

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
INSTITUTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**Aplicação de Diferentes Intensidades de Fluxo
de Calor para a Estimação Simultânea de
Propriedades Termofísicas de Materiais
Metálicos em Função da Temperatura**

Luís Felipe dos Santos Carollo

Itajubá, Fevereiro de 2016

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
INSTITUTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Luís Felipe dos Santos Carollo

**Aplicação de Diferentes Intensidades de Fluxo
de Calor para a Estimação Simultânea de
Propriedades Termofísicas de Materiais
Metálicos em Função da Temperatura**

Tese de Doutorado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica como parte dos requisitos para obtenção do Título de Doutor em Engenharia Mecânica.

Área de Concentração: **Conversão de Energia**

Orientador: **Prof. Dr. Sandro Metrevelle Marcondes de Lima e Silva**

Co-Orientadora: **Profa. Dra. Ana Lúcia Fernandes de Lima e Silva**

Fevereiro de 2016

Itajubá

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
INSTITUTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Luís Felipe dos Santos Carollo

**Aplicação de Diferentes Intensidades de Fluxo
de Calor para a Estimação Simultânea de
Propriedades Termofísicas de Materiais
Metálicos em Função da Temperatura**

Composição da Banca Examinadora:

Prof. Dr. Gilmar Guimarães – FEMEC/UFU

Prof. Dr. Frederico Romagnoli Silveira Lima – DEM/CEFET-BH

Prof. Dr. Genésio José Menon - IEM/UNIFEI

Prof. Dr. Marcelo José Pirani - IEM/UNIFEI

Profa. Dra. Ana Lúcia Fernandes de Lima e Silva (Co-Orientadora) – IEM/UNIFEI

Prof. Dr. Sandro Metrevelle Marcondes de Lima e Silva (Orientador) – IEM/UNIFEI

Itajubá
2016

Dedicatória

*Aos meus pais Antonio e Marta,
e à minha esposa Flavia.*

Agradecimentos

Agradeço aos meus pais, Antonio e Marta, à minha esposa, Flavia, e à minha família pelo apoio recebido durante o tempo de desenvolvimento deste trabalho.

Ao professor Sandro Metrevelle Marcondes de Lima e Silva, pela orientação clara, segura e objetiva e pelo apoio durante a elaboração do trabalho.

À Professora Ana Lúcia Fernandes de Lima e Silva, pela sua ajuda na co-orientação desse trabalho.

Aos amigos do LabTC e colegas do curso de Pós-Graduação pelo companheirismo.

Aos amigos da MAHLE pelo incentivo e suporte ao longo desta jornada.

Aos funcionários da Oficina Mecânica pelo suporte nas usinagens.

Ao curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica pela confiança depositada em meu trabalho.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e ao Conselho de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo suporte financeiro.

Só se pode alcançar um grande êxito quando nos mantemos fiéis a nós mesmos.

Friedrich Nietzsche

Resumo

CAROLLO, L. F. S. (2016), *Aplicação de Diferentes Intensidades de Fluxo de Calor para a Estimação Simultânea de Propriedades Termofísicas de Materiais Metálicos em Função da Temperatura*, Itajubá, 92p. Tese - Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá.

Apresenta-se neste trabalho um método para estimar simultaneamente, em função da temperatura, a condutividade térmica, λ , e a capacidade de calor volumétrica, ρc_p , de amostras de Aço AISI 1045 e Aço Inoxidável AISI 304. O modelo térmico utilizado é baseado na equação da difusão unidimensional transiente considerando propriedades térmicas constantes para variações de até 5 °C. Neste método as propriedades são determinadas de forma simultânea utilizando um mesmo experimento. A bancada experimental consiste em uma montagem simétrica para minimizar os erros na medição do fluxo de calor, onde a amostra é colocada entre um aquecedor resistivo e um isolante. Devido a necessidade de variar a temperatura inicial, a montagem é inserida em uma estufa. Com o intuito de reduzir as perdas de calor por convecção, a montagem foi completamente isolada com placas de fibra cerâmica. Além disso, a amostra possui espessura muito pequena quando comparada as suas outras dimensões e o período de realização do experimento é pequeno. O modelo considera um fluxo de calor constante na superfície superior da amostra e condição de isolamento na superfície oposta, onde a temperatura é medida por um termopar tipo T. Desta forma, a estimação das propriedades é realizada baseando-se nos coeficientes de sensibilidade, definidos pela primeira derivada parcial da temperatura em relação ao parâmetro analisado, multiplicado pelo parâmetro analisado. Baseando-se nesta análise, duas intensidades de fluxo de calor foram utilizadas: a maior intensidade foi aplicada no começo do experimento para aumentar a sensibilidade para estimar λ , e a menor intensidade no restante do experimento para garantir sensibilidade para a estimação do ρc_p . Para estimar as propriedades, uma função objetivo definida pela diferença ao quadrado da temperatura experimental e numérica mais o quadrado do erro sistemático gerado pela resistência térmica foi minimizada aplicando-se a técnica de otimização BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno). A temperatura numérica foi obtida pela solução do modelo térmico proposto aplicando-se o método das diferenças finitas com formulação implícita. Além disso, uma análise de incertezas foi realizada com o objetivo de garantir a qualidade dos resultados obtidos. Nesta análise, a resistência térmica de contato, o erro do termopar, o erro da aquisição de dados, dos multímetros, do método de otimização, entre outros, foram analisados. As propriedades estimadas e a análise de incertezas estão em acordo com a literatura.

Palavras-chave: propriedades térmicas de metais, condução de calor, otimização, coeficientes de sensibilidade, incertezas.

Abstract

CAROLLO, L. F. S. (2016), *Applying Different Intensities of Heat Flux to Simultaneously Estimate Temperature-Dependent Thermal Properties of Metallic Materials*, Itajubá, 92p. PhD Thesis - Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá.

This work presents a method for the simultaneous estimation of temperature-dependent thermal conductivity, λ , and volumetric heat capacity, ρc_p , in samples of AISI 1045 steel and AISI 304 stainless steel. The thermal model used is based on a transient one-dimensional diffusion equation with constant thermal properties up to a 5°C variation. In this method, these properties are estimated simultaneously using the same experiment that consist a symmetrical assembly with the purpose to minimize heat flux measurement errors. The sample is placed between the resistive heater and the insulator. Due to the initial temperature variation, the assembly is placed inside an oven. To reduce the heat losses resulting from the convection phenomenon, the assembly was totally isolated by ceramic fiber plates. Furthermore, the sample is much thinner than its other dimensions and the experiments were done very fast; all of which ensures a one-dimensional thermal model. This model uses a constant heat flux on the upper surface of the sample and insulation condition on the bottom surface and the temperature is measured on the bottom surface by using type T thermocouple. Thus, the estimation of the properties was based on analysis of the sensitivity coefficients defined by the first partial derivative of the temperature in relation to the parameter to be analyzed multiplied by the analyzed parameter values. Based on this analysis, two heat flux different intensities were used: a higher intensity at the beginning to increase the sensitivity coefficient for the estimation of λ , and a lower one at the end to ensure enough sensitivity for estimation of ρc_p . To estimate these properties, an objective function defined by the square difference between the numerical and experimental temperatures plus the square of the systematic error caused by the thermal resistance was minimized by applying the optimization technique BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno). The numerical temperature was obtained by the solution of the proposed thermal model by using the Finite Difference Method with an implicit formulation. Besides, uncertainty analyses were done in order to ensure the quality of the obtained results. In these analyses, the thermal contact resistance, the errors of the thermocouple, data acquisition, multimeters, optimization method, and others were considered. The estimated properties and the uncertainty are in good agreement with literature.

Keywords: thermal properties of metals, heat conduction, optimization, sensitivity coefficients, uncertainty.

Lista de Figuras

Figura 3.1 – Modelo térmico unidimensional (vista em corte).	31
Figura 3.2 – Modelo térmico unidimensional (vista tridimensional).	31
Figura 3.3 – Esquema do balanço de energia.	33
Figura 3.4 – Nó 0 (zero) na superfície onde o fluxo de calor é imposto e nó adjacente 1.	34
Figura 3.5 – Representação dos nós intermediários.	35
Figura 3.6 – Nó n_p na superfície onde é imposta a condição de isolamento e nó anterior n_{p-1} .	36
Figura 3.7 – Algoritmo utilizado para calcular a distribuição de temperatura na amostra.	37
Figura 3.8 – Comparação entre os coeficientes de sensibilidade do ρc_p calculados a partir da análise numérica e analítica.	41
Figura 3.9 – Comparação entre os coeficientes de sensibilidade do λ calculados a partir da análise numérica e analítica.	41
Figura 3.10 – Diferença entre os coeficientes de sensibilidade calculados para o ρc_p .	42
Figura 3.11 – Diferença entre os coeficientes de sensibilidade calculados para o λ .	42
Figura 3.12 – Algoritmo da técnica BFGS e DFP.	46
Figura 4.1 – Esquema da bancada utilizada para determinar as propriedades.	47
Figura 4.2 – Dimensões das amostras de Aço AISI 1045.	48
Figura 4.3 – Dimensões das amostras de Aço Inoxidável AISI 304.	48
Figura 4.4 – Aquecedor resistivo.	49
Figura 4.5 – Fonte de alimentação Instrutemp.	49
Figura 4.6 – Multímetro Instrutherm.	50
Figura 4.7 – Multímetro Minipa.	50
Figura 4.8 – Descarga Capacitiva.	51
Figura 4.9 – Banho Termostático Marconi.	51
Figura 4.10 – Aquisição Agilent 34980A.	52
Figura 4.11 – Estufa Marconi MA 030.	52
Figura 4.12 – Esquema da montagem (corte vista superior).	53
Figura 4.13 – Esquema da montagem (corte vista lateral esquerda).	53
Figura 4.14 – Esquema da montagem (corte vista frontal).	53
Figura 4.15 – Posição do termopar na amostra.	53

Figura 5.1 – Coeficientes de Sensibilidade do Aço AISI 1045. _____	56
Figura 5.2 – Valores da Função Objetivo para o Aço AISI 1045. _____	58
Figura 5.3 – Análise da melhor configuração para o experimento proposta por Dowding <i>et al.</i> (1995). _____	59
Figura 5.4 – Temperatura numérica (T), experimental (Y) e fluxo de calor imposto. _____	59
Figura 5.5 – Diferença de temperatura para o Aço AISI 1045. _____	60
Figura 5.6 – Comparação dos resultados da capacidade de calor volumétrica para o Aço AISI 1045. _____	62
Figura 5.7 – Comparação dos resultados da condutividade térmica para o Aço AISI 1045. _____	63
Figura 5.8 – Coeficientes de Sensibilidade do Aço Inoxidável AISI 304. _____	64
Figura 5.9 – Valores da Função Objetivo para o Aço Inoxidável AISI 304. _____	65
Figura 5.10 – Análise da melhor configuração para o experimento proposta por Dowding <i>et al.</i> (1995). _____	65
Figura 5.11 – Temperatura numérica (T), experimental (Y) e fluxo de calor imposto. _____	66
Figura 5.12 – Diferença de temperatura para o Aço Inoxidável AISI 304. _____	66
Figura 5.13 – Comparação dos resultados da capacidade de calor volumétrica para o Aço Inoxidável AISI 304. _____	69
Figura 5.14 – Comparação dos resultados da condutividade térmica para o Aço Inoxidável AISI 304. _____	69
Figura 5.15 – Bancada HT11C da Armfield. _____	70
Figura 5.16 – Esquema da bancada HT11C da Armfield. _____	71
Figura A.1 – Modelo térmico unidimensional. _____	80
Figura A.2 – Comparação entre a temperatura calculada de forma analítica e numérica. _____	82
Figura A.3 – Diferença entre as temperaturas calculadas. _____	83
Figura B.1 – Modelo da montagem experimental para validar a condição unidimensional. _____	84
Figura B.2 – Comparação das temperaturas na superfície oposta ao aquecimento. _____	85
Figura B.3 – Diferença entre as temperaturas na superfície oposta ao aquecimento. _____	85

Lista de Tabelas

Tabela 3.1 – Valores dos parâmetros utilizados para o cálculo da temperatura. _____	38
Tabela 3.2 – Parâmetros utilizados no método BFGS. _____	45
Tabela 5.1 – Resultados médios obtidos para o Aço AISI 1045 com a estufa a 25°C. _____	60
Tabela 5.2 – Resultados médios obtidos para o Aço AISI 1045 com a estufa a 50°C. _____	61
Tabela 5.3 – Resultados médios obtidos para o Aço AISI 1045 com a estufa a 75°C. _____	61
Tabela 5.4 – Resultados médios obtidos para o Aço AISI 1045 com a estufa a 100°C. _____	61
Tabela 5.5 – Resultados médios obtidos para o Aço AISI 1045 com a estufa a 125°C. _____	61
Tabela 5.6 – Resultados médios obtidos para o Aço AISI 1045 com a estufa a 150°C. _____	61
Tabela 5.7 – Resultados médios obtidos para o Aço Inoxidável AISI 304 com a estufa a 25°C. _____	67
Tabela 5.8 – Resultados médios obtidos para o Aço Inoxidável AISI 304 com a estufa a 50°C. _____	67
Tabela 5.9 – Resultados médios obtidos para o Aço Inoxidável AISI 304 com a estufa a 75°C. _____	67
Tabela 5.10 – Resultados médios obtidos para o Aço Inoxidável AISI 304 com a estufa a 100°C. _____	67
Tabela 5.11 – Resultados médios obtidos para o Aço Inoxidável AISI 304 com a estufa a 125°C. _____	68
Tabela 5.12 – Resultados médios obtidos para o Aço Inoxidável AISI 304 com a estufa a 150°C. _____	68
Tabela 5.13 – Comparação dos resultados da Bancada da Armfield e presente trabalho. _____	71

Letras Latinas

A	Área	m^2
B	Vetor das variáveis	
D	Matriz simétrica de atualização	
c_p	calor específico	$J/(kgK)$
\dot{E}_{ac}	taxa de energia acumulada	W
\dot{E}_e	taxa de energia de entrada	W
\dot{E}_g	taxa de energia gerada	W
\dot{E}_s	taxa de energia de saída	W
F	função objetivo	$^{\circ}C$
H	matriz Hessiana	
I_{BFGS}	incerteza percentual do método BFGS	%
I_{final}	incerteza percentual final	%
I_{MDF}	incerteza percentual do método das diferenças finitas	%
$I_{resist. elétrica}$	incerteza percentual do multímetro Instruterm	%
$I_{corrente}$	incerteza percentual do multímetro Minipa	%
$I_{sist. aquis.}$	incerteza percentual do sistema de aquisição	%
$I_{term.}$	incerteza percentual do termopar	%
$I_{resist. térmica}$	Incerteza da resistência térmica do aquecedor	%
$I_{isol.}$	Incerteza do isolamento térmico	%
L	espessura da amostra	m
n_p	número de pontos na malha	
P	parâmetro a ser analisado	
p	incremento de tempo	
q''_{cond}	fluxo de calor por condução	W/m^2
R''_c	resistência térmica do aquecedor resistivo	$^{\circ}C m^2 /W$
S	Direção de busca	
t	Tempo	s
T	temperatura numérica	$^{\circ}C$
T_0	temperatura inicial	$^{\circ}C$

x, y, z	coordenadas cartesianas	m
X_1	coeficiente de sensibilidade para ρc_p	°C
X_2	coeficiente de sensibilidade para λ	°C
y	vetores	
Y	temperatura experimental	°C

Letras Gregas

α	difusividade térmica	m/s ²
β	Escalar multiplicador	
δ	passo para a derivada numérica	
Δ	operador gradiente	
σ	Escalar	
τ	Escalar	
λ	condutividade térmica	W/(mK)
ρ	massa específica	kg/m ³
ρc_p	capacidade de calor volumétrica	J/(m ³ K)
ϕ_1	fluxo de calor	W/m ²
ϕ_m	média ponderada do fluxo de calor	W/m ²

Sobrescritos

q	tempo para a técnica BFGS
T	Transposto
\rightarrow	Indica vetor

= Indica matriz

p Instante de tempo

Subscritos

i contador de parâmetros

j contador de número de pontos

k incremento dos auto valores

m incremento de posição

n número total de pontos

Abreviaturas

aquis Aquisição

inst Instruterm

máx Máxima

mult Multímetro

sist Sistema

term Termopar

Siglas

<i>BFGS</i>	Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno
<i>IEM</i>	Instituto de Engenharia Mecânica
<i>MDF</i>	Método das Diferenças Finitas
<i>FEMEC</i>	Faculdade de Engenharia Mecânica
<i>UFU</i>	Universidade Federal de Uberlândia
<i>UNIFEI</i>	Universidade Federal de Itajubá
<i>CEFET</i>	Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais
<i>DEM</i>	Departamento de Engenharia Mecânica

Sumário

1. INTRODUÇÃO	16
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
3. METODOLOGIA	31
3.1. Modelo térmico unidimensional (1D)	31
3.2. Solução do modelo	33
3.3. Análise da melhor configuração do experimento para determinar as propriedades λ e ρc_p	39
3.4. Estimativa da condutividade térmica e da capacidade de calor volumétrica	43
4. MONTAGEM EXPERIMENTAL	47
4.1. Descrição da bancada de teste	47
4.2. Detalhamento da montagem das amostras	52
5. ANÁLISE DOS RESULTADOS	54
5.1 Aço AISI 1045	54
5.2 Aço Inoxidável AISI 304	64
6. ANÁLISE DAS INCERTEZAS	722
6.1 Aço AISI 1045	73
6.2 Aço Inoxidável AISI 304	75
7. CONCLUSÕES	78
APÊNDICE A - VALIDAÇÃO DA METODOLOGIA UTILIZADA PARA RESOLVER O MODELO TÉRMICO 1D	80
APÊNDICE B - VALIDAÇÃO DA CONDIÇÃO UNIDIMENSIONAL DA BANCADA	84
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	866

1. INTRODUÇÃO

Nos dias de hoje identifica-se o desenvolvimento de inúmeros materiais com aplicações específicas, sendo que este desenvolvimento tem como objetivo a busca de um aumento de eficiência de um sistema. Entretanto, somente este desenvolvimento não garante um resultado com maior eficiência, pois se faz necessário caracterizar todas as propriedades do material desenvolvido para que o mesmo seja aplicado de maneira correta. Além disso, esta caracterização deve apresentar resultados precisos e confiáveis para garantir a qualidade das análises/aplicações, e devido a atual necessidade de mercado, esta análise deve ser realizada o mais rápida possível.

Com os fatos explicitados anteriormente, verifica-se o incentivo ao desenvolvimento de novas técnicas para a determinação de propriedades de materiais. Cita-se como estudo de caso, as empresas que fornecem serviços de usinagem como torneamento e/ou fresamento. Sabe-se que a vida útil da ferramenta está inversamente ligada a temperatura de trabalho, isto é, quanto maior a temperatura, menor sua vida útil. Sendo assim, mecanismos para reduzir a temperatura no ponto de corte devem ser desenvolvidos para garantir uma maior produtividade e menor custo ao processo, obtendo-se por consequência uma maior competitividade no mercado em âmbito nacional e internacional. Entretanto, estes mecanismos podem estar relacionados ao desenvolvimento de novos materiais para as ferramentas. Isto pode gerar uma demanda de caracterização dos materiais, sendo neste caso, não somente em temperatura ambiente, mas sim durante todo o ciclo de trabalho, ou seja, caracterização das propriedades com variação de temperatura. Desta forma, a atuação da engenharia é de grande importância e o engenheiro tem grande responsabilidade de garantir a determinação e caracterização do processo bem como determinar a melhor maneira de efetua-los.

Outro ponto importante está relacionado ao consumo de energia que está diretamente relacionado ao custo dos produtos ou serviços prestados. Cita-se, por exemplo, um anel de pistão de um motor de combustão interna constituído de um material que não é um bom condutor, ou seja, não consegue dissipar parte do calor gerado na câmara de combustão para que o sistema mantenha a eficiência térmica esperada. Esta definição incorreta acarretará diretamente na redução da vida útil do motor e no aumento de consumo de combustível, que por sua vez irá gerar inúmeros impactos nas questões energéticas e ambientais, diariamente

discutidas em todo o mundo. Com base nestes fatos, cita-se como propriedades importantes para a correta aplicação e definição de projetos, a condutividade térmica e a capacidade de calor volumétrica.

A condutividade térmica representa a quantidade de energia térmica que o material pode conduzir pelo processo de difusão e é esta propriedade que demarca a intensidade da temperatura de trabalho do material. Já a capacidade de calor volumétrica representa a capacidade de um material de armazenar energia térmica. Utilizando os exemplos descritos anteriormente, processo de usinagem ou aplicação do anel de pistão, visualiza-se a necessidade da determinação das propriedades de forma confiável, precisa e rápida. Assim, todas as informações necessárias são fornecidas para garantir que a definição do escopo do projeto seja realizada de maneira correta, evitando que ocorra perda de eficiência ou até mesmo uma falha do sistema.

Desta maneira, o principal objetivo deste trabalho é desenvolver uma metodologia diferenciada para determinar as propriedades termofísicas condutividade térmica λ , e capacidade de calor volumétrica, ρc_p de materiais metálicos variando com a temperatura. Para esta tarefa, realizou-se análises de sensibilidade das propriedades para definir as variáveis do experimento, como por exemplo, a intensidade do fluxo de calor, o tempo de incidência desse fluxo, a localização do termopar, entre outros. O modelo utilizado foi um modelo térmico unidimensional com condição de isolamento em um lado, onde a temperatura é medida, e o fluxo de calor prescrito do outro lado. Para a determinação das propriedades aplicou-se o método de otimização BFGS, minimizando uma função objetivo definida pelo quadrado da diferença da temperatura experimental e numérica mais a incerteza experimental da resistência térmica do aquecedor. A obtenção da temperatura numérica ocorreu pela solução da equação da difusão de calor usando o método das diferenças finitas com formulação implícita.

No Capítulo 2 encontra-se uma revisão bibliográfica que teve por objetivo reunir informações suficientes para que fosse possível o desenvolvimento da metodologia para determinar de forma simultânea λ e ρc_p , de materiais metálicos, variando com a temperatura.

Apresenta-se no Capítulo 3 toda a fundamentação teórica necessária para que seja possível estimar as propriedades térmicas em função da temperatura. Desta maneira, aborda-se os seguintes tópicos: modelo térmico proposto, escolha do modelo de condução, solução da

equação da difusão do calor unidimensional, definição dos coeficientes de sensibilidade, definição da função objetivo para estimar as propriedades e o pacote computacional utilizado para minimizar esta função.

Encontra-se no Capítulo 4 a descrição da bancada experimental desenvolvida para estimar de forma simultânea e dependente à temperatura as propriedades térmicas. Além disso, descreve-se a função de cada componente da bancada, bem como o detalhamento do conjunto aquecedor-amostra-isolamento.

No Capítulo 5 são apresentados os resultados das propriedades térmicas estimadas variando com a temperatura com base nas informações do Capítulo 3.

No Capítulo 6 é apresentada a análise de incertezas referente à estimação das propriedades. Este capítulo aborda os itens que contribuíram para a geração e propagação dos erros e sua influência nos resultados obtidos.

No Capítulo 7 encontram-se os comentários finais e sugestões de propostas futuras com o intuito de aprimorar a técnica apresentada nesse trabalho.

No Apêndice A é mostrada a validação da metodologia usada para resolver numericamente o modelo térmico adotado. A validação foi realizada comparando a solução numérica obtida pelo método das diferenças finitas com formulação implícita com a solução analítica obtida pelas funções de Green.

Na sequência, todas as referências bibliográficas dos trabalhos citados nesta qualificação podem ser encontradas.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são descritas algumas técnicas utilizadas para a determinação de propriedades termofísicas como a condutividade térmica, λ , capacidade de calor volumétrica, ρc_p , e difusividade térmica, α . Nesta revisão, são apresentados trabalhos que permitem a determinação das propriedades térmicas tanto de forma simultânea quanto não simultânea, variando ou não com a temperatura, destacando suas vantagens e desvantagens. Em todos os trabalhos, percebe-se que para a estimação das propriedades é necessário gerar um campo de temperatura na amostra e comparar a temperatura experimental com a temperatura numérica obtida pela solução da equação da difusão para o modelo térmico proposto.

Dentre os métodos/técnicas estudados, destacam-se os três mais utilizados: o método da Placa Quente Protegida, o método do Fio Quente e o método Flash.

