

Modelagem térmica do processo de furação usando a técnica dos volumes finitos

Thiago Augusto M. Guimarães¹

1. Faculdade de Engenharia Mecânica - Universidade Federal de Uberlândia - Campus Santa Mônica - 38400-902
Uberlândia – MG – Brasil.
thiagoamg@yahoo.com.br

Prof. Dr. Gilmar Guimarães¹

gguima@mecanica.ufu.br

Prof. Dr. Solidônio R. de Carvalho¹

srcarvalho@mecanica.ufu.br

Resumo: *A vida das ferramentas de corte no processo de furação é fortemente influenciada pelas elevadas temperaturas. Além disso, medição das temperaturas na interface ferramenta-peça é de difícil execução, devido ao movimento da ferramenta. Este trabalho é um primeiro para se estudar e se obter o comportamento térmico na peça durante um processo de furação. Primeiramente, este propõe a obtenção de uma solução numérica do problema escolhido. Dois modelos transientes têm sido testados: 1D retangular e 2D radial. Em ambos os casos a peça é modelada. A técnica de volumes finitos é, então, aplicada para se obter as equações discretizadas. O problema, modelo térmico 1D, foi resolvido usando a formulação implícita e explícita. O objetivo é de se comparar a eficiência das técnicas e escolher a mais apropriada para a simulação térmica do processo de furação. A metodologia implícita tem mostrado ser mais apropriado porque esta é flexível a escolha da malha e do intervalo de tempo. Devido a isso, apenas a metodologia implícita será usada na modelagem 2D cilíndrica. No processo de simulação inicial, a broca é considerada como uma fonte de fluxo de calor estática. Até o presente momento estão sendo realizadas análises no modelo térmico com o objetivo de se identificar falhas no processo de simulação. O próximo passo é inserir a fonte móvel de calor e o algoritmo para simular a remoção de material da amostra submetida ao processo de furação.*

Palavras-chave: furação, implícito, volumes finitos.

1. INTRODUÇÃO

O que são problemas inversos? Esta é uma pergunta clássica e a resposta pode ser simples: um problema inverso determina as causas desconhecidas baseando-se na observação dos seus efeitos. Nos problemas diretos, cuja solução pode ser obtida por métodos analíticos ou numéricos ocorre o inverso, a solução do problema representa os efeitos baseados na descrição completa de suas causas. Os problemas inversos são classificados matematicamente como “mal-postos”, isto é, podem ter ou não solução, e caso exista solução esta pode ser única ou estável.

Os problemas inversos em condução de calor podem ser considerados como uma classe especial dentro das técnicas de problemas inversos. As características principais destes problemas são: usar temperaturas medidas experimentalmente, modelar o problema térmico baseando-se na equação de difusão de calor e ter como objetivo a estimação de algum parâmetro térmico, como por exemplo, a obtenção das propriedades térmicas, a obtenção de fluxo de calor superficial, a obtenção da fonte de calor interna, ou ainda a determinação da temperatura superficial sem acesso direto.

Nos processos de fabricação, como por exemplo, na furação dos metais, grande parte da energia fornecida é convertida em calor e é praticamente impossível medir experimentalmente o valor do calor gerado neste processo. A partir desta característica, verifica-se que este processo se enquadra perfeitamente na classe dos problemas inversos em transferência de calor, isto é, deseja-se conhecer o calor gerado na interface de corte e a partir dele calcular a distribuição de temperatura na ferramenta. O conhecimento da energia térmica fornecida à ferramenta pode proporcionar o aumento do desempenho da broca e conseqüentemente o desenvolvimento de produtos de maior qualidade e baixo custo.

A operação de furação é um dos processos de fabricação mais antigos utilizados pelo homem. Na idade da pedra utilizou-se sílex e ossos como ferramentas em uma espécie de furadeira manual que dependia principalmente da habilidade de seu executor. Também existem registros que indicam que esta foi uma das primeiras operações executadas em metal. Mesmo ao longo de todos estes anos, a furação manteve sua importância dentro dos processos de fabricação, sendo ainda hoje de grande importância nos processos industriais. Este fato justifica plenamente o desenvolvimento de estudos contínuos com o objetivo de atingir melhoramentos técnicos e econômicos neste processo.

