

## **DEFINIÇÃO DO FLUXO DE CALOR E DO COEFICIENTE DE CONVECÇÃO NO PROCESSO DE FURAÇÃO POR COMPARAÇÃO DOS MÉTODOS ANALÍTICOS E DOS ELEMENTOS FINITOS**

**Lincoln Cardoso Brandão, [lincoln@ufsj.edu.br](mailto:lincoln@ufsj.edu.br)<sup>1</sup>**  
**Frederico Ozanan Neves, [fred@ufsj.edu.br](mailto:fred@ufsj.edu.br)<sup>1</sup>**  
**Reginaldo Teixeira Coelho, [rtcoelho@sc.usp.br](mailto:rtcoelho@sc.usp.br)<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Universidade Federal de São João del Rei, Praça Frei Orlando, 170 – Centro

<sup>2</sup>Escola de Engenharia de São Carlos EESC/USP, Av. Trabalhador São-carlense, 400 – Centro

**Resumo:** O calor gerado durante o processo de corte é um dos principais fatores responsáveis pela baixa eficiência na usinagem. Monitorar e definir as melhores condições de lubrificação para o processo de furação é importante na definição da vida de ferramentas. Neste trabalho corpos-de-prova de aço endurecido tiveram seus valores de temperatura monitorados usando a técnica de termopar inserido. Sistemas de resfriamento como fluido em abundância e MQL (Mínima Quantidade de Lubrificante) foram empregados para minimizar a temperatura de corte durante o processo e comparar com a furação a seco. Duas técnicas foram empregadas para definir o fluxo de calor durante o processo; o método de elementos finitos e um método analítico. Comparando os valores de temperatura experimentais e teóricos foi possível definir o menor erro e assim encontrar o fluxo de calor e o coeficiente de convecção dos sistemas de resfriamento utilizados. Os dois métodos empregados mostraram-se eficientes para a definição do fluxo de calor, sendo os resultados do método de elementos finitos superiores na definição dos valores do coeficiente de convecção.

**Palavras-chave:** Inverse Heat Conduction Method; Fluxo de Calor; Coeficiente de Convecção; Elementos Finitos; Furação.

### **1. INTRODUÇÃO**

O desafio da manufatura com relação à consciência ambiental tem como objetivo encontrar opções para minimizar o uso de fluidos lubri-refrigerantes nos processos de usinagem. Nos processos de furação, principalmente com brocas helicoidais, a falta de lubri-refrigeração aumenta os problemas relativos ao controle do cavaco e a temperatura (Beck, 1985). A energia induzida nos materiais usinados pode causar uma variedade de não conformidades para o produto, como por exemplo: tensões residuais, deformação em furos de paredes finas e variações dimensionais (Kalidas et al., 2002). Segundo Watanabe et al. (1997), a temperatura gerada no processo é um fator importante na aparecimento de eventuais erros de diâmetro produzido nos furos.

Conhecer a variação da temperatura nos processos de furação pode contribuir para a escolha dos dados de corte, prevendo-se assim a integridade do produto. Diversas pesquisas foram desenvolvidas para definir a temperatura no processo de furação, utilizando-se de termopares inseridos no corpo-de-prova (DeVries et al., 1968), medindo-se a micro-dureza da peça furada (Thangaraj et al., 1984), utilizando-se de microscópio de varredura por elétrons (Mills et al., 1981) e termopares inseridos na região entre a peça e a ferramenta (Agapiou et al., 1994; Watanabe et al., 1997).

Os métodos descritos anteriormente são utilizados para medir o comportamento da temperatura na ferramenta ou na peça usinada durante a usinagem. Esta medição torna-se importante, pois permite monitorar o processo de corte, e assim, garantir a qualidade mantendo as propriedades mecânicas, avaliando as deformações dos materiais usinados e testando a resistência ao calor de novas coberturas de ferramentas. Assim, muitas vezes torna-se interessante conhecer o calor no processo de usinagem e, paralelo a isto, conhecer a capacidade de retirar calor de um determinado sistema de resfriamento empregando os valores de temperatura obtidos.

A condição mais complexa destes métodos é determinar a partição do calor dentro do cavaco (Bono, 2002). Embora diferentes métodos tenham sido desenvolvidos para prever a partição de calor, a maioria dos pesquisadores utiliza o modelo desenvolvido por Lowen e Shaw (1954). Pode-se dizer que existem duas técnicas para se inferir os valores do calor por condução através da medição da temperatura: a primeira utiliza-se de modelos matemáticos baseados na solução de equações diferenciais especificamente adaptadas ao caso real. A segunda utiliza-se de simulação numérica, onde o modelamento está baseado nas equações de transferência de calor que governam as relações de condução entre os materiais empregados.