O método da Placa Quente Protegida apresentado em torno de 1910 e normalizado pela ABNT (2005) é citado como o método mais preciso para estimar a condutividade térmica de materiais isolantes por pesquisadores como Ribeiro *et al.* (2004), Wulf, Barth e Gross (2005), Lima *et al.* (2008), Karimi, Li e Teertstra (2010), entre outros. Entretanto, este método pode ser aplicado para determinar propriedades de materiais não isolantes com algumas ressalvas. Cita-se como sua principal vantagem a facilidade para a estimação da propriedade, pois utiliza-se a lei de Fourier em regime permanente. Essa simplicidade torna, porém o experimento longo, o que é uma desvantagem, além de o aparato experimental ser de alto custo. Para determinar as propriedades, a montagem experimental deve ser constituída de uma amostra plana, homogênea e isotrópica entre uma placa quente protegida e uma placa fria, com o objetivo de garantir a condição de fluxo de calor unidimensional, isto é, o fluxo de calor que percorre a amostra possui apenas uma direção. Assim, ao atingir a condição de regime permanente, calcula-se a condutividade térmica com base no fluxo de calor aplicado e na diferença média de temperatura na amostra. O fluxo considerado para o cálculo refere-se ao fluxo necessário para garantir uma temperatura da placa quente constante. Diante das dificuldades encontradas, algumas modificações foram propostas com o intuito de aprimorar a técnica desenvolvida em relação a precisão, confiabilidade, abrangência para outros materiais, como por exemplo: para aumentar o campo de trabalho relacionado à temperatura, Healy (2001) desenvolveu uma montagem circular e Stacey (2002) aplicou vácuo, Zarr e Filliben

(2002) e Simioni (2005) apresentaram trabalhos com o objetivo de analisar e reduzir os erros experimentais por comparação laboratorial.

Blackwell (1954) apresentou o método do Fio Quente que é atualmente amplamente utilizado na determinação da condutividade térmica, pois o aparato experimental é simples. Este aparato consiste de uma sonda metálica, que contém um fio de resistência e um termopar, inserida no centro de uma amostra. O objetivo é prover um fluxo de calor pela aplicação de corrente, no fio de resistência, que irá gerar uma diferença de temperatura na amostra, coletada pelo termopar. Desta forma, determina-se a condutividade térmica baseando-se no transiente de temperatura da amostra, gerada pela fonte de calor. Esta técnica pode ser aplicada para determinar a difusividade térmica apenas com a inclusão de um termopar na superfície externa da amostra com o objetivo de confirmar a condição de isolamento. Neste caso, necessita-se minimizar uma função objetivo que pode ser baseada na temperatura experimental e numérica, sendo a última obtida pela solução da equação da difusão de calor. Cita-se como desvantagem desta técnica a medição de propriedades de materiais metálicos, pois existe uma alta resistência de contato entre a sonda metálica e a amostra devido à dificuldade de se eliminar os interstícios de ar existentes na montagem. Cientes da necessidade de aprimorar esta técnica, pesquisadores apresentaram melhorias com o intuito de aumentar a precisão dos resultados, bem como a aplicação para outros materiais. Silva Neto e Carvalho (1999) e André *et al.* (2002) aplicaram técnicas de problemas inversos em conjunto com a técnica convencional para otimizar o processo de estimativa das propriedades. Miyamura e Susa (2002) modificaram o aparato para determinar as propriedades térmicas em líquidos e Santos (2002) comparou a disposição dos termopares para verificar o erro no processo. Nahor *et al.* (2003) aprimoraram a posição do termopar para caracterizar alimentos e Santos *et al.* (2004) determinaram as propriedades de polímeros. Thomson (2005) aplicou o método de Levenberg-Marquardt e Sequencial de Estimativa de Parâmetros em conjunto com a técnica do fio quente para otimizar o processo. Carvalho *et al.* (2006) otimizaram o método, Porfírio *et al.* (2006) propuseram uma modificação para determinar a condutividade térmica de compósitos com elevada condutividade térmica e Adjali e Laurent (2007) modificaram a técnica para caracterizar as propriedades térmicas variando com a temperatura em uma mistura de água-ágar gel. Por último, Carollo, Gravena e Lima e Silva. (2012) modificaram o aparato experimental facilitando o seu manuseio permitindo a caracterização de amostras reduzidas.

Desenvolvido por Parker *et al.* (1961), o método Flash é bastante aplicado para estimar a difusividade térmica aplicando-se um pulso de calor radiante, de grande intensidade e curta duração em uma superfície da amostra analisada. A obtenção da difusividade ocorre com base no tempo necessário para que a temperatura na face oposta da amostra atinja o valor máximo. A principal vantagem deste método é a não necessidade do conhecimento do valor do fluxo de calor aplicado na amostra para determinar a propriedade. Entretanto, as condições de que a excitação pode não ser pontual no tempo e não homogênea no espaço, e que a amostra pode estar sujeita a perdas térmicas são as desvantagens deste método. Além disso, para este método faz-se necessário conhecer a quantidade de energia absorvida pela face da amostra sujeita a excitação, para estimar a condutividade térmica.

Como todos os outros métodos, variações foram propostas para que fosse possível caracterizar materiais com propriedades diferentes, podendo-se citar os trabalhos de Mardolcar (2002) na análise de rochas a altas temperaturas, Žmuda *et al.* (2002) em dente humano, Eriksson, Hayashi e Seetharaman (2002) em silicato líquido fundido, Shibata *et al.* (2002) em metais fundidos, Grossi, Andrade e Ferreira (2004) em aço, Santos, Mummery e Wallwork (2005) em seis tipos de polímeros, Coquard e Panel (2008) em materiais líquidos pastosos e Stankus *et al.* (2008) para aços inoxidável. Mesmo assim, ainda existe a dificuldade relacionada ao custo para aumentar a aplicação deste método.

A seguir são apresentados trabalhos onde as técnicas utilizadas foram alteradas ou desenvolvidas com o intuito de atender a necessidade pontual, como por exemplo, reduzir o tempo de resposta, melhorar a precisão e confiabilidade dos resultados, modificar as condições de contorno, entre outros.

Taktak, Beck e Scott (1993) desenvolveram uma metodologia para determinar as condições ideais dos experimentos para estimar λ e α de uma matriz de fibra de carbono e epóxi com alta confiabilidade. O aparato experimental foi desenvolvido com base nas análises da posição do termopar com relação ao aquecedor, período do experimento e tempo de aquecimento, sendo que estes estudos foram guiados pelo conceito de sensibilidade e do determinante da matriz de sensibilidade. Desta forma a bancada experimental foi constituída por uma amostra com condição de fluxo prescrito na superfície superior, temperatura prescrita na superfície oposta e termopares em ambas as superfícies. A contribuição deste trabalho refere-se à conclusão de que para determinar as propriedades com maior confiabilidade faz-se necessário maximizar os coeficientes de sensibilidade e o determinante da matriz de

sensibilidade, e neste trabalho, a maximização ocorreu realizando a coleta de temperatura perto do fluxo de calor com a aplicação de calor em um curto período de tempo.

No trabalho apresentado por Garnier, Delaunay e Beck (1994) uma amostra de epóxi foi caracterizada pela aplicação da técnica de estimação de parâmetros e as propriedades estimadas de maneira simultânea foram a condutividade térmica e a capacidade de calor volumétrica. O diferencial deste trabalho foi a abordagem realizada que permitiu a medição do fluxo de calor e da temperatura em ambas as superfícies da amostra. Essa abordagem foi possível devido ao aparato experimental ser constituído de um aquecedor entre duas amostras de epóxi que estavam em contato direto com placas de alumínio mantendo a condição de temperatura prescrita. Além disso, apresentou-se neste trabalho a importância da correta aplicação dos coeficientes de sensibilidade para definir de maneira mais precisa a configuração do experimento.

Dowding *et al.* (1995) caracterizaram um composto de carbono-carbono estimando λ e ρc_p simultaneamente e com dependência da temperatura, pela aplicação de uma técnica sequencial em experimentos transientes. O modelo unidimensional foi reproduzido pela montagem simétrica constituída de uma amostra entre o aquecedor e uma placa de cerâmica com a função de isolamento, com uma disposição variada de termopares com o intuito de entender a influência de sua localização pelo coeficiente de sensibilidade. A contribuição deste trabalho refere-se a seguinte conclusão: quando a soma ponto a ponto dos coeficientes de sensibilidade de λ e ρc_p normalizados for igual ao gradiente de temperatura, considerando as condições de contorno fluxo prescrito e isolamento, atingiu-se a melhor configuração experimental.

Sawaf, Özisik e Jarny (1995) estimaram numericamente a condutividade térmica e a capacidade de calor volumétrica, variando com a temperatura, de um sólido. Neste caso, utilizou-se dados numéricos, onde a temperatura foi obtida da solução de um modelo bidimensional de condução de calor transiente com a adição de erros aleatórios. Além disso, utilizou-se o método de Levenberg-Marquardt para solucionar o problema inverso. A contribuição deste trabalho refere-se a precisão satisfatória obtida na estimação das propriedades.

Haji-Sheikh *et al.* (1998) apresentaram uma maneira diferenciada de determinar propriedades termofísicas utilizando métodos periódicos baseados em análises de

sensibilidade no domínio da frequência, pois apenas com o conhecimento da fase foi possível estimar as propriedades λ e α . A condutividade térmica foi estimada com base no fluxo de calor e valores médios de temperatura, enquanto a difusividade térmica foi determinada por uma resposta periódica para a temperatura, gerada pela aplicação de determinadas intensidades de fluxo de calor em diferentes posições da mesma amostra. As desvantagens deste trabalho referem-se à determinação das propriedades em diferentes amostras (Delrin e aço inoxidável AISI 304), o que acarreta em um ruído na análise, além de o aparato experimental apresentar um custo elevado pela necessidade de um fluxo de calor periódico.

Yang (1999) estimou numericamente a condutividade térmica variando com a temperatura aplicando um algoritmo de linearização baseado em um método construído a partir de um grupo de equações não lineares. A determinação da propriedade foi realizada variando-se a equação que rege a propriedade e verificou-se que o erro obtido é pequeno, confirmando a veracidade da técnica aplicada. A vantagem deste trabalho refere-se à rápida convergência e a utilização de apenas uma sonda para coleta das temperaturas.

No trabalho proposto por Blackwell *et al.* (2000) a condutividade térmica do aço inoxidável AISI 304 foi estimada com base em uma técnica em regime transiente. A principal contribuição deste trabalho foi a maneira utilizada para determinar as condições de trabalho como a localização dos termopares, a intensidade do fluxo de calor, o intervalo de tempo, entre outros. Todas as condições foram determinadas através do estudo dos coeficientes de sensibilidade e da maximização do determinante da matriz de sensibilidade apresentada por Beck e Arnold (1977), ou seja, buscou-se otimizar o experimento para garantir as melhores condições para a estimativa da propriedade analisada. A estimativa ocorreu pela minimização de uma função erro baseada nas temperaturas experimental e numérica, onde a temperatura experimental foi obtida pela utilização do aparato experimental composto por um corpo cilíndrico oco.

No trabalho proposto por Aviles-Ramos *et al.* (2001) as propriedades λ e α foram estimadas por um experimento virtual transiente baseado em uma técnica espectral com geração de fluxo de calor periódico. A obtenção da solução analítica da equação da difusão ocorreu pela utilização de um modelo bidimensional no domínio da frequência e do tempo, e as propriedades foram estimadas minimizando uma função erro concebida pela diferença ao quadrado das fases experimental e numérica, resultante do modelo proposto. Este trabalho

apresenta uma desvantagem similar ao trabalho proposto por Haji-Sheik *et al.* (1998), pois aplica-se um fluxo de calor periódico.

Nicolau, Güths e Silva (2002) desenvolveram um método para determinar λ e ρc_p de materiais isolantes com um aparato experimental que inclui fluxímetros em gradientes tangenciais. O aparato é constituído por uma amostra plana entre um aquecedor, que fornece energia, e um sumidouro na superfície oposta para manter a temperatura constante. A condutividade térmica foi estimada pela diferença de temperatura, considerando o experimento em regime permanente. A outra propriedade foi estimada pelos dados do fluxímetro, diferença de temperatura e energia absorvida. Uma desvantagem desta técnica refere-se ao longo período para estimar as propriedades, visto que a condição de regime permanente se faz necessária.

Orlande *et al.* (2002) apresentaram um trabalho para estimar de maneira simultânea λ e ρc_p do Teflon utilizando problemas inversos. O aparato experimental consiste de uma montagem simétrica, onde a amostra está localizada entre um aquecedor e uma placa de alumínio para fornecer a condição de temperatura prescrita. Com o intuito de verificar a condição de simetria, termopares foram dispostos em ambas às superfícies para coletar as temperaturas. Para minimizar a função erro, ou seja, estimar as propriedades, utilizou-se técnicas como o método de Levenberg-Marquardt e o método sequencial de estimação de parâmetros. Devido ao bom resultado encontrado pelas técnicas aplicadas, um trabalho similar apresentado por Huang e Huang (2007) utilizou a técnica de Levenberg-Marquardt para estimar as propriedades de tecidos biológicos.

No trabalho apresentado por Assael e Gialou (2003) determinou-se a condutividade térmica do aço inoxidável AISI 304L desde a temperatura ambiente até 277 °C utilizando o método do Fio Quente. Esta estimativa foi possível devido à modificação proposta na montagem do sensor de fio quente, que consiste na aplicação de uma pasta de silicone e de dois filmes de poliamida entre os dois fio quentes e a amostra a ser estudada. A propriedade analisada foi estimada através da solução de um modelo térmico bidimensional utilizando o método de elementos finitos. O diferencial desta técnica consiste na possibilidade da eliminação do contato elétrico entre a amostra e os fios e também da presença do ar no aparato.

No trabalho apresentado por Lima e Silva, Ong e Guimarães (2003) as propriedades condutividade e difusividade térmica de polímeros foram estimadas. O diferencial deste trabalho é a possibilidade de toda a análise ocorrer a partir de sinais de temperatura e fluxo de calor oriundos de somente uma superfície. Uma vez que as propriedades foram estimadas de maneira independente, utilizou-se duas funções objetivo, sendo que a função baseada na fase foi aplicada para estimar a difusividade térmica, enquanto que a condutividade foi estimada a partir do uso de uma função no domínio do tempo. Para realizar a minimização destas funções objetivo, a técnica BFGS em conjunto com as técnicas de otimização Seção Áurea e da aproximação polinomial foram aplicadas.

Vosteen e Schellschmidt (2003) realizaram a medição das propriedades termofísicas condutividade térmica, capacidade de calor volumétrica e difusividade térmica de inúmeras rochas a temperatura ambiente e à altas temperaturas utilizando o método do fio quente e calorímetros. A limitação nestas medições refere-se ao fato da determinação das propriedades ocorrerem em momentos diferentes, resultando em uma maior incerteza nos resultados obtidos.

No trabalho apresentado por Lahoucine e Khellaf (2004) caracterizou-se o Delrin e o aço inoxidável AISI 304 estimando a difusividade e a condutividade térmica por um método periódico em conjunto com a influência dos termopares considerando um modelo unidimensional. A condutividade térmica foi estimada baseando-se no fator de correção do termopar, enquanto a difusividade foi estimada de maneira similar ao trabalho de Haji-Sheikh *et al.* (1998), pelo atraso de fase. A desvantagem deste trabalho refere-se ao alto custo, visto que existe a condição de fluxo de calor periódico na superfície superior da amostra.

Jannot, Acem e Kanmogne (2006) estimaram a condutividade térmica de materiais metálicos com o desenvolvimento do Método da Placa Quente Transiente. O modelo unidimensional utilizado é representado pelo aparato experimental constituído por uma amostra entre uma placa de material isolante e um aquecedor. A estimativa ocorreu com a minimização de uma função objetivo baseada na temperatura numérica e experimental. Estudos de sensibilidade foram realizados com o objetivo de determinar a melhor configuração para estimar as propriedades, como por exemplo, região de análise e espessura da amostra. Neste ponto, destaca-se uma desvantagem desta técnica, pois para obter propriedades precisas o tamanho da amostra aumenta, acarretando em alto custo e dificuldade na montagem experimental.

No trabalho apresentado por Borges, Lima e Silva e Guimarães (2006), materiais condutores e não condutores foram caracterizados pela estimativa das propriedades α e λ simultaneamente, porém de forma independente. Essa condição foi realizada, pois o trabalho contém funções objetivo diferentes, sendo uma no domínio do tempo e outra no domínio da frequência. Uma desvantagem deste trabalho refere-se a precisão das propriedades estimadas, pois a difusividade térmica é estimada primeiro a partir de um pequeno número de pontos e como a condutividade térmica é obtida a partir deste resultado, uma parcela de incerteza aumenta o erro na determinação desta propriedade.

Imani, Ranjbar e Esmkhani (2006) apresentaram um método para determinar, de forma simultânea e dependente da temperatura, as propriedades condutividade térmica e capacidade de calor volumétrica. O modelo térmico unidimensional utilizado foi resolvido pelo método das diferenças finitas e uma análise inversa de condução de calor em conjunto com um Algoritmo Genético Elitista Modificado (MEGA) foi realizada. A função objetivo de erro quadrático constituída pelas temperaturas experimental e numérica foi minimizada pela aplicação do MEGA em conjunto com o Método de Levenberg-Marquardt. Por fim, a influência do período de aquecimento da amostra foi analisada baseando-se nos coeficientes de sensibilidade.

Khandelwal e Mench (2006) com o intuito de melhorar a predição do campo de temperatura numa célula de combustível, utilizaram o método da placa quente protegida para determinar a condutividade térmica do material Nafion®, variando com a temperatura. Uma contribuição deste trabalho refere-se a análise de incertezas contemplando perda de calor, medições e dimensões das amostras. O resultado deste trabalho indica que com o aumento da temperatura ocorre uma redução da condutividade térmica.

Um método desenvolvido por Ghrib, Yacoubi e Saadallah (2007) baseado no efeito *Mirage* foi aplicado para determinar α e λ de materiais metálicos de maneira simultânea. Para realizar a determinação das propriedades, deve-se coincidir a curva de temperatura teórica com a experimental. O método consiste na comparação da variação da amplitude e da fase do sinal térmico experimental com a raiz quadrada da frequência modular para o caso estudado, o que acarreta em um alto custo experimental.

Tsukada, Fukuyama e Kobatake (2007) determinaram a condutividade térmica de materiais fundidos utilizando uma modificação do método de aquecimento periódico por

laser. Uma função definida pelo atraso de fase entre o fluxo periódico e a variação da temperatura foi aplicada para estimar a propriedade. Para melhorar a precisão das propriedades obtidas, realizou-se um estudo da influência da frequência e da fase com base nos coeficientes de sensibilidade.

Zueco e Alhama (2007) propuseram um método numérico para determinar simultaneamente a condutividade térmica e capacidade de calor volumétrica, variando com a temperatura, de materiais líquidos, utilizando o método da Função Especificada e o método da Simulação de Redes. Para realizar este trabalho, considerou-se um problema de condução/convecção não linear com um fluxo totalmente laminar considerando uma malha bidimensional. Uma desvantagem apresentada neste trabalho refere-se ao fato da necessidade de inserção de pontos de coleta próximos e dentro da região de incidência do fluxo de calor.

Borges, Souza e Guimarães (2008) apresentaram um método diferenciado para estimar α e λ de materiais condutores e não condutores, sendo que esta técnica diferencia-se da apresentada por Borges, Lima e Silva e Guimarães (2006) pela não utilização de transdutores de fluxo de calor e sim uma técnica inversa baseada nas funções de Green para a obtenção do valor do fluxo de calor. Neste trabalho um modelo térmico tridimensional foi caracterizado pelo experimento constituído de um aquecedor posicionado na superfície superior da amostra de aço inoxidável AISI 304 e condições de isolamento nas superfícies restantes.

No trabalho apresentado por Laskar *et al.* (2008) um método fundamentado em uma fonte de calor e uma câmera termográfica foi utilizado para determinar a difusividade térmica do alumínio. O objetivo deste trabalho foi realizar uma comparação com o método Flash, visto que ambos os métodos apresentaram o mesmo procedimento para determinar a propriedade em questão, embora o custo da técnica proposta seja menor. O experimento consiste na utilização da câmera para obter a variação da temperatura em função do tempo na superfície oposta a que está sofrendo a excitação por um aquecedor. Desta forma, com a solução da equação da difusão do calor, incluindo o efeito da convecção, é possível obter a propriedade analisada com pequenos desvios em relação a literatura.

No trabalho apresentado por Mohamed (2008), a estimativa das propriedades λ e ρc_p de alimentos foi realizada utilizando-se a técnica Sequencial de estimação de parâmetros. A contribuição deste trabalho refere-se às análises das configurações do experimento, como por exemplo, a posição do termopar, o parâmetro inicial adotado para a otimização e erros

intrínsecos ao processo. A partir destes dados, um programa computacional baseado na análise da sensibilidade foi desenvolvido e aplicado para orientar a elaboração do aparato experimental constituído basicamente por uma amostra com fluxo de calor constante em uma superfície e condição de isolamento nas demais.

Stankus *et al.* (2008) apresentaram um método diferenciado para a caracterização de uma liga de aço inoxidável, variando a temperatura inicial. A caracterização ocorreu pela obtenção da condutividade e difusividade térmica do material. O método Flash foi utilizado para determinar a difusividade térmica e neste caso evitou-se gerar uma diferença de temperatura maior que 3 °C. Para determinar a condutividade térmica, as propriedades calor específico e massa específica, retirados da literatura, e a difusividade térmica estimada foram utilizadas, o que garantiu um diferencial a este trabalho. Esta abordagem foi adotada frente à dificuldade existente para estimar a troca de calor ocorrida entre a amostra e o ambiente com a variação da temperatura inicial, que por consequência, acarreta em erros na determinação da condutividade térmica.

Tillmann *et al.* (2008) apresentaram uma técnica para estimar as propriedades térmicas de materiais isolantes de forma simultânea e dependente da temperatura. Uma técnica baseada em duas funções objetivo, uma no domínio do tempo e outra no domínio da frequência, foi utilizada para estimar as propriedades. Um modelo térmico unidimensional foi considerado impondo um fluxo de calor em uma das superfícies e adotando uma condição de isolamento na superfície oposta. As propriedades foram estimadas variando a temperatura inicial de 20 °C a 66 °C em uma estufa e limitando a variação em um mesmo experimento à no máximo 5 °C. Além disso, realizou-se uma análise dos coeficientes de sensibilidade para determinar a melhor localização dos sensores de temperatura.

Aksöz *et al.* (2010) utilizaram o método de fluxo de calor radial para determinar a condutividade térmica variando com a temperatura de ligas de alumínio e cobre. A temperatura foi alterada até aproximadamente a temperatura de fusão do material. Para realizar as análises foi necessário que o aparato atingisse a condição de regime permanente, tornando o experimento demorado. Após os testes verificou-se que com o acréscimo da temperatura ocorreu com uma redução linear da condutividade térmica.

Karimi, Li e Teertstra (2010) utilizaram o método da placa quente para determinar a condutividade térmica de materiais de células de combustível com o intuito de melhorar a

eficiência e aplicação deste tipo de fonte de energia. O aparato experimental utilizado incluía fluxímetros para realizar a medição do fluxo de calor imposto. Uma vantagem deste trabalho refere-se a análise de incerteza apresentada. Entretanto, o resultado foi obtido sem que a variação de temperatura fosse analisada.

Sadeghi, Djilali e Bahrami (2011) apresentaram a medição da condutividade térmica de uma amostra de papel de carbono TGP-H-120 com o intuito de melhorar a análise deste material durante a aplicação em uma célula de combustível. Para este trabalho desenvolveu-se uma bancada experimental equipada com termopares, medidor de fluxo de calor, banho termostático e uma câmara à vácuo. Além disso, uma análise de incertezas foi realizada e encontrou-se um erro de no máximo 4 % para a propriedade estimada. Uma desvantagem deste trabalho está relacionada a coleta das medições em regime permanente, o que acarreta em um tempo experimental maior.

Aksöz e Marasli (2012) determinaram a condutividade térmica, de uma liga de prata, variando com a temperatura usando o método do fluxo de calor radial. Este método é normalmente utilizado para amostras cilíndricas. O aparato utilizado consiste de um fio aquecedor localizado no centro da amostra e de um sumidouro na superfície da amostra, gerando um diferencial térmico na direção radial. Após os testes, verificou-se que com o aumento de temperatura, a condutividade térmica do material analisado reduzia.

Zamel, Becker e Wiegmann (2012) estimaram a condutividade térmica de camada microporosas de membrana de polímero eletrolítico de células de combustível com o objetivo de aumentar a eficiência de sua aplicação. Neste trabalho utilizou-se modelos estocásticos para reproduzir uma malha tridimensional e comprovou-se que com o aumento do volume dos poros na estrutura, também ocorre aumento da condutividade térmica.

Aksöz, Öztürk e Marasli (2013) determinaram a condutividade térmica de materiais sólidos, alumínio e zinco, variando com a temperatura considerando no experimento um fluxo de calor linear. Neste caso, a amostra cilíndrica foi posicionada entre uma placa fria e quente e termopares foram dispostos na amostra para a coleta da temperatura. Uma análise de incertezas foi realizada considerando a contribuição de cada elemento do experimento realizado. A maior dificuldade desta técnica está relacionada a medição do fluxo de calor imposto da amostra cilíndrica.

