



## ESTUDO DA FORMAÇÃO DE TRINCAS TÉRMICAS EM FERRAMENTAS DE USINAGEM NO PROCESSO DE FRESAMENTO

Denis Sales Lopes<sup>1</sup>, Rafael Martins Barragan Loy<sup>2</sup>, Márcio Bacci da Silva<sup>3</sup>

Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Mecânica

(1) [salesmass@yahoo.com](mailto:salesmass@yahoo.com), (2) [loy@triang.com.br](mailto:loy@triang.com.br), (3) [mbacci@meccanica.ufu.br](mailto:mbacci@meccanica.ufu.br) - Uberlândia, MG, Brasil

**Resumo.** Os estudos sobre falha em ferramentas de corte, especificamente no processo de usinagem com corte interrompido, revelam que a variação cíclica de temperatura é um dos fatores dominantes nos mecanismos de desgaste e falha. As temperaturas desenvolvidas na ferramenta no corte interrompido variam ciclicamente, aumentando durante o tempo ativo e diminuindo durante o tempo inativo. Esta flutuação cíclica da temperatura na interface cavaco-ferramenta leva a uma modificação, também cíclica, da distribuição de tensão na região de corte da ferramenta, o que pode provocar a formação de trincas térmicas por fadiga. Estas trincas, que são consideradas de origem térmica, se transformam em sulcos, conhecidos como sulcos desenvolvidos em forma de pentes. Neste trabalho a variação cíclica de temperatura na ferramenta é simulada utilizando como fonte de calor chama de oxiacetileno para aquecer a região na ferramenta que corresponderia ao contato cavaco-ferramenta. O sistema desenvolvido permite regular potência, tempo ativo e tempo inativo. Com isto o ciclo térmico na ferramenta é simulado sem a influência de esforços mecânicos. A temperatura na superfície da ferramenta é medida simultaneamente. A distribuição de temperatura, o ciclo térmico na ferramenta de usinagem, os gradientes de temperatura e taxas de resfriamento são simulados através do método de elementos finitos.

**Palavras-chave :** Trincas térmicas, Corte interrompido, Simulação numérica

### 1. INTRODUÇÃO

A influência da temperatura na vida de uma ferramenta de usinagem tem sido objeto de estudo em muitos trabalhos da área de usinagem. Quando a operação é contínua, como no caso do torneamento, a temperatura influencia o desgaste da ferramenta através de, basicamente, três mecanismos de desgaste (Trent, 1991): cisalhamento superficial, deformação plástica e difusão.

As ferramentas utilizadas no corte interrompido, como no caso do fresamento, são frequentemente rejeitadas por lascamento, trincamento ou quebras. Neste tipo de operação o desenvolvimento do desgaste progressivo através de um dos mecanismos citados no parágrafo anterior, na superfície de folga ou saída da ferramenta, será dominante apenas se o material da ferramenta possuir tenacidade suficiente para resistir aos choques mecânicos e térmicos

inerentes a tais processos. No corte interrompido, uma aresta de corte pode sofrer avarias na entrada, no meio ou na saída do corte, durante um ciclo (ou revolução) da ferramenta.

O papel desenvolvido pela temperatura na falha da ferramenta de corte é bem conhecido. As temperaturas num corte interrompido flutuam ciclicamente, aumentando durante o tempo ativo na aresta de corte e diminuindo durante o tempo inativo. Segundo Palmi (1987), a variação cíclica da temperatura na ferramenta será semelhante ao gráfico ilustrado na figura 1.

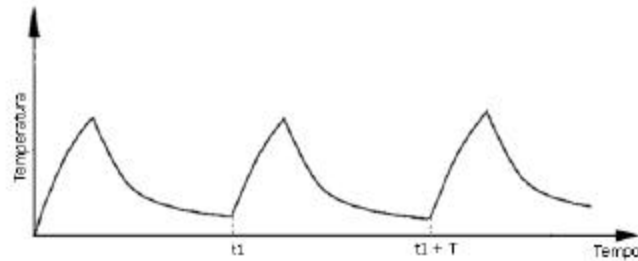


Figura 1 - Variação cíclica da temperatura de corte no processo de corte interrompido, (adaptado de Palmi, 1987).