As técnicas utilizadas para calcular as condições de contorno do fluxo de calor são baseadas nos Métodos Inversos de Condução de Calor e existem diversas metodologias para a solução destes problemas como, por exemplo, as várias soluções propostas por Carslaw e Jaeger (1957). Estas soluções podem ser aplicadas para a determinação do calor em diversos casos práticos de condução de calor em processos de usinagem como; retificação, torneamento, fresamento, etc. Em todos estes casos o calor é fornecido não apenas em um único ponto, mas em uma área restrita, que na maioria das vezes é desconhecida e muito pequena, e que pode ser desconsiderada por ter pouca influência na solução final do problema.

Os Métodos Inversos de Condução de Calor têm sido utilizados por diversos pesquisadores. Gonçalves et al. (2002) utilizou termopares para monitorar e definir o calor em processos de soldagem em peças de aço inox AISI 304. Ohadi e Cheng (1993) modelaram também através de termopares a distribuição de temperaturas no processo de usinagem por jato de água em corpos-de-prova de aço SAE 4041. Ming et al. (2003) utilizaram o método de infravermelho para encontrar o calor em uma liga de alumínio, entre vários outros trabalhos que se pode citar. Em todas estas pesquisas os valores do calor encontrados foram muito próximos e podem ser considerados compatíveis com os indicados nas bibliografias da área de condução de calor, podendo também apresentar valores mais precisos.

Problemas analíticos de geração de calor em superfícies planas são freqüentemente encontrados em diversas situações de usinagem. Komanduri e Hou (2000) dividem em soluções de fontes estacionárias e móveis, onde o primeiro caso é uma condição específica do segundo, pois considera a velocidade de deslocamento da fonte igual à zero. A magnitude do aumento da temperatura assim como a distribuição ao redor da fonte de calor vai depender de diversos fatores, incluindo a intensidade da fonte e sua distribuição, como; forma e tamanho da fonte de calor, propriedades térmicas, velocidade de deslocamento e o número de Peclet que é usado para expressar a velocidade relativa de deslocamento da fonte.

A solução baseada em métodos numéricos devido à facilidade em conseguir uma resposta concisa é a mais empregada. Entretanto, apesar da aplicação de soluções analíticas, que em geral requerem um conhecimento mais aprofundado de métodos matemáticos, ainda assim, quando possível, estas devem ser buscadas, pois o resultado pode apresentar-se de forma simples.

Abukhshim et al. (2006) sugere que devido à complexidade e severidade da deformação nos processos de usinagem, os processos puramente analíticos de obtenção do calor são seriamente restritos. Devido a estas restrições e pela condição que a zona de deformação é não-analítica e é não-linear, torna-se essencial a aplicação de métodos numéricos que permitam uma representação menos limitada da região de deformação. A aplicação de métodos de elementos finitos apresenta excelente precisão em simulações 2D, porém a transição para sistemas 3D ainda permanece complexa.

Este trabalho compara os valores do fluxo de calor no processo de furação empregando-se os dois métodos mais conhecidos, método inverso de condução de calor e o método de elementos finitos. Foram empregados dois sistemas de resfriamento e comparados os valores do coeficiente de convecção de ambos empregando-se os dois métodos.

## 2. METODOLOGIA

Os experimentos de furação foram realizados com corpos-de-prova de aço AISI H13 endurecidos com 55 HRC e dimensões de 100 x 40 x 14 mm. Foram realizados furos com diâmetro de 8,6 mm com brocas inteiriças de Metal Duro com cobertura de (TiAl)N. O código da ferramenta é A3269TFL\*8.6 com as seguintes dimensões; comprimento da hélice de 47 mm e comprimento total de 89 mm, conforme norma DIN 6537K. As variáveis de usinagem foram; avanço  $0,03 \text{ mm} \cdot \text{rot}^{-1}$ , velocidade de corte  $25 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$  e velocidade de avanço de  $28 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ .

Para a realização dos experimentos de furação foi utilizado um centro de usinagem marca ROMI, modelo Discovery 560, com 7.500 RPM e 15 kW de potência. A Figura (1) mostra o esquema de montagem dos termopares para os experimentos. Nota-se que a distância entre o furo e a junta fria do termopar foi de 0,8 mm e a Fig. (2) mostra o lay-out dos experimentos.

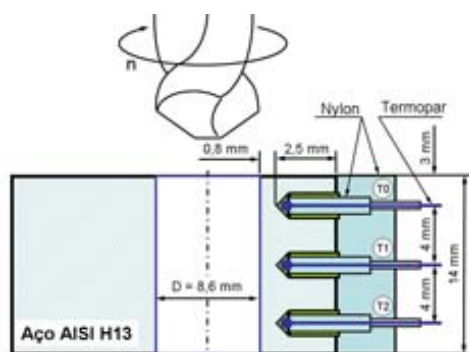


Figura 1. Lay-out da fixação dos termopares.