Öztürk *et al.* (2013) determinaram a condutividade térmica de ligas de prata variando a temperatura através de um aparato de fluxo de calor linear, constituído de uma amostra entre uma placa quente e outra fria. Neste trabalho foi apresentada uma análise das incertezas através do método da propagação dos erros. Um ponto importante, refere-se ao fato de que para todos os materiais analisados encontrou-se uma redução na condutividade térmica com o aumento da temperatura. Este trabalho é uma continuação do trabalho apresentado por Aksöz e Marasli (2012).

Após a análise de todos os trabalhos citados anteriormente, notou-se as vantagens e as desvantagens de cada técnica e/ou aplicação. Desta forma, verifica-se que para cada aplicação existe uma técnica que tende a fornecer respostas mais precisas, rápidas e confiáveis, confirmando a necessidade da realização de um amplo estudo nesta área. Além disso, esses motivos proporcionam o desenvolvimento de novas técnicas, uma vez que melhores condições sempre serão almejadas. Por fim, esta revisão bibliográfica contribui com dados e informações importantes e imprescindíveis para o desenvolvimento de uma nova técnica, com o intuito de estimar simultaneamente e variando com a temperatura as propriedades termofísicas, condutividade térmica e capacidade de calor volumétrica de materiais metálicos.

3. METODOLOGIA

A metodologia utilizada para estimar de maneira simultânea λ e ρc_p de materiais metálicos variando com a temperatura foi desenvolvida levando em conta o conteúdo teórico apresentado neste capítulo. Neste trabalho, escolheu-se utilizar o modelo térmico unidimensional, devido a sua facilidade de programação, desenvolvimento da montagem experimental, e pelo fato de apresentar boas condições para estimar as propriedades em questão. O diferencial desta técnica refere-se à estimação simultânea das propriedades, variando com a temperatura, no domínio do tempo.

3.1. Modelo térmico unidimensional (1D)

O modelo térmico unidimensional é caracterizado por uma amostra posicionada entre um aquecedor resistivo e um isolante, conforme Figuras 3.1 e 3.2. Com o objetivo de garantir o fluxo unidirecional, a amostra analisada possui a espessura muito menor que suas outras dimensões, além de ser aplicada uma condição de isolamento em todas as outras superfícies. Além disso, realizou-se um experimento, vide Apêndice B, que comprova esta hipótese.

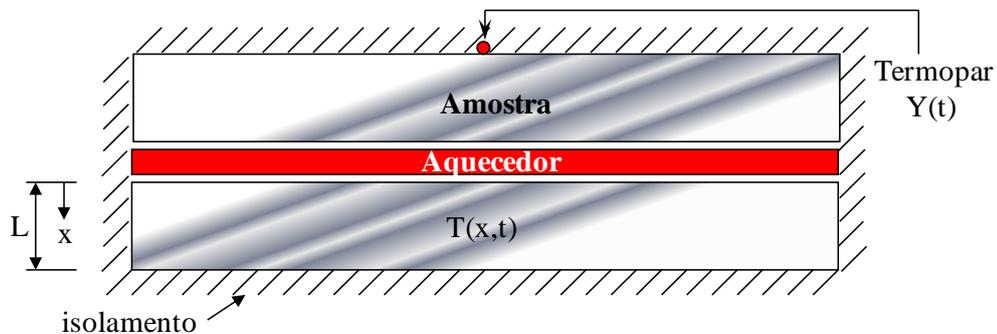


Figura 3.1 – Modelo térmico unidimensional (vista em corte).

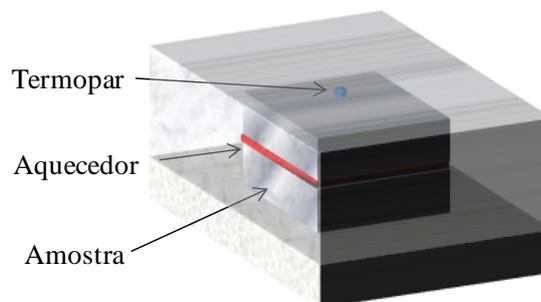


Figura 3.2 – Modelo térmico unidimensional (vista tridimensional).

Desta forma, a equação da difusão de calor unidimensional pode ser escrita por:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda(T) \frac{\partial T(x,t)}{\partial x} \right) = \rho c_p(T) \frac{\partial T(x,t)}{\partial t} \quad (3.1)$$

De acordo com a literatura, existem duas maneiras de estimar as propriedades térmicas variando com a temperatura. A primeira apresentada por Özisik (1993) considera um modelo com a condução de calor não linear, isto é, a resolução do modelo térmico deve ser realizada considerando as propriedades dependentes da temperatura.

A segunda opção é considerar as propriedades térmicas constantes dentro de um intervalo de temperatura, conforme Tillmann *et al.* (2008). Desta maneira, define-se a temperatura de início do experimento (T_0) e estima-se as propriedades limitando a variação de temperatura à no máximo 5 °C. Esse procedimento é realizado até que todos os valores de temperaturas desejados sejam analisados.

Neste trabalho foi adotado o procedimento utilizado por Tillmann *et al.* (2008), devido suas vantagens para a resolução do modelo térmico proposto e por apresentar bons resultados.

Logo, a equação que rege o problema térmico exposto pela Figura 3.1 é a equação da difusão de calor. Como neste trabalho adotou-se a condição de propriedades térmicas constantes, a Eq. (3.1) é simplificada por:

$$\frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial x^2} = \frac{\rho c_p}{\lambda} \frac{\partial T(x,t)}{\partial t} \quad (3.2)$$

sendo as condições de contorno dadas por:

$$-\lambda \frac{\partial T(x,t)}{\partial x} = \phi_1(t) \quad \text{em } x = 0 \quad (3.3)$$

$$\frac{\partial T(x,t)}{\partial x} = 0 \quad \text{em } x = L \quad (3.4)$$

A condição inicial considerada foi:

$$T(x,t) = T_0 \quad \text{em } t = 0 \quad (3.5)$$

sendo x a coordenada cartesiana, t o tempo, ϕ_1 o fluxo de calor imposto no intervalo de tempo determinado, T_0 a temperatura inicial do corpo e L a espessura da amostra.

3.2. Solução do modelo

A partir do modelo térmico proposto é possível obter a distribuição de temperatura numérica resolvendo a equação da difusão (Eq. 3.2), e para isto um código numérico, em linguagem Fortran, foi utilizado. O método escolhido para solucionar a Eq. (3.2) foi o Método das Diferenças Finitas com formulação implícita. Definiu-se utilizar essa formulação com o objetivo de evitar o critério de estabilidade, sendo possível utilizar o mesmo intervalo de tempo utilizado nos experimentos evitando uma possível divergência numérica. Outra vantagem deste método refere-se ao baixo custo computacional quando aplicado em conjunto com Gauss-Seidel para resolver o sistema linear. Em estudos prévios para determinar o número de nós (n_p) a serem considerados para a solução do problema térmico, isto é, o teste de refinamento da malha, concluiu-se que 10 (dez) nós eram suficientes para obter a distribuição de temperatura. A seguir apresenta-se o detalhamento da solução numérica do modelo proposto.

Na Figura 3.3 é representado de maneira esquemática o volume de controle que foi analisado para obter a solução do modelo térmico pela aplicação do balanço de energia. Na superfície superior encontra-se o nó 0 (zero) onde o fluxo de calor é aplicado, na superfície oposta encontra-se a condição de isolamento representada pelo nó n_p e os pontos de 1 até n_p-1 indicam os nós intermediários.

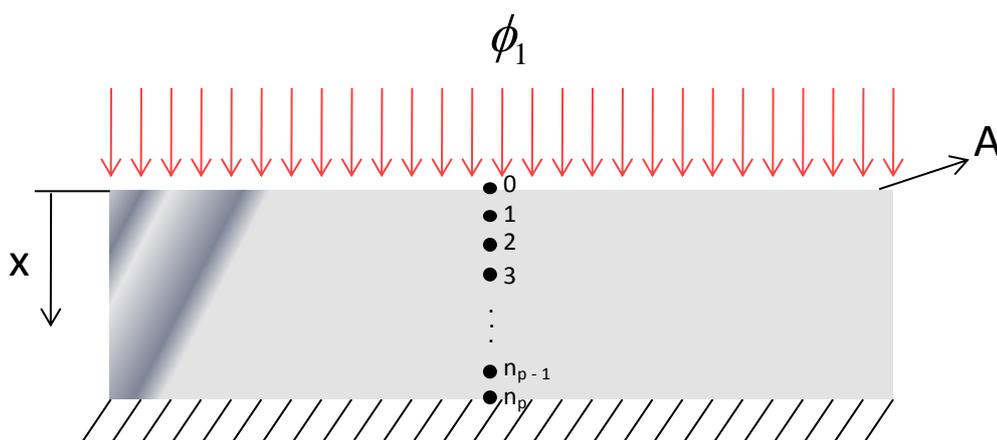


Figura 3.3 – Esquema do balanço de energia.

Desta forma, representa-se o balanço de energia para o problema proposto:

$$\dot{E}_e - \dot{E}_s + \dot{E}_g = \dot{E}_{ac} = \frac{dE_{ac}}{dt} \quad (3.6)$$

sendo, \dot{E}_e a taxa de energia de entrada, \dot{E}_s a taxa de energia de saída, \dot{E}_g a taxa de energia gerada internamente e a \dot{E}_{ac} taxa de energia acumulada.

Sabendo-se que para o problema proposto as taxas de energias referentes à saída e a geração interna são nulas, tem-se:

$$\dot{E}_e = \dot{E}_{ac} \quad (3.7)$$

Com o intuito de simplificar a análise, decidiu-se dividir a amostra em três regiões. Desta forma, analisando-se o balanço de energia em um volume de controle ao redor do nó na superfície com o aquecimento, representado pela Figura 3.4, tem-se:

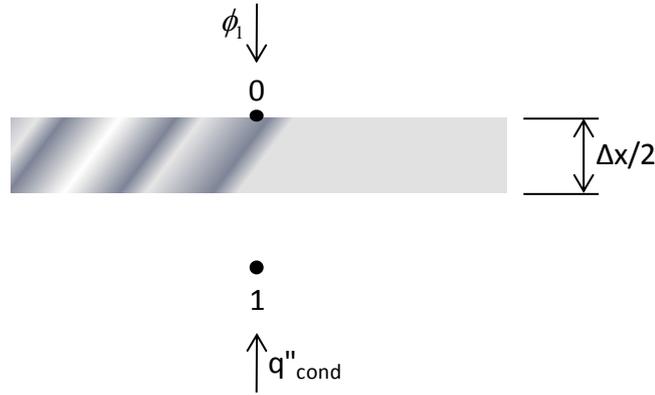


Figura 3.4 – Nó 0 (zero) na superfície onde o fluxo de calor é imposto e nó adjacente 1.

$$\phi_1 A + \lambda A \frac{(T_1^p - T_0^p)}{\Delta x} = \rho c_p A \frac{\Delta x}{2} \frac{(T_0^p - T_0^{p-1})}{\Delta t} \quad (3.8)$$

onde A é a área perpendicular ao fluxo, ρ é a massa específica do material e c_p é o calor específico do material. λ é a condutividade térmica, p refere-se ao instante de tempo atual, Δt o intervalo de tempo e Δx o incremento da malha

Com o objetivo de facilitar o entendimento, a Eq. (3.8) foi reescrita como:

$$T_0^p = \left(2Fo \frac{\phi_1 \cdot \Delta x}{\lambda} + 2FoT_1^p + T_0^{p-1} \right) / (1 + 2Fo) \quad (3.9)$$

onde Fo é o número de Fourier.

Sabendo-se que o número de Fourier é representado por:

$$Fo = \frac{\Delta t \alpha}{(\Delta x)^2} \quad (3.10)$$

sendo α a difusividade térmica do material.

Após realizar um procedimento similar nos nós intermediários, representados pela Figura 3.5, tem-se:

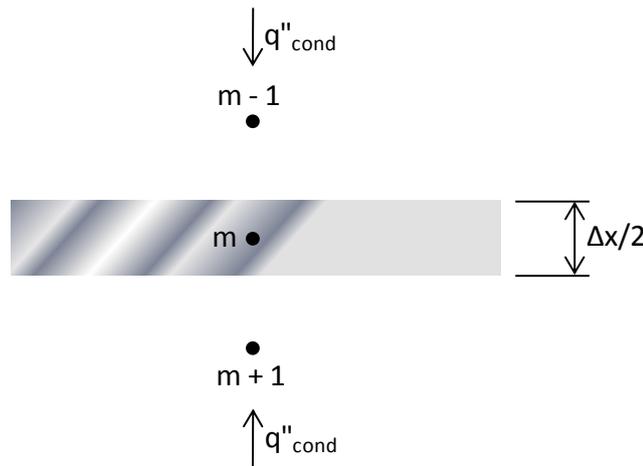


Figura 3.5 – Representação dos nós intermediários.

$$\lambda A \frac{(T_{m-1}^p - T_m^p)}{\Delta x} + \lambda A \frac{(T_{m+1}^p - T_m^p)}{\Delta x} = \rho c_p A \Delta x \frac{(T_m^p - T_m^{p-1})}{\Delta t} \quad (3.11)$$

sendo m o incremento de posição.

Reescrevendo a Eq. (3.11), obtém-se a equação da condução de calor para os nós intermediários:

$$T_m^p = (T_m^{p-1} + Fo(T_{m+1}^p + T_{m-1}^p)) / (1 + 2Fo) \quad (3.12)$$

E por último, obtém-se a equação para o nó que possui a condição de isolamento, representado pela Figura 3.6, como:

$$\lambda A \frac{(T_{n_{p-1}}^p - T_{n_p}^p)}{\Delta x} = \rho c_p A \frac{\Delta x}{2} \frac{(T_{n_p}^p - T_{n_p}^{p-1})}{\Delta t} \quad (3.13)$$

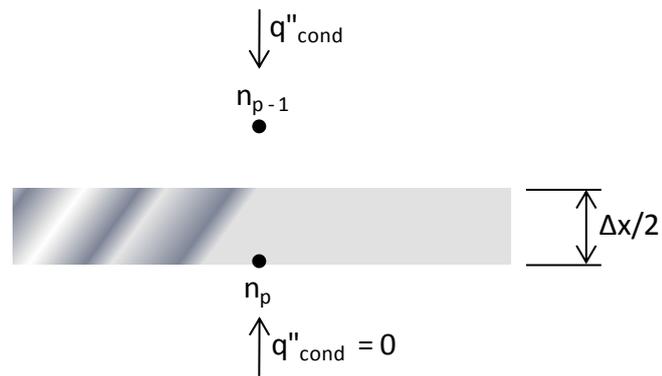


Figura 3.6 – Nó n_p na superfície onde é imposta a condição de isolamento e nó anterior n_{p-1} .

Reescrevendo a Eq. (3.13), obtém-se:

$$T_{n_p}^p = (T_{n_p}^{p-1} + 2FoT_{n_{p-1}}^p)/(1 + 2Fo) \quad (3.14)$$

Por fim, na Figura 3.7 é apresentado o algoritmo utilizado para o cálculo da temperatura para o caso unidimensional.

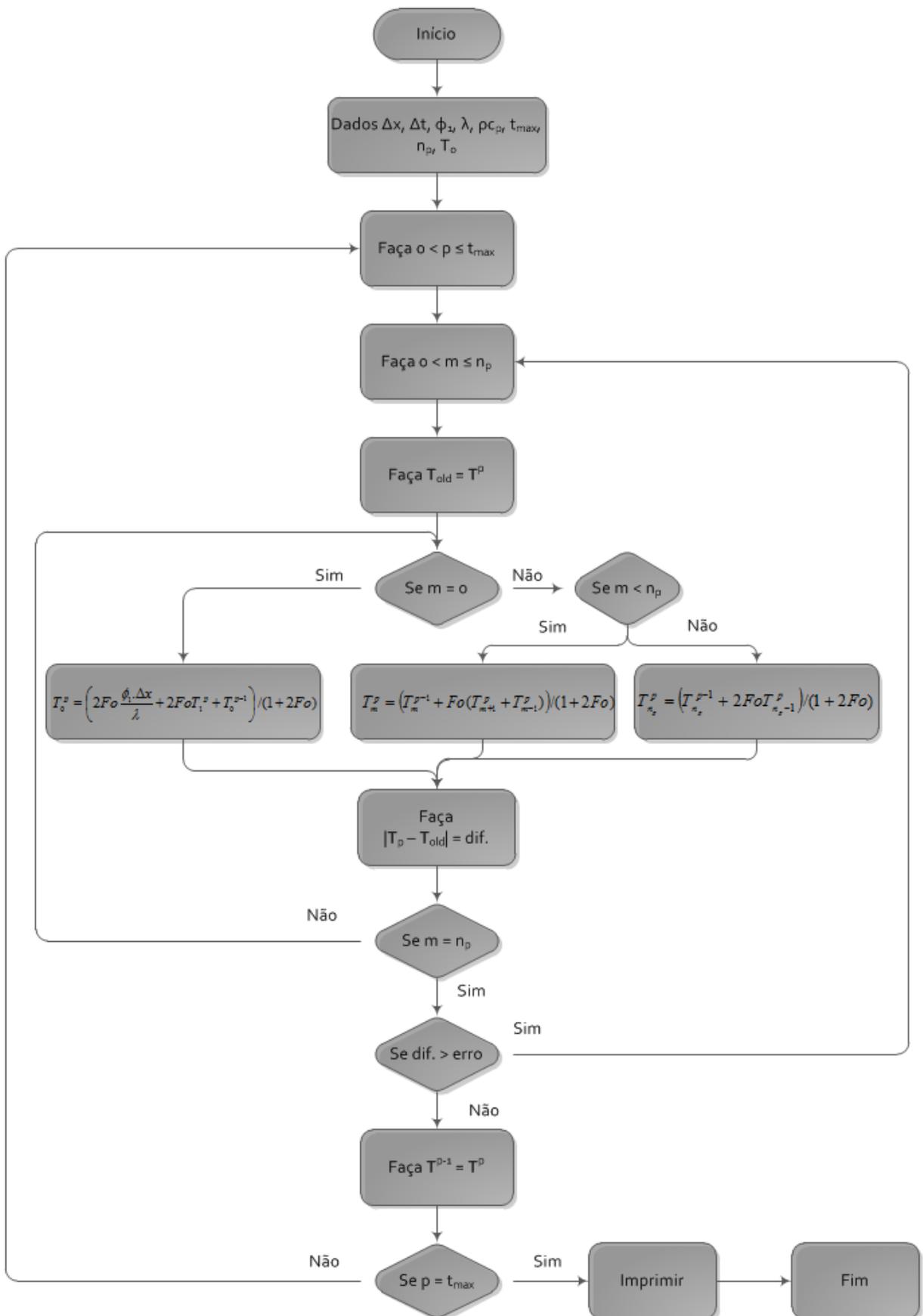


Figura 3.7 – Algoritmo utilizado para calcular numericamente a distribuição de temperatura na amostra.

O sistema linear constituído pelo conjunto de equações para cada ponto da malha pode ser resolvido com base nos seguintes dados: fluxo de calor prescrito, temperatura inicial, tempo total do experimento, incremento de tempo, espessura da amostra, número de pontos da malha, incremento da malha, condutividade térmica e capacidade de calor volumétrica.

O motivo da escolha do método Gauss-Seidel refere-se à possibilidade de se utilizar as temperaturas do tempo anterior quando se encontra uma incógnita no tempo atual. Por exemplo, na equação para calcular a temperatura do nó na superfície (T_0^p) é necessário conhecer a temperatura do ponto seguinte para o mesmo instante de tempo (T_1^p) e como este valor não é conhecido, o método utiliza o valor da temperatura no instante de tempo anterior (T_1^{p-1}). Esta característica facilita a resolução do sistema, pois é possível resolvê-lo equação por equação, ou seja, não é necessário aplicar um *solver* para encontrar a solução das matrizes. Devido à utilização de temperaturas de tempos anteriores, faz-se necessário utilizar um critério de convergência para minimizar os erros de cálculos, sendo que neste trabalho o critério estabelecido é definido por: $|T_{old} - T^p| < \text{diferença} = 1 \times 10^{-10}$. A partir deste critério, o *software* só executa a próxima iteração caso a magnitude da diferença em módulo seja menor que o valor do erro. Se esta diferença for maior, o código atualiza a temperatura obtida e inicia a próxima iteração para dar procedimento nos cálculos. O programa só é finalizado quando t se torna igual a t_{max} , e neste momento, as temperaturas são gravadas em um arquivo.

Na Tabela 3.1 são apresentados os valores dos parâmetros utilizados para o cálculo das temperaturas para uma das amostras (Aço AISI 1045).

Tabela 3.1 – Valores dos parâmetros utilizados para o cálculo da temperatura para o Aço AISI 1045.

Parâmetro	Valor	Parâmetro	Valor	Parâmetro	Valor
n_p	10	Δt	0,1 [s]	t_{max}	80 [s]
L	$11,94 \times 10^{-3}$ [m]	$\phi_1(0 \text{ a } t')$	7709 [W/m ²]	T_0	20,0 [°C]
Δx	$1,33 \times 10^{-3}$ [m]	$\phi_1(t' \text{ a } t'')$	1854 [W/m ²]	Tempo de processamento	2,2 [s]

3.3. Análise da melhor configuração do experimento para determinar as propriedades λ e ρc_p

Com o objetivo de determinar as condições ideais para estimar as propriedades, realizou-se um estudo dos coeficientes de sensibilidade da condutividade térmica e capacidade de calor volumétrica da amostra analisada. O estudo realizado fornece informações com precisão para definir características, como por exemplo, tempo do experimento, intervalo de tempo para a coleta de temperatura, posicionamento dos termopares, intensidade do fluxo de calor, tempo de incidência do fluxo de calor, entre outros. Para conseguir estimar as propriedades com maior precisão e confiabilidade, os coeficientes de sensibilidade devem apresentar a maior magnitude possível, entretanto, se a diferença entre eles for grande, pode-se encontrar dificuldades na minimização da função erro para estimar as propriedades de forma simultânea.

Pode-se definir o coeficiente de sensibilidade como sendo a primeira derivada parcial da temperatura em relação ao parâmetro que se deseja analisar (λ e ρc_p). Assim, tem-se:

$$X_{ij} = P_i \frac{\partial T_j}{\partial P_i} \quad (3.15)$$

onde T é a temperatura calculada numericamente, P o parâmetro que deseja-se analisar (ρc_p ou λ), i o contador para o número de parâmetros e j o contador para o número de pontos. Visto que neste trabalho determinam-se duas propriedades, tem-se: $i = 1$ para ρc_p e $i = 2$ para λ .

A seguir demonstra-se como os coeficientes de sensibilidade foram calculados e validados. Aplicando-se o conceito de derivada numérica na Eq. (3.15) é possível calcular os coeficientes de sensibilidade, como:

$$X_{ij} = P_i \frac{T_j(P_i) - T_j(P_i + \delta)}{\delta} \quad (3.16)$$

onde $\delta = P_i 10^{-4}$.

Para realizar a validação dos coeficientes obtidos na formulação numérica, uma comparação com os coeficientes resultantes da formulação analítica se faz necessária. Com base na afirmação de que a primeira derivada parcial da temperatura em função do parâmetro

a ser analisado fornece o coeficiente de sensibilidade, deriva-se a Equação (A.10) obtida aplicando-se as Funções de Green (Cole *et al.*, 2011), em relação as propriedades a serem estimadas. Desta maneira, após algumas operações algébricas, obtém-se os coeficientes de sensibilidade de forma analítica. Logo:

$$X_{1j} = \rho c_p \frac{\partial T(L,t)}{\partial \rho c_p} = -\frac{\phi_1 t'}{\rho c_p^2 L} \left[1 + 2 \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k \left(e^{-\frac{k^2 \pi^2 \lambda}{\rho c_p L^2} t'} \right) \right] - \frac{\phi_2 t''}{\rho c_p^2 L} \left[1 + 2 \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k \left(e^{-\frac{k^2 \pi^2 \lambda}{\rho c_p L^2} t''} \right) \right] \quad (3.17)$$

$$X_{2j} = \lambda \frac{\partial T(L,t)}{\partial \lambda} = \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k \left[\frac{2\phi_1 L}{k^2 \pi^2 \lambda^2} \left(e^{-\frac{k^2 \pi^2 \lambda}{\rho c_p L^2} t'} - 1 \right) + \frac{2\phi_1 t'}{\lambda \rho c_p L} \left(e^{-\frac{k^2 \pi^2 \lambda}{\rho c_p L^2} t'} \right) \right] + \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k \left[\frac{2\phi_2 L}{k^2 \pi^2 \lambda^2} \left(e^{-\frac{k^2 \pi^2 \lambda}{\rho c_p L^2} t''} - 1 \right) + \frac{2\phi_2 t''}{\lambda \rho c_p L} \left(e^{-\frac{k^2 \pi^2 \lambda}{\rho c_p L^2} t''} \right) \right] \quad (3.18)$$

onde $k = 1, 2, \dots, \infty$ para ambas as equações.