Durante o processo de furação a broca é fortemente influenciada pelas elevadas temperaturas a que esta submetida. A temperatura média desta ferramenta está relacionada à taxa de deformação do material da peça na zona de cisalhamento secundária, de modo que o aumento da faixa de velocidades de corte tem como conseqüência o aumento da temperatura média da ferramenta. Com isso, o desenvolvimento de ferramentas de corte com boas propriedades de resistência ao desgaste à temperaturas elevadas é um dos requisitos para o aumento da faixa de velocidades de corte e, em conseqüência, da produtividade.

Contudo, durante o processo de furação é muito difícil medir a temperatura experimental da broca, principalmente devido às altas velocidades de corte exigidas. Uma alternativa seria o uso de sensores infravermelhos. Outra opção seria o uso de técnicas inversas em condução de calor. Este é, portanto o objetivo principal deste trabalho, ou seja, desenvolver uma metodologia inversa que permita estudar os campos térmicos em ferramentas de corte 2-D em regime transiente, a partir da modelagem térmica em coordenadas cilíndricas do processo de furação.

2. METODOLOGIA

Primeiramente dividiu-se o trabalho em duas etapas distintas:

2.1. Primeira Etapa – Estudo e desenvolvimento de um modelo Térmico em 1D

Para a análise térmica do processo de furação, realizou-se inicialmente o estudo de um problema de transferência de calor mais simples.

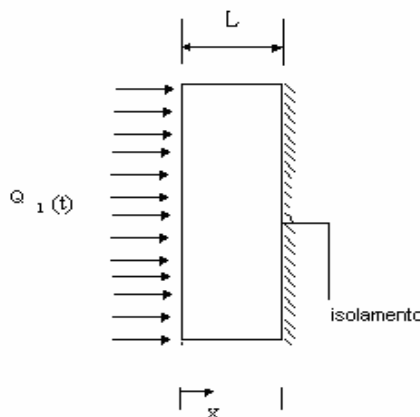


Figura 1: Amostra sujeita a um fluxo de calor imposto na superfície.

A Figura 1 apresenta o modelo térmico proposto. Verifica-se nesta figura um problema básico de transferência de calor unidimensional no qual uma amostra homogênea de espessura L e temperatura inicial T_0 está sujeita a um fluxo de calor transiente e unidimensional, $Q_1(t)$, na superfície frontal. A superfície oposta ao fluxo de calor está isolada. O objetivo é determinar a variação da temperatura em qualquer posição da amostra durante o processo de aquecimento.

O modelo térmico foi obtido a partir da solução numérica da equação da difusão unidimensional transiente que pode ser descrita por:

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

Nesse sentido, aplicou-se o método das diferenças finitas com formulação explícita e implícita. A formulação explícita permite obter a solução direta do problema térmico unidimensional, entretanto a solução fica condicionada a uma série de fatores como, por exemplo, o intervalo de cálculo da temperatura (Δt), o tipo de malha numérica, entre outros. Já a formulação implícita elimina os problemas com o Δt e o tipo de malha, entretanto o problema térmico fica condicionado à solução de um sistema linear do tipo $A.T = B$, onde a matriz A representa os coeficientes das equações, T a temperatura em qualquer posição da amostra e B a matriz dos termos independentes. Para a resolução do sistema linear, aplicou-se o método iterativo, S.O.R (Método das Sobre-relaxações Sucessivas) procurando acelerar o processo de convergência do sistema linear. O S.O.R pode ser facilmente deduzido a partir do método de Newton-Raphson, cujo objetivo é a determinação do zero da função $F(T)$, Figura 2.

