

ANÁLISE DA EVOLUÇÃO DA TEMPERATURA NA FERRAMENTA DURANTE O PROCESSO DE TORNEAMENTO

Alexandre Tácito Malavolta, malavolta@ufscar.br¹

Carlos E. H. Ventura, ventura@ufscar.br¹

¹Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de São Carlos, Rodovia Washington Luís km 235, 13565-905, São Carlos, SP, Brasil

Resumo: No processo de torneamento, uma elevada parcela da potência de corte é convertida em calor, gerando aumento da temperatura na região de contato ferramenta-peça. Esse efeito contribui com os mecanismos térmicos de desgaste da ferramenta, reduzindo sua vida, e pode causar alterações na camada subsuperficial da peça, prejudicando sua integridade. Com o objetivo de compreender o comportamento da temperatura na região de corte, este trabalho apresenta análises térmicas computacionais, empregando o método dos elementos finitos, para a previsão da evolução da temperatura na ferramenta durante o processo de torneamento. A distribuição da temperatura em função do tempo será avaliada para duas condições de aresta da ferramenta no torneamento de um aço endurecido com insertos de PCBN. Como resultado das simulações, foi possível observar um alto gradiente térmico em uma região muito próxima da ponta da ferramenta, além do potencial de aplicação de dissipadores de calor para reduzir a temperatura durante o corte.

Palavras-chave: torneamento, análise térmica, método dos elementos finitos

1. INTRODUÇÃO

Os processos de usinagem convencionais ainda representam uns dos meios mais utilizados para a produção e/ou acabamento de componentes na indústria metalmeccânica. Para atender a demanda de produção atual, a taxa de remoção e as velocidades de corte aplicadas durante o processo necessitam ser cada vez mais elevadas. Porém, estas velocidades são limitadas principalmente devido a problemas na ferramenta de corte utilizada. Nos últimos anos, ganhos na velocidade e taxa de remoção foram obtidos com o desenvolvimento de novas geometrias e de novos materiais para as ferramentas de corte, Fig. (1), em conjunto com a aplicação de revestimentos de alta resistência ao desgaste e alta dureza (cerâmicas, carbetos, nitretos etc.).

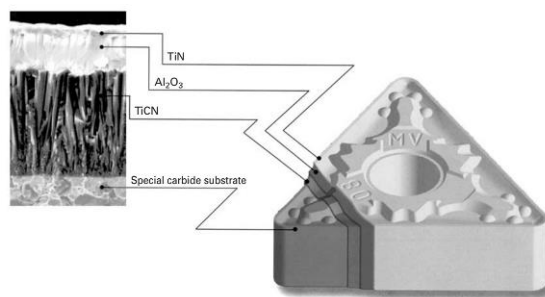


Figura 1. Exemplo de revestimentos em insertos de corte (Black e Kohser, 2008).

Minimizar o aquecimento ocasionado pelo processo de usinagem ainda representa um desafio tecnológico. As temperaturas elevadas na região de corte acarretam diversos problemas, como a queda de dureza, o desgaste prematuro e a falha superficial, com consequente diminuição da vida útil da ferramenta. O tempo gasto com a parada do processo de produção para a substituição da ferramenta representa um custo significativo que deve ser evitado. Além disso, a integridade superficial da peça também é prejudicada com o aquecimento. Alterações metalúrgicas, como a geração da chamada camada branca (martensita não revenida), podem gerar uma fragilização local e atuar como um concentrador de tensão na peça, diminuindo sua vida à fadiga.

Para desenvolver modelos de previsão das temperaturas na ferramenta de corte é importante compreender o mecanismo de formação do cavaco, durante o qual a maior parcela da energia térmica é dissipada na zona de cisalhamento primário, sendo que a maior parte desta energia é transferida para o cavaco e outra parte é transferida para a peça. Outra região de dissipação de energia térmica ocorre na zona de cisalhamento secundário. Esta região é responsável por fornecer a maior parcela de energia térmica incidente na zona de corte da ferramenta e acarreta

gradientes de temperatura localizados. A Fig. (2) esquematiza os principais fluxos térmicos atuantes durante o processo de corte, conforme Abouridouane et al (2016).

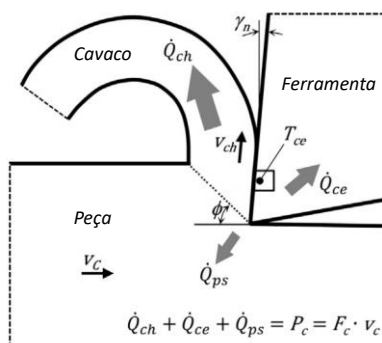


Figura 2. Representação dos fluxos térmicos durante o corte (Abouridouane et al, 2016).