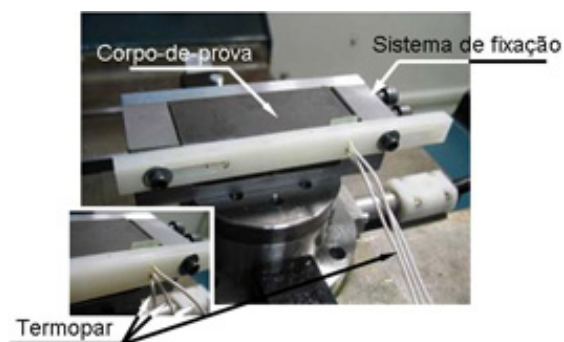


Figura 2. Lay-out do experimento.

Todos os experimentos foram realizados com termopares do tipo “T” de Cobre-Constantan AWG 30 (0,051mm<sup>2</sup>) e faixa de temperatura de 0 a 400 °F (-18 a 205 °C). Para os experimentos de furação, três termopares; T<sub>0</sub>, T<sub>1</sub> e T<sub>2</sub>, distantes entre si de 4 mm, conforme a Fig. (1), foram montados na direção axial dos furos. Isto permitiu avaliar a temperatura do processo na região no início, meio e no final do comprimento furado. Utilizou-se um bloco de conectores modelo SCB 68 para conexão dos termopares. Assim, o sinal era transferido para uma placa de conversão de sinais analógicos para digitais (Placa A/D, modelo PCI - MIO - 16E - 4 da National Instruments). A taxa de aquisição do sinal de temperatura monitorada foi de 20 Hz e os sistemas de resfriamento empregados nos experimentos foram o MQL (Mínima quantidade de Lubrificante) e o fluido em abundância além dos experimentos realizados a seco.

### 2.1. Modelo matemático empregado no método inverso de condução de calor

A Figura (4) mostra um disco em azul que representa a área de introdução do calor. A distância “dx” é o comprimento do furo. Um sistema onde o balanço de energia é resultado da energia introduzida pela ação da broca no corpo-de-prova, menos a porção de energia retirada por convecção pelo ar ou pelo sistema de resfriamento. Este modelo pode se escrito de acordo com a Eq. (1) abaixo.

$$qx - q_{conv} = \Delta U \tag{1}$$

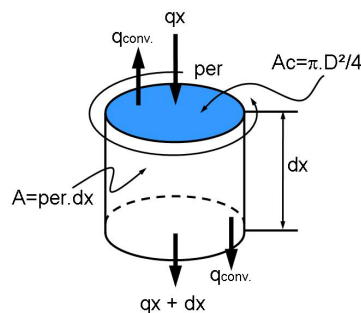


Figura 3 - Esquema da representação do sistema

Sendo:

qx = Calor entrando por condução [J];

q<sub>conv</sub> = Calor saindo por convecção [J];

ΔU = Fluxo de calor resultante no sistema [J].

Assim, a Eq. (1) pode ser desenvolvida da seguinte maneira:

$$q_x - \left( q_x + \frac{\partial q}{\partial x} dx \right) - q_{conv} = d_m \cdot cp \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \tag{2}$$

Onde:

dm = massa do sistema;

cp = Calor específico do material.

Usando a Lei de Condução de calor descrita por Fourier e a Lei de resfriamento de Newton, descrita nas Eq. (3) e (4), a Eq. (2) pode ser reescrita conforme a Eq. (5).

$$q_x = -k \frac{\partial T}{\partial x} \tag{3}$$

$$q_{conv} = h \cdot dA \cdot (T - T_{\infty}) \tag{4}$$

$$-\frac{\partial}{\partial x} \left( -k \frac{\partial T}{\partial x} \right) dx - h \cdot dA \cdot (T - T_{\infty}) = \rho \cdot dx \cdot per \cdot cp \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \tag{5}$$

Onde pode ser definido também:

per. = Perímetro do corpo-de-prova;

dm = dx.per (volume do corpo-de-prova);

ρ = Densidade do material;

A = per.dx

Sendo resolvido de acordo com a Eq. (5) e sendo desenvolvida de acordo com as equações abaixo:

$$\frac{h \cdot per}{k} = \varphi \quad (6)$$

$$(T - T_{\infty}) = \theta \quad (7)$$

$$\frac{\rho \cdot per \cdot cp}{k} = \frac{1}{\alpha} \quad (8)$$

Podem ser feitas as substituições necessárias para a solução do sistema e assim pode-se escrever a Equ. (9)

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - \varphi \cdot \theta - \frac{1}{\alpha} \left( \frac{\partial T}{\partial t} \right) = 0 \quad (9)$$

Dessa forma, para o processo de usinagem nós devemos considerar o sistema em movimento que se deslocará de acordo com a equação do movimento uniforme e com  $X_0=0$ , sendo escrita:

$$x = v \cdot t' \quad (10)$$

De acordo com a Eq. (9) substituída na Eq. (10), podemos então escrever a Eq. (11) que pode ser descrita da seguinte maneira.

