

AMANDA RIBEIRO TILLMANN

**DETERMINAÇÃO SIMULTÂNEA DA
CONDUTIVIDADE TÉRMICA E DA DIFUSIVIDADE
TÉRMICA VARIANDO COM A TEMPERATURA**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
2005**

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

AMANDA RIBEIRO TILLMANN

**DETERMINAÇÃO SIMULTÂNEA DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA E
DA DIFUSIVIDADE TÉRMICA VARIANDO COM A TEMPERATURA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos Requisitos para a obtenção do título de **MESTRE EM ENGENHERIA MECÂNICA.**

Área de Concentração: Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos.

Orientador: Prof. Dr. Sandro M. M. Lima e Silva

Co-orientador: Prof. Dr. Gilmar Guimarães

UBERLÂNDIA – MG

2005

FICHA CATALOGRÁFICA

Elaborada pelo Sistema de Bibliotecas da UFU / Setor de Catalogação e Classificação

T577d Tillmann, Amanda Ribeiro.
Determinação simultânea da condutividade térmica e da condutividade térmica variando com a temperatura / Amanda Ribeiro Tillmann. - Uberlândia, 2005.
99f. : il.
Orientador: Sandro M. M. Lima e Silva.
Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.
Inclui bibliografia.
1. Calor - Condução - Teses. 2. Otimização matemática - Teses. I. Silva, Sandro Metrevelle Marcondes de Lima e. II. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.

CDU: 536.24



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
Av. João Naves de Ávila, 2121 - 38400-902 Fone: 0XX(34)32394149 Ramal 42
FAX: 0XX(34)32394282 - Campus Santa Mônica - Uberlândia MG



ALUNA: Amanda Ribeiro Tillmann

NÚMERO DE MATRÍCULA: 5032202-5

**ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: Transferência de Calor e Mecânica
dos Fluidos**

PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA: NÍVEL MESTRADO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO:

***“Determinação Simultânea da Condutividade Térmica
e da Difusividade Térmica Variando com a
Temperatura”***

ORIENTADOR: Prof. Dr. Sandro Metrevelle Marcondes de Lima e
Silva

Co-ORIENTADOR: Prof. Dr. Gilmar Guimarães

A Dissertação foi **APROVADA** em reunião pública, realizada na Sala
218, Bloco “1M”, Campus Santa Mônica, em 03 de novembro de 2005,
às horas 8:30 horas, com a seguinte Banca Examinadora:

NOME	ASSINATURA
Prof. Dr. Sandro Metrevelle Marcondes de Lima e Silva	UFU/UNIFEI
Prof. Dr. Gilmar Guimarães	UFU
Prof. Dr. Aristeu da Silveira Neto	UFU
Prof. Dr. Luís Mauro Moura	PUCPR

Uberlândia, 03 de novembro de 2005.

Dedico este trabalho aos meus pais, Luiz Tillmann e Neusa Ribeiro Tillmann.

AGRADECIMENTOS

Ao amigo e orientador Prof. Dr. Sandro M. M. Lima e Silva pela orientação, paciência, otimismo e principalmente pelo apoio e força durante toda a condução do trabalho.

Ao amigo e co-orientador Prof. Dr. Gilmar Guimarães pela orientação, paciência e principalmente pela tranquilidade transmitida em todos os momentos.

Ao amigo MSc. Eng. Valério L. Borges pela ajuda e orientação durante o trabalho.

Ao MSc. Eng. Cleber Cristian da Silva pelo apoio, carinho e principalmente pelo incentivo.

Ao amigo Eng. Cleber Spode pela ajuda e apoio técnico.

Aos amigos MSc. Eng. José Eduardo S.Oliveira e Ana Paula Fernandes pelo apoio técnico

Ao amigo Lázaro Henrique A. Vieira pelo apoio técnico durante a montagem experimental.

Aos amigos do LTCM e colegas do curso de pós-graduação pela amizade e companheirismo.

Ao curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica pela confiança depositada no meu trabalho.

A todos os funcionários do curso de Engenharia Mecânica.

Aos CNPQ (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) e Fapemig (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais) pelo suporte financeiro

A CAPES (Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pelo apoio financeiro e concessão da bolsa de estudo.

“O valor das coisas não está no tempo que elas duram, mas na intensidade com que acontecem. Por isso, existem momentos inesquecíveis, coisas inexplicáveis e pessoas incomparáveis”.

Fernando Pessoa

SUMÁRIO

Lista de Figuras.....	x
Lista de Tabelas.....	xv
Lista de Símbolos.....	xvi
Resumo.....	xviii
Abstract.....	xix
1.INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	6
2.1. Estimação Não Simultânea de Propriedades Térmicas.....	6
2.2. Estimação Simultânea de Propriedades Térmicas.....	8
2.3. Estimação Simultânea de Propriedades Térmicas Utilizando Somente uma Superfície de Acesso.....	10
2.4. Estimação Simultânea de Propriedades Térmicas Variando com a Temperatura...	11
3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	15
3.1 Modelos Térmicos.....	15
3.1.1. Modelo Tridimensional.....	15
3.1.1.1. Solução Numérica: Modelo Tridimensional.....	17
3.1.2. Modelo Unidimensional.....	21
3.1.2.1. Solução Numérica: Modelo Unidimensional.....	22
3.2 Sistema Dinâmico.....	24
3.3. Determinação das Propriedades Térmicas α e λ	29
3.3.1. Determinação da Difusividade Térmica.....	29
3.3.2. Determinação da Condutividade Térmica.....	30
4. APARATO EXPERIMENTAL.....	31
5. DETERMINAÇÃO DE PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS VARIANDO COM A TEMPERATURA.....	38

5.1. Introdução.....	38
5.2. Definições do tipo, dimensões da amostra e posição dos termopares.....	39
5.3. Definição dos parâmetros experimentais.....	42
5.4. Análise de resultados.....	43
5.4.1. Introdução.....	43
5.4.2. Análise de resíduos.....	48
5.4.3. Análise da melhor faixa de frequência para obtenção de α	49
5.4.4. Análise da melhor faixa de frequência para obtenção de λ	53
5.4.5. Valores obtidos de α e λ do PVC variando com a temperatura.....	55
6. INVESTIGAÇÃO DE UMA METODOLOGIA PARA A DETERMINAÇÃO PARA DE PROPRIEDADES TÉRMICAS UTILIZANDO UMA SUPERFÍCIE DE ACESSO.....	62
6.1. Introdução.....	62
6.2. Definição do tipo e dimensões da amostra e localização dos termopares.....	63
6.3. Análise de sensibilidade e considerações experimentais.....	64
6.4. Análise de resultados para a amostra de PVC de 100 x 25 x 60 mm.....	66
6.5. Amostra de PVC com dimensões de 305 x 25 x 245 m.....	68
6.6. Considerações Experimentais para a Amostra de 305 x 25 x 245 mm.....	72
6.7. Análise de resultados para a amostra de PVC de 305 x 25 x 245 mm.....	73
7. CONCLUSÕES.....	76
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	80
ANEXOS.....	85
1. O Software DPT.....	85
2. Calibração dos Transdutores de Fluxo de Calor.....	93
3. Seção Áurea (Golden Section).....	97

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 - Modelo térmico tridimensional equivalente.....	16
Figura 3.2 - Dimensões em mm das amostras para o modelo 3D a) Amostra1 b) Amostra 2.....	18
Figura 3.3 – Discretização do plano xz a partir de uma malha tridimensional regular.....	18
Figura 3.4 – Volume de controle infinitesimal em coordenadas cartesianas.....	19
Figura 3.5 - Modelo térmico unidimensional equivalente.....	21
Figura 3.6 - Dimensões em mm da amostra para o modelo 1D.....	23
Figura 3.7 – Volume de controle infinitesimal em coordenadas cartesianas – modelo 1D.....	23
Figura 3.8 - Sistema dinâmico tipo entrada/saída.....	24
Figura 4.1 - Esquema de montagem para a amostra de PVC com dimensões de (245 x 25 x 245 mm).....	31
Figura 4.2 - Posição dos termopares na amostra de PVC (245 x 25 x 245 mm.....	32
Figura 4.3 - Esquema de montagem da bancada experimental.....	32
Figura 4.4 - Foto da bancada experimental.....	33
Figura 4.5 - Amostra de PVC disposta dentro do forno.....	33

Figura 4.6 - Controlador Watlow/Ecil SÉRIE 93 1/16 DN.....	34
Figura 4.7 - Ligação do controlador ao forno a) Foto b) Esquema ilustrativo da ligação...	34
Figura 4.8 - HP 75000 SERIES B.....	35
Figura 4.9 - Esquema de montagem para a amostra de PVC (100 x 25 x 60 mm).....	36
Figura 4.10 - Posição dos termopares na amostra de PVC (100 x 25 x 60 mm).....	36
Figura 4.11 - Esquema de montagem para a amostra de PVC (305 x 25 x 245 mm).....	37
Figura 4.12 - Posição dos termopares na amostra de PVC (305 x 25 x 245 mm).....	37
Figura 5.1 - Perfil de temperatura em (°C) na superfície da amostra de PVC.....	40
Figura 5.2 - Perfil de temperatura em (°C) no eixo y da amostra de PVC.....	40
Figura 5.3 - Temperaturas na superfície da amostra (posição ótima).....	41
Figura 5.4 - Disposição dos termopares na amostra de PVC.....	41
Figura 5.5 - Temperaturas a) Comparação modelos 1D e 3D b) resíduo.....	42
Figura 5.6 - a) Evolução do sinal de entrada b) Evolução do sinal de saída.....	44
Figura 5.7 - Temperaturas experimentais para o caso da temperatura média do forno de 20,66 °C.....	44
Figura 5.8 - Temperaturas experimentais para o caso da temperatura média do forno de 27,86 °C.....	45
Figura 5.9 - Temperaturas experimentais para o caso da temperatura média do forno de 37,55 °C.....	45

Figura 5.10 - Temperaturas experimentais para o caso da temperatura média do forno de 43,44 °C.....	46
Figura 5.11 - Temperaturas experimentais para o caso da temperatura média do forno de 50,01 °C.....	46
Figura 5.12 - Temperaturas experimentais para o caso da temperatura média do forno de 58,02 °C.....	47
Figura 5.13 - Temperaturas experimentais para o caso da temperatura média do forno de 65,48 °C.....	47
Figura 5.14 - Fase a) experimental e calculada b) residual.....	49
Figura 5.15 - Evolução da temperatura a) experimental e calculada b) residual.....	49
Figura 5.16 - Densidades autoespectrais dos sinais de a) entrada e b) saída.....	50
Figura 5.17 - Densidade espectral cruzada a) parte real e b) parte imaginária.....	51
Figura 5.18 - Correlação cruzada no domínio da frequência.....	51
Figura 5.19 - Fase calculada para um caso típico.....	52
Figura 5.20 - Sensibilidade da fase em relação à α	53
Figura 5.21 - Sensibilidade da temperatura em relação à λ	54
Figura 5.22 - Correlação cruzada no domínio do tempo.....	55
Figura 5.23 - Histograma para a) α e b) λ para temperatura média de 20,81 °C.....	55
Figura 5.24 - Histograma para a) α e b) λ para temperatura média de 27,89 °C.....	56
Figura 5.25 - Histograma para a) α e b) λ para temperatura média de 37,40 °C.....	56

Figura 5.26 - Histograma para a) α e b) λ para temperatura média de 43,44 °C.....	57
Figura 5.27 - Histograma para a) α e b) λ para temperatura média de 49,34 °C.....	57
Figura 5.28 - Histograma para a) α e b) λ para temperatura média de 58,14 °C.....	58
Figura 5.29 - Histograma para a) α e b) λ para temperatura média de 65,89 °C.....	58
Figura 5.30 - Resultados da condutividade térmica.....	60
Figura 6.1 - Disposição dos sensores na parte superior da amostra (100 x 25 x 60 mm)	64
Figura 6.2 - Temperaturas para amostra de PVC.....	64
Figura 6.3 - a) Sensibilidade da fase em relação a α b) Sensibilidade da temperatura em relação a λ	65
Figura 6.4 - a) Esquema da montagem amostra mais isolamento b) Temperaturas da montagem.....	68
Figura 6.5 - Esquema da área demarcada na Figura 6.6.....	69
Figura 6.6 - Perfil de temperatura no plano xz.....	69
Figura 6.7 - Evolução de temperatura a) ao longo do eixo x b) ao longo do eixo z.....	70
Figura 6.8 - Esquema da malha no plano xz.....	71
Figura 6.9 - Temperaturas na superfície da amostra para os termopares seleccionados..	72
Figura 6.10 - Perfil de temperatura em (°C) na superfície da amostra de PVC.....	75
Figura 6.11 - Perfil de temperatura em (°C) no eixo y da amostra de PVC.....	75
Figura A1.1 - DPT janela “Gráficos”: temperaturas experimentais.....	88

Figura A1.2 - DPT janela “Gráficos”: Fluxo de Calor.....	89
Figura A1.3 - DPT janela “Malha”: Termopares e Área do fluxo.....	90
Figura A1.4 - DPT janela “DPT”	91
Figura A1.5 - DPT janela “Análise”.....	92
Figura A2.1 - Esquemas de montagem para a calibração dos transdutores a) montagem I e b) montagem II.....	94
Figura A2.2 - Curva de calibração.....	96
Figura A3.1 - Método da Seção Áurea.....	97

LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1 - Parâmetros experimentais para o PVC amostra (245 x 25 x 245 mm).....	43
Tabela 5.2 - Valores médios determinados de α para o PVC com 99% de confiança.....	59
Tabela 5.3 - Valores médios determinados de λ para o PVC com 99% de confiança.....	60
Tabela 5.4 - Valores médios determinados de $\rho \cdot c_p$ para o PVC.....	61
Tabela 6.1 - Parâmetros experimentais para o PVC amostra (100 x 25 x 60).....	66
Tabela 6.2 - Valores médios estimados de α e λ para temperaturas experimentais simuladas com valores de referência ($\alpha = 1,28 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ e $\lambda = 0,157 \text{ W/mK}$) para a amostra de 100 x 25 x 60 mm.....	67
Tabela 6.3 - Parâmetros experimentais para o PVC amostra (305 x 25 x 245 mm).....	73
Tabela 6.4 - Valores médios estimados de α e λ para temperaturas experimentais simuladas com valores de referência ($\alpha = 1,28 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ e $\lambda = 0,157 \text{ W/mK}$) para a amostra de 305 x 25 x 245 mm.....	74
Tabela A1.1 - Exemplo do arquivo de entrada de dados.....	86
Tabela A1.2 - Exemplo do arquivo de entrada de dados(arquivo preparado para o PVC)	87

LISTA DE SÍMBOLOS

Letras Latinas

i, j, k	Índices de posição	
t, τ, p	Tempo	s
q''	Fluxo de calor	W/m ²
$T_i(t)$	Temperatura	°C
a, b, c	Dimensões da amostra	m
d, e, f, g	Constantes de calibração	W/m ² · V
x, y, z	Coordenadas cartesianas	m
c_p	Calor específico	J/kgK
F_1, F_2	Sinal elétrico gerado transdutores 1 e 2	V
$h(t)$	Função resposta no tempo (FRT)	$\frac{K \cdot m^2}{W}$
$H(f)$	Função resposta na frequência (FRF)	$\frac{K \cdot m^2}{W}$
$reH(f)$	Parte real da FRF	$\frac{K \cdot m^2}{W}$
$imH(f)$	Parte imaginária da FRF	$\frac{K \cdot m^2}{W}$
$X(t)$	Sinal de entrada no tempo	W/m ²
$Y(t)$	Sinal de saída no tempo	K
$X(f)$	Sinal de entrada na frequência	W/m ²
$Y(f)$	Sinal de saída na frequência	K
$ H(f) $	Módulo da FRF	$\frac{K \cdot m^2}{W}$
$S_{T,\lambda}$	Sensibilidade da temperatura em relação a condutividade térmica	

$S_{\varphi, \alpha}$	Sensibilidade da fase de H em relação a difusividade térmica	
$S_{xx}(f)$	Função autoespectral do sinal de entrada	W^2/m^4
$S_{yy}(f)$	Função autoespectral do sinal de saída	K^2
$S_{xy}(f)$	Função espectral cruzada	WK/m^2
$re(S_{xy}(f))$	Parte real da função espectral cruzada	WK/m^2
$im(S_{xy}(f))$	Parte imaginária da função espectral cruzada	WK/m^2
S_{φ}	Função objetivo de fase	rad^2
S_T	Função objetivo de temperatura	K^2
$R_{xy}(t), R_{xy}(f)$	Correlação cruzada	WK/m^2
$\mathfrak{F}[]$	Transformada de Fourier	
$\mathfrak{F}^{-1}[]$	Transformada inversa de Fourier	
$G()$	Função de Green	

Letras Gregas

α	Difusividade térmica	m^2/s
λ	Condutividade térmica	W/mK
$\theta_i(t)$	Diferença de temperaturas	K
$\phi_i(t)$	Fluxo de calor	W/m^2
$\varphi(f)$	Função fase	rad
ρ	Densidade mássica	kg/m^3
ε	Tolerância relativa	

Operadores Matemáticos

∂	Derivada parcial
Δ	Diferença finita

Tillmann, A. R, 2005, **Determinação da Condutividade Térmica e da Difusividade Térmica Variando com a Temperatura**, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, Brasil.

RESUMO

Propõe-se nesse trabalho uma técnica experimental para obtenção simultânea da difusividade térmica, α , e condutividade térmica, λ , variando com a temperatura de materiais isolantes. O modelo térmico usado considera a transferência de calor unidimensional em um meio submetido a um fluxo de calor transiente na superfície frontal e isolado na superfície oposta. A determinação simultânea dessas propriedades variando com a temperatura é feita usando-se o princípio da técnica Mista. Nessa técnica são definidas duas funções objetivo, uma no domínio da frequência e outra no domínio do tempo. Uma das funções é calculada a partir da fase da função resposta em frequência de um sistema dinâmico que tem como entrada o fluxo de calor e saída a temperatura em um modelo unidimensional. A segunda função objetivo é obtida usando os sinais de temperatura na superfície frontal e oposta ao aquecimento. Obtêm-se as propriedades α e λ variando com a temperatura para amostra de PVC (*Policloreto de Vinila*) a partir de uma montagem experimental. A montagem consiste basicamente de um forno com temperatura controlada. As propriedades α e λ foram determinadas para 7 (sete) pontos de temperaturas médias, nas faixas de 20°C a 66°C. As propriedades são estimadas a partir da imposição de um fluxo de calor que estabelece uma diferença de temperatura máxima entre as superfícies da amostra de 4,5 °C. Uma análise da disposição ótima dos sensores na superfície da amostra é realizada. Uma vez determinada a melhor localização dos sensores e a região de determinação das propriedades, em seguida é realizado o cálculo das propriedades α e λ variando com a temperatura através da técnica proposta.

Palavras-chave: Determinação de propriedades térmicas, Condução de calor, Otimização, Métodos experimentais.

Tillmann, A. R, 2005, **Identification of Temperature - Dependent Simultaneous Thermal Properties of Polyvinyl Chloride (PVC)**, Master Science Dissertation, Federal University of Uberlândia, Uberlândia, MG, Brasil.

ABSTRACT

This work proposes an experimental technique for simultaneous estimation of temperature-dependent thermal diffusivity, α and thermal conductivity, λ of insulation materials. The thermal model used considers a transient one-dimensional heat transfer problem. In this model a heat flux is imposed on the frontal surface and the sample is isolated on the opposite surface. The simultaneous determination of these properties is done by using the principle of the Mixed technique. In this technique two objectives functions are defined, one in the frequency domain and another in the time domain. The objective function in the frequency domain is based on the square difference between experimental and calculated values of the phase angle. While the other objective function is the least square error function of experimental and calculated signals of temperature. The properties α and λ are obtained by using an experimental apparatus that basically consists of an oven with controlled temperature. The properties α and λ were estimated for 7 (seven) points of average temperature in a range from 20 °C to 66 °C. The properties are determined with an additional heating of approximately 4.5 K on the frontal surface. Analyses are also performed to determine the sensors location on the sample. Afterwards the temperature-dependent thermal properties α and λ are determined through the proposed technique.

Keywords: Determination of thermal properties, Heat conduction, Optimization, Experimental methods.

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

A caracterização de materiais, através da identificação de suas propriedades representa um ramo bastante promissor e importante em diversos setores (setores industrial, elétrico, científico, controle de qualidade entre outros) que dependem da disponibilidade de materiais com propriedades físicas e químicas bem definidas e que tenham confiabilidade. A caracterização adequada dos materiais a serem processados é imprescindível na maioria dos processos industriais. Do ponto de vista econômico é importante que se tenham materiais bem caracterizados para garantir a competitividade dos mesmos no mercado internacional. Por exemplo, as determinações das propriedades dos materiais utilizados no setor elétrico são fundamentais para eficiência energética dos equipamentos fabricados no País. O mesmo se aplica as indústrias química, de alimentos que também necessitam ter um conhecimento das propriedades dos equipamentos, visto que a maioria dos mesmos trabalha a altas temperaturas e pressão. Dessa forma todo engenheiro deve estar inevitavelmente atento às características e comportamento dos materiais usados em seus projetos, uma vez que o conhecimento das propriedades do material é essencial na execução de projetos, evitando falhas, diminuindo custos e aumentando sua aplicação.

Dentre as principais propriedades físicas de um material do ponto de vista de cálculos térmicos destacam-se a difusividade térmica, α e a condutividade térmica, λ . A difusividade térmica mede a capacidade do material de conduzir a energia térmica em relação à sua capacidade de armazená-la. Ou seja, a difusividade térmica é uma medida da rapidez com que a energia térmica se propaga através do material. Ela é uma propriedade importante em todos os problemas envolvendo condução de calor no estado não estacionário. Já a condutividade térmica fornece uma indicação da taxa segundo a qual a energia é transferida pelo processo de difusão. A condutividade depende da estrutura física da matéria, a níveis atômicos e moleculares, que por sua vez está relacionada ao seu estado físico. A condutividade térmica assume um papel crítico no desempenho de materiais em muitas aplicações. Baixos valores de condutividade térmica são exigidos, quando se

pretende minimizar as perdas de calor. Por outro lado, a transferência de calor de uma parte para outra é obtida mais facilmente usando materiais de condutividade térmica mais alta. Assim sendo, dados confiáveis de condutividade térmica são essenciais na seleção de um material para que o mesmo possa ter o melhor desempenho possível em uma dada aplicação. Ela é a propriedade que determina o nível de temperatura de trabalho de um material, sendo um importante parâmetro em problemas envolvendo transferência de calor transiente.

Para a caracterização de materiais existe um grande número de técnicas, cada uma com sua particularidade e importância. Ressaltando que a cada dia se desenvolvem-se mais modelos refinados são desenvolvidos para determinadas análises algumas 0,00...1% melhores que as anteriores, mas para alimentar esses modelos usa-se, quando bem feito, valores de propriedades com incertezas de 2,5 % ou 10%. A dificuldade na obtenção dessas propriedades se deve a existência de erros sistemáticos e aleatórios, uma vez que envolve um modelo teórico e sua implementação experimental. Citam-se como exemplos, erros na restrição do modelo numérico, erros de calibração de sensores ou perdas de calor em modelos unidimensionais, tempo de resposta e incerteza de medição na aquisição de sinais, disposição e o número de sensores utilizados. A previsão desses erros e a otimização tanto de modelos como de experimentos representa, assim, um papel fundamental para o desenvolvimento de técnicas para obtenção de α e λ .

O uso racional e a economia de energia térmica são importantes demandas de nossa época, não só pela indústria, mas de uma maneira geral. Assim sendo, a transferência de calor com a máxima eficiência possível é tão importante quanto evitar perdas de calor com a utilização de materiais adequados. As propriedades físicas que determinam o uso de inúmeros materiais são aquelas propriedades diretamente relacionadas com mudança de temperatura. Essas propriedades são importantes para todos os materiais, independentes do seu uso. Entretanto, para aplicações como isolantes térmicos, ou sob condições nas quais uma boa resistência a tensões térmicas é requerida, elas são críticas. A determinação das propriedades térmicas α e λ do PVC variando com a temperatura é uma contribuição desse presente trabalho já que existem muitos processos onde essa variação deve ser considerada. Por exemplo, durante o processo de extrusão um polímero experimenta uma complicada história térmica. No trajeto inicial da extrusora, as partículas sólidas do polímero são aquecidas até o ponto de fusão. Na região intermediária, a temperatura do polímero fundido é aumentada até um nível considerável acima do ponto de fusão, enquanto as partículas sólidas remanescentes continuam sendo aquecidas até sua fusão. Na região final da extrusora, o polímero fundido tem que alcançar um estado

termicamente homogêneo. Quando o material deixa a extrusora ele é, então, resfriado normalmente até a temperatura ambiente. Pode-se concluir, portanto, que o conhecimento das propriedades térmicas de polímeros variando com a temperatura é crucial na descrição e análise do processo de extrusão.

Um outro exemplo da importância do conhecimento das propriedades térmicas do PVC variando com a temperatura é o seu uso como revestimento de fios e cabos elétricos devido a sua baixa ignitabilidade (não pega fogo fácil). A resistência à ignição é geralmente avaliada pela aplicação de testes com temperaturas em vários níveis. A molécula de cloro é a responsável pelo caráter natural antichama e pelas inúmeras formas e propriedades do PVC. A maioria dos materiais de PVC tem *flash point* (o mesmo fornece uma indicação de como prontamente um produto químico pode se queimar) de 391°C. Os produtos químicos com pontos flash mais elevados são mais menos inflamáveis ou perigosos do que aqueles com pontos flash mais baixos.

A difusividade térmica é importante em problemas transientes como os que ocorrem durante o aquecimento e resfriamento de um polímero. Ela é uma propriedade fundamental no processo de moldagem por injeção para determinação do tempo de ciclo de moldagem. Na análise da maioria dos problemas de extrusão ela é considerada constante, embora na realidade ela depende da pressão, temperatura e orientação molecular. Para o caso de polímeros como o PVC que são usados como isolantes térmicos, a determinação precisa da difusividade térmica é importante na avaliação do seu desempenho.

Existem poucas técnicas experimentais para determinação de propriedades térmicas α e λ variando com a temperatura sendo que a maioria delas usa dados experimentais simulados ou através de restrições, como a consideração de uma das propriedades constante. O número dessas técnicas diminui quando se deseja obter essas propriedades simultaneamente. Uma técnica bastante usada para estimação das propriedades α e λ é a técnica de estimação de parâmetros. Ressalta-se que para o uso dessa técnica com sucesso os chamados coeficientes de sensibilidade, definidos como a primeira derivada em relação a grandeza a ser medida, nesse caso a temperatura, devem ser linearmente independentes. Todavia, o maior problema dessa técnica reside na busca de regiões onde o comportamento de independência linear entre esses coeficientes ocorre. A técnica usada nesse trabalho representa uma forma alternativa na solução desse problema e foi inicialmente desenvolvida por Borges (2004) para materiais condutores e não condutores com propriedades constantes. A técnica usada se baseia na definição de duas funções objetivos, uma no domínio da frequência e outra no domínio do tempo. Uma função de fase no domínio da frequência é usada para a determinação de α , enquanto uma função

objetivo de mínimos quadrados é usada para a determinação de λ . Realizou-se uma montagem experimental composta por um forno com temperatura controlada numa faixa de 20°C a 66°C. O desenvolvimento da bancada experimental que possua potencial para ser aplicado na determinação das propriedades termofísicas variando com a temperatura representa uma das contribuições do presente trabalho.

Um outro aspecto importante é a determinação de α e λ utilizando uma superfície de acesso, ou seja, na mesma superfície é feita a excitação da amostra e as aquisições dos dados experimentais. A importância dessa técnica reside principalmente na sua aplicação para determinação das propriedades em meios já construídos (por exemplo *edificações).

No Capítulo II tem-se uma revisão de algumas técnicas existentes para determinação das propriedades térmicas α e λ . Na primeira parte é feita uma revisão dos métodos clássicos que determinam apenas uma propriedade como o método flash e o método do fio quente. Apresenta-se na segunda parte uma breve revisão dos métodos que determinam simultaneamente as duas propriedades à temperatura ambiente. A terceira parte consiste de uma breve revisão para se determinar as propriedades térmicas α e λ usando uma superfície de acesso ou seja utilizando somente uma superfície de trabalho onde são feitas a excitação do problema térmico e as medições das temperatura e fluxo de calor. Por fim uma revisão de estudos e técnicas usadas para medição das propriedades α e λ variando com a temperatura, é apresentada para desenvolvimento teórico.

No Capítulo III apresenta-se o desenvolvimento teórico que descreve a técnica proposta para a determinação das propriedades térmicas. A técnica se baseia em um sistema dinâmico do tipo entrada e saída onde as propriedades são obtidas através da identificação de duas funções objetivos uma no domínio da frequência utilizada para a obtenção de α e a outra no domínio do tempo usada para determinação de λ . A solução da equação de difusão de calor é feita através da discretização por diferenças finitas utilizando um método totalmente implícito. A solução do sistema de equações algébricas lineares obtidas dessa discretização é feita através do método iterativo SOR (Método das Sobre-relaxações Sucessivas).

No Capítulo IV apresentam-se a aplicação do método e os resultados da determinação das propriedades térmicas α e λ variando com a temperatura. Para determinação das propriedades utiliza-se a técnica descrita no Capítulo III para o modelo unidimensional. Para cada condição de temperatura imposta no controlador (20,00 K; 27,00 K; 36,00 K; 43,00 K; 50,00 K; 58,00 K e 65,00 K) são realizados 20 experimentos. Os valores médios da temperatura no forno para cada uma dela são: 20,81 K; 27,89 K; 37,40 K;

43,44 K; 49,34 K; 58,14 K e 65,89 K. A amostra é disposta no forno com temperatura controlada e as propriedades são estimadas a partir de um calor adicional de aproximadamente 4,5 K. A disposição ótima dos sensores na superfície da amostra são obtidas analisando-se os perfis de temperatura. Para determinar a melhor faixa e o número de pontos utilizados para o cálculo das propriedades são analisadas para o caso de α , as funções no domínio da frequência (autoespectrais e a espectral cruzada). Já para o λ a análise é feita através da função espectral cruzada no domínio do tempo. Juntamente com essas funções são também analisados os coeficientes de sensibilidade. Análises estatísticas dos dados e dos coeficientes de sensibilidade são realizadas para verificar os valores obtidos para as propriedades. Os resultados obtidos são comparados com os valores encontrados na literatura.

No Capítulo V descreve-se a montagem do aparato experimental e os equipamentos usados nesse trabalho.

No Capítulo VI apresenta-se uma investigação para a determinação das propriedades térmicas α e λ do PVC usando somente uma superfície de acesso. Nesse caso aplica-se a técnica apresentada no Capítulo III para um modelo de condução de calor tridimensional. Todavia, a obtenção das propriedades α e λ para as condições estudadas nessa parte devido aos problemas encontrados como o isolamento da amostra, baixa sensibilidade e principalmente o fato da distribuição de temperaturas no caso do PVC se encontrarem na espessura não foi satisfatória. Conclui-se o trabalho realizando uma análise dos resultados obtidos e apresentando algumas propostas para trabalhos futuros a partir do método desenvolvido.

Apresenta-se no Anexo I o software DPT (Determinação de Propriedades Termofísicas de Sólidos), desenvolvido para implementação da técnica e análise de dados.

Apresenta-se no Anexo II a calibração do transdutor de fluxo de calor usado nesse trabalho.

No Anexo III é mostrada a técnica de otimização, Seção Áurea.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Vários autores têm se dedicado ao estudo e desenvolvimento de técnicas para a determinação de propriedades termofísicas devido a uma série de fatores como por exemplo a sua grande aplicação na indústria ou seja conhecer as propriedades dos materiais dos equipamentos presentes na indústria já que os mesmos ficam diariamente expostos a condições diversas (altas temperaturas e pressão). Outra motivação se deve a grande quantidade de novos materiais que surgem todos os dias. Dessa forma apresenta-se assim uma breve revisão bibliográfica de alguns métodos existentes para determinação das propriedades difusividade térmica, α , condutividade térmica λ , e capacidade de calor volumétrica ρc_p . Primeiro apresentam-se alguns trabalhos referentes aos métodos clássicos para a obtenção da difusividade térmica (método Flash) e da condutividade térmica (método do Fio Quente). Apresentam-se a seguir técnicas para estimação simultânea das propriedades térmicas α e λ , usando uma e duas superfícies de acesso. Por último apresenta-se uma revisão de técnicas de estimação das propriedades α e λ variando com a temperatura assunto principal do presente trabalho.

