

GERAÇÃO E PARTIÇÃO DE CALOR EM USINAGEM ATRAVÉS DO MÉTODO CALORIMÉTRICO: UMA REVISÃO

Ivanilson Sousa da Costa, LEPU - UFU, ivanilsonsousacosta@hotmail.com

Márcio Bacci da Silva, LEPU - UFU, mbacci@mecanica.ufu.br

Resumo. Quantificar as temperaturas envolvidas e o calor gerado durante a usinagem é de fundamental importância, dado que a temperatura de corte é um parâmetro crítico do processo, influenciando a formação dos cavacos, as forças de usinagem, a vida da ferramenta, o controle dimensional e integridade superficial da peça, os custos em usinagem, etc. A literatura aborda vários métodos experimentais utilizados para a medição de temperatura e calor em usinagem, inclusive o método calorimétrico. O objetivo deste trabalho é apresentar uma revisão sobre a medição do calor gerado em usinagem através do método calorimétrico, apresentando metodologias e resultados da partição do calor gerado entre peça, ferramenta de corte, cavacos e vizinhanças.

Palavras chave: calorímetro, temperatura, calor.

1. INTRODUÇÃO

É consenso entre os pesquisadores que a energia consumida no corte de metais é convertida, em sua maior parcela, em calor (Shaw, 1984; Trent; Wright, 2000). Este acréscimo de energia térmica torna-se um parâmetro crítico no processo, podendo acarretar problemas técnicos e econômicos devido principalmente à parcela de calor dissipada pela ferramenta de corte, limitando sua vida útil. Por exemplo, na usinagem de ligas metálicas de elevado ponto de fusão, as ferramentas de corte são aquecidas a altas temperaturas em função da taxa de remoção de material, podendo falhar de forma catastrófica sob a influência de tensões e temperaturas, após curto tempo de usinagem (Ferraresi, 1970; Trent; Wright, 2000; Machado *et al.*, 2011).

O calor gerado no corte de metais foi investigado em um trabalho pioneiro desenvolvido pelo físico *Benjamin Thompson* (conde *Rumford*, 1753-1814) em 1798. Observando a fabricação de canhões de bronze, *Rumford* admirou-se com as grandes quantidades de calor gerado na operação - a peça era mergulhada num tanque com água, a qual aquecia a ponto de ferver. *Rumford* investigou como esta quantidade de calor era produzida numa operação puramente mecânica, imergindo a peça, ferramenta de corte e cavacos em uma quantidade conhecida de água. A Fig. (1) representa o experimento utilizado por *Rumford* para determinação do calor gerado na usinagem do canhão (Shaw, 1984; Komanduri; Hou, 2001; Danoso, s.d.).

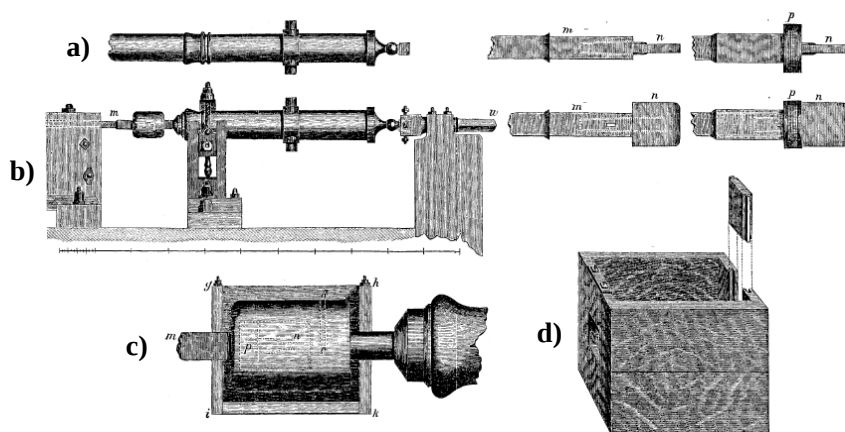


Figura 1. Determinação do calor gerado na usinagem de canhão; a) canhão recebido da fundição; b) experimento montado; c) ampliação do calorímetro mostrando a barra de metal ao fim do qual uma ferramenta de broquear desgastada é fixada; d) recipiente para o líquido do calorímetro (adaptado de Komanduri; Hou, 2001).

