

PROGRAMA EDUCACIONAL PARA ESTUDO DA TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONDUÇÃO E CONVECÇÃO

Míriam Rocchi Tavares

Marcelo Oliveira de Souza

Guilherme Menin Gaertner

Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, Departamento de Engenharia Mecânica

Av. Prof. Mello Moraes, 2231, 05447-030, São Paulo, SP, Brasil. E-mail: mtavares@usp.br

Resumo

Este trabalho apresenta a primeira versão de um *software* educacional para o estudo da transferência de calor em problemas que envolvam os mecanismos de condução e convecção. O desenvolvimento do programa Transcal 1.0 envolveu alunos de quinto ano do curso de engenharia mecânica como atividade de iniciação científica. O objetivo maior deste programa é servir como uma ferramenta didática adicional em cursos de transferência de calor, seja em aulas teóricas como experimentais. Problemas de condução bidimensional são tratados numericamente enquanto que os referentes a casos unidimensionais são resolvidos analiticamente. O módulo referente à convecção utiliza correlações empíricas. As saídas gráficas possibilitam fácil compreensão dos processos de troca de calor.

Palavras-chave: Educação em engenharia, Programa educacional, Condução, Convecção.

1. INTRODUÇÃO

A utilização do computador na educação moderna como parte integrante do processo de aprendizado tem aumentado consideravelmente nos últimos anos. Neste contexto, e como consequência do que já ocorre no campo da pesquisa, vem-se estimulando em salas de aula o uso do computador e de *softwares* variados para solução de problemas básicos nas mais diversas disciplinas.

Com relação às ciências térmicas é grande o número de programas existentes no mercado. Entretanto a maioria absoluta destes *softwares* tem por enfoque exclusivamente aplicações técnicas e científicas nas áreas de pesquisa e desenvolvimento e, portanto, dada a sua complexidade exigem do usuário treinamento específico relativamente demorado e conceitos técnicos avançados. Uma exceção a esta regra é o trabalho de Maliska (1999) que desenvolveu um bom *software* didático para cálculo numérico da condução pela técnica dos volumes finitos, mas que não trata casos de convecção.

A proposta que apresentamos neste artigo refere-se a um programa educacional cujo objetivo é servir como uma ferramenta adicional ao ensino da transferência de calor por condução e convecção, para os cursos de graduação nas diversas modalidades de engenharia. A idéia de elaborar tal programa nasceu juntamente com a necessidade de adaptar as ementas dos cursos teóricos e de laboratório de Transferência de Calor, na Universidade de São Paulo, às recomendações para reforma da estrutura curricular (Hernandez et al. 1998) do curso de

Engenharia Mecânica. Tal reforma aconselha a utilização de recursos técnicos modernos nos currículos dos cursos de graduação e enfatiza a necessidade de uma total integração entre os cursos de teoria e práticos. Neste último contexto, o programa computacional desenvolvido tem-se mostrado extremamente útil nas aulas de laboratório permitindo, através do computador, a repetição simulada dos experimentos com materiais e condições de contorno diferentes, o que leva o aluno a adquirir em pouco tempo vivência prática do fenômeno estudado.

O desenvolvimento do programa Transcal, que começou em 1997, envolveu também dois alunos do quinto ano do curso de Engenharia Mecânica que trabalharam durante o período de um ano e que para isto receberam treinamento específico. O programa nesta primeira versão 1.0 permite o estudo da condução unidimensional, transiente ou estacionária, para casos padrões tratados nos cursos de graduação (Incropera, 1996) através da solução analítica do problema escolhido, incorporando arquivos de dados termodinâmicos como função da temperatura, para os sólidos condutores e isolantes mais comuns, bem como para líquidos e gases. A condução bidimensional é estudada através do método das diferenças finitas e o módulo de cálculo permite a utilização das mais variadas condições de contorno sobre o problema estudado, oferecendo como opção adicional a possibilidade de tratar a condutibilidade térmica do material como variável com a temperatura no domínio de cálculo. O usuário pode também selecionar, sobre interface gráfica, diferentes materiais e suas localizações (por movimentação do mouse) no domínio de cálculo. As saídas gráficas permitem fácil visualização da distribuição de temperaturas.