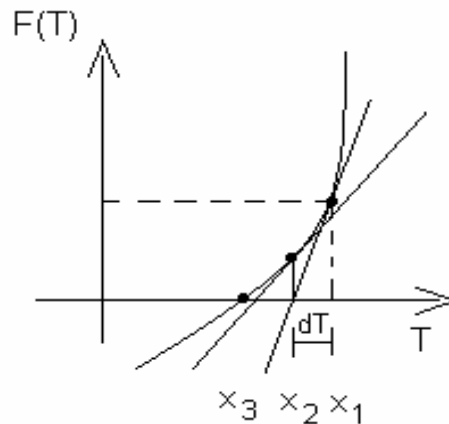


Figura 2: Zero da função $F(T)$ encontrado pelo método de Newton-Raphson

O método de Newton-Raphson é considerado um dos processos mais eficientes para o cálculo de raízes de equações e pode ser escrito como sendo:

$$T = T - W \frac{F(T)}{F'(T)} \quad (2)$$

Onde T é a temperatura, W é o coeficiente de relaxação. Os valores recomendados de W para avançar mais rapidamente a solução variam entre 1.5 e 1.7. Ressalta-se que W depende fortemente da distância entre nós (dx) e do intervalo de tempo (dt). Valores de W menores que 1.0 sub-relaxam a solução. $F(T)$ é obtido a partir da modelagem numérica e $F'(T)$ é a derivada de $F(T)$.

Para determinar a $F(T)$ aplica-se o método das diferenças finitas implícito na equação (1) discretizada, obtendo-se:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{T_{i-1} - 2T_i + T_{i+1}}{\Delta x^2} \quad (3)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{\alpha} \frac{T_i - T_i^o}{\Delta t} \quad (4)$$

A Figura 3 apresenta o método das diferenças finitas centradas.

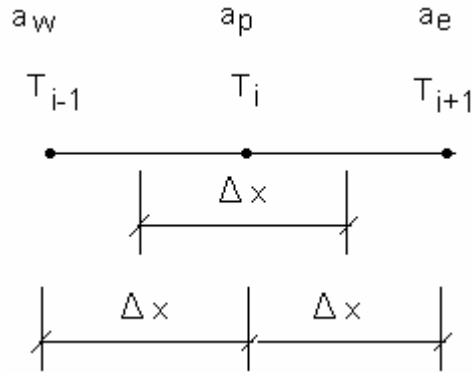


Figura 3. Método das diferenças finitas centradas

Substituindo (3) e (4) em (1), tem-se:

$$\frac{T_{i-1} - 2T_i + T_{i+1}}{\Delta x^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{T_i - T_i^o}{\Delta t} \quad (5)$$

Reescrevendo:

$$\frac{T_{i-1}}{\Delta x^2} - \frac{2T_i}{\Delta x^2} + \frac{T_{i+1}}{\Delta x^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{T_i}{\Delta t} - \frac{1}{\alpha} \frac{T_i^o}{\Delta t} \quad (6)$$

$$\left(\frac{2}{\Delta x^2} + \frac{1}{\alpha \Delta t} \right) T_i = \frac{T_{i-1}}{\Delta x^2} + \frac{T_{i+1}}{\Delta x^2} + \frac{T_i^o}{\alpha \Delta t} \quad (7)$$

Fazendo:

$$ap = \left(\frac{2}{\Delta x^2} + \frac{1}{\alpha \Delta t} \right), \quad aw = \frac{1}{\Delta x^2}, \quad ae = \frac{1}{\Delta x^2} \quad \text{e} \quad b = \frac{T_i^o}{\alpha \Delta t} \quad (8)$$

Tem-se que:

$$apT_i = awT_{i-1} + aeT_{i+1} + b \quad (9)$$

Pode-se agora definir F(T) como sendo:

$$F(T_i) = awT_{i-1} + aeT_{i+1} + b - apT_i \quad (10)$$

E F'(T) é a derivada de F(T_i) definida por:

$$F'(T_i) = -ap \quad (11)$$

Substituindo (10) e (11) em (1), obtém-se a solução problema:

$$T_i = T_i - W \left(\frac{awT_{i-1} + aeT_{i+1} + b - apT_i}{-ap} \right) \quad (12)$$

Obtém-se a convergência do S.O.R quando:

$$\left| T_i - \left(\frac{awT_{i-1} + aeT_{i+1} + b}{ap} \right) \right| \leq \text{erro} \quad (13)$$

Normalmente, em problemas de transferência de calor, adota-se o erro como sendo: erro = 1.0E-07.