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial x'^2} - \varphi \cdot \theta + \frac{v}{\alpha} \frac{\partial \theta}{\partial \gamma} - \frac{1}{\alpha} \frac{\partial \theta}{\partial t'} = 0 \quad (11)$$

Esta equação representa a temperatura, em função da distância “x”, e o tempo “t”, no corpo-de-prova, sujeitas a uma fonte de calor que se move com a velocidade “v”. A solução da equação (11) pode ser encontrada, inicialmente sendo definida como:

$$\theta = \mu \cdot \exp\left(\frac{v}{\alpha} t\right) \quad (12)$$

Assim, a equação diferencial será escrita da seguinte maneira:

$$\frac{\partial^2 \mu}{\partial x'^2} - \alpha \frac{\partial \mu}{\partial t} = 0 \quad (13)$$

A solução matemática desta equação diferencial é proposta por Carslaw (14) e pode ser escrita da seguinte maneira:

$$T_{\text{model}} = T_0 + \frac{q}{2 \cdot w \cdot cp \cdot \rho \cdot (\pi \cdot \alpha \cdot t)^{1/2}} \cdot \exp\left(\frac{v \cdot t - (x - vel \cdot t)^2}{4 \cdot \alpha \cdot t}\right) \quad (14)$$

$$v = \frac{h \cdot per}{cp \cdot \rho \cdot w} \quad (15)$$

Onde:

$T_{\text{model}}$  = Temperatura ao longo do corpo-de-prova [°C];

$T_0$  = Temperatura de referência [°C];

q = Quantidade de calor absorvido [J];

w = Secção do corpo-de-prova [m<sup>2</sup>];

cp = Calor específico do material do corpo-de-prova [J.kg<sup>-1</sup>.°C<sup>-1</sup>];

$\rho$  = Densidade do material do corpo-de-prova [kg.m<sup>-3</sup>];

$\alpha$  = Difusividade térmica [m<sup>2</sup>.s<sup>-1</sup>];

t = Tempo de usinagem [s];

v = Velocidade de deslocamento da fonte de calor [m.s<sup>-1</sup>];

x = Posição do termopar [m];

$h$  = Coeficiente de convecção [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{°C}^{-1}$ ];  
 $per$  = Perímetro da secção de convecção [ $\text{m}$ ].

Esta solução fornecida pelos dados de temperatura serão ajustados para curvas teóricas. Os parâmetros ajustados serão os valores “Q” e “H”. Esta solução será feita para fornecer o erro mínimo do somatório do erro quadrático entre os valores medidos e os valores teóricos.

$$\varepsilon = \sum_{i=1}^N (\theta_i - \hat{\theta}_i)^2 \quad (16)$$

Onde:

$\theta_i$  = Temperatura teórica no tempo  $i$ ;

$\hat{\theta}_i$  = Temperatura medida no tempo  $i$

$\varepsilon$  = erro

$N$  = Número dos pontos de medição

Os testes de minimização foram realizados com o software MatLAB™ baseado na Eq. (14). O ajuste é aplicado, separadamente para a curva de cada termopar, sendo obtido três valores para “Q” e “H”. Como a fonte de calor fornece, teoricamente, um fluxo de calor constante e o coeficiente de convecção é o mesmo para cada sistema de resfriamento específico, a média é calculada pelos valores encontrados na três curvas. Desta maneira, pode ser encontrado o valor médio da energia armazenada no corpo-de-prova e o valor médio de convecção para cada sistema de resfriamento testado.

## 2.2. Simulação processo de furação

Para o processo de furação foi empregada a seguinte estratégia o modelo foi dividido em 10 camadas no sentido da direção de avanço da ferramenta por 96 elementos distribuídos radialmente, sendo que estes foram divididos em 1 círculo central com 32 elementos, 1 anel intermediário com 32 elementos e um 1 anel externo com 32 elementos. A Figura (4) mostra a disposição final dos elementos. No processo de simulação, o fluxo de calor “*Hflux*”, proveniente da formação do cavaco foi aplicado nos elementos do círculo central da primeira camada pelo tempo total de usinagem dividido pelo número de anéis, em seguida o fluxo de calor “*Hflux*” foi removido e aplicado o valor do coeficiente de convecção “*conve*” de acordo com a Fig. (4). Em uma segunda etapa, o fluxo de calor “*Hflux*” voltou a ser aplicado nos elementos do círculo central da segunda camada e para os elementos da primeira camada do anel intermediário, sendo que, novamente o fluxo de calor “*Hflux*” foi retirado e substituído pelo coeficiente de convecção “*conve*”, como mostra a Fig. (4b).