Utilizando a metodologia desenvolvida por Carollo, Lima e Silva e Lima e Silva (2012) verificou-se que o fluxo de calor apresenta três intensidades com períodos de incidência pré-estabelecidos, conforme Apêndice A. É importante ressaltar, que dentro de cada período, o fluxo de calor aplicado é constante. Analisando a Figura 3.8 percebe-se o comportamento descrito, pois no início da curva existe uma inclinação mais íngreme (maior intensidade de fluxo de calor) seguida de uma inclinação ligeiramente menor (menor intensidade de fluxo de calor) e por fim encontra-se o período onde não existe incidência do fluxo de calor.

Nas Figuras 3.8 e 3.9 demonstram-se os coeficientes de sensibilidade para ρc_p e λ obtidos através da análise numérica e analítica.

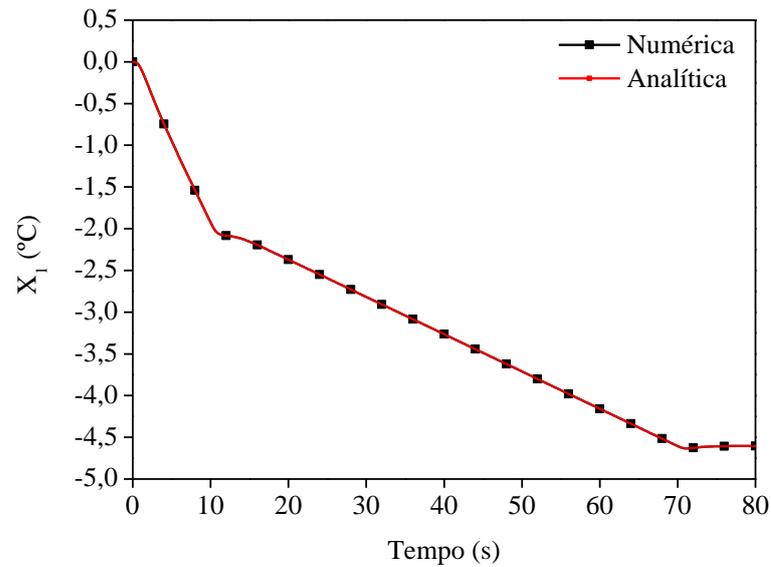


Figura 3.8 – Comparação entre os coeficientes de sensibilidade do ρc_p calculados a partir das análises numérica e analítica.

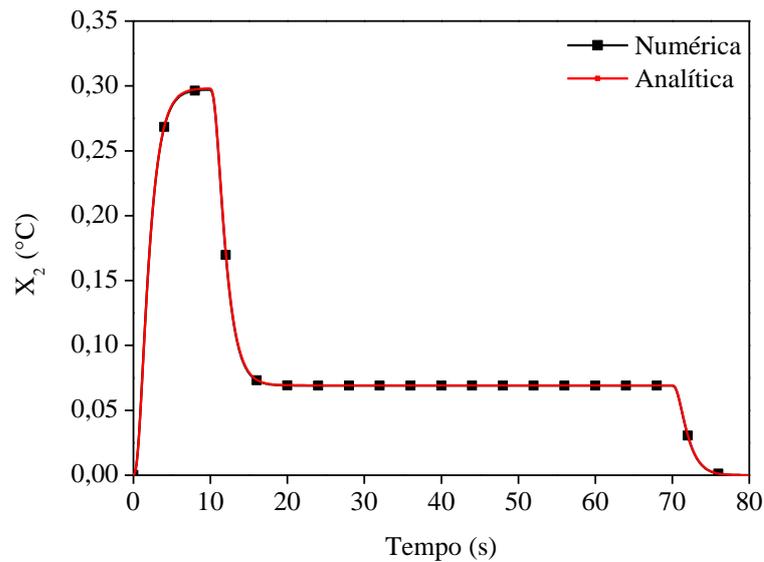


Figura 3.9 – Comparação entre os coeficientes de sensibilidade do λ calculados a partir das análises numérica e analítica.

Analisando as Figuras. 3.8 e 3.9 percebe-se uma boa concordância entre as curvas numérica e analítica e um comportamento característico para cada propriedade. Logo, para a condutividade térmica, ocorre um acréscimo da sensibilidade com o fluxo de calor inicial de maior intensidade, após a redução deste fluxo, percebe-se a redução da sensibilidade e por fim, com o desligamento da fonte, a sensibilidade iguala-se a zero. Para a capacidade de calor volumétrica percebe-se o crescimento da sensibilidade conforme a aplicação do fluxo de calor, entretanto a intensidade é alterada quando se modifica o fluxo de calor. E por fim, a estabilização quando ocorre o desligamento da fonte de calor.

Para confirmar a boa concordância, nas Figuras 3.10 e 3.11 apresentam-se os desvios entre os coeficientes, isto é, a diferença entre os resultados da análise analítica em relação a numérica.

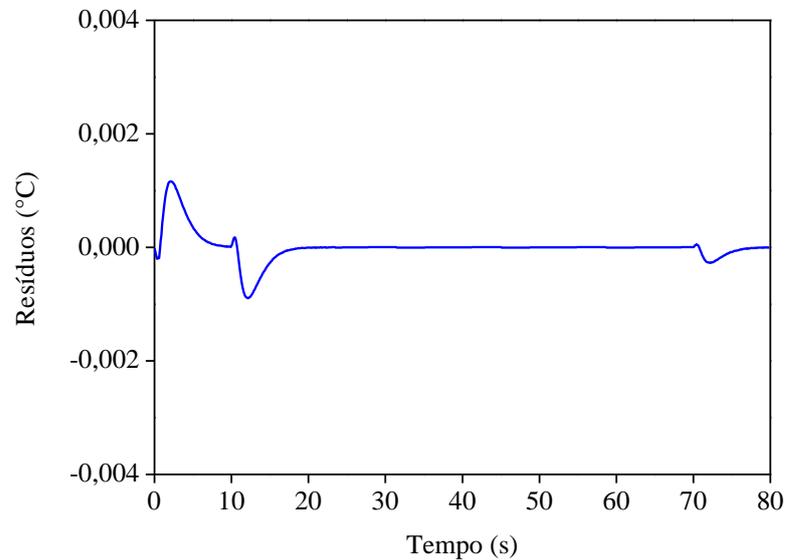


Figura 3.10 – Diferença entre os coeficientes de sensibilidade calculados para o ρc_p .

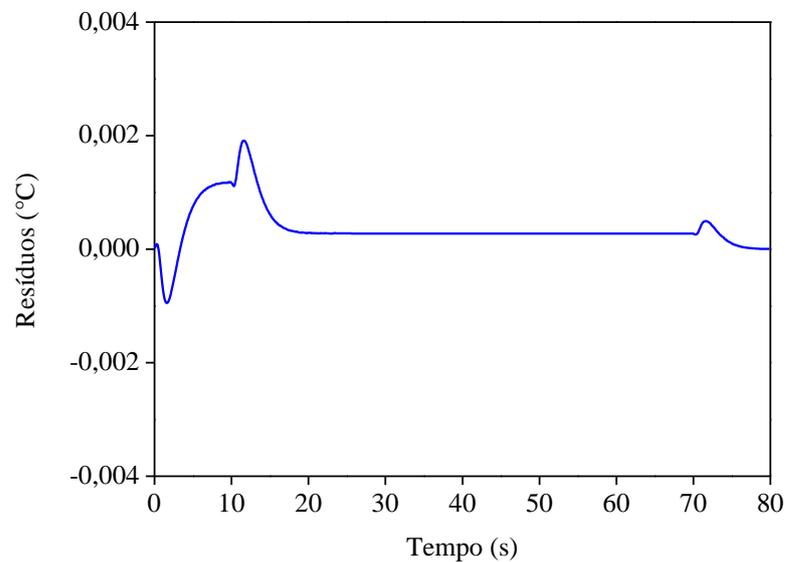


Figura 3.11 – Diferença entre os coeficientes de sensibilidade calculados para o λ .

Após analisar os resultados das comparações dos coeficientes, conclui-se que as curvas dos coeficientes de sensibilidade são muito similares (Figs. 3.8 e 3.9), pois apresentam uma diferença de no máximo 0,004 °C (Figs. 3.10 e 3.11). Desta forma, afirma-se que a metodologia numérica aplicada para calcular a sensibilidade das propriedades analisadas está validada, ou seja, apresentou bons resultados e pode ser aplicada.

3.4. Estimativa da condutividade térmica e da capacidade de calor volumétrica

Para realizar a estimativa das propriedades térmicas analisadas deve-se definir uma função objetivo que considera a temperatura experimental e a temperatura numérica. Desta forma, normalmente define-se essa função como sendo a diferença ao quadrado entre essas temperaturas. Entretanto, existe a resistência térmica do aquecedor resistivo, que pode ser considerada constante e permanente, ou seja, um erro sistemático. Assim esta influência é considerada originando um erro inicial, e por consequência, a função erro nunca será zero. Logo, tem-se a seguinte equação:

$$F = (R_c^n \phi_m)^2 + \sum_{j=1}^n (Y_j - T_j)^2 \quad (3.19)$$

sendo n o número total de pontos, Y a temperatura experimental, R_c^n a resistência térmica do aquecedor resistivo e ϕ_m a média ponderada do fluxo de calor aplicado.

Para estimar as propriedades analisadas deve-se minimizar a função objetivo (Eq. 3.19) e esta função é minimizada quando se encontra o valor ótimo para λ e ρc_p . Para obter estes valores, utiliza-se técnicas de otimização. Neste trabalho optou-se pela técnica sequencial de otimização BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno) apresentada em Vanderplaats (2005), considerada uma particularidade dos Métodos da Métrica Variável. Cita-se como vantagens desta técnica a facilidade para otimizar com inúmeras variáveis de projeto e a alta velocidade de convergência. Entretanto, por se tratar de um método de primeira ordem, deve-se conhecer o gradiente da função objetivo. Nesta etapa, escolheu-se usar o pacote computacional *Design Optimization Tools* – DOT (VANDERPLAATS, 2005) para realizar o cálculo do gradiente. O detalhamento do método escolhido é apresentado a seguir.

Uma característica importante da técnica BFGS refere-se ao fato de usar informações de períodos anteriores alocados em um vetor e não em um escalar. Desta forma, conclui-se que este método é mais preciso e confiável, pois pode armazenar mais informações (VANDERPLAATS, 2005).

Define-se como conceito básico deste método a criação de um vetor próximo do inverso de uma matriz Hessiana ao longo da otimização. A direção de busca na iteração q é dada como sendo:

$$\vec{S}^q = -\overline{\overline{H}} \vec{\nabla} F(\vec{B}^{q-1}) \quad (3.20)$$

onde $\overline{\overline{H}}$ é uma aproximação da inversa da matriz Hessiana durante o processo de otimização, \vec{B} é o vetor das variáveis e $\vec{\nabla} F$ é o gradiente da função objetivo.

Ao aplicar a direção de busca \vec{S}^q em conjunto com a Eq. (3.21), apresentada a seguir, realiza-se o processo de busca unidimensional.

$$\vec{B}^q = \vec{B}^{q-1} + \beta_q^* \vec{S}^{q-1} \quad (3.21)$$

onde β_q^* é um escalar multiplicador.

No início do processo de otimização, a matriz $\overline{\overline{H}}$ é definida como sendo uma matriz identidade, pois assim a direção de busca do primeiro passo é a direção do Método da Máxima Descida (VANDERPLAATS, 2005). Porém, ao término da iteração q , obtém-se uma matriz $\overline{\overline{H}}$ atualizada baseada na equação:

$$\overline{\overline{H}}^{q+1} = \overline{\overline{H}}^q + \overline{\overline{D}}^q \quad (3.22)$$

onde $\overline{\overline{D}}$ é uma matriz simétrica de atualização. Esta matriz é definida pela seguinte equação:

$$\overline{\overline{D}}^q = \frac{\sigma + \theta\tau}{\sigma^2} \vec{p} \vec{p}^T + \frac{\theta - 1}{\tau} \overline{\overline{H}}^q \vec{y} (\overline{\overline{H}}^q \vec{y})^T - \frac{\theta}{\sigma} [\overline{\overline{H}}^q \vec{y} \vec{p}^T + \vec{p} (\overline{\overline{H}}^q \vec{y})^T] \quad (3.23)$$

onde \vec{p} e \vec{y} são vetores e τ e σ são escalares, definidos por:

$$\vec{p} = \vec{B}^q - \vec{B}^{q-1} \quad (3.24)$$

$$\vec{y} = \vec{\nabla} F(\vec{B}^q) - \vec{\nabla} F(\vec{B}^{q-1}) \quad (3.25)$$

$$\sigma = p \overset{\rightarrow T}{\rightarrow} y \quad (3.26)$$

$$\tau = y \overset{\rightarrow T}{=} H \overset{q}{\rightarrow} y \quad (3.27)$$

Resumindo, a Eq. (3.23) representa parte do Método da Métrica Variável, sendo Davidon-Fletcher-Powell (DFP) e Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno (BFGS) os dois métodos mais populares. Logo, para escolher qual procedimento utilizar, deve-se alterar o valor do parâmetro θ , sendo $\theta = 0$ para DFP e $\theta = 1$ para BFGS.

Na Tabela 3.2 encontra-se os parâmetros aplicados no método BFGS e a Fig. 3.12 apresenta o algoritmo para os métodos DFP e BFGS.

Tabela 3.2 – Parâmetros utilizados no método BFGS.

Parâmetro	Valor
Valor inicial para λ	30 [W/(mK)]
Limite inferior para λ	1 [W/(mK)]
Limite superior para λ	100 [W/(mK)]
Valor inicial para ρc_p	5×10^6 [Ws/(m ³ K)]
Limite inferior para ρc_p	1×10^5 [Ws/(m ³ K)]
Limite superior para ρc_p	1×10^7 [Ws/(m ³ K)]
Tempo de processamento	5,3 [s]
Número de iterações	11 [-]

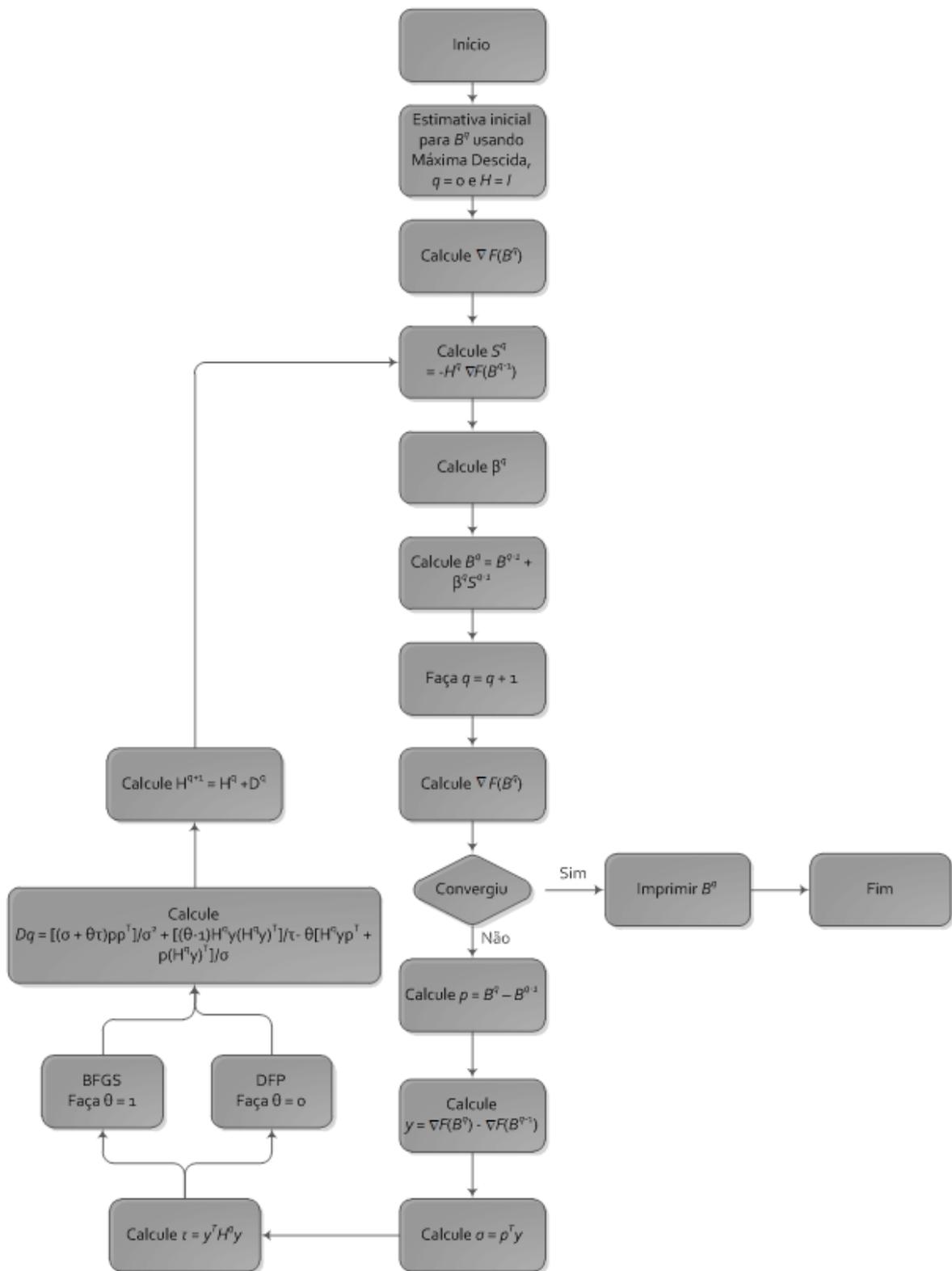


Figura 3.12 – Algoritmo das técnicas BFGS e DFP.

4. MONTAGEM EXPERIMENTAL

4.1. Descrição da bancada de teste

Na Figura 4.1 pode-se visualizar o aparato experimental desenvolvido para estimar as propriedades térmicas dos Aços AISI 1045 e Inoxidável AISI 304, em função da temperatura.

Nesta bancada o micro computador é responsável por controlar a aquisição de dados. A aquisição de dados realiza a coleta dos dados de temperatura utilizando um termopar posicionado na superfície oposta ao aquecimento. A fonte de corrente contínua é conectada ao aquecedor resistivo e os multímetros são utilizados com o intuito de melhorar a precisão dos valores de corrente e resistência. Todo o conjunto aquecedor-amostras-isolamento é inserido dentro de uma estufa responsável por prover a temperatura inicial necessária.

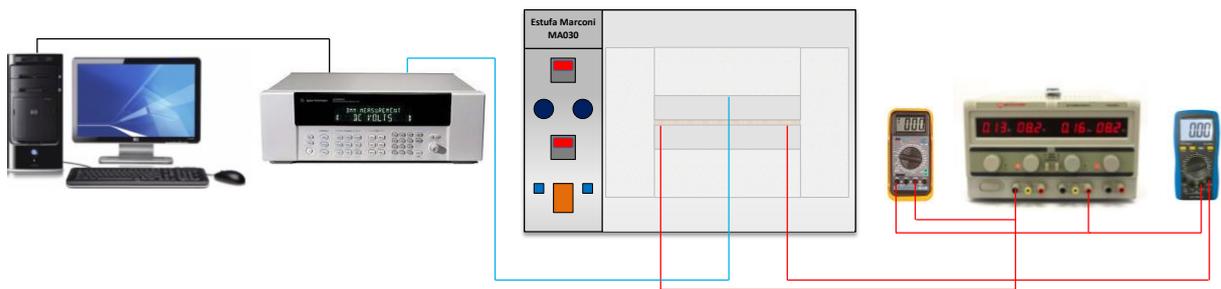


Figura 4.1 – Esquema da bancada utilizada para determinar as propriedades.

A placa de Aço AISI 1045 analisada, Figura 4.2, possui as seguintes dimensões: 99,90 mm x 99,90 mm x 11,49 mm. Na Figura 4.3 é mostrado um esquema de um placa de Aço Inoxidável AISI 304 com as seguintes dimensões: 49,90 mm x 49,90 mm x 10,45 mm. Essas dimensões foram determinadas para melhorar a condição unidimensional do fluxo de calor imposto à amostra. Ambas as amostras foram retificadas para garantir uma melhor superfície de contato, reduzindo a incidência de interstícios de ar, que podem interferir na condição de fluxo prescrito.

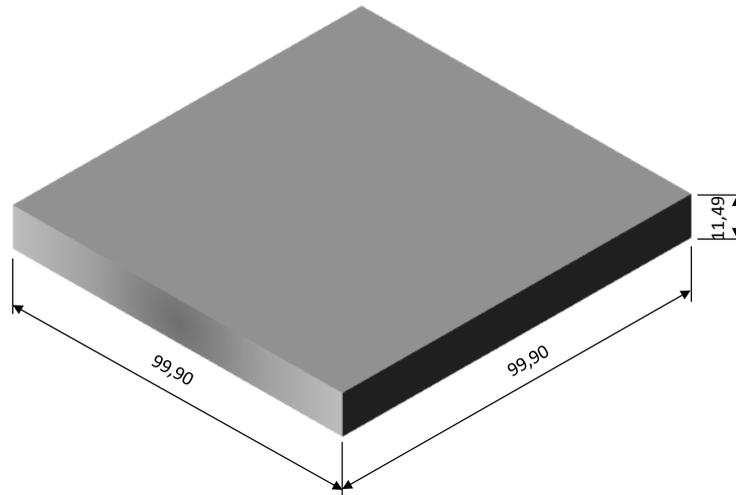


Figura 4.2 – Dimensões em milímetros das amostras de Aço AISI 1045.

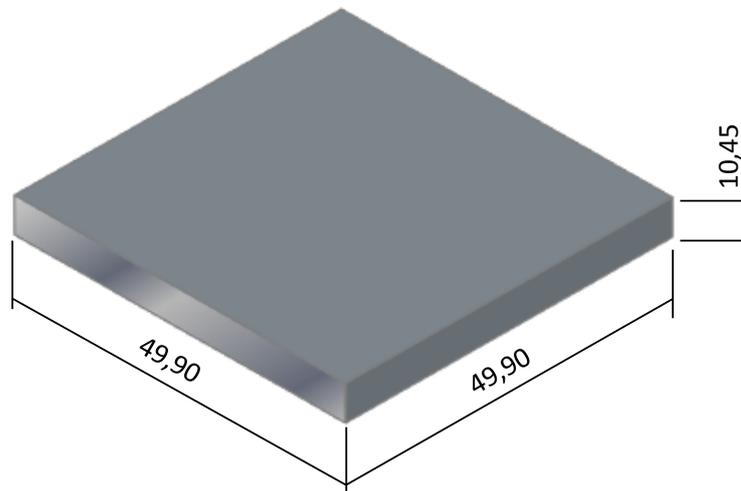


Figura 4.3 – Dimensões em milímetros das amostras de Aço Inoxidável AISI 304.

Na Figura 4.4 é mostrado o aquecedor resistivo de kapton utilizado no presente trabalho. O aquecedor utilizado para analisar o Aço AISI 1045 apresenta uma resistência de $24,4 \Omega$ e dimensões de $99,50 \text{ mm} \times 99,50 \text{ mm} \times 0,20 \text{ mm}$, enquanto o aquecedor aplicado para o Aço Inoxidável AISI 304 possui uma resistência de $15,2 \Omega$ e dimensões de $48,50 \text{ mm} \times 48,50 \text{ mm} \times 0,20 \text{ mm}$. O motivo de usar estes aquecedores refere-se à sua pequena espessura que permite um aquecimento uniforme em toda sua superfície em um curto período de tempo, conforme Omega (2000).



Figura 4.4 – Aquecedor Resistivo: (a) vista superior e (b) vista inferior.

Apresenta-se na Figura 4.5 a fonte de alimentação digital Instrutemp ST 305D-II utilizada para fornecer a energia necessária ao aquecedor resistivo de kapton. A razão para a escolha desta fonte de alimentação é a possibilidade de configurá-la para prover diferentes intensidades de potência utilizando o chaveamento para as configurações independente, em série e em paralelo. Esta característica é importante, pois para alcançar as melhores condições para estimar de maneira simultânea as propriedades, conforme os coeficientes de sensibilidade, diferentes intensidades de fluxo de calor durante um mesmo experimento devem ser aplicadas. Através destes coeficientes, definiu-se que a maior intensidade de fluxo de calor foi aplicada para estimar a condutividade térmica e para isso a configuração em série foi utilizada. Para determinar a capacidade de calor volumétrica, a menor intensidade de calor foi aplicada e, portanto, a configuração em paralelo foi aplicada.



Figura 4.5 – Fonte de alimentação Instrutemp.