Resultados de investigações das condições térmicas mostraram que a distribuição de temperatura depende das condições de corte (principalmente da velocidade de corte, avanço e da relação entre o tempo inativo de um ciclo), do material da ferramenta de corte e do material da peça (Wang *et al*, 1969; Crakraverti, *et al*, 1984; Bathia *et al*, 1986).

A flutuação cíclica da temperatura na interface cavaco-ferramenta leva a uma modificação, também cíclica, da distribuição de tensão na região de corte da ferramenta, o que pode provocar a formação de trincas térmicas.

De acordo com Ferraresi (1977), a figura 2 apresenta as curvas de distribuição de temperatura e tensão em relação à profundidade  $x$ , a partir do ponto de contato cavaco-ferramenta. A camada superficial, a uma temperatura bastante alta, se dilata. Porém, as camadas subsequentes a temperaturas inferiores, terão uma dilatação bem menor. Como consequência, tais camadas impedirão o processamento de uma dilatação maior na camada superficial. Desta forma origina-se na camada superficial (camada de contato cavaco-ferramenta) tensões de compressão. Em consequência disto, haverá, a uma determinada distância  $x$  das superfícies de contato, tensões de tração. Num instante de tempo seguinte, com a variação da temperatura de corte, isto é, com o resfriamento da camada de contato (devido ao tempo inativo), essa camada estará submetida à tração, enquanto que as camadas subsequentes passarão a ser solicitadas à compressão.

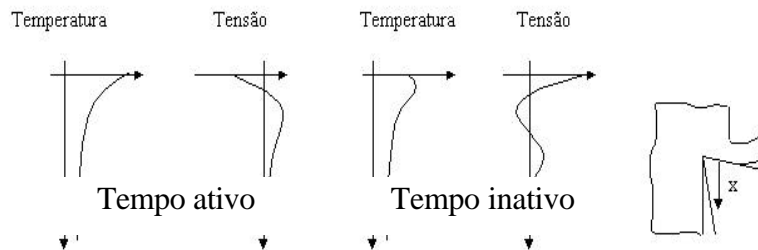


Figura 2 - Distribuição de temperatura e tensões no corte interrompido, Ferraresi (1977).

Essa flutuação cíclica da tensão promoverá o aparecimento de trincas térmicas por fadiga nas ferramentas de metal duro (as ferramentas de aço-rápido têm tenacidade suficiente para suportarem as variações de tensão, sem a nucleação de trincas). Essas trincas levarão ao desenvolvimento do que se conhece por sulcos desenvolvidos em forma de pentes

“combracks”). A figura 3 mostra uma ferramenta de metal duro utilizada no fresamento com as trincas térmicas.

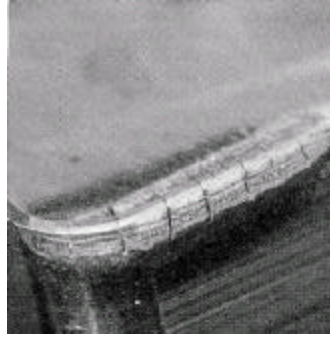


Figura 3 - Trincas térmicas numa ferramenta de metal duro, Metals Handbook (1989).