O módulo que analisa a convecção permite o estudo de casos de convecção forçada interna e externa e da convecção mista através da determinação dos números de Nusselt ou Grashof por relações empíricas tiradas da literatura especializada. Neste caso o programa faz uso de várias relações apropriadas para uma mesma situação e mostra os diferentes resultados. Este procedimento leva a uma outra contribuição importante deste tipo de *software* que tem sido a de facilitar a compreensão, pelos estudantes, de que todos os modelos implicam num certo número de simplificações que nem sempre reproduzem perfeitamente a realidade mas que, apesar disto, levam a resultados coerentes.

2. CARACTERÍSTICAS DO PROGRAMA

O programa foi desenvolvido através do EXCEL para o Microsoft Windows. Como configuração mínima para o computador recomenda-se processador típico de um PC 486 de 100MHz e 8 Mb de memória RAM. A escolha do EXCEL, para esta primeira versão Transcal 1.0, em detrimento do C++ ou o Delphi 4.0, baseou-se na decisão de tornar o programa interativo com o usuário permitindo-lhe alterar facilmente os bancos de dados do *software*, pela inclusão de novos materiais ou propriedades termodinâmicas ou mesmo de modificar correlações, no caso dos problemas de convecção. Sendo o Excel um programa de uso generalizado e bem conhecido entre estudantes, esta possibilidade de interação programa/usuário pareceu-nos, nesta etapa inicial, compensar largamente as desvantagens da escolha, que se referem à necessidade de compilação e à maior lentidão na obtenção dos resultados.

2.1. Modelos Matemáticos

Os módulos de condução resolvem a equação da conservação de energia num meio contínuo. Levando em conta a lei de Fourier para a condução através de um sólido, de

material com calor específico c_p , condutibilidade térmica k e massa específica ρ , a conservação de energia se escreve:

$$\nabla \cdot (k \nabla T) + \dot{q} = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

onde T representa a distribuição de temperaturas, t o tempo e \dot{q} a geração interna de energia.

Condução unidimensional - O programa trata os casos de problemas estacionários ou transitórios de condução unidimensional, com ou sem geração interna para sólidos de geometria convencional, como esferas, paredes planas e cilindros, através da solução analítica, conforme detalhado nos livros textos mais comuns de Transferência de Calor (Incropera, 1996) e supondo constante. Como condições de contorno pode-se escolher entre temperatura de superfície constante ou coeficiente de transferência por convecção constante. Os resultados mostram graficamente a distribuição de temperaturas ou sua evolução temporal e apresentam o valor do fluxo de calor através da superfície escolhida. Na unidade referente ao regime transiente unidimensional utilizam-se os casos de análise concentrada e as soluções analíticas que geraram as cartas de Heisler, soluções estas descritas em Schneider (1955).

Condução bidimensional - Para os casos bidimensionais estacionários o programa, nesta primeira versão Transcal 1.0, inclui apenas superfícies retangulares, mas apresenta a possibilidade de tratar a condutibilidade térmica do sólido como não-uniforme, variando com a temperatura em cada ponto do domínio. Os valores da condutibilidade do material são interpolados pelo programa a partir de banco de dados para valores discretos, preestabelecidos, da temperatura. Este recurso foi também utilizado para tratar problemas com dois ou mais materiais distintos. A técnica das diferenças finitas é utilizada para a solução do problema.

Neste caso, discretizando-se o domínio de cálculo em elementos retangulares de dimensão Δx por Δy , o balanço de energia no volume de controle em torno de um nó interno (m,n) , conforme esquematizado na Figura 1, leva a:

$$\sum_{i=1}^4 q_{(i) \rightarrow (m,n)} + \dot{q} (\Delta x \cdot \Delta y) = 0 \quad (2)$$

onde $q_{(i) \rightarrow (m,n)}$ representa o fluxo de calor por condução do nó vizinho (i) para o nó (m,n) e \dot{q} a energia gerada por unidade de volume.