Embora a fonte de alimentação indique os valores de corrente e tensão aplicados, multímetros, representados pelas Figuras 4.6 e 4.7, foram utilizados para minimizar os erros na medição do fluxo de calor. Desta forma, o cálculo do fluxo de calor aplicado foi baseado na resistência elétrica do aquecedor e na corrente aplicada. Os multímetros utilizados foram: Minipa ET-2042C e Instrutherm MD-380 previamente calibrados. Outra ação, refere-se à realização de uma montagem simétrica com o intuito de minimizar o erro da condição de isolamento em somente uma superfície e evitar a necessidade da medição do fluxo pela aplicação de transdutores de fluxo de calor, que aumentam a resistência térmica de contato e consequentemente, aumentam a incerteza dos resultados.



Figura 4.6 – Multímetro Instrutherm.



Figura 4.7 – Multímetro Minipa.

Diferente do trabalho apresentado por Carollo, Lima e Silva e Lima e Silva (2012) optou-se por não utilizar pasta térmica para tentar melhorar o contato entre o aquecedor resistivo e a amostra. A condutividade térmica das melhores pastas, como por exemplo, a Arctic Silver 5, estão em torno de 9 W/mK (Arctic Silver Incorporated, 2010), ou seja, a sua aplicação pode gerar um ruído e interferir no resultado da estimativa das propriedades. Desta forma, para o presente trabalho, optou-se por retificar as amostras com o intuito de reduzir a rugosidade superficial, quando comparado ao processo de fresamento, e por consequência, foi possível reduzir significativamente a resistência térmica em função do espaçamento entre o aquecedor e a amostra na montagem.

Com o objetivo de ajudar a manter a condição de calor unidirecional e reduzir a perda de energia por convecção ao ambiente interno da estufa, o conjunto de amostras-aquecedor foi isolado com Placas de Fibra Cerâmica, com massa específica de 300 kg/m^3 de 50,8 mm de espessura. A vantagem da utilização desta placa está em sua baixa condutividade térmica, em torno de $0,18 \text{ W/mK}$ (FIBERSEALS, 2015).

Um termopar do tipo T (Cobre/Constantan – 30 AWG) foi soldado na superfície oposta ao aquecimento da amostra usando a descarga capacitiva (BR1020150316763 – Solicitação de patente), representada na Figura 4.8. Este termopar foi calibrado utilizando um banho calibrador de temperatura Marconi MA 184, previamente calibrado, com uma resolução de $\pm 0,01 \text{ K}$ (Figura 4.9). A aquisição Agilent 34980A, apresentada na Figura 4.10, previamente calibrada e controlada por um micro computador, foi utilizada para coletar as temperaturas em conjunto com o termopar tipo T.

Devido à necessidade de variar e controlar a temperatura inicial do experimento, o conjunto aquecedor-amostras-isolantes foi colocado dentro de uma estufa Marconi MA030 calibrada, representada pela Figura 4.11. Além disso, para evitar ruídos referente a temperatura ambiente, todos os experimentos foram executados com a temperatura do laboratório controlada por um ar condicionado à $25 \text{ }^\circ\text{C}$.



Figura 4.8 – Descarga Capacitiva.



Figura 4.9 – Banho Termostático Marconi.



Figura 4.10 – Aquisição Agilent 34980A.



Figura 4.11 – Estufa Marconi MA 030.

4.2. Detalhamento da montagem das amostras

O esquema de montagem do conjunto aquecedor-amostras-isolante é apresentado nas Figuras 4.12 a 4.15. São mostradas nestas figuras as dimensões em milímetros e a localização do termopar utilizado para estimar as propriedades do Aço AISI 1045 (o mesmo procedimento é adotado para o Aço Inoxidável AISI 304). É importante ressaltar que a posição do termopar foi definida no centro da superfície oposta ao aquecimento. Esta posição foi escolhida com o objetivo de não permitir interstícios de ar entre o aquecedor e a amostra, uma vez que estes interstícios são gerados pelo termopar quando posicionado na superfície de aquecimento.

A Figura 4.12 mostra a vista superior da montagem com o intuito de comprovar que o isolamento está simétrico em relação ao conjunto amostra-aquecedor, bem como as dimensões do conjunto.

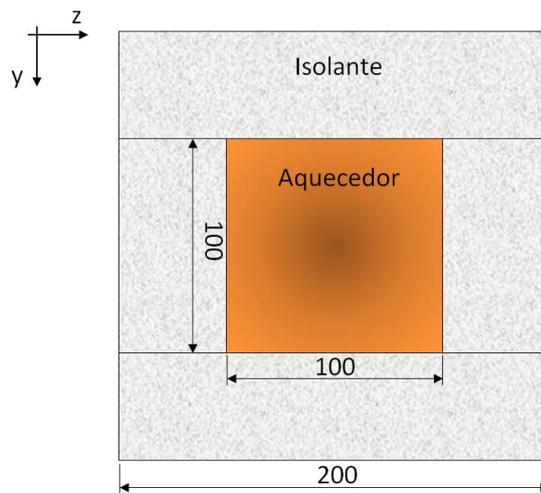


Figura 4.12 – Esquema da montagem (corte vista superior).

As Figuras 4.13 e 4.14 mostram a montagem com a vista lateral e frontal para verificar a disposição do aquecedor em relação a amostra, bem como as dimensões do conjunto.

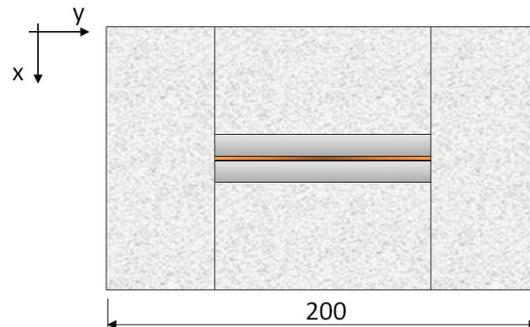


Figura 4.13 – Esquema da montagem (corte vista lateral esquerda).

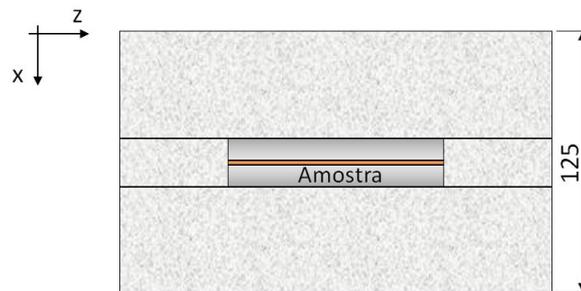


Figura 4.14 – Esquema da montagem (corte vista frontal).



Figura 4.15 – Posição do termopar na amostra.

5. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo encontra-se a análise dos resultados obtidos para as amostras dos aços AISI 1045 e Inoxidável AISI 304. Além disso, são apresentados os valores das propriedades térmicas dos dois materiais utilizados assim como uma análise geral da técnica experimental empregada.

O Aço AISI 1045 foi escolhido devido sua alta aplicabilidade na indústria justificada pela boa relação entre resistência à fratura e resistência mecânica. Além disso, este material é constantemente solicitado em aplicações com variação de temperatura como, por exemplo, eixos de bombas e ventiladores na indústria petrolífera.

Analisando o Aço Inoxidável AISI 304 percebe-se sua vasta aplicação nos setores químicos, hospitalares, farmacêuticos e petrolíferos, devido sua resistência à corrosão, boa soldabilidade e excelente conformabilidade.

5.1 Aço AISI 1045

Para realizar a estimação simultânea da condutividade térmica e capacidade de calor volumétrica do aço AISI 1045, variando com a temperatura, decidiu-se realizar os experimentos em 6 diferentes temperaturas: 25°C, 50°C, 75°C, 100°C, 125°C e 150°C. Para cada temperatura inicial definida foram realizados quinze (15) experimentos com o intuito de reduzir a incidência de erros provenientes de ruídos. Além disso, todos os experimentos foram realizados em sequência e sem alteração na bancada experimental para garantir a repetibilidade dos resultados.

Os experimentos foram definidos após a análise dos coeficientes de sensibilidades. Desta forma a duração total do experimento foi de 80 segundos, divididos em 3 etapas: 10 segundos iniciais com a incidência do fluxo de maior intensidade (7709 W/m²), 60 segundos seguintes com o fluxo de menor intensidade (1854 W/m²) e os últimos 10 segundos sem a incidência de fluxo de calor. É importante ressaltar, para que a condição de variação de temperatura de no máximo 5 °C fosse respeitada (Capítulo 3), o período de aplicação e intensidade de fluxo de calor foram definidas após inúmeros testes práticos, onde aplicou-se o fluxo de calor e tempo adotados e verificou-se a manutenção da condição. O incremento de tempo de 0,1 segundos foi definido com o objetivo de coletar o maior número possível de

informações (temperatura) para melhorar a confiabilidade dos resultados obtidos. Além disso, esse tempo não pode ser menor, pois a aquisição de dados utilizada não permite coleta de temperaturas com intervalo menor sem que isso acarrete em erros, devido ao tempo de resposta do termopar.

Para garantir resultados precisos e confiáveis, deve-se buscar a melhor região e configuração do experimento para estimar as propriedades de forma simultânea. Com este intuito, realizou-se uma análise detalhada dos coeficientes de sensibilidade conforme Beck e Arnold (1977). Informações imprescindíveis como o incremento de tempo, duração do experimento, tempo de incidência e intensidade de cada fluxo de calor, localização do termopar, entre outras são obtidas e refinadas com esta análise. Para esta análise é necessário fornecer valores de referência da condutividade térmica e capacidade de calor volumétrica que foram extraídos de Incropera *et al.* (2011). A análise de sensibilidade também é aplicada para determinar a quantidade e a região de pontos que será utilizada na determinação das propriedades analisadas. Os pontos que não apresentarem magnitude e inclinação diferente de zero devem ser desprezados da análise, pois irão gerar erros na estimação das propriedades, visto que a definição dos coeficientes de sensibilidade se baseia na primeira derivada parcial da temperatura em relação ao parâmetro.

Para complementar o estudo, análises da função objetivo foram realizadas para certificar que na região apontada pela análise de sensibilidade exista influência (informação) suficiente para estimar as propriedades de forma simultânea. Além disso, incluiu-se nesta análise, a influência da resistência térmica, conforme Eq. (3.19). Essa influência foi estimada baseando-se na condutividade térmica e espessura do kapton presente no aquecedor. Para realizar a análise deste material o Microscópio Óptico Jenavert Zeiss (2000x) em conjunto com o Analisador de Imagens Olympus modelo TVO.5XC-3 foram utilizados para medir a espessura da camada de kapton aplicada ao aquecedor resistivo. A espessura do kapton aplicado é de $10,64 \times 10^{-6}$ m e a condutividade térmica de acordo com MatWeb (2012) é de 0,12 W/mK. Logo, a resistência térmica, calculada dividindo-se a espessura do kapton por sua condutividade térmica, é igual a $88,67 \times 10^{-6}$ °Cm²W⁻¹. Considerando a média ponderada do fluxo de calor aplicado ao longo do experimento, 2639,95 W/m², e multiplicando-o pela resistência térmica, obtém-se a influência da resistência térmica de contato em temperatura, sendo igual a 0,23 °C.

Na Figura 5.1 são mostrados os coeficientes de sensibilidade para λ e ρc_p na face oposta ao aquecimento ($x = L$). Definiu-se que X_1 representa o coeficiente de sensibilidade para a capacidade de calor volumétrica e X_2 para a condutividade térmica. Para adequar a visualização das curvas em somente um gráfico, a curva X_2 foi multiplicada por um fator de 10 devido sua pequena intensidade frente a X_1 . É importante ressaltar, que em acordo com o trabalho apresentado Carollo, Lima e Silva e Lima e Silva (2012) os 3 primeiros segundos da análise são desprezados devido a inércia térmica do aquecedor resistivo.

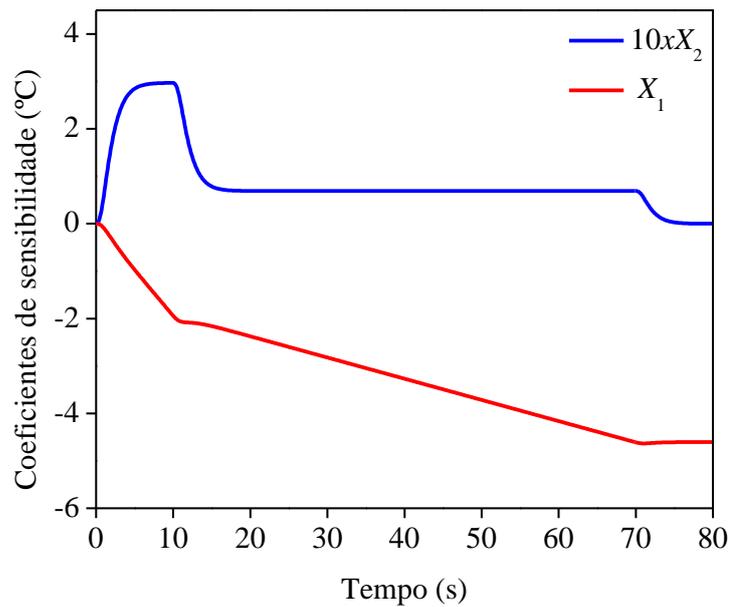


Figura 5.1 – Coeficientes de Sensibilidade do Aço AISI 1045.

Realizando uma análise dos coeficientes de sensibilidade percebe-se que existe uma variação brusca da sensibilidade de X_2 nos 10 primeiros segundos e por consequência da alteração da intensidade de fluxo de calor, sua magnitude é reduzida e estabilizada até o momento do desligamento da fonte de calor. Logo, verifica-se, que somente a região que corresponde aos 10 segundos fornece informação para a determinação da condutividade térmica. Analisando X_1 verifica-se outro comportamento, visto que a magnitude aumenta proporcionalmente a imposição do fluxo de calor, ou seja, aumenta de maneira acentuada nos 10 primeiros segundos e continua aumentando nos próximos 60 segundos de fluxo com menor intensidade. Além disso, percebe-se que sua magnitude se assemelha à magnitude da variação da temperatura ao longo do experimento.

Com o conhecimento dessas informações, definiu-se aplicar o fluxo de maior intensidade no início do experimento para estimar λ e o fluxo de menor intensidade na etapa

seguinte para incrementar a sensibilidade para ρc_p . Sabendo-se que a estimativa das propriedades ocorre por minimização de uma função objetivo, a diferença entre as magnitudes dos coeficientes deve ser controlada para que não ocorra a otimização de somente uma propriedade, logo, justifica-se o procedimento adotado para os fluxos de calor. Além disso, verifica-se que ambos os coeficientes são linearmente independentes, isto é, não interferem entre si. Conforme método apresentado no Capítulo 3, essa é uma condição imprescindível para que ocorra a estimativa simultânea das propriedades pelo método de otimização.

Com base nas referências analisadas, destaca-se o trabalho apresentado por Taktak, Beck e Scott (1993). Este trabalho demonstrou que quanto menor a distância entre o ponto de coleta de temperatura e a incidência do fluxo de calor, maior será o coeficiente de sensibilidade. Entretanto, de acordo com Carollo (2010) inúmeros testes foram realizados posicionando o termopar na superfície aquecida. Nesta configuração, não ocorre o assentamento das amostras sobre o aquecedor, gerando aquecimento não uniforme e presença de ar, e por consequência um aumento na resistência térmica de contato. Logo, a confiabilidade dos resultados é reduzida.

Além disso, Guimarães (1993) apresentou um estudo referente às dificuldades encontradas para aplicar essa condição de medição de temperatura na superfície frontal do aquecedor para materiais metálicos. Mais um fator importante na análise dos resultados, refere-se ao tempo de resposta do aquecedor resistivo, isto é, o tempo necessário para que a entrega do fluxo de calor necessário ocorra. Este estudo foi realizado por Carollo (2010) e definiu-se que para minimizar os erros na estimativa das propriedades, os primeiros 3 segundos devem ser desprezados da análise.

Na Figura 5.2 mostra-se que a estimativa simultânea das propriedades térmicas é possível, pois um valor mínimo global para cada propriedade foi encontrado. Essa análise foi baseada pela função objetivo considerando os pontos da região estabelecida para análise.

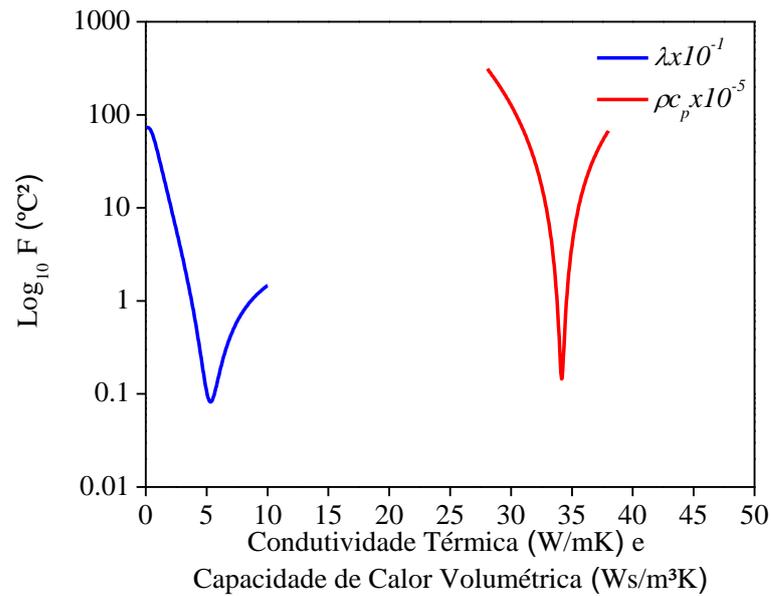


Figura 5.2 – Valores da função objetivo para o Aço AISI 1045.

No trabalho apresentado por Dowding *et al.* (1995) foi proposta a seguinte análise: quando a soma dos coeficientes de sensibilidade de λ e ρc_p , considerando as condições de contorno de fluxo de calor prescrito na superfície superior e de isolamento na superfície oposta, mais o gradiente de temperatura é igual a zero ($X_1 + X_2 + Y - Y_0 = 0$), a melhor condição e configuração para o experimento foi alcançada. Logo, realizou-se esta análise para certificar que as condições estabelecidas para o procedimento experimental estariam permitindo a obtenção de bons experimentos. Na Figura 5.3 é apresentado o resultado obtido. Com base no comportamento encontrado conclui-se que o experimento foi muito bem realizado, visto que os valores encontrados são sempre menores que a incerteza de medição de temperatura pelo termopar ($0,1^{\circ}\text{C}$).

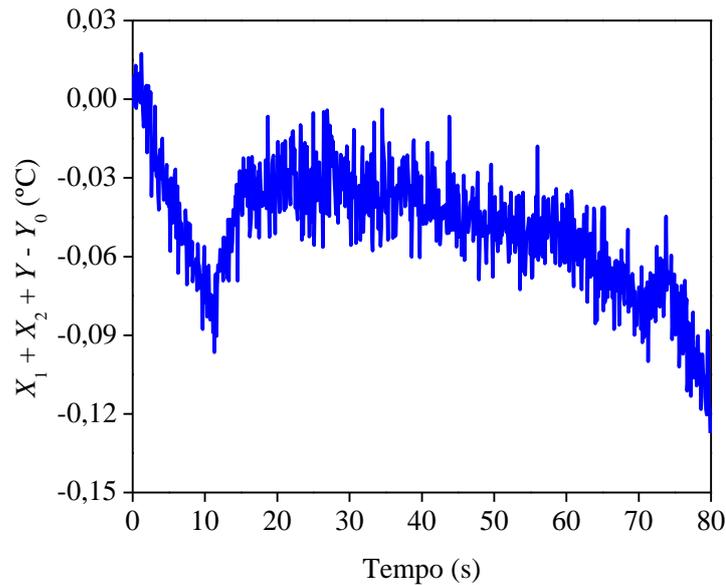


Figura 5.3 – Análise da melhor configuração para o experimento proposta por Dowding *et al.* (1995).

As temperaturas experimental e numérica em $x = L$, e o fluxo de calor imposto ao longo do experimento em $x = 0$ são apresentados pela Figura 5.4. Para se obter a temperatura numérica, coletou-se os valores das propriedades térmicas estimadas de um experimento. Analisando a Figura 5.4 conclui-se que existe uma boa concordância entre as curvas de temperatura experimental e numérica, visto que a forma e a magnitude são semelhantes. Na Figura 5.5 é mostrada a diferença entre ambas as curvas. O resíduo é calculado considerando a temperatura experimental menos a temperatura numérica, e conforme esperado, essa diferença está abaixo de 0,1 °C. Entretanto, ao fim do experimento percebe-se uma pequena diferença entre as temperaturas que pode ser atribuída a condição de isolamento não ser perfeita.

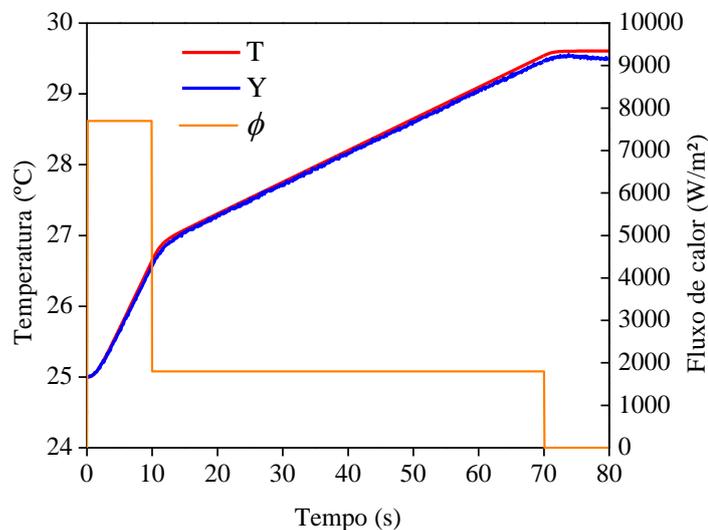


Figura 5.4 – Temperatura numérica (T), experimental (Y) e fluxo de calor imposto (ϕ).

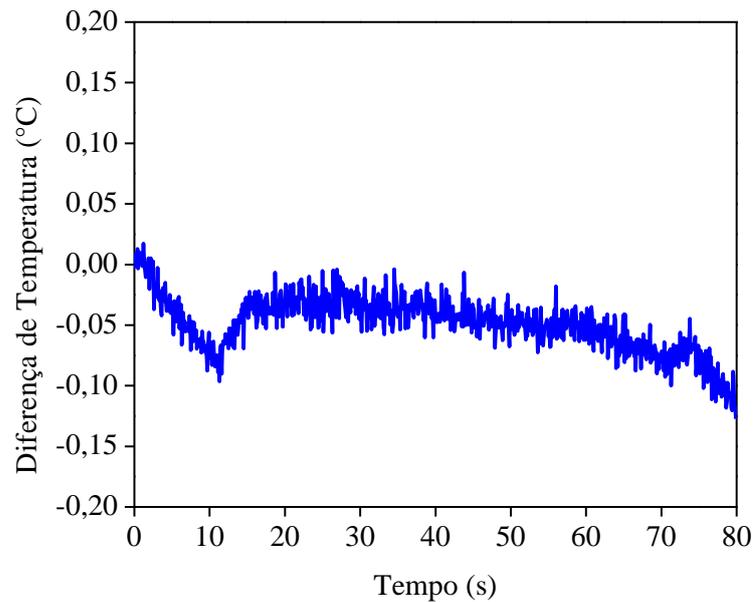


Figura 5.5 – Diferença de temperatura para o Aço AISI 1045.

Na Tabela 5.1 encontram-se os resultados obtidos para a condutividade térmica e capacidade de calor volumétrica do Aço AISI 1045 para a temperatura da estufa em 25°C. Além disso, encontra-se o desvio padrão e a diferença em relação à literatura.

Tabela 5.1 – Resultados médios obtidos para o Aço AISI 1045 com a estufa a 25°C.

Propriedade	Temperatura inicial média (°C)	Média	Grzesik <i>et al.</i> (2009)	Desvio Padrão	Diferença (%)
$\rho c_p \times 10^{-6}$ (J/m ³ K)	25,4	3,48	3,43	± 0,02	1,44
λ (W/mK)		52,04	51,80	± 0,49	0,46

Com base na diferença dos resultados obtidos em relação a literatura e no baixo valor de desvio padrão, conclui-se que os resultados obtidos para a temperatura inicial de 25°C são satisfatórios e atendem a proposta efetuada. Esse desvio e a pequena diferença estão relacionadas a resistência térmica de contato, uma possível assimetria do experimento, condição de isolamento, entre outros.

As análises referentes às temperaturas iniciais de 50°C até 150°C são as mesmas realizadas para a temperatura inicial de 25°C. Desta forma, são apresentados somente os resultados das propriedades térmicas estimadas para cada uma destas temperaturas. Nas Tabelas 5.2 à 5.6 encontram-se respectivamente os resultados de 50 °C a 150 °C.

Tabela 5.2 – Resultados médios obtidos para o Aço AISI 1045 com a estufa a 50°C.