Diversos autores investigaram a partição da energia térmica entre a ferramenta, o cavaco e a peça. Boothroyd (1975) afirma que a quantidade de calor que flui para a ferramenta pode ser desprezada para maiores velocidades, pois o cavaco flui muito rapidamente sobre a superfície de saída e possui maior capacidade de transferência de calor que o material da ferramenta. Ghani et al (2008) ajustaram um modelo de elementos finitos por meio de medições da temperatura no torneamento de um aço endurecido em uma região próxima à de corte e concluíram que, a baixas velocidades de corte (~ 150 m/min), a fração de calor que penetra a ferramenta é de aproximadamente 22%, enquanto que a altas velocidades de corte (~ 290 m/min) essa fração cai para 14%. Os autores afirmam que essa diminuição está relacionada a um processo mais adiabático, já que o tempo para condução do calor é reduzido em processos com elevadas velocidades. Já Kryzhaniivsky et al (2015) não explicitaram os coeficientes para a partição da energia gerada no corte, mas levaram em conta fluxos de calor nas superfícies de saída e de folga para o ajuste de um modelo de elementos finitos através de dados experimentais e demonstraram que, para um inserto com alto teor de PCBN, o fluxo de calor que entra pela superfície de folga corresponde a menos da metade do fluxo na superfície de saída.

Devido à complexidade envolvida no processo de formação do cavaco, como efeitos de contato e atrito, não linearidades etc., os modelos analíticos de previsão das temperaturas durante a usinagem fornecem valores médios e aproximados. Outra abordagem utiliza técnicas de medição experimental (termopares, termistores, pirômetros, câmeras térmicas) para a determinação das temperaturas envolvidas durante o processo de usinagem. Além das abordagens analítica e experimental, modelos térmicos computacionais utilizando o método dos elementos finitos também são empregados na determinação de temperaturas na usinagem. Contudo, a aplicação de tais modelos exige um grande número de parâmetros de entrada, que devem ser determinados através de experimentos. Entre eles estão as propriedades do material a altas deformações, a grandes taxas de deformação e a elevadas temperaturas (Abukhshim et al, 2006). Kagnaya et al (2011) observaram que a temperatura na ferramenta aumenta consideravelmente com maiores valores de condutividade térmica. Com isso, eles concluíram que seria ideal considerar no modelo numérico a variação do coeficiente de partição de calor em função da temperatura.

Neste contexto, o objetivo principal deste trabalho é a investigação, via método dos elementos finitos, dos níveis de temperatura na ferramenta de corte durante o processo de torneamento cilíndrico externo a seco do aço endurecido AISI 5115 com insertos de PCBN. Tendo em vista as dificuldades na simulação do processo de remoção de material, propõe-se aqui um modelo simplificado para análise térmica da ferramenta. Para isso, dados da força de corte obtidos em testes experimentais de usinagem foram utilizados para estimar a potência térmica de aquecimento da ferramenta. Os resultados gerados pelo modelo mostram os gradientes térmicos na zona de corte e podem servir de suporte para melhor compreensão do desgaste da ferramenta.

2. METODOLOGIA

A fim de se obter os dados de entrada para a simulação por elementos finitos, foram realizados testes de torneamento com insertos SNMA120408 compostos de oito pontas de PCBN (90% CBN + Co + TiCN) brasadas sobre uma base de metal duro classe ISO K (96%WC + Co). Foram aplicados dois tipos de preparação de aresta: arredondamento simétrico com raio de aresta $r_\beta = 50$ μm (Caso A); chanfro simples com largura $b = 100$ μm e ângulo $\gamma = 27^\circ$ (Caso B). Trechos com 20 mm de comprimento foram torneados em uma barra de aço endurecido AISI 5151 (60 HRC) com 64 mm de diâmetro, tendo os parâmetros sido mantidos constantes: velocidade de corte $v_c = 200$ m/min, avanço por volta $f = 0,1$ mm e profundidade de usinagem $a_p = 0,1$ mm. As forças foram medidas por meio de um dinamômetro Kistler 9129AA conectado a um amplificador de sinais Kistler 5015. Sabendo-se que a potência total de usinagem corresponde à soma das componentes de corte e avanço, a potência total consumida no processo pode ser

calculada por meio da multiplicação das componentes da força pelas respectivas velocidades (potência total = força de corte $\times$ velocidade de corte + força de avanço $\times$ velocidade de avanço).