Os experimentos de *Rumford* não apenas analisaram a geração de calor por atrito gerado na usinagem de canhões, mas também a própria natureza do calor durante uma época em que o calor foi considerado tanto como um fluido ígneo (denominado “calórico”) ou uma propriedade do material. Seus experimentos também apresentaram uma importante metodologia para investigação de calor em usinagem através de calorímetros (Komanduri; Hou, 2001).

Cerca de cinquenta anos após os experimentos de *Rumford*, o físico britânico *James P. Joule* (1818-1889) desenvolveu o conceito de “equivalente mecânico de calor”, a relação existente entre a energia mecânica (expressa em joules) e a térmica (expressa em caloria), quando uma se converte na outra. O experimento de *Joule* consistiu de um calorímetro (recipiente de paredes adiabáticas, ou seja, termicamente isolado) com determinada massa de água, no qual foi inserido um conjunto de paletas presas a um eixo. Este conjunto é colocado em rotação pela queda de um par de massas, Fig. (2). O atrito das paletas aquece a água, cuja variação de temperatura, determinada por um termômetro, corresponde a certo número de calorias (Nussenzveig, 2008).

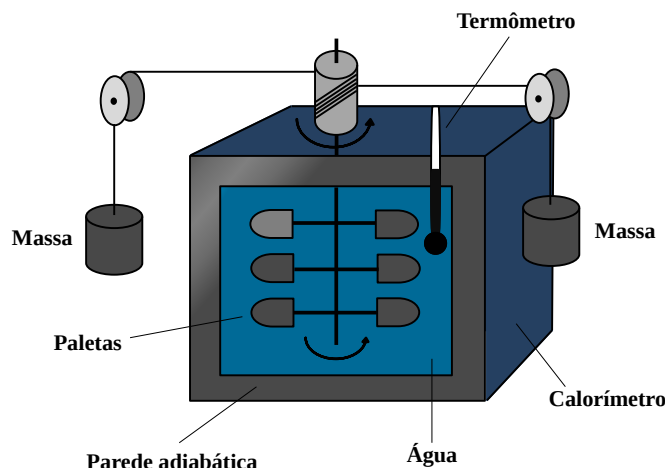


Figura 2. Medição do equivalente mecânico do calor por *Joule* (adaptado de Nussenzveig, 2008, p. 174).

O trabalho mecânico equivalente é medido pela altura da queda das massas. *Joule* constatou que eram necessários aproximadamente 4,184 J para elevar de 1 °C a temperatura de 1 g de água. Assim, o equivalente mecânico da água é 4,184 J/cal (Nussenzveig, 2008).

A importância do estudo de calor em usinagem também foi de fundamental importância nos experimentos do engenheiro estadunidense *Frederick W. Taylor* (1856-1915), levando-o ao desenvolvimento das ferramentas de aço rápido. Este material tem a capacidade de resistir a temperaturas mais elevadas que as ferramentas de aço carbono, multiplicando as taxas de remoção de material por um fator igual a quatro. Até hoje as limitações impostas pelas temperaturas de corte tem sido o estímulo para o desenvolvimento de novos materiais de ferramentas de corte (Trent; Wright, 2000).