Propriedade	Temperatura inicial média (°C)	Média	Grzesik <i>et al.</i> (2009)	Desvio Padrão	Diferença (%)
$\rho c_p \times 10^{-6}$ (J/m ³ K)	46,1	3,54	3,50	± 0,05	1,18
λ (W/mK)		51,39	51,40	± 0,25	0,02

Tabela 5.3 – Resultados médios obtidos para o Aço AISI 1045 com a estufa a 75°C.

Propriedade	Temperatura inicial média (°C)	Média	Grzesik <i>et al.</i> (2009)	Desvio Padrão	Diferença (%)
$\rho c_p \times 10^{-6}$ (J/m ³ K)	69,4	3,59	3,54	± 0,04	1,36
λ (W/mK)		50,92	51,00	± 0,37	0,16

Tabela 5.4 – Resultados médios obtidos para o Aço AISI 1045 com a estufa a 100°C.

Propriedade	Temperatura inicial média (°C)	Média	Grzesik <i>et al.</i> (2009)	Desvio Padrão	Diferença (%)
$\rho c_p \times 10^{-6}$ (J/m ³ K)	92,4	3,61	3,57	± 0,03	0,99
λ (W/mK)		50,47	50,40	± 0,28	0,14

Tabela 5.5 – Resultados médios obtidos para o Aço AISI 1045 com a estufa a 125°C.

Propriedade	Temperatura inicial média (°C)	Média	Grzesik <i>et al.</i> (2009)	Desvio Padrão	Diferença (%)
$\rho c_p \times 10^{-6}$ (J/m ³ K)	115,3	3,66	3,61	± 0,05	1,42
λ (W/mK)		49,75	49,80	± 0,38	0,10

Tabela 5.6 – Resultados médios obtidos para o Aço AISI 1045 com a estufa a 150°C.

Propriedade	Temperatura inicial média (°C)	Média	Grzesik <i>et al.</i> (2009)	Desvio Padrão	Diferença (%)
$\rho c_p \times 10^{-6}$ (J/m ³ K)	139,2	3,74	3,77	± 0,02	0,86
λ (W/mK)		49,55	49,40	± 0,36	0,30

Analisando os resultados, percebe-se que a precisão é melhor para a capacidade de calor volumétrica visto que seu desvio padrão em média é cerca de 10 vezes menor que o encontrado para a condutividade térmica. Uma explicação para este fato está relacionada ao coeficiente de sensibilidade da capacidade de calor volumétrica ser maior que o da condutividade térmica. Quando se analisa a diferença encontrada em relação à literatura, o desvio encontrado para a capacidade de calor volumétrica é maior, entretanto todas as diferenças estão abaixo de 3 %, indicando que todos os experimentos foram realizados de maneira correta e que os resultados são confiáveis.

Nas Figuras 5.6 e 5.7 apresentam-se as comparações de todos os resultados encontrados no presente trabalho comparados com os resultados de Grzeik *et al.* (2009). Desta forma é possível verificar a boa concordância entre os resultados e a literatura. Além disso, realizou-se um estudo de correlação para garantir estatisticamente a boa concordância entre os resultados.

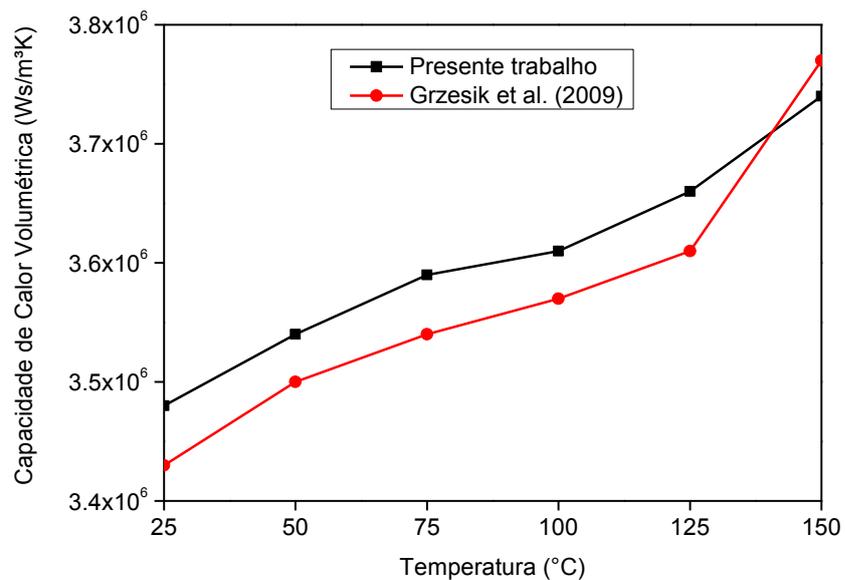


Figura 5.6 – Comparação dos resultados da capacidade de calor volumétrica para o Aço AISI 1045.

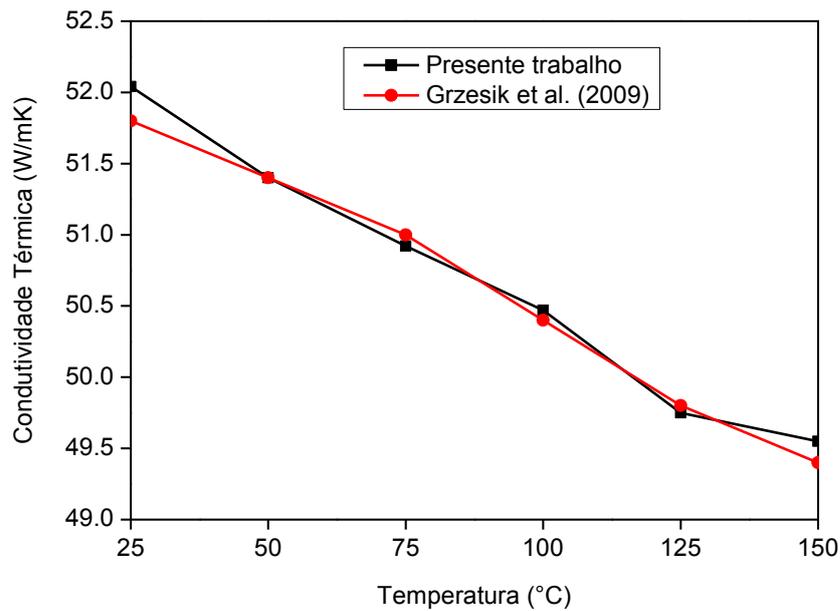


Figura 5.7 – Comparação dos resultados da condutividade térmica para o Aço AISI 1045.

De acordo com Beasley e Figliola (2007), o estudo de correlação indica uma medida quantitativa da associação entre dois fatores. Além disso, se o valor da correlação for entre +0,9 e +1,0 pode-se afirmar que se trata de uma correlação direta e que a correlação é confiável. Desta forma, este estudo pode ser utilizado para verificar se existe ou não concordância entre os resultados obtidos neste trabalho e os da literatura. Foi encontrada uma correlação de 0,99 para a condutividade térmica e 0,98 para a capacidade de calor volumétrica. Com base nestes dados, confirma-se a confiabilidade dos resultados obtidos em relação à referência.

A partir dos resultados mostrados nas Figuras 5.6 e 5.7 é possível definir as equações para obtenção das propriedades, dependentes da temperatura, pela seguinte equação:

$$\lambda(T) = -0,02228 \times T + 52,500 \quad (5.1)$$

para a condutividade térmica em W/m°C e

$$\rho c_p(T) = (0,00210 \times T + 3,43253) \times 10^6 \quad (5.2)$$

para a capacidade de calor volumétrica em J/m³°C.

Estas equações são válidas para a faixa de temperatura de 298 K (25°C) a 423 K (150 °C).

5.2 Aço Inoxidável AISI 304

Nesta seção apresenta-se a análise dos resultados obtidos na determinação de λ e ρc_p da amostra de Aço Inoxidável AISI 304. De forma similar ao Aço AISI 1045, realizou-se 15 experimentos para as seguintes temperaturas iniciais: 25°C, 50°C, 75°C, 100°C, 125°C e 150°C. Para cada experimento coletou-se 1500 pontos, porém, o fluxo de calor foi aplicado durante os primeiros 140 segundos. O fluxo de calor imposto foi dividido em duas etapas: na primeira parte, intervalo de 0 a 20 segundos, aplicou-se cerca de 2672 W/m² e na segunda parte, período de 20 a 140 segundos, uma intensidade de aproximadamente 668 W/m². Os 10 segundos restantes foram obtidos com a fonte desligada. O incremento de tempo usado na leitura das temperaturas foi de 0,1 segundo.

Na Figura 5.8 apresenta-se os coeficientes de sensibilidade e na Figura 5.9 mostra-se o estudo da função objetivo, ambas as análises feitas como descrito para o Aço Inoxidável AISI 304. Os valores das propriedades utilizados nas análises foram retirados de Incropera *et al.* (2011). Analisando as Figuras 5.8 e 5.9 percebe-se que existe sensibilidade para ambas as propriedades e que é possível realizar a estimativa, visto que um mínimo foi encontrado para cada propriedade.

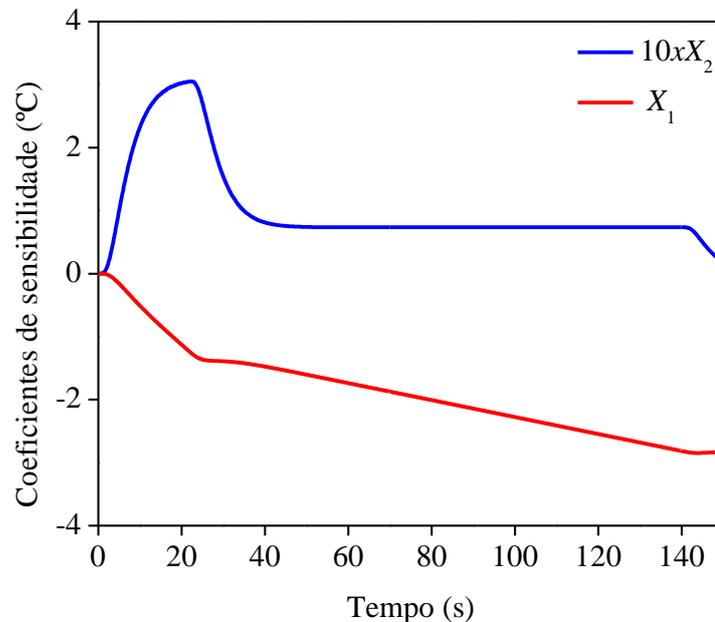


Figura 5.8 – Coeficientes de Sensibilidade do Aço Inoxidável AISI 304.

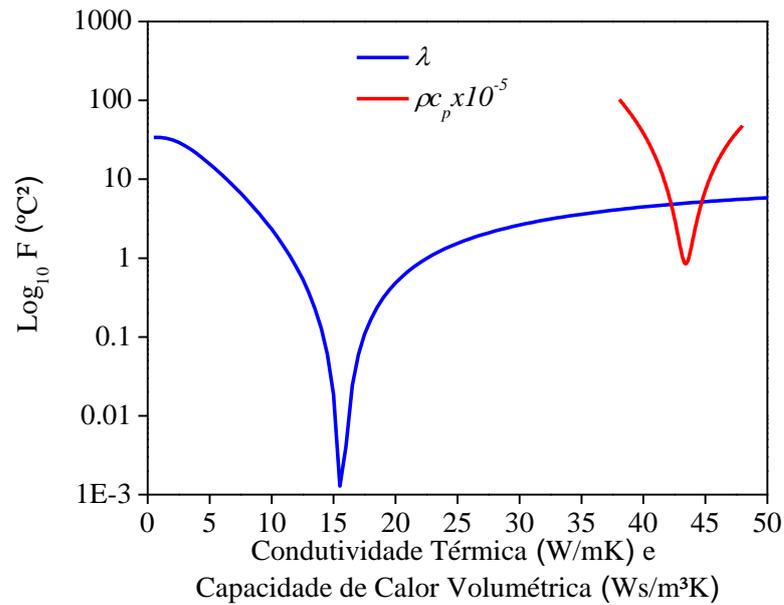


Figura 5.9 – Valores da Função Objetivo para o Aço Inoxidável AISI 304.

A determinação das propriedades do Aço Inoxidável AISI 304 foi realizada da mesma maneira e considerando as mesmas condições utilizadas para o Aço AISI 1045. Na Figura 5.10 mostra-se os resultados para a análise do experimento de acordo com Dowding *et al.* (1995). Os resultados são satisfatórios visto que a máxima diferença é de $0,07\text{ }^\circ\text{C}$, sendo este valor menor que a incerteza adotada para o termopar. Vale ressaltar que a variação do comportamento da curva próximo a 30 segundos deve-se ao fato da alteração da intensidade do fluxo de calor, da maior para a menor intensidade.

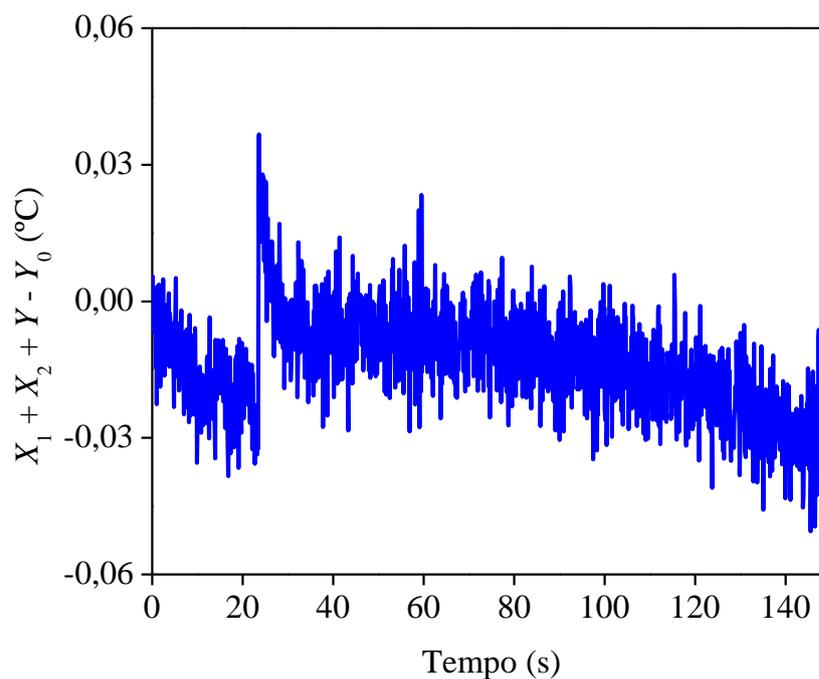


Figura 5.10 – Análise da melhor configuração da bancada experimental.

Na Figura 5.11 são apresentados o fluxo de calor aplicado e a comparação entre as temperaturas experimental e numérica, sendo que a temperatura numérica é calculada usando-se os valores das propriedades estimados para um experimento. Observa-se que as curvas de temperatura apresentam boa concordância e este fato pode ser comprovado pela análise da Fig. 5.12, que apresenta os resíduos de temperatura. De forma análoga ao Aço AISI 1045, a diferença máxima que se encontra é por volta de 0,05 °C.

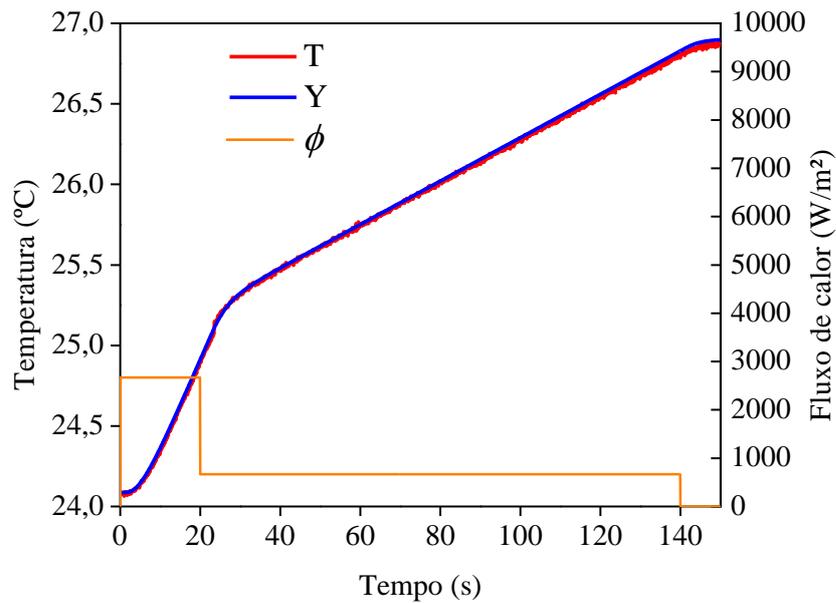


Figura 5.11 – Temperatura numérica (T), experimental (Y) e fluxo de calor imposto (ϕ).

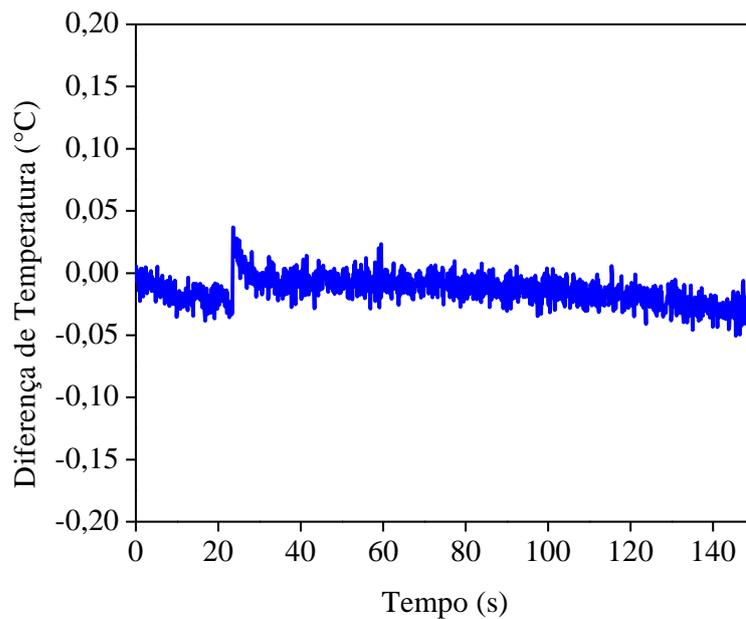


Figura 5.12 – Diferença de Temperatura para o Aço Inoxidável AISI 304.

Nas Tabelas 5.7 à 5.12 encontram-se os resultados obtidos para a condutividade térmica e capacidade de calor volumétrica do Aço inoxidável AISI 304 para a temperatura da estufa de 25°C à 150 °C com incremento de 25°C. Além disso, encontra-se o desvio padrão e a diferença em relação à literatura.

Tabela 5.7 – Resultados médios obtidos para o Aço Inoxidável AISI 304 com a estufa a 25°C.

Propriedade	Temperatura inicial média (°C)	Média	Abas <i>et al.</i> (2007)	Desvio Padrão	Diferença (%)
$\rho c_p \times 10^{-6}$ (Ws/m ³ K)	24,8	4,35	4,35	0,12	0,03
λ (W/mK)		15,49	14,8	0,39	4,64

Tabela 5.8 – Resultados médios obtidos para o Aço Inoxidável AISI 304 com a estufa a 50°C.

Propriedade	Temperatura inicial média (°C)	Média	Abas <i>et al.</i> (2007)	Desvio Padrão	Diferença (%)
$\rho c_p \times 10^{-6}$ (Ws/m ³ K)	49,7	4,55	4,40	0,09	3,31
λ (W/mK)		16,04	15,0	0,58	6,95

Tabela 5.9 – Resultados médios obtidos para o Aço Inoxidável AISI 304 com a estufa a 75°C.

Propriedade	Temperatura inicial média (°C)	Média	Abas <i>et al.</i> (2007)	Desvio Padrão	Diferença (%)
$\rho c_p \times 10^{-6}$ (Ws/m ³ K)	74,9	4,61	4,45	0,06	3,64
λ (W/mK)		16,33	15,3	0,47	6,76

Tabela 5.10 – Resultados médios obtidos para o Aço Inoxidável AISI 304 com a estufa a 100°C.

Propriedade	Temperatura inicial média (°C)	Média	Abas <i>et al.</i> (2007)	Desvio Padrão	Diferença (%)
$\rho c_p \times 10^{-6}$ (Ws/m ³ K)	99,2	4,63	4,46	0,07	3,77
λ (W/mK)		16,63	15,6	0,53	6,62

Tabela 5.11 – Resultados médios obtidos para o Aço AISI 1045 com a estufa a 125°C.

Propriedade	Temperatura inicial média (°C)	Média	Abas <i>et al.</i> (2007)	Desvio Padrão	Diferença (%)
$\rho c_p \times 10^{-6}$ (Ws/m ³ K)	124,9	4,65	4,50	0,06	3,22
λ (W/mK)		16,97	15,9	0,57	6,74

Tabela 5.12 – Resultados médios obtidos para o Aço Inoxidável AISI 304 com a estufa a 150°C.

Propriedade	Temperatura inicial média (°C)	Média	Abas <i>et al.</i> (2007)	Desvio Padrão	Diferença (%)
$\rho c_p \times 10^{-6}$ (Ws/m ³ K)	149,5	4,80	4,60	0,09	4,38
λ (W/mK)		16,73	16,4	0,67	2,01

Analisando os resultados, percebe-se que a precisão dos resultados é melhor para a capacidade de calor volumétrica, característica encontrada e analisada durante o estudo do resultado do Aço AISI 1045. Entretanto, quando se analisa a diferença encontrada em relação à literatura, todas as diferenças estão abaixo de 7 %, indicando que todos os experimentos foram realizados de maneira correta e que os resultados são confiáveis. A diferença de comportamento encontrada para a condutividade térmica à 150 °C deve-se a queima do isolamento utilizado.

Vale ressaltar que os resultados obtidos para o Aço Inoxidável AISI 304 são melhores quando comparados ao Aço AISI 1045 devido a maior sensibilidade para as propriedades, principalmente para a condutividade térmica.

De maneira similar ao Aço AISI 1045, as Figs. 5.13 e 5.14 representam todos os resultados encontrados para o Aço Inoxidável 304 e uma comparação com a literatura também é apresentada.

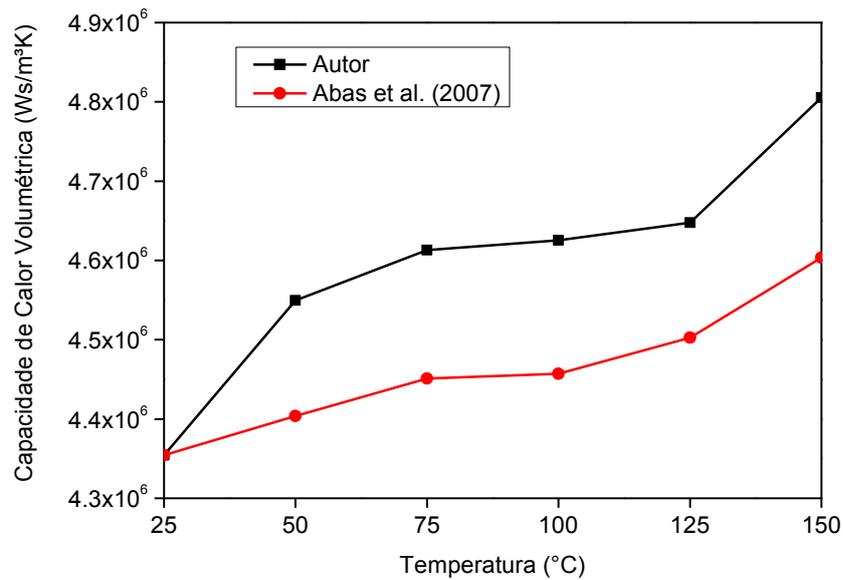


Figura 5.13 – Comparação dos resultados da capacidade de calor volumétrica para o Aço inoxidável AISI 304.

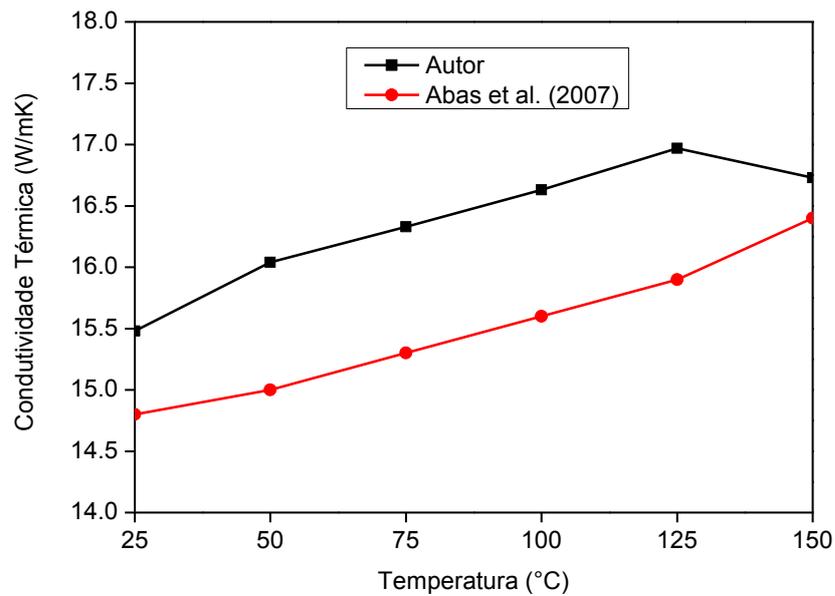


Figura 5.14 – Comparação dos resultados da condutividade térmica para o Aço inoxidável AISI 304.

