

POTÊNCIA CONSUMIDA E GERAÇÃO DE CALOR NO PROCESSO DE TORNEAMENTO

Anderson Clayton A. de Melo

Edvon A. Cordeiro

Álison R. Machado

Gilmar Guimarães

Universidade Federal de Uberlândia, Departamento de Engenharia Mecânica

Cep: 38400-100 – Uberlândia, MG, Brasil

***Resumo.** São apresentados os resultados obtidos através do estudo das transformações energéticas durante o processo de torneamento. Forças de usinagem e temperaturas de corte foram medidas simultaneamente e usadas para estimar a quantidade de calor gerado. O calor total e o calor gerado na zona de cisalhamento secundária, foram obtidos a partir da força de corte e da força de avanço, respectivamente. A quantidade de calor que flui para a ferramenta de corte, a partir da interface cavaco-ferramenta, foi estimada com o uso de um pacote computacional baseado em problemas inversos em condução de calor e nas temperaturas medidas na aresta inferior oposta à aresta de corte. O calor gerado na zona de cisalhamento secundária é comparado com aquele que flui para a ferramenta. Foi observado que a maior parte do calor gerado na zona de cisalhamento secundária flui para a ferramenta de corte. A quantidade de calor gerado na zona de cisalhamento primária foi calculada pela diferença entre o calor total e o calor gerado na zona de cisalhamento secundária.*

***Palavras-chave:** Torneamento, Potência consumida, Calor gerado.*

1. INTRODUÇÃO

Durante o processo de corte, a maior parte da potência consumida é utilizada para o cisalhamento do material que leva à formação do cavaco e da nova superfície usinada. Taylor e Quinney (1934, 1937), estimaram que cerca de 97 a 99 % dessa potência é convertida em calor que flui diretamente para o cavaco, para a peça, para a ferramenta e para o meio circunvizinho.

As duas principais zonas de geração de calor no processo de usinagem são as zonas de cisalhamento primária e secundária. A zona de cisalhamento primária é uma região que surge durante todo o processo de corte na interface entre o material que está sendo recalcado e o cavaco que está sendo formado. Nesta região as deformações cisalhantes geralmente são da ordem de 2 a 4 (Trent, 1984). O trabalho necessário para provocar estas deformações é praticamente todo transformado em calor, o que faz elevar a temperatura naquela região de

corte. A maior parte deste calor é dissipado pelo cavaco, mas uma pequena fração flui em direção à peça. A zona de cisalhamento secundária foi estudada por Trent (1963), que através da análise de micrografias da raiz do cavaco de vários materiais usinados com aço rápido e metal duro, utilizando técnicas de *quick-stop*, obteve evidências claras de um contato íntimo entre o cavaco e a ferramenta numa grande porção da interface. Esta região foi denominada zona de aderência. A região logo acima da interface, dentro da zona de aderência, foi denominada de zona de fluxo. Nela existe um gradiente de velocidade que provoca a ocorrência de grandes deformações, as quais são bem maiores do que as existentes no plano de cisalhamento primário, podendo atingir valores iguais a 100 ou mais (Trent, 1984). Para que sejam alcançados tais níveis, é necessário uma grande quantidade de trabalho cisalhante, que é praticamente todo transformado em calor. Esta fonte térmica é a principal responsável pelo aumento da temperatura da ferramenta de corte. A zona de interface entre a peça e a superfície de folga da ferramenta, também pode representar uma importante fonte de geração de calor no processo de usinagem. Quanto menor o ângulo de folga, maior será a área de contato da superfície do flanco com a nova superfície usinada. Esse fato pode produzir uma zona de aderência e, conseqüentemente, gerar uma zona de fluxo semelhante à existente na região de interface cavaco-ferramenta. Um fator que pode causar a redução do ângulo de folga e, conseqüentemente, intensificar a geração de calor nesta região, é o desgaste de flanco ou deformação plástica da aresta de corte.

