

DESENVOLVIMENTO DE UM SOFTWARE AMIGÁVEL PARA A ANÁLISE E SOLUÇÃO DE PROBLEMAS DIRETOS E INVERSOS EM CONDUÇÃO DE CALOR

Ana Paula Fernandes

apfernandes@mecanica.ufu.br

Valério L. Borges

vlborges@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 2121.
38400-902 - Uberlândia - MG - Brasil.

Resumo: Este trabalho propõe o desenvolvimento de um pacote computacional baseado nos softwares: DPT 1.0 e INV3D desenvolvidos no LTCM-UFU. O programa DPT é desenvolvido para a determinação das propriedades térmicas, difusividade térmica, α , e condutividade térmica, k , de materiais sólidos sejam eles condutores ou não enquanto o INV3D dedica-se a solução de problemas inversos aplicados a modelos térmicos tridimensionais. O desenvolvimento de um software amigável que incorpore os dois programas tem como grande objetivo a construção de um poderoso pacote computacional que possua capacidade de abordar, analisar e resolver problemas térmicos em pelo menos três níveis distintos de conhecimento: i) Conhecimento básico: Solução de problemas diretos envolvendo condução de calor com grande interação entre o usuário e programa. Nesse caso, problemas simulados poderão ser facilmente testados variando-se condições de contorno e geometrias. O principal objetivo nesse caso é o de proporcionar ao usuário uma ferramenta de análise térmica para a solidificação de conceitos físicos, sendo o estudante de graduação em engenharia mecânica ou área afim, o público alvo; ii) Conhecimento intermediário: O software deve facilitar a análise de diversos problemas térmicos específicos, como por exemplo, decorrentes de processos de usinagem, soldagem ou com fontes móveis de calor. Neste caso, o usuário deve possuir conhecimentos básicos do problema físico envolvido ou interesses específicos na solução destes tipos de problema; iii) Conhecimento avançado. O software deverá ser uma ferramenta importante para o cálculo de propriedades térmicas de diversos tipos de materiais e da solução de problemas inversos específicos, com a obtenção de fluxo de calor imposto em diferentes tipos de modelos ou sistemas térmicos. Recursos gráficos de entrada e saída de dados devem possibilitar e permitir uma interação entre usuário e o programa. O software deve incorporar ferramentas estatísticas, de cálculo de funções matemáticas e diferentes técnicas de otimização.

Palavras-chave: software, condução de calor, técnicas experimentais, temperatura, método numérico.

1. INTRODUÇÃO

O uso de softwares para resolver problemas de engenharia está se tornando cada vez mais freqüente. Diversos pesquisadores têm 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) é construído em C++ Builder e modela a transferência combinada de calor e umidade em um meio poroso.

Neste trabalho, apresentam-se as funções básicas dos softwares DPT 1.0 e INV3D e estabelece as diretrizes gerais para a construção do software: **Optimum Heat**. Apresentam-se também a concepção do novo pacote computacional e a idealização de sua interface focando-se principalmente na definição de entrada de dados no programa.

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1. O problema térmico: solução do problema direto

Apresenta-se na Fig. (1) o esquema térmico do modelo proposto a ser resolvido neste trabalho. Ou seja, uma amostra homogênea com dimensões a , b e c e temperatura inicial T_0 é sujeita a um fluxo de calor, $\phi_1(t)$, em uma determinada localização de uma superfície.

