



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, α , e condutividade térmica, λ , 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 α e λ . 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 α e λ 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, λ , e difusividade térmica, α , 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 α e λ 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 α e λ . 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.

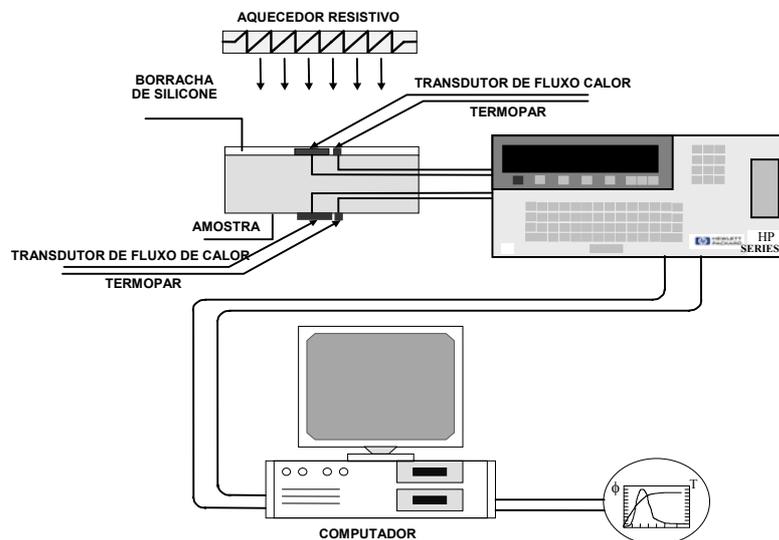


Figura 1 – Esquema de montagem do Aparato Experimental

3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS PARA O DPT 1.0

3.1. Modelo Teórico de Temperatura

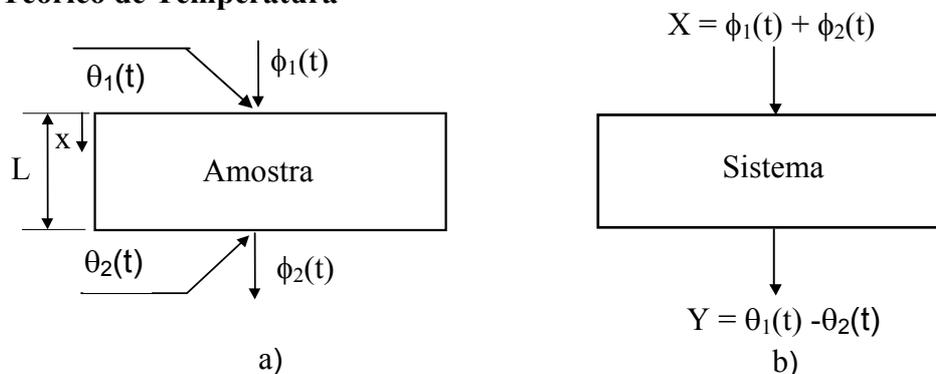


Figura 2 – a) Modelo térmico e b) Sistema dinâmico

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 α e λ , 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 θ 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 α e λ 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 α e λ 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 α e λ 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 α e λ . 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 α e λ . 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).

