

## COMPARAÇÃO ENTRE A MEDIÇÃO EXPERIMENTAL E A ESTIMATIVA NUMÉRICA DA TEMPERATURA NA REGIÃO DE FORMAÇÃO DE CAVACOS NA USINAGEM DE UMA LIGA DE ALUMÍNIO

Frederico de Castro Magalhães, [fredmag@br.inter.net](mailto:fredmag@br.inter.net)<sup>1</sup>  
Davidson Santos Carvalho, [davidson@demec.ufmg.br](mailto:davidson@demec.ufmg.br)<sup>1</sup>  
Juan Carlos Campos Rúbio, [juan@demec.ufmg.br](mailto:juan@demec.ufmg.br)<sup>1</sup>  
Alexandre Mendes Abrão, [abrao@demec.ufmg.br](mailto:abrao@demec.ufmg.br)<sup>1</sup>  
Haroldo Béria Campos, [beriacampos@uol.com.br](mailto:beriacampos@uol.com.br)<sup>1</sup>  
Paulo Roberto Cetlin, [pcetlin@demet.ufmg.br](mailto:pcetlin@demet.ufmg.br)<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Minas Gerais, Av. Antônio Carlos, 6627, Campus da Pampulha, Belo Horizonte, Minas Gerais, Cep. 31270-901.

<sup>2</sup> Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal de Minas Gerais, Rua Espírito Santo, 35, 2º andar, Belo Horizonte, Minas Gerais, Cep. 30160-030.

**Resumo:** A geração de calor e a temperatura de corte de metais tem sido extensivamente estudadas usando técnicas experimentais, analíticas e numéricas ao longo dos tempos. Tais estudos são de grande importância, pois estes parâmetros são determinantes em relação à vida da ferramenta, escolha de materiais, parâmetros de corte e nas propriedades do item usinado. O principal objetivo deste trabalho é comparar a temperatura de torneamento de uma liga de alumínio, variando a velocidade de corte e o avanço, utilizando o método prático por inserção de termopares e o método numérico por elementos finitos.

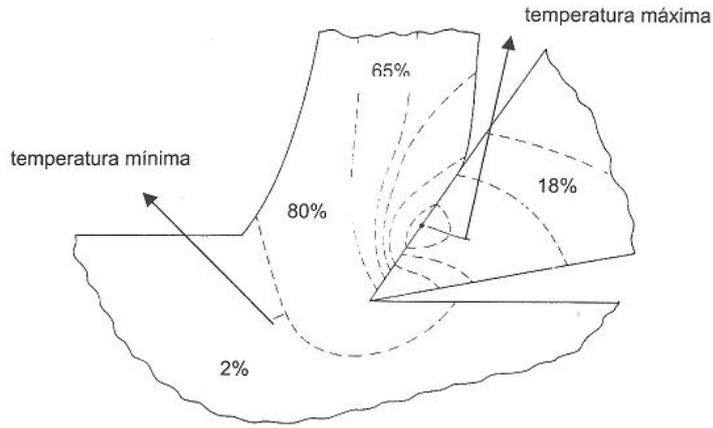
**Palavras-chave:** Temperatura de Corte, Termopar- Ferramenta-Peça, Método dos Elementos Finitos.

### 1. INTRODUÇÃO

Problemas relacionados à temperatura de corte gerada durante o processo são mais evidenciados no torneamento de aços, ferro fundido e ligas que apresentam alto ponto de fusão o que pode dificultar a remoção do material onde altas taxas de deformação são necessárias para a formação de cavaco.