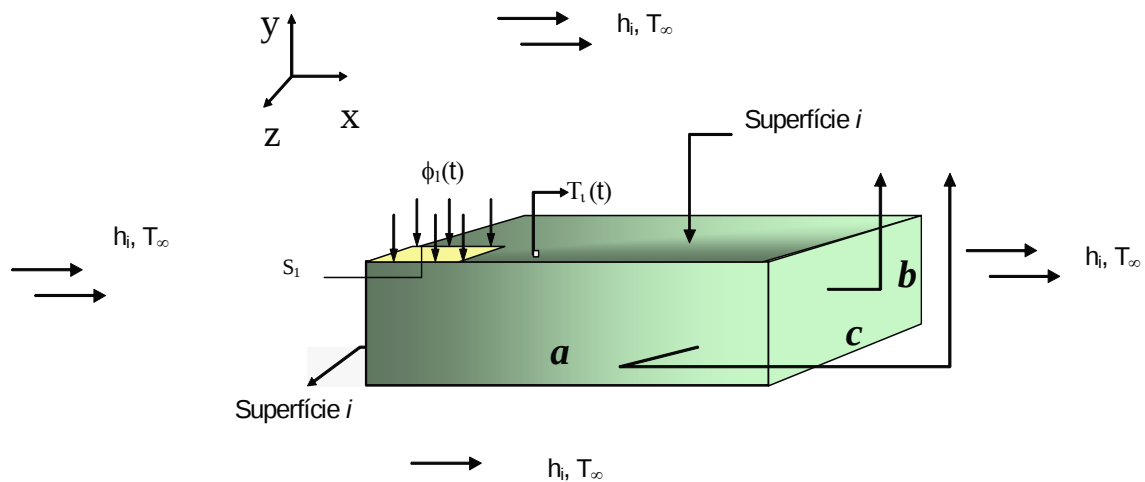


Figura 1 - Esquema de uma amostra submetida a fluxo de calor e exposta a um meio convectivo.

A equação da difusão de calor que estabelece o problema térmico para a Fig. (1) pode então ser escrita como

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_i \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_i \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_i \frac{\partial T}{\partial z} \right) = (\rho C p)_i \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1.1)$$

sujeitos às condições de contorno

$$-\lambda_i \frac{\partial T}{\partial \eta} + h_i (T - T_\infty) = f_i''(t) \quad (1.a)$$

onde nas regiões expostas ao meio tem-se

$$f_i''(t) = 0 \quad (1.b)$$

nas regiões submetidas a fluxo de calor

$$f_i = q_o''(t) \text{ e } h_i = 0 \quad (1.c)$$

Ou seja, todas as superfícies não sujeitas ao fluxo de calor estão expostas a um meio convectivo com coeficiente de transferência de calor h_i . Esse coeficiente é variável e deve incorporar superfícies adiabáticas ($h_i=0$) ou contribuições de trocas de calor por radiação ($h_i = h_r + h_{conv}$). Esse coeficiente pode ainda ser tratado também como a contribuição de um termo de temperatura prescrita. Assim, nas regiões onde a temperatura da superfície é conhecida pode-se escrever,

$$T = h_i T_\infty = f_i''(t) \text{ com } k_i = 0 \quad (1.d)$$

2.2. Solução Numérica Do Problema Direto: Método Das Diferenças Finitas

Para a solução da Equação (1.1) desenvolveu-se uma modelagem numérica baseada no método das diferenças finitas com formulação implícita.

Dentre as várias técnicas numéricas existentes, optou-se pelo uso do método das diferenças finitas com formulação implícita por atender a todas as exigências mencionadas e ainda por possuir baixo custo computacional quando associado a outros métodos de solução de equações diferenciais. Neste caso, a Eq. (1.1), 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. (2):