Por certo, é importante compreender os fatores que influenciam a geração de calor e a distribuição da temperatura na ferramenta e na peça. No entanto, a medição de calor, temperaturas e distribuição de temperatura na região de corte são tecnicamente difícil e o progresso nesta área tem sido lento nos mais de cem anos desde que o problema foi claramente indicado. Pesquisas recentes buscam esclarecer alguns dos princípios, mas o trabalho feito até agora é apenas o início do estudo que é necessário (Trent; Wright, 2000). Logo, este trabalho se propõe a apresentar uma breve revisão de metodologias e resultados obtidos pelo método calorimétrico na medição de temperatura de corte, calor gerado em usinagem e sua partição entre peça, ferramenta de corte, cavacos e vizinhanças.

2. TEMPERATURA E CALOR EM USINAGEM

Em usinagem praticamente toda a energia mecânica associada à formação do cavaco se transforma em energia térmica (calor). O balanço energético do processo de corte pode ser expresso pela Eq. (1) (Ferraresi, 1970):

$$Q_z + Q_{a1} + Q_{a2} = Q_c + Q_p + Q_f + Q_{ma} \quad (1)$$

Onde:

Q_z = quantidade de calor produzida pela deformação e pelo cisalhamento do cavaco.

Q_{a1} = quantidade de calor produzida pelo atrito do cavaco com a ferramenta.

Q_{a2} = quantidade de calor produzida pelo atrito da peça com a ferramenta.

Q_c = quantidade de calor dissipada pelo cavaco.

Q_p = quantidade de calor dissipada pela peça.

Q_f = quantidade de calor dissipada pela ferramenta.

Q_{ma} = quantidade de calor dissipada pelo meio ambiente.

Verifica-se experimentalmente que quase todo o trabalho de usinagem (87 % a 90 %) se transforma em calor (Ferraresi, 1970). Logo, a taxa de geração de calor, em watts, é aproximadamente equivalente ao trabalho de usinagem na unidade de tempo. Pode-se determinar, com bastante aproximação, a quantidade de calor (Q) produzida na usinagem através da Eq. (2) (Machado *et al.*, 2011):

$$q = \frac{F_c \cdot v_c}{60} \quad [\text{W}] \quad (2)$$

Onde q é taxa de calor gerado (W), F_c é a componente principal da força de usinagem (N) e v_c é a velocidade de corte (m/min).

3. MÉTODO CALORIMÉTRICO

A medição de temperatura em usinagem é um desafio experimental e muitos métodos experimentais foram desenvolvidos ao longo do tempo (Da Silva; Wallbank, 1999; Trent; Wright, 2000; Machado *et al.*, 2011). Cada método tem as suas próprias vantagens e desvantagens. A técnica adequada para um determinado problema depende da situação em consideração, tais como a facilidade de acesso, tamanho da área de medição, dinâmica do corte, precisão necessária, custo de instrumentação, etc. (Komanduri; Hou, 2001).

Denomina-se calorímetro um sistema fechado que não permite trocas de calor com o ambiente (adiabático). O método calorimétrico (“*calorimetric method*” na literatura inglesa) consiste em confinar os fenômenos de geração de calor em usinagem no interior de um calorímetro e avaliar as temperaturas envolvidas e o calor através de medições através de termopares/termômetros e das equações da Calorimetria.

O calor gerado no corte pode ser determinado com bastante precisão pelo método calorimétrico, permitindo medições de trabalho, potência, forças, temperatura média do cavaco, etc. apresentando boas concordâncias entre as medidas de potência obtida a partir de medições de torque (Komanduri; Hou, 2001).

Segundo Ferraresi (1970), a temperatura média do cavaco pode ser determinada aproximadamente através de calorímetro de água, Fig. (3).

