



## SOFTWARE PARA DETERMINAÇÃO DE PROPRIEDADES TÉRMICAS

Valério L. Borges – vlborges@mecanica.ufu.br

Sandro M. M. Lima e Silva – metrevel@mecanica.ufu.br

Solidônio R. de Carvalho – srcarvalho@mecanica.ufu.br

Gilmar Guimarães – gguima@mecanica.ufu.br

Universidade Federal de Uberlândia – UFU, Faculdade de Engenharia Mecânica – FEMEC.

Laboratório de Transferência de Calor e Massa e Dinâmica dos Fluidos – LTCM.

Campus Santa Mônica - Bloco1M - Avenida João Naves de Ávila 2160.

38400-902 - Uberlândia - MG – Brasil.

**Resumo.** Neste trabalho apresenta-se o software DPT 1.0 (Determinação de Propriedades Térmicas 1.0), desenvolvido para a determinação das propriedades térmicas, difusividade térmica,  $\alpha$ , e condutividade térmica,  $\lambda$ , de materiais sólidos. O DPT 1.0 usa uma interface gráfica construída sobre a plataforma do C++ Builder 5. O objetivo deste programa é facilitar a utilização das técnicas de determinação das propriedades  $\alpha$  e  $\lambda$ . As saídas gráficas possibilitam uma fácil interação entre usuário e o programa. O modelo térmico unidimensional e transiente usado neste software foi desenvolvido a partir dos sinais de temperatura e fluxo de calor medidos em ambas as superfícies da amostra. As propriedades térmicas  $\alpha$  e  $\lambda$  são determinadas no domínio da frequência, usando o princípio de um sistema dinâmico, tipo entrada e saída, em duas funções objetivo distintas. Na minimização destas funções como procedimento de busca, podem ser usados os métodos de otimização DFP e de Estimação de Parâmetros. Ressalta-se que juntamente, com estes métodos utiliza-se a técnica de busca unidimensional Seção Áurea, para evitar qualquer divergência na determinação das propriedades. Apresentam-se resultados para obtenção das propriedades de duas amostras de polímeros, PVC e Polythene.

**Palavras-chave:** Problemas Inversos, Condução de Calor, Software, Medição de Propriedades Térmicas, Estimação de Parâmetros.

### 1. INTRODUÇÃO

O uso de softwares para resolver problemas de engenharia está se tornando cada vez mais freqüente. Diversos pesquisadores tem usado estas ferramentas para facilitar a análise e o entendimento nas várias áreas de engenharia. Maliska et al., (1999) apresentaram o software Heat Transfer 1.1, usado como uma ferramenta auxiliar no curso de Condução de Calor. O Heat Transfer 1.1 usa as vantagens das técnicas computacionais modernas, mostrando ser um ambiente interessante e inteligente de aprendizado. Romeu et al., (1999) desenvolveram o software Gocad para aplicações de caracterização de reservatórios de petróleo. O UMIDUS 2.1 é outro software desenvolvido para aplicação em problemas de engenharia, apresentado por Mendes et al., (2000). Este programa construído em C++ Builder foi desenvolvido para modelar a transferência combinada de calor e umidade em um meio poroso. Neste programa busca-se analisar a performance higrótérmica de elementos construtivos quando sujeitos a qualquer tipo de condições climáticas. Neste trabalho, apresenta-se o software DPT 1.0 (Determinação de Propriedades Térmicas 1.0) desenvolvido sobre a plataforma C++ Builder 5, uma linguagem orientada a objetos. Este software pode ser executado no sistema operacional Windows. A interface consiste de uma série de janelas nas quais pode-se informar os dados de entrada relevantes e conferir os resultados.

Este programa é usado para determinação da condutividade térmica,  $\lambda$ , e difusividade térmica,  $\alpha$ , de materiais sólidos para um modelo térmico transiente e unidimensional. Este modelo baseia-se numa técnica experimental onde os sinais de temperatura e fluxo de calor são provenientes das duas superfícies da amostra. O DPT 1.0 é usado para determinação das propriedades térmicas  $\alpha$  e  $\lambda$  para as amostras de Polythene e PVC.

## 2. APARATO EXPERIMENTAL

Apresenta-se na Fig. (1) o esquema de montagem da bancada experimental projetada para a obtenção das condições de contorno necessárias para o desenvolvimento do modelo térmico e conseqüente obtenção das propriedades  $\alpha$  e  $\lambda$ . O fluxo de calor,  $\phi_1(t)$ , aplicado na superfície frontal da amostra é gerado por um aquecedor resistivo e medido por um transdutor de fluxo de calor. Na superfície oposta ao aquecimento o fluxo de calor,  $\phi_2(t)$ , é também medido por um transdutor de fluxo de calor. Ressalta-se que os transdutores de fluxo de calor têm dimensões de 50 x 50 x 3 mm e constante de tempo inferior a 10 ms (Leclerq & They, 1983). As temperaturas em ambas as superfícies são medidas por termopares do tipo K. Os sinais medidos de temperatura e fluxo de calor foram adquiridos usando-se o sistema de aquisição HP 75000 Series B, juntamente com o voltímetro HPE 1326B.