Por isto na avaliação de desempenho de uma ferramenta e/ou revestimento se faz necessário entender os fatores que influenciam a geração de calor e o fluxo de distribuição de temperatura no material da ferramenta e da peça junto à aresta de corte. Conforme visualizado na Fig. (1), grande quantidade de calor fica retido no cavaco (80%), enquanto menores quantidades ficam distribuídas entre a ferramenta (18%) e a peça (2%). A temperatura máxima fica localizada na interface cavaco/ferramenta. Segundo Ezugwu (1993) e Trent (1984) as possíveis explicações para esta ocorrência se fundamentam nos seguintes argumentos:

- Ocorrência de mínima transferência de calor por radiação ou convecção devido ao curto tempo de exposição do cavaco na superfície de saída;
- Presença de uma zona de intenso cisalhamento próximo a esta região, denominada de zona de fluxo caracterizada por apresentar altas temperaturas e elevadas taxas de deformação plástica.



**Figura 1 – Representação esquemática da distribuição do calor na ferramenta de corte, material usinado e cavaco gerado**

Vários métodos, práticos e numéricos, vêm sendo desenvolvidos ao longo do tempo, com o objetivo de determinar a temperatura gerada durante o processo de torneamento. Dentre os métodos práticos mais utilizados na medição de temperatura destacam-se (Machado et al, 1998):

- Medição de calor por radiação;
- Medição da força termoeletrica entre a ferramenta e a peça;
- Medição direta por inserção de termopares na ferramenta e na peça.

Entre as técnicas numéricas modernas para a determinação da temperatura, sobressai o método de elementos finitos, que, além de determinar a distribuição da temperatura na peça, é possível também, determinar o gradiente de temperatura na ferramenta de corte e até mesmo, a temperatura no cavaco (Machado et al, 1998).

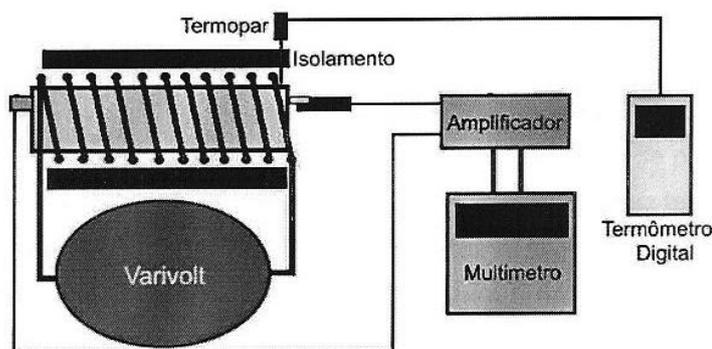
O principal objetivo deste trabalho é comparar a temperatura de torneamento de uma liga de alumínio, na região de formação de cavaco, variando a velocidade de corte e o avanço, utilizando o método prático por inserção de termopares e o método numérico por elementos finitos.

## 2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Foram utilizados os seguintes materiais para a calibração do termopar ferramenta/peça:

- Corpo de prova de liga de alumínio 6351 de  $\Phi 51 \times 270$  mm e ferramenta SANDVIK de metal duro classe N10, geometria TCGX 167308PF e porta-ferramenta STGCR 2020 K16 que combinados geram um ângulo de posição  $\chi_r = 91^\circ$ , saída  $\lambda_0 = 0^\circ$ , inclinação  $\lambda_s = 0^\circ$  e folga  $\alpha_0 = 7^\circ$ ;
- Escova de grafite;
- Base magnética para suporte da escova de grafite;
- Manta isolante de resistência até 1200 °C.

O passo inicial para os testes de torneamento consistiu na calibração do par termoeletrico formado pela peça e sua respectiva ferramenta. A partir do momento em que se vai medir a tensão gerada devido à diferença de temperatura ocasionada pela operação de corte. O maior cuidado é utilizar os mesmos materiais para a calibração quanto para os testes de torneamento. A montagem esquematizada do sistema de calibração pode ser visto na Fig. (2).



**Figura 2 – Sistema de calibração.**

Para avaliar a evolução da temperatura no processo de torneamento, foi montado um sistema de coletas de dados, conforme a Fig. (3). A principal preocupação neste tipo de montagem é garantir o isolamento da peça nas castanhas do torno, da contra-ponta e a montagem da ferramenta no torno.