2.1 Estimação não simultânea de propriedades térmicas

Para determinação de α e λ de materiais sólidos existem vários métodos clássicos como o método do Fio Quente e o método Flash. Os dois métodos podem ser usados para determinação simultânea dessas propriedades, mas usualmente o método do Fio Quente é mais indicado para a obtenção de λ enquanto o Flash para a determinação de α . Na seqüência apresenta-se uma descrição desses métodos

Blackwell (1954) desenvolve o método do Fio Quente que se baseia na solução da equação da difusão de calor, para uma fonte de calor em forma de linha infinita, imersa

numa amostra suposta infinita. Este método é realizado com a inserção de um elemento filiforme (sonda), geralmente de forma cilíndrica, no centro axial da amostra que se deseja medir. A sonda tem a função de dissipar calor (efeito Joule) e medir a temperatura no interior da amostra. Devido a alta resistência térmica de contato entre a sonda e a amostra esta técnica não é indicada para metais, uma vez que a presença de interstícios de ar no interior da amostra são muito difíceis de se evitar. Essa é uma restrição para uso dessa técnica. Uma outra restrição reside no fato que somente a condutividade térmica é obtida com precisão. Variações do método do fio quente têm sido usadas em trabalhos recentes como em André et al (2002) que caracterizam o método do Fio Quente usando técnicas inversas, Miyamura & Susa (2002) que determinam a condutividade em gálio líquido e Nahor et al. (2003) que otimizam a posição do fio quente para encontrar a condutividade térmica em alimentos. Santos et al. (2004) usam a técnica do fio quente paralelo normalizada para a determinação da condutividade térmica de materiais cerâmicos e determinaram as propriedades α , λ e c_p de polímeros. Neste trabalho, a condutividade térmica e calor específico são determinados a partir do mesmo transiente térmico experimental e a difusividade térmica foi calculada a partir dessas duas propriedades conhecidas. Cinco diferentes polímeros com diferentes estruturas são utilizados. Os cálculos são feitos por um método de ajuste por regressão não linear, de tal maneira que todos os pontos experimentais obtidos são considerados nos cálculos dessas propriedades térmicas.

Parker et al. (1961) descrevem pela primeira vez o método Flash. Neste método um pulso de calor radiante de alta intensidade e curta duração é aplicado sobre uma das superfícies da amostra. A difusividade térmica é determinada, então, através da identificação do tempo gasto para a temperatura na face oposta à radiação atingir seu valor máximo. Uma das grandes vantagens deste método é a possibilidade de determinar a difusividade térmica sem o conhecimento do fluxo de calor imposto na superfície. Na prática é difícil de se conseguir as condições experimentais ideais propostas por Parker et al. (1961). Ou seja, a excitação pode não ser pontual no tempo, pode não ser homogênea no espaço e a amostra pode estar sujeita a perdas térmicas. Uma limitação do método Flash para a determinação da condutividade térmica é a necessidade de se conhecer o valor da energia absorvida na face frontal da amostra. Inúmeros trabalhos usam o método Flash para medir a difusividade em diversos materiais como, por exemplo, Mardolcar (2002) em rochas a altas temperaturas, Zmuda et al. (2002) em dentes humanos, Eriksson et al. (2002) em silicato fundido, Shibata et al. (2002) em metais fundidos. Santos et al. (2003) determinaram a difusividade térmica de dez polímeros. As amostras foram preparadas em forma de disco, tendo aproximadamente 1 cm de diâmetro e 0,3 a 1 mm de espessura. Os resultados experimentais obtidos foram comparados com os dados existentes na literatura e com os

dados obtidos pela técnica. A concordância entre os resultados e a repetibilidade das medidas mostrou a viabilidade da utilização desta técnica experimental para materiais poliméricos. O aquecimento é proporcionado por um sistema de indução e permite medidas desde a temperatura ambiente até 3000 K. Meukam et al. (2004) utiliza o método do Flash para medir materiais de construção.

A maior dificuldade do método Flash reside na implementação do aparato experimental. O gerador laser responsável pelo pulso radiante de calor de alta intensidade e curta duração, torna caro o custo dos equipamentos. As restrições como as características destrutivas do método do fio quente ou o alto custo do método Flash, indicam a necessidade do desenvolvimento de métodos alternativos que possam contornar essas dificuldades.

2.2 Estimação simultânea de propriedades térmicas

A partir de dados de temperatura e fluxo de calor variável, Guimarães et al. (1995) determinam simultaneamente a condutividade térmica e a difusividade térmica de um sólido não condutor. O método baseia-se no princípio de um sistema dinâmico tipo entrada / saída. O problema da difusão de calor é criado pelo modelo experimental, a partir da imposição de um fluxo de calor na superfície frontal da amostra. Trata-se de um modelo unidimensional onde a combinação entre as técnicas de tratamento de sinais no domínio da frequência e a estimação de parâmetros mostra-se adequada para a medição simultânea de α e λ de materiais não metálicos. A determinação de α e λ de forma independente é a principal vantagem do uso de estimação de parâmetros no domínio da frequência.

Em Nicolau et al. (2002) um dispositivo experimental, bem como uma metodologia própria foi desenvolvido para a determinação simultânea das propriedades condutividade térmica e calor específico de materiais isolantes. O dispositivo é baseado na utilização de fluxímetros a gradientes tangenciais e aplica-se a amostras planas de formato quadrado. A metodologia consiste no aquecimento de uma das superfícies da amostra através de uma taxa constante, enquanto que a outra superfície é mantida à temperatura constante através do contato com uma placa refrigerada a água. O conjunto parte de uma condição inicial de temperatura uniforme e avança até a condição final de regime permanente, com gradiente de temperatura uniforme sobre o corpo de prova. No estado final, regime permanente, é calculada a condutividade térmica. O calor específico é calculado à partir da variação de temperatura sofrida pelo corpo de prova e da quantidade de calor absorvida, obtida dos valores de fluxos instantâneos acusados pelos fluxímetros. Um programa de simulação é desenvolvido para avaliação dos procedimentos de medição e dos erros envolvidos no

processo. Destaca-se que a determinação de λ é em regime permanente o que demanda tempos grandes e que as propriedades são somente obtidas para materiais não condutores.

O trabalho de Aviles-Ramos et al. (2001) apresenta a avaliação de uma técnica espectral para a determinação de propriedades termofísicas λ e ρc_p . Nesse caso, um experimento virtual transiente é construído, usando-se sinais periódicos. As soluções analíticas para a temperatura são encontradas para um modelo bidimensional no domínio do tempo e no domínio espectral, com as propriedades λ e ρc_p anisotrópicas. Sendo que no domínio espectral, o ângulo de fase, depende das posições relativas dos sensores de temperatura e também das propriedades termofísicas. As propriedades são encontradas a partir da minimização de uma função objetivo de mínimos quadrados de fase que é definida pela diferença ao quadrado entre a fase experimental e a fase calculada pelo modelo. A técnica para o cálculo do ângulo de fase apresentada é analítica, quando isto não é possível, soluções numéricas são necessárias para a solução da temperatura e ângulo de fase. Entretanto, além dos resultados nesse trabalho serem simulados uma limitação dessa técnica é a geração do fluxo de calor periódico, que exige uma montagem experimental difícil de se construir.

Lahoucine & Khellaf (2004) determinam λ e α do Delrin e do aço inoxidável AISI 304 para um modelo de difusão unidimensional (placa de espessura L), usando métodos periódicos levando em consideração os efeitos dos termopares. Nesse trabalho a difusividade térmica, α é obtida do atraso da fase, enquanto a condutividade térmica, λ é obtida através de um fator de correção para os efeitos dos termopares. Atualmente esse fator de correção diz respeito a amplitude de atenuação da temperatura medida devido aos efeitos do termopar. Esse fator é relacionado com a redução da amplitude da temperatura medida devido aos efeitos dos termopares. Esse fator fornece também informações sobre a interação do material sólido e do termopar. Então, além da natureza do contato e propriedades termofísicas do termopar, também contem informação sobre o sólido tal como sua condutividade e difusividade. Cita-se como desvantagem desse trabalho a geração de um fluxo de calor periódico, o que exige uma montagem experimental complicada e de alta custo.

Meukam et al (2004) realizam um estudo experimental para a caracterização térmica de materiais de construção. Neste trabalho, os autores verificaram o efeito da adição de saibro ou serragem no tijolo de solo laterítico sobre as propriedades térmicas λ e α . Neste sentido, os autores mostram que o efeito do uso de saibro ou serragem é o decréscimo das propriedades λ e α . O conteúdo de umidade destes materiais pode modificar o desempenho térmico deles. A condutividade térmica dos materiais foi obtida em

regime permanente através da Lei de Fourier. Já a difusividade térmica é obtida usando-se o método Flash.

Malinarič (2004) determina λ e α do PMMA (polymethylmethacrilate). A teoria do método da fonte plana dinâmica e seu aparato experimental são discutidas. Os métodos dos coeficientes de sensibilidade e da análise de diferença são usados para determinar o intervalo de tempo no qual os dados experimentais podem ser usados para obtenção λ e α . Ressalta-se, que também a influência do aquecedor e suas perdas nas laterais da amostra e a influência do ruído são estudadas.

Borges et al. (2005) desenvolvem uma técnica experimental para determinação simultânea e independente das propriedades térmicas difusividade, α e condutividade, λ de materiais metálicos e não-metálicos. A estimação da difusividade é realizada através da identificação da fase da resposta em frequência e a condutividade é determinada no domínio do tempo. As funções de transferência são calculadas numericamente possibilitando o uso de modelos uni, bi e tridimensionais e a aplicação da técnica em materiais condutores e não-condutores. Para implementação da técnica foi criado um software chamado DPT (Determinação de propriedades Termofísicas de sólidos). As propriedades foram calculadas para o PVC e para aço inox AISI 304.

2.3 Estimação simultânea de propriedades térmicas utilizando somente uma superfície de acesso

Alguns meios existentes (por exemplo: edificações), têm normalmente uma superfície de trabalho. Ou seja, apenas uma superfície onde se deve submeter a excitação térmica para o estabelecimento do problema térmico e, ainda, serem feitas as aquisições dos dados experimentais de temperatura e fluxo (determinação de propriedades termofísicas utilizando uma superfície de trabalho).

Moreno & Trevisan (1994) apresentam duas técnicas para determinação das propriedades térmicas α e λ no domínio do tempo usando somente uma superfície de trabalho, uma técnica chamada de convolução e outra de deconvolução. O modelo teórico estudado considera a condução de calor unidimensional em um material homogêneo e isotrópico de propriedades constantes e submetido às seguintes condições de contorno: temperatura na superfície $x = L$ mantida constante e igual à inicial, perfis de temperatura e de fluxo de calor conhecidos em $x = 0$. Entretanto para determinação das duas propriedades de forma simultânea Moreno & Trevisan (1994) necessitam que o estado permanente seja

atingido. Ou seja, nesse trabalho os autores determinam α em regime transiente e λ em regime permanente.

Dowding et al. (1996) descrevem um método para medir as propriedades térmicas para um modelo bidimensional para uma amostra composta de carbono-carbono. As propriedades térmicas são obtidas usando técnicas de estimação de parâmetros. Todavia para experimentos bidimensionais a análise é mais sensível às condições experimentais que para um modelo unidimensional. Por exemplo, a magnitude e duração do fluxo de calor devem produzir respostas adequadas para os sensores perto do aquecedor semelhantes aos sensores fora da região de aquecimento. Essa análise requer um tempo de aquecimento bem maior que para o modelo unidimensional. Outra limitação é que as posições dos termopares devem ser conhecidas com exatidão, especialmente na região de aquecimento onde existem altas temperaturas. Apesar de não ser difícil o posicionamento dos termopares na amostra de carbono-carbono, é difícil de se alinhar o aquecedor de mica junto com os termopares, uma vez que os elementos de aquecimento não são visíveis. A utilização desse método em campo não é possível devido ao fato que o fluxo de calor é obtido a partir da leitura da potência gerada na fonte de alimentação. Isso só é possível usando uma montagem simétrica.

Lima e Silva et al. (2003) desenvolveram uma técnica experimental adequada para determinação de α e λ de polímeros utilizando uma superfície de acesso. Duas funções objetivos distintas são usadas para a determinação dessas propriedades. Uma função objetivo de fase definida a partir da correlação entre os sinais de temperatura experimental e teórico no domínio da frequência é usada para a determinação de α . Uma outra função objetivo de mínimos quadrados entre os sinais de temperatura experimental e teórico no domínio do tempo é usada para a determinação de λ .

2.4 Estimação simultânea de propriedades térmicas variando com a temperatura

O objetivo principal desse trabalho é a medição das propriedades α e λ variando com a temperatura devido a sua grande aplicação. Por exemplo, no caso de materiais metálicos têm-se os processos de laminação e recozimento nos quais as temperaturas podem variar mais de 1000 °C, os processos industriais (como por exemplo, às indústrias siderúrgicas, minérios etc) onde a maioria dos equipamentos está exposta a condições de altas temperaturas. Dessa forma é imprescindível o conhecimento das propriedades dos materiais desses equipamentos variando com a temperatura, pois evita falhas e garante a

segurança das pessoas que manuseiam esses equipamentos. No caso de materiais isolantes como o PVC, material de análise do presente trabalho o mesmo está presente como revestimento de fios e cabos elétricos. A fim de garantir a plena segurança aos usuários, a Portaria INMETRO 87/2003 deliberou pela certificação obrigatória dos fios e cabos com isolação em PVC para tensões nominais de 450/750 V. Da mesma forma é importante o conhecimento das propriedades desse material a fim de diminuir os riscos de acidentes na rede elétrica como, por exemplo, curto circuito. Uma outra aplicação do PVC é em tubulações rígidas e flexíveis presente na maioria das indústrias químicas por se tratar de um material resistente à maioria dos reagentes químicos, impermeável a gases e líquidos, não propaga chamas: é auto-extinguível. O conhecimento das propriedades térmicas do material (PVC) variando com a temperatura garante a aplicabilidade do mesmo em vários setores da indústria sem causar riscos como, por exemplo, a ruptura ou derretimento das tubulações.

Muitos métodos têm sido desenvolvidos para estimar propriedades térmicas variando com a temperatura. Pode-se citar, por exemplo, os métodos de otimização que são baseados na diferença das temperaturas medidas e calculadas os quais requer procedimentos iterativos. Outro método também se baseia no uso de medições internas de temperatura no interior do meio de interesse. Esse procedimento não é muito adequado experimentalmente, pois conduz a erros devido à resistência de contato existente entre a amostra e o dispositivo de medição (termopar) além da incerteza da posição do termopar na amostra. Esses erros comprometem a estimativa das propriedades. A expressão matemática das propriedades em função da temperatura está associada a resolução da equação de difusão de calor para a obtenção da distribuição de temperatura na amostra ou meio analisado. Essa função quando expressa em termos das propriedades térmicas trata-se de uma equação não-linear. Muitos autores têm utilizado a chamada transformação de Kirchhoff para converter essa função em uma equação linear (Lesnic et al., 1995 e Kim, 2001). Um método também utilizado para estimativa de propriedades variando com a temperatura é através do método integral (Kim et al., 2003). A seguir têm-se alguns desses métodos usados.

Lesnic et al. (1995), determinam a condutividade térmica em função da temperatura de um material para um modelo unidimensional. A difusividade térmica do material é considerada constante e conhecida. A equação de difusão de calor é linearizada utilizando a transformação de Kirchhoff e medidas de temperatura em posições arbitrárias do espaço são utilizadas para produzir uma única solução. A dependência da condutividade com a temperatura é obtida de forma explícita através da soma de uma série infinita, enquanto a solução da temperatura é obtida implicitamente. Uma análise em relação a posição do

sensor foi feita e verifica-se que a condutividade térmica é fortemente dependente da posição em que é colocada o sensor de temperatura.

Dowding et al. (1999) obtêm λ e ρc_p para uma amostra composta de carbono-carbono a partir de uma série de experimentos transientes usando um método seqüencial. As propriedades foram determinadas da temperatura ambiente até 500 °C. A expressão da dependência das propriedades com a temperatura obtida com o método seqüencial foi comparada com uma análise que considera os experimentos de forma independente, ou seja, as propriedades são determinadas considerando que em cada experimento as mesmas são constantes e determinadas para cada experimento. São usados tanto fluxos de calor unidimensionais como bidimensionais.

Kim (2001) desenvolve um método para determinação da condutividade térmica variando com a temperatura sem medições internas de temperatura. Nesse método a equação de difusão de calor não linear é linearizada usando a transformação de Kirchhoff que se trata de um procedimento que transforma um processo difusivo não-linear em uma equação linear através da introdução de uma nova variável. A equação linear obtida é resolvida com a transformada de Laplace determinando a distribuição de temperaturas. A condutividade térmica é determinada a partir da combinação linear de funções conhecidas e coeficientes que são obtidos a partir do conhecimento do fluxo de calor e temperaturas nos contornos. A fim de verificar a eficiência do método proposto são estudados quatro exemplos cada um com um tipo de função para a condutividade térmica variando com a temperatura. Os resultados se mostram satisfatórios quando comparados com os valores obtidos da condutividade térmica na literatura.

Em Luo et al. (2003) a condutividade térmica é obtida dependente da temperatura a partir de uma fonte de calor linear constante no centro. Nesse caso a difusividade térmica do material é considerada constante e aplicando a transformação de Kirchhoff, a equação de difusão de calor é linearizada e a solução analítica do problema inverso de condução de calor é obtida. Baseada nessa solução a condutividade é determinada a partir de temperaturas medidas numa região arbitrária $r = r_0$. A técnica foi testada para um material de grande dimensão através da aplicação da fonte de calor linear no centro da amostra.

Kim et al. (2003) desenvolvem um método integral para estimar a condutividade térmica variando com a temperatura sem o uso de medições internas de temperatura para um modelo unidimensional onde uma das faces é aquecida e a outra é isolada. O problema inverso de condução de calor não-linear é resolvido considerando a condutividade térmica uma função linear da temperatura e usando o método integral. A distribuição de temperatura para o método integral é assumida como uma função polinomial de terceira ordem onde os

coeficientes da equação são determinados utilizando dois fluxos de calor impostos e duas temperaturas medidas no contorno. Experimentos numéricos validam o método proposto.

Pode-se observar que as técnicas apresentadas nessa seção na maioria das vezes obtêm somente uma propriedade térmica variando com a temperatura. Outra limitação para o uso dessas técnicas é que os resultados são obtidos a partir de dados experimentais simulados com erros aleatórios.

Nesse capítulo buscou-se reunir informações da maior quantidade possível de técnicas a fim de se utilizar uma técnica experimental que obtenha de forma simultânea as propriedades térmicas α e λ variando com a temperatura. Essa técnica é desenvolvida a partir de um modelo térmico unidimensional. A base da técnica é a obtenção da difusividade térmica a partir da identificação da fase da resposta em frequência como proposto por Borges (2004). A condutividade térmica é obtida no domínio do tempo. Essa mesma técnica também é usada para obtenção de α e λ usando somente uma superfície de acesso. No entanto, para esse caso é usado o modelo térmico tridimensional.

CAPÍTULO III

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Neste capítulo apresenta-se o desenvolvimento teórico no qual se baseia a técnica de determinação das propriedades térmicas α e λ . Os fundamentos teóricos são descritos para um modelo térmico tridimensional que por sua vez contempla o modelo unidimensional. O modelo unidimensional é usado no Capítulo V para obtenção de α e λ variando com a temperatura. Já o modelo tridimensional é utilizado para obtenção de α e λ usando somente a superfície frontal ao aquecimento (ver Capítulo VI). Como mencionado essa técnica baseia-se no trabalho de Borges et al. (2005).

3.1 Modelos Térmicos

3.1.1 Modelo Tridimensional

O modelo térmico pode ser obtido de um problema de transferência de calor tridimensional, como mostra a Fig (3.1). No modelo térmico uma amostra homogênea de espessura L e temperatura inicial T_0 é sujeita a um fluxo de calor $\phi_1(t)$ a partir do tempo inicial $t = 0$. A temperatura $T_1(t)$ é a temperatura frontal ao aquecimento e $T_2(t)$ é a temperatura também na superfície frontal só que próximo ao aquecimento próximo ao aquecimento.

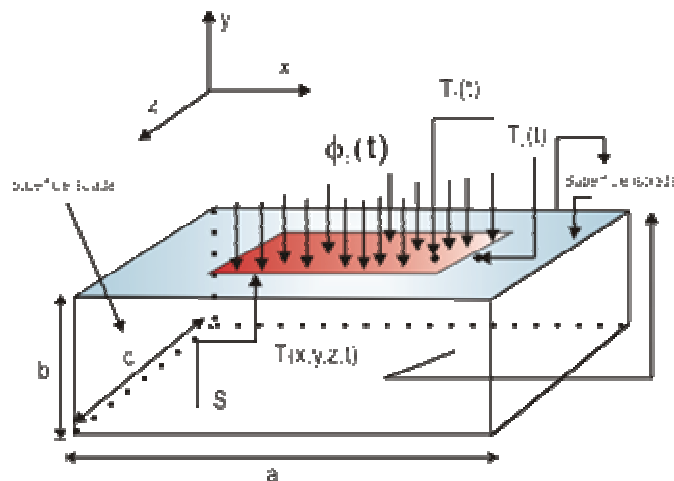


Figura 3.1 - Modelo térmico tridimensional equivalente

Os sinais de entrada $X(t)$ e de saída $Y(t)$ são definidos independentemente do modelo térmico utilizado respectivamente como:

$$X(t) = \phi_1(t) \quad (0.1)$$

$$Y(t) = \theta_1(t) - \theta_2(t) = \Delta\theta \quad (0.2)$$

onde $\theta_1 = T_1 - T_0$ e $\theta_2 = T_2 - T_0$

A equação da difusão de calor governante do problema mostrado na Figura (3.1) pode ser escrita por:

$$\frac{\partial^2 T(x, y, z, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(x, y, z, t)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T(x, y, z, t)}{\partial z^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial t} \quad (0.3)$$

na região R ($0 < x < a$, $0 < y < b$, $0 < z < c$) em $t > 0$, sujeita à condição inicial:

$$T(x, y, z, 0) = T_0 \quad (0.4)$$

e às condições de contorno:

$$-\lambda \frac{\partial T(x, b, z, t)}{\partial y} = \phi_1(t) \text{ em } S_1 \quad (0 \leq x \leq x_H, \quad 0 \leq z \leq z_H) \quad (0.5)$$

$$\frac{\partial T(x, b, z, t)}{\partial y} = 0 \text{ em } S_2 \text{ (} x, z \in S \mid (x, z) \notin S_1 \text{)} \quad (0.6)$$

$$\frac{\partial T(0, y, z, t)}{\partial x} = \frac{\partial T(a, y, z, t)}{\partial x} = \frac{\partial T(x, 0, z, t)}{\partial y} = \frac{\partial T(x, y, 0, t)}{\partial z} = \frac{\partial T(x, y, c, t)}{\partial z} = 0 \quad (0.7)$$

onde S representa a superfície dada por $(0 \leq x \leq a, 0 \leq z \leq c)$ e x_H e z_H os limites da superfície S_1 onde é aplicado a fonte de calor. A não linearidade da equação da difusão indica a solução numérica como alternativa para diminuir o custo computacional também facilitar a implementação do problema térmico.

Uma vez conhecido o valor de $\phi_1(t)$, a solução da Eq.(0.3) representa o problema direto em estudo. Entretanto, a proposta do Cap.VI é a obtenção das propriedades α e λ utilizando uma superfície de trabalho. A obtenção das duas propriedades partir da medição da temperatura em regiões acessíveis da amostra caracteriza a solução de um problema inverso de condução de calor. A solução do problema inverso exige, por sua vez, a construção de um algoritmo que permita a identificação das propriedades. A determinação da difusividade térmica se dá através da identificação de uma função objetivo no domínio da frequência. Já a determinação da condutividade térmica se dá através de uma técnica de otimização que minimiza uma função erro definida pelo quadrado das diferenças entre as temperaturas medidas experimentalmente e calculadas pelo modelo térmico a partir da solução do problema direto (Eq. 3.3).

3.1.1.1 Solução Numérica: Modelo Tridimensional

Para a solução da Eq. (0.3) desenvolveu-se uma modelagem numérica baseada no método das diferenças finitas com formulação implícita. Para a discretização numérica do domínio de cálculo, considerou-se as dimensões reais das amostras. A Fig. (3.2) apresenta essas dimensões.

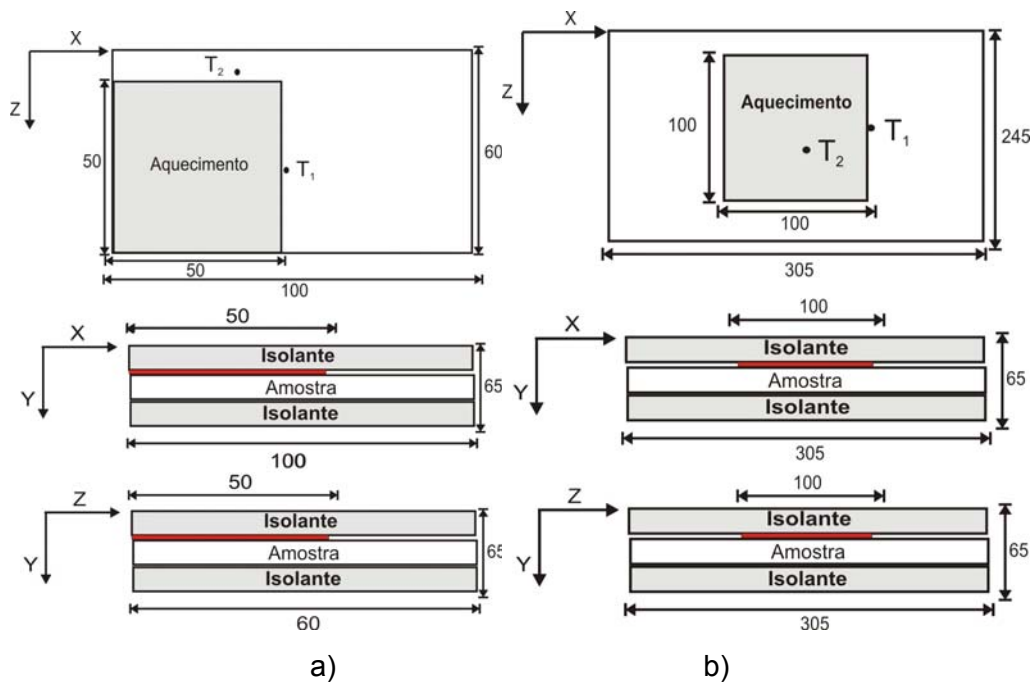


Figura 3.2 - Dimensões em mm das amostras para o modelo 3D a) Amostra 1 b) Amostra 2

Assim, baseando-se nessas dimensões, discretizou-se as amostras a partir de uma malha mais refinada no plano xz como apresentado na Fig. (3.3).

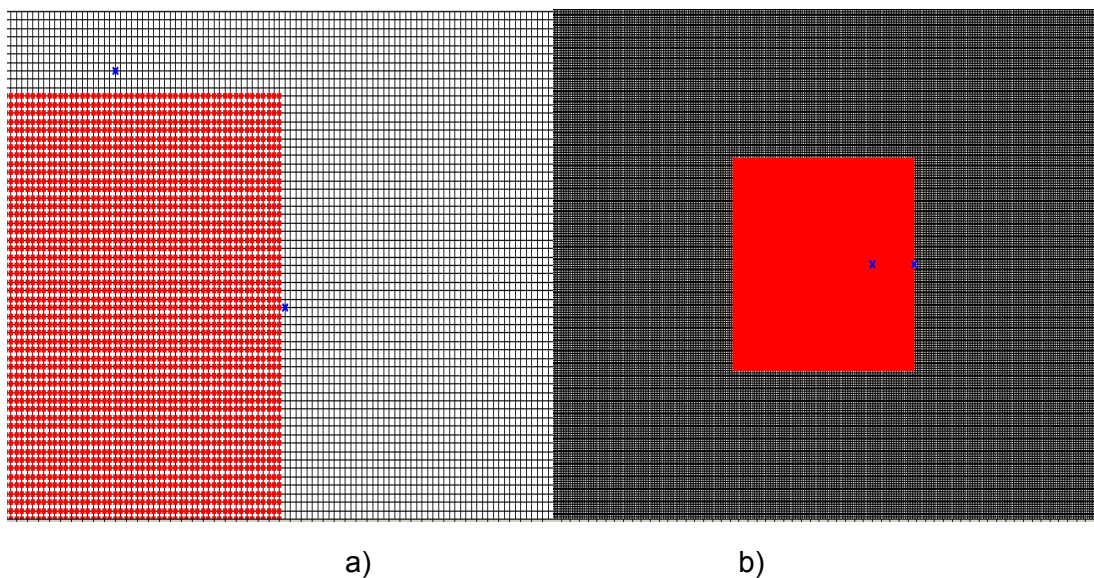


Figura 3.3 – Discretização do plano xz a partir de uma malha tridimensional regular

Dentre as várias técnicas numéricas existentes, optou-se pelo uso do método das diferenças finitas com formulação implícita por possuir baixo custo computacional quando associado a outros métodos de solução de equações diferenciais. Neste caso, a Equação

(0.3), em sua forma discretizada, pode ser obtida a partir do balanço de energia aplicado a um nodo de referência da malha numérica, assim como apresentado na Fig. (3.4):

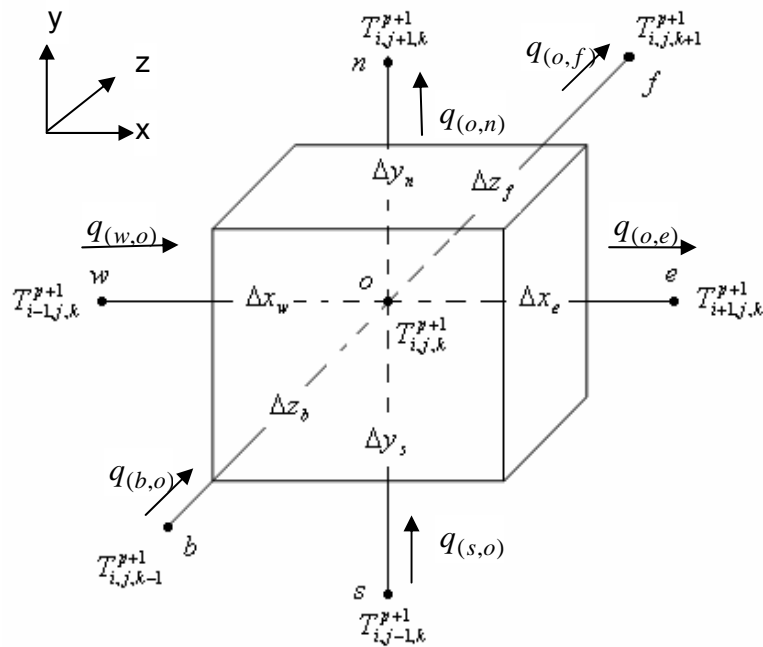


Figura 3.4 – Volume de controle infinitesimal em coordenadas cartesianas

Aplicando-se então o balanço de energia, tem-se:

$$q_{(w,o)} - q_{(o,e)} + q_{(s,o)} - q_{(o,n)} + q_{(b,o)} - q_{(o,f)} = \frac{\lambda}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} V \quad (0.8)$$

onde q representa a taxa de transferência de calor por condução no elemento infinitesimal (Fig.3.4). Nesse caso, reescrevendo a Eq.(0.8), tem-se:

$$\begin{aligned} \lambda A_{yz} \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_o^w - \lambda A_{yz} \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_o^e + \lambda A_{xz} \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_o^s - \lambda A_{xz} \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_o^n + \lambda A_{xy} \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_o^b - \lambda A_{xy} \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_o^f = \\ = \frac{\lambda}{\alpha} \frac{T_{i,j,k}^{p+1} - T_{i,j,k}^p}{\Delta t} V \end{aligned} \quad (0.9)$$

onde,

$$A_{yz} = \frac{\Delta y_n + \Delta y_s}{2} \times \frac{\Delta z_f + \Delta z_b}{2},$$

$$A_{xz} = \frac{\Delta x_e + \Delta x_w}{2} \times \frac{\Delta z_f + \Delta z_b}{2},$$

$$A_{xy} = \frac{\Delta x_e + \Delta x_w}{2} \times \frac{\Delta y_n + \Delta y_s}{2}$$

e T é a temperatura no nodo analisado, Δt o intervalo de medição da temperatura, i, j, k a coordenada do nó, t o tempo, Δx_w é a distância $w \leftrightarrow o$ (Fig. 3.6), Δx_e a distância $o \leftrightarrow e$, Δy_s a distância $s \leftrightarrow o$, Δy_n a distância $o \leftrightarrow n$, Δz_b a distância $b \leftrightarrow o$ e Δz_f a distância $o \leftrightarrow f$.