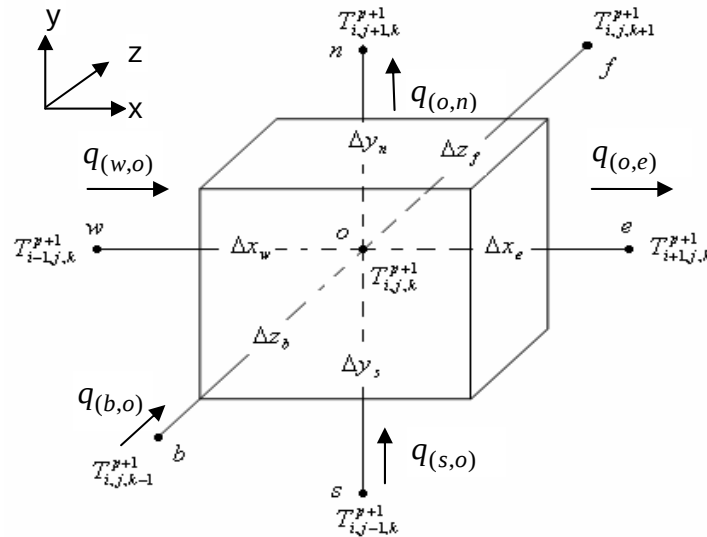


Figura 2 - Volume de controle infinitesimal em coordenadas cartesianas.

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

$$q_{(w,o)} - q_{(o,e)} + q_{(s,o)} - q_{(o,n)} + q_{(b,o)} - q_{(o,f)} = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} V \quad (2)$$

onde q representa a taxa de transferência de calor por condução no elemento infinitesimal (Fig. 2). Nesse caso, reescrevendo a Eq. (2), na forma implícita, obtém-se:

$$a_o T_{i,j,k}^{p+1} + a_w T_{i-1,j,k}^{p+1} + a_e T_{i+1,j,k}^{p+1} + a_s T_{i,j-1,k}^{p+1} + a_n T_{i,j+1,k}^{p+1} + a_b T_{i,j,k-1}^{p+1} + a_f T_{i,j,k+1}^{p+1} = b \quad (5)$$

onde os coeficientes a_o , a_w , a_e , a_s , a_n , a_b , a_f e b são coeficientes que dependem da malha, geometria e propriedades térmicas da amostra.

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. 5). Numerosos métodos estão disponíveis na literatura. Este trabalho propõe o uso do SOR (Método das Sobre-relaxações Sucessivas), Carvalho et al., (2003).

3. O SOFTWARE DPT

O DPT é uma aplicação computacional em uma interface gráfica que permite a determinação de α e k pela técnica descrita em Borges et al, (2006). Com o DPT pode-se visualizar todos os dados experimentais pertinentes ao modelo térmico de forma simples e rápida. O DPT determina ainda o fluxo de calor pelo método de estimação seqüencial de fluxo constante (Beck et al., 1985) e método dos observadores dinâmicos. As temperaturas podem também ser calculadas numericamente para serem comparadas com as temperaturas experimentais.

3.1. Entrada de Dados no DPT 1.0

Para iniciar o DPT 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 *Problema 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*.

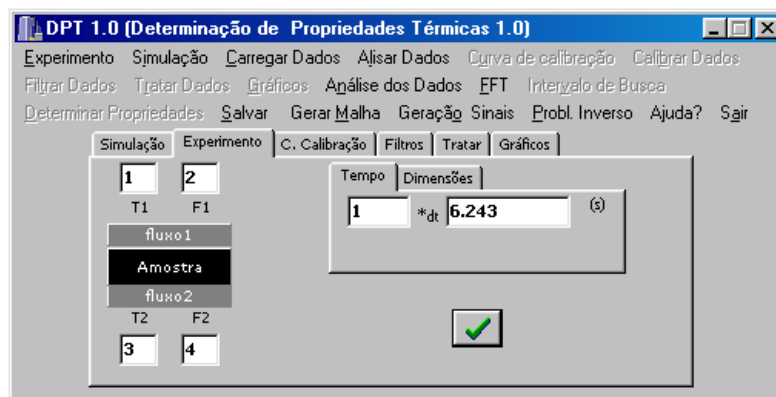


Figura 3 - Janela *Experimento* do software DPT 1.0

Para a minimização das funções objetivo podem ser usados o método sequencial de otimização DFP (Davidon-Fletcher-Powell, Vanderplaats, 1984) e a técnica de estimação de parâmetros (Beck & Arnold, 1977). Salienta-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 k . 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).