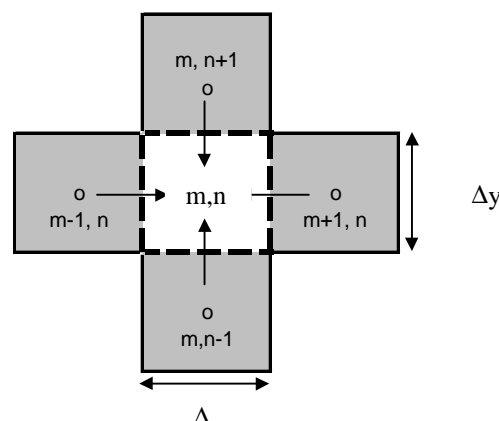


Figura 1. Volume de controle retangular em torno do nó (m,n) e nós vizinhos

Em caso da condutibilidade térmica ser considerada variável com a temperatura, a equação para o fluxo de calor entre o nó $(m-1,n)$ e o nó (m,n) pode ser obtida pela lei de Fourier e resulta:

$$q_{(m-1,n) \rightarrow (m,n)} = \frac{2 k_{m-1,n} k_{m,n}}{k_{m-1,n} + k_{m,n}} \Delta y \frac{T_{m-1,n} - T_{m,n}}{\Delta x} \quad (3)$$

onde $k_{i,j}$ representa o valor da condutibilidade no nó (i,j) . Equações semelhantes resultam para os fluxos provenientes dos outros nós vizinhos de forma que a equação 2, para o volume de controle em torno do nó (m,n) se transforma em:

$$\begin{aligned} & \Delta y^2 \left(\frac{2 k_{m+1,n} k_{m,n}}{k_{m+1,n} + k_{m,n}} \right) T_{m+1,n} + \Delta y^2 \left(\frac{2 k_{m-1,n} k_{m,n}}{k_{m-1,n} + k_{m,n}} \right) T_{m-1,n} + \\ & + \Delta x^2 \left(\frac{2 k_{m,n+1} k_{m,n}}{k_{m,n+1} + k_{m,n}} \right) T_{m,n+1} + \Delta x^2 \left(\frac{2 k_{m,n-1} k_{m,n}}{k_{m,n-1} + k_{m,n}} \right) T_{m,n-1} + \\ & - 2 \Delta x^2 \left(\frac{k_{m,n+1} k_{m,n}}{k_{m,n+1} + k_{m,n}} + \frac{k_{m,n-1} k_{m,n}}{k_{m,n-1} + k_{m,n}} \right) T_{m,n} + \\ & - 2 \Delta y^2 \left(\frac{k_{m+1,n} k_{m,n}}{k_{m+1,n} + k_{m,n}} + \frac{k_{m-1,n} k_{m,n}}{k_{m-1,n} + k_{m,n}} \right) T_{m,n} = -\dot{q} \Delta x^2 \Delta y^2 \end{aligned} \quad (4)$$

Para considerar a variação da condutibilidade térmica com a temperatura o programa gera inicialmente uma primeira solução impondo k constante para todo o domínio. Posteriormente permite que o usuário escolha se deseja, ou não, refinar as soluções, de tal modo que cada solução anterior sirva como uma melhor aproximação para se determinar a condutibilidade em cada ponto do domínio até a convergência.

O programa também utiliza a equação 4 para um domínio que contenha mais de um material desprezando-se neste caso a resistência de contato.

Por análise semelhante à que levou a equação 4, escreve-se uma equação para cada nó do domínio resultando um sistema de equações lineares cujas incógnitas são as temperaturas nos nós da malha. A solução deste sistema permite determinar a distribuição de temperaturas no domínio. Na resolução do sistema linear o programa utiliza técnica de inversão de matrizes, programada em C++, contida em módulo executável anexado ao Transcal 1.0.

Com relação às condições de contorno o programa é bem geral, permitindo tratar casos de convecção com coeficiente de transferência de calor constante, h , e/ou casos de paredes com temperatura uniforme, ou variável segundo uma função qualquer, a ser definida pelo usuário.

Convecção – O estudo da convecção baseia-se na conhecida lei de Newton para o cálculo do fluxo de calor entre um sólido e o fluido adjacente. Sendo T_p a temperatura a superfície do sólido de área A e T_∞ a temperatura do fluido ao longe, tem-se:

$$q = h A (T_p - T_\infty) \quad (5)$$

Na solução deste problema o programa utiliza correlações empíricas para o número de Nusselt (ou Grashof) em função do número de Reynolds (ou Rayleigh), para casos

encontrados nos livros textos de Transferência de Calor para a graduação (Incropera, 1996). Estes casos referem-se à convecção forçada interna ou externa e à convecção natural, para corpos de forma convencional.