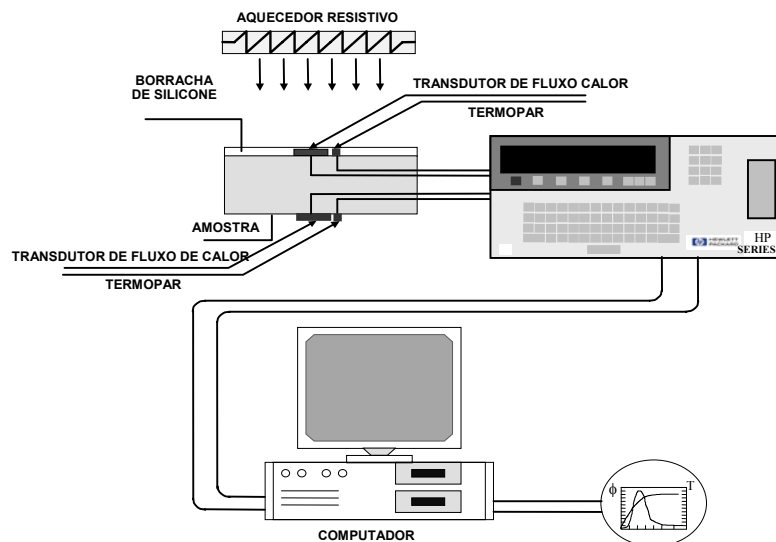


Figura 1 – Esquema de montagem do Aparato Experimental

## 3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS PARA O DPT 1.0

### 3.1. Modelo Teórico de Temperatura

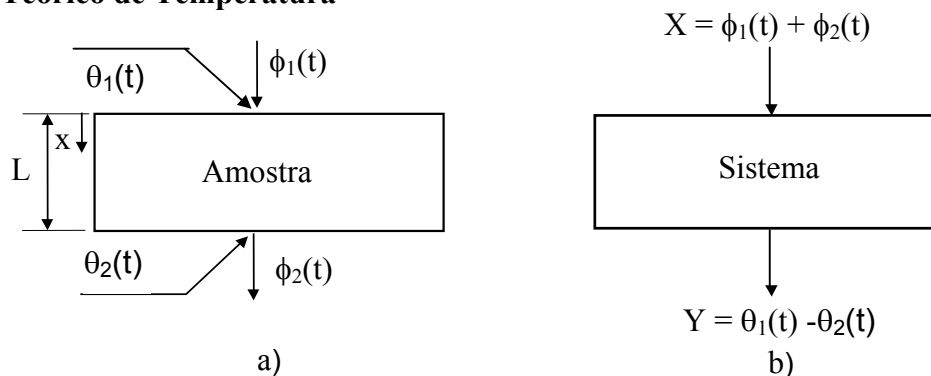


Figura 2 – a) Modelo térmico e b) Sistema dinâmico

Apresenta-se na Fig. (2a) o esquema térmico do modelo proposto neste trabalho (Guimarães et al., 1995). Ou seja, uma amostra homogênea de espessura  $L$  e temperatura inicial  $T_0$  é sujeita a um fluxo de calor,  $\phi_1(t)$ , na superfície frontal e um fluxo de calor resultante,  $\phi_2(t)$ , atravessa a superfície oposta. Para a determinação das propriedades térmicas  $\alpha$  e  $\lambda$ , utiliza-se o princípio de um sistema dinâmico tipo entrada/saída (Fig. (2b)). Na Figura (2a),  $\theta_1(t)$  e  $\theta_2(t)$  são respectivamente, as temperaturas na superfície em  $x = 0$  e  $x = L$ . O problema térmico da Fig. (2a) pode ser dado pela equação da difusão,

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (1)$$

com as suas respectivas condições de contorno,

$$\theta(0, t) = \theta_1(t) \quad (2)$$

$$\theta(L, t) = \theta_2(t) \quad (3)$$

$$\phi(0, t) = \lambda \left. \frac{\partial \theta}{\partial x} \right|_{x=0} = \phi_1(t) \quad (4)$$

$$\phi(L, t) = \lambda \left. \frac{\partial \theta}{\partial x} \right|_{x=L} = \phi_2(t) \quad (5)$$

e condição inicial

$$\theta(x, 0) = 0 \quad (6)$$

onde  $\theta$  é definida como

$$\theta(x, t) = T(x, t) - T_0 \quad (7)$$

## 2.2. Funções Objetivo de Fase e de Módulo

Fazendo a Transformada de Laplace nas Eqs. (1)-(6) obtém-se a solução na forma matricial

$$\begin{bmatrix} \Theta_2 \\ \Phi_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P & -Q \\ -R & P \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Theta_1 \\ \Phi_1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