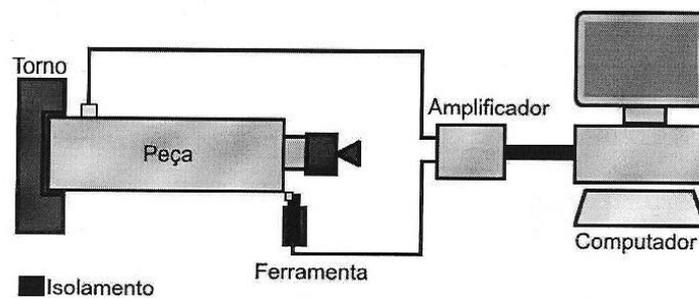


Figura 3 – Montagem do sistema para coleta de temperatura.

Para a liga de alumínio foram realizados 4 ensaios, a fim de observar a influência da velocidade de corte e do avanço na temperatura entre o material/ferramenta (Reis et al, 2004).

### 3. MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Para a modelagem numérica, por elementos finitos, do processo de torneamento faz-se o uso de duas técnicas: a Lagrangiana e a Euleriana, que são chamadas arbitrariamente de formulação Lagrangiana e Euleriana. Basicamente, as técnicas são bastante parecidas. A maior diferença, é que na formulação Lagrangiana é atribuída uma malha discretizada ao corpo de prova, e o modelo do material é elasto-plástico, apenas plástico, ou viscoplástico, enquanto que, na formulação Euleriana, é assumido um fluxo através da malha para descrever o material (Grzesik et al, 2005).

Para a modelagem do torneamento da liga de alumínio, foi utilizado o aplicativo Deform 2D, de formulação lagrangiana, com remalha automática, o que torna a simulação mais fácil. Para a modelagem do torneamento, o conjunto ferramenta/material foi reduzido a um estado de deformação plana ortogonal (Grzesik et al, 2005), conforme Fig. (4).

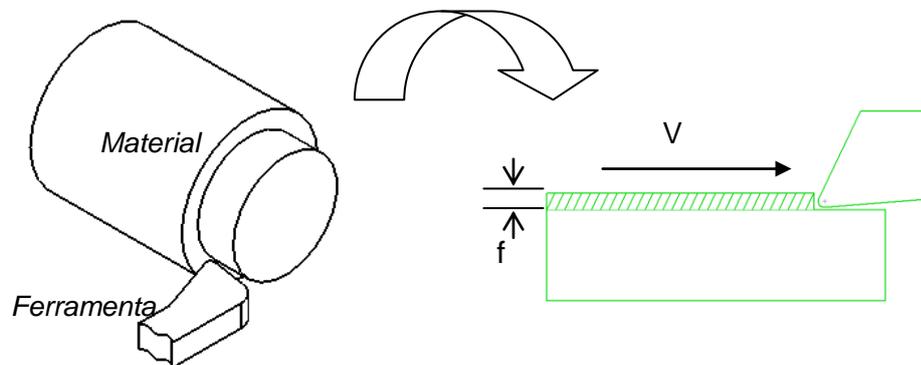


Figura 4 – Simulação do processo de torneamento.

A análise por elementos finitos pelo aplicativo DEFORM 2D é similar ao processo de forjamento, onde a ferramenta de corte é tratada como uma matriz, que penetra através do corpo de prova. O cavaco se forma pelo fluxo natural do material ao redor da ferramenta, onde o material é dividido em duas partes, uma seguindo paralelamente o ângulo de inclinação e a outra parte seguindo o ângulo de folga (Shatla et al, 2001).