2.2. Estrutura

A estrutura do programa está baseada em dois módulos desenvolvidos através do Excel 7 para Windows 95. O primeiro, UNIDIMENSIONAL, refere-se ao estudo dos casos com solução analítica/empírica e o segundo BIDIMENSIONAL, aos casos da condução bidimensional que foram tratados numericamente.

2.2.1. Módulo UNIDIMENSIONAL

O módulo UNIDIMENSIONAL está dividido em:

Planilha “TRANSCAL” – que contém dois grandes blocos, Condução e Convecção, com as Telas das Ferramentas compostas de Entrada de Dados, Resultados, Gráficos, as Telas de Fórmulas e as Telas de Perfil de Temperaturas. Nestas telas encontram-se definidas as variáveis de entrada e saída, as fórmulas utilizadas nos cálculos para obtenção dos resultados. Como as planilhas são abertas, o usuário pode acrescentar casos não tratados pelo programa, que se baseia apenas nos descritos pelos livros textos para a graduação.

Como ferramenta auxiliar na entrada de dados, pode-se escolher o material do problema a estudar através de uma Caixa de Seleção de Material a ser aberta na tela de entrada.

No caso dos problemas de Convecção o *software* põe a disposição do usuário a ferramenta Caixa de Seleção da Correlação a ser utilizada, da qual constam os nomes das correlações empíricas e seu intervalo de aplicação em termos dos adimensionais característicos. O programa não habilita correlações inadequadas e calcula os resultados para todas fórmulas válidas além da selecionada mostrando-os ao usuário para comparação.

Planilha “TABELAS” - que contém as tabelas com propriedades de substâncias sólidas e fluidos em função da temperatura além dos coeficientes utilizados nas equações. O banco de dados contém informações para mais de 100 materiais sólidos e para 12 fluidos. O usuário pode também complementar este banco com novas substâncias.

Módulo “MACROS” que contém as Macros de Propriedades, de Cálculos e de Movimentação dentro das ferramentas disponíveis. Neste módulo estão definidos os procedimentos para interpolação nas tabelas de propriedades, os cálculos a serem realizados, e transparentes ao usuário, que no entanto pode alterá-los se desejar.

Módulo “FUNÇÕES” que contém algumas fórmulas úteis para o usuário como cálculo de áreas, volumes, velocidades, vazões, etc.

O módulo UNIDIMENSIONAL apresenta ainda um menu para que o usuário possa escolher e alternar entre os dois blocos, Condução e Convecção, da planilha TRANSCAL, escolhendo dentro de cada bloco o caso que deseja estudar, se regime permanente ou transitório, cilindro, esfera, etc.

2.2.2. Módulo BIDIMENSIONAL

O módulo BIDIMENSIONAL trata, nesta primeira versão, o caso da condução bidimensional em regime permanente e, conforme exposto, apenas para domínio retangular.

Leva-se em conta a variação da condutibilidade térmica com a temperatura em cada ponto do domínio. Este módulo está subdividido em:

Entrada de Dados – onde o usuário escolhe as dimensões do domínio e o número de elementos que deseja. Nesta tela deve-se também completar as informações sobre o caso a ser

estudado pela escolha de um ou dois materiais e pela quantificação do termo de geração interna. O programa utilizará as planilhas TABELAS e MACROS do módulo para cálculo das propriedades e interpolação dos vapores da condutibilidade.

Condições de Contorno – que oferece ao usuário barras de opções para cada uma das faces do domínio. Nestas caixas pode-se tanto definir condições de contorno de convecção com coeficiente de transferência constante (eventualmente calculado pelo próprio programa no módulo UNIDIMENSIONAL), como também definir funções matemáticas quaisquer para ao perfil de temperaturas numa face. Funções pré existentes no EXCEL podem também ser utilizadas. Desta maneira cada face do domínio pode estar sujeita a condição de contorno diferente.

Materiais – Caso o usuário opte por domínio contendo dois materiais diferentes este módulo permite que ele defina, sobre o domínio através de movimentação do cursor ou do mouse na tela, a localização de cada material.