onde  $\Theta_1(0, p)$  e  $\Theta_2(L, p)$  são respectivamente, a Transformada de Laplace de  $\theta_1(0, t)$  e  $\theta_2(L, t)$ .  $\Phi_1(0, p)$  e  $\Phi_2(L, p)$  são respectivamente a Transformada de Laplace de  $\phi_1(0, t)$  e  $\phi_2(L, t)$ , sendo

$$P = \cosh\left\{\left(\sqrt{p/\alpha}\right)L\right\} \quad (9)$$

$$Q = \left\{\left(\lambda\sqrt{p/\alpha}\right)^{-1}\right\} \sinh\left\{\left(\sqrt{p/\alpha}\right)L\right\} \quad (10)$$

$$R = \left(\lambda\sqrt{p/\alpha}\right) \sinh\left\{\left(\sqrt{p/\alpha}\right)L\right\} \quad (11)$$

A partir da definição de um sistema dinâmico, com um sinal de entrada do tipo  $\sum \phi = \phi_1 + \phi_2 = X(t)$  e de saída do tipo  $\Delta\theta = \theta_1 - \theta_2 = Y(t)$ , obtém-se da Eq. (8) a função

$$Z(p) = \frac{\Delta\Theta}{\sum \Phi} = \frac{Q}{1+P} = \frac{X(p)}{Y(p)} \quad (12)$$

ou ainda

$$Z(p) = \left\{ 1/\lambda(\sqrt{p/\alpha}) \right\} \tanh \left\{ 1/2 \times \sqrt{p/\alpha} \right\} L \quad (13)$$

onde  $Z$  é conhecida como impedância generalizada, (Kougbeadjo, 1981). Assim aplicando-se a transformada inversa de Laplace (Spiegel, 1992), obtém-se no domínio do tempo a impedância generalizada.

$$Z(t) = \left( \frac{4 \cdot \alpha}{L \cdot \lambda} \right) \sum_{n=1}^{\infty} e^{-[(2n-1)^2 \pi^2 \alpha t / L^2]} \quad (14)$$

A estimação de  $\alpha$  e  $\lambda$  é feita no domínio da frequência, a partir da minimização de  $Z(f)$  em suas formas teórica e experimental. Como  $Z(f)$  é complexa, a minimização é feita no módulo e na fase, a partir da aplicação da Transformada de Fourier na Eq. (14), ou seja,

$$Z(f) = \int_0^{\infty} Z(t) e^{-j2\pi ft} dt \quad (15)$$

onde  $j = \sqrt{-1}$ . Para a obtenção de  $Z(f)$  experimental utiliza-se os sinais medidos de fluxo de calor  $X(t)$  e temperatura  $Y(t)$  no domínio da frequência. Nesse caso, obtém-se  $X(f)$  e  $Y(f)$  através da aplicação da transformada numérica de Fourier (Discrete Fast Fourier Transform, Bendat & Piersol, 1986).

A estimação de  $\alpha$  e  $\lambda$  é feita através da minimização das funções objetivo de mínimos quadrados na fase e no módulo definidas por

$$S_{fase} = \sum (\Psi(f) - \bar{\Psi}(f))^2 \quad (16)$$

$$S_{mod} = \sum (|Z(f)| - |\bar{Z}(f)|)^2 \quad (17)$$

onde  $\Psi(f)$  e  $\bar{\Psi}(f)$  são respectivamente o fase teórica e experimental de  $Z$ .  $|Z(f)|$  e  $|\bar{Z}(f)|$  representam os seus módulos teórico e experimental.

#### 4. O SOFTWARE DPT 1.0

O DPT 1.0 é uma aplicação computacional em uma interface gráfica que permite a determinação de  $\alpha$  e  $\lambda$  pelo modelo proposto pela Seção (3). Com o DPT 1.0 pode-se visualizar todos os dados experimentais pertinentes ao modelo térmico de forma simples e rápida. O DPT 1.0 determina o fluxo de calor pelo método de estimação seqüencial de fluxo constante (Beck et al., 1985). As temperaturas podem também ser calculadas numericamente para serem comparadas com as temperaturas experimentais.

#### 4.1. Entrada de Dados no DPT 1.0

Para iniciar o DPT 1.0 deve-se ter o arquivo com os sinais experimentais de temperatura e fluxo de calor no formato ASCII. Na janela *Experimento* (Fig. 3) o usuário entra com os dados iniciais fornecendo quais são as colunas de temperatura e fluxo de calor do arquivo de dados. Na janela *Simulação*, pode-se calcular a temperatura numericamente para ser comparada com a temperatura experimental. Os dados experimentais são carregados pela janela *Carregar Dados*, onde o usuário tem a opção de entrar com os dados calibrados ou não calibrados. Caso os dados não estejam calibrados, o usuário tem a opção (*Curva de calibração*) de entrar com a curva de calibração pelo arquivo ou entrar pelo teclado. Na Figura (4) apresenta-se a janela *Gráficos*, onde pode-se verificar todos os sinais experimentais de temperatura e de fluxo de calor. Nesta janela o usuário tem a opção de escolher como deseja verificar o experimento. Os botões da Fig. (4) mostram todas as opções. Na Figura (5) é mostrada a janela *Análise dos Dados*. Nesta janela estão todas as opções de tratamento de dados dos sinais, as densidades autoespectrais e espectrais de entrada e saída, o coeficiente de coerência e os coeficientes de sensibilidade em relação a  $\alpha$  e  $\lambda$ . As partes reais e imaginárias da transformada rápida de Fourier, também estão nesta janela. Ressalta-se que, na janela *Probl Inverso* calcula-se o fluxo de calor nas duas superfícies a partir do uso da técnica de estimação seqüencial de fluxo de calor. Todos os sinais experimentais e dados tratados podem ser salvos em arquivo através da janela *Salvar*.