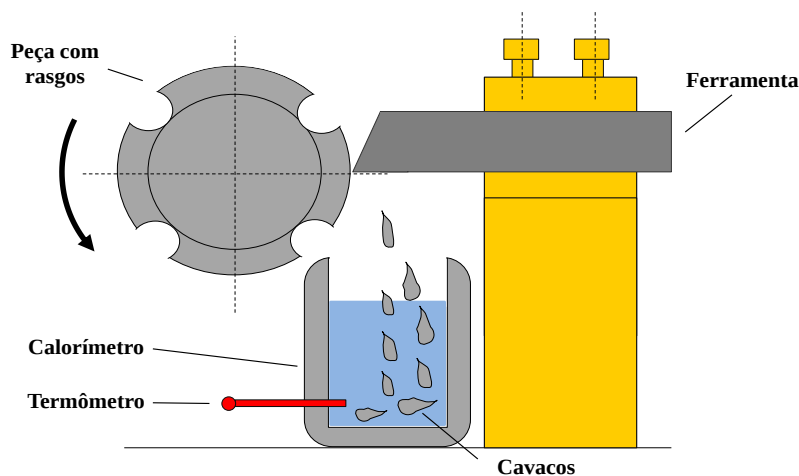


Figura 3. Determinação da temperatura média do cavaco através de calorímetro (adaptado de Ferraresi, 1970, p. 148).

A metodologia consiste na medição da temperatura inicial da água seguida da usinagem de uma peça com rasgos axiais (para haver quebra de cavaco). O cavaco gerado se aloja no interior do calorímetro. Após a usinagem, a temperatura final da água é medida após um tempo previamente determinado. Os cavacos são pesados após a secagem. Desta forma, a temperatura do cavaco é determinada pela equação do calorímetro, Eq. (3):

$$T_{cav} = \frac{(M_a + M_e \cdot c_e) \cdot (T_2 - T_1)}{M_c \cdot c} + T_2 \quad (3)$$

Onde M_c é a massa de cavaco (g), M_a é a massa da água no calorímetro (g), M_e é a massa equivalente do calorímetro (g), c é o calor específico do cavaco (cal/g.°C), c_e é o calor específico do calorímetro (cal/g.°C), T_2 é a temperatura final da água, do cavaco e do calorímetro (°C), T_1 é a temperatura inicial da água e do calorímetro (°C) e T_{cav} é a temperatura do cavaco, a ser determinada (°C).

A distribuição do calor gerado na furação foi investigada por Schmidt e Roubik (1949, *apud* Shaw, 1984; *apud* Komanduri; Hou, 2001). Os autores construíram três calorímetros de água para determinação do calor total gerado na furação de ligas de magnésio, do calor dissipado na ferramenta após o corte e do calor dissipado pelos cavacos. Os autores mostraram que a maior parte do calor gerado em usinagem foi dissipada pelos cavacos (cerca de 70 % a 85 %), cerca de 10 % do calor é dissipado pela peça e o restante é dissipado pela ferramenta de corte, conforme a Fig. (4).

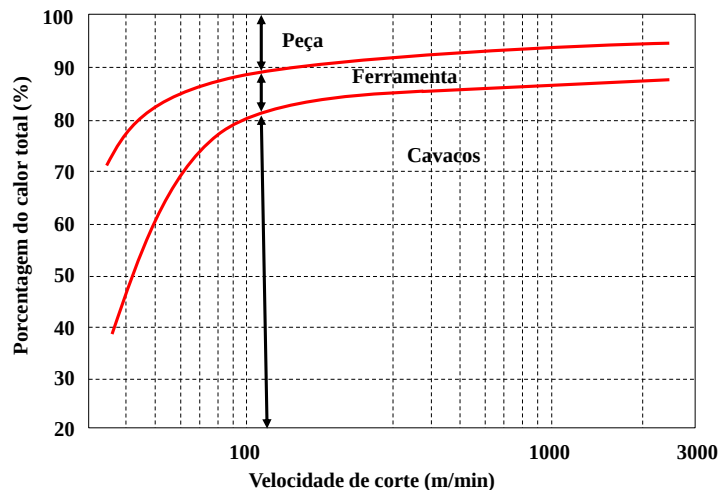


Figura 4. Distribuição do calor gerado em função da velocidade de corte (adaptado de Schmidt; Roubik, 1949 *apud* Komanduri; Hou, 2001).