As principais características deste método são suas propriedades de convergência e simplicidade de aplicação.

Na solução numérica do problema térmico analisou-se ainda as formulações explícita e implícita. As equações foram implementadas em C++ Builder o que proporcionou o início do desenvolvimento do software SET.

Uma vez entendido o procedimento para a modelagem de problemas térmicos em transferência de calor, o próximo passo é a análise do problema térmico de furação.

2.2. Segunda Etapa - Modelagem 2D em coordenadas cilíndricas de um processo de furação

Para a modelagem térmica do processo de furação devemos entender como ocorre o processo de usinagem.



Figura 4: Representação da broca de usinagem

Verifica-se na Figura 4 que a geometria da broca de usinagem é muito complexa. Assim, como o objetivo é determinar o calor na interface de corte, optou-se por modelar a peça submetida ao processo de furação: neste caso, uma peça cilíndrica. A Figura 5 apresenta uma vista do plano radial da peça submetida ao processo de furação.

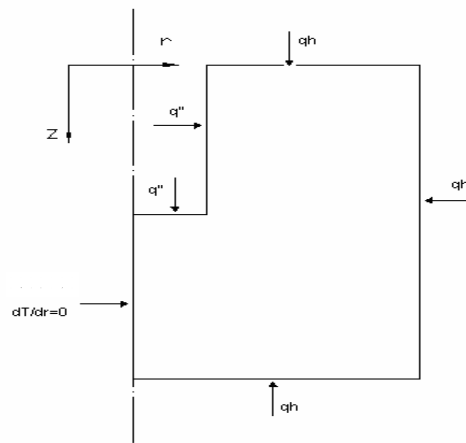


Figura 5: Vista do plano radial, representa a simplificação do modelo em 2D

Na Figura 5, verifica-se que o fato de se considerar uma peça cilíndrica submetida ao processo de furação torna o problema térmico mais simples, ou seja, o processo de transferência de calor pode ser considerado bidimensional transiente e as condições de contorno são conhecidas, ou seja, fluxo de calor transiente na superfície submetida ao processo de furação, $dT/dr=0$ no eixo de simetria e transferência de calor por convecção nas demais faces.

Assim, a partir de uma malha bidimensional que represente a peça furada (Figura 6), pode-se discretizar o problema por meio do método dos volumes finitos aplicando um balanço de energia nos nodos da malha numérica.

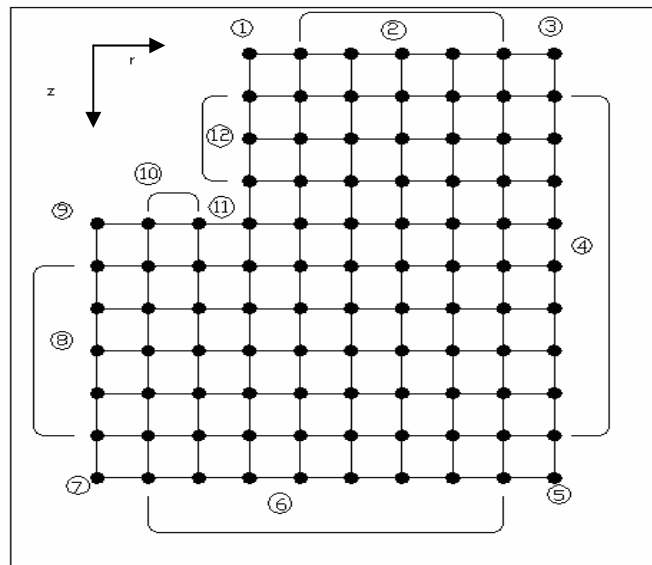


Figura 6: Representação da Malha no plano radial do cilindro, sendo que as condições de contorno estão representadas na Figura 5.

Na Figura 6 apresentam-se os nodos nos quais foram realizados os balanços de energia.