Reescrevendo a Eq.(0.9) na forma implícita, tem-se:

$$\begin{aligned} A_{yz} \frac{(T_{i-1,j,k}^{p+1} - T_{i,j,k}^{p+1})}{\Delta x_w} - A_{yz} \frac{(T_{i,j,k}^{p+1} - T_{i+1,j,k}^{p+1})}{\Delta x_e} + A_{xz} \frac{(T_{i,j-1,k}^{p+1} - T_{i,j,k}^{p+1})}{\Delta y_s} + \\ - A_{xz} \frac{(T_{i,j,k}^{p+1} - T_{i,j+1,k}^{p+1})}{\Delta y_n} + A_{xy} \frac{(T_{i,j,k-1}^{p+1} - T_{i,j,k}^{p+1})}{\Delta z_b} - A_{xy} \frac{(T_{i,j,k}^{p+1} - T_{i,j,k+1}^{p+1})}{\Delta z_f} = \\ = \frac{V}{\alpha \Delta t} (T_{i,j,k}^{p+1} - T_{i,j,k}^p) \end{aligned} \quad (0.10)$$

Rearranjando os termos da Eq. (0.10), tem-se:

$$\begin{aligned} \frac{A_{yz}}{\Delta x_w} T_{i-1,j,k}^{p+1} + \frac{A_{yz}}{\Delta x_e} T_{i+1,j,k}^{p+1} - \frac{A_{yz}}{\Delta x_w} T_{i,j,k}^{p+1} - \frac{A_{yz}}{\Delta x_e} T_{i,j,k}^{p+1} + \\ \frac{A_{xz}}{\Delta y_s} T_{i,j-1,k}^{p+1} + \frac{A_{xz}}{\Delta y_n} T_{i,j+1,k}^{p+1} - \frac{A_{xz}}{\Delta y_s} T_{i,j,k}^{p+1} - \frac{A_{xz}}{\Delta y_n} T_{i,j,k}^{p+1} + \\ \frac{A_{xy}}{\Delta z_b} T_{i,j,k-1}^{p+1} + \frac{A_{xy}}{\Delta z_f} T_{i,j,k+1}^{p+1} - \frac{A_{xy}}{\Delta z_b} T_{i,j,k}^{p+1} - \frac{A_{xy}}{\Delta z_f} T_{i,j,k}^{p+1} + \\ - \frac{V}{\alpha \Delta t} T_{i,j,k}^{p+1} = - \frac{V}{\alpha \times \Delta t} T_{i,j,k}^p \end{aligned} \quad (0.11)$$

A Equação (0.11), pode então ser reescrita na seguinte forma algébrica linear:

$$a_o T_{i,j,k}^{p+1} + a_w T_{i-1,j,k}^{p+1} + a_e T_{i+1,j,k}^{p+1} + a_s T_{i,j-1,k}^{p+1} + a_n T_{i,j+1,k}^{p+1} + a_b T_{i,j,k-1}^{p+1} + a_f T_{i,j,k+1}^{p+1} = b \quad (0.12)$$

onde os coeficientes a_o , a_w , a_e , a_s , a_n , a_b , a_f e b são definidos de acordo com a Eq. (0.11).

Uma vez estabelecida uma rede nodal e escrita uma equação em diferenças finitas apropriada para cada nodo, a distribuição de temperatura pode então ser determinada. O problema se reduz à solução de um sistema de equações algébricas lineares (Eq. 3.22). Numerosos métodos estão disponíveis na literatura. Neste trabalho é usado o SOR (Método das Sobre-relaxações Sucessivas). Ressalta-se que as principais características do SOR são suas propriedades de convergência e simplicidade de aplicação.

3.1.2 Modelo Unidimensional

O modelo térmico pode ser também obtido de um problema de transferência de calor unidimensional como mostra a Fig. (3.5). No modelo térmico uma amostra homogênea de espessura L e temperatura inicial T_0 é sujeita a um fluxo de calor $\phi_1(t)$ a partir do tempo inicial $t = 0$. A temperatura $T_1(t)$ é a temperatura frontal ao aquecimento e $T_2(t)$ é a temperatura oposta ao aquecimento.

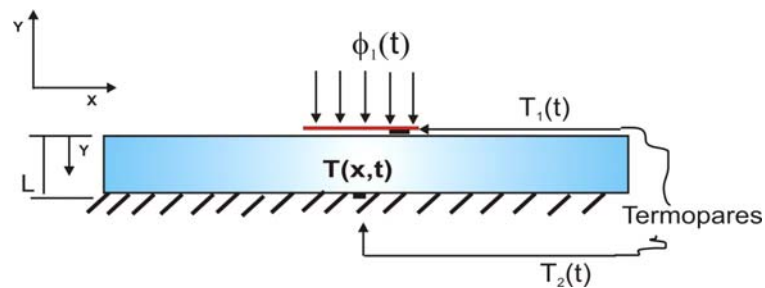


Figura 3.5 - Modelo térmico unidimensional equivalente

A equação da difusão de calor governante do problema mostrado na Figura (3.2) pode ser escrita por:

$$\frac{\partial^2 T(y,t)}{\partial y^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T(y,t)}{\partial t} \quad (0.13)$$

e às condições de contorno:

$$-\lambda \frac{\partial T(0,t)}{\partial y} = \phi_1(t) \quad \frac{\partial T(L,t)}{\partial y} = 0 \quad T(y,0) = T_0 \quad (0.14)$$

Uma vez conhecido o valor de $\phi_1(t)$, a solução da Eq.(0.13) representa o problema direto em estudo.

3.1.2.1 Solução Numérica: Modelo Unidimensional

Para a solução da Eq. (0.13) também foi usada uma modelagem numérica baseada no método das diferenças finitas com formulação implícita. Para a discretização numérica do domínio de cálculo, considerou-se as dimensões reais das amostras. A Fig. (3.6) apresenta essas dimensões.

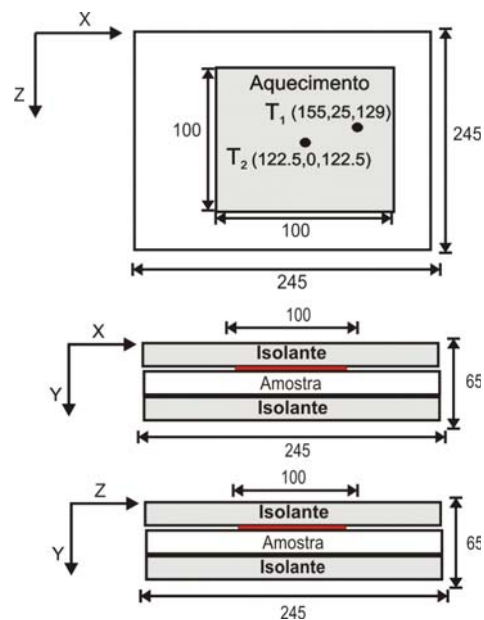


Figura 3.6 - Dimensões em mm da amostra para o modelo 1D

A técnica numérica utilizada para resolução da Eq.(0.13) foi o método das diferenças finitas com formulação implícita por possuir baixo custo computacional quando associado a outros métodos de solução de equações diferenciais. Neste caso, a Equação (0.13), em sua

forma discretizada, pode ser obtida a partir do balanço de energia aplicado a um nodo de referência da malha numérica, assim como apresentado na Fig. (3.7):

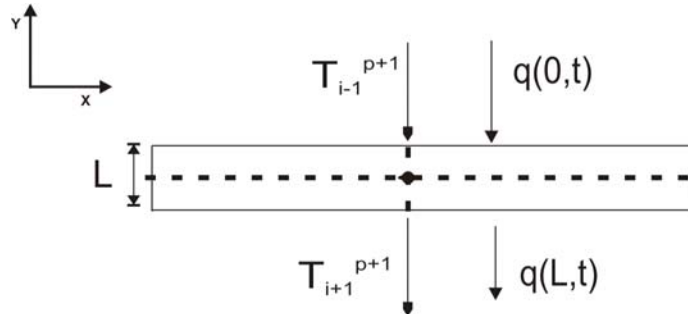


Figura 3.7 – Volume de controle infinitesimal em coordenadas cartesianas - modelo 1D

Aplicando-se então o balanço de energia, tem-se:

$$q(0,t) - q(L,t) = \frac{\lambda}{\alpha} \frac{dT}{dt} V \quad (0.15)$$

onde q representa a taxa de transferência de calor por condução no elemento infinitesimal (Fig. 3.4). Nesse caso, tem-se que $q(L,t) = 0$, então reescrevendo a Eq. (0.15), tem-se:

$$\lambda A_{xy} \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_0^L = \frac{\lambda}{\alpha} \frac{T_i^{p+1} - T_i^p}{\Delta t} V \quad (0.16)$$

onde, $A_{xy} = \Delta x \cdot \Delta y$

Reescrevendo a Eq.(0.16) na forma implícita, tem-se:

$$A_{xy} \frac{(T_{i-1}^{p+1} - T_{i+1}^{p+1})}{\Delta y} = \frac{V}{\alpha \Delta t} (T_i^{p+1} - T_i^p) \quad (0.17)$$

Rearranjando os termos da Eq. (0.17), tem-se:

$$A_{xy} \cdot \frac{T_{i-1}^{p+1}}{\Delta y} - A_{xy} \cdot \frac{T_{i+1}^{p+1}}{\Delta y} - \frac{V}{\alpha \Delta t} \cdot T_i^{p+1} = -\frac{V}{\alpha \Delta t} \cdot T_i^p \quad (0.18)$$

A Equação (0.18), pode então ser reescrita na seguinte forma algébrica linear:

$$a_o \cdot T_{i-1}^{p+1} + a_1 \cdot T_{i+1}^{p+1} + a_2 \cdot T_i^{p+1} = c \quad (0.19)$$

onde os coeficientes a_o , a_1 , a_2 e c são definidos de acordo com a Eq. (0.18).

Uma vez estabelecida uma rede nodal e escrita uma equação em diferenças finitas apropriada para cada nodo, a distribuição de temperatura pode então ser determinada. O problema se reduz à solução de um sistema de equações algébricas lineares (Eq. 3.19). Da mesma forma que no modelo tridimensional o sistema de equações algébricas lineares foi resolvido utilizando o SOR (Método das Sobre-relaxações Sucessivas).

3.2 Sistema dinâmico

A técnica proposta para determinação das duas propriedades baseia-se em um sistema dinâmico do tipo entrada/saída como mostrado na Fig. (3.8).



Figura 3.8 - Sistema dinâmico tipo entrada/saída

O modelo térmico por sua vez pode ser obtido de um problema de transferência de calor tridimensional, como mostra a Fig (3.1) ou de um modelo térmico unidimensional como mostra a Fig. (3.5).

Assim, o modelo dinâmico é descrito pela função resposta $h(\tau)$, que é definida como a saída do sistema em qualquer tempo a um pulso unitário aplicado a um tempo anterior τ . Logo, para qualquer sinal de entrada $X(t)$, a saída do sistema $Y(t)$ pode ser dada pela integral de convolução, Bendat & Piersol (1986).

$$Y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t-\tau) X(t) d\tau \quad (0.20)$$

Uma vez que para sistemas fisicamente realizáveis (causal) $h(\tau) = 0$ para $\tau < 0$, a Eq.(0.20) pode ser escrita como:

$$Y(t) = \int_0^{\infty} h(t-\tau) X(t) d\tau \quad (0.21)$$

Se o sistema é estável e fisicamente realizável, a função resposta a um pulso unitário, $h(t-\tau)$, pode também ser descrita no domínio da frequência como:

$$H(f) = \int_0^{\infty} h(t-\tau) e^{-j2\pi f\tau} d\tau \quad (0.22)$$

onde $j = \sqrt{-1}$. Ainda, se $X(f)$ e $Y(f)$ são respectivamente as transformadas de Fourier de $X(t)$ e $Y(t)$, ou seja:

$$Y(f) = \int_0^{\infty} Y(t) e^{-j2\pi ft} dt \quad (0.23)$$

$$X(f) = \int_0^{\infty} X(t) e^{-j2\pi ft} dt \quad (0.24)$$

onde a transformada de Fourier de uma função $f(t)$ é definida por:

$$\mathfrak{T}[f(t)] = F(f) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-j2\pi ft} dt \quad (0.25)$$

e sua inversa por $\mathfrak{T}^{-1}[F(f)]$

$$\mathfrak{T}^{-1}[F(f)] = f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} F(f) e^{-j2\pi ft} df \quad (0.26)$$

então:

$$Y(f) = H(f) \times X(f) \quad (0.27)$$

e a função resposta em frequência de um sistema pode ser obtida por:

$$H(f) = \frac{Y(f)}{X(f)} \quad (0.28)$$

Observa-se que $H(f)$ é uma função complexa e, portanto, é escrita como:

$$H(f) = |H(f)| e^{-j\varphi(f)} \quad (0.29)$$

onde os termos $|H(f)|$ e $\varphi(f)$ são respectivamente o módulo e a fase da resposta em frequência, $H(f)$. A fase $\varphi(f)$ por sua vez é definida por:

$$\varphi(f) = \arctang[imH(f)/reH(f)] \quad (0.30)$$

onde $imH(f)$ e $reH(f)$ representam a parte real e imaginária de $H(f)$.

A resposta em frequência $H(f)$ no domínio do tempo e a evolução temporal das temperaturas nas superfícies do sistema, $T_1(t)$ e $T_2(t)$ são a base da técnica experimental proposta para a determinação da difusividade térmica e condutividade térmica do sistema e são apresentadas nas próximas seções. Entretanto, antes da descrição do procedimento das estimativas de α e λ , torna-se necessário a verificação da equivalência entre o modelo dinâmico e os modelos térmicos apresentados na Fig. (3.1) e (3.5). A determinação das temperaturas teóricas será feita através da resolução da respectiva equação de difusão de calor proposta para esse modelo térmico.

A solução das Eqs. (3.3)–(3.7) pode ser expressa em termos da função de Green (Özsisik, 1993) como sendo respectivamente:

$$T(x, y, z, t) - T_0 = \frac{\alpha}{\lambda} \int_{\tau=0}^t \left[\int_{S'} G(x, y, z/x', y', z', t-\tau) \Big|_{y'=b} dS' \right] \phi_1(\tau) d\tau \quad (0.31)$$

onde $G(x, y, z/x', r', z', t-\tau)$ é a função de Green associada ao problema térmico apresentado. A Eq. (0.31) pode ser escrita como:

$$\theta(x, y, z, t) = \int_{\tau=0}^t G^+(x, y, z, t-\tau) \cdot \phi(\tau) d\tau \quad (0.32)$$

onde,

$$G^+(x, y, z, t-\tau) = \frac{\alpha}{\lambda} \int_S G(x, y, z / x', y', z', t-\tau) \Big|_{y'=b} dS' \quad (0.33)$$

Para duas posições quaisquer dadas pelos pares (x_1, y_1, z_1) e (x_2, y_2, z_2) , a Eq. (0.32) é dada por:

$$\theta(x_1, y_1, z_1, t) = \theta_1(t) = \int_{\tau=0}^t G_1^+(t-\tau) \cdot \phi_1(\tau) d\tau \quad (0.34)$$

$$\theta(x_2, y_2, z_2, t) = \theta_2(t) = \int_{\tau=0}^t G_2^+(t-\tau) \cdot \phi_1(\tau) d\tau \quad (0.35)$$

Se $G_i^+(t)$ e $\phi_i(t)$ são funções de t para $t > 0$ então as Eqs. (0.34) e (0.35) representam a integral de convolução destas funções denotadas por $G_i^+ * \phi_i$, ou seja:

$$\theta_1(t) = G_1^+ * \phi_1(\tau) = \int_{\tau=0}^t G_1^+(t-\tau) \cdot \phi_1(\tau) d\tau \quad (0.36)$$

$$\theta_2(t) = G_2^+ * \phi_2(\tau) = \int_{\tau=0}^t G_2^+(t-\tau) \cdot \phi_1(\tau) d\tau \quad (0.37)$$

Se as transformadas de Fourier da convolução das Eqs.(0.36) e (0.37) existem umas de suas propriedades podem ser aplicadas, Abramowitz and Stegun (1968), ou seja:

$$\mathfrak{F}(G_1^+(t) * \phi_1(t)) = G_1^+(f) \cdot \phi_1(f) \quad (0.38)$$

$$\mathfrak{F}(G_2^+(t) * \phi_1(t)) = G_2^+(f) \cdot \phi_1(f) \quad (0.39)$$

As Eqs. (0.38) e (0.39) podem ser escritas no domínio da frequência como:

$$\theta_1(f) = G_1^+(f) \cdot \phi_1(f) \quad (0.40)$$

$$\theta_2(f) = G_2^+(f) \cdot \phi_1(f) \quad (0.41)$$

Observa-se que como $\phi_1(t)$ e $\theta_1(t)$ e $\theta_2(t)$ são obtidos de medições discretas, podem ser calculados diretamente aplicando-se a técnica de transformada rápida de Fourier usando-se o algoritmo de Cooley-Tukey (Bendat & Piersol, 1986). Subtraindo-se a Equação (0.40) da Equação (0.41) obtém-se

$$\frac{\theta_1(f) - \theta_2(f)}{\phi_1(f)} = (G_1^+(f) - G_2^+(f)) = H(f) \quad (0.42)$$

onde $H(f)$ é denominada função resposta em frequência de um sistema. Observa-se que $H(f)$ é uma função complexa e, portanto, é escrita como:

$$H(f) = |H(f)| e^{-j\varphi(f)} \quad (0.43)$$

onde os termos $|H(f)|$ e $\varphi(f)$ são respectivamente o módulo e a fase da resposta em frequência, $H(f)$. A fase $\varphi(f)$ por sua vez é definida por:

$$\varphi(f) = \arctang[imH(f)/reH(f)] \quad (0.44)$$

onde $imH(f)$ e $reH(f)$ representam a parte imaginária e real de $H(f)$.

A função resposta em frequência é fortemente dependente das propriedades térmicas do sistema (Borges et al, 2004), ou seja:

$$H(f) = \frac{\theta_1(f) - \theta_2(f)}{\phi_1(f)} = \frac{Y(f)}{X(f)} = \text{função}(\alpha, \lambda) \quad (0.45)$$

A fase de $H(f)$ é uma função exclusiva de α :

$$\varphi(f) = \text{função}(\alpha) \quad (0.46)$$

A utilização dessa técnica proposta por Borges (2004) representa uma alternativa para determinação das propriedades térmicas já que se dispõe de duas funções que determinam as propriedades de forma simultânea e independente.

3.3 Determinação das propriedades térmicas α e λ

A base da técnica para a determinação das propriedades α e λ de forma simultânea e independente é conseguida através da definição de duas funções objetivo uma no domínio da frequência usada para determinação de α e uma no domínio do tempo usada para determinação de λ .

3.3.1 Determinação da difusividade térmica

Verifica-se que a fase é só função de α o que é comprovado analiticamente por Guimarães (1993) para um modelo unidimensional e numericamente por Borges (2004) o modelo tridimensional. Assim pode-se determinar a difusividade térmica através da minimização de uma função objetivo, S_φ , baseados na diferença entre os valores experimentais e calculados da fase. Esta função é, por sua vez, definida como:

$$S_\varphi = \sum_{i=1}^{N_f} (\varphi_e - \varphi)^2 \quad (0.47)$$

onde φ_e e φ são respectivamente os valores experimentais e calculados da fase de $H(f)$. Os valores teóricos são calculados através do modelo matemático, isto é, usando a solução da equação da difusão de calor do modelo térmico (uni e tridimensional). Logo, os valores de α são os valores estimados que minimizam a Eq. (0.47). Faz-se a minimização usando-se o método da Seção Áurea com Aproximação Polinomial (Vanderplaats, 1984). A técnica da Seção Áurea é apresentada em detalhes no Anexo III.

O cálculo da fase de $H(f)$ envolve a aplicação da Transformada de Fourier usando-se o algoritmo de Cooley-Tukey (Fast Fourier Transform), Bendat & Piersol (1986), nos sinais originais de fluxo e temperatura, $X(t)$ e $Y(t)$. Como o uso direto de $X(f)$ e $Y(f)$ pode produzir alguma instabilidade numérica, a função resposta em frequência $H(f)$ é obtida através da multiplicação da Eq. (0.45) pelo complexo conjugado de $X(f)$, ou seja:

$$H(f) = \frac{Y(f) X^*(f)}{X(f) X^*(f)} = \frac{S_{xy}(f)}{S_{xx}(f)} \quad (0.48)$$

onde S_{xy} é a densidade espectral cruzada de $\mathbf{X}(f)$ e $\mathbf{Y}(f)$, e S_{xx} é a densidade autoespectral de $\mathbf{X}(f)$. A Eq. (0.48) é mais estável devido ao melhor comportamento da densidade espectral com a frequência.

3.3.2 Determinação da condutividade térmica

Determinada a difusividade térmica obtém-se a condutividade térmica minimizando-se uma função objetivo baseada no erro quadrático entre as temperaturas medidas experimentalmente, $\theta_e(t)$, e aquelas obtidas através do modelo teórico, $\theta(t)$. Da mesma forma anterior para minimização usa-se método da Seção Áurea com Aproximação Polinomial, Vanderplaats (1984). Portanto o valor de λ ótimo será escolhido entre o menor valor que minimiza a função S_{mq} , definida como:

$$S_{mq} = \sum_{i=1}^{N_s} \sum_{j=1}^{N_t} [\theta_e(i, j) - \theta(i, j)]^2 \quad (0.49)$$

onde N_s é o número de sensores e N_t é o número de pontos.

A técnica apresentada nesse capítulo é aplicada no Capítulo IV para a determinação das propriedades térmicas variando com a temperatura do PVC para um modelo térmico unidimensional e um modelo térmico tridimensional para obtenção de α e λ usando uma superfície de acesso.

CAPÍTULO IV

APARATO EXPERIMENTAL

A montagem da bancada experimental é constituída basicamente de aquecedores elétricos, transdutores de fluxo de calor, termopares, computador, sistema de aquisição, amostra de PVC, isolantes térmicos, fonte de alimentação, controlador de temperatura entre outros. Nas Figuras (4.1)-(4.2) tem-se os esquemas e dimensões das montagens experimentais para a amostra de PVC destinadas à determinação das propriedades variando com a temperatura.

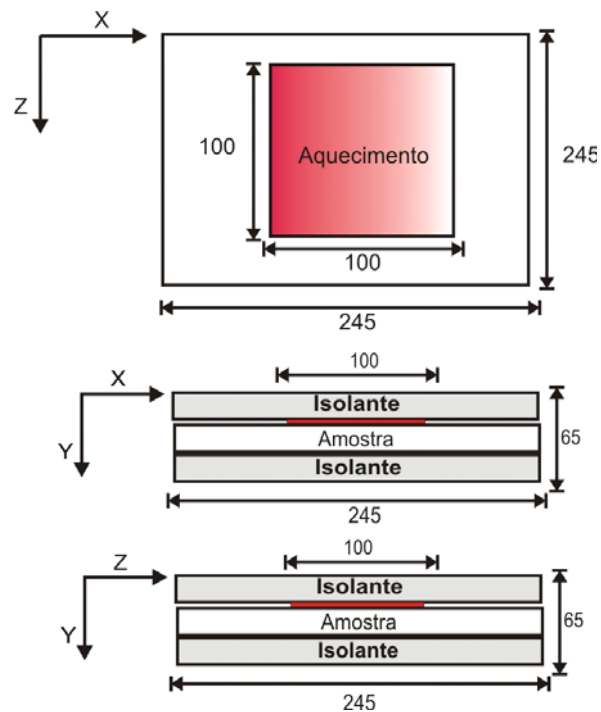


Figura 4.1 – Esquema de montagem para a amostra de PVC com dimensões de (245 x 25 x 245 mm)

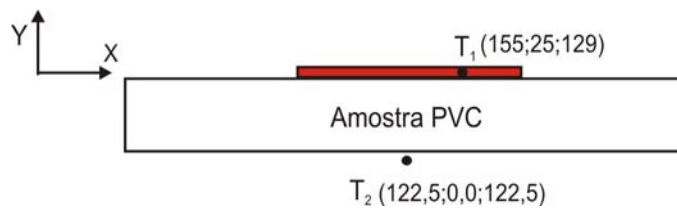


Figura 4.2 – Posição dos termopares na amostra de PVC (245 x 25 x 245 mm)

Na Figura (4.3) tem-se um esquema da bancada para determinação das propriedades do PVC variando com temperatura e na Fig. (4.4) tem-se uma foto mais detalhada da bancada experimental utilizada. Na Figura (4.5) tem-se uma foto da amostra de PVC.

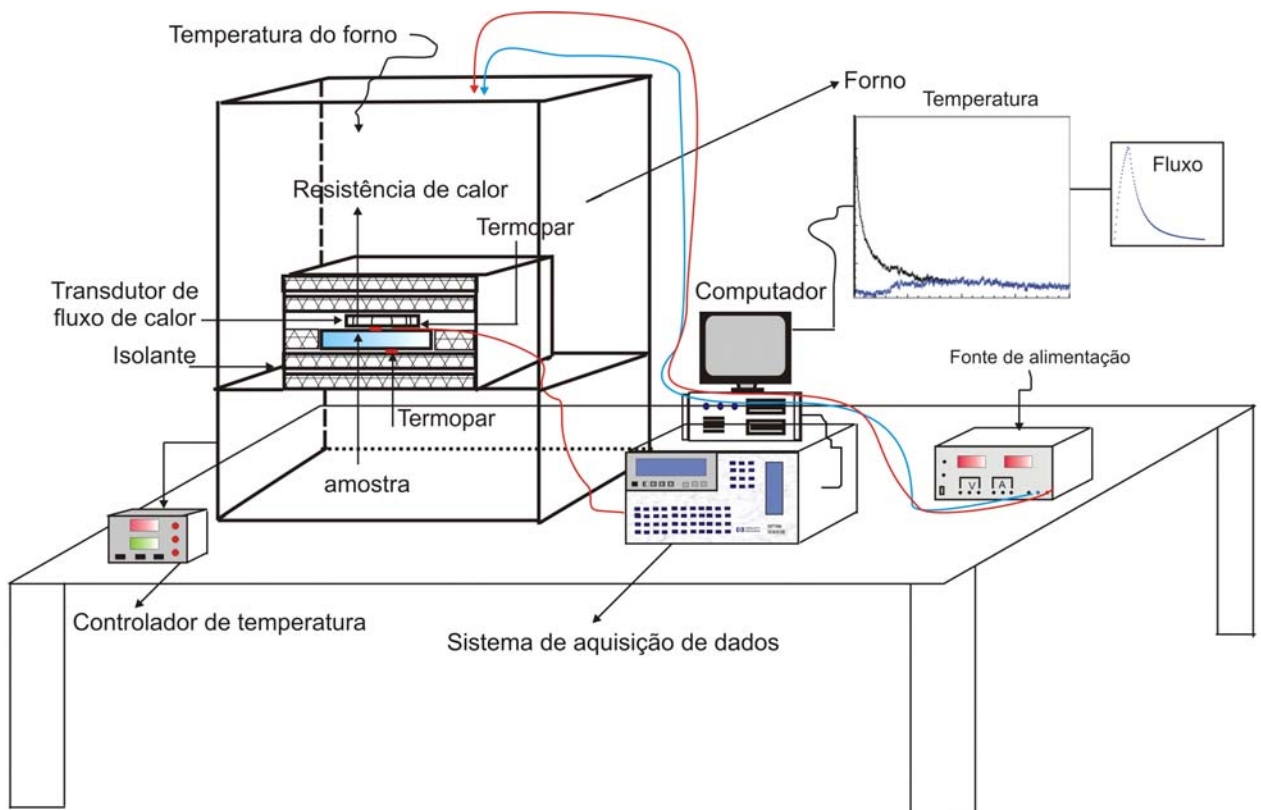


Figura 4.3 - Esquema de montagem da bancada experimental



Figura 4.4 - Foto da bancada experimental



Figura 4.5 - Amostra de PVC disposta dentro do forno

Para o controle da temperatura do forno usou-se o Controlador Watlow/Ecil SÉRIE 93 1/16 DIN, (Fig. 4.6). Na Figura (4.7a) tem-se uma foto com mais detalhes do controlador e na Fig. (4.7b) tem-se um esquema mais detalhado da ligação do controlador.



Figura 4.6 - Controlador Watlow/Ecil SÉRIE 93 1/16 DIN

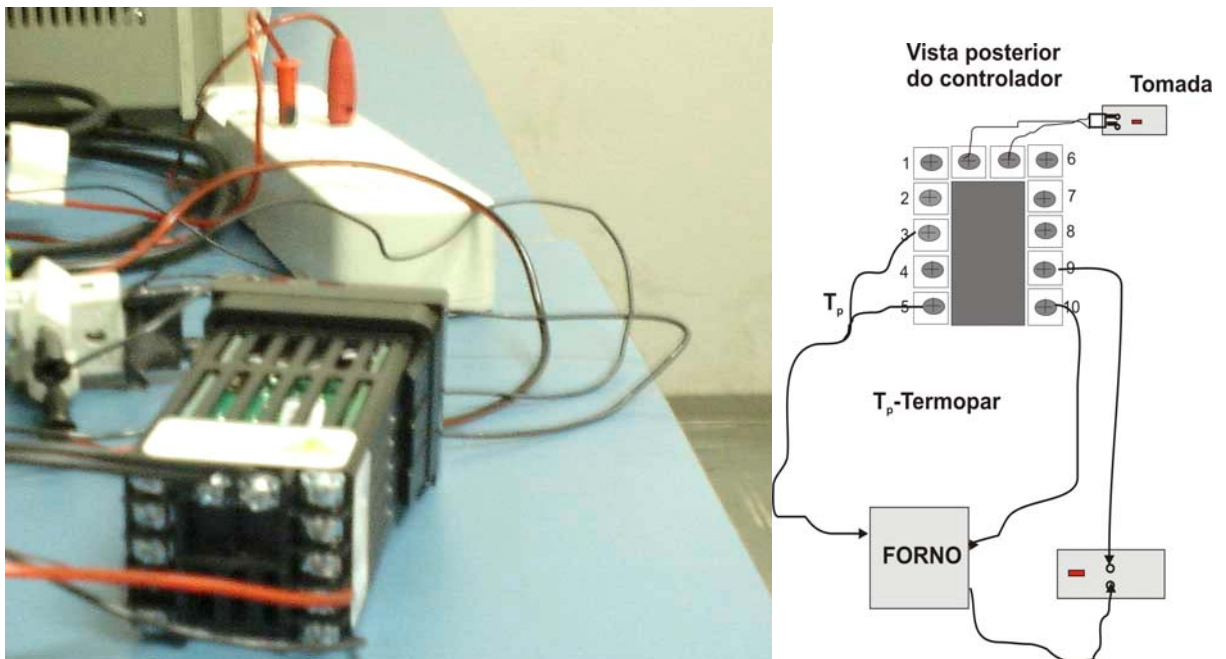


Figura 4.7 - Ligação do controlador ao forno a) Foto b) Esquema ilustrativo da ligação

A montagem da bancada experimental descrita na Figura (4.4) foi realizada em uma sala com temperatura controlada. Para as condições de temperatura média no forno de 20,66°C e 27,86 °C a sala foi controlada para uma temperatura de 20 °C e 27 °C respectivamente. Para essas condições o controlador de temperatura estava desligado. Já

para as outras condições de temperatura média do forno a temperatura da sala foi controlada em 25 °C.

Os sinais medidos de temperatura e fluxo de calor foram adquiridos usando o sistema de aquisição de dados HP 75000 SERIES B, mostrado na Fig. (4.8), conectado a um micro computador. Todas as condições de contorno são de isolamento, ou seja, todas as faces expostas são recobertas com material isolante de poliestireno expandido ($\lambda = 0,02 \text{ W / mK}$). O transdutor de fluxo de calor utilizado foi desenvolvido por Güths et al (1995), com dimensões de 50 x 0,7 x 50 mm. Os termopares são do tipo T (Cobre/Constatan), os aquecedores resistivos de dimensões 50 x 0,2 x 50 mm para amostra de 100 x 25 x 60 mm e 100 x 0,2 x 100 mm para as amostra de 305 x 25 x 245 mm e 245 x 25 x 245 mm e foram alimentados por uma fonte de corrente contínua, MCE, modelo 1051.



Figura 4.8 - HP 75000 SERIES B

Por fim nas Figuras (4.9)-(4.11) tem-se os esquemas e dimensões das montagens das amostras de PVC destinadas a determinação das propriedades utilizando uma superfície de acesso (Capítulo VI).