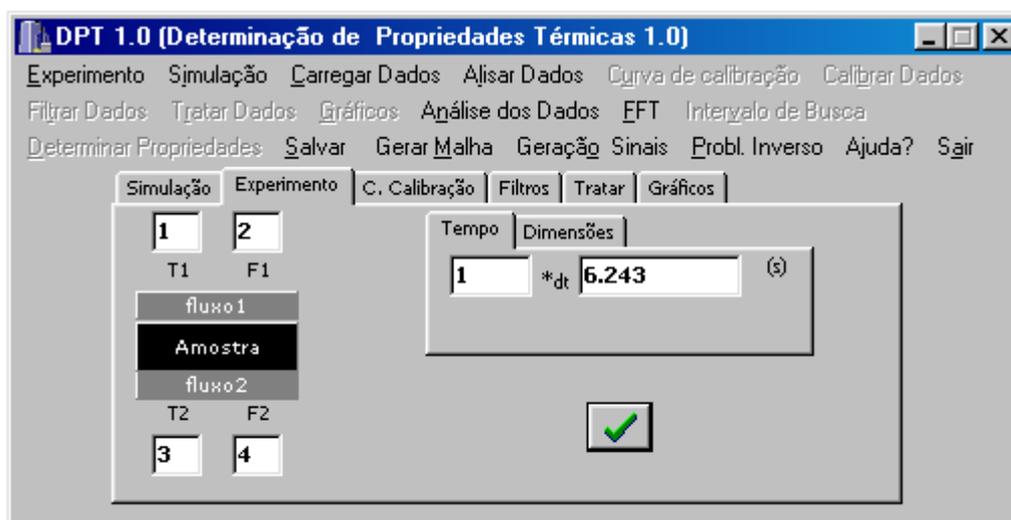


Figura 3 – Janela *Experimento* do software DPT 1.0

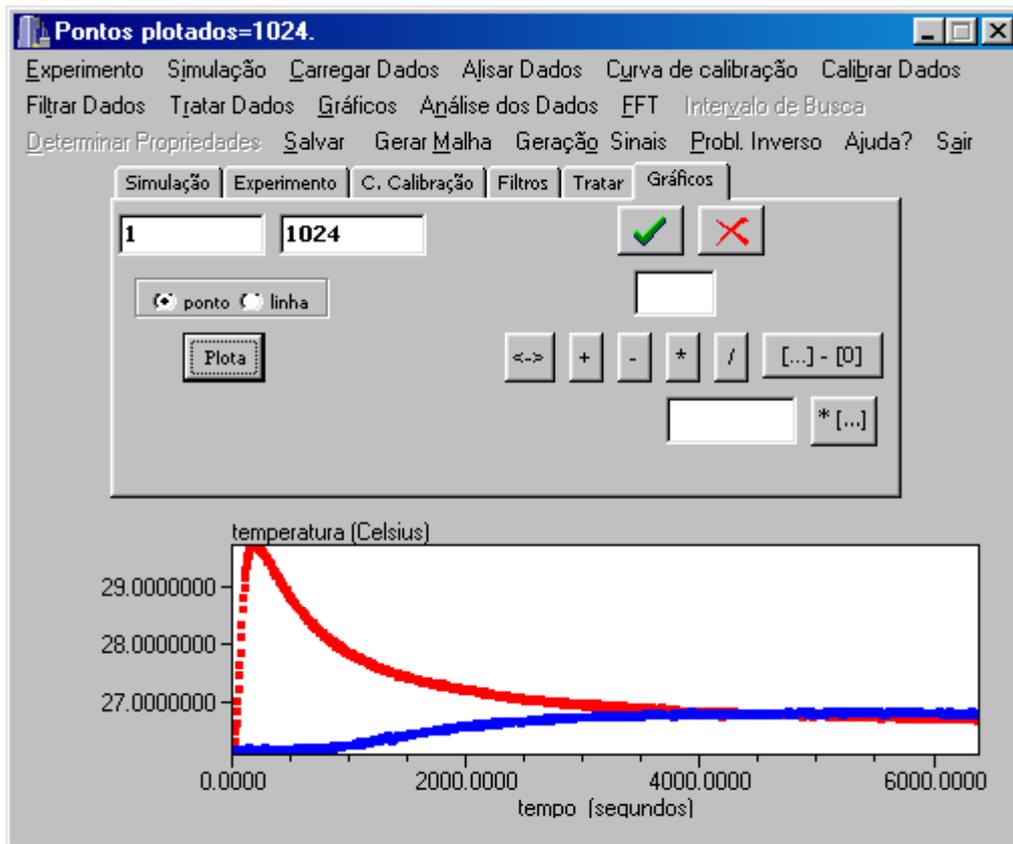


Figura 4 – Evolução experimental da temperatura em $x = 0$ e $x = L$ para o Polythene.