Finalmente, o fluxo de calor “*Hflux*” foi aplicado simultaneamente nos elementos do círculo central da terceira camada, nos elementos do anel intermediário da segunda camada e nos elementos do anel externo da primeira camada, sendo que o fluxo de calor “*Hflux*”, como citado anteriormente foi retirado e aplicado o coeficiente de convecção “*conve*”. A programação seguiu esta lógica na mesma ordem de aplicação do fluxo de calor e aplicação do coeficiente de convecção pra todos os anéis no sentido do deslocamento da ferramenta até que a simulação do processo terminasse após a retirada de calor no último anel, simulando dessa forma a passagem da ferramenta pelo furo. Esta orientação de aplicação do fluxo de calor “*Hflux*” e do coeficiente de convecção “*conve*” teve como objetivo representar, o mais próximo possível, a aresta central da broca, a inclinação do ângulo de ponta  $\varepsilon_r$  e o movimento da broca ao furar o corpo-de-prova.

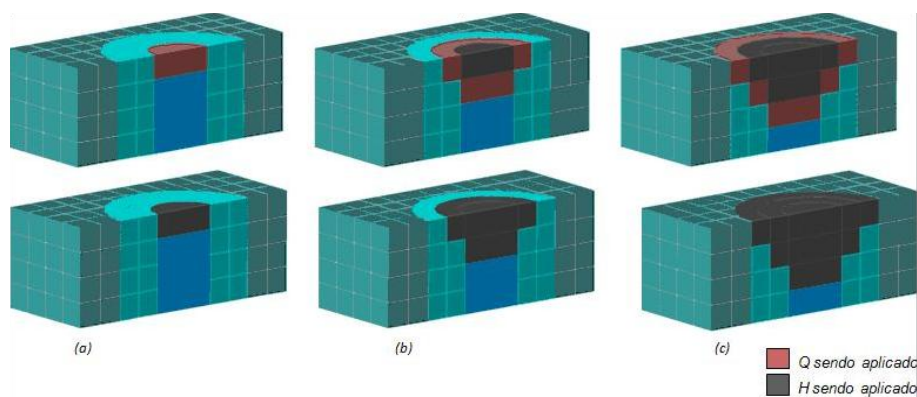


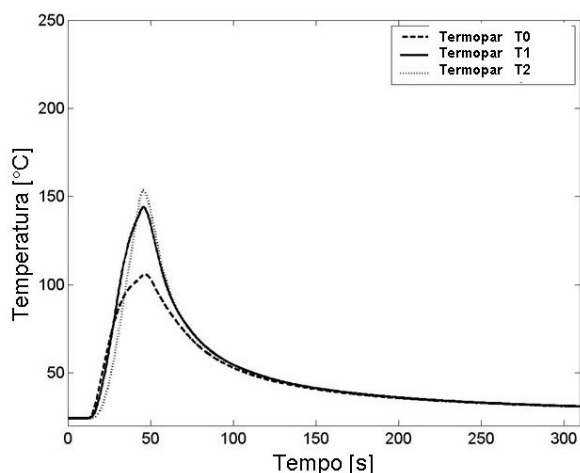
Figura 4 - Aplicação do fluxo de calor no corpo-de-prova.

Em todos os processos de simulação para minimizar o fluxo de calor “*Hflux*” e o coeficiente de convecção “*conve*” foi aplicada uma função de erro médio  $Er_{avg}$  e o Steepest Decent Method foi utilizado. Este método consiste basicamente, em estimar o primeiro ponto  $P_i$  para a função e mover para o próximo ponto  $P_{i+1}$  direção ao local do gradiente mínimo  $-\nabla Er_{avg}(P_i)$  (Flannery, Teukolsky e Vetterling, 1990). Este método foi adotado devido a sua simplicidade de localizar um mínimo local com facilidade, posicionando-se entre os valores de zero e de energia máximos.