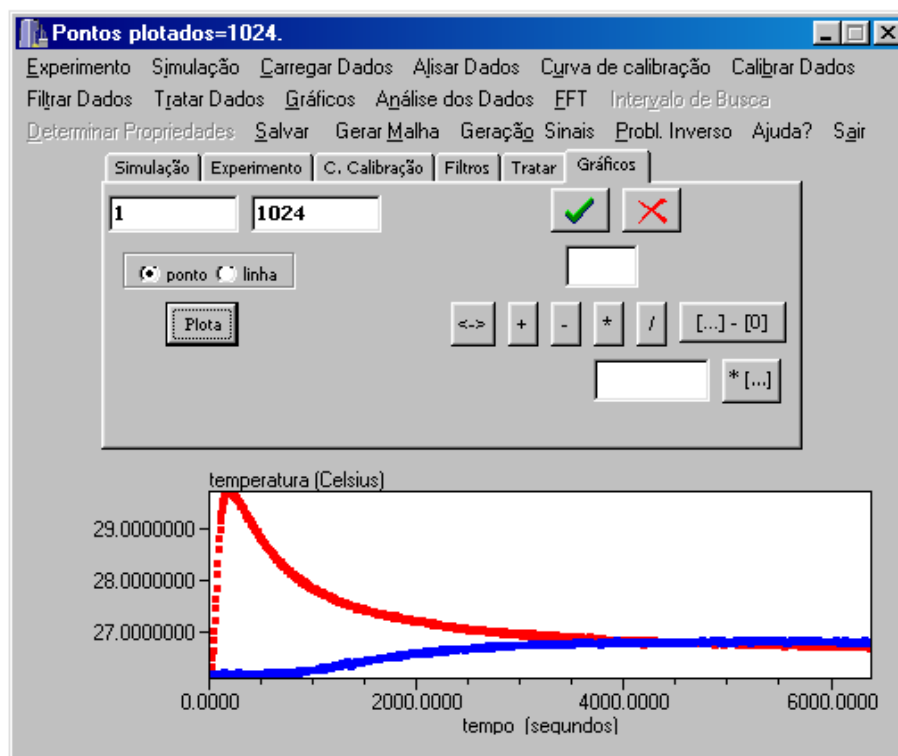


Figura 4 - Evolução experimental da temperatura em $x = 0$ e $x = L$ para o Polythene.

4. O SOFTWARE INV3D

Para executar o software, o usuário deve inicialmente optar entre a solução do problema direto ou problema inverso. Em ambos os casos dois arquivos são necessários. No caso do problema direto o primeiro arquivo deve conter todas as informações da amostra, como por exemplo, as dimensões, propriedades térmicas, localização da área submetida à taxa de transferência de calor, condições de contorno entre outros (Fig. 5).

O segundo arquivo deve conter o sinal experimental ou simulado do fluxo térmico, para que o programa possa determinar a distribuição de temperatura na amostra. No caso do experimento apresentado anteriormente será fornecido o arquivo contendo o fluxo térmico de calor experimental.

Nota-se na Figura (5) que a entrada de dados é feita de maneira simples a partir de um arquivo de texto. Verifica-se que esta deve conter todas as informações sobre o experimento realizado como, por exemplo, as dimensões da ferramenta ($0.0127 \times 0.0127 \times 0.0047$ m), suas propriedades térmicas: condutividade térmica e difusividade térmica (λ ou $k = 43.1$ W/mK e $\alpha = 14.8 \times 10^{-6}$ m²/s) e as distâncias mínimas exigidas entre os nós nas direções x , y e z (0.0005 , 0.0005 e 0.0002 m), para a geração da malha numérica tridimensional. No momento que o usuário carrega o arquivo contendo a entrada de dados da amostra, o software inicia o processo de construção da malha numérica tridimensional (Fig.6).