É de grande importância o conhecimento quantitativo da fração de calor gerada em cada zona descrita anteriormente. Através destas informações é possível se fazer um estudo mais detalhado da energia consumida durante o processo que leva à geração de calor e, conseqüentemente, à elevação da temperatura na região de corte. Isto se torna mais importante ainda quando se tem conhecimento de que a temperatura desenvolvida durante o processo de usinagem influencia forte e diretamente a vida da ferramenta de corte. Tal comportamento já foi evidenciado com bastante ênfase por Taylor (1907) em seu trabalho “*On the art of cutting metals*”.

Este artigo apresenta os resultados obtidos a partir de um estudo realizado sobre a relação entre a potência consumida durante o corte e a quantidade de calor gerado. Ensaio de torneamento do ferro fundido cinzento DIN GG 20 usinado com uma ferramenta de metal duro ISO K10 à seco foram realizados, onde foram monitoradas de forma simultânea e em tempo real, as forças de usinagem (força de corte, força de avanço e força passiva) e as temperaturas desenvolvidas na aresta inferior oposta à aresta de corte. As forças de corte e de avanço, foram usadas para calcular o calor total e o calor gerado na zona de cisalhamento secundária, respectivamente. As temperaturas obtidas experimentalmente foram armazenadas em forma de arquivo e utilizadas em um pacote computacional baseado em problemas inversos em condução de calor que fornece a quantidade de calor que flui para dentro da ferramenta de corte durante o processo de usinagem. O calor gerado na zona de cisalhamento secundária foi comparado com aquele que entra na ferramenta de corte. A quantidade de calor gerada no plano de cisalhamento primário, foi obtida pela diferença entre o calor total e o calor gerado na região de interface cavaco-ferramenta.

2. CALOR DESENVOLVIDO NAS ZONAS DE CISALHAMENTO PRIMÁRIA E SECUNDÁRIA

Como foi dito anteriormente, o trabalho realizado para a formação do cavaco durante o processo de usinagem é praticamente todo transformado em calor. Boothroyd (1975) propôs um método que permite quantificar as energias térmicas produzidas durante o corte a partir dos parâmetros de usinagem e das forças desenvolvidas. Segundo ele, o calor total gerado, Q ,

numa operação de corte é igual ao produto da força de corte, F_c , pela velocidade de corte, V_c , dividido pelo equivalente mecânico do calor, J , ou seja:

$$Q = \frac{F_c V_c}{J} \quad (1)$$

A Eq. (1), considera que a potência consumida para a formação do cavaco ($F_c V_c$), é totalmente convertida em calor. O consumo de potência devido à força de avanço não é considerado neste caso, pois este representa uma quantidade desprezível quando comparada com a potência de corte. Q , representa a soma do calor gerado no plano de cisalhamento primário (ou zona de cisalhamento primária), Q_s , e o calor gerado na interface cavaco-ferramenta (ou zona de cisalhamento secundária), Q_t . Considerando-se o caso de uma zona de fluxo perfeitamente estabelecida e na ausência de aresta postiça de corte (APC), tem-se que o calor gerado na zona de cisalhamento secundária, Q_t , é dado pelo produto da força tangencial, F_t , pela velocidade de saída do cavaco, V_{cav} , dividido pelo equivalente mecânico do calor, J , ou seja:

$$Q_t = \frac{F_t V_{cav}}{J} \quad (2)$$

No caso do corte ortogonal utilizando-se uma ferramenta de corte com um ângulo de saída igual a zero, a Eq. (2) fica como segue:

$$Q_t = \frac{F_f V_c \operatorname{tg} \phi}{J} \quad (3)$$

onde F_f é a força de avanço e ϕ é o ângulo do plano de cisalhamento primário.

