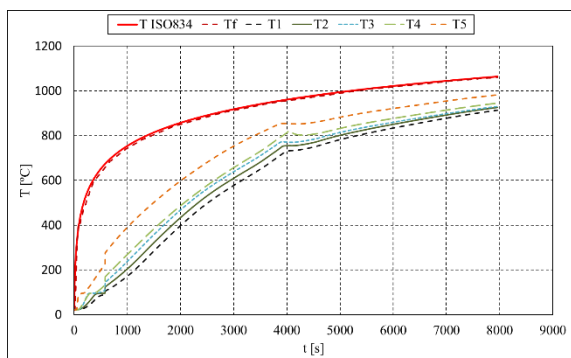


a)

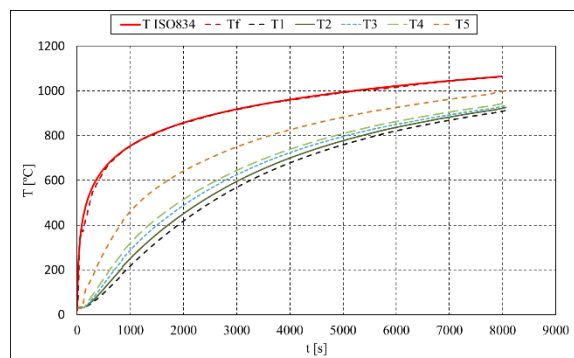


b)

Figura 32. Distribuição de temperatura da amostra Promatec_200_S2 obtida pelo forno de resistência ao fogo. a) Antes das reações químicas. b) Pós reações químicas



a)



b)

Figura 33. Distribuição de temperatura da amostra Promatec_H_S1 obtida pelo forno de resistência ao fogo. a) Antes das reações químicas. b) Pós reações químicas

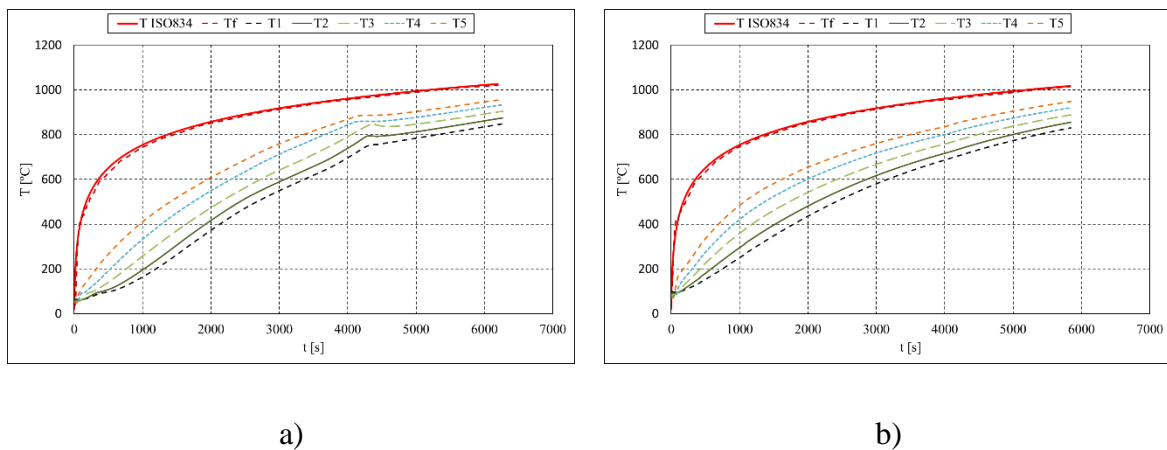


Figura 34. Distribuição de temperatura da amostra Promatec_H_S2 obtida pelo forno de resistência ao fogo. a) Antes das reações químicas. b) Pós reações químicas

As figuras acima mostram uma comparação da evolução da temperatura das placas de silicato de cálcio utilizadas no caso em estudo, as figuras nomeadas com a letra A se referem as amostras que foram submetidas aos testes antes de qualquer reação térmica ou química, já as figuras classificadas com a letra B, dizem respeito as mesmas amostras que foram ensaiadas novamente no forno, mas após as reações químicas.

Mediante as figuras à esquerda, percebe-se uma leve instabilidade na evolução da temperatura por volta dos 100 [°C], esse fenómeno ocorre devido à grande quantidade de energia (calor latente) que é desprendida para promover a mudança de fase da água contida nas placas, durante esse intervalo de tempo, a energia que o material de proteção está absorvendo é destinada para evaporar a água (desidratação) e não para aumentar a temperatura. Essa é uma das principais características que tornam as placas de silicato de cálcio bastante eficientes na proteção ao calor, além de possuírem baixa condutividade térmica. Ao lado direito (figuras b), percebe-se que a evolução de temperatura se dá de maneira uniforme, seguindo a curva de incêndio padrão. Esse comportamento é conveniente por não haver água na estrutura do material devido a desidratação, por consequência, após a ocorrência de um incêndio deve-se substituir o revestimento de proteção por um novo a fim de manter a eficiência do produto, pois após a exposição ao fogo os materiais sofrem severas degradações, prejudicando as características mecânicas e térmicas.

5.2.2 Evolução da temperatura em elementos protegidos

Embora os materiais de proteção térmica consigam atuar por bastante tempo na retenção do calor devido sua particularidade de isolamento térmico, pode haver um instante que a temperatura aumente tanto até causar a deterioração do material e perda da capacidade de proteger. Sabe-se ainda que, a temperatura crítica dos elementos estruturais é um dos principais parâmetros de projeto e está diretamente relacionada com a temperatura que envolve o conjunto estrutural e conseqüentemente, com as características e propriedades dos materiais de proteção.

O método simplificado contido no Eurocódigo 3, parte 1.2 (CEN, 2005b) determina a forma que o aumento de temperatura ocorre em um conjunto estrutural envolvido por uma camada de proteção. O modelo consiste na resolução simplificada da equação diferencial de condução de calor, ver equação (5.3).

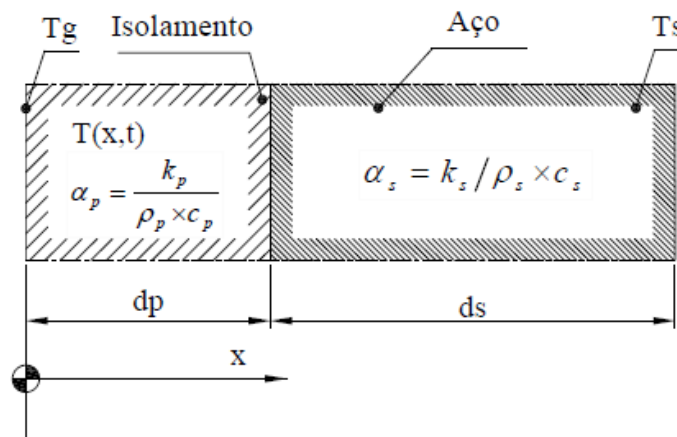


Figura 35. Modelo unidimensional de fluxo de calor com elemento protetivo,[7].

O aumento da temperatura do elemento estrutural protegido se dá ao longo do eixo da abscissa e transcorre da parte externa através do material de proteção que está em contato com os gases quente.

$$\frac{1}{\alpha_p} \frac{\partial T(x, t)}{\partial t} = \nabla^2 T(x, t) \quad (5.3)$$

Onde, α_p representa a difusividade térmica do material de proteção dado pela razão da condutividade térmica do mesmo pela massa específica e calor específico. ($=k_p/\rho_p c_p$).

De acordo com o Eurocódigo 3, parte 1.2 a evolução da temperatura do aço protegido é dada pela equação (5.4).

$$\Delta T_s = \frac{K_p A_p / V (T_g - T_s)}{c_s \rho_s d_p \left(1 + \frac{\phi}{3}\right)} \Delta t - \left(e^{\frac{\phi}{10}} - 1\right) \Delta T_g \quad ; \quad \Delta T_s \geq 0 \geq \Delta T_g \quad (5.4)$$

Onde, ΔT_s representa a evolução de temperatura no aço baseadas em curvas normalizadas de incêndio, K é a condutividade térmica do material de proteção, A_p é a área apropriada do material de proteção, c_a calor específico do aço, ρ_a massa específica do aço, T_g e T_a representam as temperaturas instantâneas dos gases e do aço, respetivamente e A_p/V é o fator de massividade e $\phi = c_p \rho_p d_p / c_s \rho_s \left(\frac{V}{A_p}\right)$.

Para casos onde sejam empregados materiais de proteção leve, que acontece sempre que a proteção possuir apenas a metade da capacidade térmica do aço, ocorre uma simplificação na equação fazendo com que o parâmetro ϕ tenda a zero e assim dando origem a outro modelo para determinar a variação da temperatura no aço em materiais de proteção leve, ver equação (5.5), [7].

$$\Delta T_s = \frac{K_p A_p (T_g - T_s)}{V c_s d_p \rho_s} \Delta t \quad (5.5)$$

Vale ressaltar que as equações acima não levam em consideração a variação da espessura dos elementos de proteção passiva, nem a alteração das propriedades físicas e térmicas para elevadas temperaturas, não representando uma situação real de incêndio. Isto posto, para avaliar a variação da condutividade térmica é preciso manipular as equações (5.4) e (5.5).

Para o caso simplificado, que ocorre sempre que o material de proteção possuir menos do que a metade da capacidade térmica do material a ser protegido, tem-se a solução que representa a variação da condutividade térmica efetiva em função do tempo durante o aquecimento do material, ver equação (5.6). Mesquita e Wang fizeram uso deste recurso para analisar a variação da condutividade térmica em tintas intumescentes que revestiam um perfil de aço. Tal solução é trazida ao longo da norma EN13381-8 e no anexo F da norma EN13381-4, este regimento proporciona ao projetista um conjunto de ferramentas para calcular os aspetos relevantes num projeto de edificação, [30, 41].

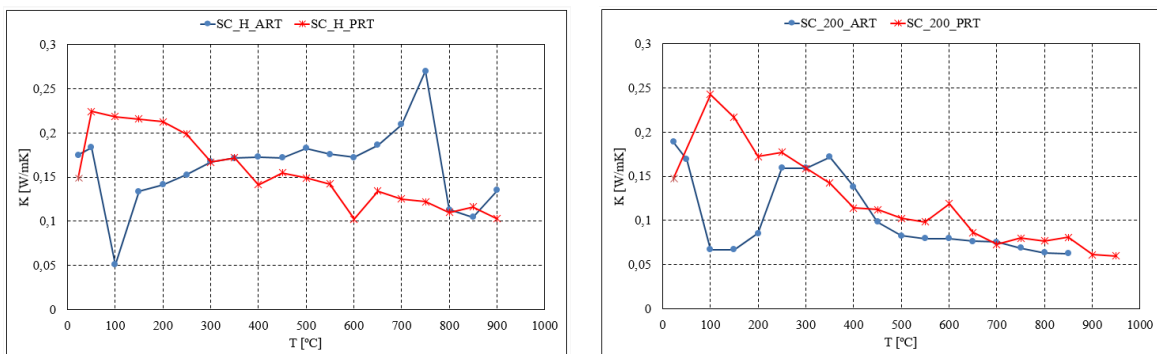
$$K(t) = C_p d_p \rho_s \frac{V}{A_p} \frac{T_s(t + \Delta t) - T_s(t)}{[T_g(t + \Delta t) - T_s(t)] \Delta t} \quad (5.6)$$

Contudo, no presente trabalho os experimentos realizados no forno foram feitos de forma um pouco diferente, pois as placas de silicato de cálcio não foram sobrepostas a nenhum perfil de aço e sim a uma placa do mesmo material. Assim sendo, os elementos da equação acima que estão relacionados com o aço devem ser alterados para dependerem somente das placas de silicato de cálcio como mostra a equação (5.7).

$$K(t) = C_p d_p \rho_p \frac{V}{A_p} \frac{T_p(t + \Delta t) - T_p(t)}{[T_g(t + \Delta t) - T_p(t)] \Delta t} \quad (5.7)$$

Onde, T_p representa a temperatura na placa de silicato de cálcio inferior.

Os dados da evolução de temperatura obtidos com o forno foram utilizados em conjunto com a equação acima para gerar as curvas que descrevem a variação da condutividade térmica efetiva em função da temperatura. Para isto, foi considerada a temperatura média do material de proteção durante o aquecimento. Os resultados alcançados revelam uma oscilação não linear durante o aquecimento do material, tal comportamento também foi observado por [41], e estão representados na Figura 36.



a)

b)

Figura 36. Comportamento da condutividade térmica em função do tempo mediante a curva padrão de incêndio. a) SC_H. b) SC_200.

5.3 *Transient plane source (TPS)*

Nos últimos 20 anos, pesquisas exaustivas foram realizadas para o desenvolvimento científico e tecnológico de técnicas baseadas em regime transiente com a finalidade de aprimorar e resolver os problemas de transporte térmico, [42]. Os métodos embasados no regime transiente solucionam a equação básica de transferência de calor, ver equação (5.8), com a adição de uma parcela de geração de energia que advém dos sensores dos equipamentos. Hot Wire, Transient Hot Strip e Transient Plane Source são técnicas capazes de medir o comportamento de propriedades térmicas nesta modalidade de análise, [39].

$$\frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla^2 T(x, y, z) + \frac{Q(x, y, z, t)}{k} \quad (5.8)$$

O Hotdisk é um equipamento transiente baseado na teoria (TPS) desenvolvida por Gustafsson, este equipamento é capaz de medir propriedades térmica em função da temperatura. Entre as várias vantagens que o dispositivo apresenta em relação aos outros métodos destaca-se o curto tempo requerido para executar a medição, neste caso os valores da condutividade térmica e difusividade térmica são relatados simultaneamente nos resultados. Além disso, este método abrange uma elevada gama de aplicabilidade que pode ser empregada para medir a condutividade térmica de materiais que estejam entre 0,02-400 [W/mK], [40, 43].

Neste dispositivo utiliza-se um sensor que realiza as medições e ao mesmo tempo produz a energia necessária para aumentar a temperatura da amostra, que pode ser determinada com precisão através da medição de resistência elétrica do sensor. Ao iniciar a medição, uma corrente elétrica passa pelo sensor de tal maneira que, seja suficientemente grande para elevar a temperatura da amostra cerca de 1-2K. O sensor possui um sistema eletrônico padrão gravado em uma camada fina de metal e nas superfícies são revestidas por um material isolante que pode ser Kapton ou Mica. Os componentes básicos implementado no Hotdisk são representados pela Figura 37, [37, 40].

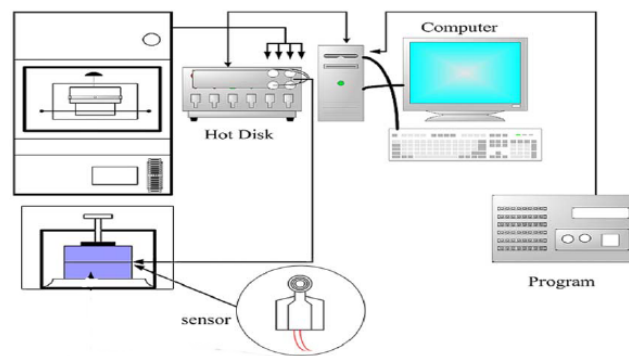


Figura 37. Componentes do aparato Hotdisk, [44].

É importante ressaltar que este método requer que o sensor esteja em contato perfeito com as superfícies dos dois corpos de prova, a fim de garantir que não haja nenhuma interferência externa na medição, logo, é necessário que os corpos de prova sejam do mesmo material com dimensões similares, [39]. O princípio básico desta técnica foi reconhecido e padronizado pela ISO-22007-2, que recomenda por meio da Tabela 17 parâmetros experimentais para diferentes tipos de materiais, [45]. A modelagem matemática integrada ao método está disponível no anexo A1.

Tabela 17. Parâmetros experimentais recomendados pela norma, [45].

	Ligas de metais	Cerâmica densa	Aço	Cerâmica	Polímero	Materiais isolantes
K [W/mK]	170	40	14	1,5	0,19	0,028
α [mm ² /s]	69	11	3,7	0,96	0,11	0,75
Incremento de T [K]	0,3	0,5	1	0,8	1,3	2,5
Raio da sonda [mm]	15	6,4	6,4	6,4	6,4	15
Espessura amostra [mm]	30	10	10	10	15	30
Diâmetro amostra [mm]	90	40	40	40	40	90
Tempo de medição [s]	5	10	10	40	160	160
Potência do sensor [W]	4	3	2	0,5	0,25	0,1

Vários pesquisadores já utilizaram esse método para caracterizar as propriedades térmicas em numerosos materiais, [46] aplicaram a técnica para determinar propriedades térmicas do cecorite 130P, um material cerâmico a base de cordierita, [39] caracterizaram diversas espumas de polietileno de baixa densidade através de dois métodos TPS e Rapid K. Há também relatos sobre materiais de construção abordados por [42], o qual ensaiou materiais como o poliestireno extrudido, PMMA, cecorite 130P, aço inoxidável e alumínio.

5.3.1 Preparação dos corpos de prova e procedimento

Os experimentos realizados foram feitos no Hotdisk (TPS) instalado no parque de ciência e tecnologia (Brigantia-EcoPark), que permite a realização dos testes de acordo com a norma internacional ISO 22007-2. A Figura 38 representa os equipamentos utilizados para executar os testes, sendo composto por um Hotdisk e um forno de resistência. A versão do equipamento em questão é o Hotdisk TPS 2500 S Extended Complete, a qual abrange uma ampla variedade de medição, podendo ser empregada para caracterizar materiais no estado sólido e líquido, desde que estejam contidos no intervalo de condutividade térmica entre 0,005 até 1800 [W/mK]. O alcance de temperatura deste equipamento também é bastante amplo, capaz de atingir valores extremos até 1000°C.



Figura 38. Equipamentos utilizados para medir a condutividade térmica (TPS). a) TPS. b) Forno.

Em relação ao Hotdisk, os cortes das amostras foram realizados com uma serra elétrica em formato de um quadrado, com lado medindo 75 [mm], pois o suporte do forno integrado ao equipamento é limitado a estas dimensões. Nos testes realizados à temperatura ambiente o sensor revestido com Kapton foi selecionado, enquanto, para medições obtidas através do forno, necessitou-se do sensor revestido com Mica que é o mais apropriado para temperaturas elevadas, Figura 39.

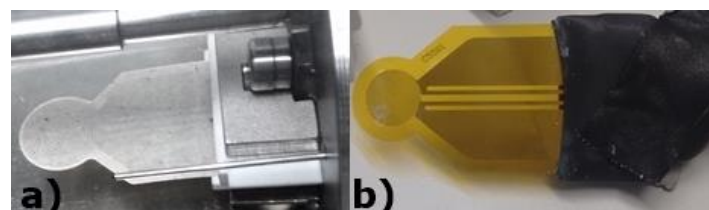


Figura 39. Sensores utilizados para o experimento: a) revestimento com mica, b) revestimento com Kapton.

Embora o silicato de cálcio possa apresentar estrutura microscópica não homogênea, neste trabalho, considerou-se que as propriedades físicas são independentes da direção analisada, com isso, as medições foram obtidas através da configuração do software HotDisk para materiais isotrópicos. Para cada teste realizado, as amostras de silicato de cálcio foram usadas em pares com o sensor posicionado no centro, onde leituras individuais foram obtidas para cada parâmetro de entrada.

Nos testes conduzidos no forno utilizou-se o gás nitrogénio para promover um ambiente inerte com o intuito de prolongar a vida útil dos sensores devido as condições agressivas em que operam. Contudo, indagou-se a hipótese de haver alguma reação térmica oxidante durante as fases de aquecimento das placas de silicato de cálcio e assim, a presença do oxigénio seria requerida. Perante à esta indagação, para verificar se o comportamento da condutividade térmica sofreria qualquer alteração, foi preciso realizar alguns testes em um ambiente contendo ar. Os resultados serão discutidos mais adiante neste capítulo. A Figura 40 ilustra o arranjo experimental.

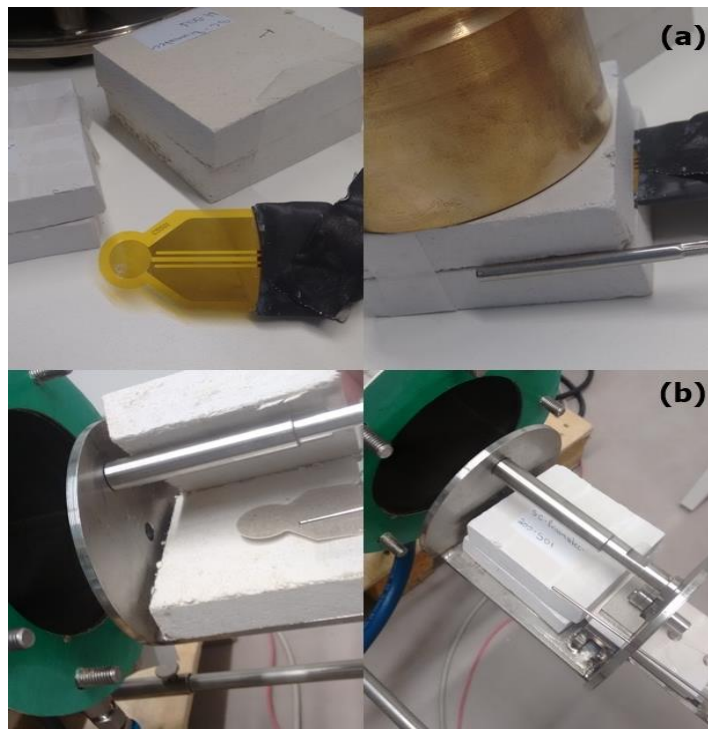


Figura 40. Preparação das amostras de silicato de cálcio para execução dos testes. a) Procedimento para temperatura ambiente. b) Procedimento para altas temperaturas.