A liga de alumínio foi modelada como material isotrópico e totalmente plástico, com uma malha de 6000 elementos quadrados, conforme a Fig. (5). Percebe-se que a malha é mais fina na parte superior do material, pois constitui na região onde há maior remoção do material, garantindo assim, a convergência de resultados. Uma malha mais grosseira no restante do corpo de prova, não compromete os resultados. A equação constitutiva para descrever a curva de fluxo do comportamento da liga durante o torneamento, é em função da deformação, da taxa de deformação e da temperatura,

isto é,  $\bar{\sigma}_{ef} = \bar{\sigma}(\bar{\varepsilon}_{ef}, \bar{\varepsilon}_{ef}, T)$ . Para a liga de alumínio as propriedades mecânicas e térmicas foram obtidas diretamente da biblioteca do aplicativo. Já a ferramenta de corte, foi modelada como material isotrópico e totalmente plástico, com 600 elementos quadrados, Fig. (5), tendo como material, carbeto de tungstênio sem revestimento. Novamente as propriedades mecânicas e térmicas do material foram obtidas diretamente da biblioteca do aplicativo numérico. Tendo em vista que foi considerado apenas o comportamento dos materiais no regime plástico, as propriedades elásticas não são apresentadas por serem irrelevantes no presente estudo.

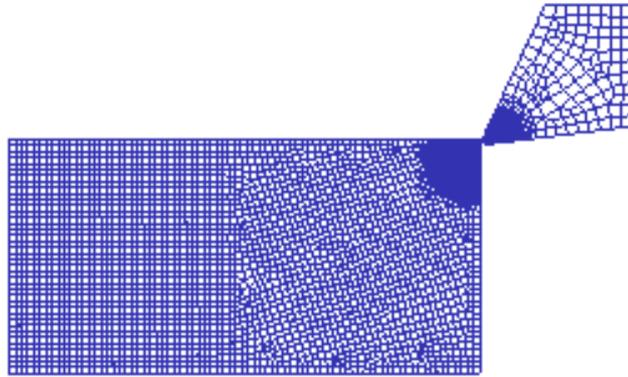


Figura 5 – Malha gerada para a liga de alumínio.

Foi utilizado o atrito cisalhante na interface ferramenta/material, com o valor de 0,1 para a liga de alumínio (Ch et al, 2004).

#### 4. TRANSFERÊNCIA DE CALOR

É comum aceitar duas fontes de geração de calor no processo de torneamento, a primeira corresponde ao trabalho proveniente da deformação plástica do material e da dissipação de calor gerado na interface ferramenta/material, os quais são praticamente convertidos em calor. Usualmente, a porcentagem da energia convertida em calor é assumida em 90%.

Para a temperatura ambiente, foi empregado o valor de 20 °C, a mesma para o material e a ferramenta de corte. De acordo com Ch et al (2004), a perda de calor por convecção para o ambiente se dá pelas superfícies que não estão em contato com a ferramenta e o material, e é dada pela Eq. (1).

$$q = h(T_w - T_0) \quad (1)$$

onde,  $T_w$  é a temperatura do material,  $T_0$  é a temperatura ambiente e  $h$  o coeficiente de transferência convectiva de calor. A Figura 6 mostra as regiões de transferência convectiva no processo de torneamento. Para as simulações foi adotado o valor de 50 Watt/m<sup>2</sup>.K para o coeficiente de convectividade térmica.