Para a minimização das funções objetivo, definidas pelas Eqs. (16) e (17), podem ser usados o método seqüencial de otimização DFP (Davidon-Fletcher-Powel, Vanderplaats, 1984) e a técnica de estimação de parâmetros (Beck & Arnold, 1977). Saliencia-se que, juntamente com estes métodos a técnica de minimização unidimensional da Seção Áurea é usada para evitar qualquer divergência na determinação de  $\alpha$  e  $\lambda$ . A técnica da seção Áurea é uma técnica bastante conhecida para estimar o máximo, o mínimo ou zero de uma função de uma variável. Informações adicionais sobre esta técnica podem ser encontradas com detalhes em Vanderplaats (1984).

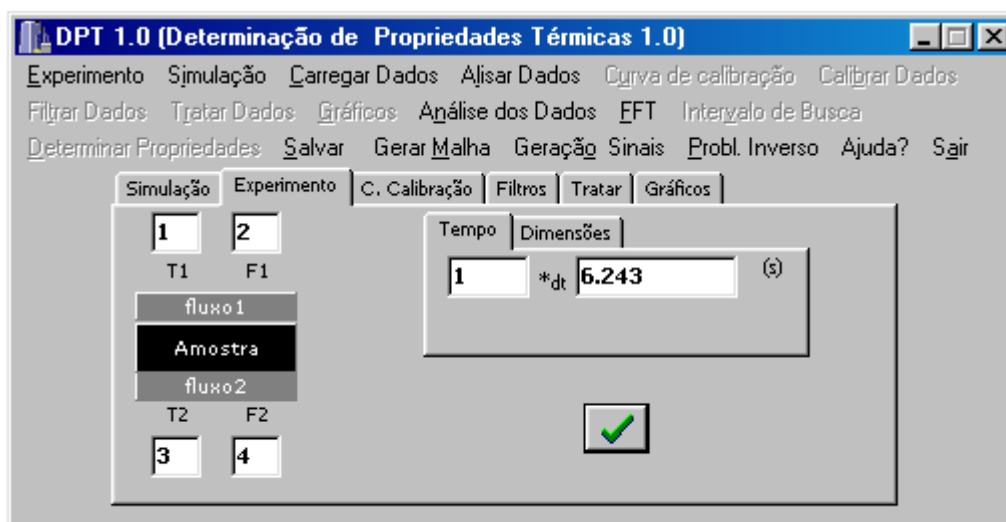


Figura 3 – Janela *Experimento* do software DPT 1.0

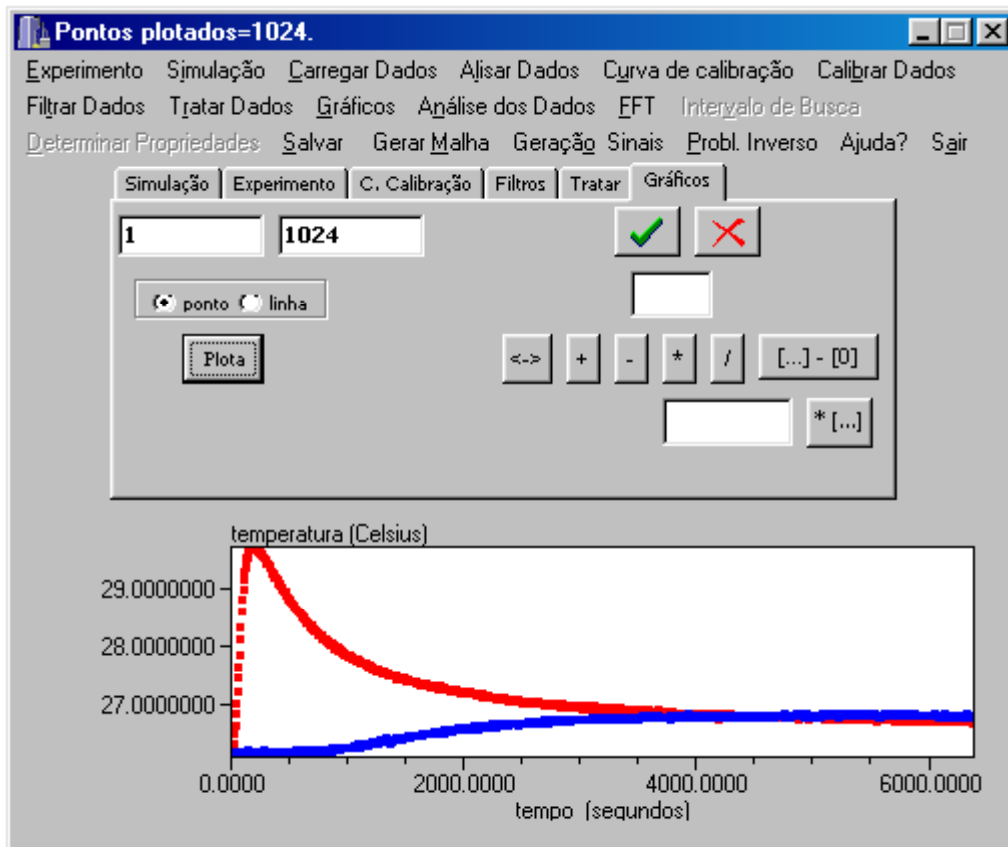


Figura 4 – Evolução experimental da temperatura em  $x = 0$  e  $x = L$  para o Polythene.