## 2. SIMULAÇÃO TEÓRICA E NUMÉRICA

A geração de calor no corte interrompido é intermitente e, portanto, o fluxo de calor é variável. A ferramenta é aquecida intermitentemente devido ao contato com o cavaco (e peça) durante o corte. Quando a ferramenta está usinando a peça, o calor gerado devido ao contato do cavaco com a ferramenta eleva a temperatura da mesma. É formado então um gradiente de temperatura, que depende das condições de corte e materiais da peça e ferramenta (Trent, 1991). Quando a ferramenta interrompe o corte, a temperatura cai subitamente devido à ausência da fonte de calor e a troca de calor por condução e convecção forçada. Há então uma redistribuição de temperatura na ferramenta. Neste processo a temperatura da ferramenta aumenta e diminui ciclicamente.

A importância do conhecimento da distribuição de temperatura, do gradiente de temperatura, da taxa de resfriamento e do comportamento transiente motivou a simulação deste fenômeno através do método de elementos finitos.

Uma ferramenta de fresamento foi modelada em 3D utilizando um elemento térmico sólido cúbico com oito nós, como ilustra a figura 4. As dimensões do modelo da ferramenta são:  $w=12,5\text{mm}$ ,  $c=12,5\text{ mm}$  e  $h= 5,0\text{ mm}$ . Foi aplicado um fluxo de calor  $Q= 20.10^6\text{ J/m}^2.s$  variável com tempo de acordo com o gráfico da figura 4, na área de interface cavaco-ferramenta (área escura da figura 4). O ciclo dura 1,5s, onde o calor é aplicado durante 0,466s ( $t_a$ ) e o tempo de resfriamento é de 1,033s ( $t_{res}$ ). Estes valores foram adotados de acordo com a simulação experimental. Todas as outras superfícies receberam um fluxo convectivo constante, onde adotou-se o coeficiente de transferência convectiva  $h=20,0\text{ W/m}^2.^\circ\text{C}$ .

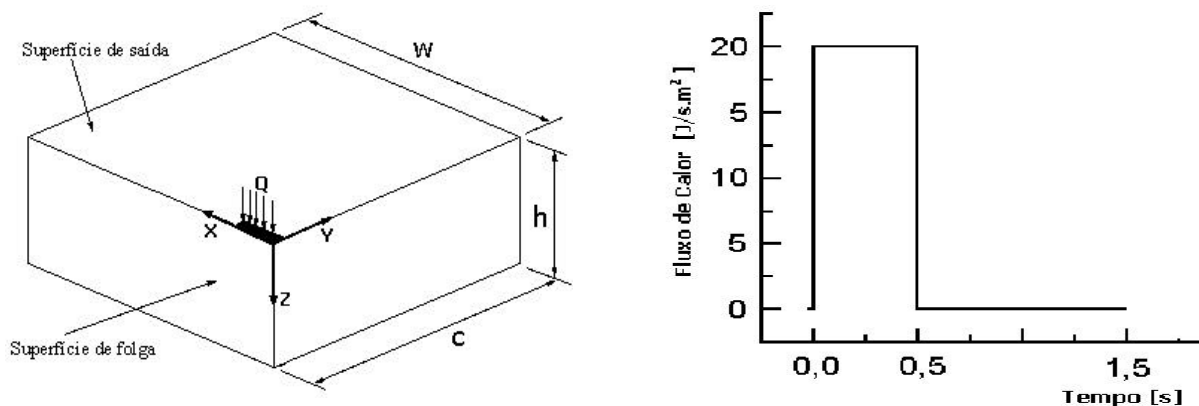


Figura 4 – Posição de aplicação do fluxo de calor na ferramenta e característica dinâmica do fluxo de calor.

A tabela 1 mostra algumas propriedades do metal duro (WC+Co) encontradas na literatura e que foram utilizadas para esta simulação.

Tabela 1 - Propriedades térmicas e mecânicas da pastilha de metal duro, Kakino *et al.* (1984).

Prop. à 100 °C	K	H	Cp	$\rho$	E
	W/m.°C	W/m <sup>2</sup> .°C	J/Kg.°C	Kg/m <sup>3</sup>	Gpa
WC+ Co	38 à 80	20	200	15000	500
Cp: calor específico $\rho$ : densidade    E: Módulo de elasticidade					

Neste estudo adotou-se a condutividade térmica do metal duro igual a 75 W/m.°C.