É importante salientar que, na utilização do forno é utilizado um sensor de conexão por quatro pontos, o qual deve-se ter bastante cautela ao ajustar o sensor na base, pois é através dos quatro pontos que o equipamento enviará a corrente elétrica necessária para promover o aumento de temperatura da amostra e assim realizar as medições. O acoplamento do sensor é dado pela união dos seus quatro pontos em direção aos quatro pontos da base, segundo o fabricante, deve-se usar calços para pressionar essa junção a fim de garantir o ajuste adequado e evitar erros de medida.

5.3.2 Execução do experimento

Os testes realizados em condições de temperatura ambiente foram conduzidos através de um conjunto de 12 amostras de cada material. Por se tratar de um material com elevada resistência térmica os parâmetros de entrada devem ser baixos para evitar danos ao sensor por causa do superaquecimento. Sendo assim, baseado na norma ISO-22007-2 e em outras obras o sensor foi calibrado para liberar 0,07 W de potência e as leituras da condutividade térmica foram obtidas num período de 160s. A Figura 41 ilustra a preparação dos testes conduzidos em condições ambiente, onde um sensor externo foi usado para medir a temperatura da amostra.

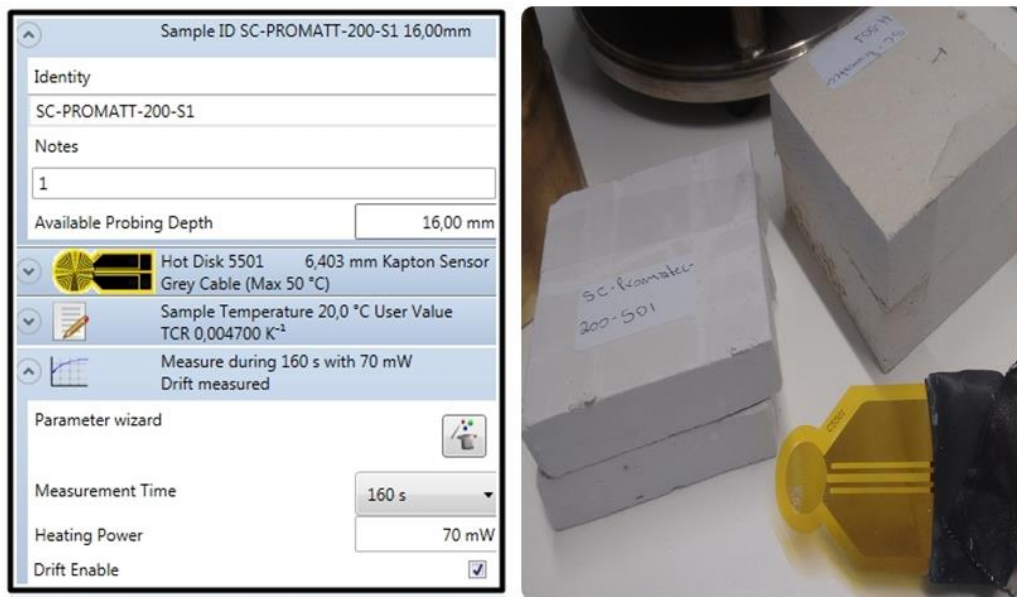


Figura 41. Preparação do teste para temperatura ambiente através do TPS.

Os resultados das propriedades obtidas (condutividade térmica, difusividade térmica e calor específico) das placas estão resumidos nas Tabela 18 e Tabela 19. O comportamento e constância dessas propriedades podem ser visualizados com detalhe nas Figura 42 e Figura 43.

Tabela 18. Propriedades térmica das placas SC-H em temperatura ambiente através do TPS.

Amostra	K [W/mk]	α [mm ² /s]	Cp [kJ/kgK]
SC-H-S1	0,229	0,416	0,632
SC-H-S2	0,213	0,426	0,574
SC-H-S3	0,232	0,360	0,743
SC-H-S4	0,218	0,393	0,637
SC-H-S5	0,227	0,368	0,710
SC-H-S6	0,233	0,370	0,725
SC-H-S7	0,222	0,419	0,608
SC-H-S8	0,232	0,474	0,562
SC-H-S9	0,239	0,395	0,696
SC-H-S10	0,254	0,394	0,741
SC-H-S11	0,261	0,412	0,728
SC-H-S12	0,249	0,389	0,736
MÉDIA	0,234	0,401	0,674
DESVIO PADRÃO	0,014	0,030	0,065

Tabela 19. Propriedades térmica das placas SC-200 em temperatura ambiente através do TPS.

Amostra	K [W/mk]	α [mm ² /s]	Cp [kJ/kgK]
SC-200-S1	0,266	0,349	0,878
SC-200-S2	0,275	0,539	0,586
SC-200-S3	0,251	0,336	0,858
SC-200-S4	0,248	0,320	0,888
SC-200-S5	0,248	0,318	0,897
SC-200-S6	0,261	0,344	0,870
SC-200-S7	0,263	0,345	0,874
SC-200-S8	0,273	0,347	0,904
SC-200-S9	0,255	0,346	0,849
SC-200-S10	0,262	0,399	0,754
SC-200-S11	0,260	0,347	0,863
SC-200-S12	0,259	0,517	0,576
MÉDIA	0,260	0,376	0,816
DESVIO PADRÃO	0,008	0,071	0,111

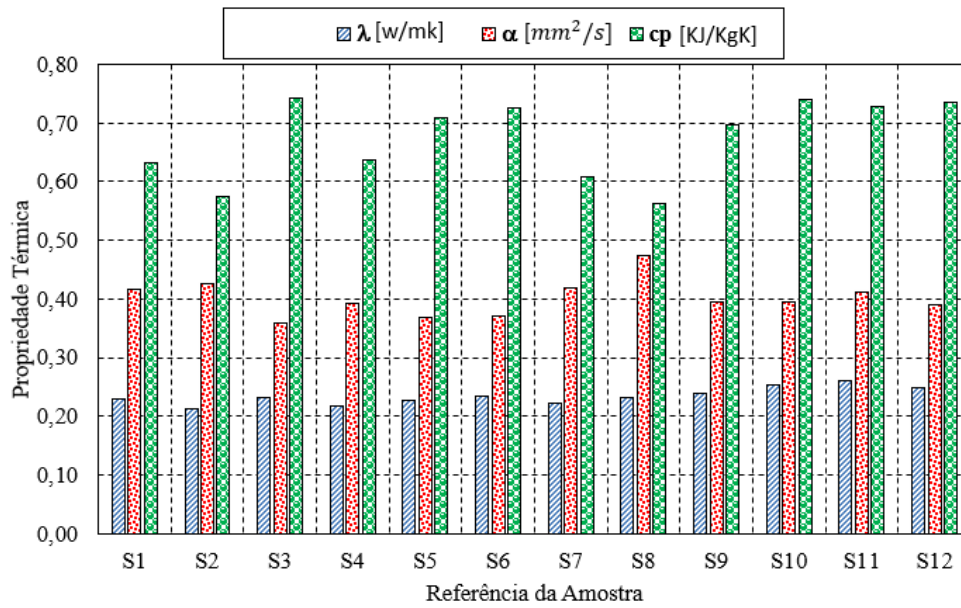


Figura 42. Propriedades térmicas das placas SC-Promatec_H em temperatura ambiente.

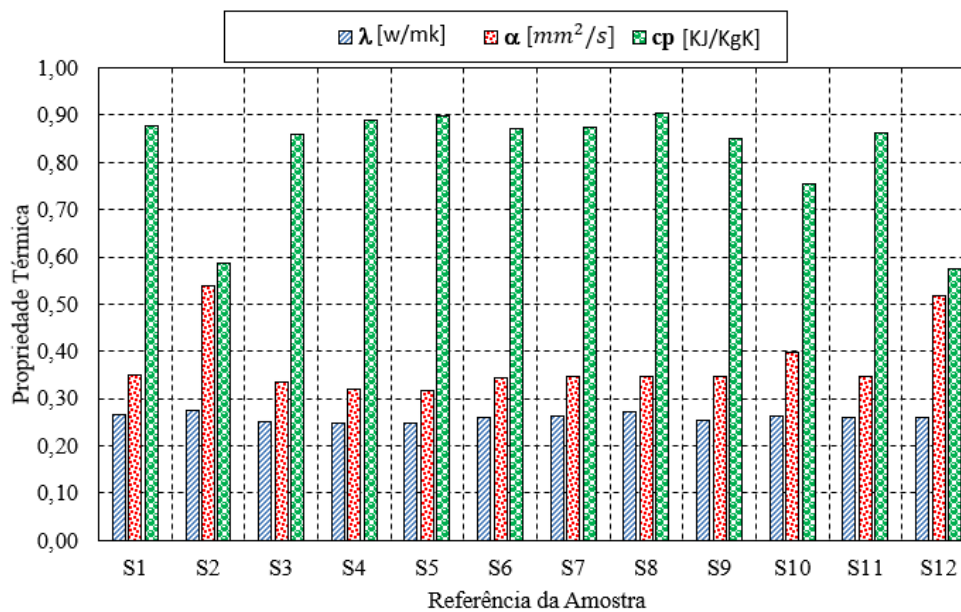


Figura 43. Propriedades térmicas das placas SC-Promatec_200 em temperatura ambiente.

Mediante os gráficos e tabelas anteriores fica evidente que a técnica TPS demonstra elevada estabilidade em relação aos valores fornecidos, principalmente com respeito a condutividade térmica, pois é bastante perceptível que essa propriedade não sofre variação considerável ao longo das 12 amostras. Esta afirmação também pode ser feita com base no tratamento dos dados, os quais revelam valores de desvio padrão inferiores a 0,07 para as placas do tipo H e 0,12 para as placas do tipo 200.

O software Hotdisk e um forno foram usados em conjunto para executar um ciclo de testes com diferentes intervalos de temperatura, sendo: temperatura ambiente (23 [°C]), 100 [°C], 200 [°C], 300 [°C], 400 [°C], e 500 [°C]. Para cada temperatura nos testes ensaiados no forno foram realizadas 5 leituras independentes de condutividade térmica. O sensor foi calibrado com uma potência de 70 [mW] durante um tempo característico de 160 [s]. A Figura 44 se refere à preparação dos testes conduzidos em altas temperaturas. Nesta etapa é necessário estabelecer a temperatura inicial, o valor final e o incremento de temperatura que se deseja obter os valores das propriedades térmicas. Além disso, deve-se definir o período de espera antes de começar a medição e o intervalo de tempo entre cada medição. A temperatura da amostra é monitorada com o auxílio de um termopar do tipo K, o qual é posicionado na superfície da mesma.



Figura 44. Preparação do teste para elevadas temperaturas através do TPS.

Em um teste preliminar conduzido no forno, foi concedido um período de espera de 1 hora para cada intervalo de temperatura antes de realizar 5 medições, tal pausa é necessária para garantir o equilíbrio em relação à perda de massa (evaporação da água) e o equilíbrio térmico, pois trata-se de um material refratário que demanda certo tempo para atingir o estado estacionário. Adicionalmente, foi atribuído um intervalo de 1/2 hora entre cada medição para assegurar o equilíbrio térmico e verificar a constância dos resultados.

Porém, ao final da primeira medição realizada a 100 [°C], constatou-se que o período de espera de 1 hora não foi suficiente para promover o equilíbrio térmico. Tal afirmação pode ser feita com base nos resultados providos pelo Hotdisk, o qual mostra que ao final desse tempo a temperatura da amostra havia atingido a marca dos 82 [°C] e aumentou até os 86 [°C] a medida em que o intervalo de tempo de meia hora era atingido, indicando a insuficiência de tempo, ver Tabela 20. Ademais, pode-se ter como indicador inicial os parâmetros disponíveis em [22] pois trata-se do mesmo material e técnica, nesta obra os autores atribuíram um período de espera de 4 horas para permitir o equilíbrio térmico e um intervalo de 1 hora entres cada medição.

Tabela 20. Teste de calibração no Hotdisk.

Status	Descrição	Código do sensor	Tempo de medição [s]	Potência [mW]	Temperatura da amostra [°C]
Calculado	Medição 1				82
Calculado	Medição 2				84
Calculado	Medição 3	4921	160	70	85
Calculado	Medição 4				85
Calculado	Medição 5				86

A diferença de temperatura da tabela acima indica que a amostra não atingiu o equilíbrio térmico. Isso é extremamente prejudicial para o sensor efetuar as medições, pois o fluxo térmico derivado dessa diferença de temperatura desorienta a sonda de calor que é liberada pelo sensor. Com o intuito de corrigir essa condição inapropriada, realizou-se um teste de calibração para aferir o tempo necessário de espera até que a amostra alcance o estado estacionário. Após o teste verificou-se que o equilíbrio térmico foi atingido após 210 minutos. À vista disso, os testes subsequentes foram calibrados com tempo de espera precedente aos testes de 210 minutos e entre cada medição um intervalo de 30 minutos.

Encontra-se disponível no apêndice deste trabalho tabelas com todos os resultados obtidos em elevadas temperaturas através do TPS, nomeadamente da Tabela 29 até a Tabela 34, estas estão separadas de acordo com o tipo de condicionamento no qual se realizou os testes e devido ao seu tamanho extenso optou-se por disponibilizá-las em anexo. Contudo, o comportamento médio dos resultados extraídos do TPS referente a variação da condutividade térmica das placas de silicato de cálcio durante a evolução da temperatura será exibido neste momento nas próximas figuras. Primeiramente têm-se as curvas da condutividade térmica ensaiadas em um ambiente com ar e outro com azoto que são mostrados através das Figura 45 e Figura 46.

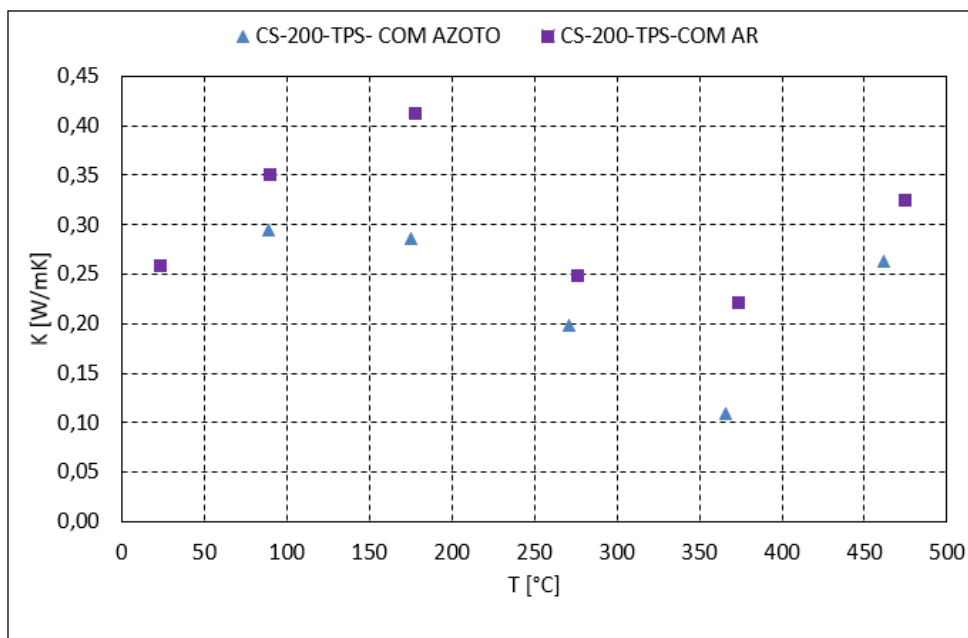


Figura 45. Condutividade térmica x Temperatura da placa Promatec_200 através da técnica TPS.

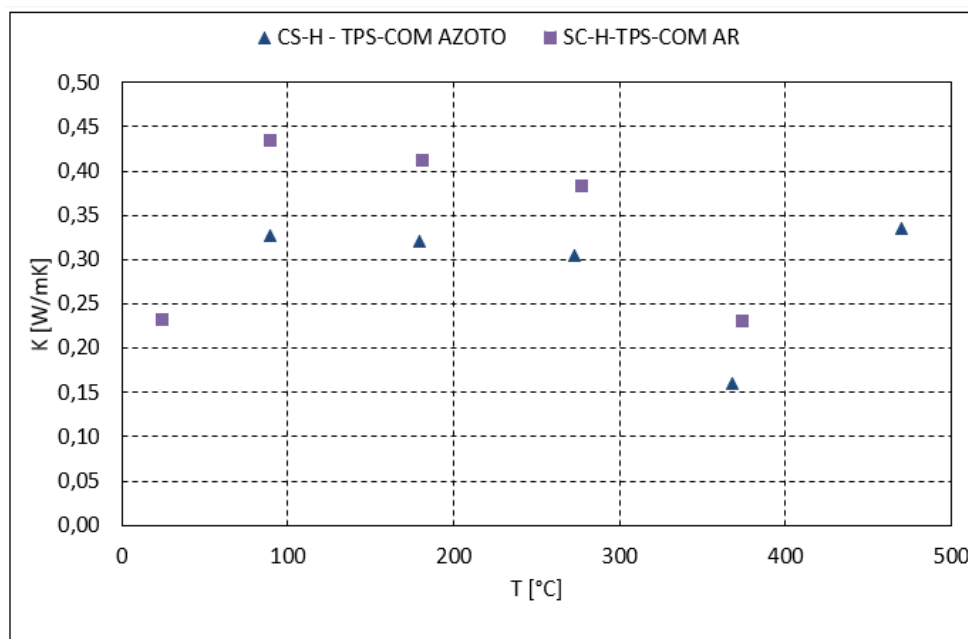


Figura 46. Condutividade térmica x Temperatura da placa Promatec_H através da técnica TPS.

As figuras acima mostram uma influência significativa da condutividade térmica em relação à variação da temperatura e, por se tratar do mesmo material as curvas da propriedade analisada apresentam comportamento similar nos ambientes com azoto e ar. Como já era esperado, houve um aumento significativo no valor da propriedade, tal incremento atingiu um valor de 32% na condutividade térmica das placas do tipo H e 12% nas placas do tipo 200. Logo, considerando uma situação de incêndio na qual a variação da condutividade térmica do material de proteção foi negligenciada, o projeto estaria sujeito a falhas, podendo causar danos catastróficos resultando no colapso global da estrutura, pois haveria um fluxo de calor adicional em direção ao aço estrutural que não foi previamente calculado. Além disto, percebe-se que os valores da condutividade térmica obtidos através do ambiente a ar são superiores aos obtidos com azoto para ambas as placas.

O aumento da condutividade térmica com o uso do ar ao redor da amostra é justificado devido ao ar possuir maior condutividade térmica em relação ao azoto. Com o propósito de demonstrar tal diferença, utilizou-se os dados das propriedades térmicas dos gases disponíveis em [47], para se criar uma regressão através da ferramenta Curve fitting do software Matlab e assim, ajustar o comportamento da condutividade térmica do ar e do azoto para gerar expressões matemáticas para efeitos de comparação. A equação (5.9) representa o comportamento da condutividade térmica do azoto e a equação (5.10) do ar.

$$K(T)_N = -1,827e^{-8}T^2 + 7,632e^{-5}T + 0,004899, \quad 300 < T < 1000 \quad (5.9)$$

$$K(T)_{Ar} = -1,49e^{-8}T^2 + 7,796e^{-5}T + 0,004197, \quad 300 < T < 1000 \quad (5.10)$$

Sendo T a temperatura do gás dada em [K].

As equações acima representam um ajuste polinomial de segunda ordem e possuem uma precisão $R^2 = 0,999$. A Figura 47 ilustra o comportamento da condutividade térmica do azoto e do ar em função da temperatura.

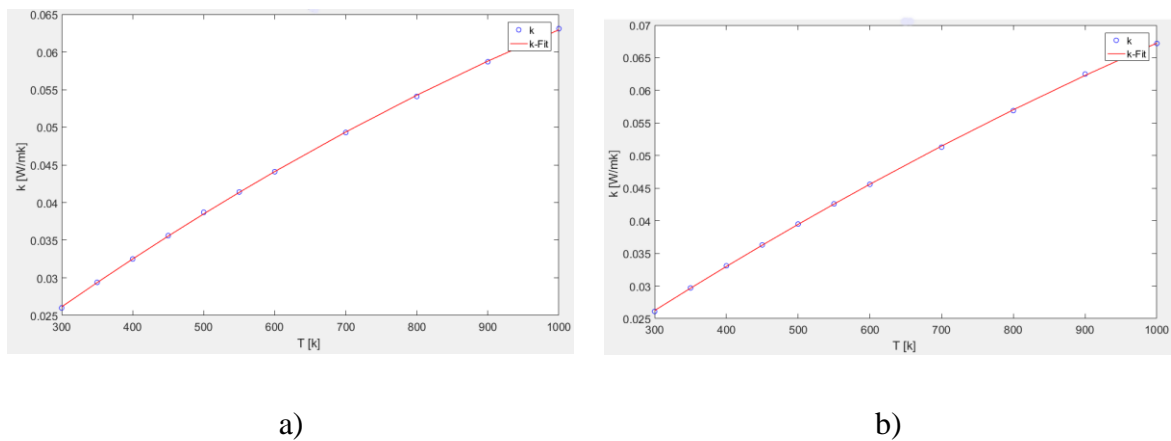


Figura 47. Condutividade Térmica dos gases usados no TPS. a) Azoto. b) Ar

Com base na figura acima e no modelo de Russell conclui-se que o uso do ar implica no aumento da condutividade térmica efetiva das placas de silicato de cálcio. É razoável afirmar isto levando em consideração que neste modelo há uma parcela de radiação que considera a condutividade térmica do gás e no caso em questão, a condutividade térmica do ar é superior ao azoto.

Posteriormente, o efeito da porosidade do material também foi objeto indireto de estudo neste trabalho. Para isso, as mesmas placas ensaiadas previamente no forno foram utilizadas, pois, como as amostras foram submetidas a altas temperaturas por bastante tempo, considerou-se que todas as reações térmicas decorrentes das temperaturas elevadas já estariam finalizadas. As Figura 48 e Figura 49 mostram o comportamento da condutividade térmica antes e depois das reações térmicas.