No torneamento tridimensional, porém, deve-se considerar que os vetores força tangencial e velocidade de saída do cavaco, estão em planos e direções diferentes. Desta forma, o calor desenvolvido na zona de cisalhamento secundária neste processo de torneamento pode ser aproximado pela seguinte equação:

$$Q_t = \frac{[F_c \operatorname{sen} \gamma_o + F_f \cos(90^\circ - \chi_r)] V_c}{J R_c} \quad (4)$$

onde γ_o e χ_r , são os ângulos de saída e de posição da ferramenta de corte, respectivamente e R_c é o grau de recalque, dado pela equação que segue:

$$R_c = \frac{h'}{h} = \frac{V_c}{V_{cav}} \quad (5)$$

onde h' é a espessura do cavaco e h é a espessura de corte.

Finalmente, o calor produzido durante o corte na zona de cisalhamento primária, Q_s , considerando-se uma ferramenta perfeitamente afiada, é dado pela diferença entre o calor total, Q , e o calor gerado na zona de cisalhamento secundária, Q_t , ou seja:

$$Q_s = Q - Q_t \quad (6)$$

3. FLUXO DE CALOR EM DIREÇÃO À FERRAMENTA DE CORTE

É sabido que o principal responsável pelo aumento de temperatura da ferramenta de corte durante o processo de usinagem é o calor gerado na zona de cisalhamento secundária. Grande parcela dessa energia térmica é conduzida para a ferramenta de corte, porém, uma pequena fração flui para o cavaco. A determinação da quantidade de calor que entra na ferramenta de corte é uma tarefa bastante complexa e determinante na obtenção da distribuição de temperatura no corpo da ferramenta e na região de interface com o cavaco. Tarefa esta, que na maioria das vezes é realizada por intermédio de métodos numéricos de estimação. Uma técnica frequentemente usada pelos pesquisadores (Yen & Wright, 1986; Lin et al., 1992) é aquela desenvolvida por Beck (1985) denotada Problemas Inversos em Condução de Calor. Yen & Wright (1986), sugeriram que as isotérmicas geradas em um inserto durante o processo de torneamento, fossem representadas por uma família de elipsóides confocais, como mostra a Fig. 1.

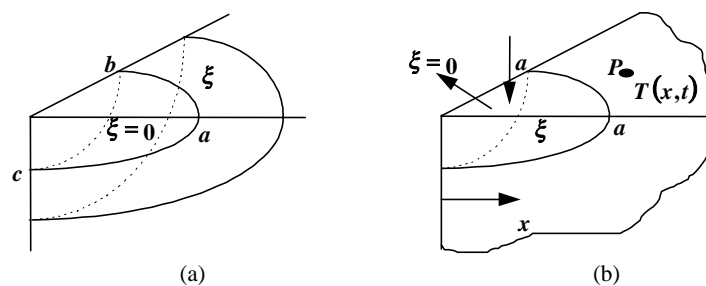


Figura 1. (a) Modelo de mapeamento elipsoidal de distribuição de temperatura em um inserto quadrado, Yen e Wright (1986); (b) Modelo elipsoidal unidimensional usado na estimação inversa da temperatura de interface cavaco-ferramenta, Lin et al. (1992).

Esta consideração permitiu que o modelo matemático de transferência de calor no corpo da ferramenta de corte fosse tratado em termos de coordenadas elipsoidais, tendo um único parâmetro espacial (ξ) que representa uma família de elipsóides confocais. Desta forma, o problema físico de difusão tridimensional foi tratado matematicamente como um problema unidimensional. Lin et al. (1992) desenvolveram um método similar baseado em problemas inversos em condução de calor e em medições de temperaturas sobre a superfície de saída da ferramenta de corte para estimar a temperatura de interface cavaco-ferramenta durante o torneamento de um aço com insertos de cerâmica e de metal duro a altas velocidades de corte, Fig. 1(b). Neste caso, a história de temperatura em um ponto localizado na superfície de saída, ponto P na Fig. 1(b), foi medida usando um sensor de infra-vermelho. Os valores medidos foram usados em um algoritmo sequencial de problemas inversos para estimar o fluxo de calor sobre a superfície correspondente a $\xi=0$. Para resolver a equação diferencial do problema físico (coeficientes de sensibilidade e temperaturas estimadas) foi usado o método dos elementos finitos. Melo (1998), desenvolveu um método similar, mas as temperaturas foram medidas usando um termopar montado na aresta inferior oposta à aresta de corte da ferramenta, entre o inserto e o porta-ferramentas, Fig. 2.