## 2.1 Resultados da Simulação Numérica

Os resultados da simulação são apresentados através da distribuição de temperatura ao final do período de aquecimento(a) e ao final do período de resfriamento(b) na figura 5, considerando um ciclo completo (tempo ativo + tempo inativo = 0,466s + 1,333 s = 1,5 s ). O instante do tempo, correspondente a distribuição de temperatura apresentada, é definido no gráfico postado no lado direito superior da figura.

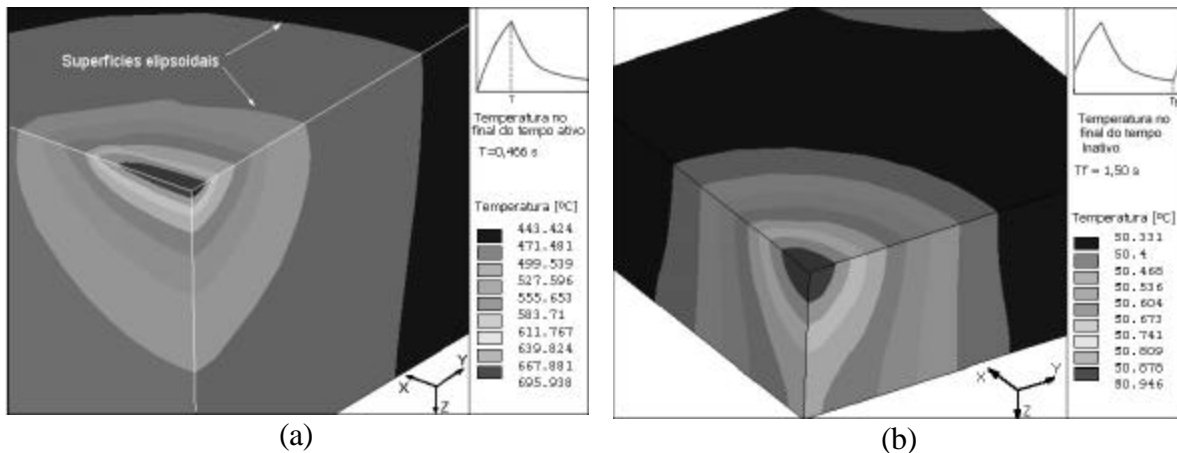


Figura 5 – Distribuição de temperatura na ferramenta: a)final do tempo ativo T=0,466s, b)final do tempo inativo Tf=1,5s.

A figura 6 permite verificar a variação de temperatura em duas direções: z e y, da fig. 4.