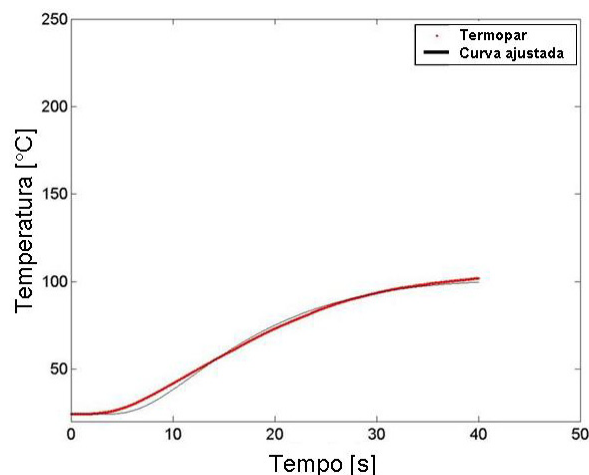
### 3. ANÁLISE DOS RESULTADOS

#### 3.1. Gráficos de temperatura - testes experimentais

A Figura (5) mostra um gráfico típico para o processo de furação. O padrão de temperatura permanece o mesmo para todos os testes experimentais variando apenas os valores dos picos de temperatura. A operação de furação levou aproximadamente 40 segundos e o tempo total até a estabilização natural da temperatura 300 segundos. O pico mais baixo de temperatura ocorreu na posição  $T_0$  posicionada a 3,0 mm do ponto de entrada da broca. A medida que a broca penetra no corpo-de-prova mais calor vai sendo produzido e acumulado no mecanismo de formação do cavaco, isto ocorre conjuntamente com o atrito das arestas secundárias de corte. Os termopares posicionados a frente da broca recebem e registram a onda de calor. Quando a ponta de broca passa pelo termopar a temperatura tende a cair, devido ao resfriamento que ocorre pelos sistemas de resfriamento aplicados nas superfícies geradas. Após um determinado tempo, a temperatura média do corpo-de-prova tende a estabilizar e diminuir até as faixas de valores de referência. A Figura (6) mostra o ajuste da curva de temperatura para os experimentos realizados com fluido em abundância.



**Figura 5 - Gráfico de temperatura para o sistema de resfriamento com fluido em abundância (Distância 0.8 mm).**



**Figura 6 - Curva ajustada para o termopar T0 (sistema de fluido em abundância)**

Como o modelo usado considera apenas o tempo de resfriamento do corpo-de-prova durante o processo de furação, desprezando o tempo de resfriamento natural, ajustes foram necessários para que o MatLAB™ encontrasse os valores de “*Q*” e “*H*” apenas durante os 40 segundos (30 segundos durante o processo de furação e 10 segundos de retorno da ferramenta). Os ajustes foram realizados para todas as posições, porém a metodologia foi aplicada separadamente para cada termopar. Os ajustes para o primeiro, segundo e terceiro termopar foram praticamente perfeitos, com erros mínimos, demonstrando que o modelo matemático foi capaz de simular o comportamento do fluxo de calor. Algumas incertezas ocorreram em função do valor do coeficiente de difusividade  $\alpha$  que foi considerado com o valor de  $8,06e^{-6}$ .

#### 3.2. Gráficos de temperatura das simulações

A Figura (7) mostra o gráfico de temperatura dos ajustes realizados com o método de elementos finitos. Da mesma forma que no método analítico, foi realizado um ajuste das curvas de temperatura considerando apenas o tempo de usinagem, ou seja, 40 segundos. Observa-se na Fig. (7) as curvas experimentais ajustadas e as curvas obtidas pelo processo de simulação que o comportamento das curvas foi bem similar, mostrando que o método de simulação foi bem robusto e consistente. O método de elementos finitos empregado não pode representar com exatidão o perfil da ponta da ferramenta, sendo desta forma desenvolvido uma metodologia que representasse esta situação na forma de escalonamentos, mesmo assim usando o método para estimar o fluxo de calor e o coeficiente de convecção, pode-se encontrar valores dentro das bibliografias de referência.

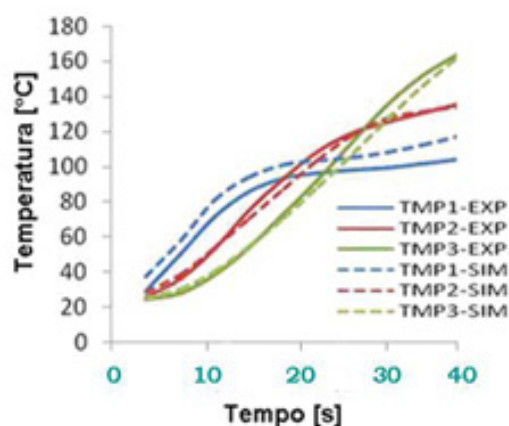


Figura 7 - Gráfico comparativo das simulações com os resultados experimentais para o processo de furação.

### 3.3. Valores do fluxo de calor e do coeficiente de convecção

A Tabela (1) mostra um quadro resumo dos valores do par fluxo de calor  $Q$  [W] e do coeficiente de convecção  $H$  [ $W.m^{-2}.C^{-1}$ ] para os dois métodos empregados. Observa-se que no modelamento matemático o valor do fluxo de calor foi dado em Joules e na rotina desenvolvida no ANSYS<sup>TM</sup> os valores de entrada de “Q” também são dados em Joules. Entretanto, dividindo-se estes valores pelo tempo do processo de furação, encontra-se os valores em Watts. Observa-se que estes valores estão coerentes com a energia disponível em um processo deste porte conforme as variáveis tecnológicas como velocidade de corte e avanço empregados.