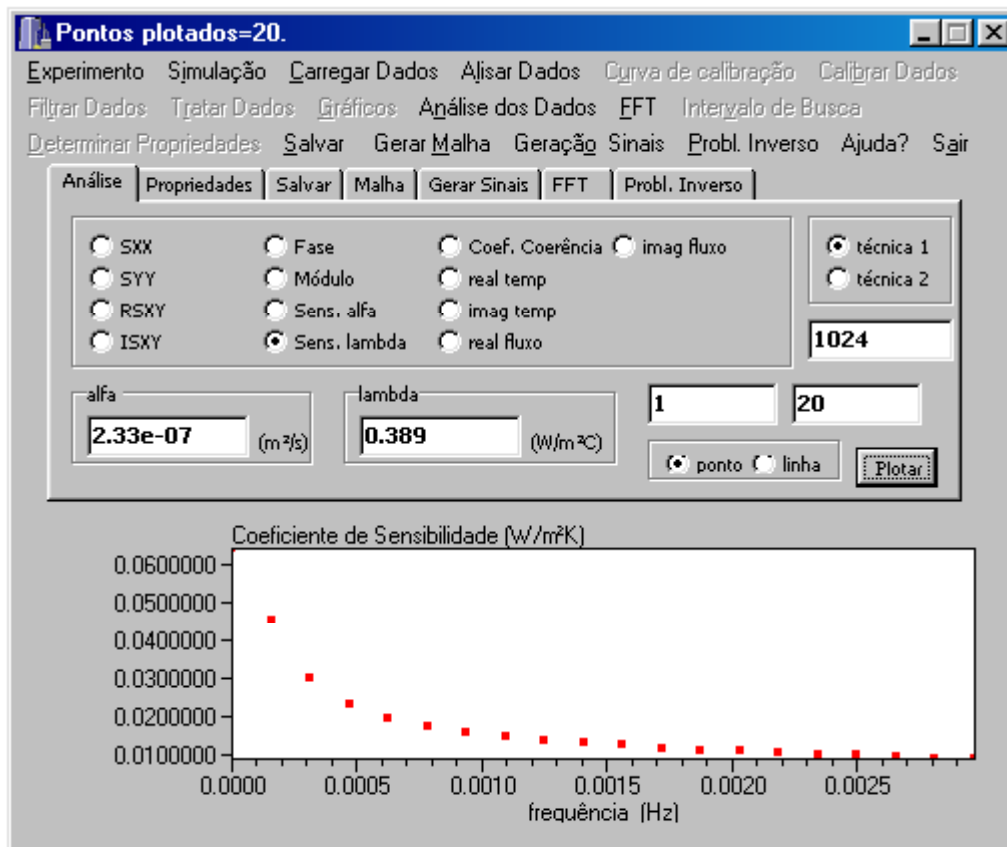


Figura 5 – Coeficiente de Sensibilidade em relação a  $\lambda$ .

## 5. RESULTADOS GERADOS PELO DPT 1.0

Apresenta-se nesta seção os resultados obtidos das propriedades térmicas  $\alpha$  e  $\lambda$  para duas amostras de polímeros diferentes. Uma de Polychloroethylene (PVC) e outra de Polythene, ambas possuindo 305 x 305 x 50 mm de dimensões. Foram realizados 20 experimentos para o Polythene e 50 experimentos para o PVC. Para ambas amostras foram adquiridos 1024 pontos, sendo que os intervalos de medição foram 6,243 s e 7,034 s respectivamente para o Polythene e o PVC. O tempo de duração do aquecimento para o Polythene é de aproximadamente 90 s e em torno de 150 s para o PVC. Para os dois materiais o pulso de calor gerado foi da ordem de 300 W/m<sup>2</sup>.