Desta forma é possível verificar a boa concordância entre os resultados e a literatura, embora desvios da ordem de 7% tenham sido encontrados. Além disso, realizou-se um estudo de correlação para garantir estatisticamente a boa concordância entre os resultados, onde se encontrou uma correlação de 0,86 para a condutividade térmica e 0,95 para a capacidade de calor volumétrica.

A partir dos resultados demonstrados nas Figuras 5.13 e 5.14 é possível definir as equações para obtenção das propriedades dependente da temperatura. Logo, tem-se:

$$\lambda(T) = 0,01067 \times T + 15,4293 \quad (5.3)$$

para a condutividade térmica em W/m°C e

$$\rho c_p(T) = (0,0029266 \times T + 4,34313) \times 10^6 \quad (5.4)$$

para a capacidade de calor volumétrica em J/m³°C.

Estas equações são válidas para a faixa de temperatura de 298 K (25°C) a 423 K (150 °C).

Com o objetivo de reforçar a qualidade dos resultados obtidos, definiu-se utilizar a bancada experimental do método Placa Quente. Esta bancada, apresentada na Fig. 5.15, é descrita pelo código HT11C e foi desenvolvida pela empresa Armfield.



Figura 5.15 – Bancada HT11C da Armfield.

Esta bancada é composta basicamente de uma placa quente de latão e uma placa fria de latão e entre estas se encontra o material a ser analisado (Fig. 5.16). O diferencial desta técnica é a possibilidade de determinar a condutividade térmica sem que seja necessário alocar um termopar na amostra. Logo, seis termopares do tipo k são dispostos, sendo que, 3 são na placa quente e 3 são na placa fria. Pelo cálculo da temperatura da face quente e da face fria, pelo comprimento da amostra e pela área da amostra, é possível determinar a condutividade térmica usando a Equação da Lei de Fourier.

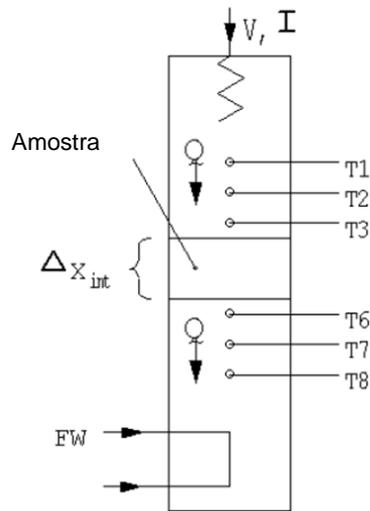


Figura 5.16 – Esquema da bancada HT11C da Armfield.

Os testes foram realizados considerando a temperatura de 44 °C. Na Tabela 5.13 pode-se encontrar os resultados obtidos pela bancada da Armfield e pelo presente trabalho.

Tabela 5.13 – Comparação dos resultados da Bancada da Armfield e presente trabalho para $T_0 = 44^\circ\text{C}$.

Propriedade	Presente trabalho	Bancada Armfield	Diferença (%)
λ (W/mK)	15,90	16,33	2,63

Analisando os resultados percebe-se que ainda existe uma diferença entre o presente trabalho e a referência (similar quando comparado a literatura). Este fato pode estar relacionado ao fato do material ter sido obtido por diferentes processos mecânicos, o que acarreta em diferentes propriedades termofísicas.

6. ANÁLISE DAS INCERTEZAS

De acordo com Taylor (1988), as medições nunca estão livres de incertezas mesmo que todos os cuidados necessários sejam realizados. Desta forma, passa a ter importância fundamental, a habilidade de executar a técnica ou procedimento para garantir que interferências aos experimentos ocasionem incertezas com intensidades pequenas, de forma a garantir resultados mais precisos. Sendo assim, realizou-se neste trabalho uma análise de incertezas contemplando todas as variáveis para a determinação das propriedades, condutividade térmica e capacidade de calor volumétrica, visto que somente a comparação dos resultados obtidos com a literatura não garante a qualidade dos resultados. Na literatura, encontra-se a definição de erro como sendo uma propriedade da medição (Beasley e Figliola, 2007) e a definição de medição pode ser a atribuição de um valor a uma variável física. Desta forma, conclui-se que o erro pode ser a diferença entre o valor atribuído pela medição e o verdadeiro valor da variável. Por fim, pode-se definir a análise de incertezas como sendo o processo de identificação, quantificação e combinação de uma estimativa de um intervalo dos erros oriundos da medição ao longo dos experimentos.

Neste trabalho, escolheu-se utilizar o procedimento da propagação das incertezas para estimar o erro na estimação das propriedades. Para realizar este estudo faz-se necessário entender quais os procedimentos realizados ao longo dos experimentos que produzem erros. Desta forma, definiu-se os seguintes pontos a serem analisados: medição de temperatura, fluxo de calor imposto, instrumentos de medição, resistência térmica, condição de isolamento. Outro ponto importante, refere-se ao método utilizado para otimizar a função objetivo e estimar as propriedades. Sendo assim, faz-se necessário incluir os erros numéricos nesta análise.

Portanto, utiliza-se como base para cálculo da incerteza de medição das variáveis, a função objetivo (Eq. 3.19). Desta forma, adotando como referência a teoria da propagação linear dos erros (Taylor, 1988), tem-se:

$$I_{final}^2 = I_Y^2 + I_T^2 + I_{BFGS}^2 \quad (6.1)$$

A incerteza para a temperatura experimental pode ser considerada a combinação da incerteza do termopar, da aquisição de dados, da resistência térmica de contato e do isolamento. Logo:

$$I_Y^2 = I_{aquis}^2 + I_{term.}^2 + I_{resist.térmica}^2 + I_{isol.}^2 \quad (6.2)$$

De maneira similar, a incerteza da temperatura numérica é obtida pela incerteza dos multímetros utilizados para mensurar a resistência do aquecedor e a corrente aplicada para fornecer o fluxo de calor e no erro numérico do método das diferenças finitas aplicado para obter a solução do modelo térmico proposto. Desta forma, tem-se:

$$I_T^2 = I_{corrente}^2 + I_{resist.elétrica}^2 + I_{MDF}^2 \quad (6.3)$$

Substituindo as Eq. (6.2 e 6.3) na Eq. (6.1), obtém-se:

$$I_{final}^2 = I_{aquis}^2 + I_{term.}^2 + I_{resist.térmica}^2 + I_{isol.}^2 + I_{corrente}^2 + I_{resist.elétrica}^2 + I_{MDF}^2 + I_{BFGS}^2 \quad (6.4)$$

Uma vez que todas as incertezas estão definidas, o passo seguinte é realizar o cálculo de cada uma delas, e para definir estes valores, considerou-se a incerteza dividida pelo valor médio do parâmetro analisado para cada material.

6.1 Aço AISI 1045

Assim, a incerteza da aquisição de dados é calculada com base no seu incremento digital de 0,01 °C e na máxima diferença de temperatura ocorrida, 5 °C. Desta forma tem-se:

$$I_{aquis} = \frac{0,01}{5,00} = 0,20 \% \quad (6.5)$$

Agora, calcula-se a incerteza do termopar, adotando como referência uma oscilação de 0,1 °C e na máxima diferença de temperatura de 5 °C. Logo:

$$I_{term} = \frac{0,10}{5,00} = 2,00 \% \quad (6.6)$$

Para o cálculo da incerteza devido à resistência térmica do aquecedor, adota-se o valor estimado no Capítulo 5, de 0,23 °C. Logo:

$$I_{resist.térmica} = \frac{0,23}{5,00} = 4,60 \% \quad (6.7)$$

Conforme mencionado no Capítulo 5, a máxima diferença entre a temperatura numérica e experimental encontrada será adotada para avaliar a condição de isolamento térmico, portanto:

$$I_{isol.} = \frac{0,10}{5,00} = 2,00 \% \quad (6.8)$$

O cálculo da incerteza dos multímetros foi realizado utilizando o incremento do aparelho dividido pela resistência do aquecedor e corrente média aplicada ao longo do experimento. Desta forma, tem-se:

$$I_{corrente} = \frac{0,01}{1,98} = 0,51 \% \quad (6.9)$$

$$I_{resist.elétrica} = \frac{0,10}{24,4} = 0,41 \% \quad (6.10)$$

E por fim, quantifica-se a incerteza para os métodos numéricos, sendo que para a técnica de otimização BFGS decidiu-se adotar o incremento de 0,01 °C e para o MDF 0,01 °C. Assim, obtém-se:

$$I_{BFGS} = \frac{0,01}{5} = 0,20 \% \quad (6.11)$$

$$I_{MDF} = \frac{0,01}{5} = 0,20 \% \quad (6.12)$$

Com base em todas as incertezas parciais calculadas, é possível calcular a incerteza na estimação das propriedades térmicas fornecida pela Eq. (6.4).

$$I_{final}^2 = 0,20^2 + 2,00^2 + 4,60^2 + 2,00^2 + 0,51^2 + 0,41^2 + 0,20^2 + 0,20^2 \quad (6.13)$$

$$I_{final} = 5,45\%$$

Analisando-se o valor da incerteza calculado para a obtenção da condutividade térmica e capacidade de calor volumétrica para o Aço AISI 1045, percebe-se que está próximo dos

valores encontrados na literatura. Espera-se que este valor fique abaixo de 5 %. Ao realizar uma análise crítica nos valores de maneira pontual, percebe-se que a incerteza referente a resistência térmica do aquecedor foi a responsável por este resultado. Esse valor expressivo, conforme calculado no Capítulo 5, é creditado à característica construtiva do aquecedor resistivo e a intensidade do fluxo de calor aplicado. Entretanto, eliminando-se este valor, percebe-se que a incerteza para as outras características é baixa e aceitável pela literatura, o que demonstra que todos os cuidados cabíveis para garantir um resultado preciso foram adotados. Portanto, define-se que o valor calculado para a incerteza deve ser utilizado apenas como uma referência e pode ser considerada uma análise representativa.

Uma das formas de se reduzir a incerteza relacionada à resistência térmica do aquecedor é utilizar um fluxo de calor menor. Para que essa condição seja possível, faz-se necessário analisar materiais com valores de condutividade térmica menores, pois assim pode-se reduzir o fluxo de calor aplicado sem que ocorra perda de sensibilidade. Este fato pode ser comprovado pelo presente trabalho (item 6.2) e pelo trabalho apresentado por Carollo, Lima e Silva e Lima e Silva (2012) onde caracterizou-se a condutividade térmica e a capacidade de calor volumétrica do Aço Inoxidável 304, à temperatura ambiente, com uma incerteza referente a resistência térmica de contato abaixo de 5 %.

6.2 Aço Inoxidável AISI 304

A incerteza para o Aço Inoxidável AISI 304 foi calculada seguindo o mesmo procedimento anterior. Entretanto, para este material, a diferença máxima de temperatura é de 3 °C. Logo, tem-se os seguintes resultados:

- Incerteza da aquisição de dados:

$$I_{aquis} = \frac{0,01}{3,00} = 0,33 \% \quad (6.14)$$

- Incerteza do termopar:

$$I_{term} = \frac{0,10}{3,00} = 3,33 \% \quad (6.15)$$

- Incerteza devido à resistência térmica de contato:

$$I_{resist.térmica} = \frac{0,08}{3,00} = 2,66 \% \quad (6.16)$$

- Isolamento térmico, portanto:

$$I_{isol.} = \frac{0,05}{3,00} = 1,67 \% \quad (6.17)$$

- Incerteza dos multímetros:

$$I_{corrente} = \frac{0,01}{0,90} = 1,11 \% \quad (6.18)$$

$$I_{resist.elétrica} = \frac{0,10}{15,2} = 0,66\% \quad (6.19)$$

- Incerteza dos métodos numéricos:

$$I_{BFGS} = \frac{0,01}{3,00} = 0,33 \% \quad (6.20)$$

$$I_{MDF} = \frac{0,01}{3,00} = 0,33 \% \quad (6.21)$$

- Incerteza final:

$$I_{final}^2 = 0,33^2 + 3,33^2 + 2,66^2 + 1,67^2 + 1,11^2 + 0,66^2 + 0,33^2 + 0,33^2 \quad (6.22)$$

$$I_{final} = 4,79 \%$$

Ao realizar uma análise sobre o valor encontrado para o Aço Inoxidável AISI 304, percebe-se que o resultado é aceitável, pois a incerteza está menor que 5 %.

Comparando-se as análises para os materiais estudados, é notória a contribuição da incerteza do termopar para o Aço Inoxidável AISI 304. Este fato deve-se a redução da

intensidade do fluxo de calor que contribuiu para uma redução de 58 % da resistência térmica do aquecedor e para uma redução do incremento de temperatura de 5 para 3 °C dos experimentos realizados.

7. CONCLUSÕES

No presente trabalho foi apresentado um método para estimar simultaneamente a condutividade térmica e capacidade de calor volumétrica de materiais metálicos, variando com a temperatura. Neste trabalho dois materiais foram analisados: Aço AISI 1045 e Aço Inoxidável AISI 304.

A contribuição deste trabalho pode ser verificada pela montagem experimental simples e de custo inferior quando se compara aos equipamentos disponíveis no mercado. Além da aplicação de diferentes fluxos de calor para buscar a melhor condição de estimação das propriedades, bem como a definição da resistência térmica do aquecedor, como um erro sistemático na função objetivo. Uma particularidade desta técnica refere-se à variação de temperatura do início ao fim do experimento ser de no máximo 5 °C, pois se este valor for ultrapassado ocorre variações das propriedades térmicas e a estimação tende a ocorrer somente para ρc_p , visto que sua sensibilidade será muito maior que a sensibilidade de λ .

Os resultados obtidos para o Aço AISI 1045 são considerados satisfatórios, pois estão em acordo com a literatura. Para todas as condições iniciais de temperatura, de 25 a 150 °C, o desvio máximo encontrado para λ foi de 0,46 % e para ρc_p foi de 1,44 %. Além disso, a incerteza para estes resultados está em torno de 5%.

Analisando os valores estimados para o Aço Inoxidável AISI 304 conclui-se a boa concordância com a literatura visto que os desvios máximos encontrados para ambas as propriedades foi de no máximo 6,95 %. Vale lembrar que estes desvios são apenas comparativos, pois não há como saber se os materiais analisados foram obtidos/usinados nas mesmas condições, o que resulta em diferentes propriedades termofísicas. Neste caso, a incerteza encontrada também foi inferior a 5 %, indicando que os experimentos possuem boa precisão.

Logo, conclui-se que o presente trabalho está validado para estimar de maneira simultânea a condutividade térmica e capacidade de calor volumétrica de materiais metálicos em função da temperatura na seguinte faixa: 10 W/mK à 60 W/mK. Entretanto, é possível

estimar materiais com diferentes propriedades térmicas, desde que alguns componentes sejam alterados, como por exemplo: isolamento e inclusão de um transdutor de fluxo de calor.

Como uma continuidade deste trabalho, pode ser realizada uma simulação e montagem experimental tridimensional para identificar possíveis regiões com maior sensibilidade para estimar ambas as propriedades. Assim, pode-se ampliar a faixa da condutividade térmica a ser avaliada e reduzir uma limitação desta técnica. Outra proposta seria analisar o material Metal Duro K10 para melhorar a condição de simulação da propagação do calor durante o processo de usinagem.

APÊNDICE A - Validação da metodologia utilizada para resolver o modelo térmico 1D

Neste apêndice encontra-se a validação da solução do modelo térmico adotado. Este estudo é baseado na comparação da solução obtida por duas maneiras: aplicando-se o Método das Diferenças Finitas (numérico) e aplicando-se as Funções de Green (analítico).

Com o intuito de facilitar a leitura, a formulação proposta para resolver o problema térmico adotado é rerepresentada. Assim, na Figura A.1 representa-se esquematicamente o modelo térmico.

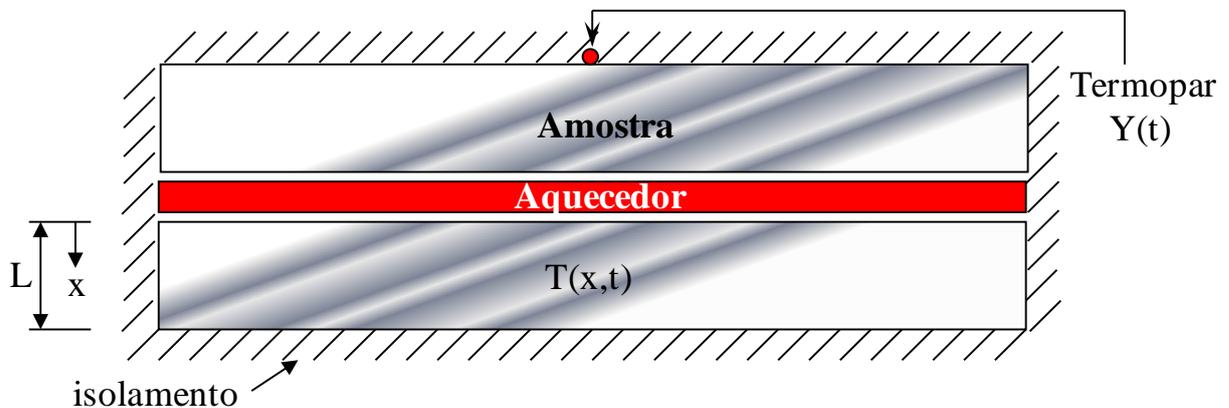


Figura A.1 – Modelo térmico unidimensional.

Considerando as informações apresentadas no Capítulo 3, apresenta-se a equação da difusão do calor que descreve o modelo demonstrado pela Figura A.1:

$$\frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial x^2} = \frac{\rho c_p}{\lambda} \frac{\partial T(x,t)}{\partial t} \quad (\text{A.1})$$

sujeita às condições de contorno:

$$-\lambda \frac{\partial T(x,t)}{\partial x} = \phi_1(t) \quad \text{em } x = 0 \quad (\text{A.2})$$

$$\frac{\partial T(x,t)}{\partial x} = 0 \quad \text{em } x = L \quad (\text{A.3})$$

e à condição inicial:

$$T(x,t) = T_0 \quad \text{em } t = 0 \quad (\text{A.4})$$

sendo x a coordenada cartesiana, t o tempo, ϕ_1 o fluxo de calor imposto, T_0 a temperatura inicial do corpo e L a espessura da amostra.

Utilizando o Método das Diferenças Finitas com formulação implícita para resolver numericamente o problema térmico, conforme apresentado no Capítulo 3, obtém-se:

$$T_0^p = \left(2Fo \frac{\phi_1 \cdot \Delta x}{\lambda} + 2FoT_1^p + T_0^{p-1} \right) / (1 + 2Fo) \quad \text{em } x = 0 \quad (\text{A.5})$$

$$T_m^p = \left(T_m^{p-1} + Fo(T_{m+1}^p + T_{m-1}^p) \right) / (1 + 2Fo) \quad \text{em } 0 < x < L \quad (\text{A.6})$$

$$T_m^p = \left(T_m^{p-1} + 2FoT_{m-1}^p \right) / (1 + 2Fo) \quad \text{em } x = L \quad (\text{A.7})$$

Outra maneira de resolver o problema térmico proposto (A.1 – A.4) é através de um método analítico. Logo, decidiu-se aplicar as Funções de Green (Cole *et al.*, 2011) e desta forma, pode-se escrever a equação da distribuição de temperatura como sendo:

$$T(L,t) = T_0 + \frac{1}{\rho c_p L} \int_0^t \phi_1(\tau) d\tau + \frac{2}{\rho c_p L} \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k \int_0^t e^{-\beta_k^2 \frac{\lambda}{\rho c_p} (t-\tau)} \phi_1(\tau) d\tau \quad (\text{A.8})$$

onde β_k são os autovalores definidos por $\beta_k = k\pi/L$, com $k = 1, 2, \dots, \infty$.

Como no presente trabalho o fluxo de calor é imposto em três diferentes intensidades, com o intuito de melhorar a precisão da estimativa (conforme Capítulo 5), faz-se necessário criar três intervalos de tempo. Logo, tem-se para a maior intensidade do fluxo de calor o período correspondente de 0 a t' , para a menor intensidade do fluxo de calor de t' a t'' e no período sem fluxo de calor de t'' a t . Devido a esta divisão e à hipótese adotada de fluxo de calor constante dentro de cada período, retira-se o termo referente ao fluxo de calor de dentro da integral e obtém-se:

$$T(L,t) = T_0 + \frac{\phi_1}{\rho c_p L} \int_0^{t'} d\tau + \frac{2\phi_1}{\rho c_p L} \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k \int_0^{t'} e^{-\beta_k^2 \frac{\lambda}{\rho c_p} (t-\tau)} d\tau + \frac{\phi_2}{\rho c_p L} \int_{t'}^{t''} d\tau$$

$$+ \frac{2\phi_2}{\rho c_p L} \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k \int_{t'}^{t''} e^{-\beta_k^2 \frac{\lambda}{\rho c_p} (t-\tau)} d\tau + \frac{\phi_3}{\rho c_p L} \int_{t''}^t d\tau + \frac{2\phi_3}{\rho c_p L} \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k \int_{t''}^t e^{-\beta_k^2 \frac{\lambda}{\rho c_p} (t-\tau)} d\tau \quad (\text{A.9})$$

onde ϕ_1 corresponde ao fluxo de maior intensidade, ϕ_2 corresponde ao fluxo de menor intensidade e ϕ_3 o fluxo é igual a zero.

Após algumas operações matemáticas, a solução para o problema térmico é dada como:

$$T(L,t) = T_0 + \frac{\phi_1 t'}{\rho c_p L} + \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k \left(\frac{2\phi_1 L}{\lambda k^2 \pi^2} \right) \left(1 - e^{-\frac{k^2 \pi^2 \lambda t'}{\rho c_p L^2}} \right) + \frac{\phi_2 t''}{\rho c_p L} + \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k \left(\frac{2\phi_2 L}{\lambda k^2 \pi^2} \right) \left(1 - e^{-\frac{k^2 \pi^2 \lambda t''}{\rho c_p L^2}} \right) \quad (\text{A.10})$$

onde $k = 1, 2, \dots, \infty$.

As Figuras A.2 e A.3 demonstram as análises referentes às temperaturas numérica e analítica.

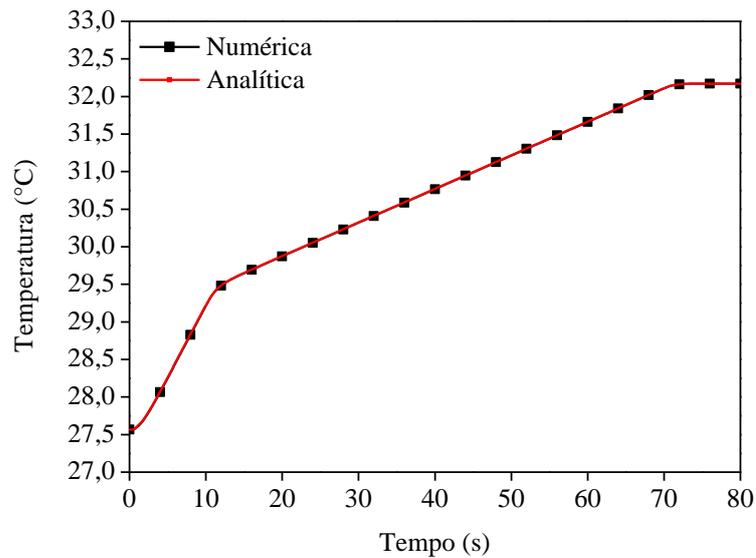


Figura A.2 – Comparação entre as temperaturas calculadas de forma analítica e numérica.

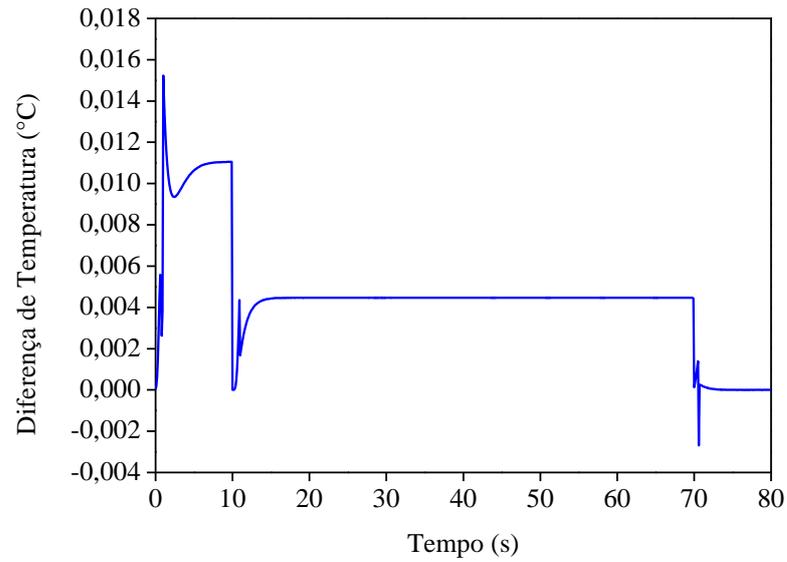


Figura A.3 – Diferença entre as temperaturas calculadas.