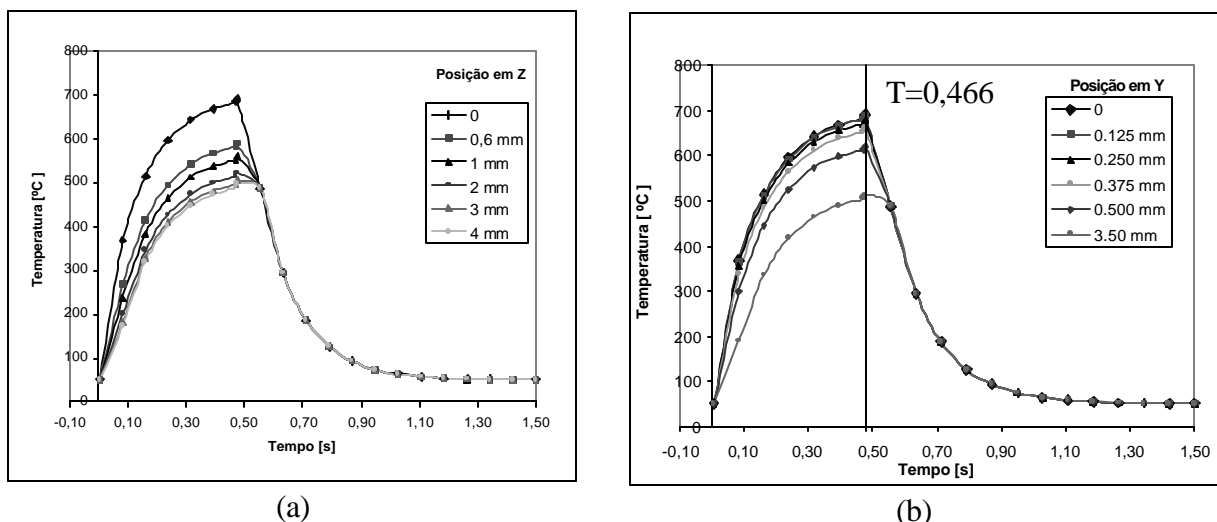


Figura 6 – Variação transiente da temperatura durante um ciclo completo: a) superfície de folga na direção z, b) superfície de saída na direção y.  $t_a=0,466s$  e  $t_{res}=1,033s$ .

A figura 5 pode ser interpretada como a representação de único instante no tempo na figura 6. No caso foram utilizados o instante  $t=0,466s$  (5a) e  $t=1,5s$  (5b) devido a representatividade destes. Na figura 5a, apresenta-se visualmente no eixo y a diferença de temperatura entre os pontos ao longo da linha  $t=0,466s$  da fig.6b. Da mesma forma  $t=0,466s$  da fig.6a representa o eixo z da fig.5a.

A figura 6 mostra a variação da temperatura em várias posições da ferramenta: na direção z em (a) e na direção y em (b). A posição  $z = 0$  representa a variação de temperatura que ocorre na superfície de saída da ferramenta. Neste ponto a temperatura máxima, de acordo com a simulação, atinge aproximadamente  $700^{\circ}C$ . A  $0,6mm$  abaixo da superfície de saída a temperatura máxima atinge aproximadamente  $600^{\circ}C$ . Na superfície inferior da ferramenta a temperatura máxima é em torno de  $500^{\circ}C$ . Estes resultados sugerem que o gradiente de temperatura é maior à medida que se aproxima da superfície que está em contato direto com a fonte de calor. Além disto a taxa de aquecimento e resfriamento depende da posição em z, como pode ser observado pela inclinação das curvas.

As curvas mostradas na figura 6 são semelhantes à variação cíclica da temperatura proposto por Palmi (1987), ilustrado na figura 1.

### 3. SIMULAÇÃO EXPERIMENTAL

Com o intuito de evidenciar os resultados numéricos foram realizados testes experimentais utilizando um sistema de variação de fluxo de calor e resfriamento.

A finalidade deste sistema é a possibilidade de variar ciclicamente a temperatura da superfície de saída da ferramenta, na região de contato com o cavaco (quando se utiliza a ferramenta numa operação de usinagem) sem contudo sujeitar a ferramenta a choques mecânicos, o que ocorre num corte interrompido. O fluxo de calor deve ser aplicado ciclicamente para que se simule uma variação térmica (aquecimento durante o período ativo e resfriamento durante o período inativo) que ocorre num processo de corte interrompido como no fresamento por exemplo.

O sistema utilizado aplica um fluxo de calor constante da mesma ordem de grandeza do calor gerado numa operação de usinagem e que foi utilizado na simulação numérica ( $20 \cdot 10^6 J/m^2 \cdot s$ ), e ainda permite a variação do tempo ativo e inativo. A temperatura máxima atingida pela ferramenta, assim como a variação de temperatura são os principais parâmetros a serem controlados. A temperatura na ferramenta é medida em diferentes posições através de termopar padrão cromel-alumel inserido na mesma através de furos obtidos pelo processo de usinagem por ultra-som, com diâmetro de aproximadamente  $0,5mm$ .