Quan; He; Dou (2008) investigaram a geração de calor no torneamento de aço carbono AISI 1045 a altas velocidades de corte através do método calorimétrico. Os autores construíram três calorímetro de água, na forma de um recipiente de aço revestido com espuma adiabática (condutividade térmica de 0,0337 W/m.K).

A Figura (5) apresenta os resultados experimentais da taxa de geração de calor em usinagem (q) e da potência de corte (P_c) em função da velocidade de corte. O calor dissipado para o meio ambiente (q_{ma}) foi de aproximadamente 0,2 %. A taxa de calor gerado e a potência aumentam com a velocidade de corte. A maior parte do calor gerado foi dissipada pelos cavacos (q_c). Os resultados também indicam que o ensaio tem um erro de medição notável nas menores velocidades de corte, porém o método é adequado para estudos em altas velocidades de corte (Quan; He; Dou, 2008).

A Figura (6) apresenta a partição de calor em usinagem dissipado entre a ferramenta (R_f), peça (R_p) e cavacos (R_c) em função da velocidade de corte (Quan; He; Dou, 2008).

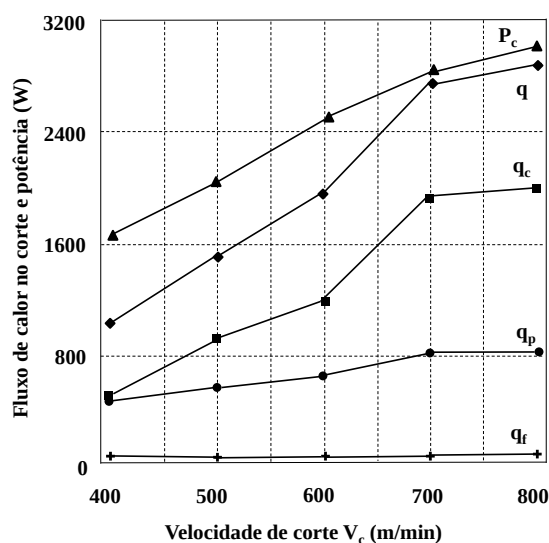


Figura 5. Taxa de calor gerado, potência consumida e partições do calor gerado em função da velocidade de corte (adaptado de Quan; He; Dou, 2008)

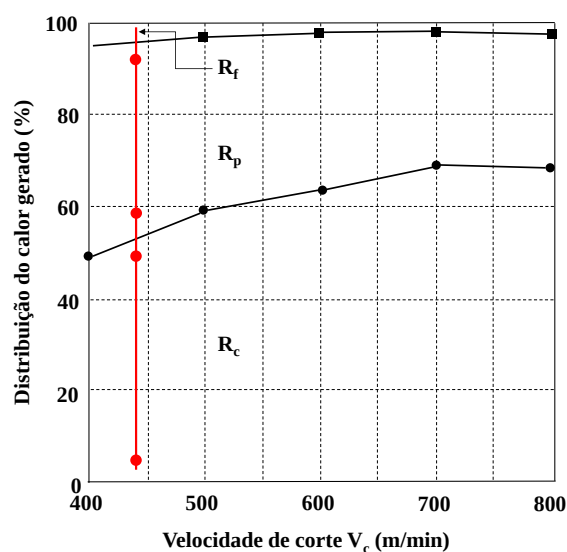


Figura 6. Distribuição do calor gerado em usinagem (partição) em função da velocidade de corte (adaptado de Quan; He; Dou, 2008)

Os resultados mostram que em velocidades de corte menores, o calor dissipado pela peça (q_p) tem sua maior parcela de contribuição, proporção próxima do calor dissipado pelos cavacos. O calor dissipado para a ferramenta de corte é cerca de 4% do calor total. Em velocidades de corte maiores, os cavacos dissipam maior parte do calor gerado, à medida que a velocidade de corte aumenta. Embora o calor de corte transferido para a peça e a ferramenta de corte também aumentem com a velocidade de corte, a proporção total destes diminuem. Assim, as temperaturas da peça e da ferramenta não podem aumentar continuamente à medida que a velocidade de corte aumenta (Quan; He; Dou, 2008).