2.2.1. Programa Furação

Para a simulação do processo de furação desenvolveu-se o programa SET que permite a solução do problema térmico a partir de uma formulação implícita. Os parâmetros de entrada são alterados em um arquivo de leitura. Depois de lidos os parâmetros são utilizados para o cálculo da distribuição de temperatura, sendo que o usuário do programa tem na janela de execução como

selecionar a opção desejada, após a escolha do método o programa realiza a impressão dos resultados e gera os resultados gráficos.

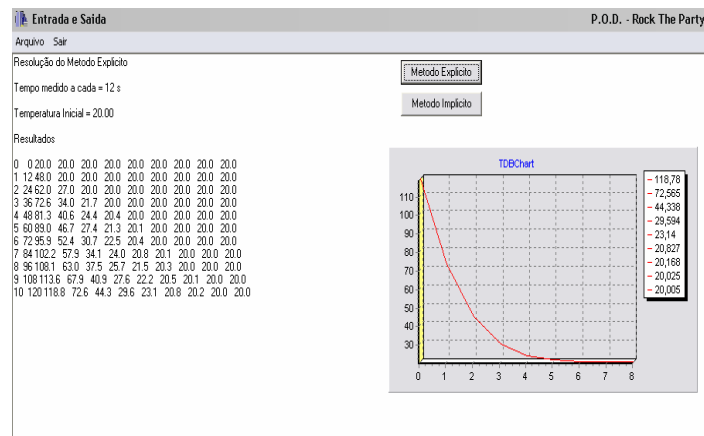


Figura 7: Janela de resultados do Programa Set

Este programa encontra-se em fase de testes, nos quais serão simulados diversas geometrias, condições de contorno e fluxos de calor.

Ressalta-se que o objetivo principal do programa é simular o comportamento térmico de amostras submetidas à furação. Nesse sentido, primeiramente optou-se pela simulação do problema a partir de uma malha uniforme. O próximo passo é desenvolver o algoritmo para a geração e cálculo com malha uniforme. Em ambos os casos serão realizados testes considerando fluxo de calor estacionário e fluxo móvel. Além disso, o algoritmo computacional deve simular a remoção de material, tal como acontece no problema físico real. O objetivo é calcular a distribuição de temperatura em uma amostra cilíndrica bidimensional submetida ao processo de furação.

3. RESULTADOS

Como este trabalho ainda está em fase de desenvolvimento, inicialmente optou-se por simular uma fonte de calor estática transiente nas paredes internas da amostra cilíndrica ($0\text{mm} < z < 20\text{mm}$ e $0\text{mm} < r < 25\text{mm}$). O tempo de simulação adotado foi de 80s. Os parâmetros de entrada foram:

- r_0 = raio interno = 25mm
- R = raio externo = 50mm
- $Q(t)$ =fluxo de calor= $3 \times 10^5 [\text{W}/\text{m}^2]$
- Z_0 = 20mm
- Z = altura total da amostra = 50mm
- Dt = intervalo de tempo = 4s
- dr = comprimento do volume na direção r = 2,5mm
- dz = comprimento do volume na direção z = 2,5mm

A Figura 8 apresenta os resultados da simulação proposta.