Entrada de Dados | Malha Numérica | Resultados | Ajuste de curva | Análise Estatística dos Dados | Tratamento de Sinais

Coordenadas Retangulares 3D

Problema Direto | Problema Inverso

Solução do Problema Direto em Coordenadas Retangulares 3D

Dimensão Total da amostra(x,y,z): 0.0127 x 0.0127 x 0.0047 (m)

Propriedades térmicas: $k = 43.1$ (W/mK) $\alpha = 14.8 \times 10^{-6}$ (m²/s)

Número de malhas: 1

Menor distância entre os nós (dx,dy,dz): 0.0005 (m) x 0.0005 (m) x 0.0002 (m)

Coordenadas:
 $x_0 = 0.0$ $x = 0.0127$ / $y_0 = 0.0$ $y = 0.0127$ / $z_0 = 0.0$ $z = 0.0047$

Intervalo de aquisição de dados = 1.332 (s)

Temperatura inicial da amostra = 29.2 (°C)

Coefficiente de transferência de calor por convecção: $T_{\infty} = 29.2$ (°C) $h = 20.0$ (W/m²°C)

Número de termopares = 2

Coordenadas do 1º termopar: $x = 0.0043$ (m) $y = 0.0035$ (m) $z = 0.0047$ (m)

Coordenadas do 2º termopar: $x = 0.0035$ (m) $y = 0.0089$ (m) $z = 0.0047$ (m)

Área ocupada pelo fluxo de calor:
 $x_0 = 0.0$ $x = 0.0104$ / $y_0 = 0.0$ $y = 0.0104$ / $z_0 = 0.0$ $z = 0.0$

Plotar Malha? Sim

Carregar Nova Entrada de dados
 Salvar Como...
 Imprimir...
 Executar o Problema
 Executar o Problema via Arquivo Backup

Figura 5 - Janela de entrada de dados do software Inv3D.

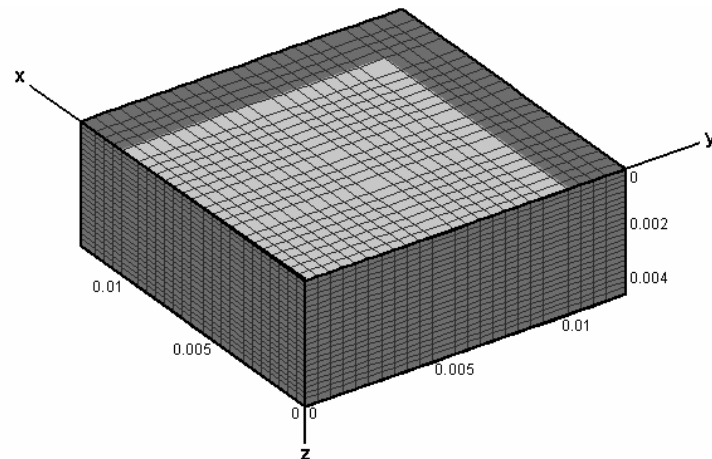


Figura 6 - Malha numérica tridimensional.

Do ponto de vista científico o Inv3D possui uma característica importante que é a facilidade de adaptação do software ao experimento, esta particularidade permite o reajuste do software caso haja alterações no experimento. Uma saída típica pode ser apresentada na Fig. (7)

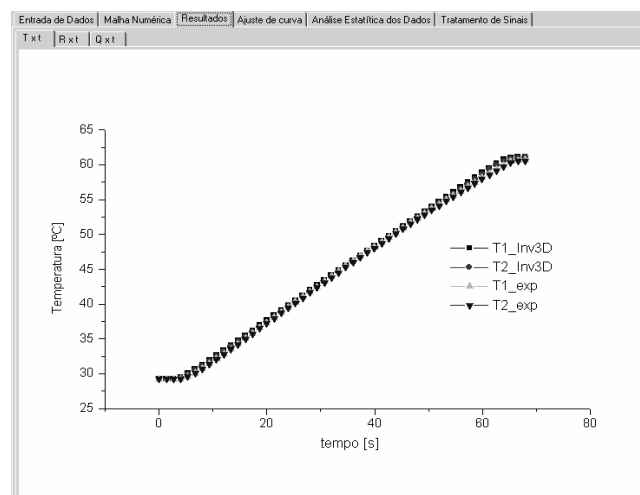


Figura 7 - Comparação entre a temperatura experimental e a calculada pelo Inv3D a partir da solução do problema direto.