Nas Tabelas (1) e (2) são mostrados respectivamente os valores médios estimados de  $\alpha$  e  $\lambda$  para os 20 experimentos do Polythene, para um intervalo de confiança de 99,87 %. Os dados estatísticos para a estimação de cada propriedade térmica são também apresentados nestas tabelas. Na Tabela (3) é mostrado um resumo da estimação de  $\alpha$  e  $\lambda$  para o Polythene. Nesta tabela, também é apresentado o valor de  $\lambda$  fornecido pela National Physical Laboratory (NPL, 1991).

Tabela 1. Dados estatísticos para o valor médio estimado de  $\alpha$  para o Polythene, valor inicial de  $\alpha = 1,0 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$

$\alpha \text{ (m}^2/\text{s)}$	$S_{fase} \text{ inicial}$	$S_{fase} \text{ final}$	$\sigma$
$2,3767 \times 10^{-7} \pm 1,06 \%$	$3,196 \times 10^{-03}$	$2,415 \times 10^{-05}$	$3,6692 \times 10^{-9}$

Tabela 2. Dados estatísticos para o valor médio estimado de  $\lambda$  para o Polythene, valor inicial de  $\lambda = 0,01 \text{ W/m.K}$

$\lambda \text{ (W/m.K)}$	$S_{mod} \text{ inicial}$	$S_{mod} \text{ final}$	$\sigma$
$0,3974 \pm 3,31 \%$	$3,686 \times 10^{-02}$	$2,01 \times 10^{-07}$	0,0191

Tabela 3. Resumo da estimação de  $\alpha$  e  $\lambda$  para a amostra de Polythene

$\lambda \text{ (W/m.K)}$	$\lambda \text{ (W/m.K)}$ (NPL, 1991)	Erro (%)	$\alpha \text{ (m}^2/\text{s)}$
$0,3974 \pm 3,31 \%$	$0,40 \pm 2,0 \%$	0,65	$2,3767 \times 10^{-7} \pm 1,06 \%$

Na Tabela (4) apresenta-se um resumo da estimação de  $\alpha$  e  $\lambda$  para o PVC para um intervalo de confiança de 99,87 %. Esta tabela apresenta também para efeito de comparação, valores de referência das propriedades térmicas do PVC. Estes valores de referência para  $\alpha$  e  $\lambda$  foram obtidos por Lima e Silva & Guimarães, (2000).

Tabela 4. Resumo da estimação de  $\alpha$  e  $\lambda$  para a amostra de PVC.

$\alpha \text{ (m}^2/\text{s)}$	$\alpha \text{ (m}^2/\text{s)}$ (Lima e Silva & Guimarães, 2000)	Erro (%)	$\lambda \text{ ( W/mK)}$	$\lambda \text{ ( W/mK)}$ (Lima e Silva & Guimarães, 2000)	Erro (%)
$1,36 \times 10^{-7} \pm 0,95 \%$	$1,32 \times 10^{-7} \pm 1,30 \%$	2,94	$0,152 \pm 0,65 \%$	$0,156 \pm 1,10 \%$	2,63