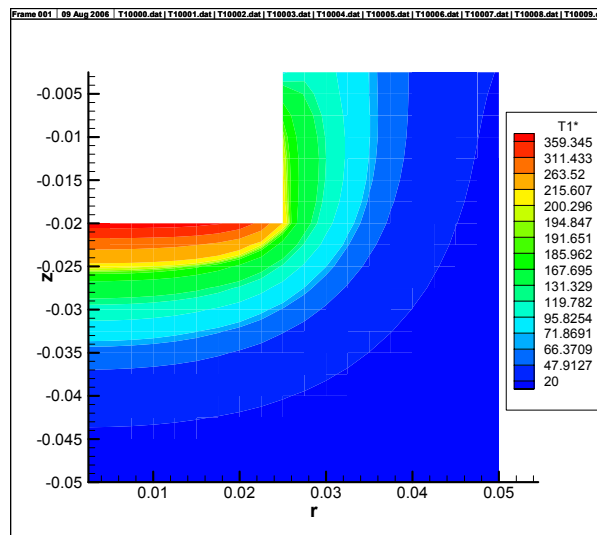


Figura 8: Representação do campo de temperatura 2D

Nota-se na Figura 8 que o modelo térmico apresenta um gradiente térmico diferente nas faces $0\text{mm} < r < 25\text{mm}$ e $0\text{mm} < z < 20\text{mm}$, o que não representa a realidade, uma vez que o fluxo de calor foi a mesmo em ambas as faces. Nesse sentido, o próximo passo será reavaliar a formulação matemática e as condições de contorno com o objeto de se corrigir este problema. Apesar dos problemas identificados, nota-se que há um aumento considerável da temperatura na amostra, o que é esperado durante um processo real de furação.

3.1. Discussão e Conclusão

O que se apresentou neste trabalho foi a solução do problema direto de transferência de calor, ou seja, a partir de um fluxo de calor arbitrário e constante, calculou-se o gradiente térmico na amostra submetido ao processo de furação. Entretanto, na prática, o que se tem é um problema inverso de transferência de calor, pois não se conhece a grandeza do fluxo de calor. Nesse sentido, após encontrar e corrigir o problema identificado na solução do problema direto e, além disso, validar o código computacional, o próximo passo será implementar o problema inverso. Para tanto, devem ser realizados testes experimentais por meio dos quais serão medidas temperaturas em regiões acessíveis da amostra submetida ao processo de furação. A partir destas temperaturas e do código computacional proposto neste trabalho, tem-se as ferramentas para se estimar a grandeza do fluxo de calor no processo de furação.

4. AGRADECIMENTOS

Os autores deste trabalho agradecem ao CNPQ e à FAPEMIG pelo suporte financeiro.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Incropera, F. P., and DeWitt, D. P., 1998, “Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa”, Livros Técnicos Científicos Editora S.A., 4a ed., Brasil.
- Carvalho, S. R., Lima E Silva, S. M. M., Pinho, F. A. A., Machado, A. R. E G. E Guimarães, G., 2003, “Determinação Da Temperatura Na Interface Cavaco-Ferramenta Durante O Processo De Torneamento Usando A Técnica Do Simulated Annealing”, II Congresso Brasileiro De Engenharia De Fabricação – COBEF 2003, Uberlândia, Brasil.

- Lima, F. R. S., 2001, “Modelagem Tridimensional De Problemas Inversos Em Condução De Calor: Aplicação Em Problemas De Usinagem”, Tese De Doutorado, Universidade Federal De Uberlândia, Uberlândia, Brasil.
- Vanderplaats G. N., 1984, “Numerical Optimization Techniques for Engineering Design”, McGraw-Hill, New York, USA.

Thermal modelling of the drilling process

Thiago Augusto M. Guimarães¹

1. Faculdade de Engenharia Mecânica - Universidade Federal de Uberlândia - Campus Santa Mônica - 38400-902
Uberlândia – MG – Brasil – thiagoamg@yahoo.com.br

Prof. Dr. Gilmar Guimarães¹

gguima@mecanica.ufu.br

Prof. Dr. Solidônio R. de Carvalho¹

srcarvalho@mecanica.ufu.br

Abstract:

The tool life in drilling process is strongly influenced by high temperature. Besides the temperature measurements at the interface drill-piece are hard to execute due to the movement of the tool. This work is a first step to study and to obtain the thermal field in a piece during a drilling process. At first, it is proposed to obtain a numerical solution of the direct problem that is chosen. Two transient models have been tested: 1D rectangular and 2D radial. In both cases the piece is modeled. The volume finite technique is, then, applied to obtain the discret equations. The problem, in 1D thermal model, is solved using both implicit and explicit formulation. The objective is to compare the efficiency of both techniques and to choose the most appropriate for the thermal simulation of the drilling process. The implicit methodology has shown the most appropriate because its flexibility in the choice of mesh and evolution time. Because of that, just the implicit formulation is applied in the 2D radial thermal model. In the two models cited the drill was simulated as an immaterial heat source at a fixed position. At the present time different geometries are been tested to allow that heat source can move.

Keywords: drilling, implicit, volume finite