Resultados – Este módulo apresenta os resultados para a distribuição de temperaturas no domínio em telas coloridas bi ou tridimensionais com possibilidade de visualização por perspectivas diferentes obtidas por movimentação do mouse (um dos recursos gráficos do EXCEL). Pode-se também optar por acessar a matriz da distribuição de temperaturas resultante na pasta de trabalho MATRIZES.

3. EXEMPLOS

A seguir apresentamos dois exemplos ilustrativos do emprego de TRANSCAL 1.0.

A figura 2 mostra a tela de opções para um problema de condução unidimensional em regime transitório.

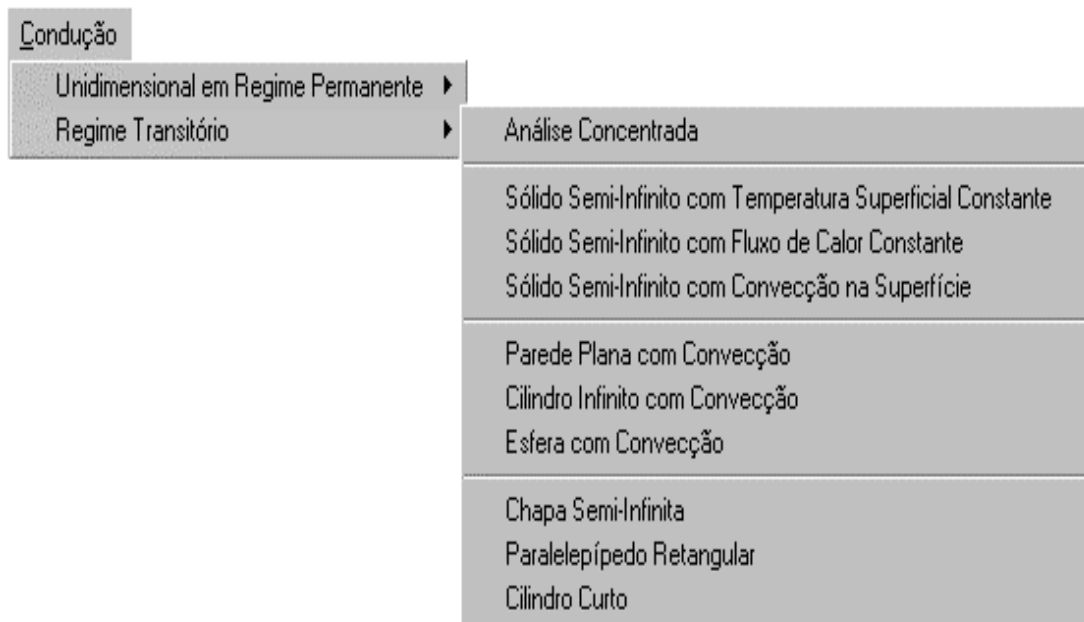


Figura 2. Tela de opções para problemas de Condução Transitória

O estudo do caso da transferência de calor transitória em uma esfera de ferro subitamente imersa em fluido, com superfície sujeita a coeficiente de convecção constante, leva ao resultado da figura 3.