5. DESENVOLVIMENTO DA INTERFCE GRÁFICA

Como já mencionado, o desenvolvimento de um software amigável que incorpore os dois programas tem como grande objetivo a construção de um poderoso pacote computacional que possua capacidade de abordar, analisar e resolver problemas térmicos em pelo menos três níveis distintos de conhecimento: i) Conhecimento básico: Solução de problemas diretos envolvendo condução de calor com grande interação entre o usuário e programa.

Uma das dificuldades existentes nos dois softwares (DPT e INV3D) está na entrada de dados dos programas que poderia ser mais amigável ao usuário. Principalmente considerando-se o primeiro objetivo deste trabalho. Outra limitação pode ser dada pela geração da malha e o estabelecimento das condições de contorno. Esses passos são na realidade variáveis de decisão que devem ser tomadas antes da obtenção da solução do problema propriamente dito.

Apresenta-se a seguir uma concepção inicial da interface a ser construída visando principalmente uma maior interação entre o usuário e o programa. Além disso, visa-se também que a interface possa ser uma ferramenta de aprendizado para usuários com pouca experiência, mas com conhecimentos básicos de condução de calor.

5.1. Desenvolvimento

A primeira versão, atualmente em desenvolvimento, utiliza a tecnologia DirectX® 10 e linguagem de programação Visual Basic .NET®, além das bibliotecas gráficas OpenGL.

A linguagem VB .NET é uma linguagem de última geração, possuindo propriedades de manipulação de imagens, através de DirectX / OpenGL, permitindo a construção de um software *Optimum Heat*. moderno, robusto, priorizando uma interface amigável.

5.2. Descrição Geral

Inicialmente, definiu-se que o *Optimum Heat* terá um menu de comandos de onde serão acessadas todas as funcionalidades; uma barra de ferramentas, contendo atalhos para as principais funcionalidades; uma região de trabalho, que apresenta a imagem atualmente sendo trabalhada; e uma barra de status, que apresenta as mensagens do sistema. A Figura 7 apresenta a tela de trabalho do *Optimum Heat*.