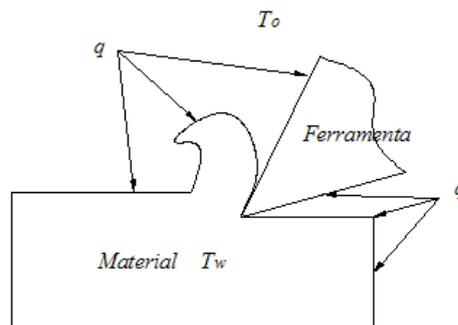


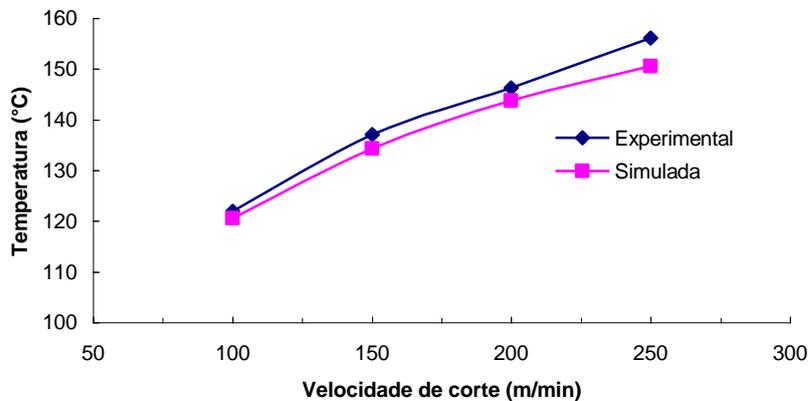
Figura 6 – Regiões de transferência de calor convectivo.

## 5. RESULTADO E DISCUSSÃO

A Tabela (1) mostra a temperatura média na interface ferramenta/material, obtidas tanto experimentalmente quanto numericamente, variando apenas a velocidade de corte. Pode ser visto que, a temperatura aumenta de uma forma linear à medida que a velocidade aumenta, Fig. 7. Isto é atribuído ao fato da taxa de remoção do material em um mesmo intervalo de tempo ser maior, fazendo com que seja maior a quantidade de calor gerado, e em consequência disto um aumento da temperatura.

**Tabela 1 - Valores da temperatura de corte experimental e simulada variando a velocidade de corte**

Vc (m/min)	ap (mm)	f (mm/volta)	Temperatura Experimental (°C)	Temperatura Simulada (°C)
100	0,5	0,2	121,9 ± 13,9	120,6
150	0,5	0,2	137,1 ± 29,0	134,3
200	0,5	0,2	146,3 ± 11,5	143,8
250	0,5	0,2	156,1 ± 6,6	150,6

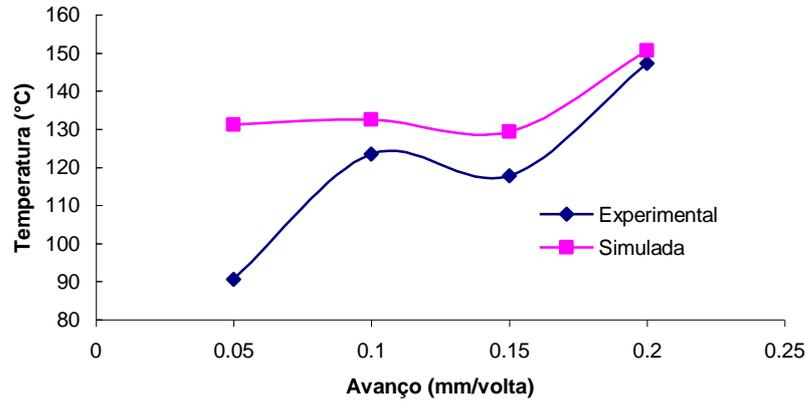


**Figura 7 – Efeito da velocidade de corte na temperatura.**

Já a Tabela (2) mostra a temperatura média na interface ferramenta/material, tanto experimentalmente quanto numericamente, variando apenas o avanço. Neste tipo de situação, a velocidade de corte foi fixada em 150 m/min e a profundidade de corte em 0,5 mm. Tais resultados indicam um aumento da temperatura de corte na interface material/ferramenta à medida que se aumenta o avanço, pois a ferramenta irá avançar uma distância maior em um mesmo intervalo de tempo, acarretando no aumento a taxa de remoção do material, e em consequência disto, da temperatura, Fig. (8).