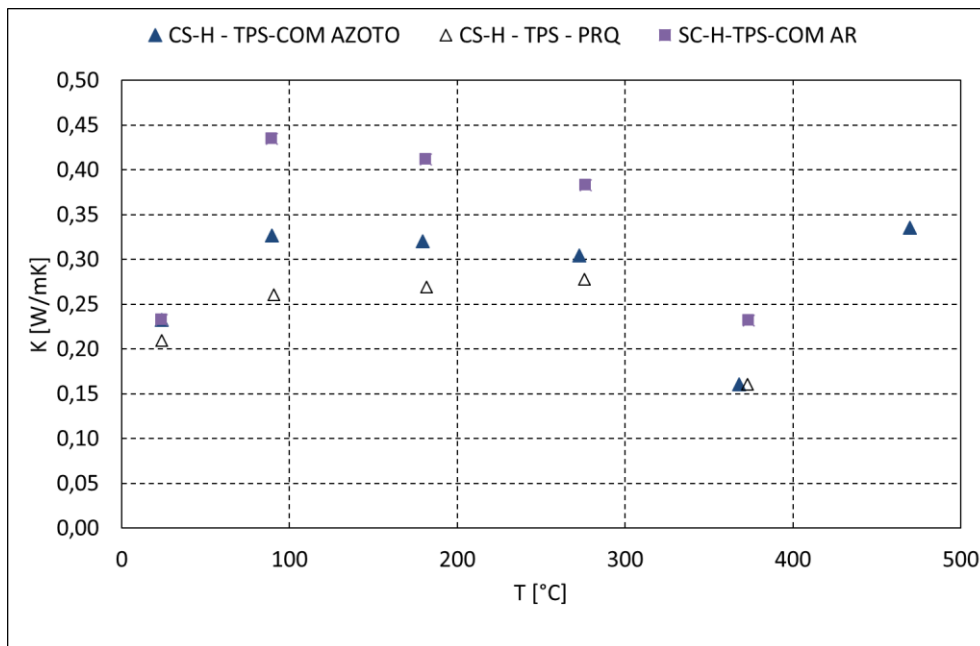


Figura 48. Influência da porosidade nas placas de silicato de cálcio promatec_H medidas com o TPS.

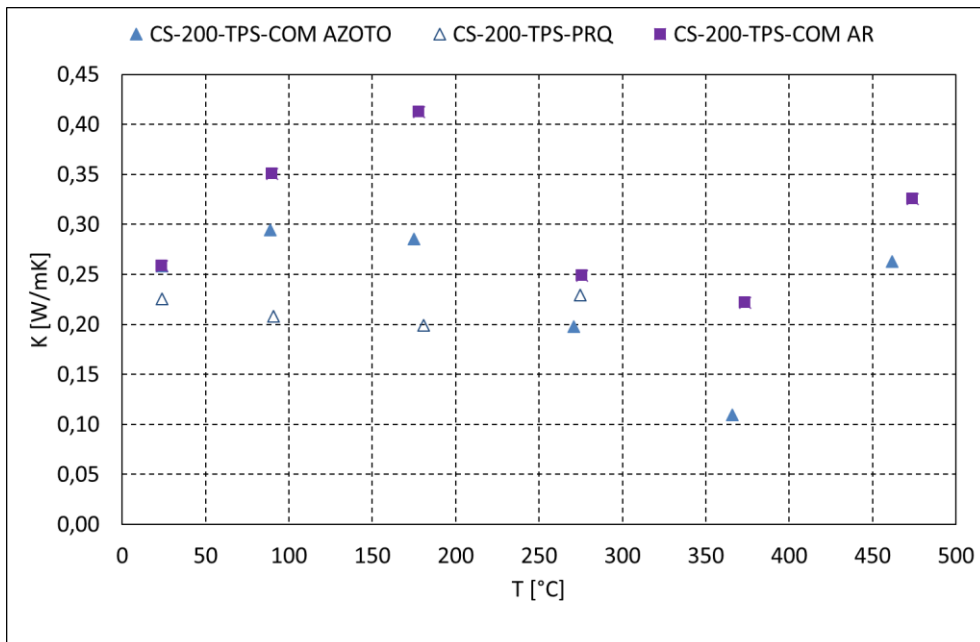


Figura 49. Influência da porosidade nas placas de silicato de cálcio promatec_200 medidas com o TPS.

Mediante as figuras acima é possível verificar a dependência da condutividade térmica com a porosidade e temperatura. Com base nos resultados e fundamentos descritos no capítulo 4 (nomeadamente entre as equações (4.2) e (4.5)), conclui-se que quanto maior a quantidade de poros menor é a condutividade térmica efetiva do material. Tal diminuição ocorre devido ao decremento da condutividade térmica na parcela do material sólido. Pois, à medida que ocorre o processo de evaporação, a água vai se ausentando das placas, resultando num aumento no tamanho e no número de poros no material.

Por fim, as análises obtidas através do TPS estão em conformidade com a investigação de Kontogeorgos et al [18], a qual faz menção sobre a possibilidade das reações químicas afetarem o comportamento da condutividade térmica. Tal fato fica evidente nos ensaios conduzidos nas amostras submetidas ao forno na condição de pós reações térmicas (posterior à desidratação), percebe-se nestes resultados um comportamento tênue da condutividade térmica em função da temperatura. Suplementarmente, [31] obtiveram um comportamento muito semelhante da variação da condutividade térmica mostrados nas figuras acima, neste caso os autores utilizaram a mesma técnica (TPS) porém em outro material de proteção passiva, as argamassas projetáveis.

5.4 *Guarded Hot Plate (GHP)*

Embora as técnicas baseadas no regime transiente tenham crescido substancialmente nos últimos anos, na Europa, o GHP continua sendo o equipamento mais utilizado para determinar a condutividade térmica dos materiais isolantes. Basicamente, a operação deste equipamento consiste em estabelecer o estado estacionário do gradiente de temperatura sobre um material de espessura conhecida, isto é possível devido ao controle do fluxo de calor originado pelo prato quente que flui para prato frio através do material a ser observado, [44, 48].

Neste método considera-se que o calor é transferido por condução unidimensional e o sistema é caracterizado por um regime estacionário, no qual a temperatura, em cada ponto do sistema é independente do tempo. Sendo assim, para o fluxo de calor longitudinal, sem perda de energia radial, nem geração de energia no interior do sólido a lei de Fourier pode ser usada para determinar a condutividade térmica, ver equação (5.11).

conhecido resulta na variação de temperatura da amostra, o que permite realizar a medição da condutividade térmica. Dois aquecedores de proteção, a placa (D) e o anel (E) que cercam a placa quente, são responsáveis por estabelecer um fluxo de calor uniforme e unidimensional, tal fluxo é protegido por uma camada de material isolante (G). A haste (H) é empregada para proporcionar o movimento vertical da placa quente bem como aplicar a pressão configurada pelo software. Por fim, toda temperatura de trabalho é rigorosamente controlada por sensores de temperaturas (J) que são distribuídos em vários pontos do equipamento. Toda a instrumentação é integrado a um computador que recolhe os dados relevantes para executar a medição da condutividade térmica, [48].

A versão do equipamento utilizado nos testes é Λ -METER EP500E. Com esta versão é possível realizar até três medições por testes em temperaturas arbitrárias, a gama de temperatura contemplada por esse equipamento deve estar entre -10 até 50°C. Qualquer material no estado sólido pode ser ensaiado, desde que possua valores de condutividade térmica contida no intervalo de 0,25 até 2 [W/mK].

5.4.1 Preparação dos corpos de prova e procedimento

De acordo com o fabricante, para medir a condutividade térmica de materiais isolantes, as amostras devem ser preparadas com área de 500 [mm²], porém, há 3 tipos de suportes, versão A (200x200 [mm²]), versão B (250x250 [mm²]) e versão C (150x150 [mm²]), que podem ser utilizados para os casos em que haja necessidade de utilizar amostras com dimensões inferiores. Ao adotar uma dessas versões é muito importante garantir que a espessura do suporte seja levemente mais espessa do que a espessura da amostra. A Figura 51 ilustra as etapas do procedimento experimental.

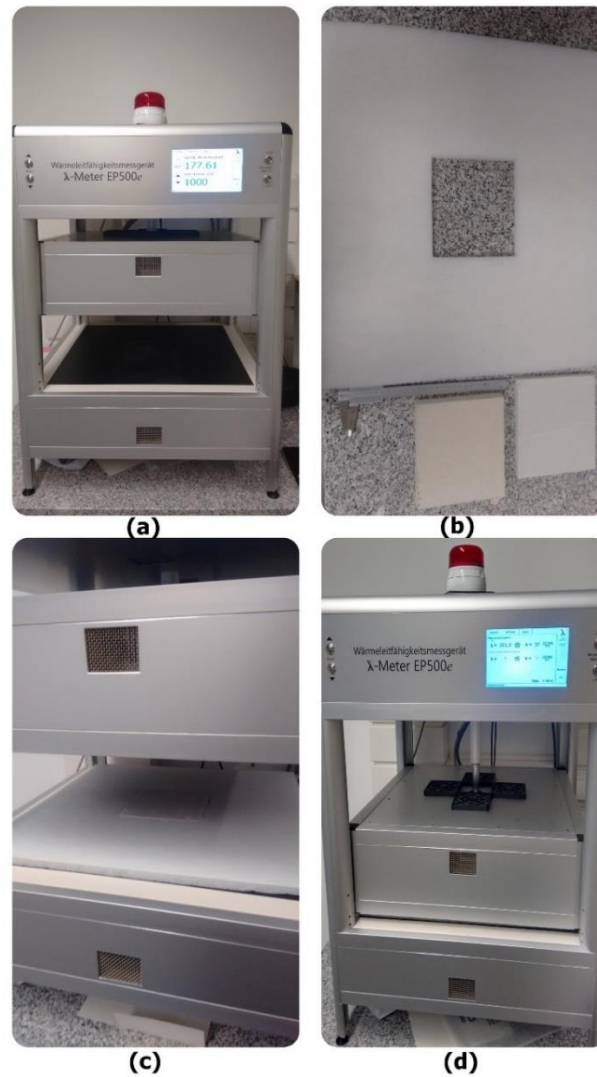


Figura 51. Principais etapas para executar os testes. (a) calibração do equipamento (zero_máquina), (b) e (c) são as etapas de preparação e inserção do suporte e peça no equipamento, (d) início do teste, aplicação da pressão adequada.

Inicialmente, a primeira etapa do procedimento é a calibração do equipamento, esse passo fornece à máquina a coordenada zero e deve ser feita com o suporte fora do equipamento, ver (a). Em seguida, é necessário tirar medidas da massa, área e espessura da amostra, pois estes valores são requeridos na interface do software, os instrumentos utilizados para tomar tais medidas foram: paquímetro e balança de precisão como mostrado em (b). A etapa (c) consiste no ajuste do suporte na posição adequada, é importante mencionar que, antes de executar o teste, deve-se verificar se a espessura do suporte é ligeiramente superior à espessura da amostra para garantir a aplicação correta da pressão.

Há várias espessuras de suportes disponíveis que podem ser combinadas e usadas como calço para atingir a altura necessária entre o suporte e a amostra. Finalmente, a etapa (d) depende unicamente da configuração do software, onde é atribuído alguns parâmetros de entrada, como: massa, dimensões e temperaturas que se deseja obter os valores da condutividade térmica, ver Figura 52.

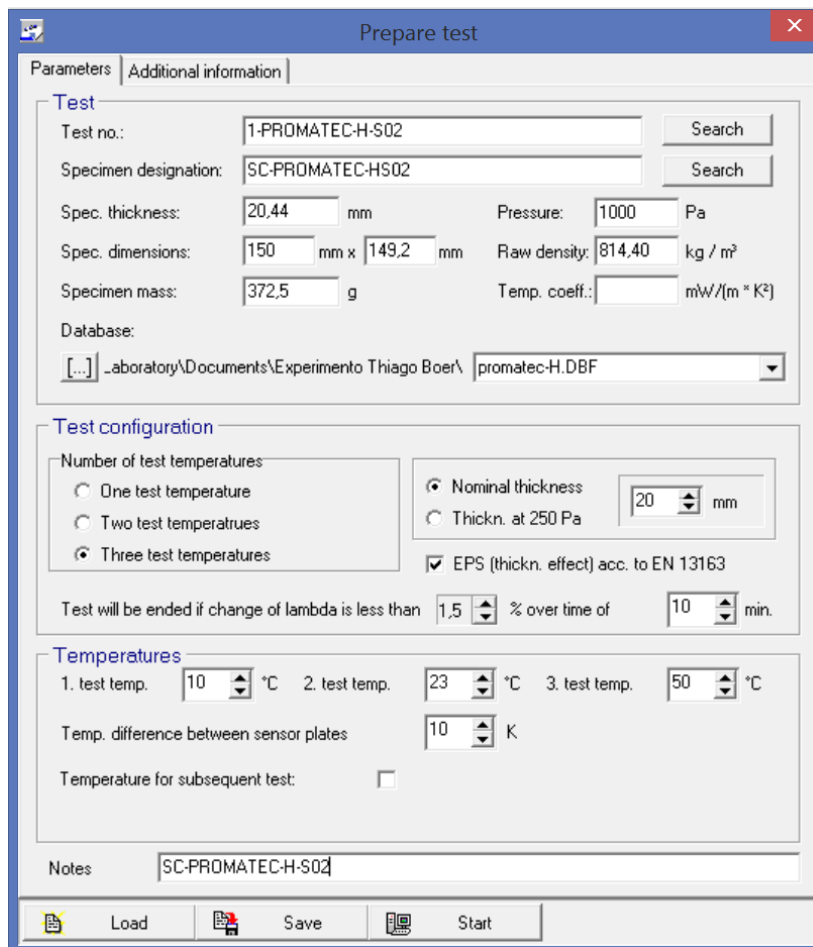


Figura 52. Configuração do software GHP.

5.4.2 Execução do experimento

A condutividade térmica das placas de silicato de cálcio foi verificada mediante a tecnologia do Guarded Hot Plate. Os testes foram conduzidos em um conjunto de oito amostras para cada tipo de placa conduzidas antes das reações térmicas e 4 amostras de cada para as análises feitas após as reações.

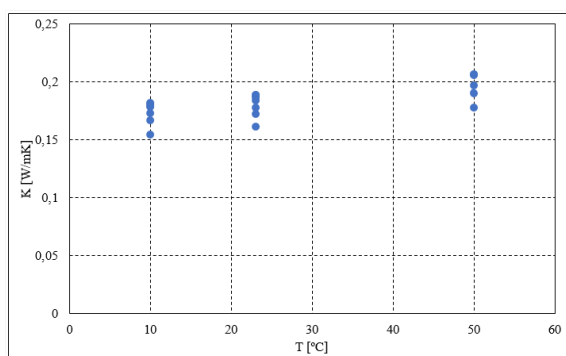
Analogamente ao TPS, o efeito da porosidade na condutividade térmica também foi verificado através da técnica GHP. Para isso, utilizou-se um forno de resistência ao fogo para submeter as placas de silicato de cálcio a condições de incêndio durante um determinado tempo até que as mesmas reações obtidas no forno do TPS sejam alcançadas com o intuito de comparar este estado em ambas as técnicas. Após 90 minutos a temperatura no forno havia superado a marca de 1000 °C, nestas circunstâncias as placas estavam descarbonatadas e com rachaduras em várias partes de sua superfície, indicando a eliminação por evaporação da água contida no material. Em virtude da capacidade limitada do alcance de temperatura do equipamento, os resultados foram obtidos apenas para 10, 23 e 50°C. As Tabela 21 e Tabela 22 resumem os resultados obtidos, o qual indica elevada estabilidade nos valores da condutividade térmica, tal constância é mais bem observada nos gráficos de dispersão representados na Figura 53.

Tabela 21. Resumo dos resultados obtidos através do GHP das placas Promatec_H.

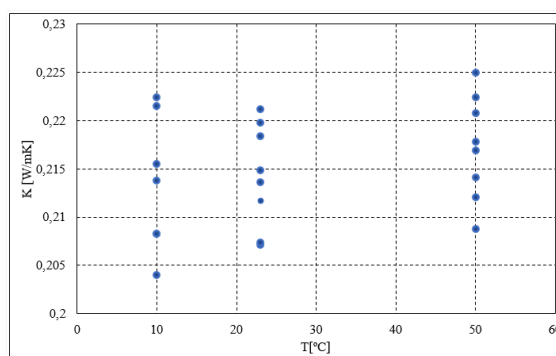
Antes das reações térmicas						
	T [°C]	K [W/mK]	T [°C]	K [W/mK]	T [°C]	K [W/mK]
S1		0,1794		0,1840		0,1974
S2		0,1547		0,1616		0,1783
S3		0,1731		0,1779		0,1914
S4	10	0,1805	23	0,1888	50	0,2065
S5		0,1823		0,1888		0,2063
S6		0,1812		0,1875		0,2067
S7		0,1667		0,1728		0,1904
S8		0,1784		0,1871		0,2053
Média		0,1789		0,1856		0,2014
Desvio Padrão		0,0095		0,0097		0,0104
Pós reações térmicas						
	T [°C]	K [W/mK]	T [°C]	K [W/mK]	T [°C]	K [W/mK]
S1		0,1574		0,1627		0,1743
S2	10	0,1501	23	0,1554	50	0,1669
S3		0,1435		0,1490		0,1605
S4		0,1496		0,1550		0,1700
Média		0,1499		0,1552		0,1685
Desvio Padrão		0,0057		0,0056		0,0058

Tabela 22. Resumo dos resultados obtidos através do GHP das placas Promatec_200.

Antes das reações químicas						
	T [°C]	K [W/mK]	T [°C]	K [W/mK]	T [°C]	K [W/mK]
S1		0,2040		0,2212		0,2224
S2		0,2083		0,2071		0,2169
S3		0,2083		0,2149		0,2250
S4	10	0,2224	23	0,2074	50	0,2088
S5		0,2138		0,2198		0,2208
S6		0,2215		0,2116		0,2121
S7		0,2155		0,2184		0,2178
S8		-		0,2136		0,2141
Média		0,2138		0,2143		0,2174
Desvio padrão		0,0070		0,0054		0,0054
Pós reações químicas						
	T [°C]	K [W/mK]	T [°C]	K [W/mK]	T [°C]	K [W/mK]
S1		0,1474		0,1470		0,1488
S2	10	0,1333	23	0,1384	50	0,1484
S3		0,1199		0,1242		0,138
S4		0,1107		0,1146		0,1261
Média		0,1278		0,1313		0,1432
Desvio padrão		0,0160		0,0144		0,0107



a)



b)

Figura 53. Oscilação dos resultados obtidos através do GHP. a) Promatec_H. b) Promatec_200.

Os resultados referente ao comportamento da condutividade térmica das amostras sem reação térmica e com reação térmica estão ilustrados nas Figura 54 e Figura 55.

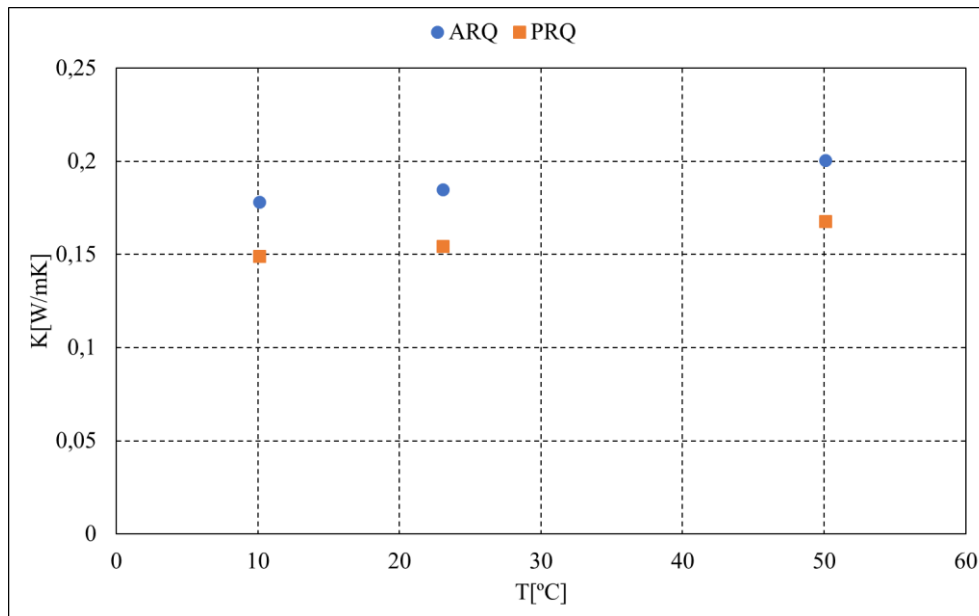


Figura 54. Influência da porosidade na condutividade térmica das placas Promatec_H através do GHP.