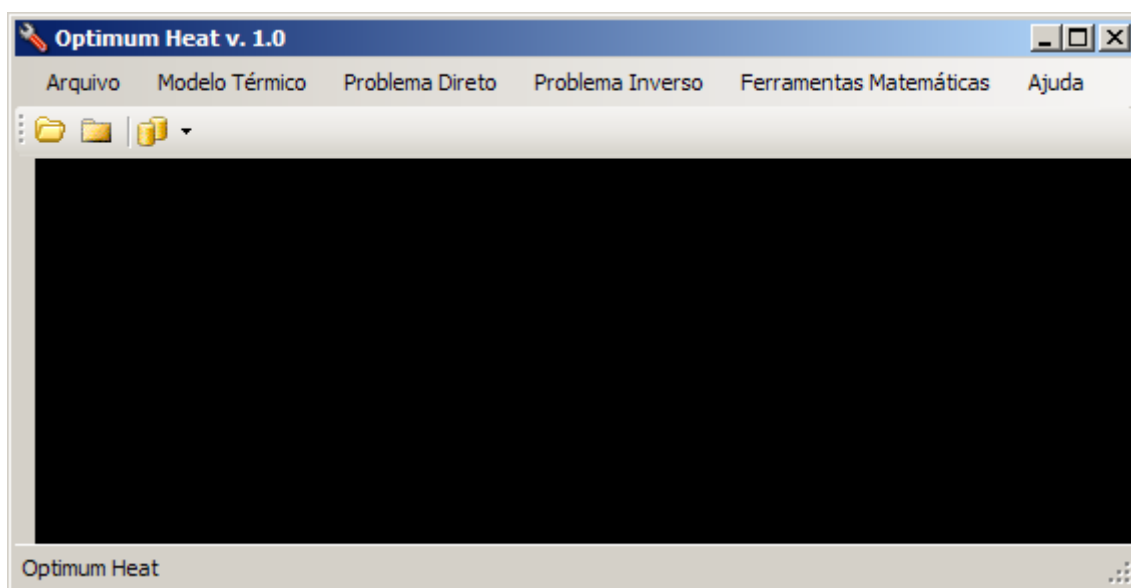
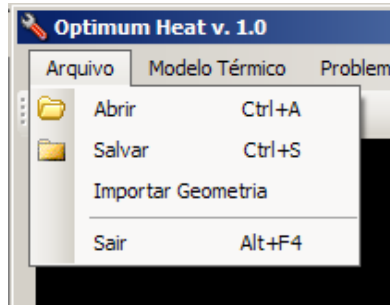
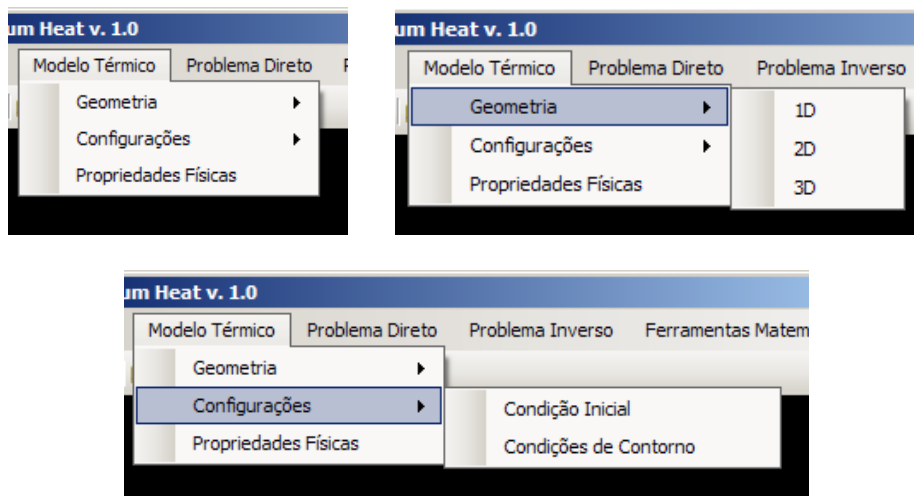


Figura 8 - Janela principal do software *Optimum Heat* em construção

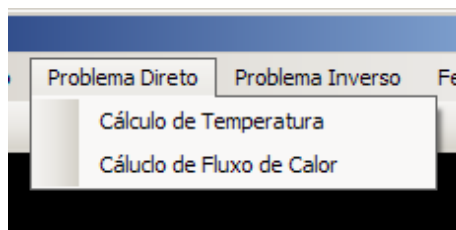
5.3. Funcionalidades



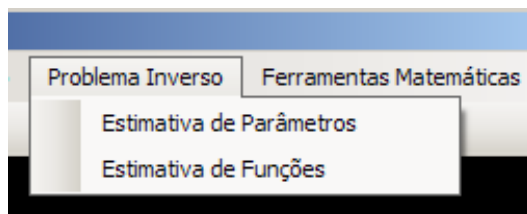
No menu “Arquivo”, são acessadas as funcionalidades “Abrir” - que permite abrir uma geometria gerada anteriormente pelo próprio **Optimum Heat**; “Salvar” - que permite salvar o trabalho; “Importar Geometria”, que permite importar arquivos gerados por softwares de CAD e “Sair” que encerra a execução do **Optimum Heat**.