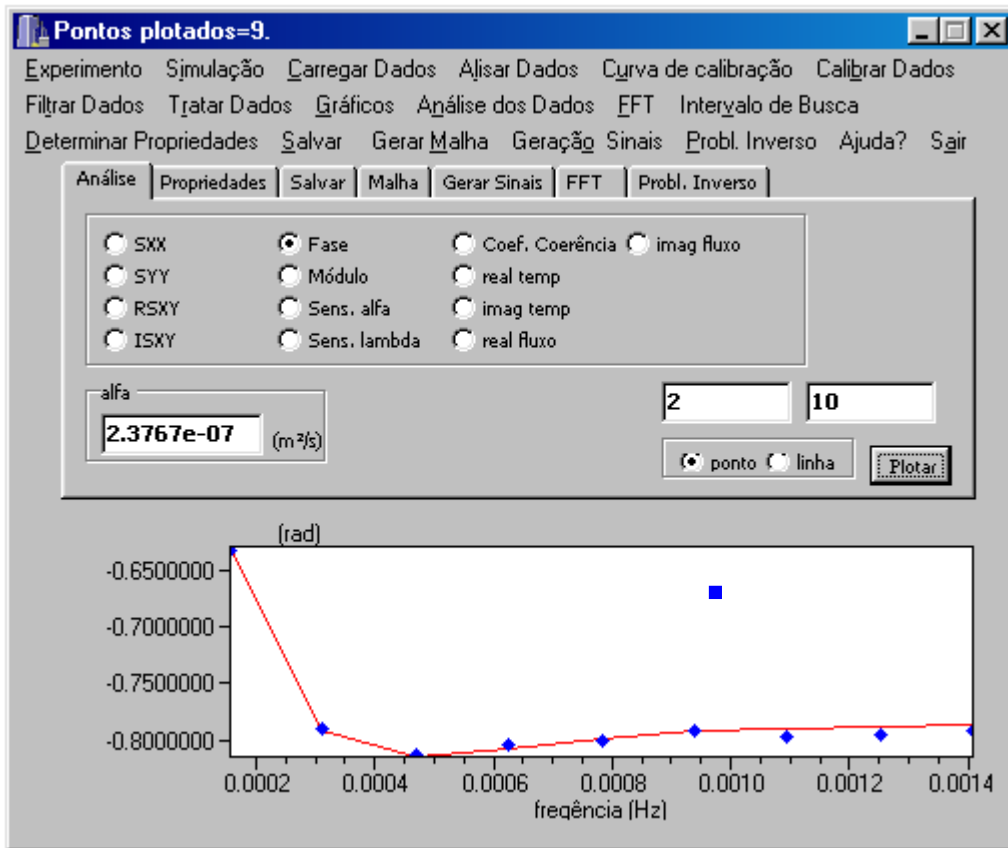


Figura 6 – Comparação entre as fases experimental e teórica da impedância generalizada

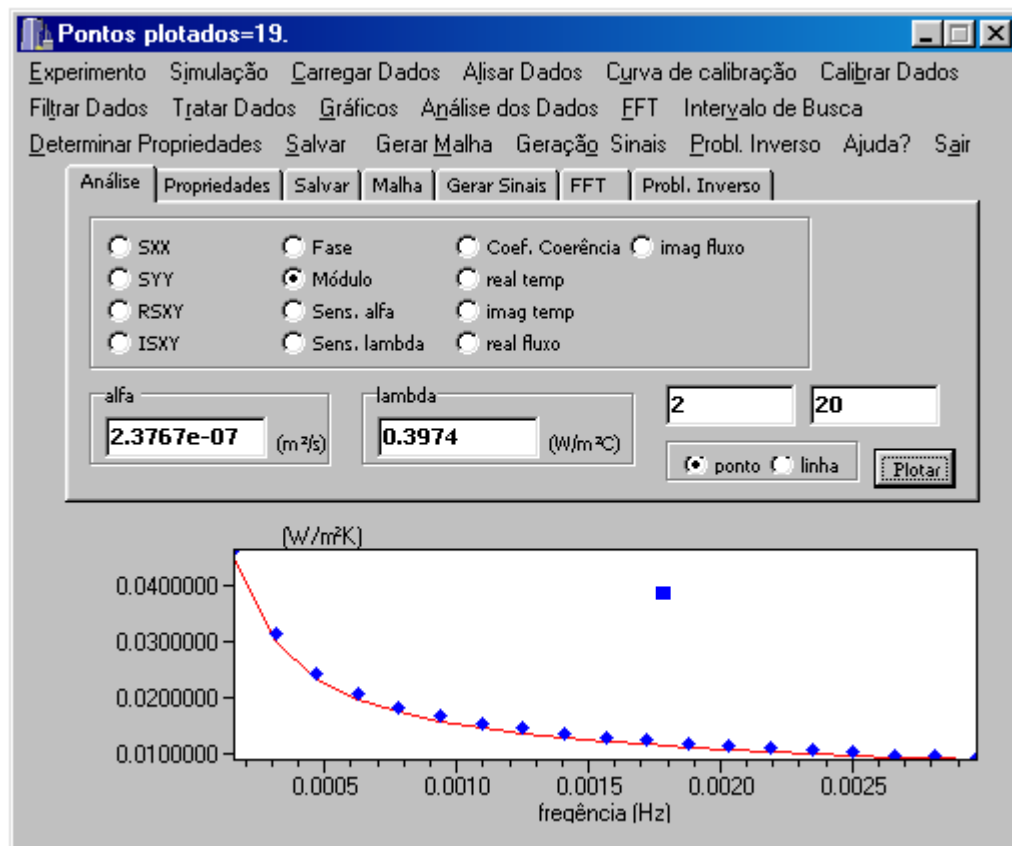




Figura 7 – Comparação entre os módulos experimental e teórico da impedância generalizada

As Figs. (6) e (7) apresentam a fase e o módulo da função resposta em frequência com seus valores estimados e experimentais, para o conjunto total de 20 experimentos para o Polythene. Ressalta-se que estes 20 dados experimentais foram alisados, ou seja, foram calculados valores médios para as densidades espectrais e autoespectrais. Observa-se nestas figuras a boa concordância dos resultados obtidos. O erro foi inferior a 1 % para a condutividade térmica do Polythene, quando comparado com o valor de referência. Para o PVC o erro ficou em torno de 3 % para  $\alpha$  e  $\lambda$  (Tabela 4). Estes resultados mostram a eficiência do programa DPT 1.0.

## 6. CONCLUSÕES

Este artigo apresentou uma ferramenta amigável, que pode ser usada para caracterização térmica de novos materiais sólidos. Os resultados apresentados para duas amostras usadas neste trabalho foram satisfatórios. O próximo passo com o DPT (versão 2.0) será a implementação de outras técnicas de determinação das propriedades térmicas.

## 7. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq e à Fapemig pelo suporte financeiro respectivamente nos processos IC (102225/00-1 e 102091/00-5) e Recém-Doutor Ref: TEC 00050/01.