#### 3.1 Sistema de variação cíclica do fluxo de calor

O sistema de variação do fluxo de calor é composto de uma chama de oxi-acetileno, um bico conectado a uma bomba de fluido refrigerante, duas placas circulares de cobre e suporte da pastilha, ilustrado na figura 7.

A ferramenta é estacionária entre as duas placas de cobre que giram a determinada rotação. Cada placa de cobre possui uma abertura que permite o contato da ferramenta com a fonte de calor ou com o fluido de corte. A dimensão das aberturas juntamente com a rotação determinam o tempo ativo e inativo da ferramenta, ou seja, o tempo de aquecimento e o tempo de resfriamento. O conjunto é preso na placa de um torno que fornece a rotação para as placas. Neste trabalho não foi utilizado fluido de corte.

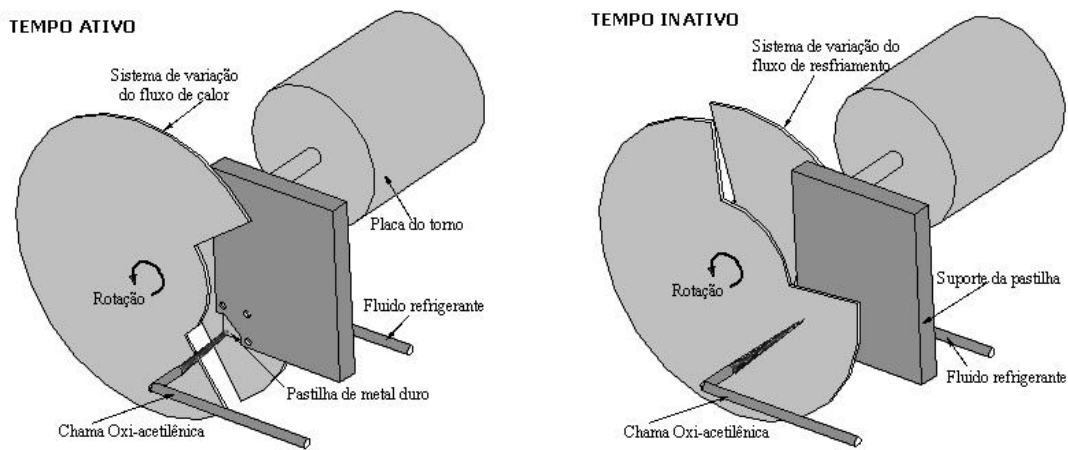


Figura 7 - Disposição do sistema de variação de fluxo de calor durante o tempo ativo.

### 3.2 Resultados experimentais

Os resultados dos ensaios com sistema de aquecimento por chama de oxi-acetileno são apresentados nas figuras 8 e 9. A figura 8 mostra a variação da temperatura na superfície de saída da ferramenta para um ensaio onde o tempo ativo foi de 0,466s e o tempo de resfriamento de 1,033s. Observa-se que a temperatura máxima aumenta com o tempo e após 8 segundos de teste está em torno de 350°C, enquanto que a temperatura mínima é aproximadamente 100°C. Uma taxa de resfriamento de 167°C/s aproximadamente.