No menu “Modelo Térmico”, são acessadas as “Geometria” / “1D”, “2D” e “3D”, que permitem a criação de outras geometrias a partir de geometrias básicas nessas dimensões. Ao selecionar a dimensão, será apresentada uma janela para que seja selecionada a geometria básica desejada e seus parâmetros de construção (lados, raio, altura, etc.). Nas geometrias tridimensionais, haverá a possibilidade de rotação dos eixos; “Configurações” / “Condição Inicial” e “Condições de Contorno”, que permitem acessar as definições de inicialização do modelo; “Propriedades Físicas”, que permite informar as propriedades físicas do modelo.



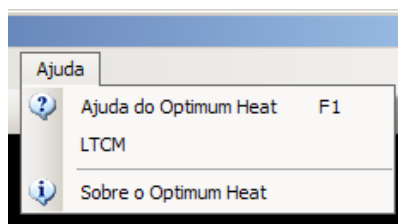
No menu “Problema Direto”, são acessados os cálculos de Temperatura e Fluxo de Calor.



No menu “Problema Inverso”, são acessadas as estimativas de Parâmetros e de Funções.

Os menus “Problema Direto” e “Problema Inverso” somente serão habilitados quando o modelo térmico estiver definido.

No menu “Ferramentas Matemáticas” serão implementadas funcionalidades matemáticas e estatísticas que proverão suporte para o usuário do *Optimum Heat*.



No menu “Ajuda”, será acessado o sistema de ajuda do *Optimum Heat*; também será possível acessar, a página do LTCM.

6. CONCLUSÕES

Este artigo apresenta o desenvolvimento de uma ferramenta amigável, que pode ser usada para o estudo de problemas térmicos, para solução de problemas inversos em transferência de calor e para a caracterização térmica de novos materiais sólidos. O software incorpora várias técnicas de otimização e deve ser uma ferramenta de muita utilidade no pré e pós processamento de dados e na solução de problemas térmicos aplicados.

7. REFERÊNCIAS

- 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. & St. Clair, C. R., 1985, “Inverse Heat Conduction, Ill-posed Problems”, Wiley Interscience Publication, New York.
- Borges, V. L., 2003, Um Sistema Dinâmico para a Identificação de Propriedades Termofísicas de Materiais Sólidos, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia
- Carvalho, S. R., 2005, “Determinação do Campo de Temperatura em Ferramentas de Corte Durante um Processo de Usinagem, Doctorate Thesis, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, Brasil, 150p (in Portuguese).
- 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 Convencion Center, Porto Alegre, Brasil.
- 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., 1995, "Design optimization tools, Vanderplaats Research & Development", Inc., Colorado Springs.

8. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq e à Fapemig pelo suporte financeiro.

8. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

DEVELOPMENT OF A FRIENDLY SOFTWARE FOR ANALYSIS AND SOLUTION OF GENERAL DIRECT AND INVERSE HEAT CONDUCTION PROBLEMS

Ana Paula Fernandes

apfernandes@mecanica.ufu.br

Valério L. Borges

vlborges@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, 2121.

38400-902 - Uberlândia - MG - Brazil.

Abstract: This work proposes the building of a computational package based on the DPT 1.0 and INV3D software developed in LTCM-UFU. The program DPT is developed for the thermal diffusivity and thermal conductivity estimation while INV3D is applied to three-dimensional inverse heat conduction problem. The main objective of the software is to allow the user to analyze and to solve thermal problems in at least three different levels of knowledge: i) Basic Knowledge: Solution of direct problems involving heat conduction with various physical and geometry conditions; ii) Intermediate knowledge: The software should facilitate the analysis of several specific thermal problems, as cutting and welding process, and moving sources; iii) advanced knowledge. The software should be an important tool for the thermal properties estimation of several types of materials and for the solution of specific inverse heat conduction problems. The graphic tools should represent an important role in the interaction between user and the program and the software should contain statistical and mathematical tools and different optimization techniques.

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