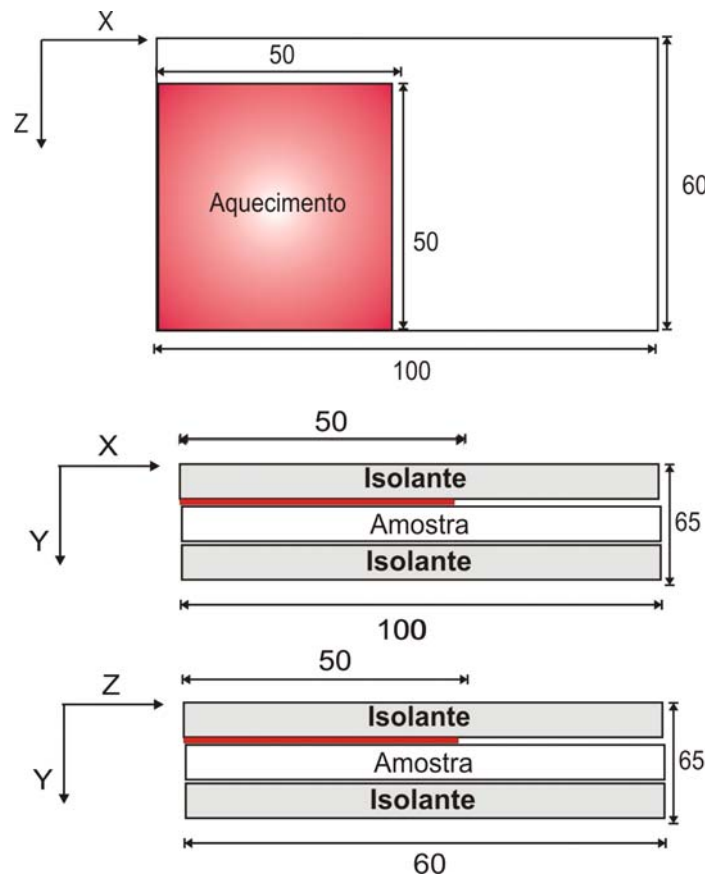


Figura 4.9 - Esquema de montagem para a amostra de PVC (100 x 25 x 60 mm)

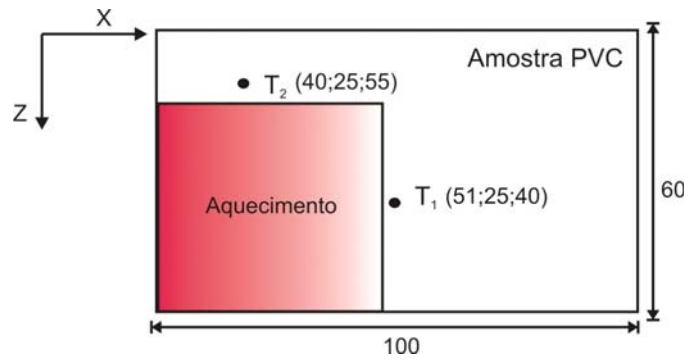


Figura 4.10 - Posição dos termopares na amostra de PVC (100 x 25 x 60 mm)

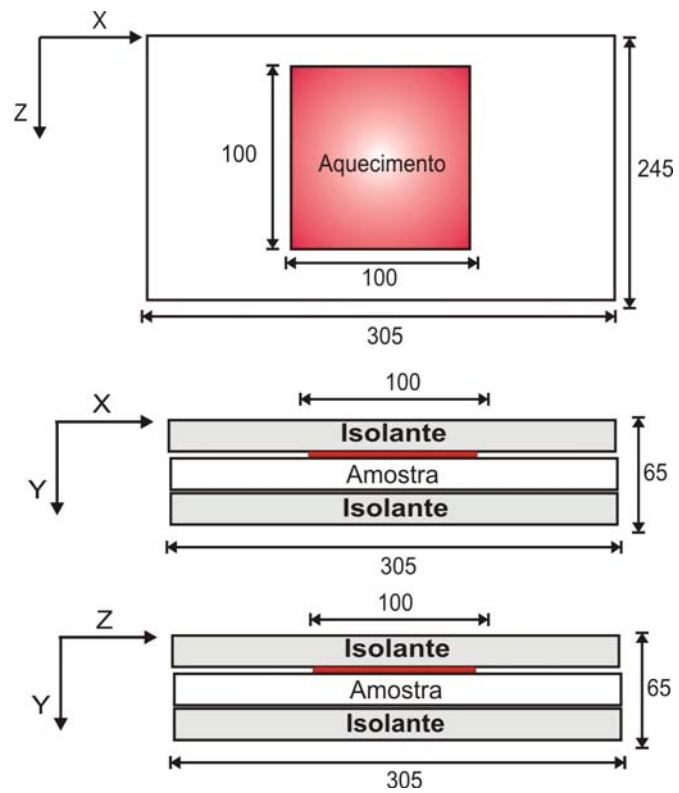


Figura 4.11 - Esquema de montagem para a amostra de PVC (305 x 25 x 245 mm)

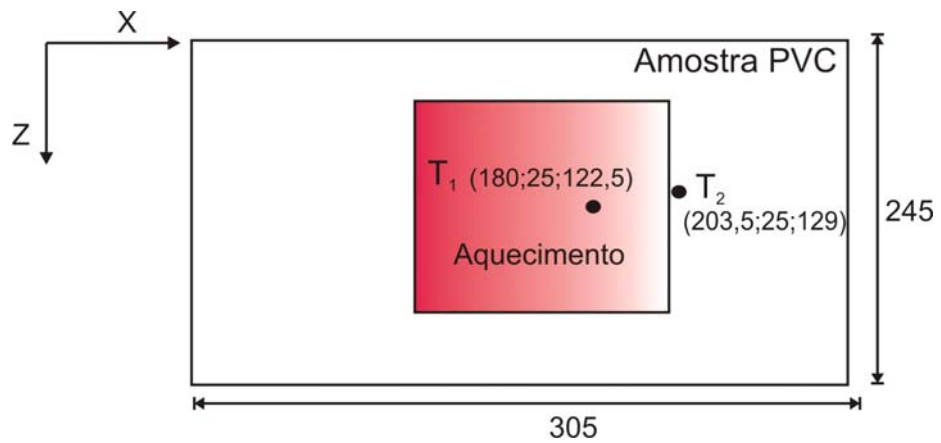


Figura 4.12 - Posição dos termopares na amostra de PVC (305 x 25 x 245 mm)

CAPÍTULO V

DETERMINAÇÃO DE PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS VARIANDO COM A TEMPERATURA

5.1 Introdução

Neste capítulo apresenta-se os resultados da determinação simultânea da difusividade térmica, α e condutividade térmica, λ variando com a temperatura. A idéia de se determinar essas duas propriedades variando com a temperatura veio primeiramente da existência de poucas técnicas experimentais para determinação dessas propriedades. Uma vez que a maioria dessas técnicas é composta de restrições em relação a uma das propriedades como se pode observar no Capítulo II. Outra motivação para a medição dessas propriedades variando com a temperatura é devido a existência de muitos processos onde a variação de temperatura é alta e deve ser considerada. Como mencionado o PVC foi escolhido como material de análise devido a importância de se conhecer suas propriedades térmicas como por exemplo nos processos de extrusão e moldagem. Uma vez que durante esses processos o polímero passa por uma complicada história térmica, o conhecimento de suas propriedades térmicas torna-se crucial na descrição e análise do processo. O PVC apresenta diversas aplicações como, por exemplo, está presente na maioria das tubulações industriais devido a sua grande resistência química, alto *flash point* (391 °C) o que faz com ele seja pouco inflamável e principalmente por ser um isolante térmico. Em situações de estado estacionário o conhecimento da condutividade térmica é essencial para adequada aplicação dos polímeros como isolantes.

O bom desempenho de uma técnica para determinação das propriedades α e λ variando com a temperatura depende de um conjunto de fatores que vão desde a definição do tamanho da amostra, até a definição de todos os parâmetros experimentais usados para o cálculo das propriedades. Dessa forma inicialmente determinou-se as dimensões e o tipo de amostra a ser investigado e através de simulações numéricas os parâmetros

experimentais (tempo de aquisição dos dados, intensidade do fluxo de calor, duração média de aquecimento e tamanho da malha).

A análise das funções no domínio da frequência: as densidades autoespectrais, as densidades espectrais cruzadas e a correlação cruzada juntamente com a análise de sensibilidade são utilizadas para determinar a melhor faixa na frequência para determinar as propriedades. Para o cálculo das propriedades térmicas são utilizados os sinais experimentais de temperatura e fluxo de calor adquiridos através de uma montagem experimental descrita no Capítulo IV. Definidas todas as condições experimentais encerra-se o capítulo com a apresentação dos resultados para a determinação de α e λ variando com a temperatura.

5.2 Definições do tipo, dimensões da amostra e posição dos termopares

O material usado para realizar as medições foi o *Policloreto de Vinila* (PVC) de dimensões 245 x 25 x 245 mm. A escolha do PVC além das aplicações mencionadas também se deve a disponibilidade de amostras desse material no laboratório e ao conhecimento preciso das propriedades térmicas do mesmo.

A escolha de grandes dimensões para a largura e comprimento da amostra está relacionada com as condições impostas no modelo teórico, ou seja, condição de isolamento no contorno. Então, devido a esse fato utilizou-se um tamanho de amostra grande a fim de minimizar as perdas de calor nas bordas laterais. A amostra grande contribui não só para minimizar as perdas de calor na amostra, mas também para garantir a unidimensionalidade do problema proposto. Uma vez definido o tamanho da amostra o próximo passo é a definição da localização dos termopares na superfície da amostra. Ressalta-se que no domínio da frequência a escolha da posição dos termopares na superfície da amostra também está associada ao cálculo numérico da transformada rápida de Fourier (FFT). Uma vez que para seu melhor desempenho os sinais nesse caso os sinais de temperatura devem tender a zero. A localização dos sensores de temperatura também deve ocorrer em regiões onde se tenha uma evolução significativa da diferença de temperatura $\Delta\theta = \theta_1 - \theta_2$ (Eq. 3.2). Para verificar esse fato observou-se os perfis de temperatura na superfície da amostra. Nas Figuras (5.1) e (5.2) tem-se um esboço dos perfis de temperatura na superfície da amostra. Nesse caso nota-se que o gradiente de temperatura na amostra de PVC se encontra no eixo y , Fig. (5.2). Como nesse caso o modelo usado é unidimensional a escolha da posição ótima é feita na direção onde está presente o gradiente de temperatura. Na Figura (5.3) tem-se o par de termopares que melhor atenderam os princípios da técnica proposta e na Figura (5.4)

tem-se o esquema da disposição desses termopares na superfície da amostra. Ressalta-se que os perfis foram analisados no instante de tempo igual a 32 s.

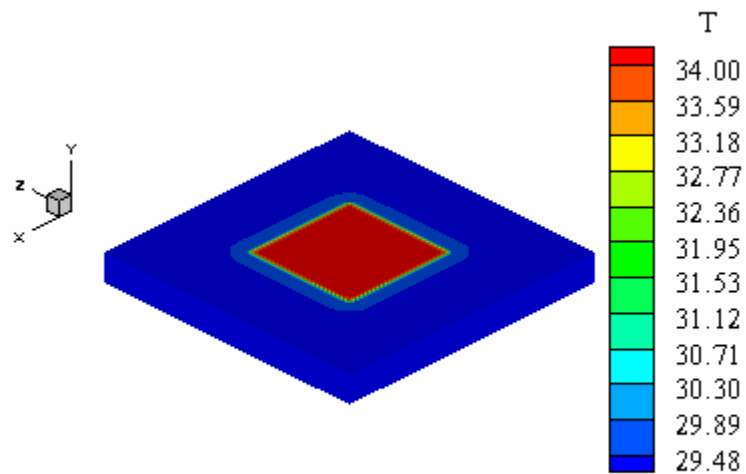


Figura 5.1 - Perfil de temperatura em (°C) na superfície da amostra de PVC

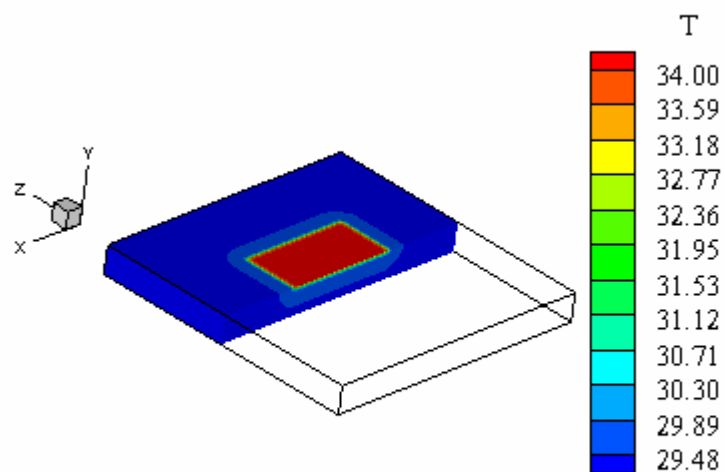


Figura 5.2 - Perfil de temperatura em (°C) no eixo y da amostra de PVC

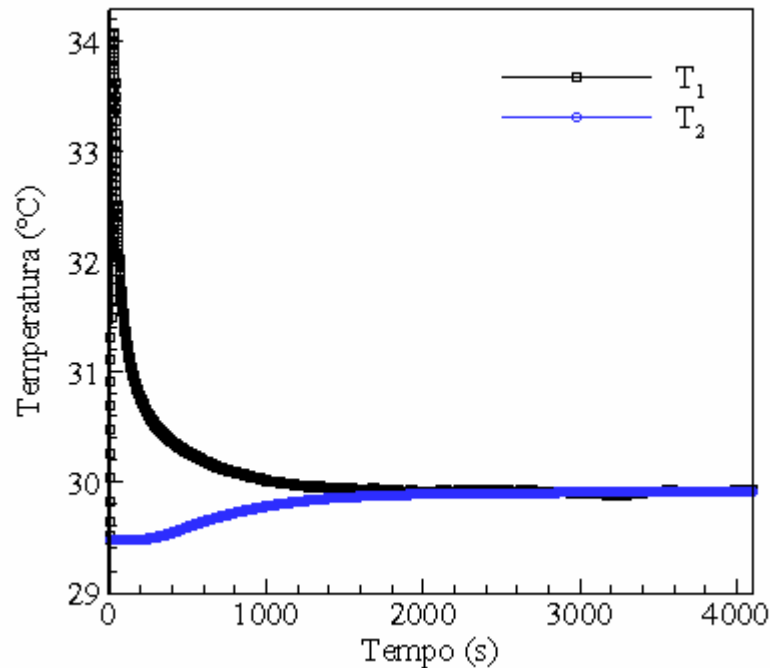


Figura 5.3 - Temperaturas na superfície da amostra (posição ótima)

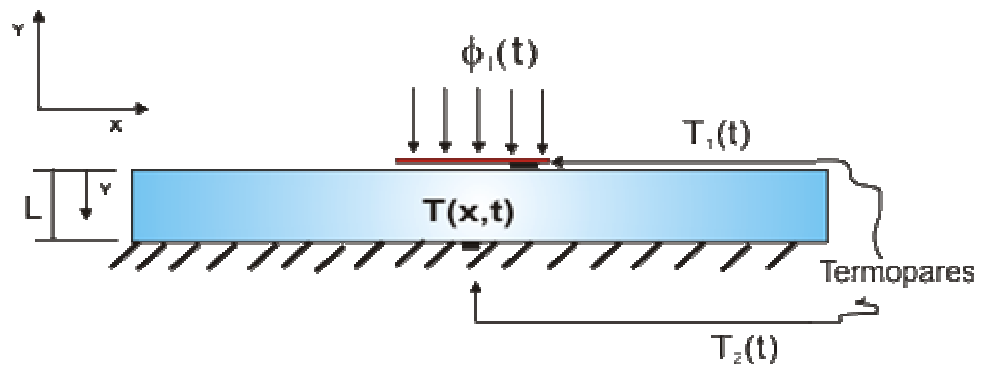


Figura 5.4 - Disposição dos termopares na amostra de PVC

Uma vez que o termopar T_1 não pode ser colocado no centro da amostra (como T_2) devido ao uso do transdutor de fluxo de calor a garantia da unidimensionalidade do modelo pode ser comprometida. Nesse sentido uma comparação entre as temperaturas calculadas T_1 e T_2 para o modelo térmico unidimensional e as temperaturas calculadas T_1 e T_2 para o modelo térmico tridimensional é apresentada na Figura (5.5a). Observa na Figura (5.5b) a perfeita concordância entre essas temperaturas. Assim, fica garantida a condição de distribuição de temperatura unidimensional proposta pelo modelo.

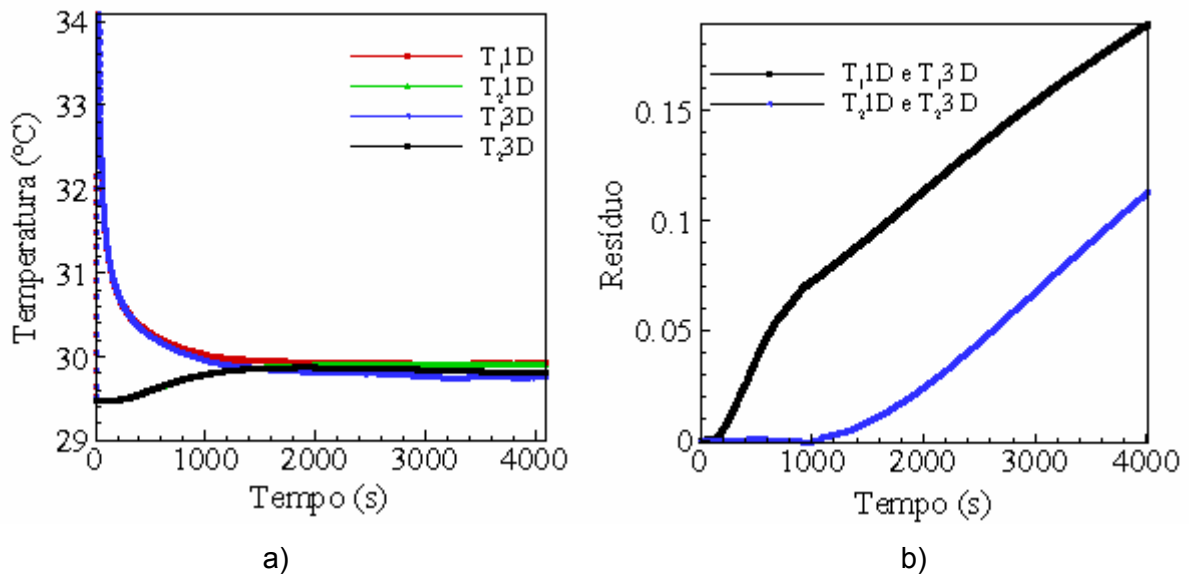


Figura 5.5 – Temperaturas a) Comparação modelos 1D e 3D b) resíduo

5.3 Definição dos parâmetros experimentais

Apresenta-se nesta seção o conjunto de parâmetros experimentais a serem usados para a determinação das propriedades térmicas α e λ . Os parâmetros mostrados na Tabela (5.1) são o intervalo de tempo de aquisição de dados, intensidade do fluxo de calor, duração média de aquecimento, número de pontos e tamanho da malha. Ressalta-se que a determinação desse conjunto de parâmetros foi feita através de simulações numéricas utilizando dados experimentais simulados.

A determinação da intensidade do fluxo de calor e da sua duração média está associada ao tamanho e tipo da amostra utilizada. Ou seja, como se usou um tamanho de amostra grande é imprescindível a aplicação de um fluxo de calor capaz de garantir um gradiente de temperatura suficiente para a determinação das propriedades. Assim, o fluxo de calor deve ser alto o suficiente para fornecer uma diferença de temperatura máxima na superfície da amostra de 4,5 °C. Já a escolha do intervalo de aquisição dos dados está associada a necessidade de se ter um intervalo de tempo suficiente para se perceber a imposição do fluxo de calor na amostra. O uso de 4096 pontos se deve ao cálculo da FFT que requer que o número de pontos seja potência de dois e produza um sinal tipo pulso, ou seja, no início um aquecimento e depois um decaimento até atingir a condição de regime ver Fig. (5.3). Por último o tamanho da malha deve ser o menor possível para que se possa

representar de forma mais realista as condições proposta pelo problema, sendo que nesse caso foi usado uma malha refinada na espessura da amostra.

Tabela 5.1 - Parâmetros experimentais para o PVC amostra (245 x 25 x 245 mm)

material		PVC (<i>Policloreto de Vinila</i>)		
Dimensões da amostra (mm)	x	245,0		
	y	25,0		
	z	245,0		
Intervalo de aquisição	(s)	1,0		
Duração média do aquecimento		30,0		
Duração do experimento		4096		
Número de pontos		4096		
Posição dos termopares (mm)	x	y	z	
	155,0	25,0	129,0	
	122,5	25,0	122,5	
Área do aquecedor		100,0	0,0	100,0
Fluxo de calor médio (W/m^2)		382,5		
Tamanho da malha (mm)		10^{-3}		

5.4 Análise de resultados

5.4.1 Introdução

Nesta seção apresenta-se uma análise dos resultados obtidos para estimação das propriedades α e λ variando com a temperatura para a amostra de *Policloreto de Vinila* (PVC). A amostra analisada possui 245 x 25 x 245 mm de dimensões. As propriedades são determinadas nas temperaturas médias iniciais de 20,81 °C; 27,89 °C; 37,40 °C; 43,44 °C; 50,01 °C; 58,14 °C e 65,89 °C sendo que para cada temperatura investigada são realizados 20 experimentos. Para cada experimento são adquiridos 4096 pontos, sendo que o intervalo de medição é de 1 s. O tempo de duração do aquecimento é de aproximadamente 30 s com um pulso de calor gerado da ordem de 8,5 V (dc). Nas Figuras (5.6a) e (5.6b) tem-se os sinais típicos de fluxo de calor e temperatura aplicados na superfície da amostra de PVC para a temperatura média de 27,89°C.

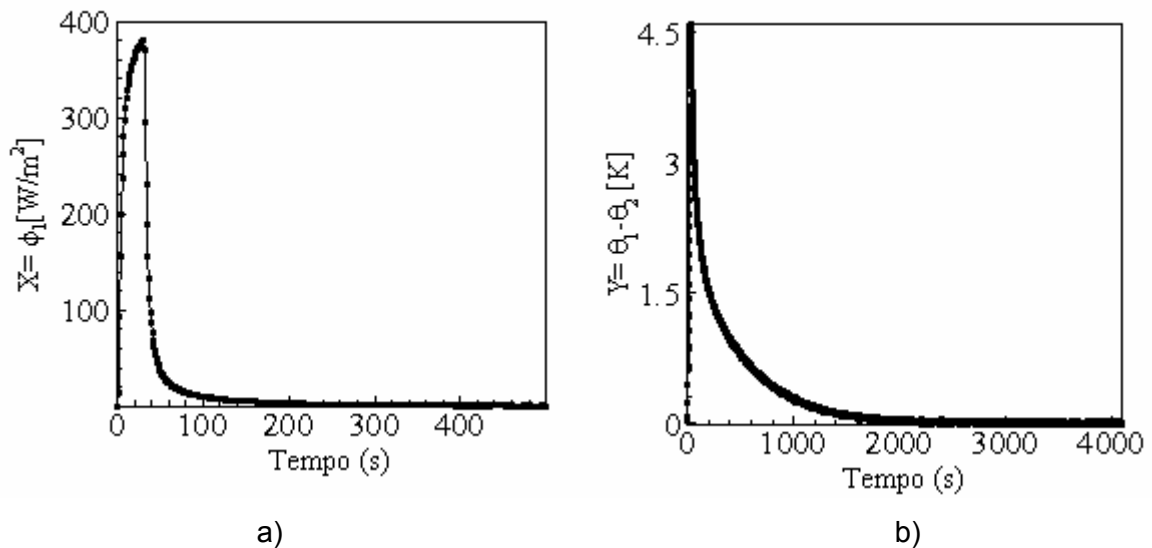


Figura 5.6 - a) Evolução do sinal de entrada b) Evolução do sinal de saída

Como é necessário que o forno mantenha a temperatura da amostra se mantenha o mais próximo possível da temperatura do forno e as duas como uma variação máxima da ordem de $\pm 0,3$ °C. Nas Figuras (5.7) – (5.13) têm-se as evoluções das temperaturas medidas para cada temperatura média investigada e a temperatura do forno. Observa-se que a temperatura do forno em todos os perfis se mantém próxima a temperatura inicial da amostra.

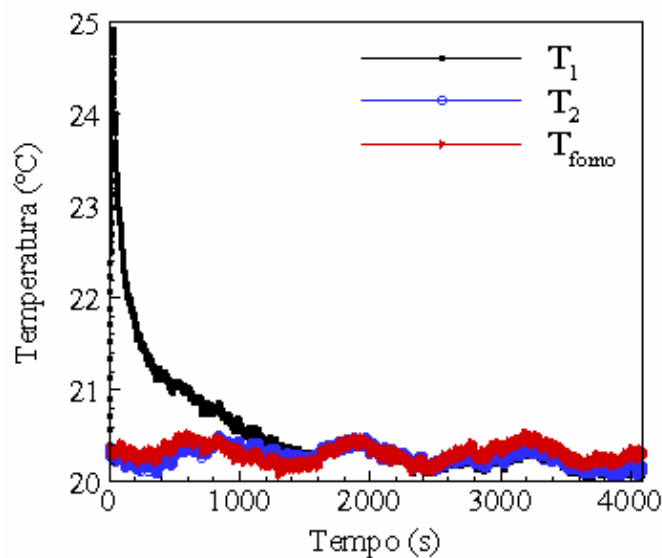


Figura 5.7 - Temperaturas experimentais para o caso da temperatura média do forno de 20,66 °C

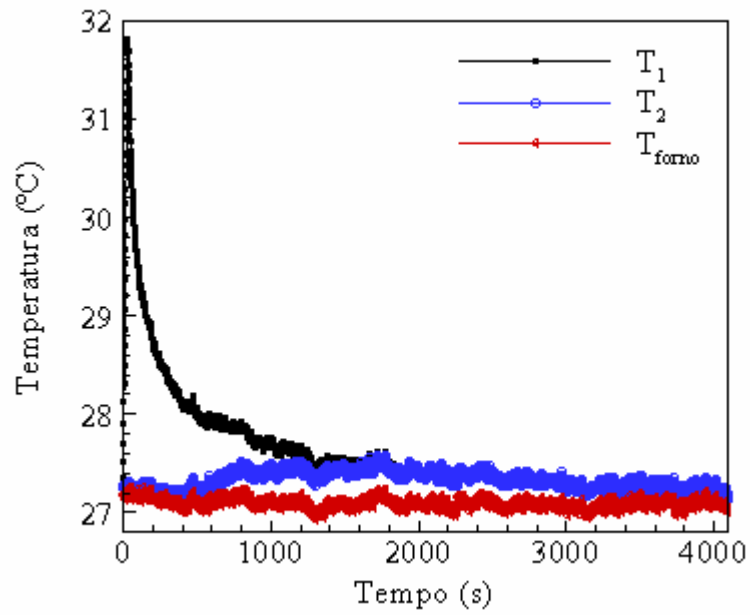


Figura 5.8 - Temperaturas experimentais para o caso da temperatura média do forno de 27,86 °C

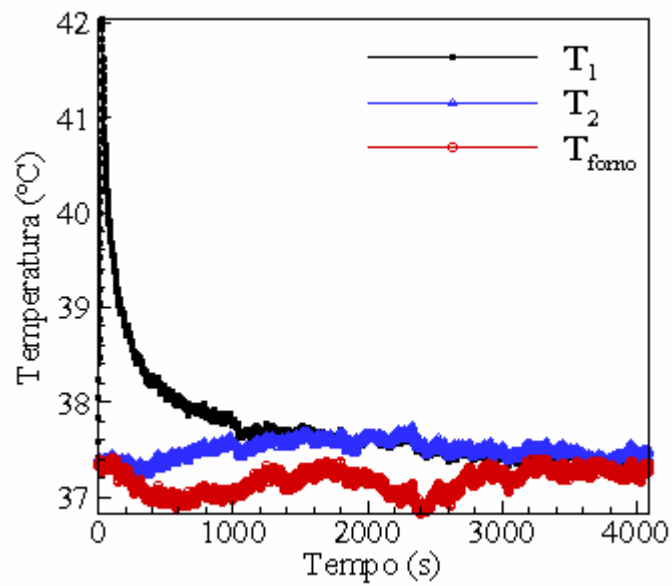


Figura 5.9 - Temperaturas experimentais para o caso da temperatura média do forno de 37,55 °C

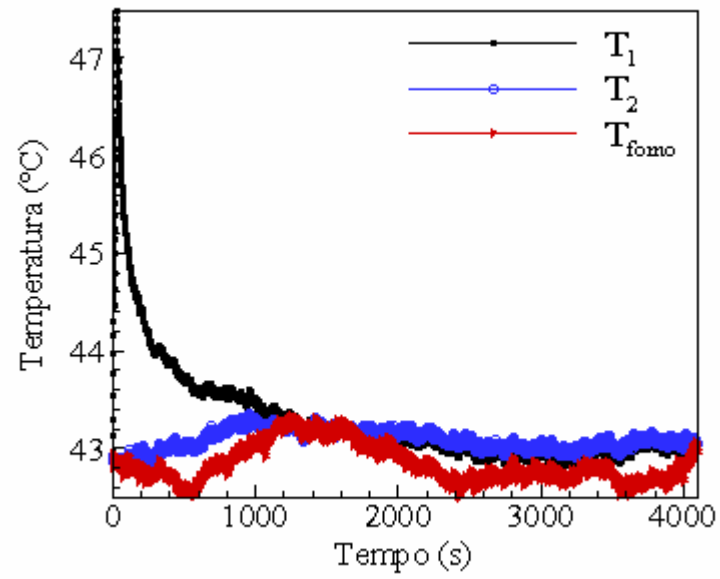


Figura 5.10 - Temperaturas experimentais para o caso da temperatura média do forno de 43,44 °C

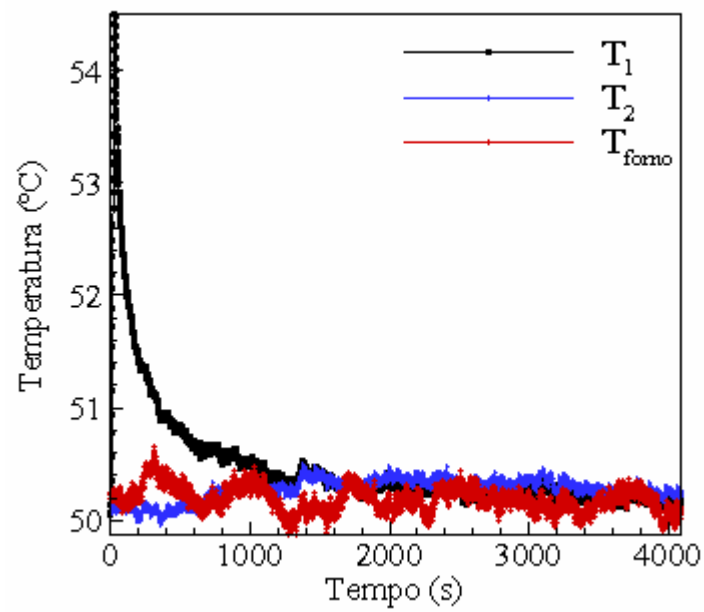


Figura 5.11 - Temperaturas experimentais para o caso da temperatura média do forno de 50,01 °C

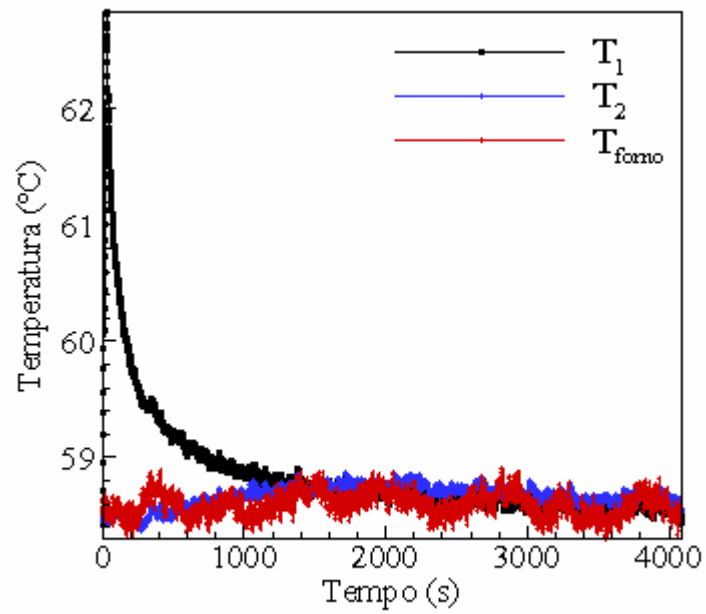


Figura 5.12 - Temperaturas experimentais para o caso da temperatura média do forno de 58,02 °C

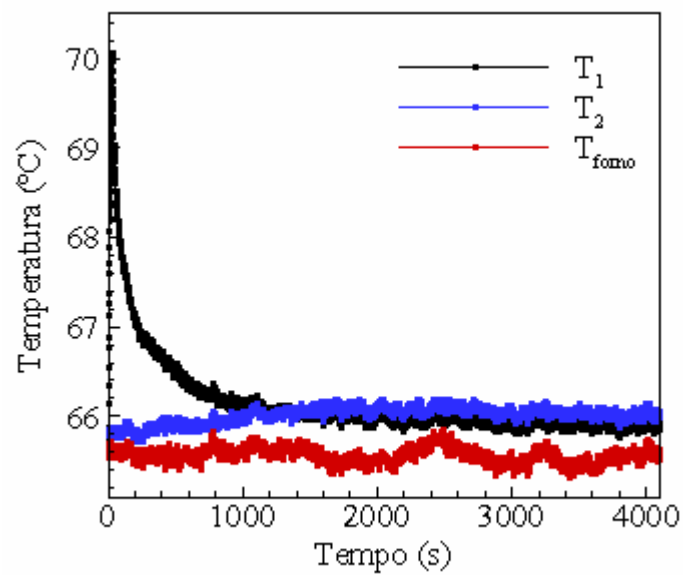


Figura 5.13 - Temperaturas experimentais para o caso da temperatura média do forno de 65,48 °C

5.4.2 Análise de resíduos

Como dito anteriormente o princípio da técnica de determinação das propriedades α e λ é baseado em um sistema dinâmico tipo entrada e saída onde a entrada é o fluxo de calor e a saída são as temperaturas medidas na superfície da amostra. Dessa forma as propriedades são calculadas através do tratamento desses dois sinais onde as propriedades são obtidas através da identificação de duas funções objetivos uma no domínio da frequência utilizada para determinação da difusividade térmica, α , e a outra no domínio do tempo para determinação da condutividade térmica, λ . A função objetivo no domínio da frequência (Eq. 3.35) é calculada através da diferença entre a fase experimental e a fase teórica calculada pelo modelo. Já a função objetivo no domínio do tempo (Eq. 3.37) é calculada através da diferença entre as temperaturas experimentais e as temperaturas teóricas calculadas pelo modelo. Dessa forma é imprescindível uma análise das fases experimentais e teóricas e do seu respectivo resíduo bem como uma análise dos perfis das temperaturas experimentais e calculadas e do seu resíduo. Esse resíduo deve ser o menor possível já que a determinação das propriedades α e λ é feita através da minimização das respectivas funções objetivo da fase e temperatura. Para ilustrar esse fato realizou-se uma análise desses resíduos para um experimento típico na temperatura média do forno de 27,89 °C e para os valores estimados de α e λ de $1,26 \times 10^{-7}$ m²/s e 0,161 W/mK, respectivamente. A comparação entre as fases experimentais e teóricas e o seu resíduo é mostrada respectivamente nas Figs. (5.14a) e (5.14b). Nas Figuras (5.15a) e (5.15b) têm-se respectivamente a comparação entre as temperaturas experimentais e calculadas e o resíduo entre essas duas temperaturas.