Um algoritmo numérico foi desenvolvido para determinar a evolução do fluxo de calor e da temperatura em função do tempo, na interface cavaco-ferramenta. A técnica consiste no uso de um termopar do tipo T montado na aresta inferior oposta à aresta de corte, para medir a temperatura em tempo real durante o processo de torneamento. Após armazenar as temperaturas em um arquivo, o próximo passo consiste em entrar com estes valores num programa computacional denominando ESTIMA para estimar a temperatura média na interface cavaco-ferramenta e o fluxo de calor que desce para o corpo da ferramenta durante o corte,

supondo a área de contato igual a $\frac{1}{4}$ de círculo. A Fig. 3 mostra um diagrama esquemático do programa.

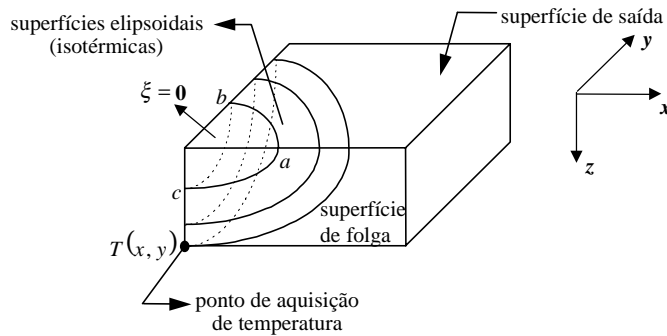


Figura 2. Técnica usado por Melo (1998). Localização do sensor de temperatura na aresta inferior oposta à aresta de corte, entre o inserto e o pota-ferramenta.

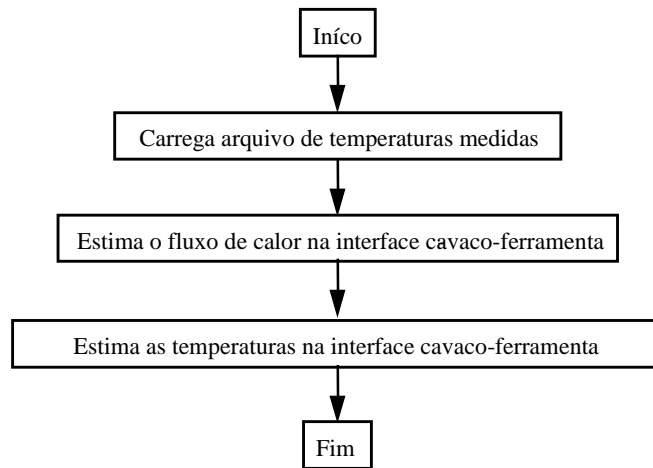


Figura 3. Diagrama esquemático do programa ESTIMA.

O método desenvolvido por Melo (1998) foi usado neste trabalho para estimar a quantidade de calor desenvolvida durante o corte.

4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Foram realizados testes de torneamento onde foram monitorados, de forma simultânea, a temperatura na aresta inferior oposta à aresta de corte e as forças de usinagem. O material usinado foi o ferro fundido cinzento DIN GG 20. Utilizou-se inserto de metal duro classe ISO K10 SNGN 120408 montado num porta-ferramentas ISO CSBNR 2020 K12. O conjunto apresentou a seguinte geometria:

$$\gamma_0 = -6^\circ; \alpha_0 = 6^\circ; \chi_r = 75^\circ; \lambda_s = -6^\circ.$$

A Figura 4 mostra o sistema que foi montado para adquirir força e temperatura durante o corte.