**Tabela 2 - Valores da temperatura de corte experimental e simulada variando o avanço.**

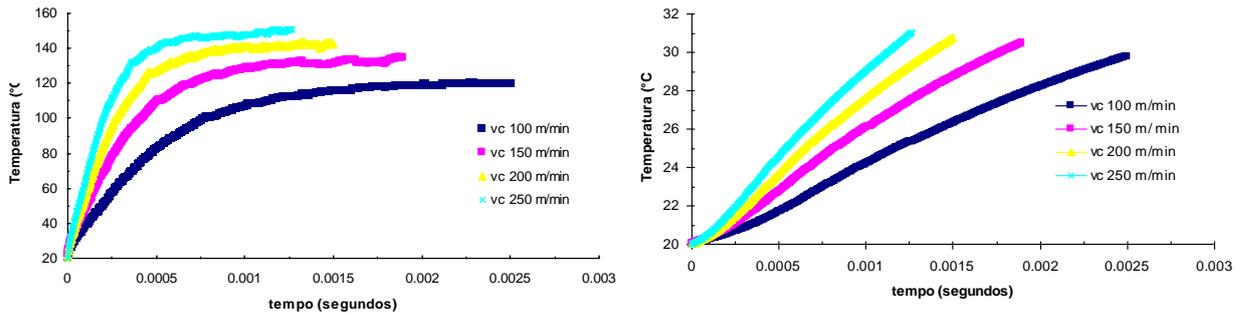
Vc (m/min)	ap (mm)	f (mm/volta)	Temperatura Experimental (°C)	Temperatura Simulada (°C)
150	0,5	0,05	90,6 ± 21,3	131,1
150	0,5	0,10	123,5 ± 13,2	132,5
150	0,5	0,15	117,7 ± 41,5	129,3
150	0,5	0,20	147,3 ± 58,6	150,6



**Figura 8 – Efeito do avanço na temperatura de corte.**

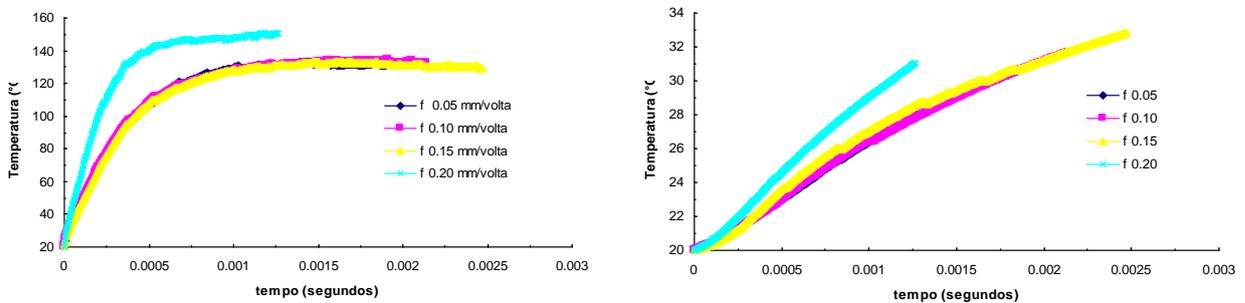
Percebe-se que há uma boa consistência entre os resultados experimentais e simulados, exceto para o avanço de 0,05 mm/volta. Isso pode ser atribuído, possivelmente, ao cavaco formado, romper o isolamento do circuito encostando-se às partes do torno que não estavam isoladas, influenciando nos valores.

A Figura (9) mostra os históricos da evolução das temperaturas, do material e da ferramenta de corte, simuladas para todas as velocidades de corte. Percebe-se que a partir de um determinado instante de tempo, a temperatura permanece constante, indicando que o regime de trabalho foi atingido no processo de torneamento. Neste mesmo instante, para todas as velocidades de corte, a temperatura da ferramenta de corte foi praticamente a mesma de 27,8 °C.