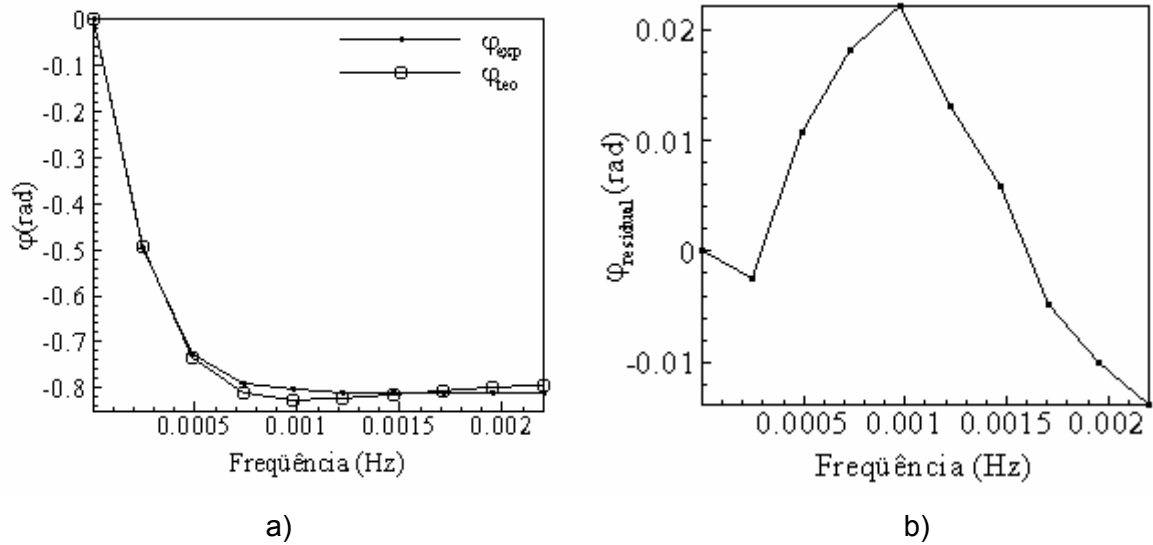


Figura 5.14 - Fase a) experimental e calculada b) residual

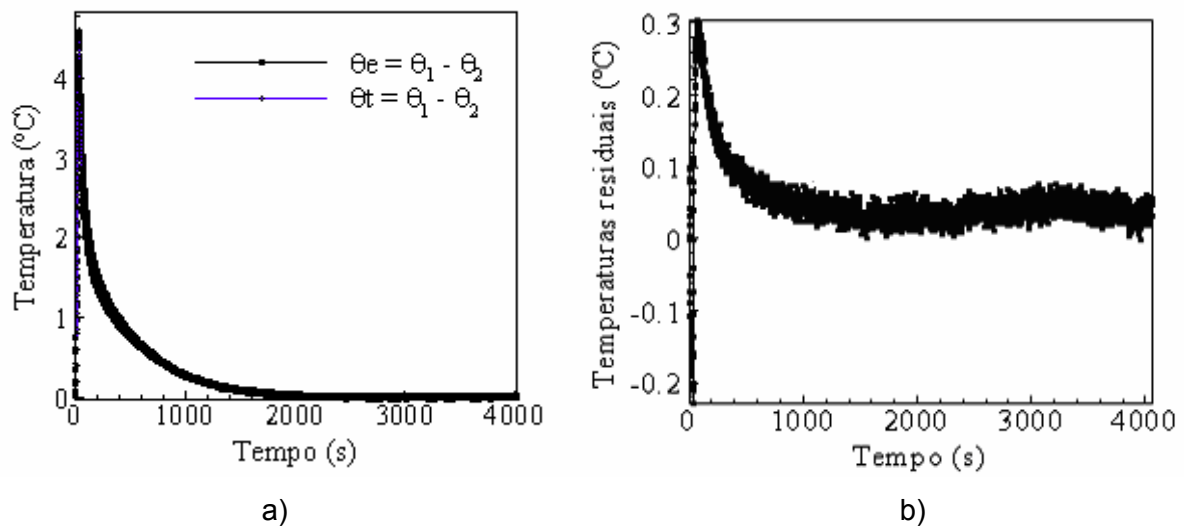


Figura 5.15 - Evolução da temperatura a) experimental e calculada b) residual

Observa-se na Fig. (5.14b) que o resíduo entre a fase teórica e experimental é baixo, ou seja, o experimento conseguiu representar bem a condição real. Já para as temperaturas observa-se que a diferença entre as temperaturas vai para zero, ou seja, atende ao princípio da técnica utilizada e o resíduo se situa dentro da incerteza do termopar cerca de $\pm 0,3$ °C.

5.4.3 Análise da melhor faixa de frequência para obtenção de α

A análise das funções autoespectrais, a função espectral cruzada e a correlação cruzada no domínio da frequência revelam as regiões onde a função resposta em frequência

$H(f)$ é melhor identificada para determinação de α . As mesmas funções no domínio do tempo revelam a faixa onde a determinação de λ é melhor realizada. Todavia, para que essas análises sejam feitas torna-se necessário o estudo de uma amostra onde sejam conhecidas as propriedades α e λ .

Uma análise mais detalhada da melhor faixa de determinação de α pode ser feita a partir do cálculo das densidades autoespectrais de entrada, $S_{xx}(f)$, de saída, $S_{yy}(f)$ e as componentes real, $re(S_{xy}(f))$, e imaginária, $im(S_{xy}(f))$, da densidade espectral cruzada. As Figuras (5.16a) e (5.16b) apresentam, respectivamente as densidades autoespectrais de entrada, $S_{xx}(f)$, de saída, $S_{yy}(f)$ e as componentes real, $re(S_{xy}(f))$, e imaginária, $im(S_{xy}(f))$, da densidade espectral cruzada. Nesse caso, apresentam-se as densidades médias, calculadas a partir de todos os experimentos. Através do comportamento das densidades autoespectrais e das partes real e imaginária da densidade espectral cruzada, pode-se determinar a frequência de interesse ou a chamada banda de análise. Observa-se, nesse sentido, que a partir da frequência 0,01 Hz, a função resposta em frequência, $H(f)$, deixa de existir, uma vez que se anulam os valores das densidades autoespectrais de entrada $S_{xx}(f)$, Fig. (5.16a), e de saída $S_{yy}(f)$, Fig. (5.16b). Analisando ainda melhor a banda de análise pode-se observar as componentes real e imaginária das densidades espectrais cruzadas, $re(S_{xy}(f))$, Fig. (5.17a), e $im(S_{xy}(f))$, Fig. (5.17b). Nota-se que realmente a faixa de análise onde a função resposta em frequência, $H(f)$ existe e é diferente de zero situa-se na faixa de 0 a 0,01 Hz. Isso também está evidenciado quando se analisa a correlação cruzada (R_{xy}) no domínio da frequência mostrada na Fig. (5.18).

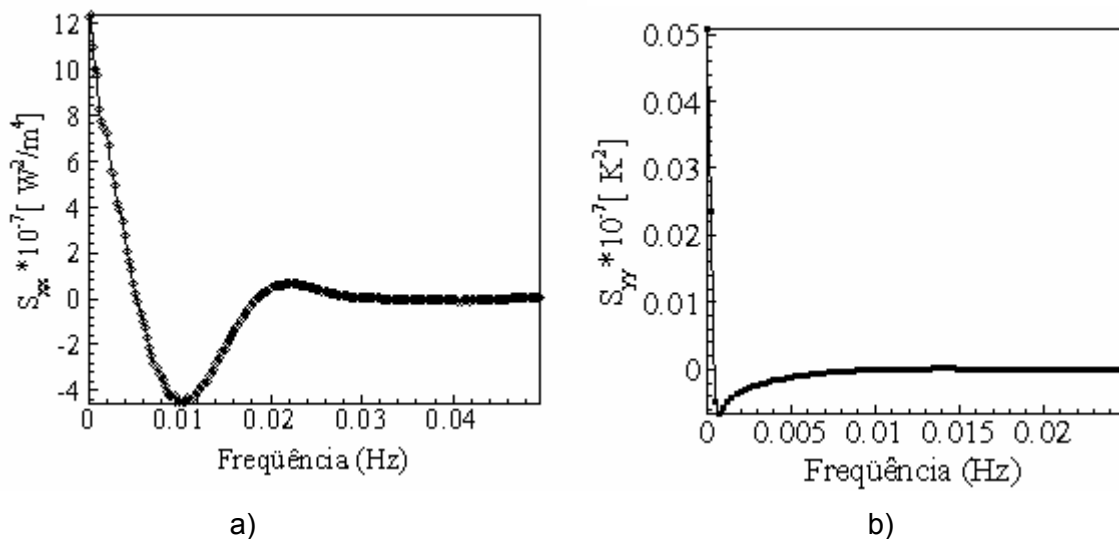


Figura 5.16 - Densidades autoespectrais dos sinais de a) entrada e b) saída

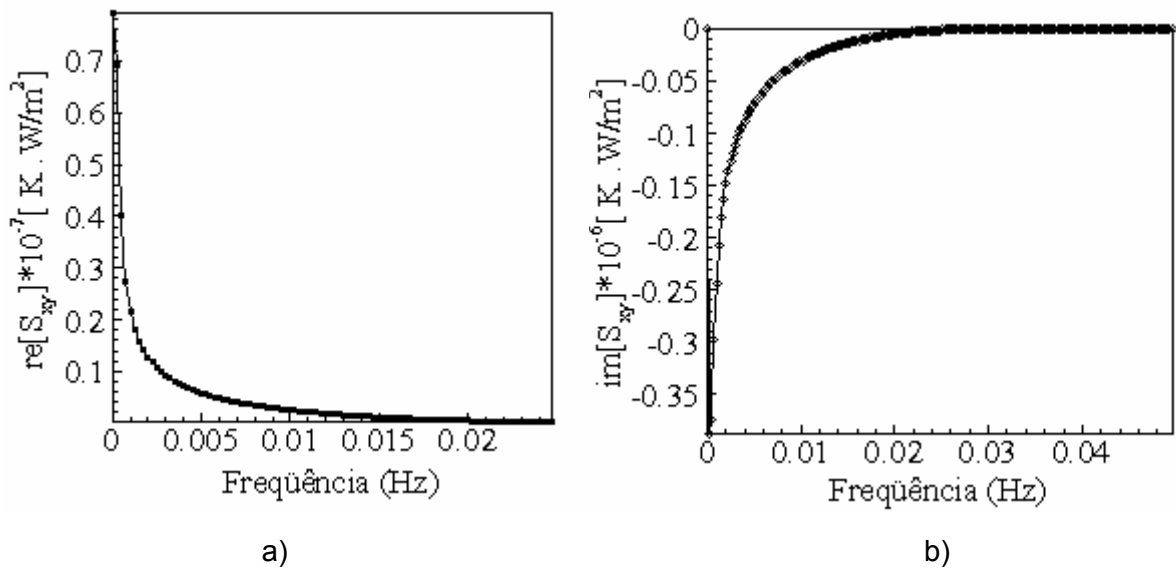


Figura 5.17 - Densidade espectral cruzada a) parte real e b) parte imaginária

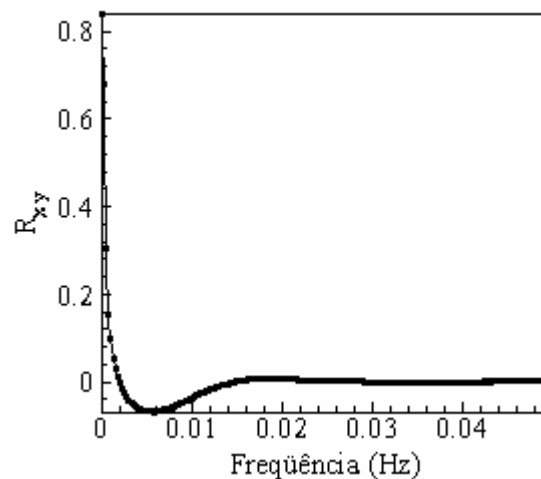


Figura 5.18 - Correlação cruzada no domínio da frequência

A correlação cruzada (R_{xy}) obtida através da convolução dos sinais de entrada e saída é mostrada na Eq.(5.1). A correlação cruzada de sinais mede o quanto um sinal está relacionado com o outro, em função de um deslocamento no tempo. Uma correlação perfeita tem um valor igual a 1,0 o que indica no caso em estudo que quanto mais próximo deste valor, melhor a região para a determinação das propriedades. A Figura (5.18) mostra a correlação no domínio da frequência. Observa-se que a correlação cruzada se anula rapidamente, para uma frequência superior a 0,01 Hz indicando que a partir dessa frequência existe pouca relação entre a resposta de temperatura e o fluxo de calor imposto. Dessa forma conclui-se que realmente a faixa de análise onde a função resposta em frequência, $H(f)$ existe e é diferente de zero situa-se entre 0 e 0,01 Hz.

$$R_{xy} = \int_0^T X(t)Y(t+\tau)dt \quad (0.50)$$

Uma fase típica de um experimento é mostrado na Fig. (5.19). Nota-se na figura que a partir de 0,002 Hz o valor da fase tende a um valor constante e aproximadamente igual a 0,8 rad. Esse comportamento implica em baixa informação para o procedimento de determinação de α , fato que pode ser comprovado através da análise do coeficiente de sensibilidade. A análise de sensibilidade tem sido usada como uma ferramenta para identificar as variáveis mais importantes e que apresentam potencial para serem calculadas. Define-se como sensibilidade ou coeficiente de sensibilidade a primeira derivada da função modelada em relação à variável de interesse. Na Equação (5.2) tem-se o coeficiente de sensibilidade normalizado da fase em relação à α , $S_{\varphi,\alpha}$.

$$S_{\varphi,\alpha} = \frac{\alpha}{\varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial \alpha} \quad (0.51)$$

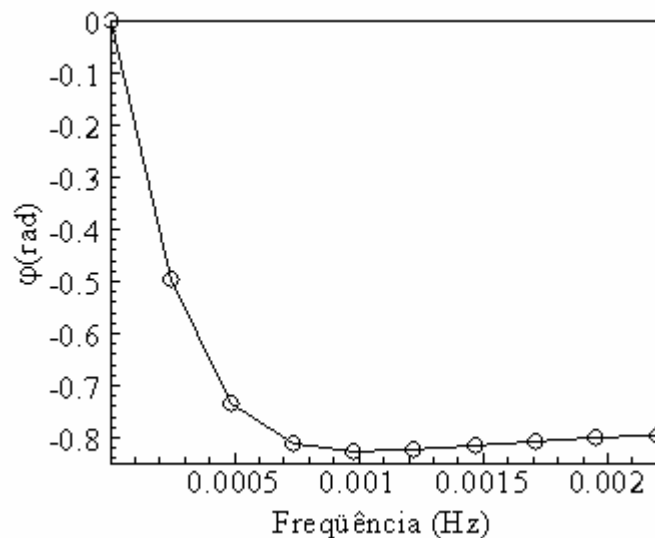


Figura 5.19 – Fase calculada para um caso típico

Uma inspeção na Fig. (5.20) revela que apenas os três primeiros pontos, eliminando-se o primeiro, são necessários e suficientes para a determinação da difusividade térmica. Observa-se nesse caso que o número de pontos destinados à determinação α situa-se dentro da faixa onde a função resposta em frequência, $H(f)$ é melhor identificada. A

partir dessa análise conclui-se que somente as freqüências situadas na faixa de 0 a 0,001 Hz devem ser usadas para a determinação de α .

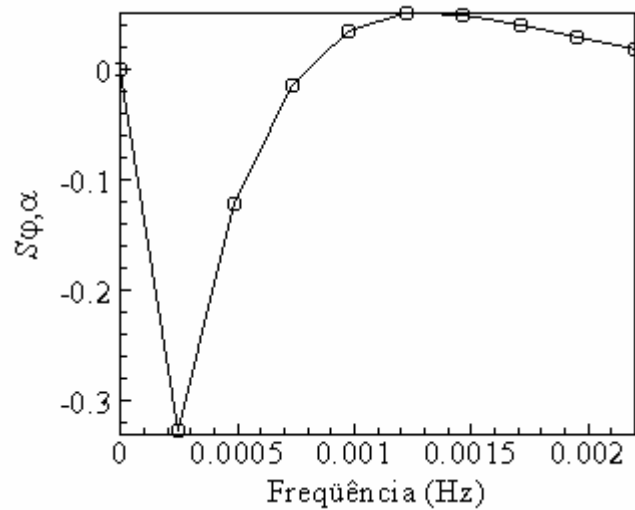


Figura 5.20 - Sensibilidade da fase em relação à α

5.4.4 Análise da melhor faixa de tempo para obtenção de λ

A determinação da condutividade térmica, λ , é feita através do processamento dos sinais de temperatura e fluxo no domínio tempo. Na Figura (5.21) tem-se a sensibilidade da temperatura em relação à λ , $S_{T, \lambda}$. Na Equação (5.3) tem-se a definição desse coeficiente.

$$S_{T, \lambda} = \frac{\lambda}{T} \frac{\partial T}{\partial \lambda} \quad (0.52)$$

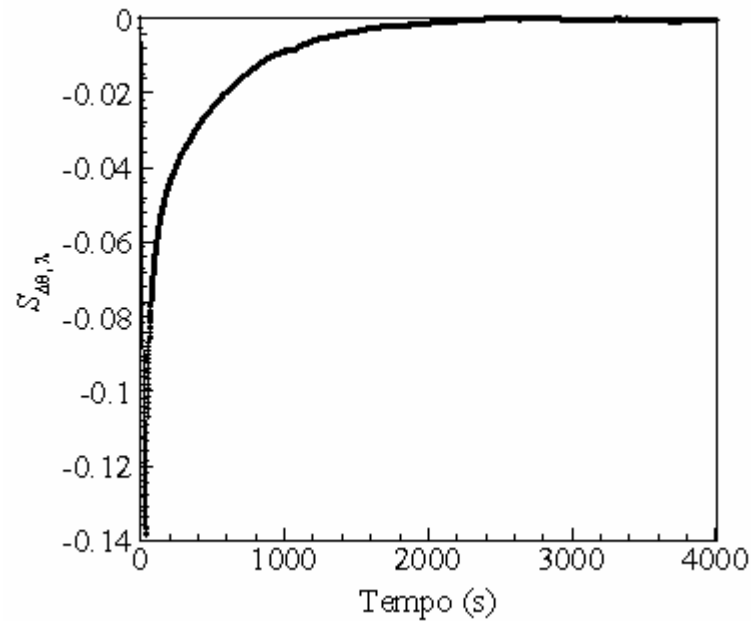


Figura 5.21 - Sensibilidade da temperatura em relação à λ

Nesse caso, a princípio todos os 4096 pontos poderiam ser usados para a obtenção de λ . Entretanto, apenas os dados experimentais relativos a 100 s de duração do experimento foram usados. Esse procedimento de fato tenta otimizar os dados experimentais no domínio do tempo. Observa-se na Fig. (5.21) que a partir de 100 s pouca informação é obtida na determinação de λ o que é evidenciado com o baixo valor da $S_{T, \lambda}$. Isso pode ser melhor verificado quando se observa a correlação cruzada ($R_{x,y}$) na sua forma temporal mostrado na Fig. (5.22). Nota-se que a partir de 100 s a correlação cruzada entre o fluxo de calor e temperatura (R_{xy}) é constante o que indica a baixa contribuição desses dados para a determinação de λ . Dessa forma utilizou-se 100 pontos para a determinação de λ .

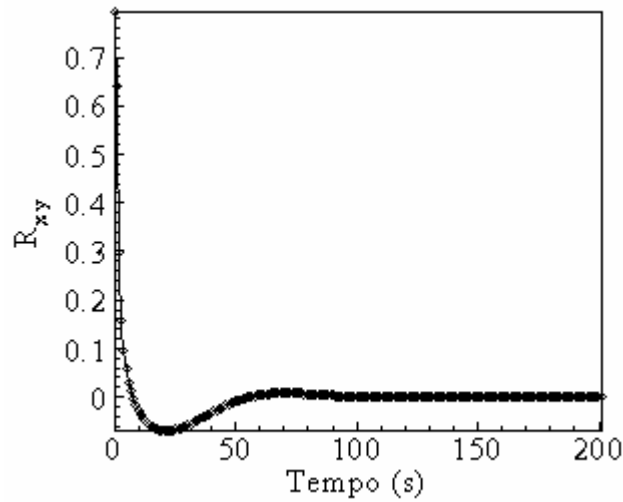


Figura 5.22 - Correlação cruzada no domínio do tempo

5.4.5 Valores obtidos de α e λ do PVC variando com a temperatura

As Figuras (5.23 - 5.29) apresentam os valores determinados de α e λ para todas as temperaturas investigadas.

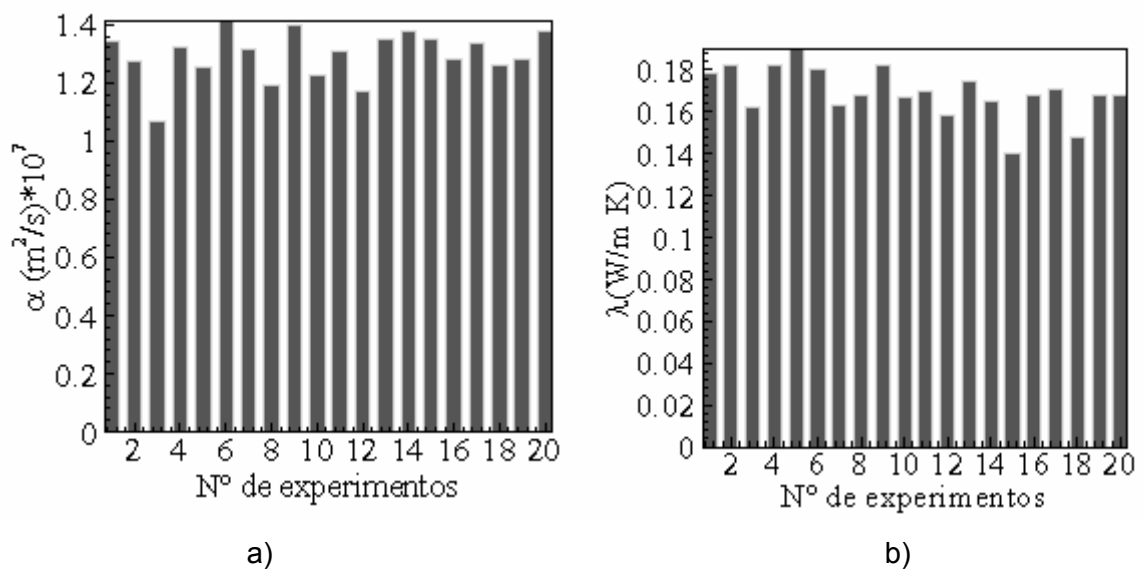
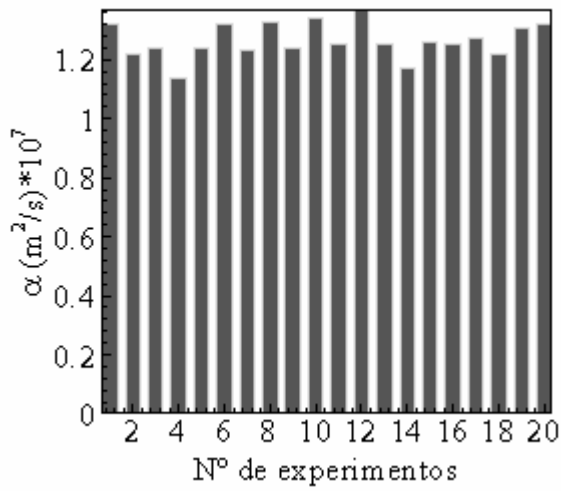
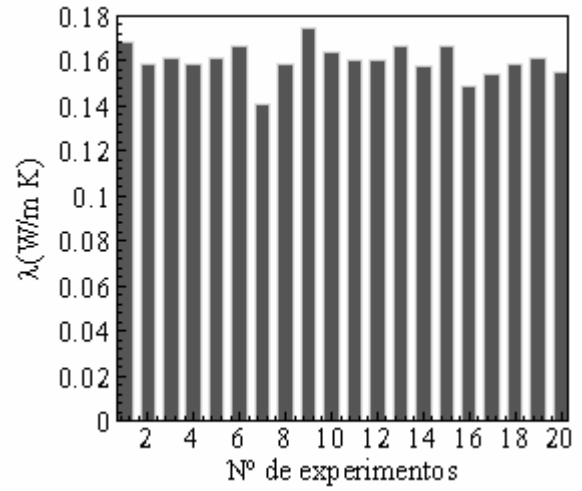


Figura 5.23 - Histograma para a) α e b) λ para temperatura média de 20,81 °C e temperatura média do forno de 20,66 °C

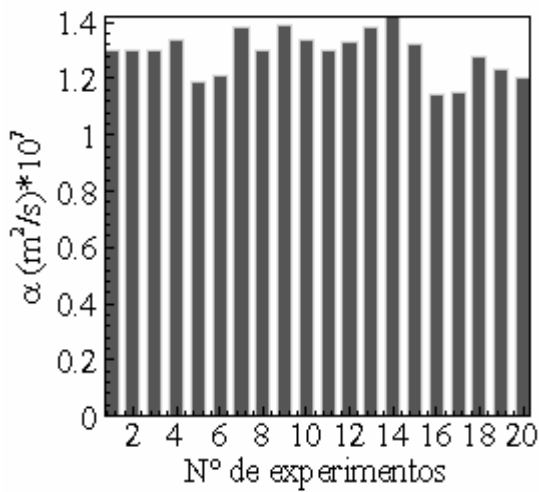


a)

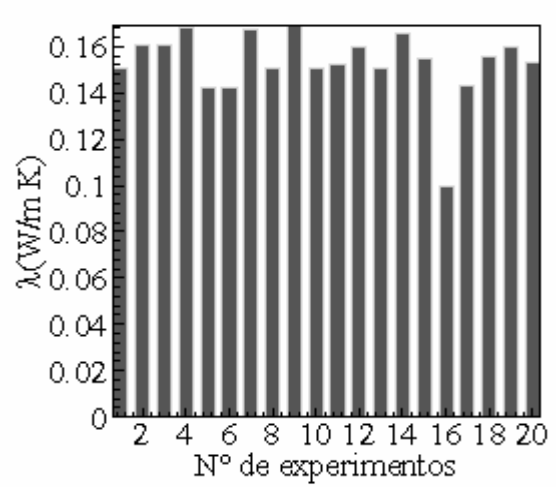


b)

Figura 5.24 - Histograma para a) α e b) λ para temperatura média de 27,89 °C e temperatura média do forno de 27,86 °C

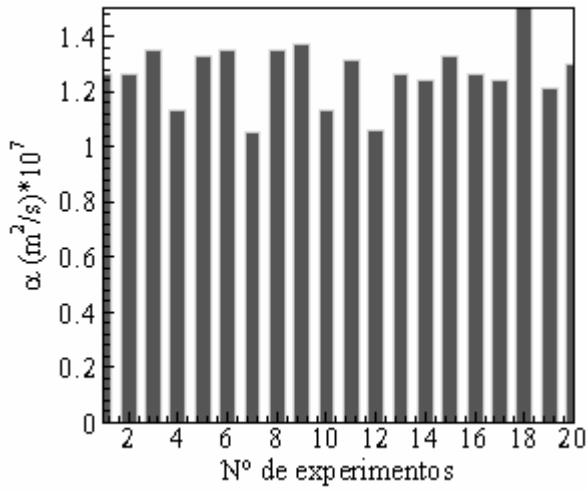


a)

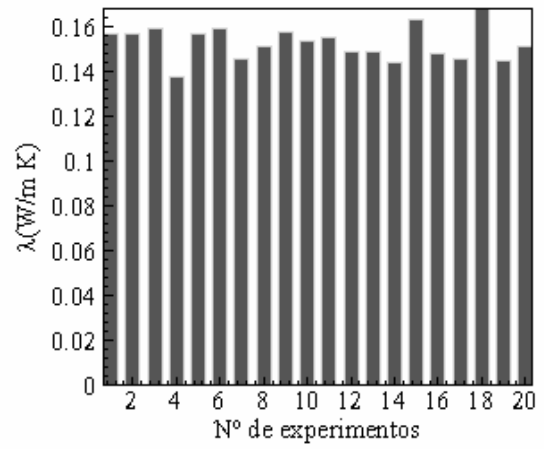


b)

Figura 5.25 - Histograma para a) α e b) λ para temperatura média de 37,40 °C e temperatura média do forno de 37,55 °C

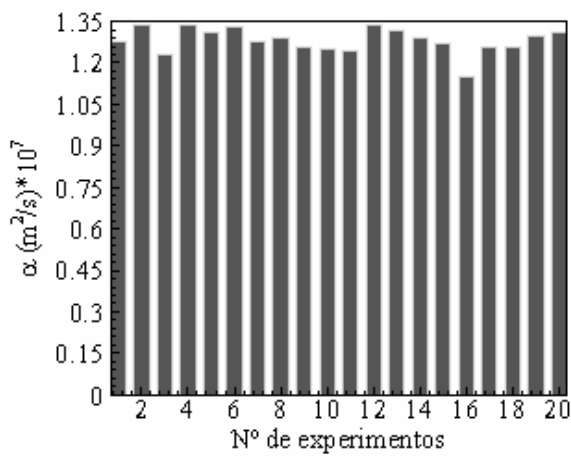


a)

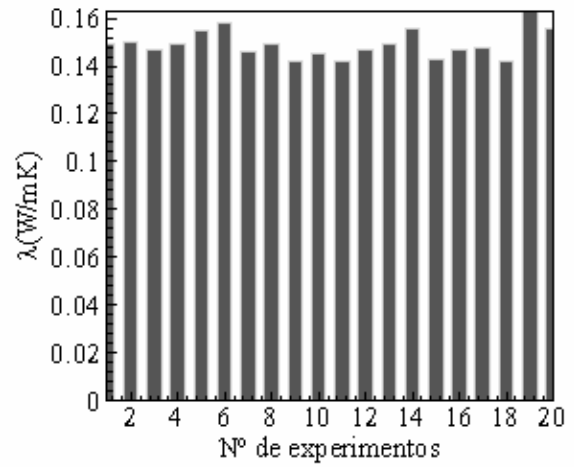


b)

Figura 5.26 - Histograma para a) α e b) λ para temperatura média de 43,61 °C e temperatura média do forno de 43,44 °C

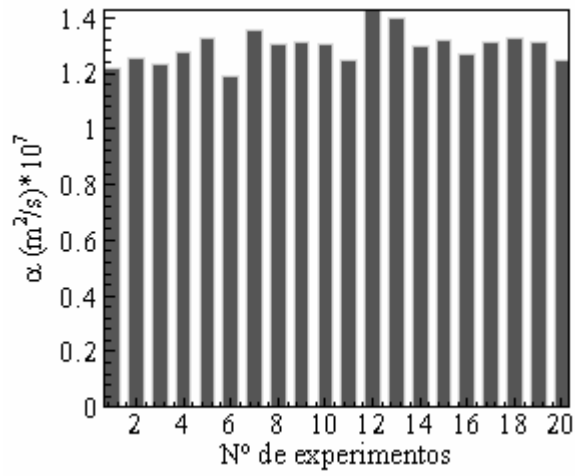


a)

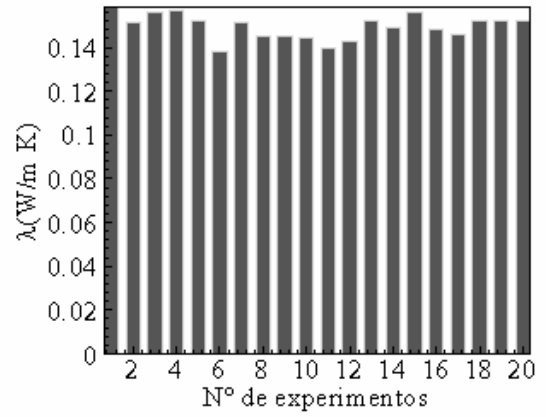


b)

Figura 5.27 - Histograma para a) α e b) λ para temperatura média de 50,03 °C e temperatura média do forno de 50,10 °C

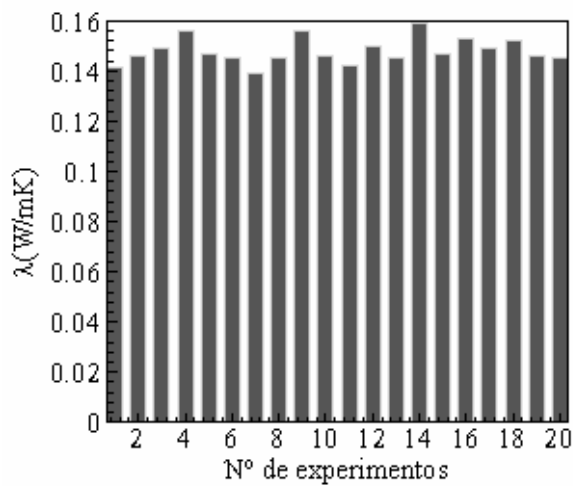
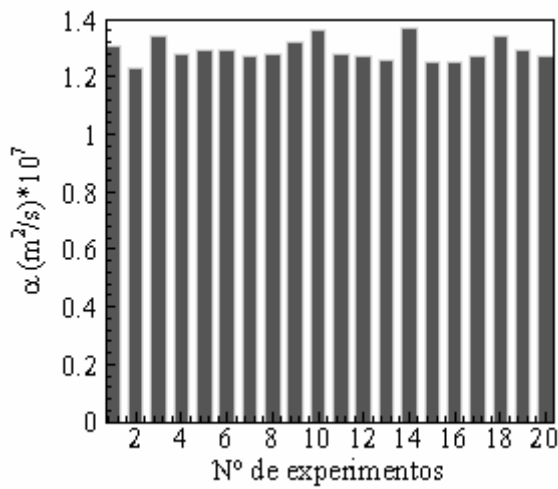


a)



b)

Figura 5.28 - Histograma para a) α e b) λ para temperatura média de 58,14 °C e temperatura média do forno de 58,02 °C



a)

b)

Figura 5.29 - Histograma para a) α e b) λ para temperatura média de 65,89 °C e temperatura média do forno de 65,48 °C

Ao analisar uma série de medições, não é raro que alguns dados apresentem alguma incerteza sendo que são vários os fatores que interferem no processo, acarretando em valores medidos inexatos. As causas de ocorrerem tais fatos são diversas sendo que quando se trata de medições de propriedades térmicas as mais comuns são: erros nas restrições do modelo teórico, erros nas medições de temperatura e fluxo de calor devido a calibração, tempo de resposta e resistência de contato térmico entre os sensores e incerteza de medição na aquisição de sinais. Dados experimentais que claramente não pertencem à amostra podem com critério ser abandonados. Uma ferramenta bastante utilizada para decidir o rechaço de dados é o “Critério de Chauvenet”, (Doebelin, 1990). O uso desse critério permite que se obtenha valores médios da difusividade térmica e condutividade térmica, respectivamente utilizando um nível de confiança de 99 %. Nas Tabelas (5.2) e (5.3) são apresentados os valores médios estimados de α e λ nesse trabalho, ressalta-se que para cada temperatura analisada foram realizados 20 experimentos. Obteve-se valores de referência para o α somente para a temperatura média de 27,89 °C (Tabela 5.2). Esses valores de referência foram obtidos usando-se o método Flash (Lima e Silva et al., 2003). Já para a condutividade térmica os valores estimados para todas temperaturas são comparados na Fig. (5.30) com a curva 7 da referência Touloukian et al. (1970) e as demais são retiradas do livro Technology of Plasticizers (Sears et al., 1982) onde em cada uma delas apresenta uma concentração de plastificante diferente utilizado na amostra de PVC. Ressalta-se que os valores de referência usados na Tab. (5.3) para a condutividade térmica são referentes à curva 7 (Touloukian et al., 1970).