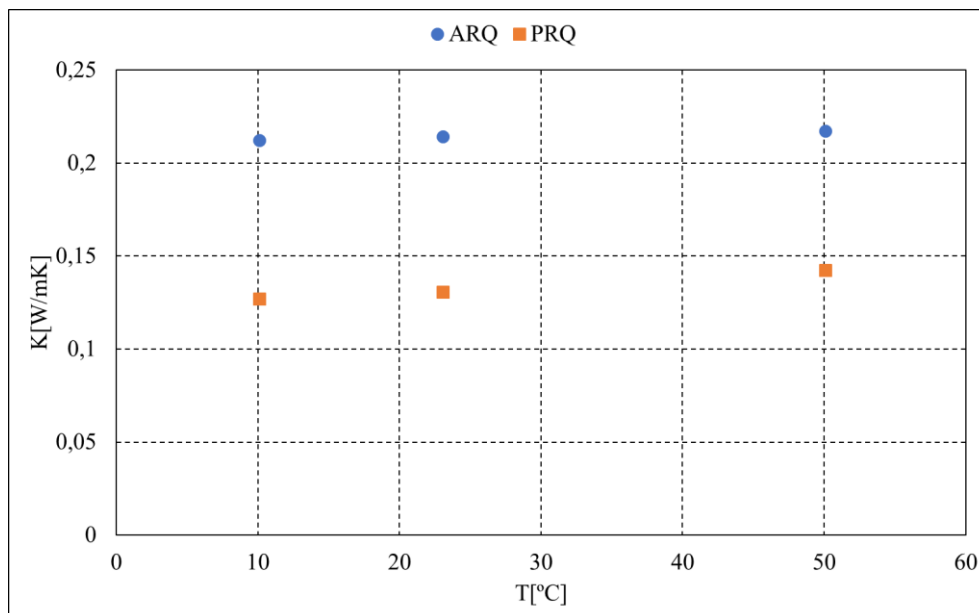


Figura 55. Influência da porosidade na condutividade térmica das placas Promatec_200 através do GHP.

Sabe-se que a sensibilidade da condutividade térmica em relação ao calor ocorre proporcionalmente ao valor do gradiente de temperatura, este fator é evidenciado no incremento ínfimo da propriedade térmica mostrado nas figuras acima. No entanto, mesmo com esta pequena variação é possível identificar a tendência gradual do comportamento da condutividade térmica à medida que a temperatura aumenta.

Conforme presumido, os valores da condutividade térmica ilustrados nas figuras acima, após a desidratação, são inferiores aos das placas sem reações térmicas. Analogamente ao TPS esse decréscimo no valor da propriedade é devido ao aumento no tamanho e volume dos poros que há no material por consequência da desidratação da água. O decréscimo após as reações térmicas é evidenciado para as duas placas, porém para as placas do tipo 200 esta redução é mais significativa. O decréscimo médio decorrente da desidratação das placas Promatec_H e Promatec_200 correspondente a cada temperatura através do GHP estão resumidos na Tabela 23.

Tabela 23. Redução da condutividade térmica após as reações térmicas.

Promatec_H		Promatec_200			
Redução 10 T [°C]	Redução 23 T [°C]	Redução 50 T [°C]	Redução 10 T [°C]	Redução 23 T [°C]	Redução 50 T [°C]
16,24%	16,36%	16,34%	40,21%	38,72%	34,12%

O fato da condutividade térmica ter decrescido mais do que o dobro nas placas Promatec_200 indica que este material possui maior potencial de reação ao fogo, tal comportamento pode estar correlacionado com vários aspetos como: os tipos de substâncias que compõem as placas, anisotropia, estrutura molecular e sobretudo a humidade relativa do material, a qual é diretamente afetada durante a absorção de calor.

5.5 Comparação dos resultados

Esta secção tem o propósito de comparar os resultados da condutividade térmica através das duas técnicas utilizadas neste trabalho. Os testes conduzidos à temperatura ambiente são resumidos nas Tabela 24 e Tabela 25, nas quais apresentam uma margem de erro associada ao método, onde se considera como referência exata os dados fornecidos pelo fabricante. O comportamento da condutividade térmica em cada amostra pode ser melhor observado na Figura 56.

Tabela 24. Comparação entre os resultados da condutividade térmica através do TPS e GHP das placas promatec_H em T_amb-23°C

	K fab	K TPS	Erro (%)	K GHP	Erro (%)
		[W/mK]	TPS	[W/mK]	GHP
S1	0,175	0,2286	31	0,1840	5
S2		0,2127	22	0,1616	8
S3		0,2324	33	0,1779	2
S4		0,2181	25	0,1888	8
S5		0,2271	30	0,1888	8
S6		0,2335	33	0,1875	7
S7		0,2218	27	0,1728	1
S8		0,2317	32	0,1871	7
méd		0,2279	30	0,1850	7
σ	0,0140		0,0095		

Tabela 25. Comparação entre os resultados da condutividade térmica através do TPS e GHP das placas promatec_200 em T_amb-23°C

	K Fabric	K TPS	Erro (%)	K GHP	Erro (%)
		[W/mK]	TPS	[W/mK]	GHP
S1	0,189	0,2664	41	0,2212	17
S2		0,2592	37	0,2071	10
S3		0,2511	33	0,2149	14
S4		0,2476	31	0,2074	10
S5		0,2479	31	0,2198	16
S6		0,2605	38	0,2116	12
S7		0,2625	39	0,2184	16
S8		0,2555	35	0,2136	13
méd		0,2573	36	0,2138	13
σ	0,0083		0,0069		

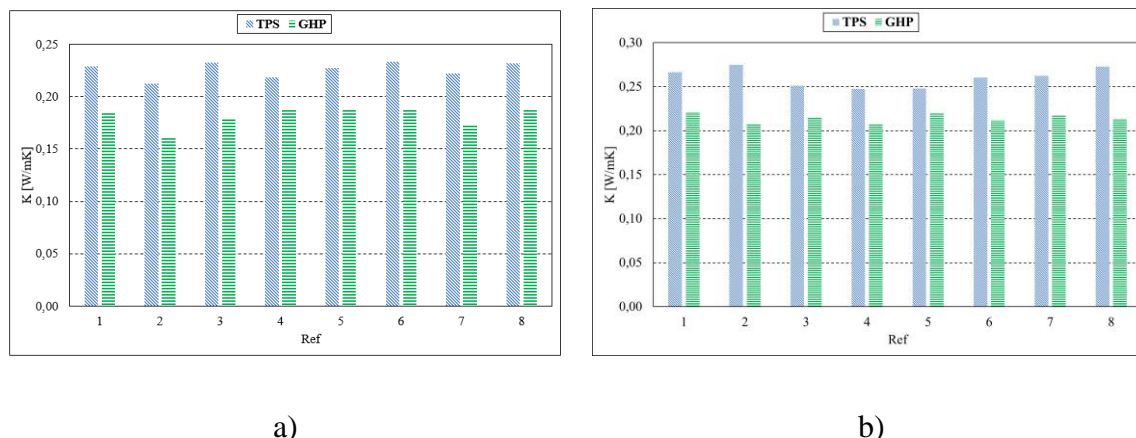


Figura 56. Comparação da condutividade térmica em temperatura ambiente através das técnicas TPS e GHP. a) Promatec_H. b) Promatec_200.

Em conformidade com os resultados mostrados acima percebe-se uma elevada compatibilidade em ambas as técnicas, principalmente em relação ao GHP, cujos resultados se aproximam mais dos valores fornecidos no catálogo técnico utilizado. O GHP apresenta apenas 7% de erro nas placas Promatec_H e 13% nas placas Promatec_200 em relação aos dados do fabricante. Além disso, com base no tratamento estatístico dos dados percebe-se que o conjunto obtido através do GHP possui menores oscilações comparado com o conjunto fornecido pela técnica TPS, pois para ambas as placas os valores do desvio padrão do conjunto é inferior. Outra observação importante é evidenciada nos gráficos acima, pois ao analisar o conjunto de resultados de ambas as técnicas percebe-se uma tendência do TPS em fornecer resultados ligeiramente superiores aos obtidos com o GHP.

Todos os resultados experimentais obtidos através das técnicas empregadas neste trabalho estão representados nas Figura 57 e Figura 58, as quais incluem todos os fatores estudados que interferem no comportamento da condutividade térmica das placas de silicato de cálcio, como a influência da temperatura, a porosidade e o tipo de gás que envolve o material durante o aquecimento das placas. Adicionalmente, utilizou-se os dados experimentais dos testes conduzidos no forno do Hotdisk para gerar polinômios através do ajuste de curva do Excel a fim de representar o comportamento da condutividade térmica em função da temperatura. As Tabela 26 e Tabela 27 fornecem as equações obtidas.

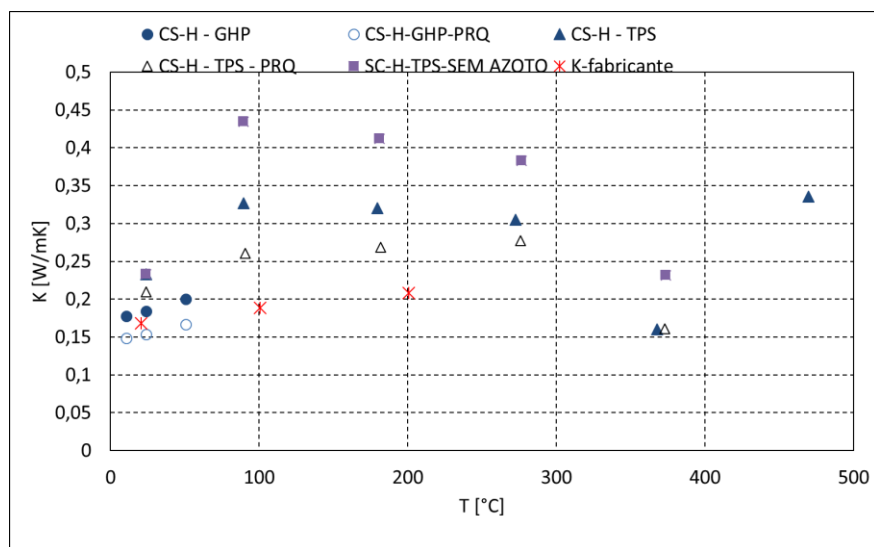


Figura 57. Comparação das técnicas utilizadas neste trabalho para o comportamento da condutividade térmica em função da temperatura para as placas promatec_H.

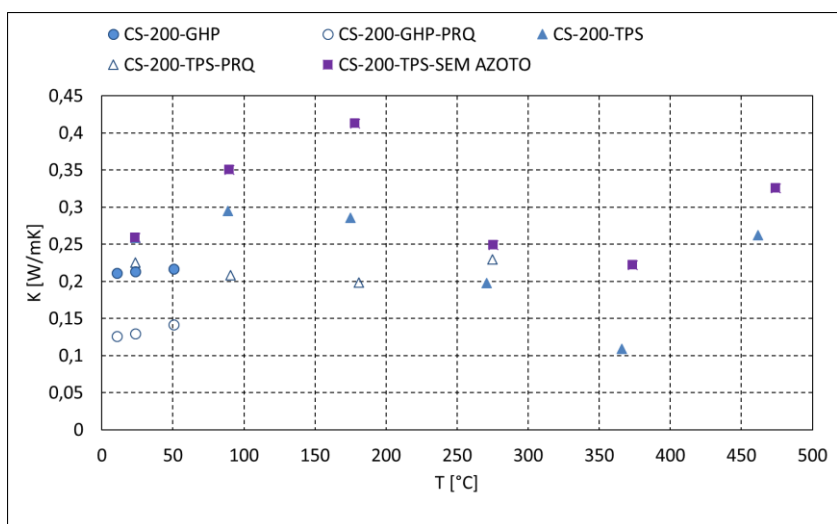


Figura 58. Comparação das técnicas utilizadas neste trabalho para o comportamento da condutividade térmica em função da temperatura para as placas promatec_200.

Tabela 26. Relações matemáticas da condutividade térmica das placas SC_H em elevadas temperaturas.

Condição	Equação	Domínio	R ²
Com azoto	$K(T) = 1x10^{-12}T^5 - 1x10^{-9}T^4 + 4x10^{-7}T^3 - 8x10^{-5}T^2 + 0,0069T + 0,1137$	0<T<500	
Com ar	$K(T) = -3x10^{-10}T^4 + 3x10^{-7}T^3 - 8x10^{-5}T^2 + 0,0092T + 0,0602$	0<T<400	1
Pós reação	$K(T) = -1x10^{-10}T^4 + 8x10^{-8}T^3 - 2x10^{-5}T^2 + 0,0024T + 0,1663$	0<T<300	

Tabela 27. Relações matemáticas da condutividade térmica das placas SC_200 em elevadas temperaturas.

Condição	Equação	Domínio	R ²
Com azoto	$K(T) = 7x10^{-11}T^4 - 4x10^{-8}T^3 + 4x10^{-6}T^2 + 0,0005T + 0,2484$	0<T<500	
Com ar	$K(T) = -1x10^{-12}T^5 + 1x10^{-9}T^4 - 5x10^{-7}T^3 + 8x10^{-5}T^2 - 0,0034T + 0,3009$	0<T<500	1
Pós reação	$K(T) = 6x10^{-9}T^3 - 7x10^{-7}T^2 - 0,0002T + 0,2324$	0<T<300	

A indagação feita anteriormente sobre a possibilidade de haver alguma reação oxidante não foi constatada já que a inclinação das curvas obtidas retrata a mesma tendência oscilatória. Porém, é notório à influência que o gás possui na condutividade térmica efetiva do material, visto que todos os resultados e curvas conseguidas com o uso do ar foram consideravelmente superiores do que os resultados obtidos azoto, validando assim o modelo de condutividade térmica efetiva de (Russell 1935).

Tanto no TPS quanto no GHP fica evidente o decréscimo da condutividade térmica após a desidratação para ambas as placas, este fato também valida os estudos abordados por este trabalho, os quais apontam a redução da condutividade térmica na parcela do sólido e como isto afeta no comportamento da condutividade térmica efetiva dos materiais.

Capítulo 6: Análise inversa do problema de condução de calor

6.1 Introdução

A análise inversa é útil para resolver diversos problemas de engenharia, quando usada em conjunto com o método explícito direto e com medidas experimentais, torna-se possível criar um algoritmo iterativo de otimização. No campo da transferência de calor o método pode ser aplicado para estimar a variação de temperatura, determinar o fluxo de calor ou verificar o comportamento de propriedades térmicas em função da temperatura.

Os cálculos inversos são realizados com base na distribuição de temperatura obtida pelos dados experimentais e pelo método direto, cujo valor da condutividade térmica foi atribuído por uma estimativa inicial. Considerando que exista uma discrepância entre os dois conjuntos de resultados, experimental e analítico, o algoritmo realizará inúmeras interações para minimizar tal diferença. Sabe-se que as leituras experimentais não podem ser alteradas, logo, o algoritmo faz com que o método direto se aproxime do método experimental. Pois, para cada instante de tempo só há um valor da condutividade térmica que satisfaça a lei de Fourier, sendo assim, é necessário atualizar o seu valor no método direto a cada ciclo do algoritmo para conseguir tal aproximação. Portanto o método inverso também é um problema de estimativa, pois pode-se estabelecer um valor inicial de condutividade térmica K e através do processo de otimização encontrar o valor exato de K , [49, 50].

Considerando o cenário descrito pela Figura 59, na qual há um elemento com espessura L onde sensores de temperatura $S_1 \dots S_m$ são posicionados ao longo da espessura para realizar leituras durante a condução transiente. Para $t > 0$ o material é exposto a um fluxo térmico conhecido em $x = 0$, no lado oposto na coordenada $x = L$, tem-se uma superfície adiabática, m sensores são utilizados para extrair as medidas experimentais por

um período de tempo t_f . As leituras experimentais foram definidas como Y_i com $i = 1$ até m e a distribuição de temperatura pelo método direto como $\check{T}_i(\dot{p}_j)$, [50].

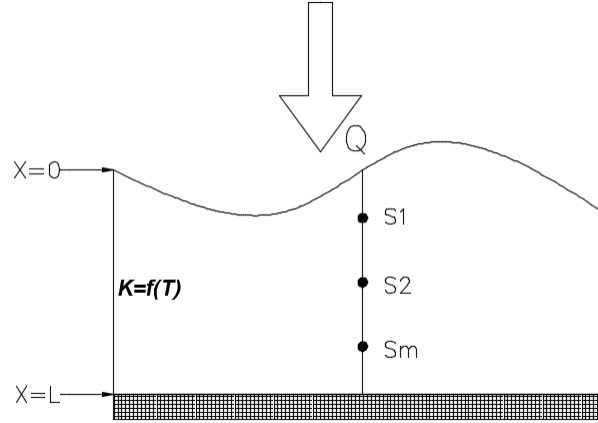


Figura 59. Esquema de análise do método inverso.

O método dos mínimos quadrados é usado para determinar a solução da análise inversa, basicamente a técnica é uma ferramenta matemática que busca encontrar o melhor ajuste entre os conjuntos de dados (experimentais e numérico), minimizando a soma dos quadrados das diferenças como mostra a equação (6.1), [51].

$$S(\dot{p}) = \sum_{i=1}^{\Omega} (Y_i - \check{T}_i(\dot{p}_j))^2, \quad j = 1, 2 \dots m \quad (6.1)$$

Onde, \dot{p}_j representa um vetor com os parâmetros desconhecidos $\dot{p} = (K)^T$.

Para encontrar a solução ótima, a equação (6.1) foi derivada em relação a variável pretendida e igualada a zero, ver (6.2) ou (6.3) para a forma matricial.

$$\frac{\partial S}{\partial \dot{p}_j} = 2 \sum_{i=1}^{\Omega} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{p}_j} \right) (\check{T}_i(\dot{p}_j) - Y_i) = 0, \quad j = 1, 2 \dots m \quad (6.2)$$

$$\frac{\partial S}{\partial \dot{p}} = 2X^T(T - Y) = 0, \quad (6.3)$$

Onde,

$$T = \begin{pmatrix} T_1 \\ T_2 \\ \vdots \\ T_\Omega \end{pmatrix}, \quad Y = \begin{pmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \vdots \\ Y_\Omega \end{pmatrix}, \quad \dot{p} = \begin{pmatrix} \dot{p}_1 \\ \dot{p}_2 \\ \vdots \\ \dot{p}_\Omega \end{pmatrix} \quad (6.4)$$

A matriz de sensibilidade X dos coeficientes é obtida com a diferenciação da temperatura em relação a condutividade térmica para cada ponto medido, ver (6.5), onde os elementos da matriz $X_{ij} = \frac{\partial \check{T}_i}{\partial \dot{p}_j}$, variam em função do número de medições realizadas $i = 1, 2 \dots \Omega$ e do número de sensores utilizados $j = 1, 2 \dots m$.

$$X = \frac{\partial T}{\partial \dot{p}^T} \begin{pmatrix} \frac{\partial \check{T}_1}{\partial \dot{p}_1} & \frac{\partial \check{T}_1}{\partial \dot{p}_2} & \dots & \frac{\partial \check{T}_1}{\partial \dot{p}_m} \\ \frac{\partial \check{T}_2}{\partial \dot{p}_1} & \frac{\partial \check{T}_2}{\partial \dot{p}_2} & \dots & \frac{\partial \check{T}_2}{\partial \dot{p}_m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial \check{T}_\Omega}{\partial \dot{p}_1} & \frac{\partial \check{T}_\Omega}{\partial \dot{p}_2} & \dots & \frac{\partial \check{T}_\Omega}{\partial \dot{p}_m} \end{pmatrix} \quad (6.5)$$

O algoritmo modificado de Levenberg-Marquardt pode ser utilizado para resolver problemas não lineares. Esta solução é uma combinação do método numérico de Newton, que converge rapidamente com uma boa estimativa inicial, e o método de steepest descent, que converge mais lentamente, mas não requer uma boa estimativa inicial, ver (6.6), [51]

$$\dot{p}^{k+1} = \dot{p}^k + (J^T J + \mu_k I)^{-1} J^T (Y - T), \quad (6.6)$$

Onde, \dot{p} representa o vetor dos parâmetros estimados, Y é o vetor de temperatura medida, μ_k é o coeficiente de amortecimento do parâmetro e J é a matriz jacobiana dada por $J \equiv \frac{\partial T}{\partial \dot{p}^T} = X$.

O ciclo do algoritmo vai se repetir até que um dos critérios de convergência seja satisfeito, ver (6.7). Onde, ϵ representa a taxa aceitável de variação.

$$\begin{aligned}
 S^{k+1} &< \epsilon_1 \\
 \frac{|S^{k+1} - S^k|}{S^{k+1}} &< \epsilon_2 \\
 |\dot{p}^{k+1} - \dot{p}^k| &< \epsilon_3
 \end{aligned} \tag{6.7}$$

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

6.2 Método das diferenças finitas

Modelos numéricos de resolução são usados extensivamente nas aplicações práticas de fenómenos térmicos, seja para determinar a distribuição de temperaturas ou o fluxo de calor. Uma técnica comumente empregada para auxiliar na resolução de situações deste tipo é através das diferenças finitas. Neste procedimento, a equação diferencial parcial da condução de calor é aproximada por um conjunto de equações algébricas, onde é possível obter os valores desconhecidos da variável desejada, desde que esteja dentro do domínio discretizado, [52]. A Figura 60 ilustra o processo de transformação do método.

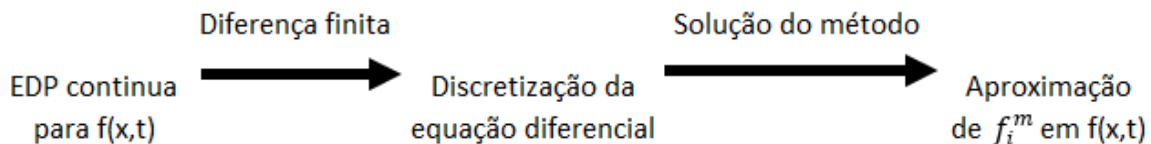


Figura 60. Método das diferenças finitas, [53].