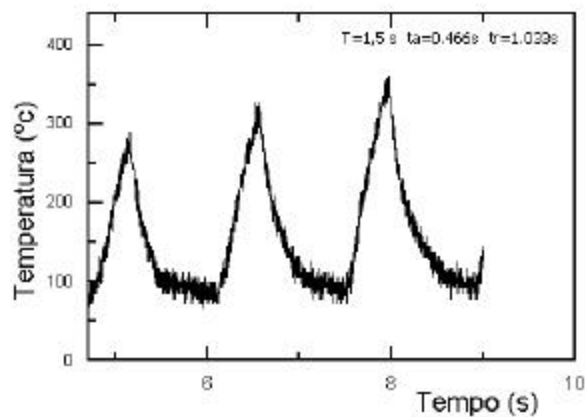


Figura 8 - Variação cíclica da temperatura

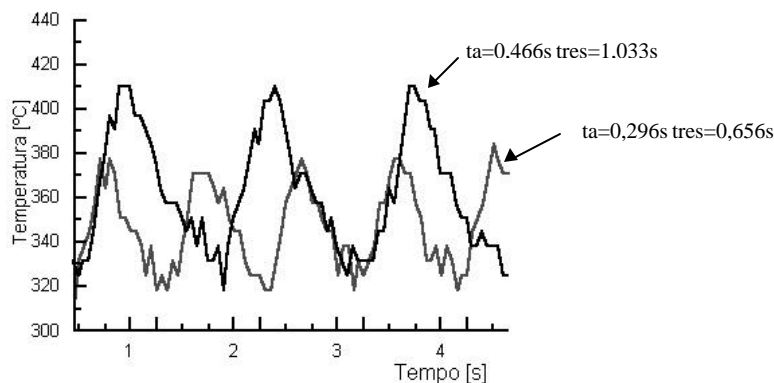


Figura 9 - Efeito do tempo de aquecimento e resfriamento na variação da temperatura

Os valores dos tempos de aquecimento e resfriamento foram conseguidos com uma rotação de 40rpm. Para uma operação de fresamento com uma fresa de 100mm de diâmetro esta rotação representa uma velocidade de corte de 10m/min. Foi necessário utilizar este valor muito baixo devido ao tempo de resposta do termopar utilizado para medir temperatura (100ms).

A figura 9 compara o comportamento da temperatura com o aumento da rotação, ou seja, diminuição dos tempos ativos e inativos. A rotação utilizada foi de 63rpm. Pela figura observa-se que a temperatura máxima diminui e a temperatura mínima praticamente não se altera.

#### **4. DISCUSSÃO**

Os resultados numéricos apresentaram divergência quantitativa dos resultados experimentais. Enquanto a temperatura máxima atinge aproximadamente 700° C no modelo numérico, na simulação experimental fica em torno de 350° C. Acredita-se que esta divergência esteja relacionada com a dificuldade em determinar o fluxo de calor correto aplicado na ferramenta e também ao alto tempo de resposta do termopar (100 ms) em relação a duração do fenômeno (466 ms). Este fato limitou o ciclo em 1,5s utilizado neste trabalho. Aumentando a rotação das placas de cobre o termopar tende a indicar uma temperatura constante. No entanto é importante observar que os dois modelos, numérico e experimental, sugerem uma variação cíclica da temperatura muito semelhante ao proposto na figura 1.

A figura 6 mostra que a temperatura máxima na superfície de saída da ferramenta, posição 0, atinge 700°C, enquanto que na posição 0,6mm abaixo da superfície de saída, a temperatura é um pouco menor que 600°C. Este gradiente é muito importante no mecanismo de formação das trincas. Quanto maior o gradiente de temperatura maior deverá ser a possibilidade do surgimento das trincas. Este gradiente depende da posição em z. Ainda segundo a figura 6, a taxa de resfriamento da ferramenta é de aproximadamente 400°C/s (comparado com 167° C/s no ensaio experimental).

Os resultados da figura 9 devem ser analisados com cautela. A intenção foi mostrar o efeito do aumento da velocidade de corte, através do aumento da rotação. No entanto, o fluxo de calor permanece constante, o que não acontece quando se aumenta a velocidade de corte no processo real de usinagem. Além disto, com o aumento da rotação o tempo de resposta do termopar começa a influenciar ainda mais nos resultados.