A partir dos valores experimentais da potência total do processo, aplicou-se um particionamento para estimar o fluxo de calor incidente na zona de corte da ferramenta. Neste estudo, considerou-se que 10% da energia referente à potência de corte é transferida para a ferramenta. Em seguida, foi desenvolvido um modelo térmico computacional, empregando-se o método dos elementos finitos, para executar análises térmicas transientes e avaliar as evoluções de temperatura na ferramenta.

2.1. Modelo de elementos finitos

O modelo térmico computacional foi elaborado no *software NX-Thermal Flow* a partir das geometrias da pastilha e do porta-ferramenta, as quais foram obtidas do fabricante. A Fig. (3) ilustra a malha gerada, composta por elementos sólidos de oito nós e elementos planos de 4 nós. A Tab. (1) apresenta um resumo da malha do modelo com a quantidade de nós e elementos utilizados em cada componente. Todas as análises foram transientes, com a aplicação da potência térmica na zona de corte variando linearmente seu valor de zero até atingir o máximo em 0,06 segundos. O tempo total de análise com potência máxima aplicada é de 300 s para todos os casos estudados. Este tempo de 300 s corresponde a 25 passes de corte nas condições dos testes ($v_c = 200$ m/min, $a_p = 0,1$ mm, $f = 0,1$ mm/volta, e comprimento usinado de 20 mm). Tal valor foi adotado nas análises para ilustrar como é a evolução do comportamento térmico do conjunto inserto, substrato e porta-ferramentas acima do tempo necessário de 12 s para um passe de acabamento.

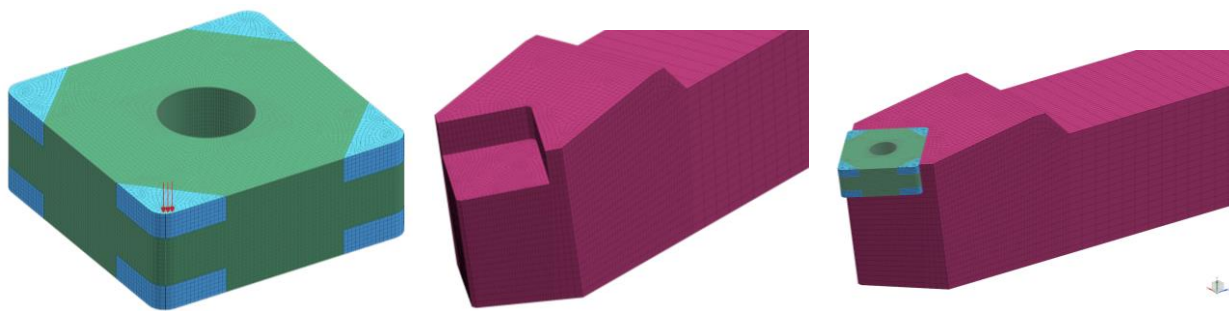


Figura 3. Detalhes da malha do modelo térmico de elementos finitos.

Tabela 1. Resumo da malha do modelo.

Componente da malha	Tipo de elemento	Quantidade de elementos	Quantidade de nós
Inserto CBN	Sólido de 8 nós	9696	12936
Substrato	Sólido de 8 nós	98496	107612
Porta ferramenta	Sólido de 8 nós	60492	66292
Espalhador de cobre	Plano de 4 nós	1044	1121

A principais condições de contorno consideradas no modelo são: (a) acoplamento térmico de 200 W/K entre o inserto e o porta-ferramenta pelas faces de assentamento inferior, (b) acoplamento térmico de 50 W/K entre as faces laterais do inserto e do porta-ferramenta, (c) acoplamento ideal entre PCBN e metal duro e (d) convecção livre com coeficiente de 15 W/m².K do porta-ferramenta com uma temperatura ambiente de 20°C. As propriedades termo-físicas dos materiais utilizados nos modelos são apresentadas na Tab. (2) e foram baseadas no trabalho de Ghani et al (2008) e no ASM Handbook (1989).

Tabela 2. Propriedades termo-físicas dos materiais.