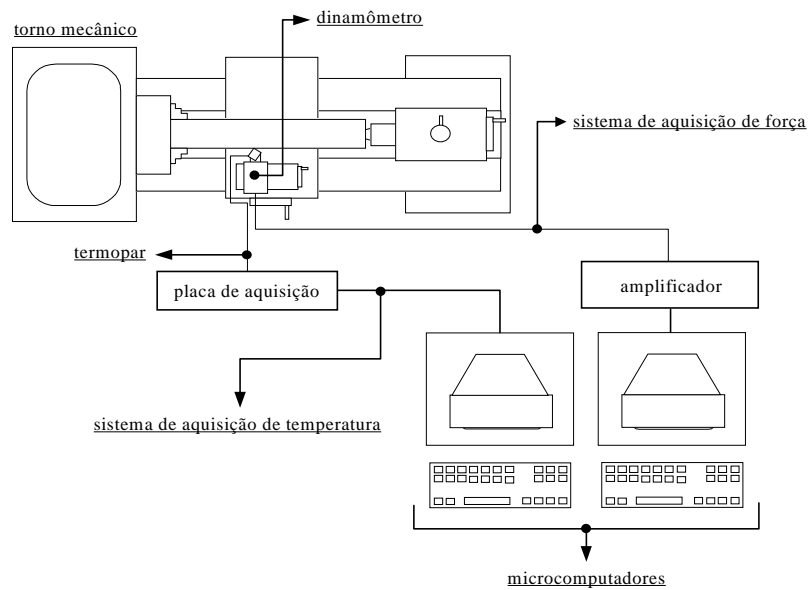


Figura 4. Sistema montado para adquirir forças de usinagem e temperaturas na aresta inferior oposta à aresta de corte.

Para adquirir as temperaturas na aresta inferior oposta à aresta de corte, utilizou-se uma placa de aquisição PCL-810 conectada a um microcomputador pentium 100 MHz, onde foi usado um programa de aquisição de dados denominado *Genie*. O tempo de amostragem selecionado foi de 1 segundo. As forças de usinagem foram obtidas com o uso de um dinamômetro Kistler 9265 B conectado a um microcomputador AT 486.

Os ensaios realizados estão mostrados na Tabela 1.

Tabela 1. Valores de velocidade de corte usados nos ensaios.

| Ensaio | 1 | 2 | 3 |
|------------------|----|-----|-----|
| V_c (m/min) | 94 | 104 | 132 |
| $a_p=1.5$ mm | | | |
| $f=0.176$ mm/rot | | | |

5. RESULTADOS

Os valores de forças de usinagem medidas estão mostradas na Tabela 2.

Tabela 2. Valores de forças medidos (em N).

| Ensaio | 1 | 2 | 3 |
|--------|-----|-----|-----|
| F_c | 341 | 404 | 403 |
| F_f | 238 | 230 | 237 |
| F_p | 165 | 187 | 197 |

O gráfico da Fig. 7(a) mostra os valores de temperaturas medidas na aresta inferior oposta à aresta de corte para as três condições testadas.