## 8. REFERÊNCIAS

- Abramowitz, M. & Stegun, I. A., 1968, "Handbook of Mathematical Functions with Formulas, Graphs, and Mathematical Tables", 5<sup>o</sup> ed., Dover Publications Inc., New York.
- Beck, J. V. e Arnold, K. J., 1977 "Parameter estimation in engineering and science", John Wiley and Sons Inc., New York, 501 p.
- Beck, J. V., Blackwell, B. & Charles R. St. Clair Jr., 1985, "Inverse Heat Conduction – Ill-posed Problems", Wiley-Interscience Publication, New York.
- Bendat, J. S. & Piersol, A. G., 1986, "Analysis and Measurement Procedures", Wiley-Interscience, 2<sup>o</sup> Ed., USA.
- Kougbeadjo, R. A., 1981, "Identification de Diffusivité Thermique par Traitement du Transfert de Chaleur à Travers une Paroi Homogène en Régimes Impulsionnel et Pseudo-Aléatoire. Application des Méthodes de Corrélation en Thermocinétique", Thèse Docteur-Ingenieur, Université des Sciences et Techniques de Lille, 171 p.
- Guimarães, G., Philippi, P. C. & Thery P., 1995, "Use of Parameters Estimation Method in the Frequency Domain for the Simultaneous Estimation of Thermal Diffusivity and Conductivity", Review of Scientific Instruments, Vol. 66, N<sup>o</sup> 3, Mar.
- Leclerq, D. & Thery, P., 1983, "Apparatus for Simultaneous Temperature and Heat-Flow Measurements under Transient Conditions", Review of Scientific Instruments, Vol. 54, pp. 374-380.
- Lima e Silva, S. M. M. e Guimarães, G., 2000, "Determinação Simultânea de Propriedades Térmicas do PVC (Polychloroethylene) Usando Somente Uma Superfície de Acesso", CDROM do ENCIT 2000, FIERGS Convention Center, Porto Alegre, Brasil.
- Maliska, C. R., Dihlmann A., Ambrosio, V. S., Reis, M. V. F. & Maliska Jr., C. R., "Heat Conduction Teaching Heat Transfer 1.1 Software + New Course Program", XV COBEM, CDROM, Águas de Lindóia, São Paulo.
- Mendes, N., Lamberts, R. & Philippi, P. C., "O Programa UMIDUS 2.1 e a Redução de Tempo de CPU em Simulações de Longos Períodos", ENCIT2000, CDROM, FIERGS Convetion Center, Porto Alegre, Brasil.
- NPL, National Physical Laboratory, 1991, "Certificate of Calibration", Thermal Conductivity of a Pair of Perspex Specimens, Technical Report 12321/90/021, England (unpublished).

- Romeu, R. K., Backheuser, Y., Russo, E. E. R., Reis, L. P., Huynh, P. & Martha, L. F., "Implementações no Programa Gocad para Aplicações de Caracterização de Reservatórios", XV COBEM, CDROM, Águas de Lindóia, São Paulo.
- Spiegel, M. R., 1992, "Manual de Fórmulas, Métodos e Tabelas de Matemáticas", Makron Books do Brasil Ltda e Mc. Graw-Hill Ltda.
- Vanderplaats G. N., 1984, "Numerical Optimization Techniques for Engineering Design", McGraw-Hill, New York, USA, 350 p.

## SOFTWARE FOR DETERMINING THERMAL PROPERTIES

**Valério L. Borges** – vlborges@mecanica.ufu.br

**Sandro M. M. Lima e Silva** – metrevel@mecanica.ufu.br

**Solidônio R. de Carvalho** – srcarvalho@mecanica.ufu.br

**Gilmar Guimarães** – gguima@mecanica.ufu.br

Federal University of Uberlândia – UFU, College of Mechanical Engineering – FEMEC.

Heat and Mass Transfer and Fluid Dynamics Laboratory – LTCM.

Campus Santa Mônica - Bloco1M - João Naves de Ávila Avenue, 2160.

38400-902 - Uberlândia - MG – Brazil.

***Abstract.** This paper presents a software DPT 1.0 (Thermal Properties Determination 1.0), developed for determining simultaneously thermal diffusivity,  $\alpha$ , and thermal conductivity,  $\lambda$ , of solid materials. The DPT 1.0 uses a graphic interface, built in C++ Builder 5. The objective of this program is to make easy the  $\alpha$  and  $\lambda$  determination. A transient one-dimensional thermal model has been developed to be used in this software. In this case, the temperature and heat flux are measured at both sample surfaces. The thermal properties  $\alpha$  and  $\lambda$  are obtained in the frequency domain by using the input/output system idea. The methods of optimization DFP and parameter estimation can be used to minimize two different objective functions. In each method, the golden section technique is used in a one-dimensional search. In this work, the determination of thermal properties  $\alpha$  and  $\lambda$  is presented for two polymer samples, PVC and Polythene.*

***Keywords:** Inverse Problems, Heat Conduction, Software, Thermal Properties Measurement, Parameter Estimation.*