Tabela 5.2 - Valores médios determinados de α para o PVC com 99 % de confiança

<i>Temperatura média inicial °C</i>	$\alpha(m^2 / s) \cdot 10^7$	<i>Referência</i> $\alpha(m^2 / s) \cdot 10^7$	<i>Diferença (%)</i>
20,81	1,30 ± 3 %	—	
27,89	1,26 ± 2 %	1,28	1,59
37,40	1,29 ± 3 %	—	—
43,44	1,28 ± 5%	—	—
49,34	1,28 ± 2 %	—	—
58,14	1,29 ± 2 %	—	—

65,89	$1,29 \pm 2 \%$	—	—
-------	-----------------	---	---

Tabela 5.3 - Valores médios determinados de λ para o PVC com 99 % de confiança

<i>Temperatura média inicial °C</i>	λ (W / mK)	<i>Referência λ (W / mK)</i>	<i>Diferença (%)</i>
20,81	$0,167 \pm 3,9 \%$	0,156	6,6
27,89	$0,161 \pm 1,5 \%$	0,1552	3,6
37,40	$0,156 \pm 3,5 \%$	0,1529	1,9
43,44	$0,1528 \pm 0,02 \%$	0,153	1,3
49,34	$0,149 \pm 1,02 \%$	0,1508	1,2
58,14	$0,150 \pm 2,1 \%$	0,146	2,5
65,89	$0,148 \pm 2,2 \%$	0,146	1,4

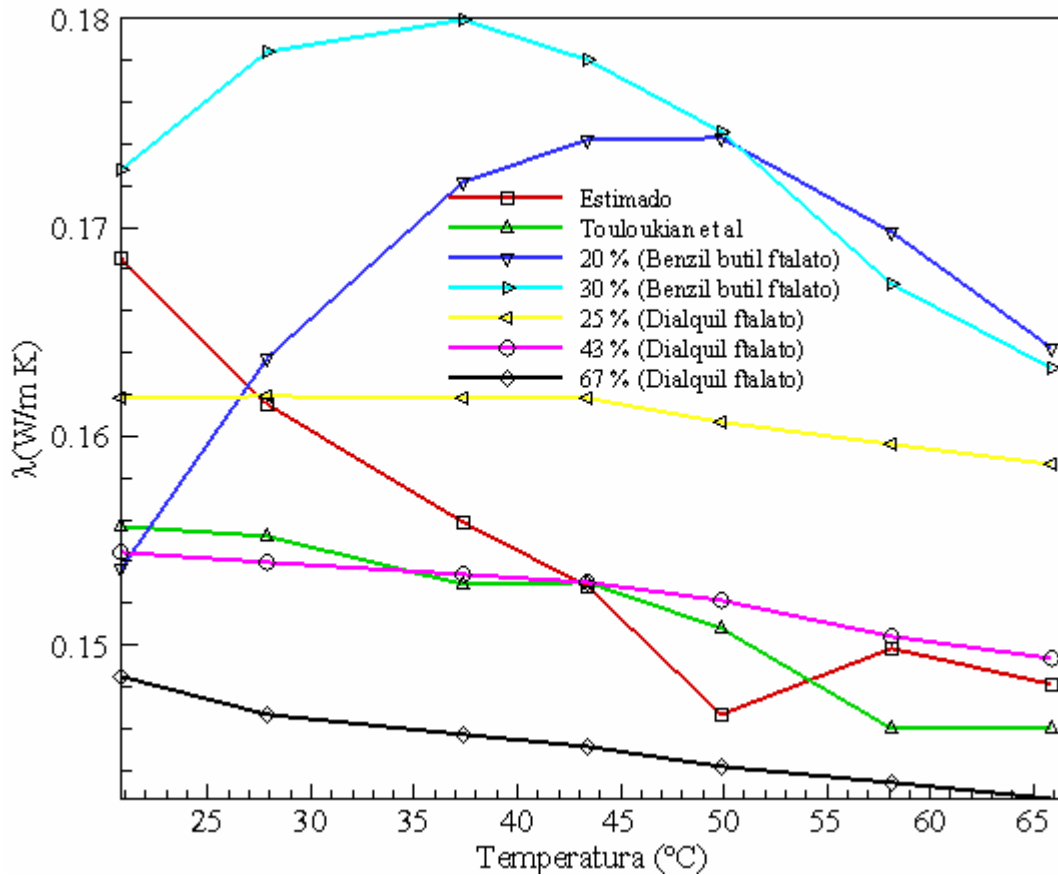


Figura 5.30 – Resultados da condutividade térmica

Pode-se observar que as condutividades térmicas determinadas na maioria das curvas apresentam o mesmo comportamento, ou seja, decaem com aumento da temperatura. Esse decaimento pode ser explicado pela dilatação da amostra com o aumento da temperatura levando em consideração que a medida que se aumenta a temperatura a amostra sofre uma dilatação ou seja muda a sua morfologia. Embora essa dilatação seja visualmente muito pouco, ela provoca uma mudança considerável nas propriedades da amostra. Através dos valores de α e λ determina-se os valores da capacidade de calor volumétrica ($\rho \cdot c_p$). Na Tabela (5.4) tem-se os valores da capacidade de calor volumétrica do PVC calculadas a partir da Eq.(5.4)

Tabela 5.4 - Valores médios determinados da $\rho \cdot c_p$ para o PVC

Temperatura média inicial °C	$\rho \cdot c_p \cdot 10^{-6}$ [J/m ³ K]
20,8	1,32

27,9	1,28
37,4	1,20
43,4	1,21
49,3	1,16
58,1	1,16
65,9	1,15

$$\rho \cdot c_p = \frac{\lambda}{\alpha} \quad (0.53)$$

Observa-se assim, que existe uma boa concordância nos resultados estimados, ou seja, foi possível a determinação da difusividade térmica e condutividade térmica do PVC variando com a temperatura sendo que os desvios para α e λ são mostrados nas Tabelas (5.2) e (5.3) respectivamente e são menores que 5 % exceto para a temperatura de 20,81 °C. Ressalta-se que não se pode garantir que a amostra usada neste trabalho contém as mesmas composições de plastificantes e peso molecular que as amostras utilizadas nos trabalhos citados. No entanto, para garantir uma melhor confiabilidade dos resultados comparou-se o valor da condutividade térmica obtida na temperatura de 27 °C para mesma amostra utilizada nesse trabalho. A condutividade térmica foi medida no Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT, 2004) usando o método da placa quente compensada sendo que o valor obtido foi de 0,16 W/mK. Observa-se na Tabela (5.3) que o valor estimado para a temperatura de 27,89 °C é bem próximo do valor obtido pelo IPT.

CAPÍTULO VI

INVESTIGAÇÃO DE UMA METODOLOGIA PARA DETERMINAÇÃO DE PROPRIEDADES TÉRMICAS USANDO SOMENTE UMA SUPERFÍCIE DE ACESSO

6.1 Introdução

Uma outra proposta desse trabalho é a determinação das propriedades térmicas α e λ usando somente uma superfície de acesso. Ou seja, apenas em uma das superfícies da amostra é realizada a excitação para o estabelecimento do problema térmico e as aquisições dos sinais de fluxo de calor e de temperatura. O desenvolvimento dessa técnica é muito importante, pois em muitos meios existentes (exemplo, edificações) pode-se apenas usar uma superfície de trabalho. Além do mais busca-se o desenvolvimento de uma técnica que possa suprir a carência dos métodos experimentais em laboratório que são capazes da identificação de materiais em campo (*in situ*). Os poucos métodos existentes na literatura para estimação de α e λ usando uma superfície de acesso são bem restritos, pois na maioria dos casos só podem ser aplicados em condições especiais de geometria, materiais ou tempos muito longos. Assim propõe-se nesse capítulo a investigação de uma metodologia para estimar as propriedades usando a técnica proposta no Capítulo III para o modelo térmico tridimensional. Para isso são apresentadas análises para definição do tipo de material a ser usado as dimensões da amostra e a disposição ótima dos sensores na amostra. Também são feitas análises para a determinação da intensidade, da duração do fluxo de calor, intervalo de aquisição e tamanho da malha. Ressalta-se, que a escolha correta desses parâmetros é de extrema importância para determinação das propriedades térmicas com precisão. A seguir tem-se a descrição passo a passo dessas análises e também a investigação da metodologia proposta para duas amostras de geometrias diferentes.

6.2 Definição do tipo e dimensões da amostra e localização dos termopares

Como já mencionado no Capítulo IV a amostra usada foi o *Policloreto de Vinila* (PVC). Aqui um outro fator que também influenciou na escolha do PVC como material de análise foi pela sua estreita relação com meios já construídos uma vez que esses meios geralmente possuem baixa condutividade térmica.

A primeira amostra usada possuía dimensões de 100 x 25 x 60 mm. Essas dimensões foram definidas a partir da realização de simulações numéricas usando várias geometrias possíveis. Nessas simulações o objetivo era analisar a maior sensibilidade da temperatura para duas posições na superfície da amostra. Todavia, a diferença entre essas temperaturas não poderia ser alta, para que não ocorresse uma variação das propriedades com a temperatura. Uma vez definido o tamanho da amostra o próximo passo é a definição da localização dos termopares na superfície da amostra. Inicialmente foi feita uma análise colocando muitos termopares a fim de varrer toda superfície da amostra. Como uma demonstração com todos os termopares ficaria complicada, apresenta-se uma análise com somente treze termopares em regiões que apresentaram maior sensibilidade. Na Fig. (6.1) apresenta-se a disposição dos sensores na amostra e na Fig. (6.2) tem-se o perfil de temperatura para os treze termopares. A escolha da melhor posição dos sensores está associada ao cálculo numérico da transformada rápida de Fourier (FFT). Quando a FFT é usada necessita-se que os sinais de temperatura, tendam para zero. Nesse sentido para que isso ocorra duas posições de temperatura devem ser escolhidas. A localização ótima dos sensores de temperatura deve ocorrer em regiões onde se tenha uma evolução significativa da diferença de temperatura $\Delta\theta = \theta_1 - \theta_2$ (Eq. 3.2). Como já mencionado o valor $\Delta\theta$ não deve ser superior a 5 °C para respeitar a hipótese de propriedades térmicas constante com a temperatura. Observa-se na Figura (6.2) que as posições que melhor atenderam a essas condições foram as posições um e sete. Pode-se observar que essas posições são as mais próximas possíveis do aquecedor.

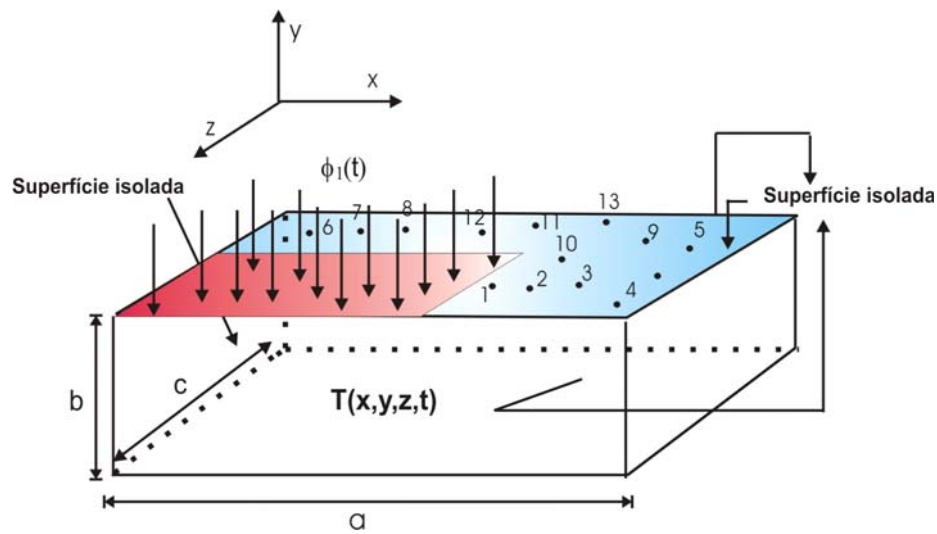


Figura 6.1 - Disposição dos sensores na parte superior da amostra (100 x 25 x 60 mm)

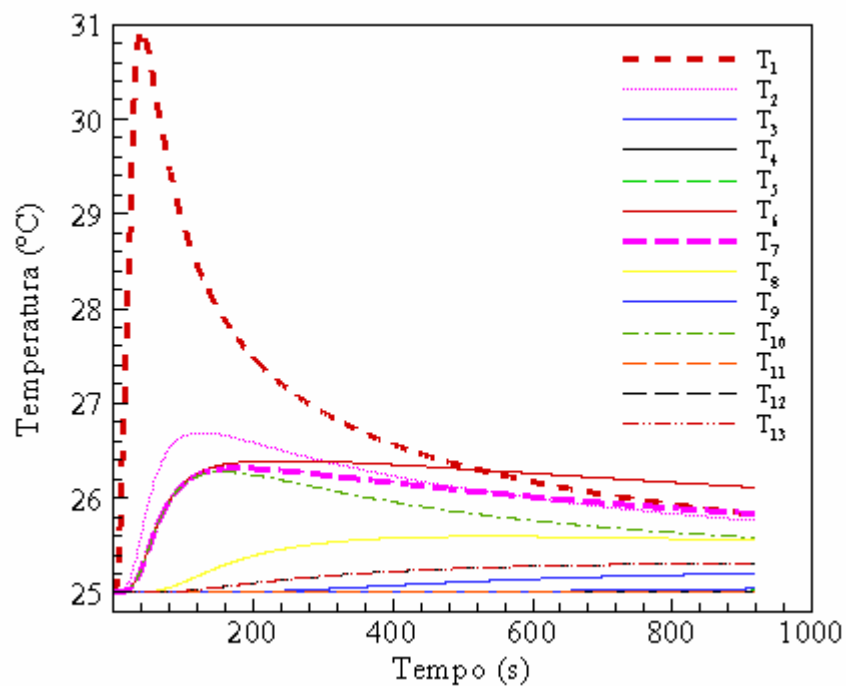


Figura 6.2 - Temperaturas para amostra de PVC

6.3 Análise de sensibilidade e considerações experimentais

Da mesma forma que no Capítulo IV os coeficientes de sensibilidade em relação a fase (Eq. 5.2) e em relação a $\Delta\theta$ (Eq.5.3) são calculados para o modelo proposto nesse capítulo. Para o cálculo dos coeficientes são usados dados de temperatura simulados com erros aleatórios. As Figuras (6.3a e 6.3b) mostram o bom comportamento dos coeficientes

para a determinação das propriedades α e λ para o modelo térmico tridimensional usando uma superfície de trabalho.

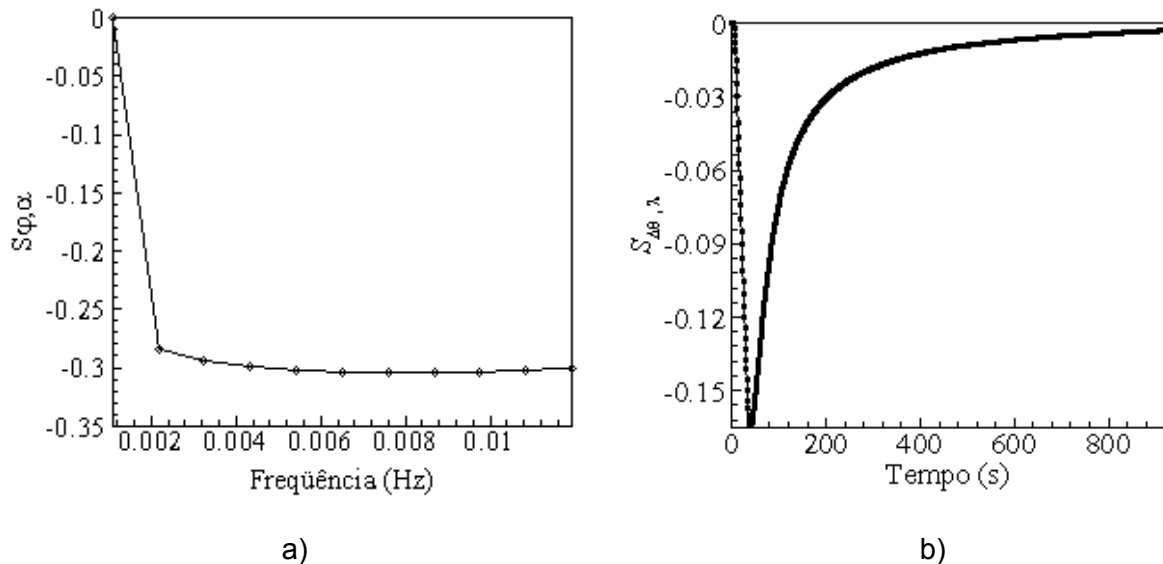


Fig. 6.3 - a) Sensibilidade da fase em relação a α b) Sensibilidade da temperatura em relação a λ

Uma vez verificado a existência de sensibilidade para a determinação das propriedades α e λ . Foram realizadas simulações numéricas para determinar o conjunto de parâmetros experimentais a serem utilizados. Esses parâmetros mostrados na Tabela (6.1) são o tempo de aquisição dos dados, intensidade do fluxo de calor, duração média de aquecimento e tamanho da malha. A escolha da intensidade do fluxo de calor e a duração média de aquecimento estão associada ao tamanho da amostra usada, ou seja, como se utilizou um tamanho menor de amostra é imprescindível o emprego de um fluxo de calor maior. Da mesma maneira que foi apresentado no Capítulo IV o intervalo de aquisição está associado ao tipo de amostra, ao número de pontos, ao uso do domínio da frequência e o tempo de aquecimento deve ser o suficiente para se ter um $\Delta\theta$ menor que 5°C . Por último o tamanho da malha deve ser o menor possível para que se possa representar de forma mais realista as condições proposta pelo problema.

Tabela 6.1 - Parâmetros experimentais para o PVC amostra (100 x 25 x 60)

material		PVC (<i>Policloreto de Vinila</i>)		
Dimensões da amostra (mm)	x	100		
	y	25		
	z	60		
Intervalo de aquisição	(s)	0,9		
Duração média do aquecimento		30		
Duração do experimento		921,6		
Número de pontos		1024		
Posição dos termopares (mm)	x	Y	z	
	51	25	40	
	40	25	55	
Área do aquecedor	50	0.0	50	
Fluxo de calor (W/m ²)		1800		
Tamanho da malha (mm)		10 ⁻³		

6.4 Análise de resultados para a amostra de PVC de 100 x 25 x 60 mm

Definidos todos os parâmetros buscou-se determinar as propriedades térmicas α e λ do PVC utilizando dados de temperatura simulados com erros aleatórios na faixa de $\pm 0,25$ K. Aos sinais de temperatura T_1 e T_7 apresentados na Fig. (6.2) foram acrescentados erros aleatório, ε , de $\pm 0,25$ K sendo que a expressão para o cálculo da temperatura simulada T_s é dada por:

$$T_s(x, y, z, t) = T(x, y, z, t) + \varepsilon \quad (0.54)$$

onde $T(x,y,z,t)$ é a temperatura calculada numericamente a partir da solução da Eq. (3.14). A partir de simulações dos sinais experimentais de temperatura foram obtidos os valores das propriedades α e λ . Na Tabela (6.2) apresenta-se os valores médios dessas propriedades, pode-se observar uma boa concordância nos resultados obtidos de α e λ . O desvio quando comparado com a referência foi de 0,63 % e 1,25 % respectivamente para essas propriedades, para amostra de PVC. Os valores de referência para α e λ foram obtidos a partir do uso do método Flash e da placa quente compensada (Lima e Silva et al, 2003).

Tabela 6.2 - Valores médios estimados de α e λ para temperaturas experimentais simuladas com valores de referência ($\alpha = 1,28 \times 10^{-7} \text{ m}^2 / \text{s}$ e $\lambda = 0,157 \text{ W} / \text{mK}$) para a amostra 100 x 25 x 60 mm

	<i>Valor estimado</i>	<i>Faixa de busca (Seção Áurea)</i>	<i>Diferença (%)</i>
$\alpha (\text{m}^2 / \text{s}) \cdot 10^7$	1,272	$5,0 \cdot 10^{-8} - 2,5 \cdot 10^{-7}$	0,63
$\lambda (\text{W} / \text{mK})$	0,159	0,1 – 0,25	1,25

Depois dos testes com dados simulados foi montada a bancada experimental (ver Capítulo V) para a determinação de α e λ a partir de dados experimentais. Entretanto, embora exista sensibilidade para obtenção das propriedades (Figuras 6.3.a e 6.3.b), não foi possível estimar as propriedades usando dados experimentais. Dessa forma realizou-se uma análise experimental a fim de explicar o que poderia estar contribuindo para não estimação das propriedades. Uma vez que o PVC é um material de baixa condutividade térmica essa análise foi realizada em relação ao isolamento. O material usado para o isolamento da amostra foi o poliestireno expandido (isopor), por se tratar de um material que apresenta as seguintes características: ótimo isolante, baixo custo, facilidade de manuseio, entre outros. Na Figura (6.4a) apresenta-se a montagem que foi feita para verificação de perdas laterais devido a ineficiência do isolamento. Nessa figura os termopares T_1 e T_2 representam as posições a serem usadas para estimação de α e λ . e os termopares T_4 , T_5 e T_6 são termopares colocados no isopor próximos a amostra (ver posição na Figura 6.4a). A ineficiência experimental do isolamento é verificada na Fig. (6.4b). Observa-se nessa figura que houve fuga de calor para o isopor. Pode-se, assim, concluir que para se usar a técnica proposta para amostra de PVC (dimensões 100 x 25 x 60 mm) só seria possível para um material que possua uma condutividade térmica bem próxima de zero. Contudo, é muito difícil achar um material que atenda a essa característica.

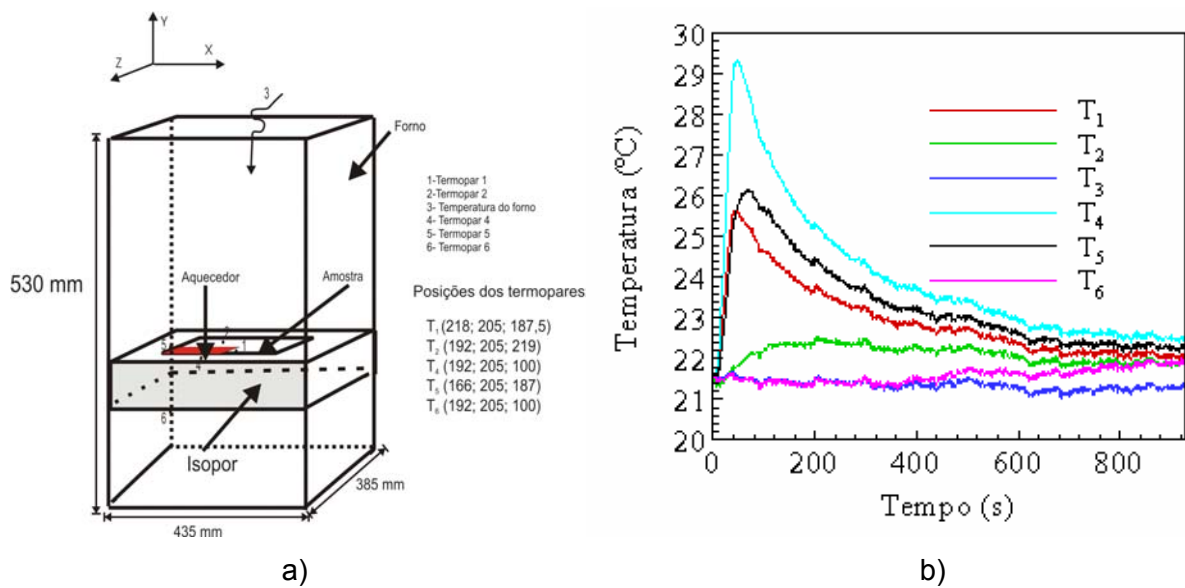


Figura 6.4 - a) Esquema de montagem da amostra com isolamento b) Temperaturas da montagem

6.5 Amostra de PVC com dimensões de 305 x 25 x 245 mm

Para contornar o problema apresentado na Seção (6.4) novas dimensões para amostra de PVC foram propostas. Como o maior problema de isolamento ocorreu nas posições laterais x e z Fig. (6.4b) foi proposto aumentar essas dimensões para evitar as perdas de laterais. Assim, o novo tamanho usado foi 305 x 25 x 245 mm. No entanto, para o uso dessa amostra foi necessária a verificação na condição de isolamento. Para verificar essa condição o aquecedor foi disposto no centro da amostra (Figura 6.5). Assim, o calor foi imposto na superfície de forma a gerar um gradiente de no máximo 5 °C (Figura 6.6). Ressalta-se que o perfil de temperatura da Fig. (6.6) foi analisado no instante de tempo de 52 s. Observa-se que as temperaturas nas bordas são constantes e iguais a inicial. Isso pode ser melhor observado nas Figuras (6.7a e 6.7b). Essas figuras mostram os perfis de temperatura na superfície da amostra ao longo dos eixos x e z respectivamente. Ressalta-se que como há condição de simetria no modelo as Figs. (6.7a e 6.7b) mostram somente as posições do centro até o final da amostra para o eixo x e do centro para a face superior para o eixo z .

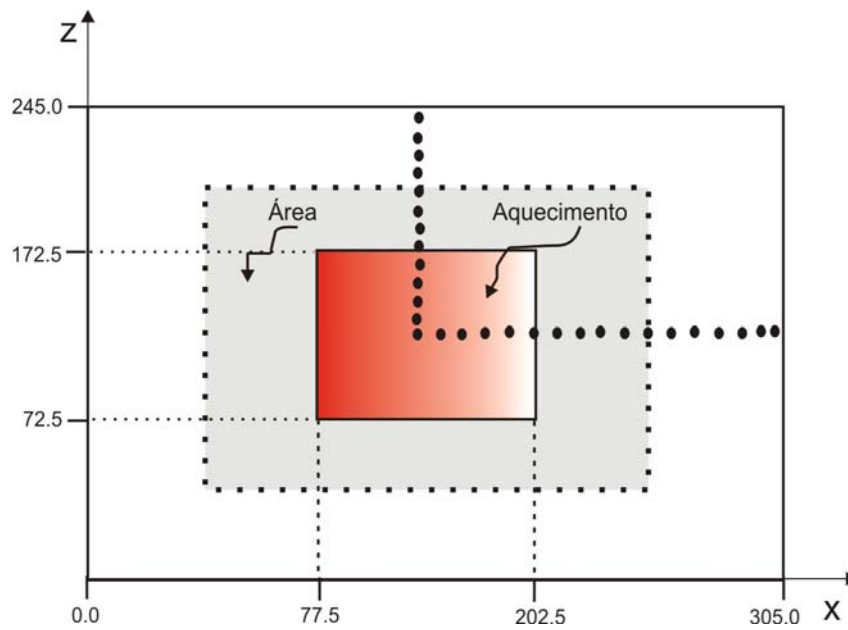


Figura 6.5 - Esquema da área demarcada na Figura 6.6

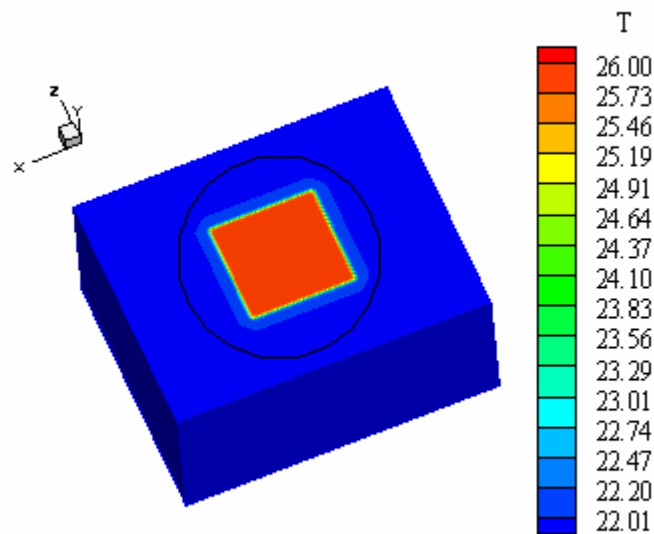


Figura 6.6 – Vista do perfil de temperatura no plano xz

Como o modelo usado é tridimensional, o cálculo da temperatura para amostra proposta (305 x 25 x 245 mm) representaria um custo computacional muito alto. Nesse sentido, aproveitando o fato da temperatura não variar a partir de uma certa posição demonstrado na Fig. (6.6) pela área demarcada, foi usado uma malha não uniforme. Ressalta-se que o perfil de temperatura foi observado no instante de tempo igual a 52 s. Observa-se que a partir de

210 mm no eixo x a temperatura que inicialmente tinha um valor constante e igual a 26 °C na região de aquecimento não mais varia. O mesmo pode ser observado para o eixo z, ou seja, a partir de 180 mm a temperatura na superfície da amostra tende para um valor constante e igual a 22 °C.