Silva (2015) propôs a construção de calorímetro de água para medição da geração de calor na furação de ferro fundido cinzento. O calorímetro proposto consistiu de dois recipientes cilíndricos coaxiais, o interno do material PVC (do inglês *Polyvinyl Chloride*, policloreto de polivinila) e o externo de *Technyl*[®]. O espaço entre os dois recipientes foi preenchido, com fins de isolamento térmica, por poliestireno expandido comercial em pedaços (*Isopor*[®]). O pesquisador obteve percentuais de geração de calor entre 80 % a 99 %, para furação de ferro fundido cinzento com velocidade de corte de 30 m/min. Em suma, o calorímetro de água projetado e construído foi conveniente para avaliação da quantidade de calor gerada em usinagem, apesar dos possíveis erros associados às medições.

4. REFERÊNCIAS

- Danoso, J. P., s. d., “Datas e Personagens na História da Termodinâmica”, Instituto de Física de São Carlos - IFSC, 40 p., disponível em: http://www.ifsc.usp.br/~danoso/termodinamica/Historia_Termodinamica.pdf, acessado em: 30/10/2015.
- Da Silva, M. B., Wallbank, J., 1999, “Cutting Temperature: Prediction and Measurement Methods - A Review”, *Journal of Materials Processing Technology* 88, p. 195–202.
- Ferraresi, D., 1970, “Fundamentos da Usinagem dos Metais”, Editora Edgard Blücher Ltda, São Paulo, 751 p.
- Komanduri, R., Hou, Z. B., 2001, “A Review of the Experimental Techniques for the Measurement of Heat and Temperatures Generated in Some Manufacturing Processes and Tribology”, *Tribology International* 34, p. 653–682.
- Machado, Á. R., Abrão, A. M., Coelho, R. T., Da Silva, M. B., 2011, “Teoria da Usinagem dos Materiais”, São Paulo: Blucher, 2ª ed., 397 p.
- Nussenzveig, H. M., 2008, “Curso de Física Básica - Fluidos, Oscilações e Ondas, Calor”, São Paulo: Blucher, 4ª ed., volume 2, 314 p.
- Quan, Y., He, Z., Dou, Y., 2008, “Cutting Heat Dissipation in High-speed Machining of Carbon Steel Based on the Calorimetric Method”, *China Mechanical Engineering*, 3(2): p. 175–179.
- Schmidt A. O., Roubik J. R., 1949, “Distribution of Heat Generated in Drilling”, *Trans ASME* 1949, 71:242–5. (*apud* Komanduri; Hou, 2001; *apud* Shaw, 1984).
- Shaw, M. C., 1984, “Metal Cutting Principles”, New York, Oxford University Press.
- Silva, M. D., 2015, “Desenvolvimento e Construção de um Calorímetro para Processo de Furação”, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica - UFU, Uberlândia, 90 p.
- Trent, E. M., Wright, P. K., 2000, “Metal Cutting”, 4th Edition, Butterworths, London, ISBN 0408108568, 446 p.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq, CAPES e FAPEMIG pelo apoio financeiro às pesquisas do Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem (LEPU-UFU).

6. ABSTRACT

Quantify the temperatures involved and the heat generated during machining is of fundamental importance, as the cutting temperature is a critical parameter of the process, influencing the chip formation, cutting forces, tool life, dimensional control and surface integrity of the workpiece, machining costs, etc. The literature discusses various test methods used to measure temperature and heat machining, including calorimetric method. The objective of this paper is to present a review of the measurement of heat generated in machining through the calorimetric method, presenting methodologies and results of the heat generated partition between workpiece, cutting tool, chips and environment.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.