	Condutividade térmica [W/m.K]	Densidade [kg/m ³]	Calor específico [J/kg.K]
Inserto PCBN (90%CBN + Co + TiCN)	44	4370	750
Substrato (96%WC + Co)	121	11900	350
Porta-ferramenta	50	7844	470

Foram analisados quatro casos denominados de A1, B1, A2 e B2, de acordo com a Tab. (3). O caso A1 representa a condição de corte A (aresta arredondada), com potência incidente na ferramenta de 15,5 W. O caso B1 corresponde à condição de corte B (aresta chanfrada), com potência incidente na ferramenta de 12,1 W. Já os casos A2 e B2

representam investigações na busca de soluções para diminuir os níveis de temperatura na zona de corte. Para tal, estes dois casos consideram uma chapa de cobre com 1 mm de espessura, condutividade térmica de 387 W/m.K, densidade de 8920 kg/m³ e calor específico de 385 J/kg.K, acoplada à pastilha, conforme esquematizado na Fig. (4). O objetivo deste acoplamento entre a pastilha e a chapa de cobre é criar um espalhador de calor.

Tabela 3. Casos analisados.

	Potência de corte [W]	Fator de partição	Potência térmica na ferramenta [W]	Obs.
Caso A1	155,5	10%	15,5	Sem espalhador
Caso A2	155,5	10%	15,5	Com espalhador
Caso B1	121	10%	12,1	Sem espalhador
Caso B2	121	10%	12,1	Com espalhador

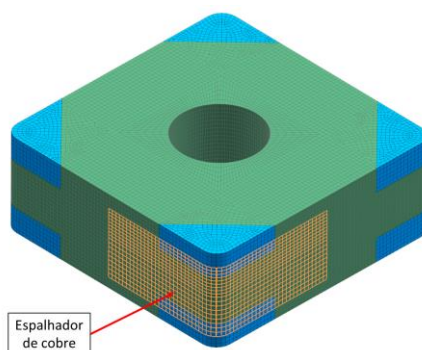


Figura 4. Detalhe da malha do espalhador de cobre acoplada ao inserto para os casos A2 e B2.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para avaliar a evolução das temperaturas ao longo do tempo, foram selecionados sete pontos de coleta de dados ilustrados na Fig. (5). Os pontos de 1 a 4 foram distribuídos na pastilha e os pontos de 5 a 7, no porta-ferramenta.

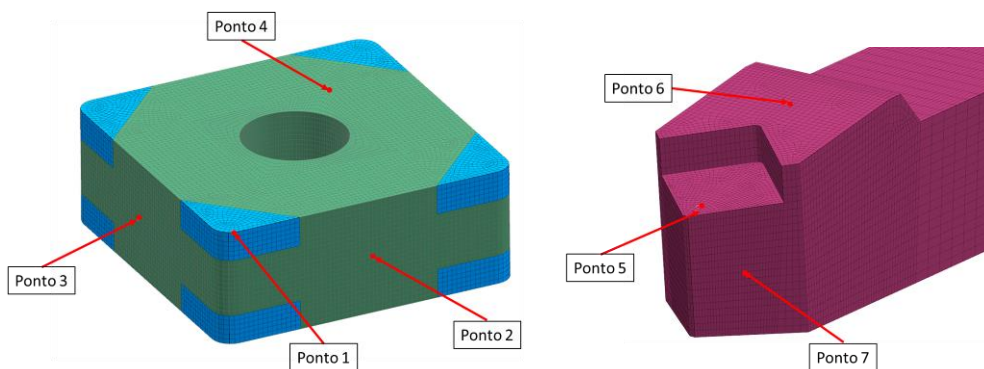


Figura 5. Identificação e localização dos pontos de coleta de resultados.

O resumo com os valores das máximas temperaturas obtidas nestes pontos de coleta de resultados após um período de simulação de 300 s é apresentado na Tab. (4) para todos os casos analisados. Os dados mostram que a diminuição da potência de entrada da condição de corte A (15,5 W) para a condição B (12,1 W) representou uma queda da temperatura máxima na zona de corte da ferramenta de aproximadamente 180°C. Menores cargas térmicas e mecânicas ocorrem na aresta chanfrada em comparação com a aresta arredondada devido à menor deformação do cavaco e ao menor comprimento de contato entre peça e ferramenta, o que reduz o atrito na região de corte.

Tabela 4. Temperaturas máximas após 300 s.