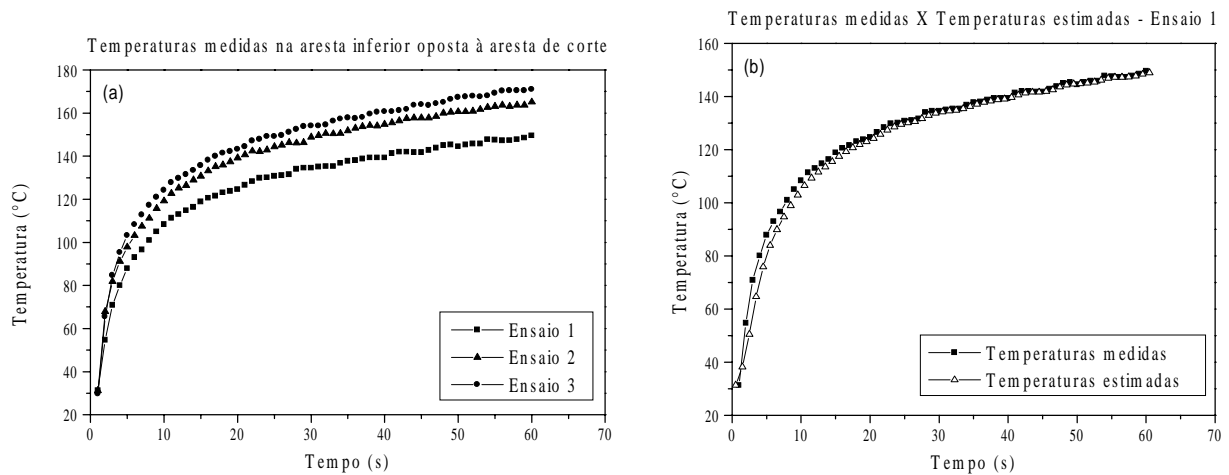


Figura 7. (a) Valores de temperaturas medidas na aresta inferior oposta à aresta de corte; (b) Comparação entre as temperaturas medidas e estimadas no ponto de medição para o ensaio 1.

Após os ensaios terem sido realizados, utilizou-se o programa computacional ESTIMA para que os fluxos de calor que entram na ferramenta durante o processo de usinagem e das temperaturas na região de interface cavaco-ferramenta fossem obtidos. A Fig. 7(b) mostra a boa correlação numérica do pacote computacional usado. Neste caso, as temperaturas medidas na aresta inferior oposta à aresta de corte são confrontadas com aquelas estimadas utilizando-se os fluxos de calor obtidos pelo pacote neste mesmo ponto de medição.

A Fig. 8(a) mostra os valores de fluxo de calor estimados na interface cavaco-ferramenta para os três ensaios realizados e a Fig. 8(b) mostra as temperaturas estimadas na interface cavaco-ferramenta usando o programa ESTIMA.

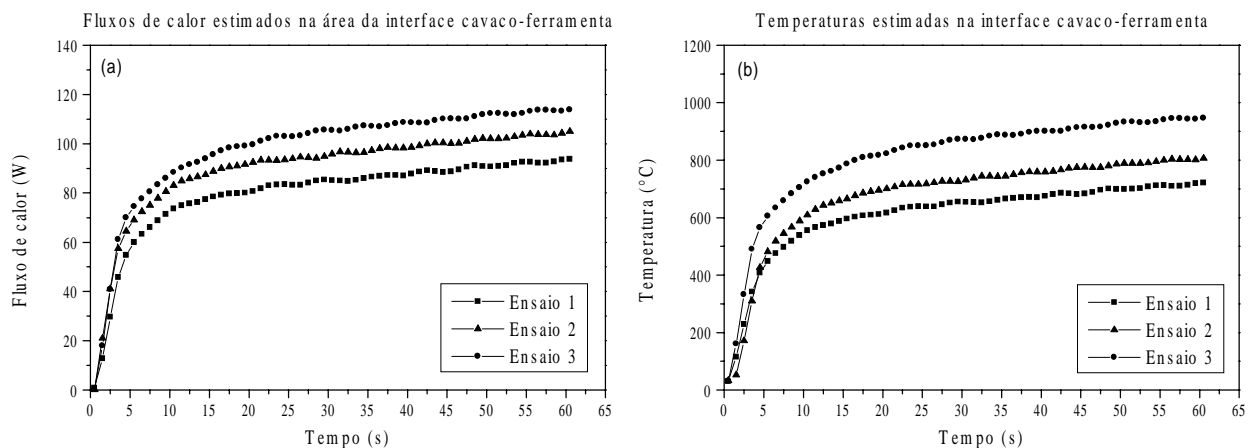


Figura 8. (a) Fluxos de calor estimados fluindo para a ferramenta de corte durante o processo de usinagem; (b) Temperaturas estimadas na interface cavaco-ferramenta.