Em seguida ocorre a discretização do domínio, onde a solução do método das diferenças finitas (transformação da EDP) é aproximada por um conjunto finito de x e t . Para o desenvolvimento deste trabalho a discretização de x está no intervalo $0 < x < L$, sendo:

$$x_i = (i - 1)\Delta_x, \quad i = 1, 2, 3 \dots N$$

Onde N é o número total de nós espaciais, incluindo aqueles nas fronteiras, e L a espessura do material. O incremento de x é computado como mostra a equação (6.8).

$$\Delta_x = \frac{L}{N - 1} \quad (6.8)$$

Similarmente, a discretização do tempo t está espaçada entre $0 \leq t \leq t_{max}$, sendo:

$$t_m = (m - 1)\Delta_t, \text{ com } m = 1, 2, 3 \dots M$$

Onde m é o número dos intervalos de tempo que se quer o resultado e Δ_t é a medida deste incremento.

$$\Delta_t = \frac{t_{max}}{M - 1} \quad (6.9)$$

A malha do domínio é ilustrada pela Figura 61, na qual os quadrados pretos indicam os valores iniciais conhecidos, os quadrados brancos representam as condições conhecidas ao longo do eixo do tempo e os círculos brancos indicam as posições no interior do domínio com valores desconhecidos, os quais serão aproximados pela técnica das diferenças finitas.

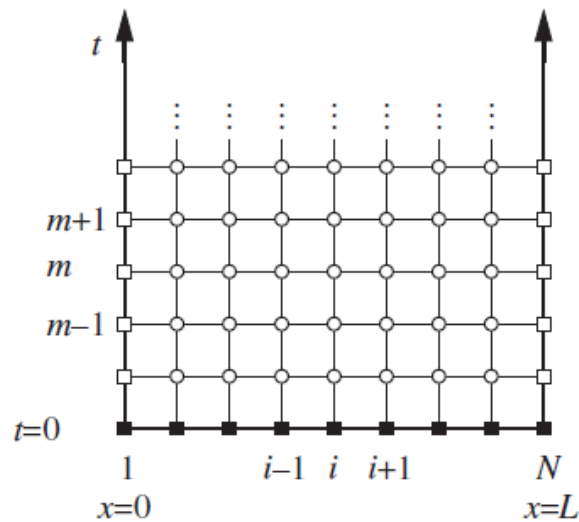


Figura 61. Malha unidimensional das diferenças finitas, [53]

Para atingir resultados satisfatórios é impreterível à aplicação adequada dos parâmetros relevantes ao método, considerando os fenómenos em torno do sistema bem como a seleção correta das equações diferenciais, [51].

As diferenças finitas podem ser uniformes ou não uniformes, dependendo se o espaçamento entre os pontos é ou não constante, ver Figura 62. Segundo Recktenwald, a precisão dos resultados depende da quantidade de pontos no domínio e, de modo geral, quanto maior o número de pontos mais preciso será o resultado, [53].

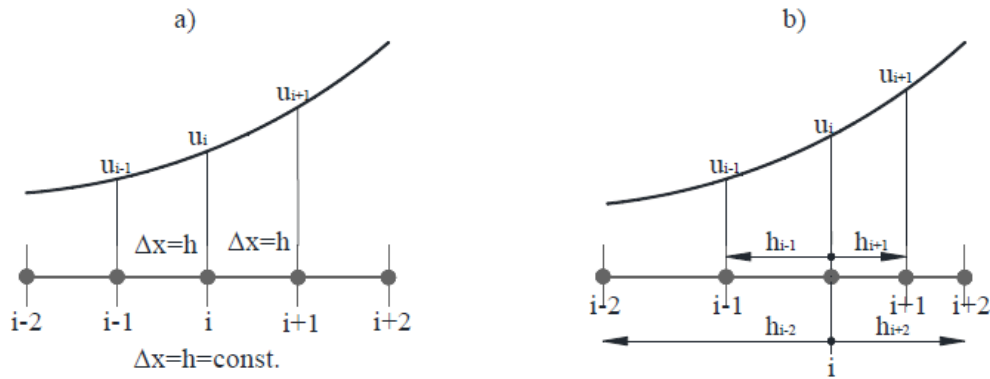


Figura 62. Tipo do espaçamento unidimensional de diferenças finitas. a) Diferenças finitas uniformes. b) Diferenças finitas não uniformes, [7]

O conceito das diferenças finitas é análogo à definição de derivada, a medida que o incremento Δx diminui tem-se uma representação mais precisa da curva gerada pela função, pois a inclinação da reta tangente é calculada em função deste incremento, ver equação(6.10),[51].

$$\frac{dF(x)}{d(x)} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{F(x_0 + \Delta x, y_0) - F(x_0, y_0)}{\Delta x} \quad (6.10)$$

Ao longo dos anos diversos pesquisadores estudaram e desenvolveram soluções distintas através das diferenças finitas, pois, dependendo da natureza do problema ou restrições do fenómeno cabia uma abordagem diferente. As soluções mais conhecidas são: diferença finita à frente, diferença finita anterior e central.

A expansão Taylor pode ser usada para aproximar as derivadas de uma função $f(x)$. Ao expandir a função em relação a (x_i) numa discretização unidimensional uniforme obtém-se a solução para diferença finita à frente, ver (6.11), [7, 51].

$$f(x_i + \Delta x) = f(x_i) + \Delta x \left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{x_i} + \frac{\Delta x^2}{2!} \left. \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} \right|_{x_i} + \frac{\Delta x^3}{3!} \left. \frac{\partial^3 f}{\partial x^3} \right|_{x_i} + \dots \quad (6.11)$$

Resolvendo a equação (6.11) para a primeira derivada no ponto x_i , obtém-se (6.12).

$$f_x(x_i) = \left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{x_i} = \frac{f(x_i + \Delta x) - f(x_i)}{\Delta x} - \frac{\Delta x}{2!} \left. \frac{\partial^2 x}{\partial x^2} \right|_{x_i} - \frac{\Delta x^3}{3!} \left. \frac{\partial^3 x}{\partial x^3} \right|_{x_i} + \dots \quad (6.12)$$

O resultado da equação diferencial acima é denominado de diferença finita a frente. Tal solução é mostrada pela equação (6.13), composta por um erro local de truncamento de primeira ordem, [51].

$$f_x = \frac{f_{i+1} - f_i}{\Delta x} + O(\Delta x) \quad (6.13)$$

O erro de truncamento está associado com o erro acumulado decorrente das aproximações e o seu valor depende do tamanho do espaçamento estabelecido no domínio, em outras palavras, quanto maior o número de nós menor será o espaçamento e consequentemente mais baixo será o erro de truncamento.

A equação relacionada com a diferença finita anterior é obtida de maneira similar, utiliza-se a primeira derivada a fim de aproximar a função para os pontos precedentes porém, com base no valor da função na diferença finita anterior, ver equação (6.14), [51].

$$f_x = \frac{f_i - f_{i-1}}{\Delta x} + O(\Delta x) \quad (6.14)$$

A diferença finita central é conseguida através da manipulação das aproximações de Taylor, para tanto, basta subtrair à equação gerada pela expansão de Taylor para o ponto anterior com relação ao ponto à frente. Neste caso, tem-se a diferença finita central de três pontos e o erro de truncamento é de segunda ordem, ver (6.15), [51].

$$f_x = \frac{f_{i+1} - f_{i-1}}{2\Delta x} + O(\Delta x^2) \quad (6.15)$$

Neste trabalho empregou-se o método das diferenças finitas para resolver um problema térmico, nomeadamente a equação da condução de calor unidimensional para o regime transiente sem geração de energia interna, ver (6.16). A obtenção desta solução é crucial para o desenvolvimento do algoritmo numérico que será mais bem detalhado no decorrer deste capítulo.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{d^2 T(x)}{dx^2} \quad 0 \leq x \leq L \quad , t > 0 \quad (6.16)$$

Sendo necessárias algumas condições de contorno como seguem a seguir:

$$T(x, t) = T_a \quad em \quad x = 0, \quad t > 0 \quad (6.17)$$

$$T(x, t) = T_L \quad em \quad x = L, \quad t > 0 \quad (6.18)$$

$$T(x, t) = F_x \quad para \quad t = 0, \quad (6.19)$$

Necati aproximou a equação transiente da condução aplicando o método das diferenças finitas centrais para a equação diferencial de segunda ordem e, o método das diferenças finitas à frente para a equação diferencial de primeira ordem e assim alcançou a solução, como mostra a equação (6.20), [51].

$$T_i^{m+1} - T_i^m = \alpha \frac{T_{i-1}^m - 2T_i^m + T_{i+1}^m}{\Delta x^2} \quad (6.20)$$

Rearranjando os termos tem-se a solução final do método explícito para a condução transiente, ver (6.21), onde a temperatura no ponto à frente, (T_i^{m+1}) , é determinada em função do nó atual m , com base no instante anterior $(i - 1)$, atual i e posterior $(i + 1)$.

$$T_i^{m+1} = rT_{i-1}^m + (1 - 2r)T_i^m + rT_{i+1}^m \quad (6.21)$$

Sendo, $r = \alpha \Delta t / \Delta x^2$ onde deve estar entre $0 < r \leq 0,5$

com $m = 0,1,2, \dots M$ e $i = 1,2,3 \dots N$.

A equação acima possui grande relevância no algoritmo numérico de otimização da condutividade térmica, sua aplicação em conjunto com outras técnicas de caráter numérico permite extrair o conjunto de resultados teóricos da evolução de temperatura das placas de silicato de cálcio ensaiadas no forno.

6.3 Aplicação do método das linhas para condução

As equações diferenciais parciais (PDEs) são bastante utilizadas para modelar os fenômenos na ciência e engenharia, isso ocorre devido a ampla dependência tridimensional espacial aliado com a variação do tempo, [54].

O método das linhas (MOL) é um procedimento numérico capaz de resolver problemas de valor inicial das (PDEs). Usualmente são necessárias duas etapas para implementar a técnica: primeiramente deve-se realizar a discretização espacial, onde o método das diferenças finitas pode ser utilizado para aproximar as derivadas e ao mesmo tempo transforma o sistema de (PDEs) em um conjunto de equações diferenciais ordinárias (EDOs). A segunda etapa consiste em integrar as equações em relação ao tempo das (EDOs). Normalmente os problemas envolvendo (PDEs) possuem a forma (6.22), sendo que ao lado direito da equação não pode haver nenhuma dependência do tempo, [7, 54].

$$u_t(x, t) = f(x, t, u(x, t), u_x(x, t), u_{xx}(x, t), \dots), \quad x_L \leq x \leq x_R, \quad t > 0 \quad (6.22)$$

A equação do método explícito referente à condução transiente (equação. (6.21)), obtida através das diferenças finitas, satisfaz a condição de aplicação do método das linhas pois somente considera-se a variação da temperatura ao longo do domínio espacial.

O esquema upwind é um método de discretização numérica usado para resolver (PDEs). A técnica consiste em usar o método das diferenças finitas adaptativa a fim de simular numericamente a fim de encontrar a direção e propagação de um campo de fluxo. Segundo Wouwer, a condição inicial $u_t(x, 0) = u_0(x)$, em $x_0 \leq x \leq x_L$ e $t = 0$ deve ser especificada para o número de pontos (N) da malha, além disto, os pontos fictícios que estão fora do domínio (u_0) e (u_{N+1}) também devem ser incluídos nas EDOs para $i = 1$ e $i = N$, fato que dificulta a implementação computacional do Matlab, [51].

Como alternativa, Wouwer desenvolveu um método para eliminar a inserção dos pontos fictícios, com isso o autor obteve aproximações por diferenças finitas para o primeiro e último nó, porém como pode ser observado em (6.23) e (6.24), as equações não são mais baseadas por diferenças finitas centrais, o que facilita na implementação do software Matlab. Assim, para o nó inicial são considerados os nós posteriores ($i2$ e $i3$) e para o último nó iN somente os nós precedentes são considerados ($iN - 1$ e $iN - 2$), [55].

$$\left. \frac{dT(x)}{dx} \right|_{i1} \cong \frac{-3T_{i1} + 4T_{i2} - T_{i3}}{2\Delta x} + O(\Delta x^2) \quad (6.23)$$

$$\left. \frac{dT(x)}{dx} \right|_{iN} \cong \frac{3T_{iN} - 4T_{(iN-1)} - T_{(iN-2)}}{2\Delta x} + O(\Delta x^2) \quad (6.24)$$

Segundo Mesquita, para realizar a implementação computacional das derivadas espaciais é necessário recorrer ao conceito da matriz de diferenciação (D_1), cujos coeficientes são determinados pela atribuição de pesos pontuais para cada aproximação. Com isso, as derivadas são calculadas numericamente através da operação matricial, onde a ordem da aproximação depende dos coeficientes da matriz,[7]. A matriz de diferenciação pode ser aplicada de duas maneiras. A primeira consiste em determinar a segunda derivada através de uma nova matriz (D_2), cujos coeficientes são baseados nas equações da segunda derivada, ou seja: $\frac{du}{dx} = \frac{d}{dx} \cdot u = D_1 \cdot u$ então $\frac{d}{dx} \left(\frac{du}{dx} \right) = D_2 \cdot u$

A diferenciação sucessiva é outra forma para calcular as derivadas de ordem superior, que utiliza como base consecutivamente a matriz (D_1), isto é: $u_x = D_1 \cdot u$, $u_{xx} = D_1 \cdot u_x = D_1(D_1 \cdot u)$ e assim sucessivamente, [7].

Com base nas diferenças finitas centrais e nas modificações de Wouwer, tem-se a matriz de diferenciação D_1 (6.25), onde a primeira e última linha são distintas do resto da matriz devido a necessidade de excluir os pontos fictícios da análise e das condições iniciais. Portanto para resolver a equação diferencial do calor, a técnica de diferenciação sucessiva pode ser usada como mostra (6.26),[7].

$$u_x = D_1 u = \frac{1}{2\Delta x} \begin{pmatrix} -3 & 4 & -1 & 0 & \dots & \dots & 0 \\ -1 & 0 & 1 & 0 & \dots & \dots & 0 \\ 0 & \dots & -1 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ 0 & \dots & -1 & 0 & -1 & 0 & 1 \\ 0 & \dots & \dots & 0 & 1 & -4 & 3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \dots \\ u_i \\ u_{N-1} \\ u_N \end{pmatrix} \quad (6.25)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} = \left(K_s \frac{\partial T}{\partial x} \right) \cong D_1 (K_s (D_1 T)) \quad (6.26)$$

6.4 Implementação do algoritmo modificado de Levenberg-Maquardt

O método de Levenberg-Maquardt foi usado para analisar numericamente a condutividade térmica das placas de silicato de cálcio. O objetivo consiste na criação de um modelo matemático através de um algoritmo de otimização que seja capaz de representar o comportamento da condutividade térmica em função da temperatura.

Várias técnicas de caráter numérico foram utilizadas em conjunto para criação do algoritmo. A discretização espacial através das diferenças finitas centrais foi utilizada para gerar o domínio de pontos ao longo da espessura das placas de silicato de cálcio. A distribuição de temperatura teórica foi obtida através da técnica do método direto e método das linhas, cujos valores foram calculados por meio das matrizes de diferenciação. Já a análise inversa de transferência de calor teve a função de minimizar a diferença entre a distribuição de temperatura teórica e real, para isto, o algoritmo realiza inúmeras iterações nas quais os valores da condutividade térmica são atualizados no método teórico fazendo com que a curva de temperatura teórica se aproxime o quanto se queira da curva real.

Do ponto de vista experimental, as curvas reais foram obtidas através de um forno de resistência ao fogo, onde as amostras de silicato de cálcio foram submetidas à curva de incendio padrão ISO 834. Todas as considerações e condições inseridas no código no Matlab referente aos experimentos estão descritas com mais detalhe no capítulo anterior. A Figura 63 ilustra o funcionamento do modelo de otimização.

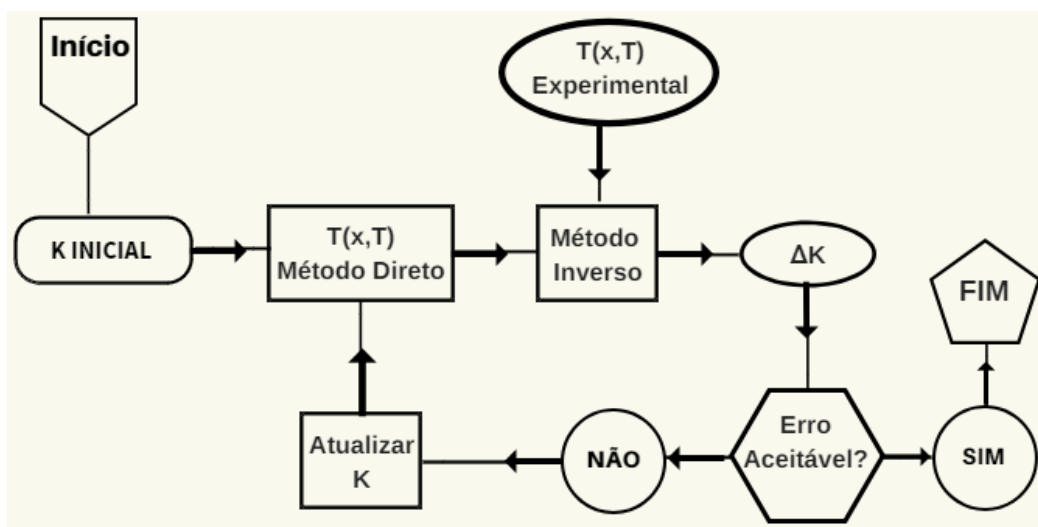


Figura 63. Fluxograma do algoritmo numérico.

Inicialmente, atribui-se uma estimativa inicial para a condutividade térmica das placas de silicato de cálcio, onde os valores do fabricante ou os resultados experimentais do GHP ou TPS podem ser utilizados. Em seguida, o método direto é encarregado de fornecer uma distribuição de temperatura teórica em função do tempo, assim, o algoritmo modificado de Levenberg-Marquardt realizará comparações entre a distribuição de temperatura real e teórica até encontrar um valor ótimo de convergência da propriedade térmica desejada.

Uma consideração impreterível no algoritmo da condutividade térmica está relacionada com a incorporação dos fenómenos pertinentes durante o aquecimento, nomeadamente os efeitos do processo de desidratação e da variação do calor específico, o qual tem relação direta com os picos de entalpia requerida para proceder com as reações térmicas. Deste modo, tais considerações foram atribuídas no modelamento do programa. Ambos fenómenos foram investigados em [20] e os resultados deste trabalho foram utilizados como base para desenvolver uma regressão linear a fim de criar uma função que represente a desidratação do silicato de cálcio, a ferramenta Cftool do Matlab foi usada para tal finalidade. O polinómio que obteve o melhor ajuste tem a ordem de 4º, o qual tem um coeficiente de ajuste $R^2 = 0,994$ e está representada na equação (6.27). A Figura 64 representa o comportamento da variação da massa inicial em função da temperatura.

$$m_{fit} = 2,12e^{-13}x^4 - 6,65e^{-10}x^3 + 5,17e^{-7}x^2 - 0,000205x + 1,008 \quad (6.27)$$

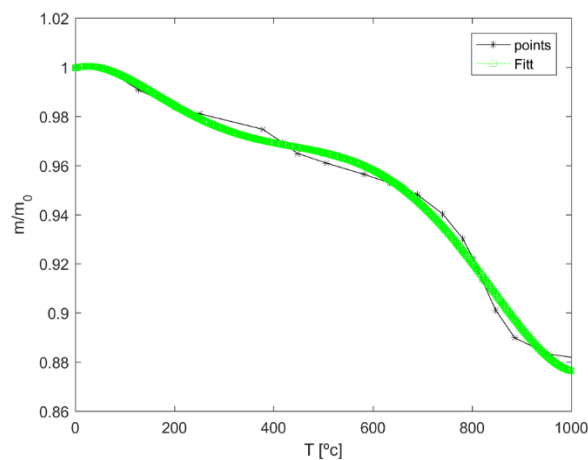


Figura 64. Ajuste para desidratação da placa de silicato de cálcio através do Matlab.

No entanto, o processo de desidratação ocorre em intervalos distintos de temperatura e, para computar precisamente a influência que este fenómeno representa na condutividade térmica é necessário respeitar a ordem das reações bem como a taxa de perda de massa em suas respectivas temperaturas. A Tabela 28 fornece a taxa real de desidratação em cada reação térmica bem como o valor da entalpia que foram considerados na implementação do modelo numérico.

Tabela 28. Variação da massa e entalpia para as reações térmicas das placas de SC,[20].

Reação	Temperatura [° C]	Perda de Massa [%]	Entalpia [KJ/Kg]	Δm total [%]
Evaporação da água livre	25 to 100	9	2330	
Primeira fase de desidratação (Hidrato)	100 to 200	23,5	1440	12
Segunda fase de desidratação (Hidróxido)	400 to 600	21,5	5660	
Descarbonatação	600 to 1000	46	3890	

Assim, conforme os dados acima para primeira reação foi considerada a relação entre a humidade de cada material e a variação total de desidratação, uma vez que toda água livre das placas evapora por volta dos 100 [°C], as demais reações foram computadas levando em consideração as taxas mencionadas acima em relação a desidratação total do material. Ademais, para determinar a curva numérica do aumento de temperatura, também foram consideradas as reações endotérmicas decorrente do aquecimento das placas, para tal implementação, levou-se em consideração a variação das entalpias em função da desidratação total conforme a tabela acima.

A medida que ocorre o aumento da temperatura nas placas de silicato de cálcio a parcela da radiação nos poros do material se intensifica, resultando no aumento da condutividade térmica efetiva. Com base nos dados experimentais do Hotdisk e levantamento de pesquisas sobre o material, adotou-se como modelo base um polinómio de segunda ordem para representar a variação da condutividade térmica em função da temperatura, como mostra a equação (6.28).

$$K(T) = K_0 + K_1(T) + K_2(T^2) \quad (6.28)$$

Sendo K_0, K_1, K_2 e K_3 constantes, cujos valores serão encontrados através do algoritmo numérico de otimização.