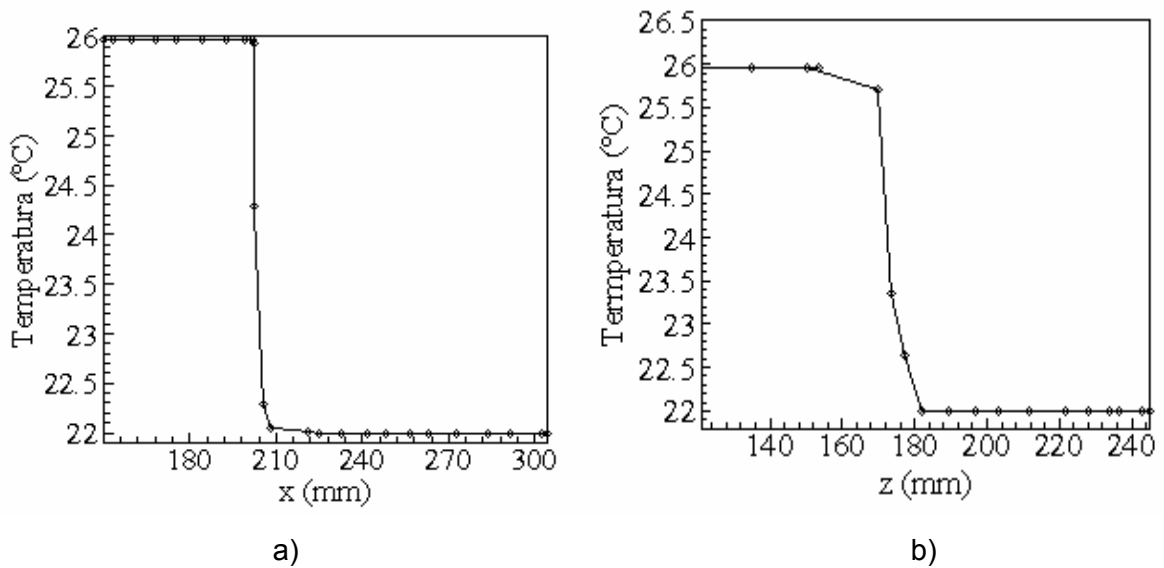


Figura 6.7 - Evolução de temperatura a) ao longo do eixo x b) ao longo do eixo z

Na Figura (6.8) apresenta-se como a malha foi usada no plano xz. Pode-se observar nessa figura que na região de interesse, onde são colocados os termopares, é usada uma malha refinada e no restante da amostra é usada uma malha mais grosseira.

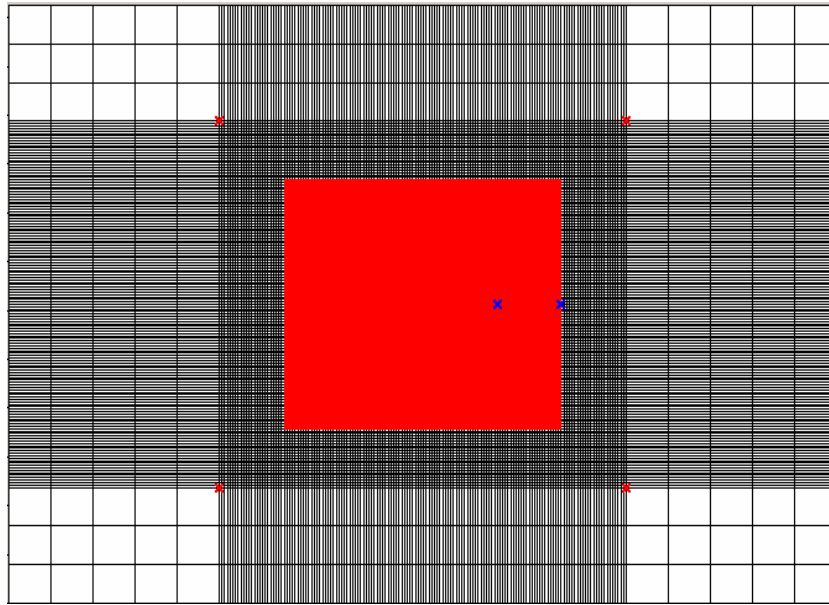


Figura 6.8 - Esquema da malha no plano xz

Para evitar a perda de calor no uso do isopor o termopar que atinge a maior temperatura é colocado embaixo do aquecedor. Usa-se para isso um aquecedor maior com área de $100 \times 100 \text{ mm}^2$. A disposição dos vários sensores de temperatura na superfície da amostra (Fig. 6.1) é também usada para determinar a posição ótima dos sensores a serem utilizados para determinação das propriedades térmicas α e λ . Da mesma forma que para a amostra anterior a escolha da posição ótima tem a ver com sua localização em regiões onde se tem gradiente de temperatura menor que $5 \text{ }^\circ\text{C}$, sensibilidade e também à utilização de técnicas no domínio da frequência. Na Figura (6.9) apresenta-se a evolução de temperatura calculada pelo modelo teórico para as duas posições escolhidas. As posições dos termopares mostradas na Fig. (6.8) são apresentadas na Tabela (6.3).

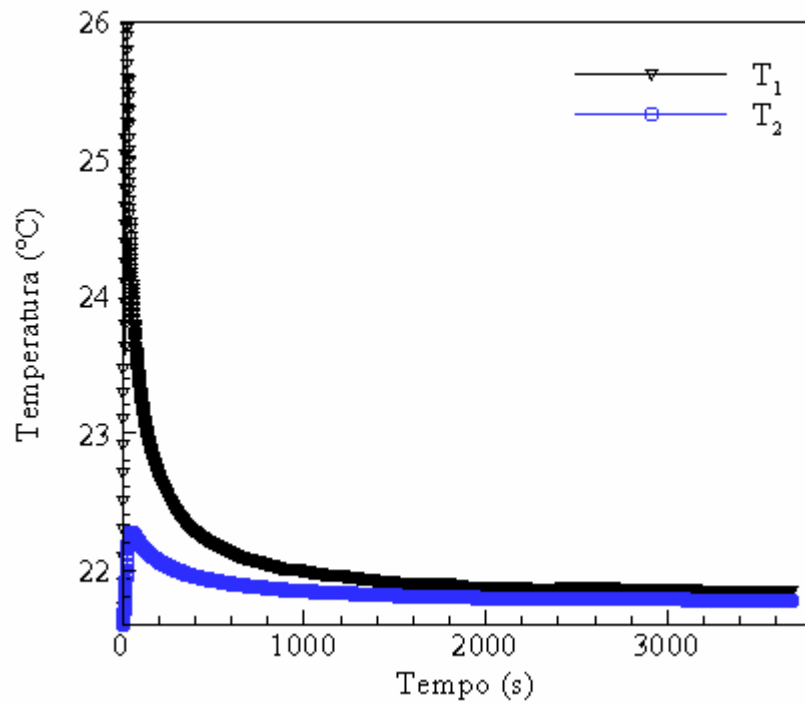


Figura 6.9 - Temperaturas na superfície da amostra para os termopares selecionados

6.6 Considerações experimentais para a amostra de 305 x 25 x 245 mm

Apresenta-se nessa seção os critérios usados para a determinação dos parâmetros experimentais (tempo de aquisição dos dados, intensidade do fluxo de calor, duração média de aquecimento, tamanho da malha) a serem utilizados na determinação das propriedades térmicas (Tabela 6.3). De forma similar ao Capítulo IV a intensidade do fluxo de calor está associada ao gradiente máximo ($\Delta\theta$) entre as duas posições na amostra que não podem ultrapassar 5 °C.

Tabela 6.3 - Parâmetros experimentais para o PVC amostra (305 x 25 x 245 mm)

material		PVC (<i>Policloreto de Vinila</i>)		
Dimensões da amostra (mm)	x	305		
	y	25		
	z	245		
Intervalo de aquisição	(s)	0,9		
Duração média do aquecimento		30		
Duração do experimento		3686		
Número de pontos		4096		
Posição dos termopares (mm)	x	y	z	
	180	25	122,5	
	203,5	25	122,5	
Área do aquecedor	100	0,0	100	
Fluxo de calor (W/m^2)		380		

A escolha do intervalo de aquisição dos dados está associada a necessidade de se ter um intervalo de tempo suficiente para se perceber a imposição do fluxo de calor na amostra. Da mesma maneira que no Capítulo IV o número de pontos a serem utilizados foi de 4096 devido ao uso de técnicas no domínio da frequência, ou seja, a mesma requer o número de pontos seja potência de dois e produza um sinal tipo pulso, ou seja, no início um aquecimento e depois um decaimento até atingir a condição de regime ver Fig. (6.9). Por último o tamanho da malha deve ser o menor possível para que se possa representar de forma mais realista as condições proposta.

6.7 Análise de resultados para a amostra de PVC de 305 x 25 x 245 mm

Determinada todas as condições necessárias para a realização de testes com a amostra proposta, as propriedades térmicas α e λ foram estimadas usando dados de temperatura simulados com erros aleatórios de $\pm 0,25$ K. Da mesma forma que para amostra de 100 x 25 x 60 mm os sinais de temperatura T_1 e T_2 apresentados na Fig. (6.9) foram acrescidos erros aleatórios, ε , de $\pm 0,25$ K, utilizando a Eq. (0.54). A partir de simulações dos sinais experimentais de temperatura foram obtidos os valores das propriedades α e λ . Na Tabela (6.4) apresenta-se os valores médios dessas propriedades,

pode-se observar uma boa concordância nos resultados obtidos de α e λ . O desvio quando comparado com a referência foi de 1,7 % e 1,3 % respectivamente para essas propriedades, para amostra de PVC.

Tabela 6.4 - Valores médios estimados de α e λ para temperaturas experimentais simuladas com valores de referência ($\alpha = 1,28 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ e $\lambda = 0,157 \text{ W/mK}$) para a amostra 305 x 25 x 245 mm

	<i>Valor estimado</i>	<i>Faixa de busca (Seção Áurea)</i>	<i>Diferença (%)</i>
$\alpha (\text{m}^2 / \text{s}) \cdot 10^7$	1,265	$5,0 \cdot 10^{-8} - 2,5 \cdot 10^{-7}$	1,9
$\lambda (\text{W} / \text{mK})$	0,154	0,1 – 0,25	1,9

Montou-se então a bancada experimental como mostrado no Capítulo V. Da mesma forma que para o caso anterior as propriedades térmicas não foram obtidas usando a metodologia proposta, embora o procedimento usado nessa parte para minimizar as perdas de calor tenha funcionado. A explicação para a não determinação de α e λ usando uma superfície de acesso para o modelo tridimensional é apresentada nas Figs. (6.10) e (6.11). Nas Figuras (6.10) e (6.11) são apresentados respectivamente os campos de temperatura na superfície frontal ao aquecimento e na direção da espessura da amostra no instante de tempo de 32 s. Nota-se na Figura (6.10) que os gradientes de temperatura na superfície são pequenos, esse fato dificultou a determinação de α e λ . Já na espessura (Fig. 6.11) obtém-se gradientes de temperatura significativos. Esse fato justifica a medição de temperatura usando as duas superfícies, como apresentado no Capítulo IV. Observa-se que a metodologia proposta nesse capítulo não apresentou resultados satisfatórios para a determinação de α e λ de materiais de baixa condutividade térmica. Uma investigação mais detalhada deve ser feita em relação a técnica de medição usando uma superfície de acesso. Duas alternativas são o aumento do fluxo de calor na superfície da amostra e o uso de um sistema de isolamento mais eficaz. Como o objetivo principal desse trabalho é a determinação de α e λ variando com a temperatura, essas investigações ficam como proposta de trabalhos futuros.

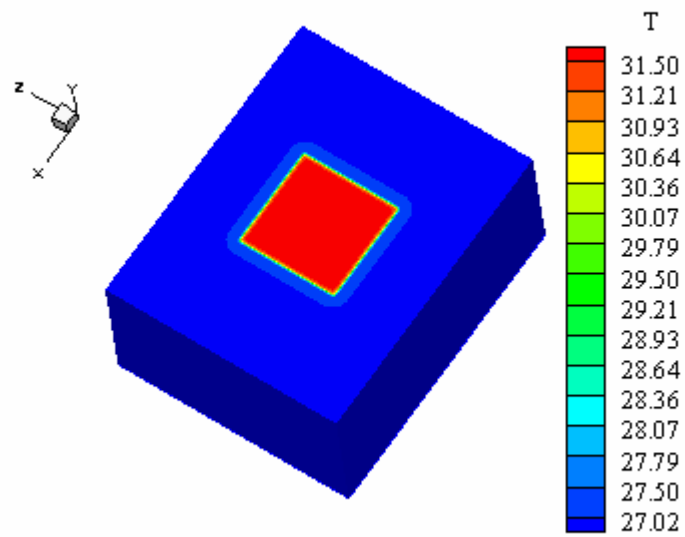


Figura 6.10 - Perfil de temperatura em (°C) na superfície da amostra de PVC

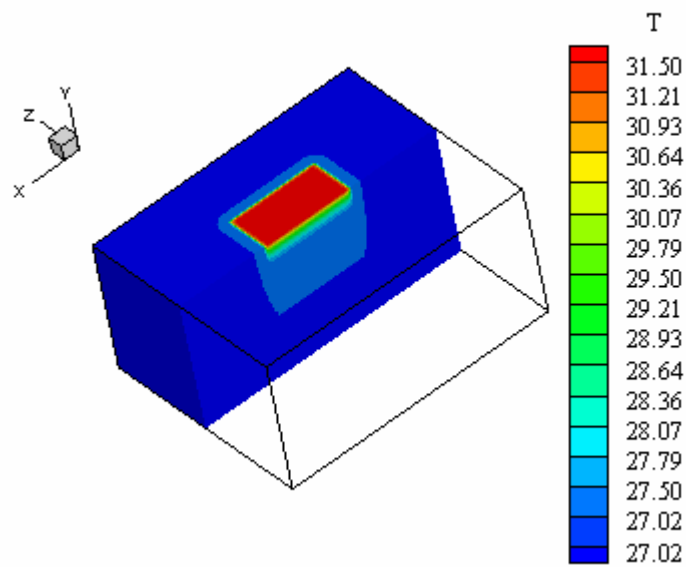


Figura 6.11 - Perfil de temperatura em (°C) no eixo y da amostra de PVC

Capítulo VII

CONCLUSÕES

No Capítulo II foi constatada a existência de poucas técnicas experimentais para a estimação simultânea de propriedades térmicas variando com a temperatura. Na grande maioria dessas técnicas as propriedades térmicas foram determinadas a partir de simulações numéricas ou técnicas que possuem restrições com relação a estimação de uma das propriedades. Nesse sentido, apresentou-se nesse trabalho o desenvolvimento de uma técnica experimental para determinação simultânea de α e λ do *Policloreto de Vinila* (PVC) variando com a temperatura. Para a obtenção de α e λ foi usado um modelo térmico unidimensional, onde no Capítulo IV foi evidenciado o porquê do uso desse modelo. Esse modelo térmico se baseou na medição de sinais variáveis de fluxo de calor e temperatura na superfície frontal ao aquecimento e temperatura na superfície oposta ao aquecimento. A partir do processamento de sinais aplicado a um sistema dinâmico, do tipo entrada e saída, a técnica usada para a determinação de α e λ mostrou-se adequada para polímeros. A definição de duas funções objetivo, uma no domínio da frequência para a determinação de α , e uma no domínio do tempo que foi empregada para obtenção de λ , possibilitou a determinação das duas propriedades de forma simultânea e independente. As propriedades foram estimadas para cada condição de temperatura imposta no controlador (20 °C, 27 °C, 36 °C, 43 °C, 50 °C, 58 °C e 65 °C), sendo que para cada condição foram realizados 20 experimentos, totalizando 140 experimentos. Os valores médios da temperatura no forno para cada uma delas foram 20,7 °C; 27,9 °C; 37,2 °C; 43,4 °C; 49,5 °C; 58,0 °C e 65,5 °C. A amostra foi disposta no forno com temperatura controlada e as propriedades foram estimadas a partir de um fluxo de calor adicional proporcionando uma diferença de temperatura de aproximadamente 4,5 °C. O sucesso na determinação das propriedades foi devido a existência de um significativo gradiente de temperatura existente na espessura da amostra de PVC, fato este que determina a localização dos sensores de temperatura nas superfícies inferior e superior da amostra. A escolha da posição dos sensores nas superfícies da amostra também está associada à utilização de técnicas no domínio da

freqüência. A técnica trabalha com diferença de temperatura (ΔT) necessitando assim do uso de dois termopares. Ressaltando que para o cálculo da FFT os sinais de temperatura tinham que ir para zero, então através de simulações do cálculo do campo de temperatura verificou-se quais posições atendem esse princípio. Uma vez examinado as posições que atenderam esse princípio o próximo passo foi conferir se era possível a estimação das propriedades. A determinação das propriedades térmicas α e λ variando com a temperatura foi possível através do controle de temperatura feito através do controlador de temperatura PID acoplado ao forno que possibilitou a variação da temperatura. Verificou-se que a temperatura do forno se manteve em todas as temperaturas investigadas próxima da temperatura inicial da amostra. Outros aspectos importantes da montagem como a resistência elétrica com espessura de 0,5 mm mostrou-se adequada para geração do fluxo de calor e temperaturas na superfície da amostra sendo que o uso dessa resistência de contato contribuiu consideravelmente para reduzir o custo da bancada experimental. O método Flash, por exemplo, usa laser como fonte de calor, aumentando significativamente os custos do experimento. Outro ponto positivo foi a geração superficial do calor tornando o método não destrutivo. Diferente de outros, onde a geração de calor é interna danificando a amostra com furos e a introdução de sondas em seu interior. O Fio Quente é um destes métodos, largamente utilizado para a determinação das propriedades térmicas de polímeros. O uso dos transdutores de fluxo de calor tornou possível a implementação do método, pela rápida resposta e alta sensibilidade, de tais sensores. Um ponto delicado no uso de transdutores é a prevenção de erros devido à sua calibração. No presente caso, realizou-se um procedimento cuidadoso de calibração.

Nas Tabelas (5.2) e (5.3) foram apresentados os valores médios estimados de α e λ nesse trabalho. Esses valores médios obtidos para cada temperatura média se mostraram satisfatórios quando comparados com os valores obtidos na literatura sendo que os desvios encontram-se dentro da faixa de 5 % de incerteza especificada pelos métodos de referência. Embora a aplicação da técnica experimental para determinação das propriedades α e λ variando com a temperatura tenha sido realizada na amostra de PVC, não há restrições quanto ao tipo de material usado. Nesse sentido, variações nos tipos de materiais devem ser acompanhadas de mudanças quanto à intensidade e duração do pulso de calor. Assim, o tempo de amostragem e número de pontos de aquisição devem também ser analisados.

Realizou-se no Capítulo VI uma investigação de uma metodologia para determinação das propriedades α e λ do PVC a temperatura ambiente usando uma superfície de acesso e um modelo térmico tridimensional. Inicialmente foi utilizada uma amostra de dimensões (100 x 25 x 60 mm) e através de simulações numéricas com erros

aleatórios determinou-se inicialmente as propriedades do PVC. Verificou-se que embora existindo sensibilidade não foi possível a determinação das propriedades α e λ a partir de dados experimentais. Uma das hipóteses para tal fato foi a não igualdade do modelo teórico com o modelo físico sendo que as possíveis causas para isso são as perdas de calor laterais, influência da convecção de calor, a não localização correta dos termopares entre outros. Constatou-se que a determinação das propriedades para essa geometria é possível se for usado um material isolante que tenha uma condutividade térmica muito pequena. Tentando contornar o problema das perdas de calor um tamanho maior de amostra foi utilizado e através de uma análise dos perfis de temperatura verificou-se que até onde o calor estava se difundindo na amostra. Essa constatação não só melhorou a condição de isolamento mais também possibilitou a utilização de malha não uniforme que contribuiu consideravelmente para diminuir o esforço computacional provocado pelo tamanho da amostra. Mas verificou-se que embora o procedimento usado para minimizar as perdas de calor laterais tenha funcionado não foi possível determinar as propriedades α e λ utilizando uma superfície de acesso através dos dados experimentais. Observou-se que a metodologia proposta no Capítulo VI não apresentou resultados satisfatórios para a determinação de α e λ de materiais de baixa condutividade térmica. Ressalta-se que para as duas dimensões analisadas o valor $\Delta\theta$ não foi superior a 5 °C para respeitar a hipótese de propriedades térmicas constante com a temperatura.

Propostas para Trabalhos Futuros

Como continuidade do presente trabalho sugere-se algumas etapas com o objetivo de aperfeiçoar a técnica experimental desenvolvida para a determinação de propriedades termofísicas variando com a temperatura. A seqüência de etapas a seguir, resume as perspectivas da continuidade deste trabalho:

- ✓ Realizar a determinação das propriedades α e λ do PVC usando a técnica proposta para temperaturas maiores que as medidas no presente trabalho. Para isso será necessário o uso de um outro material para garantir a condição de contorno de isolamento.

- ✓ Determinar as propriedades α e λ de outros polímeros para consolidar a técnica desenvolvida.

- ✓ Usar a mesma técnica experimental desenvolvida no presente trabalho para medir propriedades de materiais metálicos variando com a temperatura já que existem muitos processos como, por exemplo, os processos de laminação e recozimento nos quais as temperaturas podem variar mais de 1000 °C.

- ✓ Medir as propriedades térmicas α e λ utilizando um modelo tridimensional e somente uma superfície de acesso.

Capítulo VIII

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Abramowitz and Stegun, "Handbook of Mathematical Functions with Formulas, Graphs, and Mathematical Tables", Dover Publications, INC., 5th ed., New York, 1968, 1046 p.
2. Aviles-Ramos, C., Haji-Sheikh, A., Beck, J. V. and Dowding, K. J., "Estimation of Thermophysical Properties by the Spectral Method—Development and Evaluation", Journal of Heat Transfer, Copyright by ASME, vol. 123, p. 24-30, 2001.
3. André, S., Pereira, F. R., Rémy, B., Cella, N., and Silva Neto, A. J., "Hot Wire Method for the Thermal Characterization of Materials: Inverse Problem Application", In: IX Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências Térmicas – ENCIT, 9, 2002, Caxambu, MG, Brasil.
4. Bendat, J. S. and Piersol, A. G., "Analysis and Measurement Procedures", Wiley-Interscience, 2nd ed., USA, 1986, 592 p.
5. Blackwell, J. H., "Transient-Flow Method for Determination of Thermal Constants for Insulating Materials in Bulk", Journal of Applied Physics, vol. 25, p. 137-144, 1954.
6. Borges, V. L., "Um sistema Dinâmico para Identificação de Propriedades Termofísicas de Materiais Sólidos", 2004. 81 f., Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.
7. Borges, V. L., Lima e Silva, S. M. M. and Guimarães, G., 2005, A Dynamic Thermal Identification Method Applied to Conductor and Non Conductor Materials, This article was accepted for publication in the Inverse Problems in Science and Engineering and

it was originally sent to the Inverse Problems, Design and Optimization Symposium, Taylor & Francis Group, United Kingdom.

8. Doebelin, E., "Measurement Systems: Application and Design", International Student Edition, Mcgrall-Hill, Inc., 4th ed., New York, USA, 960 p, 1990.
9. Dowding K.J., Beck, J.V. and Blackwell, "Estimating Temperature-Dependent Thermal Properties", New Mexico, Journal of Thermophysics and Heat Transfer, vol. 13, n° 3, p. 328-336, 1999.
10. Dowding, K. J., Beck, J. V. and Blackwell, B. F., "Estimation of Directional-dependent Thermal Properties in a Carbon-Carbon Composite", vol.39, n° 15, p. 3157-3164, 1996.
11. Eriksson, R., Hayashi, M. and Seetharaman, S., "Thermal Diffusivity Measurements of Liquid Silicate Melts", In: 16th European Conference on Thermophysical Properties, Imperial College – ECTP, 2002, London, UK.
12. Guimarães, G., "Estimação de Parâmetros no Domínio da Frequência para a Determinação Simultânea da Condutividade e Difusividade Térmica", 1993. 121 f., Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil.
13. Guimarães, G., Philippi, P.C. and Thery, P., "Use of Parameters Estimation Method in the Frequency Domain for the Simultaneous Estimation of Thermal Diffusivity and Conductivity", vol. 66, n° 3, p. 2582-2588, 1995.
14. Güths, S., Domingos, R. H. E., Oliveira, R. P., "Análise de Erro no Processo de Calibração de Transdutores de Fluxo de Calor", ENCIT, In: VII Congresso Brasileiro e Engenharia e Ciências Térmicas, vol. 2, p. 722-726, 1998, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
15. Güths, S., Philippi, P. C., Gaviot, E. and Thery, P., "Um Transdutor de Fluxo de Calor a Gradiente Tangencial", In: COBEM, XI Congresso Brasileiro em Engenharia Mecânica, 1995, Belo Horizonte, MG, Brasil.

16. IPT, Instituto de Pesquisas Tecnológicas, “Determinação de condutividade térmica”, Relatório de ensaio nº 908637, fev. 2004.
17. Kim, S., “A Simple Direct Estimation of Temperature-Dependent Thermal Conductivity With Kirchhoff Transformation”, *Int. Comm. Heat Transfer*, vol. 28, nº 4, p.537-544, 2001.
18. Kim S., Kim M. Chan, Kim K. Y., “Estimation of Temperature-Dependent Thermal Conductivity With a Simple Integral Approach”, *Int. Comm. Heat Transfer*, vol. 30, nº 4, p. 485-494, 2003.
19. Lahoucine. C. O and Khellaf. A, “Periodic Method: Correction for Thermocouple and Simultaneous Estimation of Thermal Conductivity and Thermal Diffusivity”. *Review of Scientific Instruments*, vol.75, nº 7, p. 2356-2361, 2004.
20. Lesnic D, Elliott L. and Ingham D. B., “A Note on the Determination of Thermal Properties of a Material in a Transient Nonlinear Heat Conduction Problem, *Int. Comm. Heat Mass Transfer*, vol. 22, nº.4, p. 475-482, 1995.
21. Luo D., He L., Lin S., Chen T. and Gao D., “Determination of Temperature Dependent Thermal Conductivity By Solving IHCP in Infinite Region, *Int. Comm. Heat Mass Transfer*, vol.30, nº 7, p. 903-908, 2003.
22. Lima e Silva, S. M. M., Ong, T. H. and Guimarães, G, “Thermal Properties Estimation of Polymers Using Only One Active Surface”, *J. of the Braz. Soc. Mechanical Sciences*, vol. XXV, nº 9, p. 9-14,.2003
23. Mardolcar, U. V., “Thermal Diffusivity of Rocks at High Temperature by the Laser Flash Technique”, In: 16th European Conference on Thermophysical Properties, Imperial College, 2002, London, UK.
24. Malinarič, S., “Parameter Estimation in Dynamic Plane Source Method”, *Measurement Science Technology*, vol. 15, nº 5, p. 807-813, 2004.

25. Meukam P., Jannot.Y,Noumwe. A, and Kofane. T. C, "Thermo Physical of Economical Building Materials", Construction and Building Materials, vol.18, pp.437-443, 2004.
26. Miyamura, A. and Susa, M., "Relative Measurements of Thermal Conductivity of Liquid Gallium by Transient Hot Wire Method", In: 16th European Conference on Thermophysical Properties - ECTP2002, Imperial College, 2002, London, UK.
27. Moreno, R. Z. and Trevisan, O. V., "Convolução e Deconvolução no Domínio do Tempo para a Determinação de Propriedades Térmicas", Proc. V ENCIT, p.403-406, 1994.
28. Nahor, H. B., Scheerlinck, N., Van Impe, J. F. and Nicolai, B. M., "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, vol. 57, p. 103-110, 2003.
29. Nicolau, V. P., Güths, S. and Silva M. G., "Thermal Conductivity and Heat Measurement of Low Conductivity Materials Using Heat Flux Meters", In: 16th European Conference on Thermophysical Properties, Imperial College-ECTP2002, 2002,London, UK.
30. Özisik, M. N., "Heat Conduction", John Wiley and Sons Inc, 2nd ed, 1993, 692 p.
31. Parker, W. J., Jenkins, R. J., Butler, C. P. and Abbott, G. L., "Flash Method of Determining Thermal Diffusivity, Heat Capacity and Thermal Conductivity", Journal of Applied Physics, vol. 32, p. 1679-1684,1961.
32. Santos W. N., Filho R., Mummery P. e Wallwork A., "Propriedades Térmicas de Polímeros por Métodos Transientes de Troca de Calor", Revista Polímeros: Ciência e Tecnologia, nº 4, vol. 13, p. 265-269, 2003.
33. Santos W. N., Filho R. G., Mummery P. e Wallwork A., "Método do Fio Quente na Determinação das Propriedades Térmicas de Polímeros", Revista Polímeros: Ciência e Tecnologia, nº 5, vol. 14, p. 354-359, 2004.

34. Shibata, H., Okubo, K., Ohta, H. and Waseda, Y., "A Novel Laser Flash Method for Measuring Thermal Diffusivity of Molten Metals", *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2002.
35. Sears, J. Kern, Darby, Joseph R., "Technology of Plasticizers", 421 p, 1982.
36. Touloukian, Y. S., Powell, R.W., Ho, C. Y. and Klemens, P.G., "Thermophysical Properties of Matter", *Thermal Conductivity: Nonmetallic Solids*, IFI/Plenum, New York, vol.2, 1970, 933 p.
37. Vanderplaats, G. N., "Numerical Optimization Techniques for Engineering Design", McGraw-Hill Inc, New York, USA, 1984, 333p.
38. Zmuda S., Panas, A. J., Terpilowski, J. and Preiskorn, M., "Investigation of the Thermal Diffusivity of Human Tooth Hard Tissue", In: 16th European Conference on Thermophysical Properties, Imperial College, 2002, London, UK.

ANEXO I

O SOFTWARE DPT

O software denominado DPT (Determinação de Propriedades Termofísicas de Sólidos) foi desenvolvido por Borges (2004) para auxiliar na determinação das propriedades térmicas. Esse software suporta o pré-processamento, o processamento e o pós-processamento. Entende-se como pré-processamento a aquisição de dados e calibração, o processamento é a determinação efetiva das propriedades e pós-processamento é a análise através de ambiente gráfico. O desenvolvimento desse software surgiu da necessidade de se agrupar todas as técnicas de determinação de propriedades térmicas, implementadas no LTCM (Laboratório de Transferência de Calor e Massa e Dinâmica dos Fluidos) agilizando o trabalho experimental e propiciando uma melhor visão do problema. O DPT é uma aplicação computacional em uma interface gráfica que foi desenvolvido usando a linguagem C++. Com o DPT pode-se visualizar todos os dados experimentais pertinentes ao modelo de forma simples e rápida. O software tem uma série de funções que auxiliam na rapidez da determinação das propriedades térmicas. Observa-se que a simulação numérica tem grande importância na agilidade da construção experimental. Uma vez que um grande número de experimentos pode ser testado sem a sua montagem física. Nesse caso além de agilizar o tempo, o custo cai consideravelmente. O DPT também possui funções auxiliares como geração de malha auto ajustável, calibração, ajuste de curvas, estatística e solução de problemas inversos.

Dois arquivos são necessários para iniciar o DPT, um arquivo deve conter os sinais experimentais de temperatura e fluxo de calor, enquanto no outro arquivo todos os dados e arquivos necessários para determinação das propriedades térmicas α e λ como mostra a Tabela (A1.1). A Tabela (A1.2) apresenta o arquivo de dados de um experimento para o modelo unidimensional.

Tabela A1.1 - Exemplo do arquivo de entrada de dados

nome do arquivo			
número de colunas			
nome da coluna		número da coluna correspondente	
intervalo de tempo (s)			
temperatura inicial (°C)			
<i>dimensões da amostra (m)</i>			
X	Y	Z	
difusividade térmica α (m^2/s)		condutividade térmica λ (W/mK)	
número de termopares			
<i>posição dos termopares (m)</i>			
x	y	z	
<i>delimitação da área do fluxo (m)</i>			
x_1	z_1		
x_2	z_2		
<i>intervalo de busca do algoritmo de otimização</i>			
α_l	α_u	número de pontos	ponto inicial
λ_l	λ_u	número de pontos	ponto inicial
número de iterações na Seção Áurea			
número de coeficientes de sensibilidades			
difusividade térmica inicial α_0		incremento de α	
condutividade térmica inicial λ_0		incremento de λ	
tamanho da malha (m)			
dimensão do problema a ser resolvido			

Tabela A1.2 - Exemplo do arquivo de entrada de dados (arquivo preparado para o PVC)

mai24aT1T2.dat			
4			
FLUXO			1
TEMPO			2
TEMPERATURA1			3
TEMPERATURA2			4
1.0			
49.8962			
245.0-03	25.0e-03	245.0-03	
1.30e-07			0.16
2			
155.0e-03	25.0e-03	129.0e-03	
122.5e-03	25.0e-03	122.5e-03	
72.5e-03		72.50e-03	
172.5e-03		72.50e-03	
172.5e-03		172.50e-03	
72.5e-03		172.50e-03	
5.0e-08	2.5e-07	3	2
0.1	0.25	1000	2
20			
3			
1.30e-06			1.0e-08
0.16			0.01
1.0e-03			
1			

Para ilustrar a Tabela (A1.2) os dados de entrada para esse experimento são mostrados na Fig. (A1.1). As temperaturas para esse experimento são carregadas a partir desse mesmo arquivo estas curvas de temperatura foram geradas a partir da função “Gráfico”. Essa função é de extrema importância, pois a visualização dos resultados é imediata. Nas Figuras (A1.1)-(A1.2) têm-se os perfis de temperatura para as duas posições usadas no modelo unidimensional e fluxo de calor respectivamente para o conjunto de dados mostrados na Tabela (A1.2).