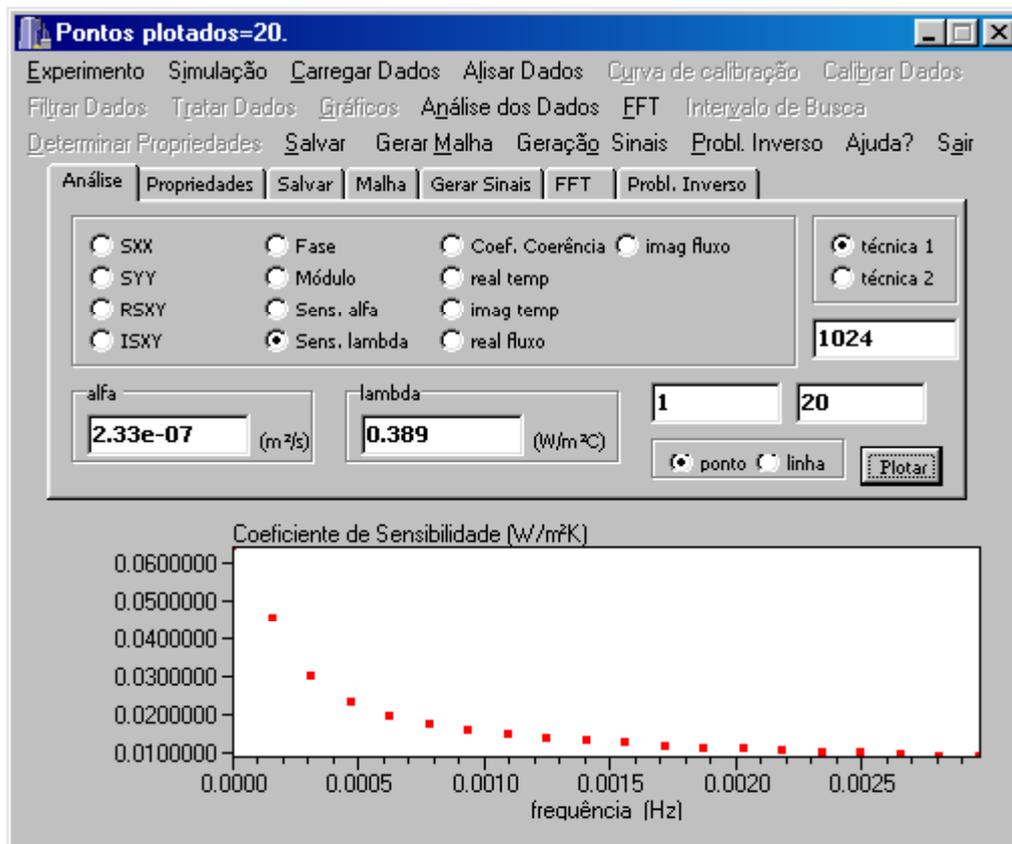


Figura 5 – Coeficiente de Sensibilidade em relação a λ .

5. RESULTADOS GERADOS PELO DPT 1.0

Apresenta-se nesta seção os resultados obtidos das propriedades térmicas α e λ 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/m².

Nas Tabelas (1) e (2) são mostrados respectivamente os valores médios estimados de α e λ 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 α e λ para o Polythene. Nesta tabela, também é apresentado o valor de λ fornecido pela National Physical Laboratory (NPL, 1991).

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

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

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

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

Tabela 3. Resumo da estimação de α e λ 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 α e λ 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 α e λ foram obtidos por Lima e Silva & Guimarães, (2000).

Tabela 4. Resumo da estimação de α e λ 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