Após a execução da rotina do Matlab, o algoritmo de otimização encontrou valores otimizados dos coeficientes das equações que correspondem ao comportamento da condutividade térmica das placas de SC durante a evolução de temperatura perante a curva padrão de incêndio. A equação (6.29) representa o polinómio obtido para a placa Promatec_200, enquanto à equação (6.30) está relacionada com a placa Promatec_H. Com o intuito de comparar as abordagens adotadas neste trabalho criou-se um gráfico que contempla os resultados do comportamento da condutividade térmica obtidos através da análise numérica, da abordagem trazida ao longo da norma EN13381-8 e dos resultados experimentais do Hotdisk. As Figura 65 e Figura 66 representam respetivamente, a oscilação da condutividade térmica das placas Promatec_200 e Promatec_H referente a cada metodologia, onde é possível observar uma variação mais moderada do desempenho da condutividade térmica dos modelos conseguidos através da abordagem do Eurocódigo e da análise numérica em comparação com os valores experimentais.

$$K(T)_{200} = 0,20 - 3,9 * 10^{-4}(T) + 2,29 * 10^{-7}(T^2) \quad (6.29)$$

$$K(T)_H = 0,299 - 0,00046(T) + 2,23 * 10^{-7}(T^2) \quad (6.30)$$

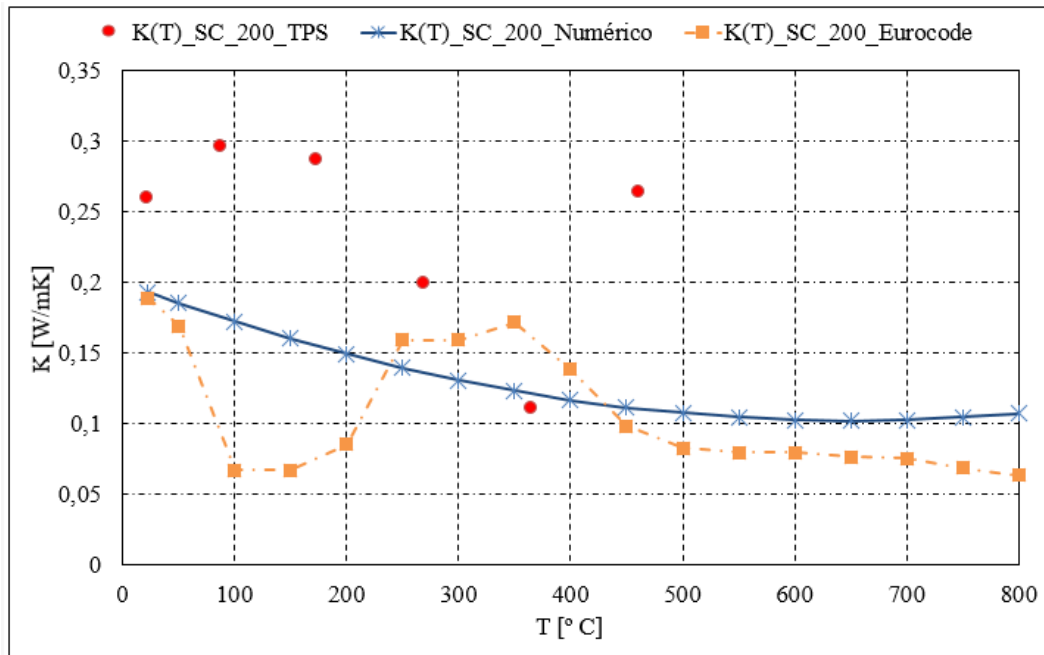


Figura 65. Comparação das metodologias abordadas acerca da variação da condutividade térmica em função da temperatura das placas Promatec_200.

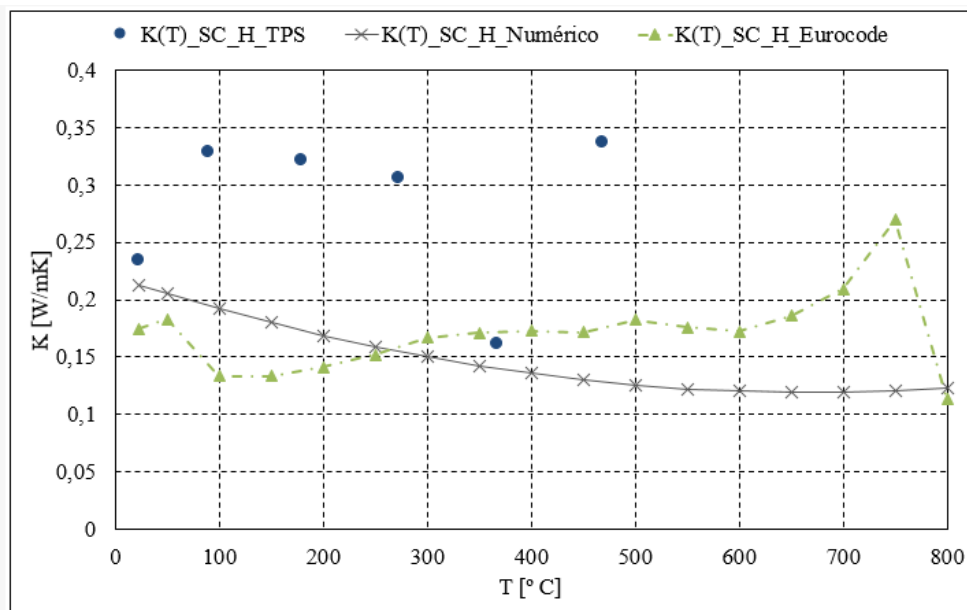


Figura 66. Comparação das metodologias abordadas acerca da variação da condutividade térmica em função da temperatura das placas Promatec_H.

Os resultados acima ilustram o comportamento da condutividade térmica através de todas abordagens, nos gráficos percebe-se valores superiores na condutividade térmica obtida através da metodologia experimental, que pode ser explicado pelo maior tempo que as amostras foram submetidas à elevadas temperaturas, pois neste método foi necessário garantir o equilíbrio térmico. Já as metodologias através do eurocode e numérica apresentam certa compatibilidade, pois em ambos os casos utilizou-se a mesma curva acerca da evolução da temperatura. Pode-se dizer que os resultados numéricos pudessem se aproximar mais do método do Eurocódigo se fosse utilizados outros modelos matemáticos para avaliar o comportamento da condutividade térmica.

Em seguida fez-se uma comparação entre a evolução da temperatura experimental, provida pelo forno de resistência e numérica, obtida através do algoritmo de Levenberg-Maquardt. Para tanto, foi necessário atualizar o método numérico direto com o polinómio otimizado da condutividade térmica em função da temperatura, assim, o valor desta propriedade é corrigido simultaneamente a medida que ocorre o aquecimento da placa. A Figura 67 representa a curva real e numérica referente ao sensor posicionado ao meio da placa Promatec_200 e a Figura 68 da placa Promatec_H. O sensor do meio foi escolhido devido ao fato de representar a variação média da temperatura na placa, pois o modelo numérico explora apenas a influência no domínio da temperatura, não levando em consideração a variação da condutividade térmica ao longo da espessura do material.

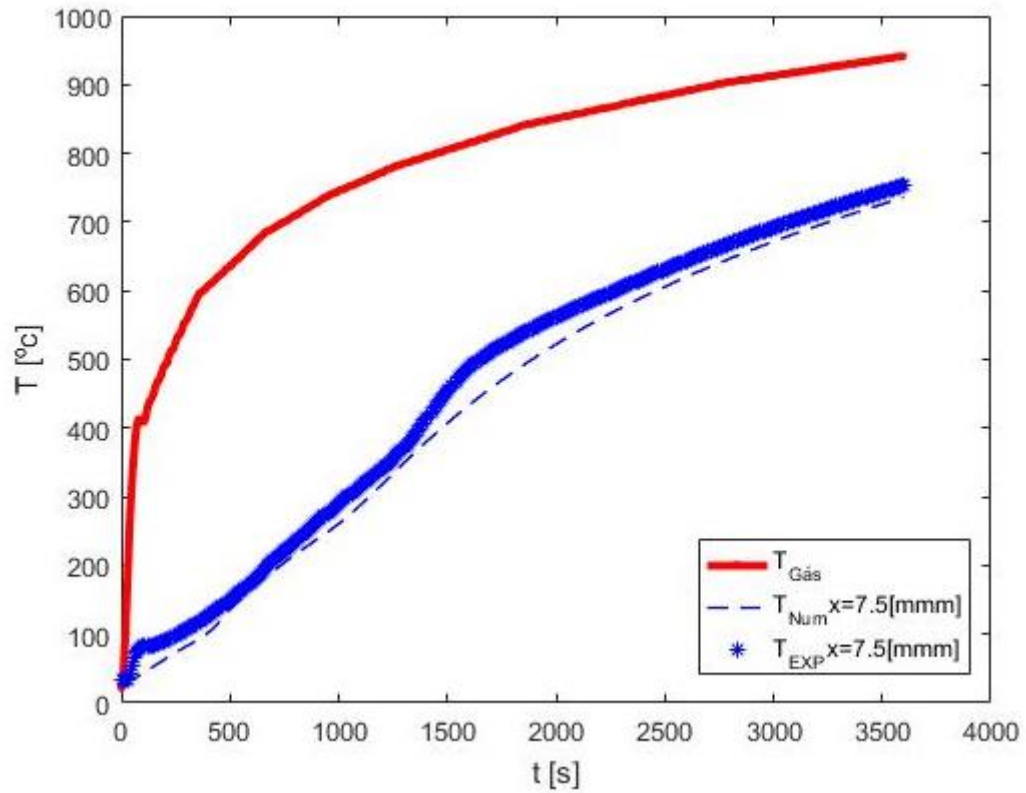


Figura 67. Evolução da temperatura real e numérica da placa Promatec_200.

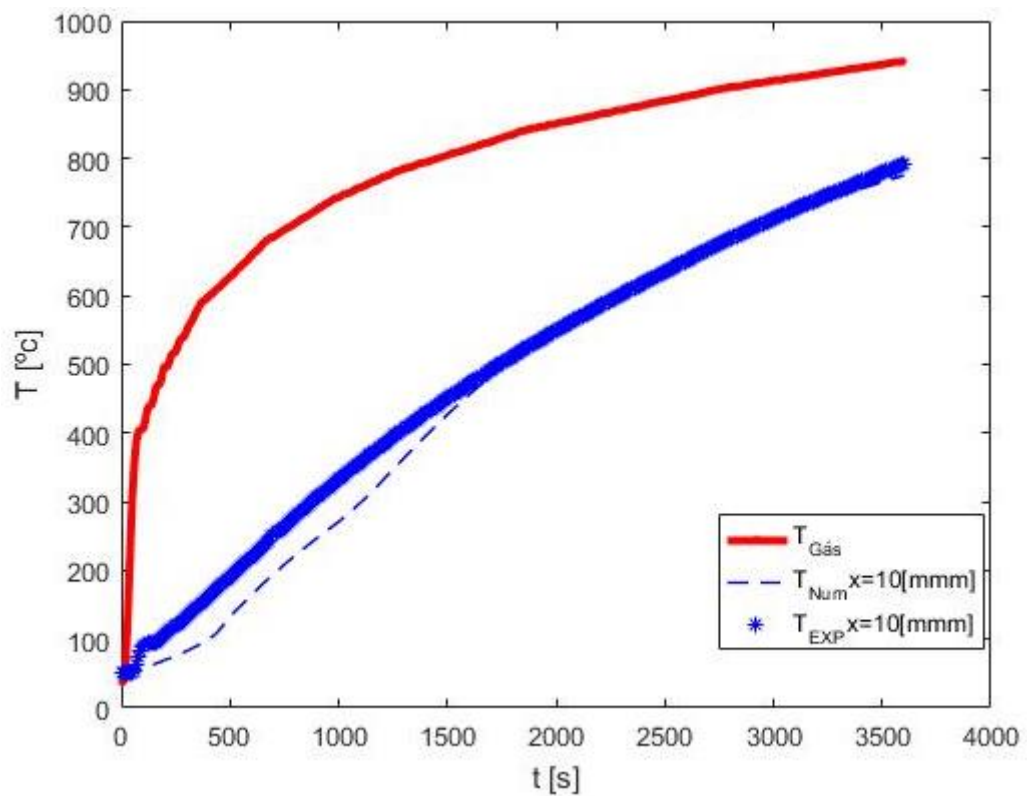


Figura 68. Evolução da temperatura real e numérica da placa Promatec_H.

As figuras acima reproduzem os resultados acerca da análise numérica da variação da condutividade térmica em função da temperatura. Contudo, no decorrer deste trabalho averiguou-se que a condutividade térmica não depende somente da temperatura, há diversos fatores que não foram considerados nos modelos alcançados nesta abordagem numérica, como por exemplo a porosidade, a humidade e eventuais reações termoquímicas. Esse fato evidencia que os resultados ilustrados acima podem ser aprimorados e sobretudo, incide na importância e necessidade de conduzir mais pesquisas e experimentos neste aspeto, principalmente aos termos que apresentam mais relevância na sensibilidade no modelo numérico.

Por fim, o comportamento analisado revela que a condutividade térmica tem bastante significância na evolução da temperatura, pois ao longo das simulações numéricas percebeu-se uma tendência distinta na forma que ocorre o aquecimento das placas para cada modelo de condutividade térmica escolhido, portanto, conclui-se que é necessário considerar a variação da condutividade térmica dos materiais de proteção nos projetos de segurança contra incêndio.

Capítulo 7: Conclusões e trabalhos futuros

7.1 Conclusões gerais

Na presente dissertação foram analisados diversos aspetos acerca dos incêndios, que de uma forma ou de outra, afetam o comportamento dos materiais de proteção passiva podendo prejudicar a sua integridade e eficácia.

Em virtude dos danos que os incêndios podem causar, tanto a pessoas quanto aos bens materiais, a verificação de segurança nos projetos de engenharia civil tem-se tornado cada vez mais exigente e frequentemente requerida pelos órgãos regulamentadores. Com isso, os engenheiros ao realizar o dimensionamento das estruturas das edificações estão adotando sistemas de proteção passiva para promover maior resistência ao fogo, pois estes sistemas são muito eficientes no combate contra incêndios nos edifícios.

Tendo em vista a importância da aplicação dos materiais de proteção contra o fogo aliado com a magnitude que a condutividade térmica possui nos fenómenos de transferência de calor, neste trabalho, objetivou-se demonstrar que esta propriedade térmica é bastante influenciada com o aumento da temperatura. Para este fim, utilizou-se dois tipos de placa de silicato de cálcio que foram testadas através de duas técnicas experimentais, TPS e GHP. Adicionalmente, foi criado um modelo numérico baseado no método direto e na análise inversa da transferência de calor para encontrar uma equação que represente o comportamento da condutividade térmica em função da temperatura.

No que diz respeito aos materiais utilizados, as placas Promatec_200 demonstraram possuir maior potencial de reação ao fogo comparada com a Promatec_H, tal afirmação é feita com base nos dados da condutividade térmica analisados após às reações térmicas, nos quais mostram uma queda superior à 50% do valor inicial da propriedade. Ademais, percebeu-se em ambas as técnicas uma tendência mais estável com relação à variação da condutividade térmica nas placas Promatec_H, pois as curvas experimentais geradas através dos resultados fornecidos revelam maior paridade entre os dados obtidos antes e após as reações térmicas.

Outra observação relevante em relação aos materiais foi constatada após as duas placas terem sido expostas à curva padrão de incêndio no forno de resistência. Pois, as placas Promatec_200 apresentaram fortes sinais de degradação e fragilidade, inclusive

havia elevado grau de distorção física e pequenas áreas fissuradas enquanto as placas Promatec_H apresentava apenas sinais de desidratação sem nenhum dano aparente em relação a resistência mecânica, deste modo, conclui-se que as placas Promatec_H exprimiram maior confiabilidade no quesito de equilíbrio e firmeza, uma vez que, os materiais de proteção devem ser capazes de acompanhar o deslocamento da estrutura em função da dilatação térmica do aço, sem que haja desprendimento ou fissuras.

As duas técnicas abordadas neste trabalho são bastante eficientes e mostraram elevada concordância nos resultados obtidos, a diferença entre os resultados fornecidos pelo GHP e o TPS em temperatura ambiente é pequena, porém, para efeitos de comparação o GHP apresenta resultados que se aproximam mais dos valores fornecidos pelo fabricante. Ademais, o GHP se mostrou ser mais estável no fornecimento dos resultados, pois apresenta menores oscilações e conseqüentemente menores valores de desvio padrão. No tocante às características das técnicas, observou-se uma tendência do TPS em fornecer resultados ligeiramente superiores comparados com à técnica GHP.

Ainda sobre a técnica TPS, houve certa dificuldade em realizar experimentos em altas temperaturas devido a durabilidade limitada dos sensores revestidos com Mika, pois a degradação nestes ocorrem rapidamente devido as condições extremas em que operam. Devido a este fato, o GHP apresenta maior viabilidade acerca da eficiência na medição, pois os sensores utilizados no TPS possuem elevado custo e pouco tempo de vida útil, limitando assim, a quantidade de experimentos por sensor, logo, apresenta maior custo operacional.

Com base nos resultados obtidos é possível concluir que a condutividade térmica das placas de silicato de cálcio possui elevada dependência com a temperatura, mediante as duas técnicas foi possível observar que o seu valor oscila conforme a temperatura e o tipo de reação química. Tal variação foi melhor observada através do TPS, devido ao maior alcance de temperatura, com esta técnica houve um aumento significativo de 32% na condutividade térmica das placas do tipo H e 12% nas placas do tipo 200, evidenciando a necessidade de contabilizar essa variação nos projetos estruturais para não expor a estrutura a falhas.

A influência que a porosidade causa na condutividade térmica das placas de silicato de cálcio também foi analisada em decorrência da desidratação, pois conforme o processo de evaporação transcorre, há um aumento significativo no tamanho e quantidade de poros no material, causando um impacto direto na condutividade térmica efetiva. Deste modo, em concordância com os resultados concluiu-se que, quanto maior a quantidade de poros menor é a condutividade térmica efetiva do material. Diante desta mesma concepção foi possível observar os efeitos combinados de contribuição da parcela de radiação e da parcela da desidratação do material sobre a condutividade térmica efetiva, pois os resultados observados dessa propriedade obtida com as placas inseridas em um ambiente a ar foram superiores àquelas obtidas com azoto, esse fato convalida o modelo de (Russell 1935), que considera a condutividade térmica do gás na parcela de radiação e, a condutividade térmica do ar é superior do que a condutividade térmica do azoto, conseqüentemente, a condutividade térmica efetiva é superior com o uso do ar.

As comparações realizadas entre os resultados numéricos e experimentais a nível da evolução da temperatura das placas de silicato de cálcio através do modelo de otimização são satisfatórias e sobretudo enfatiza que a condutividade térmica dos materiais de proteção não deve ser considerada como um valor constante nos projetos estruturais, pois ao longo das simulações numéricas tal propriedade se mostrou muito relevante no tocante a evolução da temperatura durante o aquecimento do material. Portanto, para se alcançar projetos estruturais mais eficientes aliado com menor risco às estruturas é imprescindível considerar os efeitos da temperatura na condutividade térmica e nas demais propriedades dos materiais de proteção passiva.

7.2 Linhas futuras de investigação

O estudo realizado neste trabalho compreendeu a caracterização da condutividade térmica em função da temperatura de dois tipos de placas de silicato de cálcio, como complemento o efeito da porosidade após as reações térmicas também foi averiguado bem como a influência do gás na parcela de radiação da condutividade térmica.

No entanto, a condutividade térmica dos materiais de isolamento não depende apenas da temperatura, densidade e humidade existem outros fatores que precisam ser melhor explorados, como a anisotropia, estrutura molecular e demais reações termoquímicas que ocorrem durante o aquecimento do material.

Uma investigação sobre a porosidade do material pode ser conduzida com base nos dados experimentais da condutividade térmica efetiva dos materiais, para isso, pode-se realizar uma abordagem análoga ao trabalho atual, utilizando o modelo de Russel em conjunto com o método direto e a análise inversa de transferência de calor para verificar o comportamento da porosidade em função do aumento da temperatura.

Com relação a abordagem numérica é necessário incluir alguns aspetos relevantes a sensibilidade da condutividade térmica bem como considerar a oscilação desta propriedade ao longo da espessura do material. Além disso, o modelo otimizado neste trabalho diz respeito à uma função polinomial de segunda ordem, sendo assim, nas próximas pesquisas deve-se considerar outros modelos a fim de refinar o ajuste do método de otimização.

A mesma linha de investigação pode ser utilizada para conduzir pesquisas através de outros materiais de proteção passiva, como as tintas intumescentes, as argamassas projetáveis ou outros tipos de materiais de isolamento.

Referências

1. Gerken, A.L.d.R., *Materiais de proteção térmica para sistemas construtivos de baixo custo estruturados em aço*, in *Engenharia mecânica*. 2007, Universidade federal de Minas Gerais: Belo Horizonte.
2. N.N. Brushlinky, M.A., S.V Sokolov, P. Wagner, *World fire statistics* Information bulletin of the world fire statistics centre, report № 22 of centre of fire statistics of CTIF, 2017.
3. Brushlinsky, N.N., et al, *World fire statistics - information bulletin of the world fire statistics centre, report № 10 of centre of fire statistics of CTIF, P.B.* 2005, Woodrow, the geneva association ontario: Canada.
4. Pastureau, N., *Flire protection material*, U.S. Patent, Editor. 1991, Aerospatiale society national industrielle, Paris, France: France.
5. Yong Wang, I.B., Frantisek Wald, Martin Gillie, *Performance-based fire engineering of structures*, C.P.T.F. group, Editor. 2013.
6. Corus, *Fire resistance of steel framed buildings*. Corus Construction & Industrial, 2001.
7. Mesquita, L.M.R.d., *Estudo experimental e numérico do comportamento de um material intumescente na proteção passiva de elementos estruturais submetidos a incêndios*, in *Engenharia mecânica*. 2015, Faculdade de engenharia da universidade do Porto: Porto.
8. Lewis, K.R., *Fire design of steel members*, F.E.R. Report, Editor. March 2000, University of Canterbury: Canterbury.
9. Kolaitis, D.I. and M.A. Founti, *Development of a solid reaction kinetics gypsum dehydration model appropriate for CFD simulation of gypsum plasterboard wall assemblies exposed to fire*. Fire safety journal, 2013. **58**(Supplement C): p. 151-159.
10. Ghazi Wakili, K., et al., *Gypsum board in fire - Modeling and experimental validation*. Journal of fire sciences, 2007. **25**(3): p. 267-282.
11. Meline, Y.L., C. Nguyen, K. S. Daignebonne, C. Guillou, O. Freslon, S., *One-dimensional-time study of the dehydration of plasterboards under standard fire condition (ISO 834): thermo-chemical analysis*. Journal of fire sciences, 2011. **29**(4): p. 299-316.