No método de elementos finitos nota-se que os valores para o fluxo de calor ficaram acima dos valores encontrados pelo método analítico, porém nas duas situações estes valores estão coerentes com as características do processo e das bibliografias de referência. A diferença entre os dois métodos, ocorreu em função da precisão empregada na simulação, onde apenas 960 elementos foram empregados devido ao número de load steps, para uma simulação com um número maior de elementos espera-se que os valores se aproximem dos resultados encontrados no método inverso.

Em relação ao coeficiente de convecção, nota-se que os valores encontrados pelo processo de simulação apresentaram uma dispersão maior e, de acordo com Incropera e Dewitt (1990) os valores para o ar, por exemplo, situam-se entre 50 e 200.000  $W.m^{-2}.C^{-1}$ , assim nota-se que o método de elementos finitos conseguiu minimizar melhor os valores para o coeficiente de convecção.

Em relação ao método analítico o valor do coeficiente de convecção não teve diferenças significativas, isto ocorreu devido este valor ser representado pela letra “v” no modelo matemático e estar posicionado no expoente de Eq. (14), alterando muito pouco o comportamento da curva que sofre maior influência do valor do fluxo de calor que é representado pela letra “Q” no modelo. Pode-se considerar que a sensibilidade da curva é pouco afetada pelo coeficiente do termo exponencial. Para o modelo matemático os erros também foram bem maiores devido aos valores do coeficiente de convecção, apesar do ajuste ter sido perfeito como demonstrado na Fig. (6), o valor do erro é calculado de acordo com o par de valores “Q” e “H”, sendo influenciado desta forma, pelo comportamento do valor do coeficiente de convecção.

Tabela 1. Resumo dos valores do fluxo de calor e do coeficiente de convecção utilizando os métodos de elementos finitos e método numérico.

		Simulação				
Sistema de resfriamento	Seco	Erro (%)	MQL	Erro (%)	Fluido em abundância	Erro (%)
Valor de Q [W]	1,30	9,20	1,00	9,70	1,20	6,70
Valor de H [ $W.m^{-2}.C^{-1}$ ]	150,00		300,00		1100,00	
		Método Analítico				
Sistema de resfriamento	Seco	Erro (%)	MQL	Erro (%)	Fluido em abundância	Erro (%)
Valor de Q [W]	0,86	20,20	0,49	12,50	0,46	23,60
Valor de H [ $W.m^{-2}.C^{-1}$ ]	20200,27		20442,13		19857,06	

#### 4. CONCLUSÕES

Através das análises dos resultados obtidos nas simulações usando elementos finitos e o método inverso de condução de calor, pode-se concluir que:

- ✓ As curvas de temperatura geradas pelo método de elementos finitos e pelo método inverso de condução de calor, representaram bem o comportamento da temperatura dentro do tempo de furação, independente do processo de resfriamento empregado;
- ✓ Os valores de “Q” entre 1 e 1,3 Watts definidos pelo método de elementos finitos e 0,46 a 0,86 para o método inverso de condução de calor são coerentes com as referências da área de usinagem que define a energia transferida para a peça como sendo aproximadamente 10% da energia total do processo;
- ✓ Os valores dos coeficientes de convecção encontrados pelo método de elementos finitos foram mais coerentes que os valores definidos pelo método inverso de condução de calor, apesar de nos dois métodos os valores se situaram dentro da faixa teórica proposta pelas bibliografias de referência, os valores definidos pelo método de elementos finitos ficaram mais dispersos, situando-se dentro de uma faixa de abrangência maior;
- ✓ Os erros de comparação entre os experimentos e as simulações podem ser considerados muito bons, devido ao fato de estarem abaixo de 10%, considerando-se que o modelo teórico só pode ser realizado com 1000 elementos devido às limitações do software empregado;
- ✓ Considerando os erros do método inverso de condução de calor nota-se erros maiores, devido ao fato destes serem mais influenciados pelo comportamento do coeficiente de convecção. O método de elementos finitos apresenta-se como uma excelente ferramenta de simulação para este estudos de caso, onde a medida que se aumenta o número de elementos, a precisão do método tende a aumentar e melhorar a resposta e os resultados obtidos.

#### 5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a SANDVIK pelo fornecimento do ferramental e a GERDAU Aços Especiais Piratini pelo fornecimento do aço AISI H13.