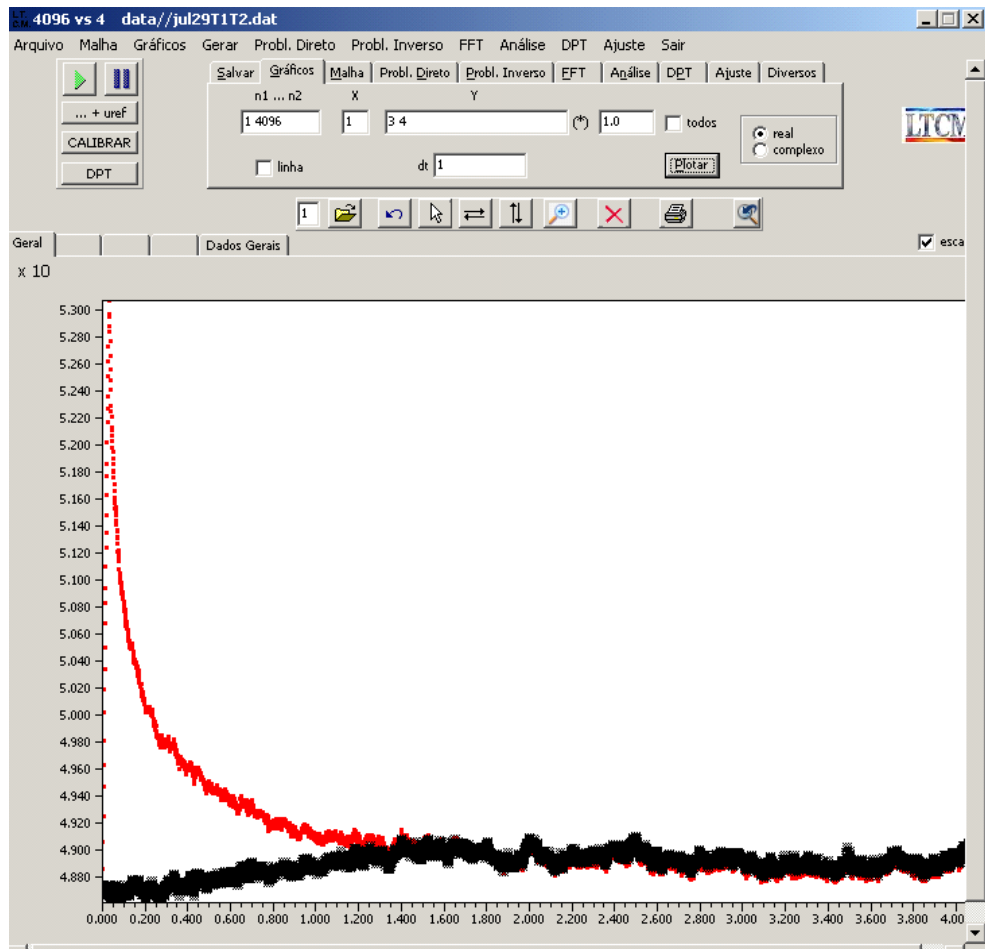


Figura A1.1 - DPT janela “Gráficos”: temperaturas experimentais”

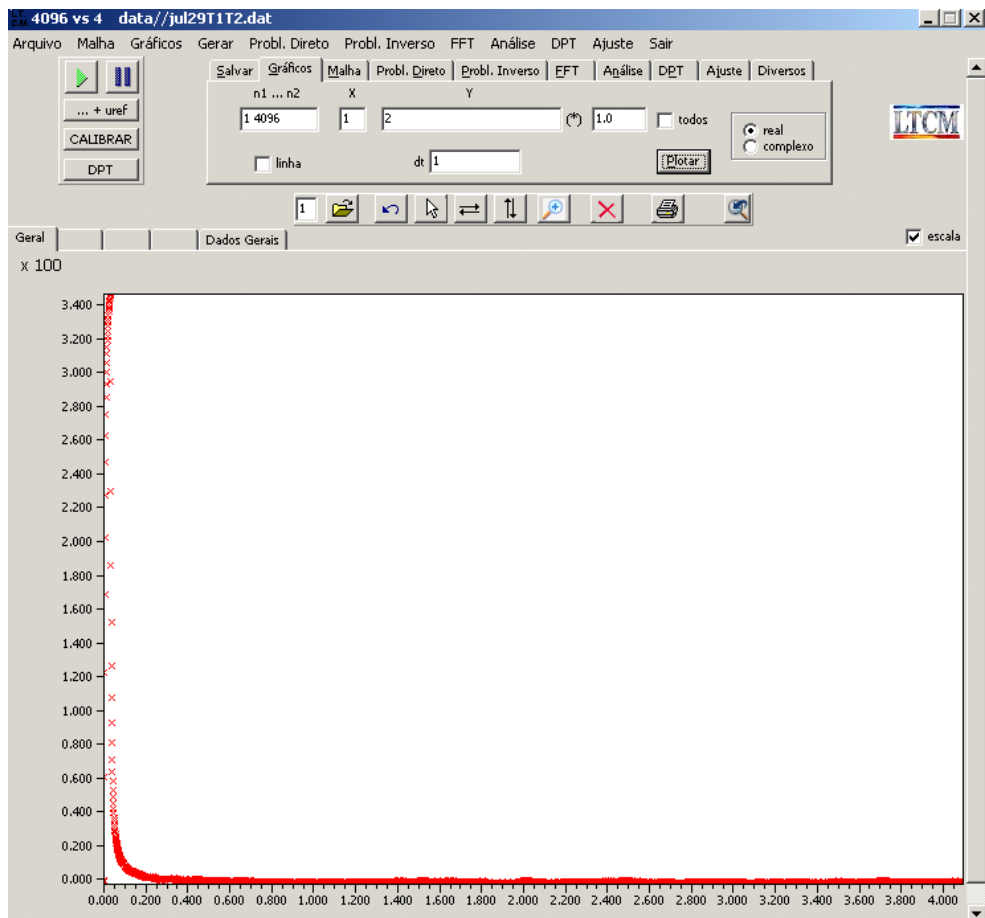


Figura A1.2 - DPT janela “Gráficos”: Fluxo de Calor

O DPT possui uma implementação numérica da solução da temperatura, o que exige a geração de uma malha. Observa-se que um algoritmo de geração de malha pode ser um fator limitante na solução das temperaturas, por se tratar de um trabalho experimental onde sensores reais são colocados nas amostras e suas posições não são perfeitamente ajustadas. Assim um algoritmo de geração de malha que não se ajusta a posição dos sensores acarreta em trabalho extra na preparação do experimento, tornando a montagem experimental muito mais delicada e demorada. Nesse sentido, foi desenvolvido também no DPT um algoritmo de geração de malha auto ajustável, ou seja, a malha se ajusta ao experimento. Na Figura (A1.3) a janela de geração de malha é mostrada. Neste exemplo os pontos vermelhos são o fluxo de calor distribuído na área e os pontos azuis são os termopares. Percebe-se claramente que a malha se adaptou aos termopares e ao fluxo de calor. O algoritmo gera ainda, uma malha de forma a não acarretar problemas de difusão numérica na solução das temperaturas.

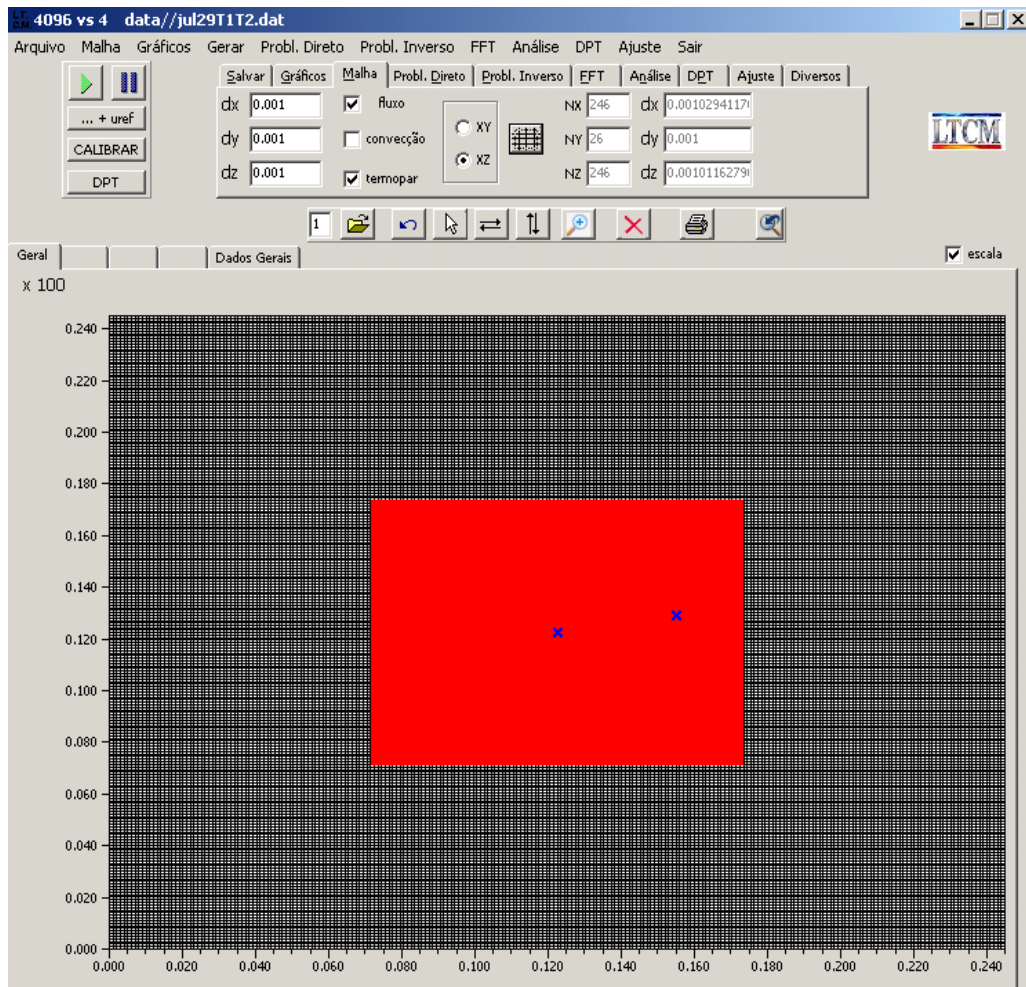


Figura A1.3 - DPT janela "Malha": Termopares e Área do fluxo

Na Figura (A1.4) é mostrada a principal janela deste programa. Nessa janela estão dispostas todas as funções para o cálculo das propriedades térmicas. Algoritmos de otimização são usados para determinar as propriedades térmicas.

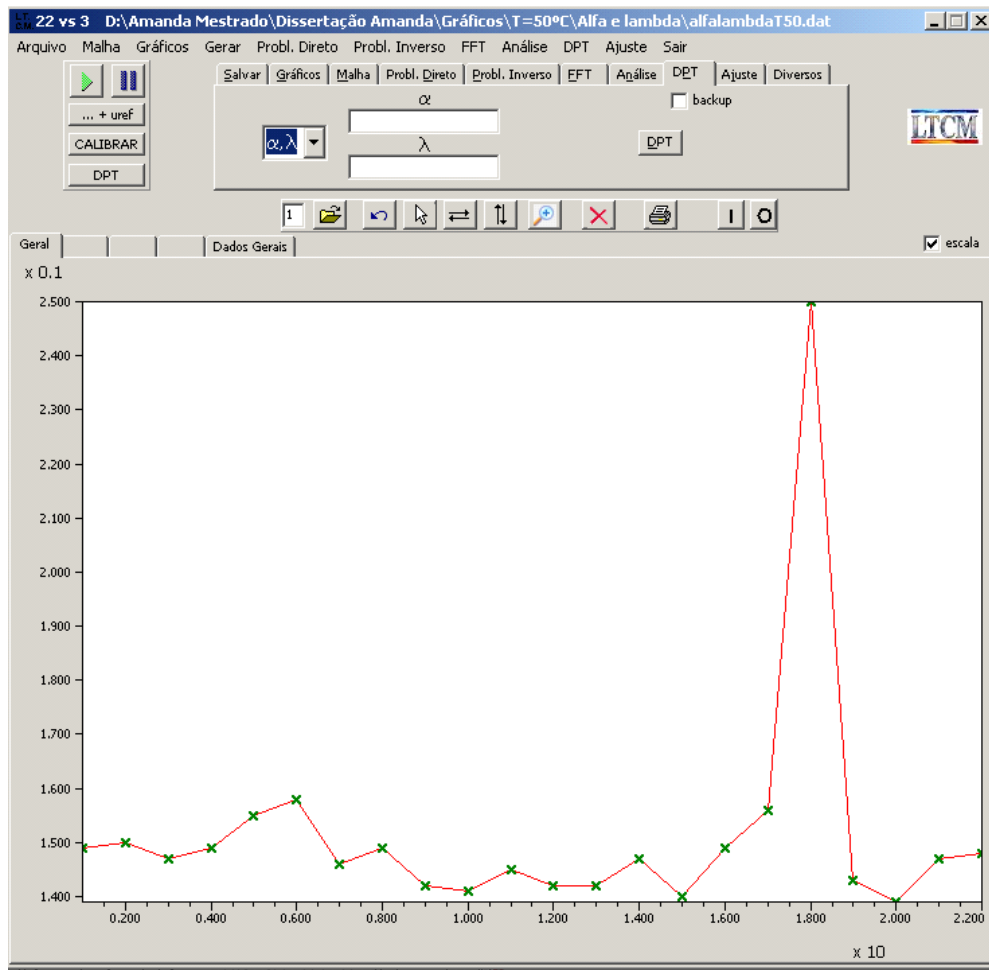


Figura A1.4 - DPT janela "DPT"

No DPT tem-se a janela chamada de Análise Figura (A1.5) onde se localiza as funções destinadas ao cálculo da FRF, correlação, sensibilidade do fluxo de calor, sensibilidade de α , sensibilidade de λ e as funções objetivo da temperatura e da fase.

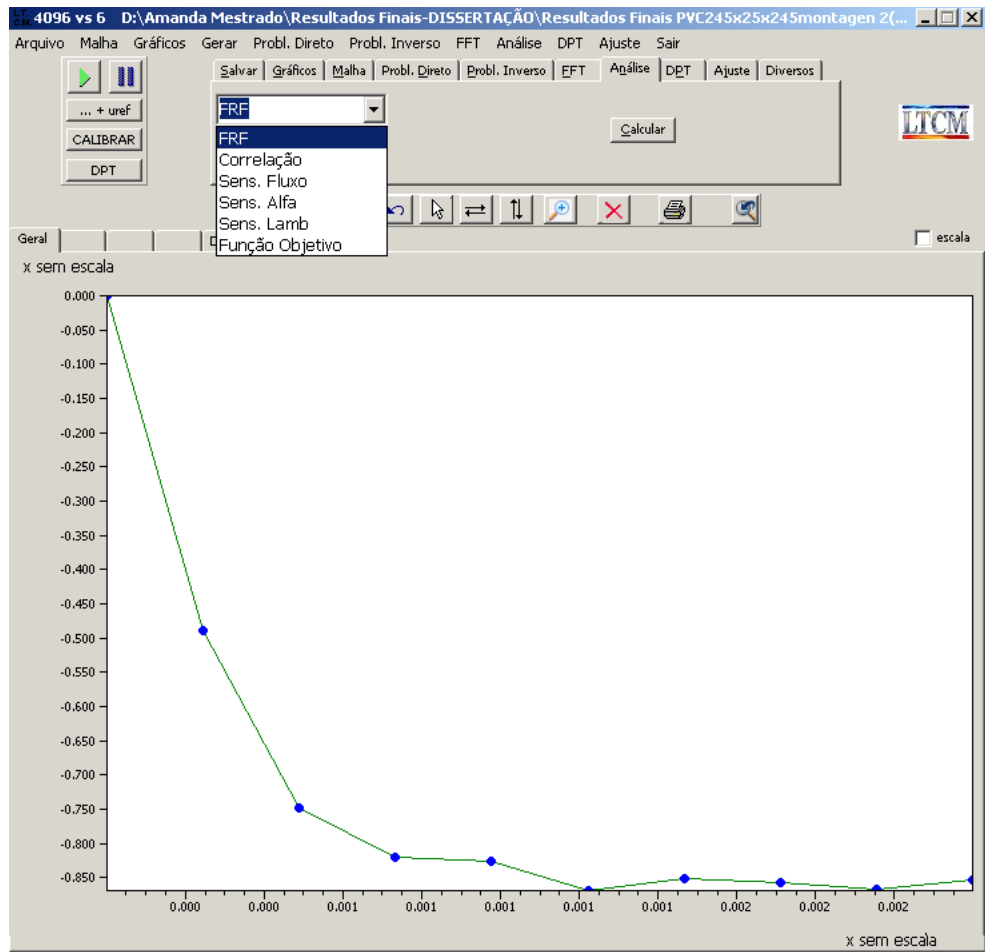


Figura A1.5 - DPT janela "Análise"

ANEXO II

CALIBRAÇÃO DOS TRANSDUTORES DE FLUXO DE CALOR

A2.1 Transdutores

Quando um meio sólido é submetido a um fluxo de calor, uma diferença de temperatura se estabelece entre as superfícies limitantes deste meio. De acordo com a lei de Fourier, o fluxo de calor que atravessa o meio é, em regime permanente, diretamente proporcional à diferença das temperaturas de suas superfícies limitantes. Assim, um instrumento que consiga fornecer o sinal proporcional à diferença das temperaturas determina, de maneira direta o fluxo de calor. Dessa forma os transdutores são os sensores responsáveis pela medição de fluxo de calor. Em diferentes áreas da engenharia são empregados transdutores de fluxo de calor para avaliar trocas térmicas, podendo ser citados como exemplos as perdas em fornos, linhas de distribuição de vapor, o controle de temperatura de componentes eletrônicos, na análise do desempenho de sistemas térmicos, entre inúmeros outros. A maioria dos transdutores de fluxo de calor utiliza, basicamente, sensores que medem uma diferença de temperatura sobre uma espessura do material. O corpo do transdutor é orientado de modo que o fluxo de calor atravesse esta espessura, assegurando que a diferença de temperatura seja diretamente proporcional ao fluxo de calor. Para cada transdutor existe uma montagem de calibração que se adapta melhor a sua forma ou condição de calibração. Entretanto, o princípio da calibração é único a todos os métodos: um fluxo de calor conhecido atravessa o transdutor de modo a se estabelecer a proporcionalidade entre o fluxo de calor e o sinal de resposta do transdutor a este fluxo.

A2.2 Calibração dos Transdutores de Fluxo de Calor a Gradiente Tangencial

Um transdutor de fluxo de calor a gradiente tangencial (Güths et al, 1998), é baseado na medição da diferença de temperatura, no sentido tangencial ao plano de medida. O instrumento torna-se assim significativamente mais delgado, com maior sensibilidade e introduzindo menores perturbações ao fluxo medido. Esta redução de espessura é obtida graças à utilização de técnicas de fabricação de circuitos impressos, que

permite a construção de termopares planares a eletrodos depositados, eliminando-se a necessidade de soldagem nas junções. Desta tecnologia resulta a produção de transdutores de grande superfície, alta sensibilidade e baixo custo. Dessa forma a calibração se processa da seguinte forma:

O fluxo de calor, q'' [W/m^2], medido por um fluxímetro é diretamente proporcional ao sinal elétrico gerado, F_n [V] onde n faz referência ao transdutor um ou dois. Para obter uma equação que relacione estas grandezas físicas é necessária uma calibração.

A confiabilidade de uma medição realizada com um fluxímetro depende diretamente da calibração efetuada, que é realizada através de duas etapas. Nas Figuras (A2.1a) e (A2.1b) têm-se o esquema das duas montagens feitas para a realização da calibração dos transdutores de fluxo de calor.

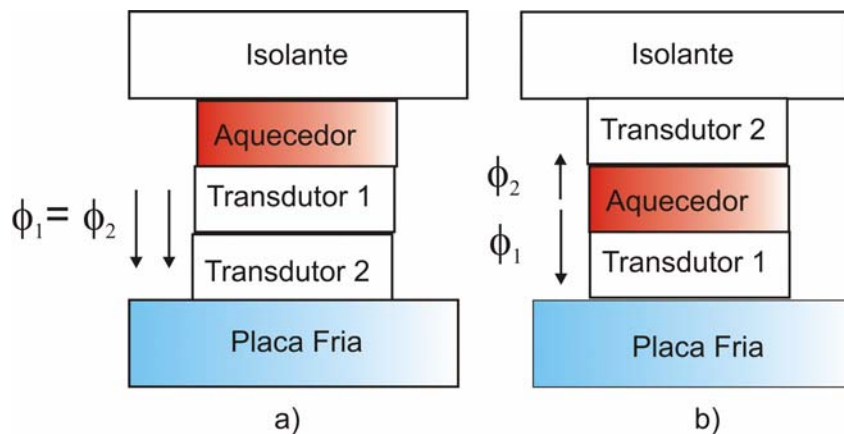


Figura A2.1 - Esquemas de montagem para a calibração dos transdutores a) montagem I e b) montagem II

Na primeira etapa, a resistência aquecedora é colocada sobre os fluxímetros que ficam sobre a placa fria. A superfície superior da resistência é termicamente isolada, conforme mostrado na Fig. (A2.1a). Nesse caso, a taxa de transferência de calor não está diretamente envolvida. Assim, admite-se a igualdade dos fluxos de calor nos fluxímetros, então da montagem um tem-se:

$$q'' = \phi_1 = \phi_2 \quad [\text{W}/\text{m}^2] \quad (2.55)$$

$$\phi_1 = d \cdot F_1 + e \quad (2.56)$$

e,

$$\phi_2 = f \cdot F_2 + g \quad (2.57)$$

Se os fluxos são iguais tem-se:

$$q'' = d \cdot F_1 + e = f \cdot F_2 + g \quad (2.58)$$

Rearranjando tem-se:

$$F_1 = \frac{g - e}{d} + \frac{f}{d} F_2 \quad (2.59)$$

Na segunda etapa, a resistência é colocada entre os fluxímetros. Estes componentes são dispostos sobre a placa fria, conforme mostrado na Fig. (A2.1 b).

O fluxo de calor dissipado pelo filme aquecedor q'' é dividido entre os fluxímetros 1 e 2, então tem-se da segunda montagem :

$$q'' = \phi_1 + \phi_2 \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (2.60)$$

$$q'' = d \cdot F_1 + e + f \cdot F_2 + g \quad (2.61)$$

Rearranjando tem-se:

$$q'' = (e + g) + d \left[F_1 + \frac{f}{d} \cdot F_2 \right] \quad (2.62)$$

Medindo-se a voltagem dos fluxímetros e o fluxo de calor q'' , é possível obter as constantes de calibração d , e , f e g .

$$d = 2,073051 \cdot 10^5 \text{ [W/m}^2 \cdot \text{V]} \quad (2.63)$$

$$e = 0,6069635 \text{ [W/m}^2 \cdot \text{V]} \quad (2.64)$$

$$f = 1,831795 \cdot 10^5 \text{ [W/m}^2 \cdot \text{V]} \quad (2.65)$$

$$g = 0,4107118 \text{ [W/m}^2 \cdot \text{V]} \quad (2.66)$$

Substituindo as constantes de calibração d , e , f e g tem-se:

$$q'' = 1,0176753 + 2,073051 \cdot 10^5 \cdot [F_1 + 0,883622 \cdot F_2] \quad (2.67)$$

Segundo Güths et al. (1998) as perdas de calor pelo isolamento para essa calibração são da ordem de 3 %. A curva de calibração correspondente a Eq. (2.67) é apresentada na Fig. (A2.2). Assim, as curvas para os dois transdutores são dados por :

$$\phi_1 = 2,073051 \cdot 10^5 \cdot F_1 + 0,6069635 \quad (2.68)$$

$$\phi_2 = 1,831795 \cdot 10^5 \cdot F_2 + 0,4107118 \quad (2.69)$$

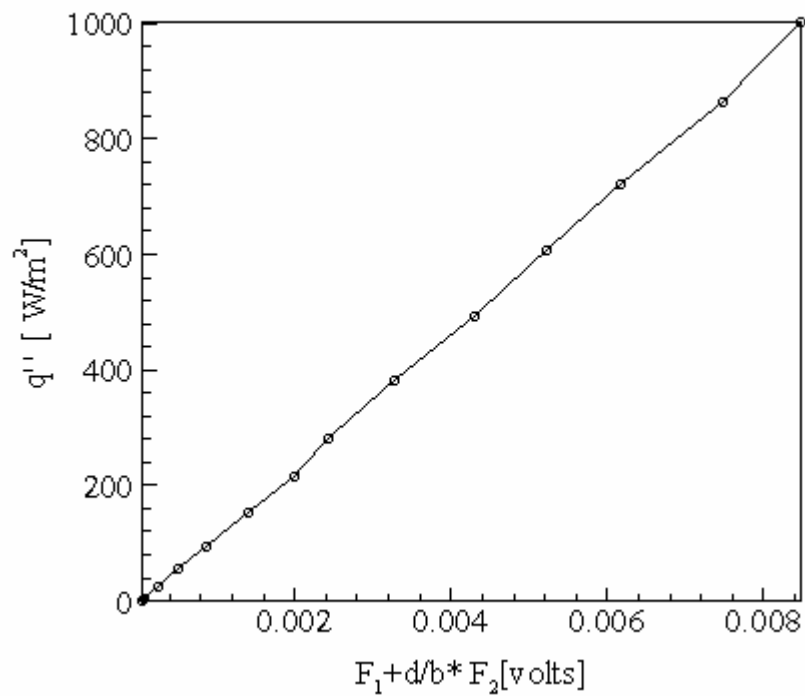


Figura A2.2 - Curva de calibração

Ressalta-se que neste trabalho somente o transdutor 1 foi utilizado.

ANEXO III

SEÇÃO ÁUREA (GOLDEN SECTION)

A3.1 Definição

Este método estima o máximo, mínimo ou zero de uma função de uma variável e é uma técnica muito usada por diversas razões. Primeiro, enquanto a função é considerada como unimodal, não precisa ter derivadas contínuas. Segundo, ao contrário de outras técnicas de ajuste de curvas, a taxa de convergência para o método é conhecida. Finalmente, o método é confiável e facilmente implementado (Vanderplaats, 1984).

A Seção Áurea é uma das técnicas mais populares para a estimação de máximos, mínimos de funções de apenas uma variável. Uma descrição baseada no algoritmo da Seção Áurea apresentada é detalhada a seguir.

Seja uma função F de uma variável X a ser minimizada assumindo-se que os limites inferiores e superiores em X sejam conhecidos por X_l e X_u , respectivamente. Assume-se também que a função F seja avaliada para cada uma desses limites e obtendo-se, respectivamente, F_l e F_u . A Fig. (A3.1) apresenta o processo de minimização.

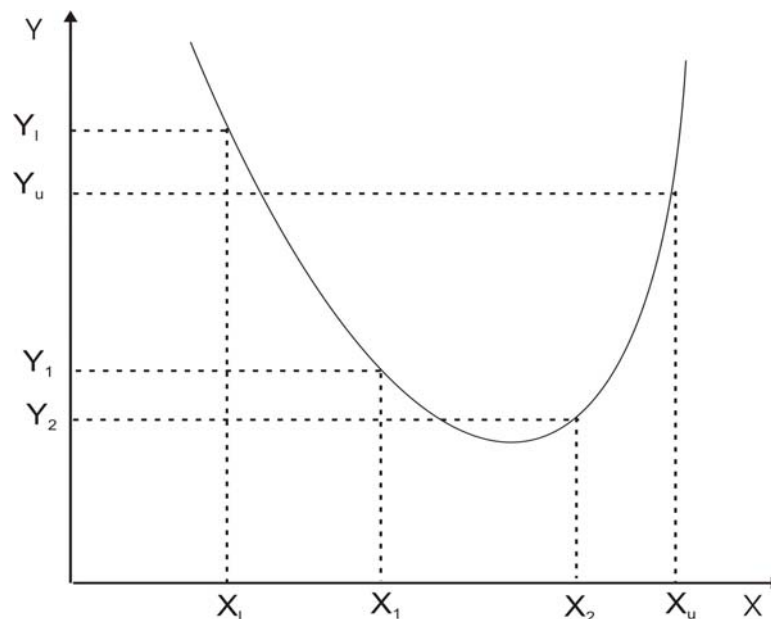


Figura A3.1 - Método da Seção Áurea

Escolhendo dois pontos intermediários X_1 e X_2 sendo $X_1 < X_2$ e avaliando estes pontos obtém-se F_1 e F_2 . Uma vez que a função F é unimodal, X_1 ou X_2 irá formar um novo limite no mínimo. Neste caso, se F_1 for maior que F_2 então X_1 será o novo limite inferior obtendo-se assim um novo conjunto de limites, X_l e X_u . Sendo F_2 maior que F_1 é evidente que X_2 será o novo limite superior e X_1 e X_2 será o novo conjunto de limites. Nesse exemplo, X_1 forma o novo limite inferior e a função F_3 é avaliada para um novo ponto X_3 . Comparando-se F_3 com F_2 o processo é repetido até que se obtenha o valor mínimo desejado. Resta ainda apresentar o método para a escolha dos pontos internos X_1 , X_2 e X_3 para que os limites sejam reduzidos os mais rápidos possíveis.

Uma forma de se obter uma função para a avaliação de X , é considerar uma mesma redução de limite para cada iteração. Ou seja, considerando simetria em relação ao centro do intervalo.

$X_u - X_2 = X_l - X_1$ ou ainda pode-se obter X_1 e X_2 de modo a garantir a relação:

$$\frac{X_1 - X_l}{X_u - X_l} = \frac{X_2 - X_1}{X_u - X_1} \quad (3.70)$$

A principal vantagem é que se pode usar qualquer informação disponível para que se obtenha a solução ótima. Assim, pelo exemplo, se X_1 tornar-se o novo limite inferior X_l , então X_2 será o novo X_l de forma que a razão

$$\frac{X_2 - X_l}{X_u - X_l} \quad (3.71)$$

seja sempre a mesma. Por conveniência, faz-se $X_l = 0$ e $X_u = 1$ de modo que os valores de X_1 e X_2 agora sejam frações do intervalo $X_u - X_l$. Reconhecendo que:

$$X_2 = 1 - X_1 \quad (3.72)$$

obtém-se

$$X_1 = \frac{1 - 2X_1}{1 - X_1} \quad (3.73)$$

ou simplificando,

$$X_1^2 - 3X_1 + 1 = 0 \quad (3.74)$$

Manipulando as Eqs. (3.72) e (3.74) determina-se os valores de X_1 e X_2 .

$$X_1 = 0,38187 \text{ e } X_2 = 0,61803 \quad (3.75)$$

Assim, a famosa razão da Seção Áurea e resultados adicionais podem ser dados por:

$$\frac{X_1}{X_2} = 0,61803 = X_2 = \frac{X_2}{X_1} - 1 \text{ e } X_1 = X_2^2 \quad (3.76)$$

Para que o processo seja simplificado pode-se definir $X_1 = 0,38197$ e obter

$$X_1 = (1 - \tau) X_l + \tau X_u \quad (3.77)$$

e

$$X_2 = \tau X_l + (1 - \tau) X_u \quad (3.78)$$

A3.2 Critério de tolerância

Considerando que tem-se o intervalo inicial $X_u - X_l$, deve-se reduzir o intervalo para algumas frações ε do intervalo inicial ou alternativamente, para algumas magnitudes específicas ΔX . Neste caso ε significa uma tolerância relativa, dependendo do intervalo inicial, e ΔX uma tolerância absoluta que é independente do intervalo inicial. Então,

$$\varepsilon = \frac{\Delta X}{X_u - X_l} \quad (3.79)$$

Se a especificação da tolerância for desejada pode-se obter (Vanderplaats, 1984):

$$\varepsilon = (1 - \tau)^{N-3} \quad (3.80)$$

onde N é o número total de avaliações, incluindo as três iniciais.

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)