12. Thomas, G., *Thermal properties of gypsum plasterboard at high temperatures*. Fire and materials, 2002. **26**(1): p. 37-45.
13. Kontogeorgos, D. and M. Founti, *Numerical investigation of simultaneous heat and mass transfer mechanisms occurring in a gypsum board exposed to fire conditions*. Applied thermal engineering, 2010. **30**(11): p. 1461-1469.
14. Kontogeorgos, D., et al., *Heat and moisture transfer through a steel stud gypsum board assembly exposed to fire*. Construction and building materials, 2012. **26**(1): p. 746-754.
15. D. J. Hopkin, et al., *A numerical study of gypsum plasterboard behaviour under standard and natural fire conditions*. Fire and materials, 2011.
16. K. Guazi Wakili, E.H., *Four types of gypsum plaster boards and their thermophysical properties under fire condition*. Journal of fire sciences, 2009.
17. Rahmanian, Y.W., *Thermal conductivity of gypsum at high temperatures*. Acta polytechnica, 2009.
18. Kontogeorgos, D., I. Mandilaras, and M. Founti, *Scrutinizing gypsum board thermal performance at dehydration temperatures*. Journal of fire sciences, 2011. **29**(2): p. 111-130.
19. Silva, L.D.P.d., *Sistemas de proteção ao fogo de elementos de betão reforçados com CFRP*, in *Engenharia da Construção*. 2016, Instituto Politécnico de Bragança: Bragança.
20. Dale P. Bentz, K.R.P., *Thermal performance of fire resistive materials. Characterization with respect to thermal performance models*. 2007, Gaithersburg.
21. Salmon, D., *Thermal conductivity of insulations using guarded hot plates, including recent developments and sources of reference materials*. Measurement science and technology, 2001.
22. Chi T. Do, D.P.B., and Paul E. Stutzman, *Microstructure and thermal conductivity of hydrated calcium silicate board materials*. Journal of building physics, 2007.
23. Omrane, A., et al., *Intumescent coating surface temperature measurement in a cone calorimeter using laser-induced phosphorescence*. Fire safety journal, 2007. **42**(1): p. 68-74.
24. Pinto, T.M.C.G., *Estudo de tintas intumescentes na protecção de elementos estruturais em condições de incêndio*, in *Engenharia Industrial*. 2008, Instituto politécnico de Bragança: Bragança.
25. L. M. R. Mesquita, P.A.G.P., M. A. P. Vaz, T. M. G. Pinto, *Decomposition of intumescent coatings: comparison between a numerical method and experimental results*. Application of structural fire design, 2009.
26. Wang, H.-B., *Heat transfer analysis of components exposed to fire*, in *Department of civil engineering and construction*. 1995, University of Salford: Manchester.
27. Di Blasi, C., *Transition between regimes in the degradation of thermoplastic polymers*. Polymer degradation and stability, 1999. **64**(3): p. 359-367.
28. Di Blasi, C., *Modeling the effects of high radiative heat fluxes on intumescent material decomposition*. Journal of analytical and applied pyrolysis, 2004. **71**(2): p. 721-737.

-
29. CEN, *Eurocode 3 EN 1993-1-2*, in *Design of steel structures - Part 1-2: general rules - Structural fire design*. 2005.
 30. Mesquita, L.M.R. and P.A.G.V. ; Piloto, M.A.P. 3; Vila Real, P.M.M. 4; Ramos, F., *Comportamento de vigas em aço protegidas com tinta intumescente*, in *Congresso de construção mecânica*. 2005.
 31. Kodur, V.K.R. and A.M. Shakya, *Effect of temperature on thermal properties of spray applied fire resistive materials*. Fire safety journal, 2013. **61**: p. 314-323.
 32. Mesquita, L.M.R.d., *Instabilidade termo-mecânica de vigas submetidas a temperaturas elevadas. Estudo numérico e experimental*, in *Construções mecânicas*. 2004, Universidade do Porto: Porto.
 33. Kaitila, O., *Cold formed steel structures in fire conditions*, in *Seminar on Steel Structures*. 2000: Helsinki university of technology,.
 34. Arthur Ribeiro Melão and V.P. Silva, *Equivalência entre incêndio-padrão e curvas paramétricas aplicados a estruturas de aço*. Associação brasileira de construção mecânica, 2014.
 35. Frank P. Incropera, D.P.D., *Fundamentos de transferência de calor e de massa*. 4 ed, ed. LTC. 1981.
 36. J. R. Mehaffey, P. Cuerrier, and G. Carisse, *A model for predicting heat transfer through gypsum-board/wood-stud walls exposed to fire*. Fire and materials 1994.
 37. Pinheiro, S.J.C., *Estudo das propriedades mecânicas e térmicas a altas temperaturas do aço enformado a frio S280GD+Z*, in *Engenharia Civil*. 2015, Universidade de Coimbra: Coimbra.
 38. insulation, P.-H.p., *Calcium silicate insulation*, Promat, Editor. 200-.
 39. Almanza, O., M.A. Rodríguez-Pérez, and J.A. De Saja, *Applicability of the transient plane source method to measure the thermal conductivity of low-density polyethylene foams*. Journal of polymer science part B: polymer physics, 2004. **42**(7): p. 1226-1234.
 40. He, Y., *Rapid thermal conductivity measurement with a hot disk sensor-Part 1. Theoretical considerations*. Elsevier, 2005.
 41. Li, G.-Q., J. Han, G.-B. Lou and Y. C. Wang *Predicting intumescent coating protected steel temperature in fire using constant thermal conductivity*. Elsevier, 2016.
 42. Log, T. and S.E. Gustafsson, *Transient plane source (TPS) technique for measuring thermal transport properties of building materials*. Fire and materials, 1995. **19**(1): p. 43-49.
 43. Solórzano, E., et al., *An experimental study on the thermal conductivity of aluminium foams by using the transient plane source method*. International journal of heat and mass transfer, 2008. **51**(25): p. 6259-6267.
 44. Al-Ajlan, S.A., *Measurements of thermal properties of insulation materials by using transient plane source technique*. Applied thermal engineering, 2006. **26**(17): p. 2184-2191.
 45. ISO, *International standard 22007-2-Transient plane heat source (hot disc) method.* , 2008.
-

46. Gustafsson, S.E., *Transient plane source techniques for thermal conductivity and thermal diffusivity measurements of solid materials*. Review of scientific instruments, 1991. **62**(3): p. 797-804.
47. Çengel, Y.A., *Heat transfer: a practical approach*. 1998, United States of America: WCB// McGraw-Hill.
48. Hammerschmidt, U., *Guarded hot-plate (GHP) method: uncertainty assessment*. International journal of thermophysics, 2002. **23**(6): p. 1551-1570.
49. C. H. Huang, M.N.Ö., *Direct integration approach for simuntaneously estimating temperature dependent thermal conductivity and heat capacity* Taylor & Francis, 1991.
50. Cheng-Hung Huang , J.-Y.Y., *An inverse problem in simultaneously measuring temperature-dependent thermal conductivity and heat capacity*. Pergamon, 1995.
51. ÖziŞik, M.N., *Heat conduction*. Second Edition ed. 1993, Raleigh, North Carolina: A Wiley-interscience publication.
52. ÖziŞik, M.N., *Transferência de calor- Um texto básico* 1990, Rio de Janeiro, RJ.
53. Recktenwald, G.W., *Finite-difference approximations to the heat equation*. Portland state university, 2011.
54. A. Vande Wouwer, P.S., W.E. Schiesser, *Adaptive method of lines*. 2001: Chapman & Hall/Crc.
55. Alain Vande Wouwer, P.S., W. E. Schiesser, *Simulation of distributed parameter systems using a matlab-based method of lines toolbox: chemical engineering applications*. 2004, Service d'automatique, faculte' polytechnique de mons: Belgium.

Anexos

1-Princípio da técnica Transient Plane Source (TPS) e tabelas de resultados.

O Hotdisk é um equipamento transiente baseado na teoria (TPS) desenvolvida por Gustafsson, uma técnica capaz de medir propriedades térmica em função da temperatura. Entre as várias vantagens que dispositivo apresenta em relação aos outros métodos vale ressaltar: o tempo requerido para executar a medição é curto, os valores da condutividade térmica e difusividade térmica são relatados simultaneamente nos resultados. Além disso, este método abrange uma elevada gama de medição que pode ser empregada para medir a condutividade térmica de materiais que estejam entre 0,02-400 W/m²K, [40, 43].

Neste dispositivo é utilizado um sensor que realiza as medições e ao mesmo tempo produz a energia necessária para aumentar a temperatura da amostra, a qual pode ser determinada com precisão através da medição de resistência elétrica do sensor. O sensor possui um sistema eletrônico padrão gravado em uma camada fina de metal, e nas superfícies são revestidas por um material isolante que pode ser Kapton ou Mica, [37, 40].

É importante ressaltar que este método requer que o sensor esteja em contato perfeito com as superfícies dos dois corpos de prova para garantir que não haja nenhuma interferência na medição, sendo assim é necessário que ambas as amostrar sejam do mesmo material com dimensões similares, [39].

O circuito elétrico implementado no sensor Hotdisk é representado pela Figura 69. Ao iniciar a medição, uma corrente elétrica passa pelo sensor de tal maneira que, seja suficientemente grande para aumentar a temperatura do sensor cerca de 1-2K. Decorrente do incremento de temperatura, a resistência do sensor é afetada e haverá uma queda de tensão correspondente sobre o sensor. No decorrer dos registros das variações da corrente elétrica e da voltagem é possível se obter informações precisas do fluxo de calor que advém do sensor e transcorre o corpo de prova por condução, [42].

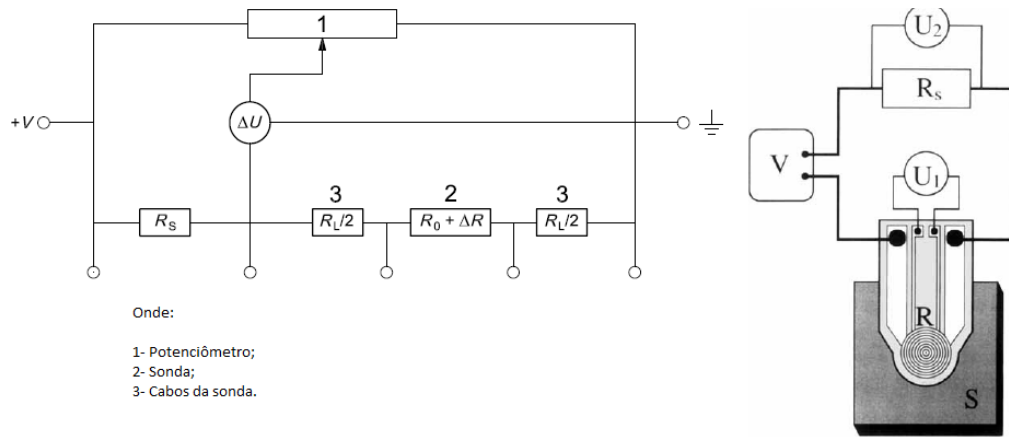


Figura 69. Circuito elétrico do sensor Hotdisk, [42, 45]

Onde, V representa a voltagem constante do circuito, U_1 e U_2 são voltímetros de alta precisão, R_s é a resistência constante do sistema, R se refere a resistência não linear que é responsável pelo aquecimento da amostra S , [42].

Assim sendo, é conveniente expressar a variação da resistência medida pelo sensor em função do incremento de temperatura que o mesmo mediu, [46], como mostra a equação (0.1).

$$R(t) = R_0(1 + \gamma \Delta T_{(\tau)}) \quad (0.1)$$

Onde, R_0 representa a resistência inicial do níquel, γ é coeficiente de temperatura da folha de níquel e $\Delta T_{(\tau)}$ é a variação de temperatura medida pelo sensor. A dependência da temperatura foi expressa em termos da variável τ , que é definida por:

$$\tau = (t/\theta)^{\frac{1}{2}} \quad (0.2)$$

$$\theta = \frac{a^2}{\alpha}$$

Onde, t é o tempo medido desde o início do aquecimento transiente, θ é o tempo característico, que depende do sensor e da amostra, a representa o raio do sensor e α é difusividade térmica da amostra.

A expressão teórica capaz de determinar com precisão os valores da condutividade térmica e difusividade térmica são obtidas através da resolução do problema de condução térmica escolhido para o elemento TPS. Gustafsson e Silas, assumiram uma amostra

infinita na qual ocorre transferência de calor restrita no plano yz, o incremento de temperatura em um ponto xy em função do tempo pode ser calculado através da equação (0.3), [46].

$$\Delta T(y, z, t) = (8\pi^{3/2} \rho c)^{-1} \int_0^t dt (\alpha(t-t'))^{3/2} * \int_A dy' dz' * Q(y', z', t') \exp\{-((y-y')^2 + (z-z')^2) * (4\alpha(t-t'))^{-1}\} \quad (0.3)$$

Onde, A é a área total que está exposta ao aumento da temperatura, ΔT é a variação de temperatura no plano y,z em função do tempo t decorrente do fluxo térmico Q, α é difusividade térmica da amostra e ρ e c representam a massa específica e o calor específico da amostra, respetivamente.

De acordo com Gustavsson, na maioria dos casos é cabível expressar a elevação da temperatura equação (0.3) em termos de σ conforme mostra a equação (0.4), [46].

$$\Delta T(y, z, \tau) = (4\pi^{3/2} aK)^{-1} \int_0^\tau \frac{d\sigma}{\sigma^2} * \int_A dy' dz' * Q(y', z', t') \exp\left\{-\frac{((y-y')^2 + (z-z')^2)}{4\sigma^2 a^2}\right\} \quad (0.4)$$

Onde, σ é a variável de integração.

A variação da temperatura também pode ser correlacionada com a potência liberada pelo sensor. Contudo, há uma expressão matemática para cada geometria assumida pelo sensor, podendo ter a forma quadrada ou circular. A equação (0.5) pode ser empregada para associar a dependência da temperatura em função da potência liberada para o sensor em forma de disco. A expressão para o sensor quadrado está disponível em, [46].

$$\Delta T(\tau) = P_0 \left(\pi^2 aK\right)^{-1} D(\tau) \quad (0.5)$$

Onde, P_0 é a potência total liberada pelo sensor, a é o raio do sensor, k é a condutividade térmica do corpo de prova e $D(\tau)$ é uma função geométrica, tal função

considera que o disco possui um número (m) de anéis concêntricos, como mostra a equação(0.6).

$$D(\tau) = (m(m + 1))^{-2} \int_0^{\tau} \sigma^2 \left\{ \sum_{l=1}^m l \sum_{k=1}^m k \exp\left(-\frac{(l^2 + k^2)}{4m^2\sigma^2}\right) L_0\left(\frac{lk}{2m^2\sigma^2}\right) \right\} d\sigma \quad (0.6)$$

Onde, L_0 é a função modificada de Bessel de ordem zero expressa pela equação (0.7).

$$L_0(x) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} e^{xcos\theta} d\theta = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} e^{xsen\theta} d\theta \quad (0.7)$$

A profundidade da onda de calor representa a distância máxima que o calor liberado pelo sensor é capaz de atingir, na direção do fluxo térmico ao longo da espessura da amostra. Portanto, a espessura da amostra deve ser maior ou igual a profundidade da onda de calor. Geralmente, a profundidade da onda de calor é próxima ou ligeiramente menor do que o diâmetro do sensor, ver (0.8), [42].

$$\Delta_{prob} = 2\sqrt{at_{max}}, \quad 1,1a < \Delta_{prob} < 2a \quad (0.8)$$

As propriedades térmicas obtidas com o TPS estão disponíveis a partir da Tabela 29 até a Tabela 34.

Tabela 29. Resultados obtidos através do TPS das placas Promatec_H em ambiente com azoto antes das reações térmicas.

Descrição	T [°C]	K [W/mK]	α [mm ² /s]	Cp [MJ/m ³ K]	Alcance da sonda [mm]
PROMATEC-H-SC-70mW-160s-S1_Row2.0.0	88	0,3246	0,2432	1,34	11,8
PROMATEC-H-SC-70mW-160s-S1_Row2.1.0	89	0,3270	0,2566	1,27	12,2
PROMATEC-H-SC-70mW-160s-S1_Row2.2.0	89	0,3280	0,2645	1,24	12,3
PROMATEC-H-SC-70mW-160s-S1_Row2.3.0	89	0,3286	0,2702	1,22	12,5
PROMATEC-H-SC-70mW-160s-S1_Row2.4.0	89	0,3293	0,2765	1,19	12,6
PROMATEC-H-SC-70mW-160s-S1_Row2.5.0	89	0,3293	0,2800	1,18	12,7
PROMATEC-H-SC-70mW-160s-S1_Row2.6.0	89	0,3295	0,2840	1,16	12,8

PROMATEC-H-SC-70mW-160s-S1_Row2.7.0	89	0,3293	0,2857	1,15	12,8
PROMATEC-H-SC-70mW-160s-S1_Row2.8.0	89	0,3291	0,2883	1,14	12,9
PROMATEC-H-SC-70mW-160s-S1_Row2.9.0	89	0,3291	0,2899	1,14	12,9
Média	88,9	0,3284	0,2739	1,20	12,6
Desvio Padrão	0,3	0,0015	0,0145	0,06	0,3
PROMATEC-H-SC-70mW-160s-S1_Row7.0.0	178	0,3138	0,2210	1,42	11,3
PROMATEC-H-SC-70mW-160s-S1_Row7.1.0	178	0,3186	0,2360	1,35	11,7
PROMATEC-H-SC-70mW-160s-S1_Row7.2.0	178	0,3201	0,2441	1,31	11,9
PROMATEC-H-SC-70mW-160s-S1_Row7.3.0	179	0,3220	0,2535	1,27	12,1
PROMATEC-H-SC-70mW-160s-S1_Row7.4.0	179	0,3229	0,2586	1,25	12,2
PROMATEC-H-SC-70mW-160s-S1_Row7.5.0	179	0,3235	0,2636	1,23	12,3
PROMATEC-H-SC-70mW-160s-S1_Row7.6.0	179	0,3238	0,2673	1,21	12,4
PROMATEC-H-SC-70mW-160s-S1_Row7.7.0	179	0,3242	0,2702	1,20	12,5
PROMATEC-H-SC-70mW-160s-S1_Row7.8.0	179	0,3242	0,2713	1,19	12,5
PROMATEC-H-SC-70mW-160s-S1_Row7.9.0	179	0,3242	0,2728	1,19	12,5
Média	178,7	0,3217	0,2558	1,26	12,1
Desvio Padrão	0,458258	0,0032	0,0164	0,07	0,4
PROMATEC-H-SC-70mW-160s-S1_Row12.0.0	271	0,3036	0,2224	1,37	11,3
PROMATEC-H-SC-70mW-160s-S1_Row12.1.0	272	0,3060	0,2314	1,32	11,5
PROMATEC-H-SC-70mW-160s-S1_Row12.2.0	272	0,3066	0,2353	1,30	11,6
PROMATEC-H-SC-70mW-160s-S1_Row12.3.0	272	0,3068	0,2371	1,29	11,7
PROMATEC-H-SC-70mW-160s-S1_Row12.4.0	272	0,3067	0,2377	1,29	11,7
PROMATEC-H-SC-70mW-160s-S1_Row12.5.0	272	0,3067	0,2383	1,29	11,7
PROMATEC-H-SC-70mW-160s-S1_Row12.6.0	272	0,3066	0,2403	1,28	11,8
PROMATEC-H-SC-70mW-160s-S1_Row12.7.0	272	0,3064	0,2405	1,27	11,8
PROMATEC-H-SC-70mW-160s-S1_Row12.8.0	272	0,3061	0,2407	1,27	11,8
PROMATEC-H-SC-70mW-160s-S1_Row12.9.0	272	0,3062	0,2419	1,27	11,8
Média	271,9	0,3062	0,2365	1,29	11,7
Desvio Padrão	0,3	0,0009	0,0056	0,03	0,1
PROMATEC-H-SC-70mW-160s-S1_Row17.0.0	367	0,1606	0,2366	0,68	11,7
PROMATEC-H-SC-70mW-160s-S1_Row17.1.0	367	0,1612	0,2396	0,67	11,7
PROMATEC-H-SC-70mW-160s-S1_Row17.2.0	367	0,1613	0,2405	0,67	11,8
PROMATEC-H-SC-70mW-160s-S1_Row17.3.0	367	0,1615	0,2416	0,67	11,8
PROMATEC-H-SC-70mW-160s-S1_Row17.4.0	367	0,1621	0,2443	0,66	11,9
PROMATEC-H-SC-70mW-160s-S1_Row17.5.0	367	0,1620	0,2435	0,67	11,8
PROMATEC-H-SC-70mW-160s-S1_Row17.6.0	367	0,1623	0,2449	0,66	11,9
PROMATEC-H-SC-70mW-160s-S1_Row17.7.0	367	0,1626	0,2453	0,66	11,9
PROMATEC-H-SC-70mW-160s-S1_Row17.8.0	367	0,1624	0,2454	0,66	11,9
PROMATEC-H-SC-70mW-160s-S1_Row17.9.0	367	0,1624	0,2461	0,66	11,9
Média	367	0,1618	0,2428	0,67	11,8
Desvio Padrão	0	0,0006	0,0029	0,01	0,1
PROMATEC-H-SC-70mW-160s-S1_Row22.0.0	469	0,3347	0,2437	1,37	11,8
PROMATEC-H-SC-70mW-160s-S1_Row22.1.0	469	0,3362	0,2494	1,35	12,0
PROMATEC-H-SC-70mW-160s-S1_Row22.2.0	469	0,3367	0,2466	1,37	11,9
PROMATEC-H-SC-70mW-160s-S1_Row22.3.0	469	0,3366	0,2497	1,35	12,0
PROMATEC-H-SC-70mW-160s-S1_Row22.4.0	469	0,3365	0,2537	1,33	12,1
PROMATEC-H-SC-70mW-160s-S1_Row22.5.0	469	0,3367	0,2511	1,34	12,0
PROMATEC-H-SC-70mW-160s-S1_Row22.6.0	469	0,3370	0,2509	1,34	12,0
PROMATEC-H-SC-70mW-160s-S1_Row22.7.0	469	0,3373	0,2514	1,34	12,0
PROMATEC-H-SC-70mW-160s-S1_Row22.8.0	469	0,3374	0,2506	1,35	12,0
PROMATEC-H-SC-70mW-160s-S1_Row22.9.0	469	0,3379	0,2507	1,35	12,0
Média	469	0,3367	0,2498	1,35	12,0

Desvio Padrão	0	0,0008	0,0026	0,01	0,1
---------------	---	--------	--------	------	-----

Tabela 30. Resultados obtidos através do TPS das placas Promatec_H em ambiente com azoto após as reações térmicas.