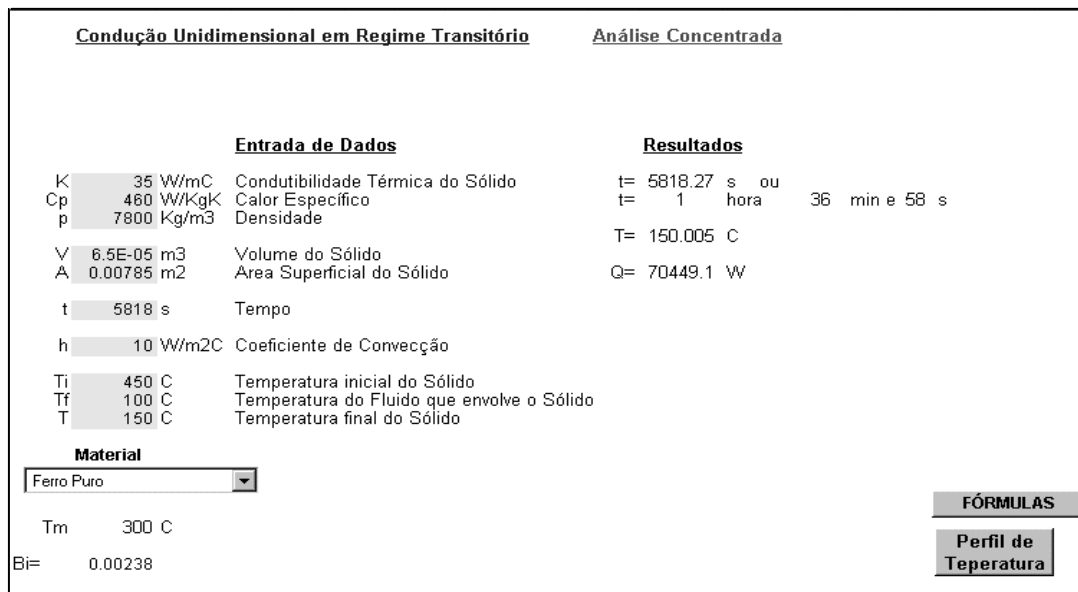


Figura 3. Resultado para problema típico de condução transitória.

A figura 4 mostra o resultado para a distribuição de temperaturas num domínio retangular onde três faces apresentam como condição de contorno temperatura uniforme e na quarta face a temperatura tem distribuição senoidal.

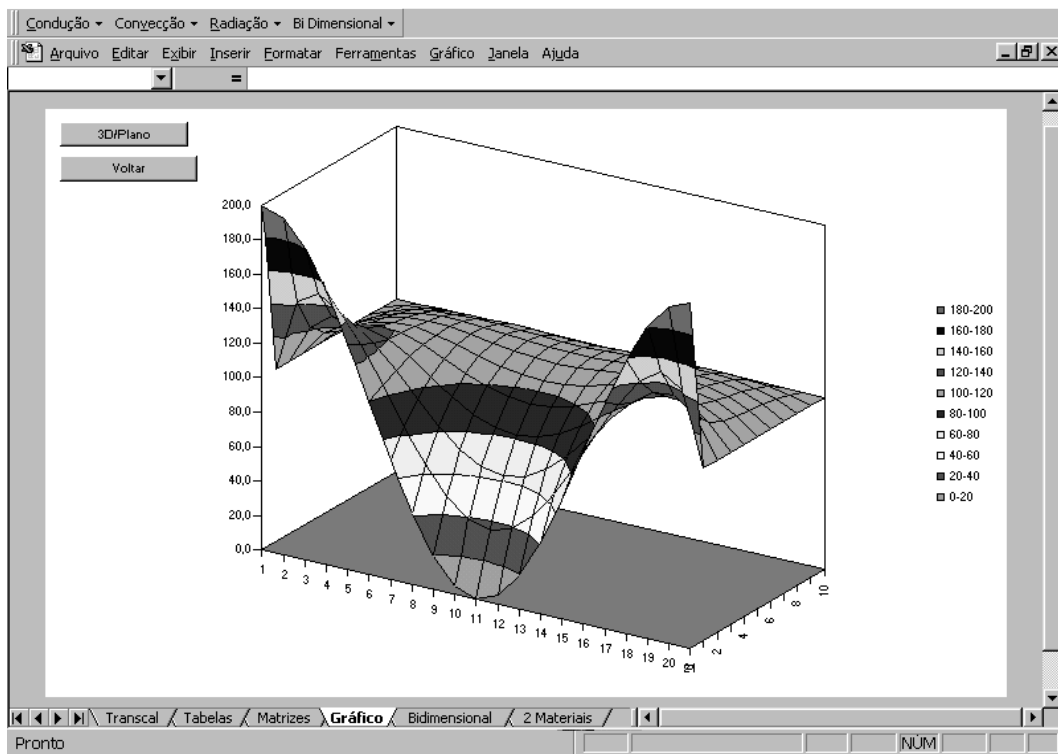


Figura 4. Distribuição de temperaturas numa chapa retangular

Finalmente, a Figura 5 ilustra o resultado no caso de um domínio retangular composto de dois materiais distintos, silício e outro altamente condutor, cobre.