Analisando os resultados, percebe-se que as curvas são praticamente idênticas em forma e magnitude. Logo, a análise da diferença entre as temperaturas confirma o esperado, pois a diferença máxima foi de aproximadamente 0,016 °C. Portanto, confirma-se a boa concordância da técnica proposta neste trabalho para calcular a temperatura numérica.

APÊNDICE B - Validação da condição unidimensional da bancada

A validação da condição unidimensional da bancada experimental proposta no trabalho é apresentada neste apêndice.

Para realizar esta validação uma nova configuração da bancada foi executada. A modificação proposta considera inserir mais um termopar na superfície oposta ao aquecimento conforme Figura B.1. Este termopar foi posicionado a 5 mm da lateral da amostra.

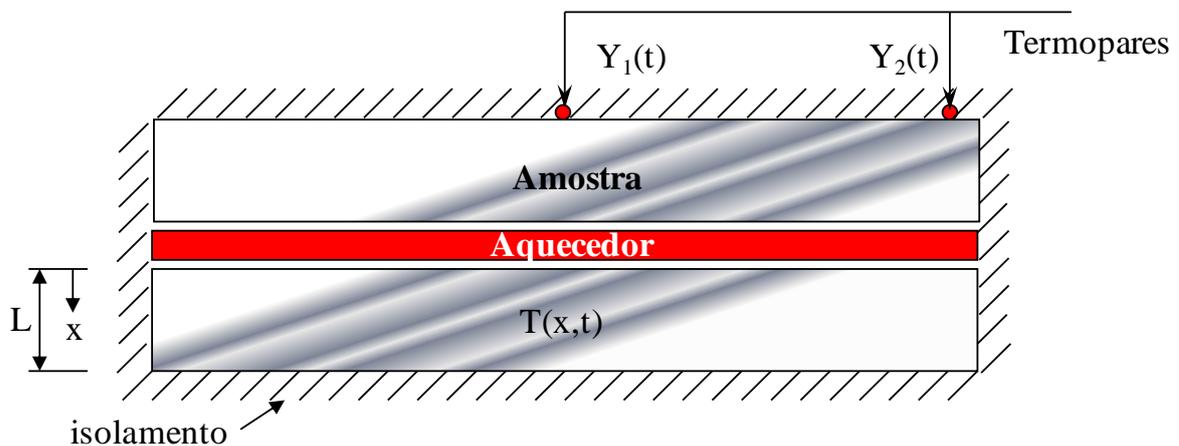


Figura B.1 – Modelo da montagem experimental para validar a condição unidimensional.

Os testes foram realizados com as mesmas intensidades de fluxo de calor e tempo, considerando o Aço Inoxidável AISI 304. A coleta de temperatura foi realizada a cada 1 segundo, visto que não é necessária uma grande quantidade de pontos. Os resultados encontrados são apresentados pelas Figuras B.2 e B.3.

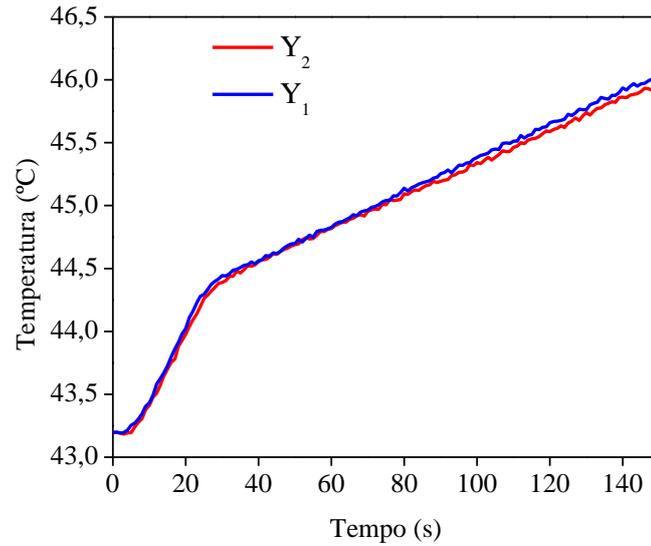


Figura B.2 – Comparação das temperaturas na superfície oposta ao aquecimento.

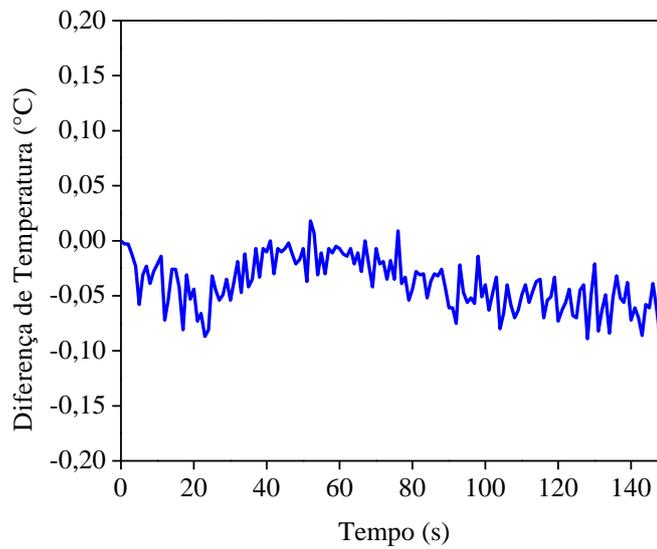


Figura B.3 – Diferença entre as temperaturas na superfície oposta ao aquecimento.

Analisando os resultados obtidos, conclui-se que a condição unidimensional do experimento é válida. Esta afirmação pode ser realizada devido ao desvio de temperatura na superfície oposta ao aquecimento ser menor que a incerteza do termopar, ou seja, abaixo de 0,10 °C.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABAS, R. A., HAYASHI, M., SEETHARAMAN, S. (2007), “Thermal Diffusivity Measurements of Some Industrially Important Alloys by a Laser Flash Method”, *International Journal of Materials Research*, v 98, pp 1-6.
- ADJALI, M. H., LAURENT, M. (2007), “Thermal Conductivity Estimation in Non-linear Problems”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v 50, pp 4623-4628.
- ARCTIC SILVER INCORPORATED, Arctic Silver 5, Disponível em: <http://www.arcticsilver.com/as5.htm>, Data de acesso: 22/02/2010.
- ANDRÉ, S., PEREIRA, F. R., RÉMY, B., CELLA, N., SILVA NETO, A. J. (2002), “Hot Wire Method for the Thermal Characterization of Materials: Inverse Problem Application”, IX Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências Térmicas – ENCIT 2002, Caxambu, Minas Gerais, Brasil.
- ABNT NBR 15200-4 (2005), “Medição da resistência térmica e da condutividade térmica pelo princípio da placa quente protegida”.
- ASSAEL, M. J., GIALOU, K. (2003), “Measurement of the Thermal Conductivity of Stainless Steel AISI 304L up to 550 K”, *International Journal of Thermophysics*, v 24, pp 1145-1153.
- AVILES-RAMOS, C., HAJI-SHEIKH, A., BECK, J. V., DOWDING, K. J. (2001), “Estimation of Thermophysical Properties by the Spectral Method-Development and Evaluation”, *Journal of Heat Transfer*, v 123, pp 24-30.
- AKSÖZ, S., OCAK, Y., MARASLI, N., CADIRLI, E., KAYA, H., BÖYÜK, U. (2010), “Dependency of the Thermal and Electrical Conductivity on the Temperature and Composition of Cu in the Al based Al-Cu Alloys”, *Experimental Thermal and Fluid Sciences*, v 34, pp. 1507-1516.
- AKSÖZ, S., MARASLI, N. (2012), “Thermal and Electrical Conductivities of Silver-Indium-Tin Alloys”, *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, v 73, pp 902-910.
- AKSÖZ, S., ÖZTÜRK, N., MARASLI, N. (2013), “The Measurement of Thermal Conductivity variation with Temperature for Solid Materials”, *Measurement*, vol 46, pp 161-170.
- BEASLEY, D. E., FIGLIOLA, R. S. (2007), *Teoria e Projeto para Medições Mecânicas*, LTC, 4ª ed., Brasil, 466p.
- BECK, J. V., ARNOLD, K. J. (1977), “Parameter Estimation in Engineering and Science”, Wiley, New York, USA, 501p.
- BLACKWELL, J. H. (1954), “A Transient Flow Method for Determination of Thermal Constants for Insulating Materials in Bulk”, *Journal of Applied Physics*, v 25, pp 137-144.
- BLACKWELL, B. F., GILL, W., DOWDING, K., VOTH, T. (2000), “Determination of Thermal Conductivity of 304 Stainless Steel Using Parameter Estimation Techniques”, The 34th National Heat Transfer Conference – NHTC 2000, Pittsburgh, Pennsylvania, United States.
- BORGES, V. L., LIMA E SILVA, S. M. M., GUIMARÃES, G. (2006), “A Dynamic Thermal Identification Method Applied to Conductor and Non Conductor Materials”, *Inverse Problems in Science and Engineering*, v 14, pp 511-527.

- BORGES, V. L., SOUZA, P. F. B., GUIMARÃES, G., (2008), “Experimental Determination of Thermal Conductivity and Diffusivity using a Partially Heated Surface Method without Heat Flux Transducer”, *Inverse Problems in Science and Engineering*, v 16, pp 1047-1067.
- CAROLLO, L. F. S. (2010), “Estimação Simultânea de Propriedades Termofísicas de Materiais Metálicos”, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Minas Gerais, Brasil.
- CAROLLO, L. F. S., GRAVENA, D. A., LIMA E SILVA, S. M. M. (2012), “Reduced Metallic Probe for the Thermal Characterization of Polymers”, *Polímeros*, v 22, pp 282-287.
- CAROLLO, L. F. S., LIMA E SILVA, A. L. F., LIMA E SILVA, S. M. M. (2012), “Applying Different Heat Flux Intensities to Simultaneously Estimate the Thermal Properties of Metallic Materials”, *Measurement Sciences and Technology*, v 23, pp 1-10.
- CARVALHO, G., PEREIRA, F. R., RAMOS, V. D., COSTA, H. M., ALMEIDA, F. L. (2006), “Otimização do Cálculo de Condutividade Térmica em Polímeros”, V Congresso Brasileiro de Análise Térmica e Calorimetria – CBRATEC 2006.
- COLE, K. D., BECK, J. V., HAJI-SHEIKH, A., LITKOUHI, B. (2011), “Heat Conduction Using Green’s Functions”, Taylor and Francis, 2nd ed., 663p.
- COQUARD, R., PANEL, B. (2008), “Adaptation of the Flash Method to the Measurement of the Thermal Conductivity of Liquids or Pasty Materials”, *International Journal of Thermal Sciences*, v 48, pp 747-760.
- DOWDING, K. J., BECK J., ULBRICH, A., BLACKWELL, B., HAYES J. (1995), “Estimation of Thermal Properties and Surface Heat Flux in Carbon-Carbon Composite”, *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, v 9, pp 345-351.
- ERIKSSON, R., HAYASHI, M., SEETHARAMAN, S. (2002), “Thermal Diffusivity Measurements of Liquid Silicate Melts”, The 16th European Conference for Thermophysical Properties – ECTP 2002, London, United Kingdom.
- FIBERSEALS (2015), Placa de Fibra Cerâmica 300 kg/m³, Disponível em: <http://www.fiberseals.com.br/placa-de-fibra-ceramica>, Data de acesso: 20/01/2015.
- GARNIER, B., DELAUNAY, D., BECK, J. V. (1994), “Improved Measurement of the Surface Temperature of Composite Materials for the Optimal Estimation of their Thermal Properties”, *High Temperature-High Pressure*, v 26, pp 15-23.
- GUIMARÃES, G. (1993), “Estimação de Parâmetros no Domínio da Frequência para a Determinação Simultânea da Condutividade e Difusividade Térmica”, Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, Brasil.
- GHRIB, T., YACOUBI, N., SAADALLAH, F., (2007), “Simultaneous Determination of Thermal Conductivity and Diffusivity of Solid Samples using the Mirage Effect Method”, *Sensors and Actuators*, v 135, pp 346-354.
- GROSSI, P. A., ANDRADE, R. M., FERREIRA, R. A. N. (2004), “Revisão do Método Flash Laser”, X Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências Térmicas – ENCIT 2004, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.
- GRZESIK, W., NIESLONY, P., BARTOSZUK, M. (2009), “Modelling of the Cutting Process Analytical and Simulation Methods”, *Advances in Manufacturing Sciences and Technology*, v 33, pp. 6-29.

- HAJI-SHEIKH, A., HONG, Y. S., YOU, S. M., BECK, J. V. (1998), "Sensitivity Analysis for Thermophysical Property Measurements Using the Periodic Method", *Journal of Heat Transfer*, Copyright by ASME, v 120, pp 568-576.
- HEALY, W. M. (2001), "Using Finite Element Analysis to Design a New Guarded Hot Plate Apparatus for Measuring the Thermal Conductivity of Insulating Materials", National Institute of Standards and Technology.
- HUANG, C. H., HUANG, C. Y. (2007), "An Inverse Problem in Estimating Simultaneously the Effective Thermal Conductivity and Volumetric Heat Capacity of Biological Tissue", *Applied Mathematical Modelling*, v 31, pp 1785-1797.
- IMANI, A., RANJBAR, A. A., ESMKHANI, M. (2006), "Simultaneous Estimation of Temperature-Dependent Thermal Conductivity and Heat Capacity based on Modified Genetic Algorithm", *Inverse Problems in Science and Engineering*, v 14, pp 767-783.
- INCROPERA, F. P., DEWITT, D. P., BERGMAN, T. L., LAVINE, A. S. (2011), "Fundamentals of Heat and Mass Transfer", John Wiley & Sons, 7th ed., USA, 1072p.
- JANNOT, Y., ACEM, Z., KANMOGNE, A. (2006), "Transient Hot Plate Method with Two Temperature Measurements for Thermal Characterization of Metals", *Measurement Science and Technology*, v 17, pp 69-74.
- KARIMI, G., LI, X., TEERTSTRA, P. (2010), "Measurement of Through-plane Effective Thermal Conductivity and Contact Resistance in PEM Fuel Cell Diffusion Media", *Electrochimica Acta*, v 55, pp 1619-1625.
- KHANDELWAL, M., MENCH, M.M. (2006), "Direct Measurement of Through-plane Thermal Conductivity and Contact Resistance in Fuel Cell Materials", *Journal of Power Sources*, v 161, pp. 1106-1115.
- LAHOUCINE, C. O., KHELLAF, A. (2004), "Correction for Thermocouple and Simultaneous Estimation of Thermal Conductivity and Thermal Diffusivity", *Review of Scientific Instruments*, v 75, pp 2356-2361.
- LASKAR, J. M., BAGAVATHIAPPAN, S., SARDAR, M., JAYAKUMAR, T., PHILIP, J., RAJ, B. (2008), "Measurement of Thermal Diffusivity of Solids using Infrared Thermography", *Materials Letters*, v 62, pp 2740-2742.
- LIMA, G. M., CAROLLO, L. F. S., LIMA E SILVA, A. L. F., GÜTHS, S., LIMA E SILVA, S. M. M. (2008), "Determinação da Condutividade pelo Método da Placa Quente Protegida", V Congresso Nacional de Engenharia Mecânica – CONEM 2008, Salvador, Bahia, Brasil.
- LIMA E SILVA, S. M. M., ONG, T. H., GUIMARÃES, G. (2003), "Thermal Properties Estimation of Polymers Using Only One Active Surface", *Journal of the Brazilian Society Mechanical Sciences*, Copyright by ABCM, v 25, pp 9-14.
- MATWEB MATERIAL PROPERTY DATA, Kapton - Lâmina de Poliamida, Disponível em: <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=99c680bc28dd409fb7e8fd3ddbce537>, Data de acesso: 22/07/2012.
- MARDOLCAR, U. V. (2002), "Thermal Diffusivity of Rocks at High Temperature by the Laser Flash Technique", The 16th European Conference for Thermophysical Properties – ECTP 2002, London, United Kingdom.
- MIYAMURA, A., SUSAKI, M. (2002), "Relative Measurements of Thermal Conductivity of Liquid Gallium by Transient Hot Wire Method", The 16th European Conference for Thermophysical Properties – ECTP 2002, London, United Kingdom.

- MOHAMED, I. O., (2008), “Simultaneous Estimation of Thermal Conductivity and Volumetric Heat Capacity for Solids Foods using Parameter Estimation Technique”, *Food Research International*, v 42, pp 231-236.
- NAHOR, H. B., SCHEERLINCK, N., VAN IMPE, J. F., NICOLAÏ, B. M. (2003), “Optimization of the Temperature Sensor Position in a Hot Wire Probe Set up for Estimation of the Thermal Properties of Foods Using Optimal Experimental Design”, *Journal of Food Engineering*, v 57, pp 103-110.
- NICOLAU, V. P., GÜTHS, S., SILVA, M. G. (2002), “Thermal Conductivity and Heat Measurement of Low conductivity Materials Using Heat Flux Meters”, *The 16th European Conference on Thermophysical Properties, Imperial College – ECTP 2002, London, United Kingdom*.
- OMEGA (2000), “The Electric Heaters: Handbook”, Stamford: Omega Engineering, 2000.
- ORLANDE, H. R. B., ABSI SALAS, F. M., OLIVEIRA, A. P., REY SILVA, D. V. F. M. (2002), “Experimental Identification of Thermal Conductivity and Volumetric Capacity”, *IX Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências Térmicas – ENCIT 2002, Caxambu, Minas Gerais, Brasil*.
- ÖZISIK, M. N., (1993), “Heat Conduction”, John Wiley & Sons, 2th ed., Canada, 692p.
- ÖZTÜRK, E., AKSÖZ, S., KESLIOGLU, K., MARASLI, N. (2013), “The Measurement of Thermal Conductivity variation with Temperature for Sn-20 wt.% In based Lead-free Ternary Solders”, *Thermochimica Acta*, v 554, pp. 63-70.
- PARKER, W. J., JENKINS, R. J., BUTLER, C. P., ABBOT, G. L. (1961), “Flash Method of Determining Thermal Diffusivity, Heat Capacity and Thermal Conductivity”, *Journal of Applied Physics*, v 32, pp 1679-1684.
- PORFÍRIO, J., BALDAN, C. A., SHIGUE, C. Y., RUPERT FILHO, E. (2006), “Avaliação de Propriedades de Transporte Térmico de Compósitos de Resina Epoxídica com Carga Condutora de Calor pelo Método do Fio Quente”, *XVII Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais – CBECIMat 2006, Foz do Iguaçu, Paraná, Brasil*.
- RIBEIRO, L. C., COSTA, E. S., SILVA, E. M., LIMA E SILVA, S. M. M. (2004), “Otimização da Montagem do Método da Placa Quente Compensada Desenvolvida no LTCM”, *III Congresso Nacional de Engenharia Mecânica – CONEM 2004, Belém, Pará, Brasil*.
- SADEGHI, E., DJILALI, N., BAHRAMI, M. (2011), “A Novel Approach to Determine the In-plane Thermal Conductivity of Gas Diffusion Layers in Proton Exchange Membrane Fuel Cells”, *Journal of Power Sources*, v 196, pp. 3565-3571.
- SANTOS W. N. (2002), “O Método de Fio Quente: Técnica em paralelo e Técnica em Superfície”, *Cerâmica*, v 48, pp 86-91.
- SANTOS W. N., GREGÓRIO FILHO, R., MUMMERY, P. E WALLWORK A. (2004), “Método de Fio Quente na Determinação das Propriedades Térmicas de Polímeros”, *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, v 14, pp 354-359.
- SANTOS, W. N., MUMMERY, P., WALLWORK, A. (2005), “Thermal Diffusivity of Polymers by the Laser Flash Technique”, *Polymer Testing*, v 24, pp 628-634.
- SAWAF, B., ÖZISIK, M. N., JARNY, Y. (1995), “An Inverse Analysis to Estimate Linearly Temperature Dependent Thermal Conductivity Components and Heat Capacity of an Orthotropic Medium”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v 38, pp 3005-3010.

- SHIBATA, H., OKUBO, K., OHTA, H., WASEDA, Y. (2002), “A Novel Laser Flash Method for Measuring Thermal Diffusivity of Molten Metals”, *Journal of Non-Crystalline Solids*, v 312-314, pp 172-176.
- SILVA NETO, A. J., CARVALHO, G. (1999), “O Projeto de Experimentos para a Caracterização Térmica de Polímeros com a Solução de Problemas Inversos”, XV Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica – COBEM 1999, Águas de Lindóia, São Paulo, Brasil.
- SIMIONI, W. I. (2005), “Análise de Erros na Medição de Condutividade Térmica de Materiais Através do Método Fluximétrico”, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, Brasil.
- STACEY, C. (2002), “NPL Vacuum Guarded Hot Plate for Measuring Thermal Conductivity and Total Hemispherical Emittance of Insulation Materials”, *Insulation Materials: Testing and Applications*, v 4, ASTM STP 1426.
- STANKUS, S. V., SAVCHENKO, I. V., BAGINSKII, A. V., VERBA, O. I., PROKOP'EV, A. M., KHAIRULIN, R. A. (2008), “Thermal Conductivity and Thermal Diffusivity Coefficients of 12Kh18N10T Stainless Steel in a Wide Temperature Range”, *High Temperature*, v 46, pp 731-733.
- TAKTAK, R., BECK, J.V., SCOTT, E.P. (1993), “Optimal Experimental Design for Estimating Thermal Properties of Composite Materials”, *International Journal of Heat Mass and Transfer*, v 36, pp 2977-2986.
- TAYLOR, B. N. (1988), “The Physical Constants”, *Physics Letter B*, v 204.
- THOMSON, N. H. (2005), “Análise Teórico-Experimental para a Identificação de Propriedades Termofísicas com a Técnica da Sonda-Linear”, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro Brasil.
- TILLMANN, A. R., BORGES, V. L., GUIMARÃES, G., LIMA E SILVA, A. L., LIMA E SILVA, S. M. M. (2008), “Identification of Temperature-Dependent Thermal Properties of Solid Materials”, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Science and Engineering*, v 30, pp 269-278.
- TSUKADA, T., FUKUYAMA, H., KOBATAKE, H. (2007), “Determination of Thermal Conductivity and Emissivity of Electromagnetically Levitated High-Temperature Droplet Based on the Periodic Laser-Heating Method: Theory”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v 50, pp 3054-3061.
- VANDERPLAATS, G. N. (2005), “Numerical Optimization Techniques for Engineering Design”, McGraw-Hill, 4th ed., New York, United States, 465p.
- VOSTEEN, H., SCHELLSCHMIDT, R. (2003), “Influence of Temperature on Thermal Conductivity, Thermal Capacity and Thermal Diffusivity for Different Types of Rock”, *Physics and Chemistry of The Earth*, v 28, pp 499-509.
- WULF, R., BARTH, G., GROSS, U. (2005), “Intercomparison of Insulation Thermal Conductivities Measured by Various Methods”, *The 17th European Conference on Thermophysical Properties, ECTP 2005*, Bratislava, Slovak Republic.
- YANG, C. (1999), “Estimation of the Temperature-dependent Thermal Conductivity in Inverse Heat Conduction Problems”, *Applied Mathematical Modelling*, v 23, pp 469-478.

ZAMEL, N., BECKER, J. WIEGMANN, A. (2012), “Estimating the Thermal Conductivity and Diffusion Coefficient of the Microporous Layer of Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells”, *Journal of Power Sources*, v 207, pp 70-80.

ZARR, R. R., FILLIBEN, J. J. (2002), “An International Study of Guarded Hot Plate Laboratories Using Fibrous Glass and Expanded Polystyrene Reference Materials”, *Insulation Materials: Testing and Applications*, v 4, pp 3-16.

ŽMUDA S., PANAS, A. J., TERPILOWSKI, J., PREISKORN, M. (2002), “Investigation of the Thermal Diffusivity of Human Tooth Hard Tissue”, *The 16th European Conference on Thermophysical Properties, Imperial College – ECTP 2002, London, United Kingdom.*

ZUECO, J., ALHAMA, F. (2007), “Simultaneous Inverse Determination of Temperature-dependent Thermophysical Properties in Fluids using the Network Simulation Method”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v 50, pp 3234-3243.