Descrição	T [°C]	K [W/mK]	α [mm ² /s]	Cp [MJ/m ³ K]	Alcance da sonda [mm]
PROMATEC-H-SC-85mW-160s-S1_Row2.0.0	90	0,2463	0,3016	0,82	13,18
PROMATEC-H-SC-85mW-160s-S1_Row2.1.0	90	0,2594	0,3334	0,78	13,86
PROMATEC-H-SC-85mW-160s-S1_Row2.2.0	90	0,2649	0,3492	0,76	14,18
PROMATEC-H-SC-85mW-160s-S1_Row2.3.0	90	0,2684	0,3610	0,74	14,42
PROMATEC-H-SC-85mW-160s-S1_Row2.4.0	90	0,2713	0,3695	0,73	14,59
Média	90	0,2621	0,3430	0,77	14,05
Desvio Padrão	0	0,0088	0,0240	0,03	0,50
PROMATEC-H-SC-85mW-160s-S1_Row7.0.0	181	0,2542	0,3013	0,84	13,17
PROMATEC-H-SC-85mW-160s-S1_Row7.1.0	181	0,2651	0,3145	0,84	13,46
PROMATEC-H-SC-85mW-160s-S1_Row7.2.0	181	0,2722	0,3325	0,82	13,84
PROMATEC-H-SC-85mW-160s-S1_Row7.3.0	181	0,2789	0,3665	0,76	14,53
PROMATEC-H-SC-85mW-160s-S1_Row7.4.0	181	0,2810	0,3575	0,79	14,35
Média	181	0,2703	0,3345	0,81	13,87
Desvio Padrão	0	0,0098	0,0247	0,03	0,51
PROMATEC-H-SC-85mW-160s-S1_Row12.0.0	275	0,2668	0,3024	0,88	13,20
PROMATEC-H-SC-85mW-160s-S1_Row12.1.0	275	0,2792	0,3309	0,84	13,81
PROMATEC-H-SC-85mW-160s-S1_Row12.2.0	275	0,2817	0,3359	0,84	13,91
PROMATEC-H-SC-85mW-160s-S1_Row12.3.0	275	0,2840	0,3424	0,83	14,04
PROMATEC-H-SC-85mW-160s-S1_Row12.4.0	275	0,2841	0,3421	0,83	14,04
Média	275	0,2791	0,3307	0,84	13,80
Desvio Padrão	0	0,0064	0,0148	0,02	0,31
PROMATEC-H-SC-85mW-160s-S1_Row17.0.0	372	0,1573	0,3256	0,48	13,69
PROMATEC-H-SC-85mW-160s-S1_Row17.1.0	372	0,1621	0,3326	0,49	13,84
PROMATEC-H-SC-85mW-160s-S1_Row17.2.0	372	0,1630	0,3409	0,48	14,01
PROMATEC-H-SC-85mW-160s-S1_Row17.3.0	372	0,1636	0,3465	0,47	14,13
PROMATEC-H-SC-85mW-160s-S1_Row17.4.0	372	0,1640	0,3512	0,47	14,22
Média	372	0,1620	0,3393	0,48	13,98
Desvio Padrão	0	0,0024	0,0093	0,01	0,19
PROMATEC-H-SC-85mW-160s-S1_Row22.1.0	357	-0,0111	0,0064	-1,74	1,92
PROMATEC-H-SC-85mW-160s-S1_Row22.2.0	343	-0,0110	0,0064	-1,72	1,92
PROMATEC-H-SC-85mW-160s-S1_Row22.3.0	330	-0,0140	0,0064	-2,17	1,92
PROMATEC-H-SC-85mW-160s-S1_Row22.4.0	318	-0,0168	0,0064	-2,62	1,92
PROMATEC-H-SC-85mW-160s-S1_Row22.5.0	306	-0,0200	0,0064	-3,10	1,93
Média	330,8	-0,0146	0,0064	-2,27	1,92
Desvio Padrão	17,97109	0,0034	0,0000	0,53	0,00

Tabela 31. Resultados obtidos através do TPS das placas Promatec_H em ambiente com ar antes das reações térmicas.

Descrição	T [°C]	K [W/mK]	α [mm ² /s]	Cp [MJ/m ³ K]	Alcance da sonda [mm]
SC-PROMATEC_H-70mW-160s-S1_Row2.0.0	88,00	0,4357	0,1018	4,28	7,66
SC-PROMATEC_H-70mW-160s-S1_Row2.1.0	88,00	0,4378	0,1139	3,84	8,10
SC-PROMATEC_H-70mW-160s-S1_Row2.2.0	89,00	0,4370	0,1218	3,59	8,38
SC-PROMATEC_H-70mW-160s-S1_Row2.3.0	89,00	0,4358	0,1290	3,38	8,62
SC-PROMATEC_H-70mW-160s-S1_Row2.4.0	89,00	0,4353	0,1344	3,24	8,80
SC-PROMATEC_H-70mW-160s-S1_Row2.5.0	89,00	0,4336	0,1415	3,06	9,03
Média	88,67	0,4359	0,1238	3,56	8,43
Desvio Padrão	0,47	0,0013	0,0132	0,40	0,45
SC-PROMATEC_H-70mW-160s-S1_Row7.0.0	179,00	0,4080	0,0879	4,64	7,12
SC-PROMATEC_H-70mW-160s-S1_Row7.1.0	180,00	0,4125	0,1010	4,08	7,63
SC-PROMATEC_H-70mW-160s-S1_Row7.2.0	180,00	0,4147	0,1108	3,74	7,99
SC-PROMATEC_H-70mW-160s-S1_Row7.3.0	181,00	0,4149	0,1192	3,48	8,29
SC-PROMATEC_H-70mW-160s-S1_Row7.4.0	181,00	0,4147	0,1267	3,27	8,54
SC-PROMATEC_H-70mW-160s-S1_Row7.5.0	181,00	0,4143	0,1330	3,12	8,75
Média	180,33	0,4132	0,1131	3,72	8,05
Desvio Padrão	0,75	0,0025	0,0153	0,52	0,56
SC-PROMATEC_H-70mW-160s-S1_Row12.0.0	275,00	0,3868	0,1228	3,15	8,41
SC-PROMATEC_H-70mW-160s-S1_Row12.1.0	276,00	0,3859	0,1317	2,93	8,71
SC-PROMATEC_H-70mW-160s-S1_Row12.2.0	276,00	0,3850	0,1361	2,83	8,86
SC-PROMATEC_H-70mW-160s-S1_Row12.3.0	276,00	0,3839	0,1407	2,73	9,00
SC-PROMATEC_H-70mW-160s-S1_Row12.4.0	276,00	0,3835	0,1439	2,67	9,10
SC-PROMATEC_H-70mW-160s-S1_Row12.5.0	276,00	0,3822	0,1486	2,57	9,25
Média	275,83	0,3846	0,1373	2,81	8,89
Desvio Padrão	0,37	0,0015	0,0084	0,19	0,27
SC-PROMATEC_H-70mW-160s-S1_Row17.0.0	373,00	0,2288	0,1957	1,17	10,62
SC-PROMATEC_H-70mW-160s-S1_Row17.1.0	373,00	0,2304	0,2089	1,10	10,97
SC-PROMATEC_H-70mW-160s-S1_Row17.2.0	373,00	0,2326	0,2115	1,10	11,04
SC-PROMATEC_H-70mW-160s-S1_Row17.3.0	373,00	0,2343	0,2146	1,09	11,12
SC-PROMATEC_H-70mW-160s-S1_Row17.4.0	373,00	0,2354	0,2182	1,08	11,21
SC-PROMATEC_H-70mW-160s-S1_Row17.5.0	373,00	0,2360	0,2223	1,06	11,32
Média	373,00	0,2329	0,2119	1,10	11,04
Desvio Padrão	0,00	0,0026	0,0084	0,03	0,22

Tabela 32. Resultados obtidos através do TPS das placas Promatec_200 em ambiente com azoto antes das reações térmicas.

Descrição	T [°C]	K [W/mK]	α [mm ² /s]	Cp [MJ/m ³ K]	Alcance da sonda [mm]
PROMATEC-200-SC-70mW-160s-S1_Row2.0.0	88,00	0,2949	0,2422	1,22	11,81
PROMATEC-200-SC-70mW-160s-S1_Row2.1.0	88,00	0,2964	0,2494	1,19	11,99

PROMATEC-200-SC-70mW-160s-S1_Row2.2.0	88,00	0,2969	0,2534	1,17	12,08
PROMATEC-200-SC-70mW-160s-S1_Row2.3.0	88,00	0,2972	0,2551	1,17	12,12
Média	88,00	0,2964	0,2500	1,19	12,00
Desvio Padrão	0,00	0,0009	0,0050	0,02	0,12
PROMATEC-200-SC-70mW-160s-S1_Row7.0.0	173,00	0,4394	0,4164	1,06	15,49
PROMATEC-200-SC-70mW-160s-S1_Row7.1.0	174,00	0,3442	1,0942	0,31	25,10
PROMATEC-200-SC-70mW-160s-S1_Row7.2.0	174,00	0,2770	1,8640	0,15	32,77
PROMATEC-200-SC-70mW-160s-S1_Row7.3.0	175,00	0,2869	0,1144	2,51	8,12
Média	174,00	0,2869	0,1144	2,51	20,37
Desvio Padrão	0,71	0,0645	0,1510	0,93	9,35
PROMATEC-200-SC-70mW-160s-S1_Row12.0.0	270,00	0,1986	0,2329	0,85	11,58
PROMATEC-200-SC-70mW-160s-S1_Row12.1.0	270,00	0,1990	0,2340	0,85	11,61
PROMATEC-200-SC-70mW-160s-S1_Row12.2.0	270,00	0,1986	0,2325	0,85	11,57
PROMATEC-200-SC-70mW-160s-S1_Row12.3.0	270,00	0,1983	0,2303	0,86	11,52
Média	270,00	0,1986	0,2324	0,85	11,57
Desvio Padrão	0,00	0,0003	0,0013	0,00	0,03
PROMATEC-200-SC-70mW-160s-S1_Row17.0.0	365,00	0,1153	0,2271	0,51	11,44
PROMATEC-200-SC-70mW-160s-S1_Row17.1.0	365,00	0,1075	0,1892	0,57	10,44
PROMATEC-200-SC-70mW-160s-S1_Row17.2.0	366,00	0,1082	0,2095	0,52	10,99
PROMATEC-200-SC-70mW-160s-S1_Row17.3.0	366,00	0,1117	0,2368	0,47	11,68
Média	365,50	0,1107	0,2157	0,52	11,14
Desvio Padrão	0,50	0,0031	0,0182	0,03	0,47
PROMATEC-200-SC-70mW-160s-S1_Row22.0.0	461,00	0,2650	0,2009	1,32	10,76
PROMATEC-200-SC-70mW-160s-S1_Row22.1.0	461,00	0,2665	0,2011	1,33	10,76
PROMATEC-200-SC-70mW-160s-S1_Row22.2.0	462,00	0,2623	0,1934	1,36	10,55
PROMATEC-200-SC-70mW-160s-S1_Row22.6.0	462,00	0,2624	0,1928	1,36	10,54
Média	461,50	0,2641	0,1970	1,34	10,65
Desvio Padrão	0,50	0,0018	0,0039	0,02	0,11
PROMATEC-200-SC-70mW-160s-S1_Row27.0.0	572,00	-0,0520	0,0011	-46,44	0,80
PROMATEC-200-SC-70mW-160s-S1_Row27.1.0	573,00	13541,3	34,1690	396,30	140,29
PROMATEC-200-SC-70mW-160s-S1_Row27.2.0	573,00	33317,4	34,0235	979,24	139,99
PROMATEC-200-SC-70mW-160s-S1_Row27.3.0	573,00	42696,4	34,2544	1246,45	140,47
Média	572,75	22388,7	25,6120	643,89	105,39
Desvio Padrão	0,43	16668,6	14,7867	503,34	60,38

Tabela 33. Resultados obtidos através do TPS das placas Promatec_200 em ambiente com azoto após as reações térmicas.

Descrição	T [°C]	K [W/mK]	α [mm ² /s]	Cp [MJ/m ³ K]	Alcance da sonda [mm]
PROMATEC-200-SC-70mW-160s-S1_Row2.0.0	89,00	0,2058	0,3707	0,56	14,61
PROMATEC-200-SC-70mW-160s-S1_Row2.1.0	90,00	0,2113	0,3621	0,58	14,44
PROMATEC-200-SC-70mW-160s-S1_Row2.2.0	90,00	0,2024	0,3406	0,59	14,01
PROMATEC-200-SC-70mW-160s-S1_Row2.3.0	90,00	0,2140	0,3712	0,58	14,62
PROMATEC-200-SC-70mW-160s-S1_Row2.4.0	90,00	0,2151	0,3737	0,58	14,67

Média	89,80	0,2097	0,3636	0,58	14,47
Desvio Padrão	0,40	0,0049	0,0122	0,01	0,25
PROMATEC-200-SC-70mW-160s-S1_Row7.0.0	180,00	0,1905	0,2785	0,68	12,67
PROMATEC-200-SC-70mW-160s-S1_Row7.1.0	180,00	0,2011	0,3066	0,66	13,29
PROMATEC-200-SC-70mW-160s-S1_Row7.2.0	180,00	0,2021	0,3064	0,66	13,28
PROMATEC-200-SC-70mW-160s-S1_Row7.3.0	180,00	0,2033	0,3117	0,65	13,40
PROMATEC-200-SC-70mW-160s-S1_Row7.4.0	181,00	0,2039	0,3138	0,65	13,44
Média	180,20	0,2002	0,3034	0,66	13,22
Desvio Padrão	0,40	0,0049	0,0128	0,01	0,28
PROMATEC-200-SC-70mW-160s-S1_Row12.0.0	274,00	0,0058	0,0058	1,00	1,82
PROMATEC-200-SC-70mW-160s-S1_Row12.1.0	274,00	0,0137	6,0640	0,00	59,10
PROMATEC-200-SC-70mW-160s-S1_Row12.2.0	274,00	0,0584	0,0060	9,73	1,86
PROMATEC-200-SC-70mW-160s-S1_Row12.3.0	274,00	0,2308	0,6874	0,34	19,90
PROMATEC-200-SC-70mW-160s-S1_Row12.4.0	274,00	0,1069	0,0997	1,07	7,58
Média	274,00	0,0831	1,3726	2,43	18,05
Desvio Padrão	0,00	0,0822	2,3595	3,67	21,56
PROMATEC-200-SC-70mW-160s-S1_Row17.0.0	372,00	0,0099	0,0121	0,82	2,64
PROMATEC-200-SC-70mW-160s-S1_Row17.1.0	372,00	0,0009	0,0064	0,14	1,92
PROMATEC-200-SC-70mW-160s-S1_Row17.2.0	372,00	0,0627	232,0005	0,00	365,56
PROMATEC-200-SC-70mW-160s-S1_Row17.3.0	372,00	0,0286	0,0085	3,37	2,21
PROMATEC-200-SC-70mW-160s-S1_Row17.4.0	372,00	0,0175	0,0045	3,90	1,60
Média	372,00	0,0239	46,4064	1,65	74,79
Desvio Padrão	0,00	0,0214	92,7971	1,66	145,39
PROMATEC-200-SC-70mW-160s-S1_Row22.0.0	473,00	0,1714	161,2696	0,00	304,78
PROMATEC-200-SC-70mW-160s-S1_Row22.1.0	473,00	0,2180	0,3311	0,66	13,81
PROMATEC-200-SC-70mW-160s-S1_Row22.2.0	473,00	0,0370	0,0160	2,31	3,04
PROMATEC-200-SC-70mW-160s-S1_Row22.3.0	473,00	0,0259	0,0045	5,80	1,61
PROMATEC-200-SC-70mW-160s-S1_Row22.4.0	473,00	0,0269	0,0063	4,25	1,91
Média	473,00	0,0958	32,3255	2,60	65,03
Desvio Padrão	0,00	0,0821	64,4722	2,17	119,96

Tabela 34. Resultados obtidos através do TPS das placas Promatec_200 em ambiente com ar antes das reações térmicas.

Descrição	T [°C]	K [W/mK]	α [mm ² /s]	Cp [MJ/m ³ K]	Alcance da sonda [mm]
SC-PROMATEC_200-50mW-160s-S1_Row2.0.0	89,00	0,3584	0,1940	1,85	10,86
SC-PROMATEC_200-50mW-160s-S1_Row2.1.0	89,00	0,3493	0,2157	1,62	11,45
SC-PROMATEC_200-50mW-160s-S1_Row2.2.0	89,00	0,3516	0,2074	1,69	11,23
SC-PROMATEC_200-50mW-160s-S1_Row2.3.0	89,00	0,3550	0,2039	1,74	11,13
SC-PROMATEC_200-50mW-160s-S1_Row2.4.0	89,00	0,3483	0,2110	1,65	11,33
SC-PROMATEC_200-50mW-160s-S1_Row2.5.0	89,00	0,3467	0,2113	1,64	11,34
Média	89,00	0,3515	0,2072	1,70	11,22
Desvio Padrão	0,00	0,0040	0,0069	0,08	0,19
SC-PROMATEC_200-50mW-160s-S1_Row7.0.0	176,00	0,5348	0,0405	13,21	4,96

SC-PROMATEC_200-50mW-160s-S1_Row7.4.0	178,00	0,2840	0,0411	6,91	5,00
SC-PROMATEC_200-50mW-160s-S1_Row7.5.0	178,00	0,4231	0,0539	7,86	5,72
Média	177,33	0,4140	0,0452	9,32	5,23
Desvio Padrão	0,94	0,1026	0,0062	2,77	0,35
SC-PROMATEC_200-50mW-160s-S1_Row12.0.0	275,00	0,2527	0,1490	1,70	9,52
SC-PROMATEC_200-50mW-160s-S1_Row12.1.0	275,00	0,2482	0,1755	1,41	10,33
SC-PROMATEC_200-50mW-160s-S1_Row12.2.0	275,00	0,2484	0,1767	1,41	10,37
SC-PROMATEC_200-50mW-160s-S1_Row12.3.0	275,00	0,2491	0,1717	1,45	10,22
SC-PROMATEC_200-50mW-160s-S1_Row12.4.0	275,00	0,2492	0,1718	1,45	10,22
SC-PROMATEC_200-50mW-160s-S1_Row12.5.0	275,00	0,2529	0,1639	1,54	9,98
Média	275,00	0,2501	0,1681	1,49	10,11
Desvio Padrão	0,00	0,0020	0,0095	0,10	0,29
SC-PROMATEC_200-50mW-160s-S1_Row17.0.0	373,00	0,2211	0,1643	1,35	10,00
SC-PROMATEC_200-50mW-160s-S1_Row17.1.0	373,00	0,2227	0,1868	1,19	10,66
SC-PROMATEC_200-50mW-160s-S1_Row17.2.0	373,00	0,2232	0,1939	1,15	10,86
SC-PROMATEC_200-50mW-160s-S1_Row17.3.0	373,00	0,2234	0,1975	1,13	10,96
SC-PROMATEC_200-50mW-160s-S1_Row17.4.0	373,00	0,2241	0,1976	1,13	10,96
SC-PROMATEC_200-50mW-160s-S1_Row17.5.0	373,00	0,2244	0,1980	1,13	10,97
Média	373,00	0,2232	0,1897	1,18	10,73
Desvio Padrão	0,00	0,0011	0,0120	0,08	0,35
SC-PROMATEC_200-50mW-160s-S1_Row22.0.0	473,00	0,3212	0,1347	2,38	9,05
SC-PROMATEC_200-50mW-160s-S1_Row22.1.0	473,00	0,3284	0,1546	2,12	9,70
SC-PROMATEC_200-50mW-160s-S1_Row22.2.0	473,00	0,3327	0,1435	2,32	9,34
SC-PROMATEC_200-50mW-160s-S1_Row22.3.0	473,00	0,3309	0,1510	2,19	9,58
SC-PROMATEC_200-50mW-160s-S1_Row22.4.0	474,00	0,3270	0,1580	2,07	9,80
SC-PROMATEC_200-50mW-160s-S1_Row22.5.0	474,00	0,3190	0,1705	1,87	10,18
Média	473,33	0,3265	0,1521	2,16	9,61
Desvio Padrão	0,47	0,0049	0,0112	0,17	0,35