	Temperatura máxima [°C]						
	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4	Ponto 5	Ponto 6	Ponto 7
Caso A1	869,3	61,9	60,6	51,6	65,6	41,9	49,1
Caso A2	820,7	63,2	61,8	51,7	64,0	42,0	49,1
Caso B1	682,4	52,1	51,2	44,1	55,1	36,7	42,3
Caso B2	644,5	53,2	52,0	44,2	53,8	36,8	42,3

Outro resultado evidenciado pelos dados na Tab. (4) se refere às elevadas diferenças de temperatura na ferramenta entre a zona de corte (ponto 1) e outras localidades afastadas desta zona (pontos 2 a 4). Estes gradientes acentuados podem ser explicados em virtude da baixa difusividade térmica do inserto (relacionada com sua baixa condutividade térmica). Além disso, a localização da potência térmica de entrada em uma área reduzida, representando a zona de corte, também colabora para aumentar este gradiente. No porta-ferramenta, verificam-se menores temperaturas e um gradiente menos intenso. Embora sua condutividade térmica seja ainda menor que a do substrato de metal duro, sua maior dimensão e área exposta trocando calor por condução e convecção contribui para essa maior dissipação térmica. A Fig. (6) ilustra a distribuição de temperatura na pastilha completa e em detalhe no instante 300 s, referente ao caso A1. A distribuição de temperaturas no porta-ferramenta para o mesmo caso é mostrada na Fig. (7).

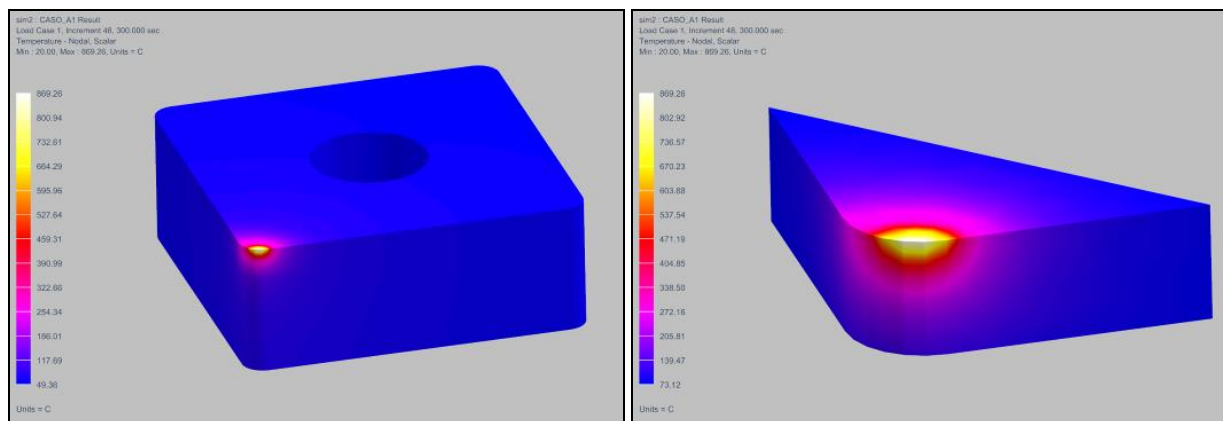


Figura 6. Campo de temperatura na pastilha no instante 300 s - Caso A1.

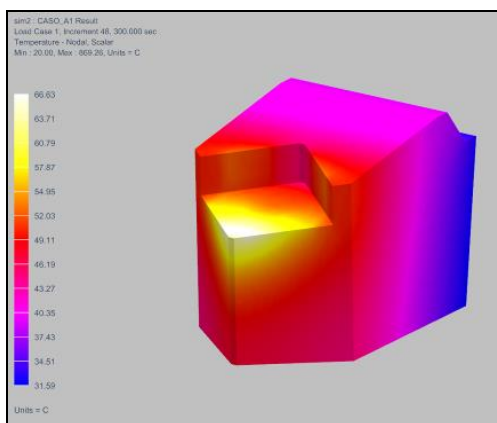


Figura 7. Campo de temperatura no porta-ferramenta no instante 300 s - Caso A1.

Pode-se observar também que a proposta de utilização de um espalhador de calor, nas condições modeladas, forneceu uma redução de aproximadamente 50°C no ponto de máxima temperatura (ponto 1) entre o caso A1 (sem espalhador) e A2 (com espalhador). Já para a condição de corte B, a redução obtida foi de 38°C entre o caso B1 (sem espalhador) e B2 (com espalhador). Uma comparação dos campos de temperatura obtidos com a utilização do espalhador de calor na condição de corte B é mostrada na Fig. (8).