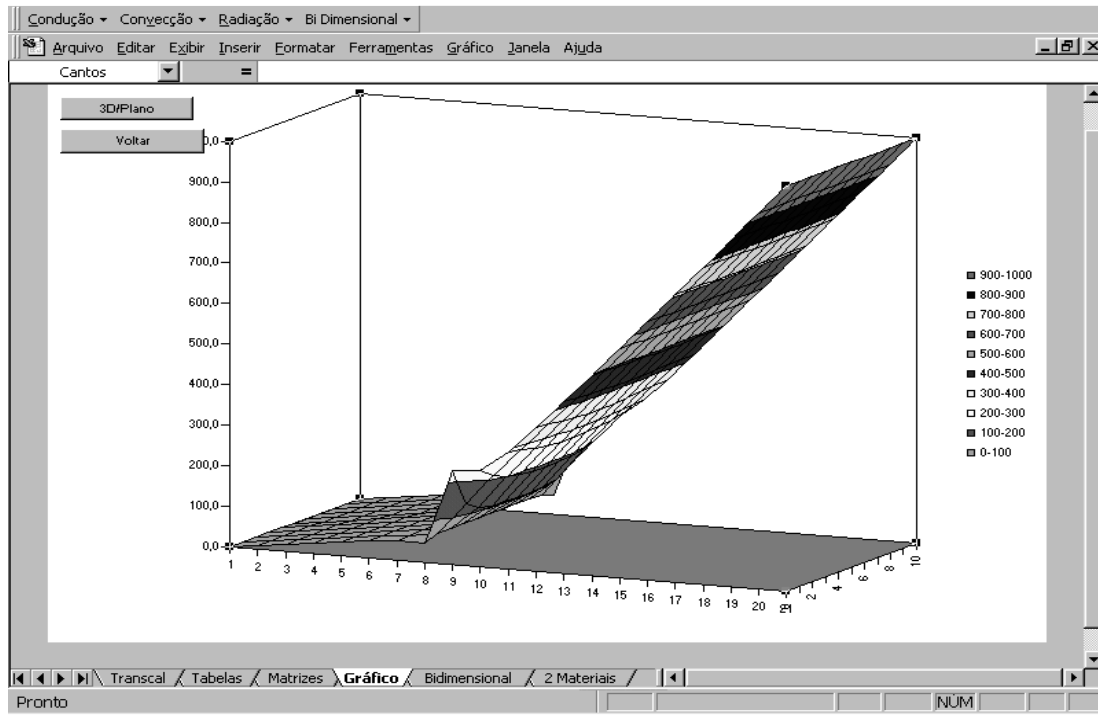


Figura 5. Distribuição de temperaturas em placa composta de 2 materiais

Nota-se na figura 5 a conseqüência da brusca mudança de material na distribuição de temperaturas, o que ocorre na abcissa $x = 8$ cm.

4. CONCLUSÃO

O programa educacional apresentado neste trabalho foi elaborado de maneira a fornecer aos estudantes ferramentas diversificadas para facilitar o compreensão de fenômenos envolvendo troca de calor entre corpos. A utilização do *software* em cursos de laboratório como recurso adicional tem servido para acelerar o processo de aprendizado ao mesmo tempo em que vem proporcionado aos estudantes vivência no assunto através da repetição simulada dos experimentos com materiais e condições de contorno diferentes.

5. REFERÊNCIAS

- Bejan A. 1996, "Transferência de Calor", Ed. Edgar Blücher, Ltda. S. Paulo, Brasil, 540p.
- Incropera F.P. & De Witt D.P., 1996, "Introduction to Heat Transfer", John Wiley and Sons, Inc., 3rd ed., 832p.
- Hernandez Neto A., Tribess A., Fiorelli F.A.S., 1998, "The laboratory as a tool for learning thermodynamics, heat transfer and thermal systems", Proc. International Congress on Engineering Education, ICEE 98, Rio de Janeiro, Brasil, em CdRom
- Maliska C.R., Dihlmann A., Ambrósio V.S., Reis M.V.F., Maliska Jr. C.R., 1999, "Heat conduction teaching, HeatTransfer 1.1 software + new course program", Proc. Brazilian Congress of Mechanical Engineering, COBEM 99, Águas de Lindóia, Brasil, em CdRom.
- Schneider, P.J., 1955, "Conduction Heat Transfer", Addison Wesley, Reading, MA. 395p.