#### 6. REFERÊNCIAS

- Abukhshim, N. A.; Mativenga, P. T.; Sheikh, M. A. 2006. “Heat generation and temperature in metal cutting: a review and implications for High Speed Machining”. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. v.46, n.7/8, p. 782-800, Jun.
- Agapiou, J.S.; Stephenson, D.A., 1994, “Analytical and Experimental Studies of Drilling Temperatures”. *ASME – Journal of Engineering for Industry*. v. 116, p. 54-60.
- Beck, J.V.; Blackwell, B.; Clair Jr., R.S.C., 1985, “Inverse Heat Conduction Problems – Ill Posed Problems”. *Wiley Interscience*.
- Bono, M.; Ni, J., 2002, “A model for predicting the heat flow into the workpiece in dry drilling”. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. v. 124. p. 773-777.
- Carslaw, H. S.; Jaeger, J.C. 1957. “Conduction of Heat in Solids”. 2.ed. London: Oxford.
- Devries, M.F.SAXENA, U.; WU, S.M, 1968, “Temperature Distribution in Drilling”. *ASME, Journal of Engineering for Industry*. v.90, p. 231-238.
- Gonçalves, C.V.; Scotti, A.; Guimarães, G. 2002. “Inverse technique applied in welding: A theoretical and experimental approach”. 4th International Conference on Inverse Problems in Engineering. Rio de Janeiro. Brasil.
- Incropera, F. P.; Dewitt, D. P. *Fundamentals of heat and mass transfer*. New York : Wiley, 3rd ed, 1990.
- Kalidas, S.; Kapoor, S.G.; Devor, R.E., 2002, “Influence of Thermal Effects on Hole Quality in Dry Drilling, part 1: A Thermal Model of Workpiece Temperatures”. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. v. 124, p.258-266.
- Komanduri, R; Hou, Z.B. 2000. “General Solutions for stationary/moving plane heat source problems in manufacturing and tribology”. *International Journal of heat and Mass Transfer*, v. 43, n.10/15, p.1679-1698, May.
- Lowen, E.G.; Shaw, M.C., 1954, “On the analysis of Cutting Tool Temperatures”. *Transactions of ASME*. v.76, p. 217-231.
- Mills, B.; Mottishaw, T. Chrisholm, A., 1981, “The Application of Scanning Electron Microscopy to The Study of Temperature and Temperature Distributions in M2 High Speed Twist Drills”. *CIRP Ann*. v. 30, p. 15-20.
- Ming, C.; Fanghong, S.; Haili, W.; Renwei, Y., Zhenghong, Q.; Shuqiao, Z. 2003. “Experimental research on the dynamic characteristics of the cutting temperature in the process of high speed milling”. *Journal of Materials Processing Technology*. Amsterdam, v.138. n.1, p.468-471, July.
- Ohadi, M. M.; Cheng, K. L. 1993. “Modeling of temperature distributions in the workpiece during abrasive waterjet machining”. *Journal of Heat Transfer – Transactions of the ASME*. vol. 115, p. 446-452, May.
- Thangaraj, A.; Wright, P.K.; Nissle, M., 1984, “New Experiments on the Temperature Distributions In Drilling”. *Journal of Engineering for Industry*. v. 106, p. 242-247.
- Watanabe, K.; Yokoyama, K. Ichimiya, R., 1977, “Thermal Analyses of the Drilling Process”. *Bulletin of Japan Society Precision Engineering*. v. 11, p.71-77.



## 7. DIREITOS AUTORAIS

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

### **DEFINITION OF THE HEAT FLUX AND CONVECTION COEFFICIENT IN DRILLING PROCESS COMPARING THE ANALYTICAL METHODOLOGY AND FINITE ELEMENTS**

Lincoln Cardoso Brandão, [lincoln@ufsj.edu.br](mailto:lincoln@ufsj.edu.br)<sup>1</sup>  
Frederico Ozanan Neves, [fred@ufsj.edu.br](mailto:fred@ufsj.edu.br)<sup>1</sup>  
Reginaldo Teixeira Coelho, [rtcoelho@sc.usp.br](mailto:rtcoelho@sc.usp.br)<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Federal University of São João del Rei, Praça Frei Orlando, 170 – Centro

<sup>2</sup>Engineering School of São Carlos EESC/USP, Av. Trabalhador São-carlense, 400 – Centro

**Abstract:** *The heat generated during the cutting process is one of the main responsible factors for low the efficiency in the machining. Thus, the monitoring and the defining of the best conditions of lubrication in the drilling process are important in the definition of the tool life. Hardened workpieces had had its temperature values monitored using the technique of embedded thermocouple. Two cooling systems; flooded and Near Dry Machining had been used to minimize the temperature of cutting during the process and to compare with the dry drilling. Two techniques had been used to define the heat flux during the process; the finite elements method and an analytical methodology. Comparing the experimental and theoretical values of temperature it was possible to define the lesser error and, thus to find the heat flux and the convection coefficient of the cooling systems. The two employed methods had revealed efficient for the definition of the heat flow, being the results of the finite elements method superior in the definition of the values of the convection coefficient.*

**Key-words:** *Inverse Heat Conduction Method; Heat flux; Convection Coefficient; Finite Elements Methodology; Drilling.*