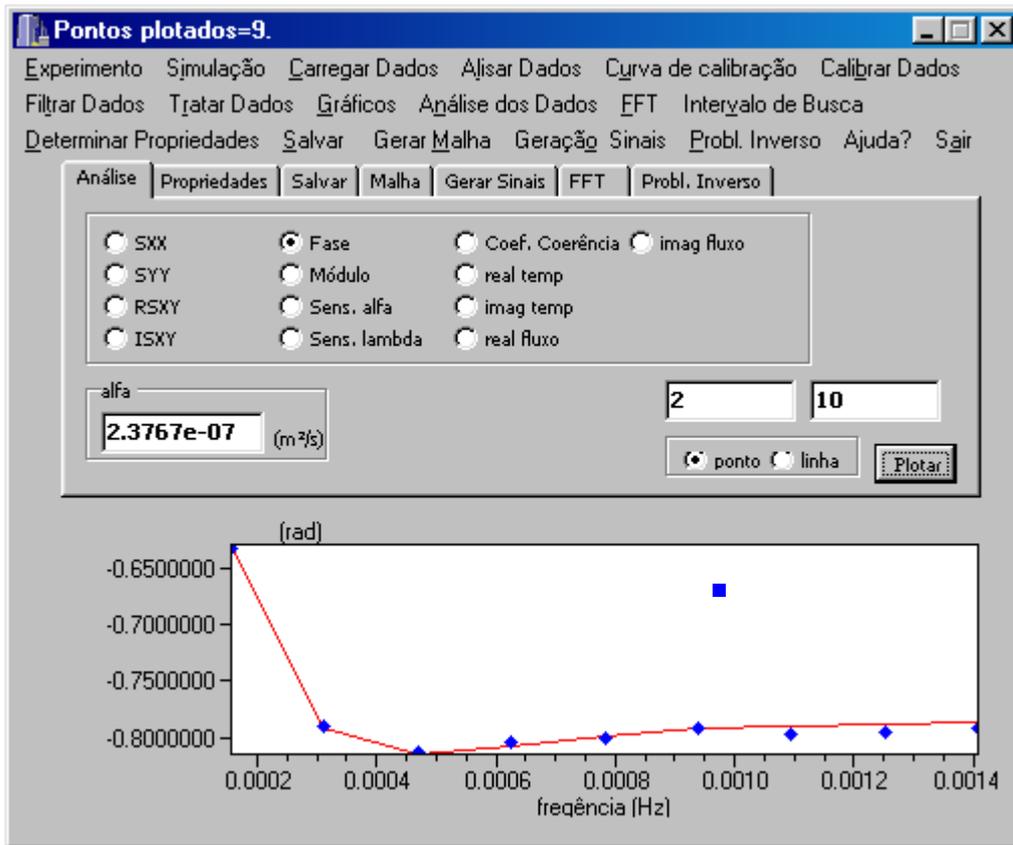


Figura 6 – Comparação entre as fases experimental e teórica da impedância generalizada

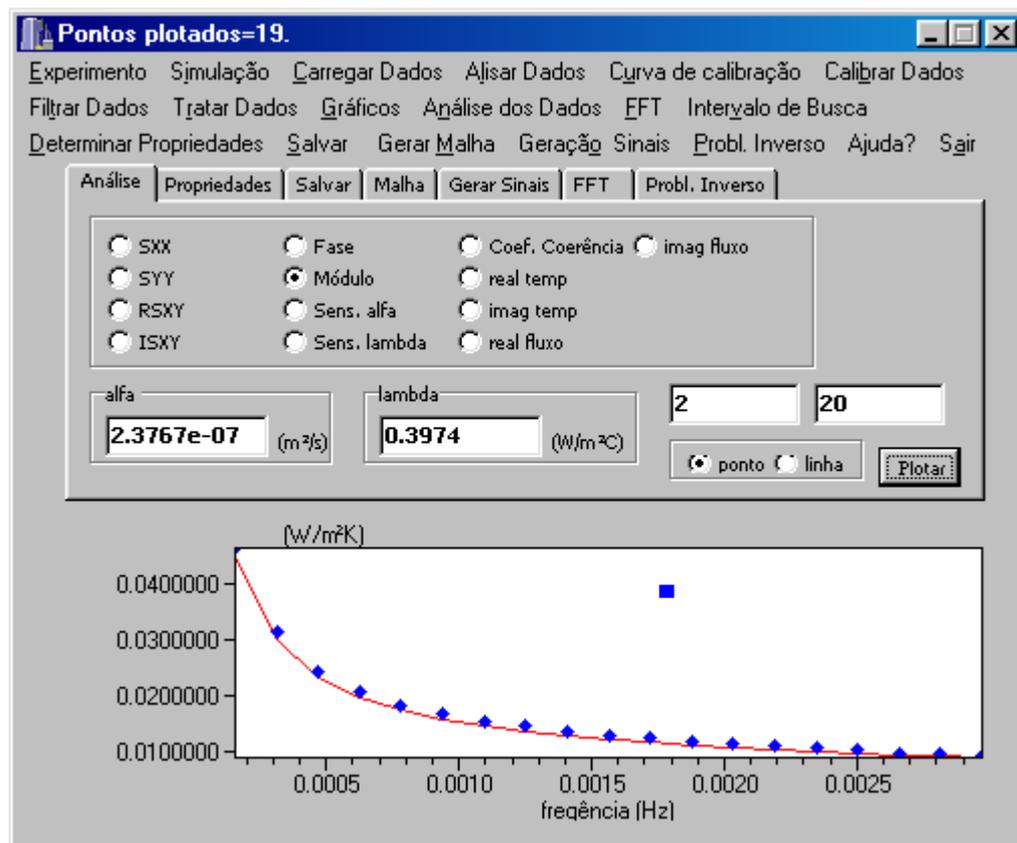


Figura 7 – Comparação entre os módulos experimental e teórico da impedância generalizada

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 α e λ (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^o 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^o 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^o 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, α , and thermal conductivity, λ , 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 α and λ 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 α and λ 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 α and λ is presented for two polymer samples, PVC and Polythene.*

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