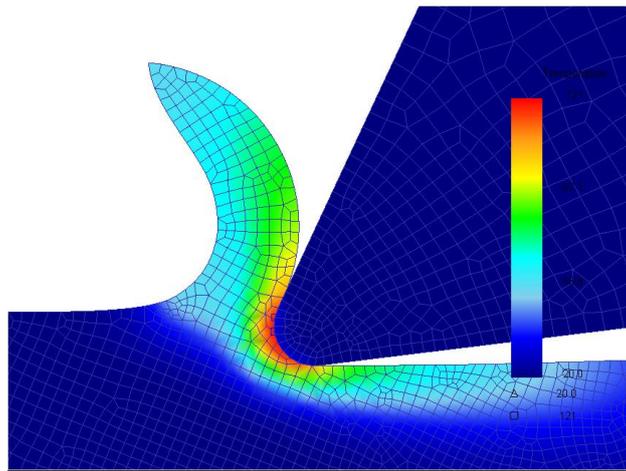
**Figura 9 – Evolução da temperatura da liga de alumínio e da ferramenta de corte respectivamente.**

A Figura (10) mostra os históricos da evolução das temperaturas, do material e da ferramenta de corte, simuladas para todos os avanços estudados. Percebe-se que o avanço têm pouca influência na temperatura do material principalmente se compararmos os avanços 0,05, 0,10 e 0,15 mm/volta. Essa mesma observação é válida para a temperatura da ferramenta.



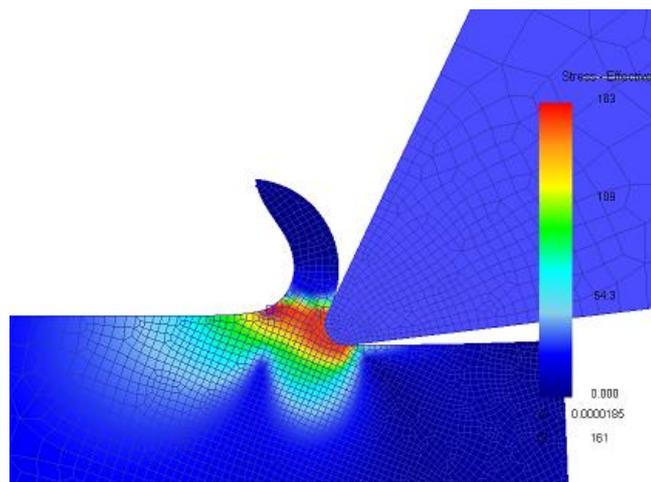
**Figura 10 – Evolução da temperatura da liga de alumínio e da ferramenta, respectivamente, em função do avanço**

A Figura (11) mostra a distribuição de temperatura do material no instante em que o sistema alcança o regime de trabalho, para a velocidade de corte de 150 m/min. Percebe-se que a máxima temperatura está localizada na interface do cavaco/ferramenta, comprovando a representação esquemática proposta por Ezugwu (1993).



**Figura 11 – Distribuição da temperatura na liga de alumínio para a velocidade de corte 150 m/min.**

Uma das vantagens do método de elementos finitos é prever determinadas situações, que nos ajudam a elucidar de como evolui o processo. A Figura (12), para a velocidade de corte de 150 m/min, nos mostra a zona de maior tensão efetiva, em vermelho, que esta associada diretamente a região de cisalhamento primária e secundária. É na região de cisalhamento primária em que o material passa a se deformar plasticamente, e que, junto com o avanço da ferramenta faz com que as tensões ultrapassem o limite de resistência do material, promovendo a ruptura. A extensão dessa ruptura depende principalmente da ductilidade do material da peça.



**Figura 12 – Distribuição da tensão efetiva para a velocidade de corte 150 m/min.**

A maior parte do calor gerado na região de cisalhamento primário é dissipado pelo cavaco, mas uma pequena fração é conduzida na peça aumentando a sua temperatura. Pode-se observar, que a temperatura do cavaco não terá nenhuma influência na temperatura da ferramenta, porque o tempo com que uma pequena porção do cavaco passa sobre a superfície de saída da ferramenta, é muito pequeno para conduzir calor.

O calor gerado pela região de cisalhamento secundário é responsável pelas temperaturas da ferramenta de corte. As altas temperaturas nas ferramentas de corte não só aceleram os mecanismos de desgaste termicamente ativados, mas também reduzem o limite de escoamento dessas ferramentas.