Realizou-se uma análise no microscópio eletrônico de varredura para verificar se a consideração sobre a inexistência da zona de cisalhamento terciária (entre a peça e a superfície de folga da ferramenta) poderia ser considerada. As Figs. 9 (a), (b) e (c) revelam que praticamente não houve desgaste do flanco das ferramentas durante os ensaios.

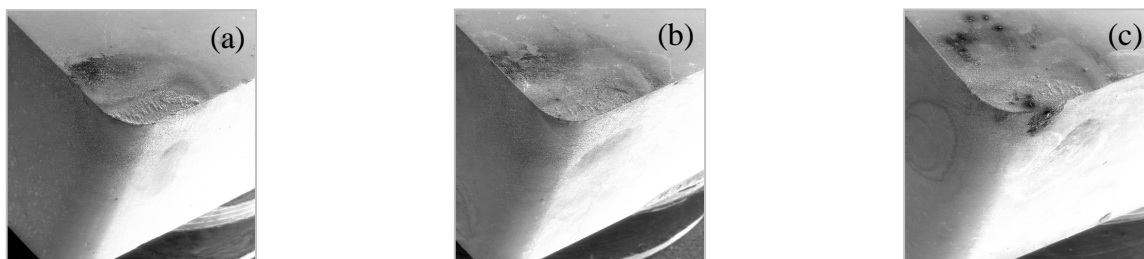


Figura 9. Superfície de flanco da ferramenta ensaiada. (a) ensaio 1; (b) ensaio 2; (c) ensaio 3.

A Tabela 3 mostra os resultados das quantidades de calor total, Q , calor gerado na zona de cisalhamento secundária, Q_t , e calor gerado na zona de cisalhamento primária, Q_s , calculadas pelas equações (1), (4) e (6), respectivamente.

Tabela 3. Valores de fluxo de calor calculados para os ensaios realizados (em W).

| Ensaio | 1 | % | 2 | % | 3 | % |
|--------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|
| Q | 534 | 100 | 700 | 100 | 888 | 100 |
| Q_t | 115 | 21,54 | 117 | 16,71 | 171 | 19,26 |
| Q_s | 419 | 78,46 | 583 | 83,29 | 717 | 80,74 |

6. DISCUSSÕES

Observando-se primeiramente as Figs. 7 (a) e 8(b), nota-se claramente que os valores de temperatura no ponto de medição (aresta inferior oposta à aresta de corte) e na interface cavaco-ferramenta, crescem de acordo com o aumento da velocidade de corte. Isto pode ser explicado pelo fato de que quando a velocidade de corte é aumentada, aumenta-se proporcionalmente a taxa de deformação nas zonas de cisalhamento primária e secundária e, conseqüentemente, aumenta-se também o calor gerado nestas zonas, como pode ser observado pelos resultados obtidos com o cálculo das quantidades de calor nestas regiões mostrados na Tabela 3. Observa-se que do total de calor gerado durante a usinagem, a maior parte é produzido na zona de cisalhamento primária, ainda que as quantidades de deformações nesta região sejam bem inferiores àsquelas observadas na zona de cisalhamento secundária. Entretanto, devido a menor quantidade de massa de material envolvida no cisalhamento da zona secundária, as temperaturas desenvolvidas nesta são bem superiores àsquelas encontradas na zona primária (Ferraresi, 1977).

Comparando-se agora os valores de calor gerado na zona de cisalhamento secundária com aquele que flui para a ferramenta de corte (estimado e no regime permanente), pôde-se plotar o gráfico mostrado na Fig. 10.

Observa-se que, da quantidade total do calor que é gerado na zona de cisalhamento secundária, a maior parte flui em direção à ferramenta de corte, o restante é conduzida para o cavaco. A elevada temperatura do cavaco, observada normalmente nos processos de usinagem, se deve a grande quantidade de calor que é gerada na zona de cisalhamento primária.