Foram realizados ensaios de usinagem com duas pastilhas: uma ciclada termicamente e outra não ciclada. Em ambos os casos surgiram trincas térmicas. No entanto o desgaste de flanco da pastilha ciclada foi cerca de cinco vezes maior que o da ferramenta não ciclada, além de apresentar menor número de trincas. Acredita-se que isto seja decorrente de uma alteração da tenacidade promovida pela variação cíclica da temperatura. Este resultado pode sugerir o efeito do fluido de corte no número de trincas no fresamento. Observa-se que o fluido de corte pode aumentar o número de trincas num processo de fresamento. Isto é atribuído ao fato do fluido aumentar a diferença de temperatura na ferramenta, entre o tempo ativo e inativo. Os resultados do ensaio com a pastilha submetida previamente a variação cíclica de calor, sugerem que o fluido de corte pode atuar para manter a ferramenta a uma temperatura menor e assim manter sua tenacidade e por isto sofrer um maior número de trincas quando se utiliza fluido de corte. Estes fatos serão investigados em trabalhos futuros.

#### **5. CONCLUSÕES**

As seguintes conclusões podem ser obtidas deste trabalho:

- A modelagem numérica da ferramenta representou satisfatoriamente, de forma qualitativa, o comportamento térmico transiente desta. Entretanto, quantitativamente houveram diferenças consideráveis em decorrência da incerteza quanto as propriedades térmicas da ferramenta e quanto ao fluxo de calor aplicada a esta. Apesar disto a distribuição tridimensional da temperatura na pastilha permite analisar a propagação do fluxo de calor e a formação das superfícies elipsoidais.
- Apesar das diferenças quantitativas entre a simulação numérica e experimental, observa-se que os resultados sugerem um modelo de variação de temperatura semelhante ao proposto na figura 1.

## REFERÊNCIAS

- Bathia, S.M.; Pandey, P.C.; Shaw, H.S., 1986, The Thermal Conditions of the Tool Cutting Edge in Intermittent Cutting, *Wear*, vol. 61, pp 21-30.
- Crakraverti, G.; Pandey, P.C.; Mehta, N.K., 1984, Analysis of Tool Temperature Fluctuation in Interrupted Cutting, *Precision Engineering*, vol. 6, n 2, April, pp 99-105.
- Ferraresi, D., 1977, *Fundamentos da Usinagem dos Metais*, Editora Edgard Blucher Ltda, São Paulo.
- Kakino, Y.; Shoda, M.; Hashitani, M.; Fujiwara, A., 1984, A Study on the Generation of Thermal Crack of Cutting Tool, *Proceeding of 5<sup>th</sup> International Conference of Production Engineering*, Tokyo, pp 161-167.
- Metals Handbook*, 1989, volume 16, Machining, 9 ed., ASM International.
- Palmai, Z., 1987, Cutting Temperature in Intermittent Cutting, *International Journal of Machine Tools Manufacture*, vol. 27, n 2, pp 261-274.
- Trent, E.M., 1991, *Metal Cutting*, Butterworths-Heinemann Ltd, 3<sup>d</sup> edition, ISBN 0-7506-1068-9.
- Wang, K.K.; Tsao, K.C.; Wu, S.M., 1969, Investigation of Face-Milling Tool Temperature by Simulation Techniques, *Journal of Engineering for Industry*, August, pp 772-780.

**Abstract.** *Tool temperature in interrupted cutting operation changes in a cyclic manner, increasing when the tool is in contact with the workpiece and decreasing when the tool leaves the cutting zone. This cyclic variation of the temperature leads to a also cyclic variation of the strength in the tool due to dilation and contraction, this can cause thermal cracks by fatigue. In this work the temperature variation of the tool is simulated without mechanical strength using a system that uses a welding flame to heat the tool. The system allows adjust of the time the tool is receiving heat and the time the tool is cooling. The temperature is measured simultaneously and a curve is obtained that shows the temperature variation on the tool surface. A finite element method is also used to simulate the temperature distribution in the tool. The results suggest the same shape of temperature variation curve predicted in the literature.*