## 6. CONCLUSÕES

O modelo termo-mecânico de deformação plana ortogonal para o torneamento, com formação de cavaco contínuo, mostrou-se bastante apropriado para prever a distribuição de temperatura da liga de alumínio, da ferramenta de corte e na determinação da zona de cisalhamento primário.

Tanto experimentalmente quanto numericamente, a temperatura na interface do material/ferramenta aumenta linearmente com a velocidade de corte. Quanto a influência do avanço na temperatura, esse apresentou pouca significância.

Independente da velocidade de corte, a temperatura média da ferramenta foi aproximadamente de 28 °C, quando o sistema alcançou o regime de trabalho.

O aplicativo numérico, Deform 2D, de formulação lagrangiana mostrou-se bastante eficaz, pois gerou resultados condizentes com o experimental.

## 7. REFERÊNCIAS

- Ch, T., Yen, Jain, A., Altan, T., A finite element analysis of orthogonal machining using different tool edge geometries, J. Mater. Process. Technol. 146 (2004) 72–81.
- D. D. Reís and A.M. Abrão, The machining of aluminium alloy 6351, Proc. IMechE vol.219 Part B: J. Engineering Manufatura, (2004) 27-33.
- Ezugwu, E.O. Evaluation of cermet cutting tool materials when machining G-17 cast iron, Lubrication Engineering, (1993) 49-55.
- Grzesik, W., Bartoszek, M., Nieslony, P. Finite element modelling of temperature distribution in the cutting zone in turning processes with differently coated tools, Journal of Materials Processing Technology 164–165 (2005) 1204–1211.
- Machado, A. R., Silva, M.B. Usinagem dos Metais. Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem. Depto. De Eng. Mecânica. Universidade Federal de Uberlândia, 1998.
- Shatla, M., Kerk, C., Altan, T. Process modeling in machining. Part II: validation and applications of the determined flow stress data, International Journal of Machine Tools & Manufacture 41 (2001) 1659–1680.
- Trent, E. M, Metal cutting 2<sup>nd</sup> ed., London, Butterworths ISBN 0.408.10856-8 (1984) 245 pages.

## 8. DIREITOS AUTORAIS

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

# A Comparison Between the Experimental and Numerically Estimated Temperatures in the Chip Forming Region in the Machining of Aluminum Alloy

Frederico de Castro Magalhães, [fredmag@br.inter.net](mailto:fredmag@br.inter.net)<sup>1</sup>

Davidson Santos Carvalho, [davidson@demec.ufmg.br](mailto:davidson@demec.ufmg.br)<sup>1</sup>

Juan Carlos Campos Rúbio, [juan@demec.ufmg.br](mailto:juan@demec.ufmg.br)<sup>1</sup>

Alexandre Mendes Abrão, [abrao@demec.ufmg.br](mailto:abrao@demec.ufmg.br)<sup>1</sup>

Haroldo Béria Campos, [beriacampos@uol.com.br](mailto:beriacampos@uol.com.br)<sup>1</sup>

Paulo Roberto Cetlin, [pcetlin@demet.ufmg.br](mailto:pcetlin@demet.ufmg.br)<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Minas Gerais, Av. Antônio Carlos, 6627, Campus da Pampulha, Belo Horizonte, Minas Gerais, Cep. 31270-901.

<sup>2</sup> Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal de Minas Gerais, Rua Espírito Santo, 35, 2º andar, Belo Horizonte, Minas Gerais, Cep. 30160-030

**Abstract.** *The heat generation and consequent temperature rise during the machining of metals has been extensively studied employing analytical, experimental and numerical approaches. The relevance of these analyses derive from their influence on the tool life, materials choice, machining parameters and final properties of the machined item. The objective of the present paper is to compare the temperature generation in the cylindrical machining of aluminum, measured through the traditional thermocouple insertion technique or evaluated through a finite element approach*

**Keywords:** *cutting temperature, thermocouple-tool-part, finite element method.*