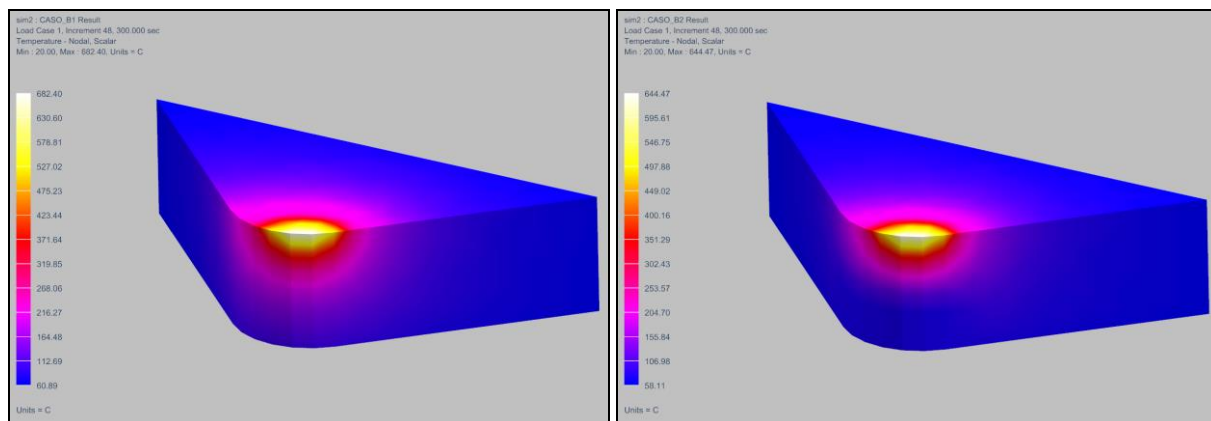


Figura 8. Comparação dos campos de temperatura - Caso B1 (à esquerda) e Caso B2 (à direita).

Apesar de fornecer uma diminuição dos níveis de temperatura, a utilização do espalhador de calor, nas condições modeladas, acentuou levemente o gradiente térmico espacial. Para avaliar este gradiente, a distribuição de temperaturas na pastilha ao longo da direção vertical, variando da posição 0 mm até a posição 1,2 mm, em destaque na Fig. (9), é ilustrada no gráfico da Fig. (10) para os quatro casos analisados. Esta distribuição se refere ao instante de simulação 300 s. Devido a esse forte gradiente, nos pontos de 2 a 7, a temperatura se manteve aproximadamente constante.

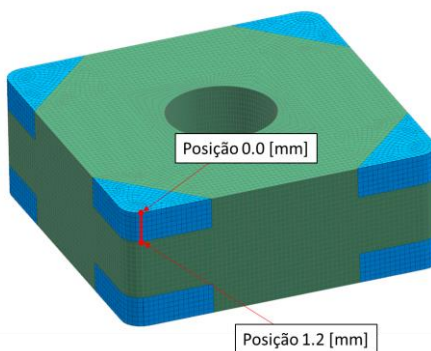


Figura 9. Posições para análise da evolução de temperaturas - Caso B2.

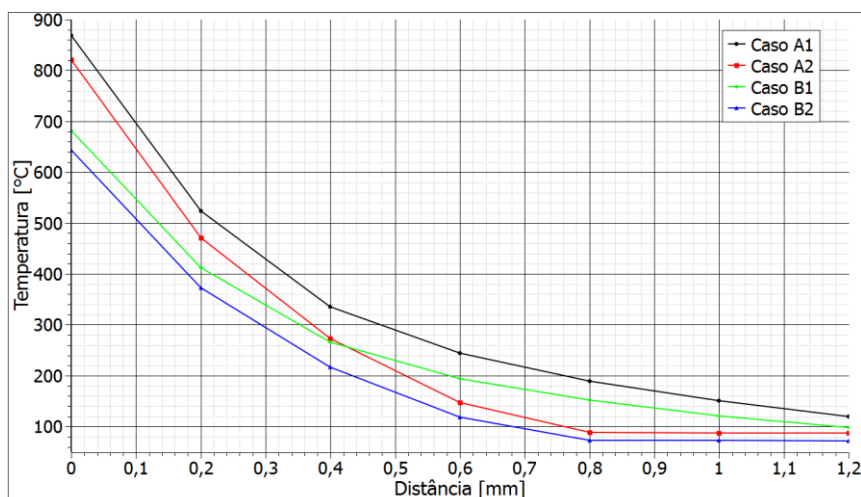


Figura 10. Distribuição de temperaturas ao longo da posição vertical.

As curvas de evolução de temperatura ao longo do tempo para todos os casos analisados são apresentadas a seguir. A Fig. (11) mostra a evolução do ponto de máxima temperatura (ponto 1) durante um tempo de 0,5 s. É possível observar a alta taxa de aquecimento durante os primeiros 0,06 segundos, que corresponde ao período que a potência de corte leva para atingir seu máximo valor.