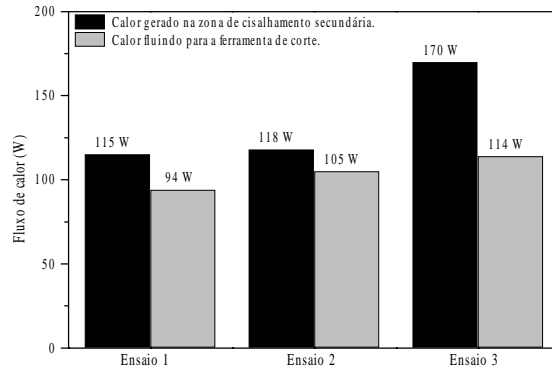


Figura 10. Comparação entre o calor gerado na zona de cisalhamento secundária e o calor que flui para a ferramenta de corte durante o processo de usinagem.

7. CONCLUSÕES

- Aumentando-se a velocidade de corte, aumenta-se a taxa de deformação nas zonas de cisalhamento primária e secundária, o que faz elevar a taxa de geração de calor nestas regiões, elevando a temperatura de corte.
- Apesar das deformações serem maiores na zona de cisalhamento secundária (Trent, 1984), a quantidade de calor gerada nesta região é inferior a gerada na zona de cisalhamento primária. Entretanto, devido à menor massa de material as temperaturas na zona secundária são superiores.
- Do calor total que é produzido na zona de cisalhamento secundária, a maior parte flui em direção à ferramenta de corte, elevando sua temperatura, o restante flui em direção ao cavaco.

REFERÊNCIAS

- Beck, J. V., Blackwell, B. and St. Clair, C. R., 1985, *Inverse Heat Conduction: Ill Posed Problems*, Wiley.
- Boothroyd, G., 1975, *Fundamentals of Metal Machining and Machine Tools*, McGraw-Hill.
- Ferraresi, D., 1977, *Fundamentos da Usinagem dos Metais*, Editora Edgard Blücher Ltda, vol. 1, SP, 751 pgs.
- Lin, J., Lee, S. and Weng, C., 1992, Estimation of Cutting Temperature in High Speed Machining, *Journal of Engineering Materials and Technology*, vol. 114, pp. 289-290.
- Melo, A. C. A., 1998, *Estimação da Temperatura de Corte Utilizando Problemas Inversos em Condução de Calor*, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia.
- Taylor, F. W., 1907, *Trans. ASME*, 28, 31.
- Taylor, G. I. and Quinney, H., 1934, *Proc. R. Soc. A*143, 307.
- Taylor, G. I. and Quinney, H., 1937, *Proc. R. Soc. A*163, 157.
- Trent, E. M., 1963, Cutting Steel and Iron with Cemented Carbide Tools – Part II: Conditions and Seizure at the Tool Work Interface, *Journal of the Iron and Steel Institute*.
- Trent, E. M., 1984, *Metal Cutting*, 2nd Edition, Butterworths, London, ISBN 0408108568, 254 pgs.
- Yen, D. W. and Wright, P. K., 1986, A Remote Temperature Sensing Technique for Estimating the Cutting Interface Temperature Distribution, *Transactions of the ASME*, vol. 108, pp. 252-263.

POWER CONSUMPTION AND HEAT GENERATION IN THE TURNING PROCESS

Abstract: *A study of the energetic transformations during the turning process is presented. Cutting forces and cutting temperatures were measured simultaneously and were used for estimating the heat generated. The total heat and the heat generated at secondary shear zone, were obtained using the cutting force and the feed force, respectively. The heat flowing to cutting tool, was estimated using a computational program based on inverse heat conduction problems and on the temperatures measured at the opposite bottom edge, between the insert face and the tool holder. The heat generated at the secondary shear zone is compared with that flowing into the cutting tool. The major part of this heat generated flows into the cutting tool. The heat generated at the primary shear zone was calculated subtracting the heat generated at the shear zone from the total heat.*

Keywords: *Turning, Power consumption, Heat generated.*