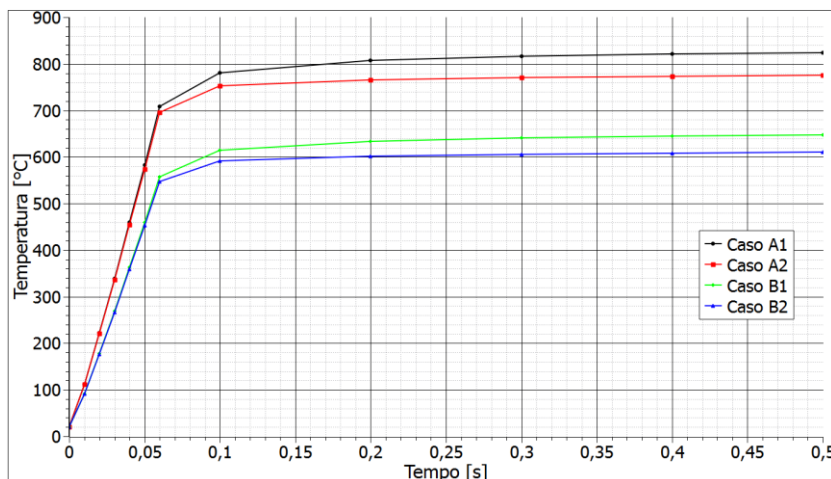


Figura 11. Evolução de temperaturas do ponto 1.

A evolução de temperaturas ao longo do tempo para os pontos de 2 a 7 é ilustrada no gráfico da Fig. (12) para o caso A1 e da Fig. (13) para o caso A2. Observa-se que as curvas de temperatura praticamente atingem o regime a partir do instante 300 s analisado. Antes disso, observam-se maiores inclinações das curvas relacionadas aos pontos mais próximos à ponta do inserto (2, 3 e 5). A aplicação do espalhador de calor não alterou de forma significativa a evolução da temperatura no tempo, mas reduziu levemente a temperatura máxima no ponto 5 e aumentou as temperaturas obtidas nos pontos 2 e 3. Esses últimos pontos estão associados às extremidades da chapa de cobre colocada sobre o inserto.

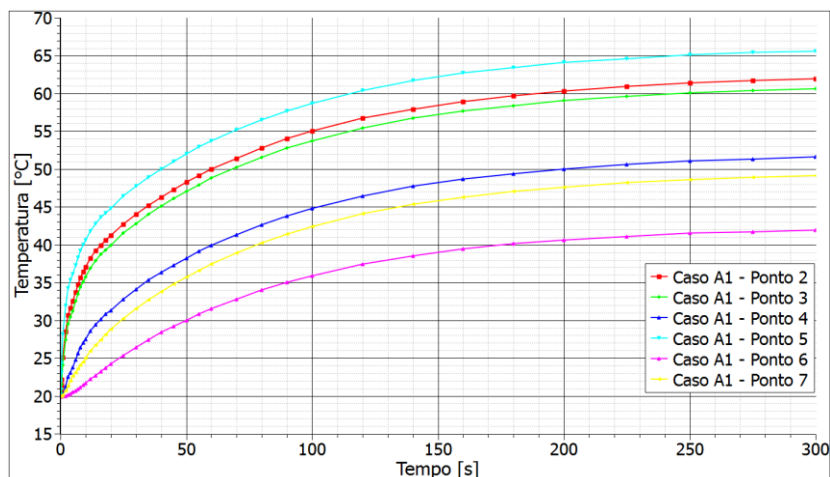


Figura 12. Evolução de temperaturas - Caso A1.

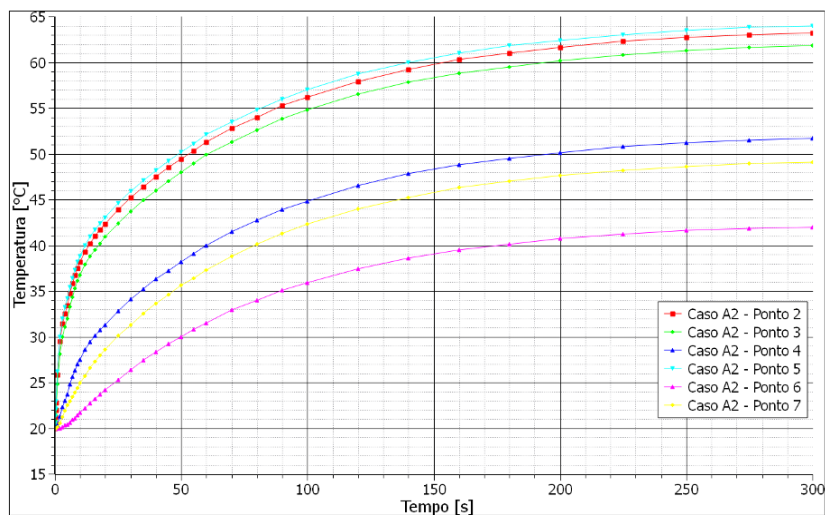


Figura 13. Evolução de temperaturas - Caso A2.

4. CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos, pôde-se verificar o comportamento da temperatura em diferentes pontos na região de corte e próximos a ela para dois tipos de preparação de aresta. Tendo em vista a hipótese utilizada para a distribuição de calor no sistema ferramenta-peça-cavaco, uma temperatura cerca de 180°C maior foi observada para a aresta arredondada em comparação à aresta chanfrada. Tal resultado se justifica pela diferente relação de contato entre ferramenta e peça nestes dois casos.

O elevado gradiente térmico observado no inserto, decorrente das propriedades do material da ferramenta, contribui para a concentração de calor em sua extremidade e leva a temperaturas bem menores que a de corte no porta-ferramenta, as quais, entretanto, são sensíveis à variação da preparação de aresta. Já a aplicação de uma chapa de cobre como espalhador de calor não causa variações de temperatura no porta-ferramenta e seu efeito corresponde fundamentalmente a uma redução média de temperatura de 45°C na ponta do inserto.

Estudos futuros devem analisar a resposta de outros tipos de espalhadores de calor, verificando sua influência sobre a temperatura máxima na região de corte. Além disso, após uma avaliação da sensibilidade de diferentes partes do porta-ferramenta a alterações da temperatura durante o corte, testes de torneamento também devem ser realizados para verificação da possibilidade de medição de temperatura fora dessa região.

5. REFERÊNCIAS

- Abouridouane, M., Klocke, F. and Döbbeler, B., 2016, “Analytical temperature prediction for cutting steel”, CIRP Annals - Manufacturing Technology, Vol. 65, pp. 77-80.
- Abukhshim, N.A., Mativenga, P.T., Sheikh, M.A., 2006, “Heat generation and temperature prediction in metal cutting: A review and implications for high speed machining”, International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 46, pp. 782-800.
- ASM Handbook, 1989, “Vol. 16 – Machining”, ASM International.
- Black, J.T. and Kohser, R.A., 2008, “DeGarmo’s Materials and processes in manufacturing”, Ed. John Wiley & Sons.
- Boothroyd, G., 1975, “Fundamentals of Metal Machining and Machine Tools”, McGraw-Hill.
- Ghani, M.U., Abukhshim, N.A., 2008, “An investigation of heat partition and tool wear in hard turning of H13 tool steel with CBN cutting tools”, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 39, pp. 874-888.
- Kagnaya, T., Lazard, M., Lambert, L., Boher, C., Cutard, T., 2011, “WSEAS Transactions on Heat and Mass Transfer”, Vol. 6, pp. 71-80.
- Kryzhanivskyy, V., Bushlya, V., Gutnichenko, O., Petrusha, I.A., Stahl, J.-E., 2015, “Modelling and experimental investigation of cutting temperature when rough turning hardened tool steel with PCBN tools”, Procedia CIRP, Vol. 31, pp. 489-495.

6. DIREITOS AUTORAIS

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

ANALYSIS OF TOOL TEMPERATURE EVOLUTION DURING TURNING

Alexandre Tácito Malavolta, malavolta@ufscar.br¹

Carlos E. H. Ventura, ventura@ufscar.br¹

¹Department of Mechanical Engineering, Federal University of São Carlos, Rodovia Washington Luís km 235, 13565-905, São Carlos, SP, Brazil

Abstract: During turning, a high portion of cutting power is converted into heat and generates an increase in temperature in the tool-workpiece contact region. This effect contributes to the intensification of thermal tool wear mechanisms, which reduce tool life. Moreover, it can cause metallurgical changes in the workpiece subsurface, damaging its integrity. In order to better understand the temperature behavior in the cutting region, this work presents computational thermal analyses by using the finite element method to predict tool temperature evolution during turning. The temperature distribution is evaluated for two cutting edge preparations applied in turning of a hardened steel with PCBN cutting inserts. After the simulations, a high thermal gradient in a region very close to the tool tip was observed. Furthermore, the potential of applying a heat sink to reduce cutting temperature was analyzed.

Keywords: turning, thermal analysis, finite element method

RESPONSIBILITY NOTICE

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper.