

ESTUDO DA TEMPERATURA DE USINAGEM EM AÇOS ENDURECIDOS COM VARIAÇÃO DA VELOCIDADE DE CORTE

Brandão, L.C. lincoln@sc.usp.br

Universidade Federal de São João del Rei – UFSJ
Praça Frei Orlando, 170 – Centro
São João Del Rei – Minas Gerais

Coelho, R.T. rtcoelho@sc.usp.br

Escola de Engenharia de São Carlos – EESC/USP
Avenida Trabalhador São-carlense, 400 – Centro
São Carlos – São Paulo

Resumo: *Este trabalho avalia a temperatura em materiais endurecidos em função da variação da velocidade em formas complexas. Foram usinados corpos de prova com $\frac{1}{4}$ de circunferência em aço AISI D2 e H13 com dureza de 57 e 53 HRC, respectivamente. Os testes foram realizados utilizando a estratégia descendente e raster com ferramentas Ball-Nose em um centro de usinagem de três eixos. Foi empregada a técnica de termopar inserido onde avaliou-se a temperatura do corpo-de-prova em função da variação da velocidade para cada ponto de contato da ferramenta e de região de inserção do corpo-de-prova. Dois sistemas de resfriamento foram empregados, ar frio e ar comprimido com o objetivo de avaliar a capacidade de reduzir a temperatura do processo. Os valores encontrados demonstram que a velocidade não influenciou no aumento da temperatura do corpo-de-prova e que os dois sistemas de resfriamento foram eficientes em reduzir a temperatura do corpo-de-prova.*

Palavras-chave: *Temperatura, Altas Velocidades de Corte, Moldes e Matrizes, Ar Frio.*

[1] INTRODUÇÃO

A temperatura é um dos principais fatores que influenciam o desgaste de ferramenta sendo originária, além da energia de deformação do material dentre outros fatores, do atrito que ocorre nas interfaces ferramenta/peça e ferramenta/cavaco. Devido às altas temperaturas na região de corte, em geral as ferramentas perdem sua dureza original, aumentando rapidamente o desgaste por abrasão e em muitos casos elementos químicos constituintes da ferramenta podem difundir-se para dentro do cavaco, ou reagir quimicamente com a peça, ou fluido de corte JASPERS⁽¹⁾.

Com o aumento da temperatura na interface cavaco/ferramenta/peça, podem ocorrer desgastes nas ferramentas de corte devido a processos químicos e físicos. Isso pode acontecer em camadas superficiais da ferramenta, na superfície de saída da ferramenta como também na superfície de folga. Os principais mecanismos de desgaste que ocorrem são; o desgaste por adesão, desgaste por abrasão, desgaste por difusão, desgaste por delaminação entre outros e podem ocorrer esquematicamente conforme apresentada na KOPAC⁽²⁾. Como os conceitos da tecnologia HSM ainda não são dominados totalmente, pode-se dizer que devido às altas velocidades de avanço utilizadas no processo de corte, estas apresentam um tempo de contato mínimo na região de formação de cavaco. Porém, o fenômeno da formação do cavaco para altas velocidades de corte, taxas de deformação, recalque do material usinado ainda precisa ser estudado e compreendido.

Para evitar este aquecimento desde os primórdios dos processos de usinagem é fluido de corte é empregado. O principal objetivo do fluido de corte utilizado na maioria das indústrias que empregam usinagem é retirar o calor gerado durante o processo de corte, melhorando assim o tempo de vida das ferramentas e aprimorando o acabamento e as tolerâncias dimensionais das peças. Além disso, o fluido de corte evita o surgimento de arestas postiças de corte, principalmente na usinagem do aço inox e do Alumínio e suas ligas, pois ambos apresentam uma tendência a aderir na ferramenta durante o recalçamento do material SREEJITH & NGOI⁽³⁾.

Segundo Silva⁽⁴⁾, para minimizar o efeito do aquecimento na ferramenta e manter a peça sob condições de temperatura ambiente sem que ocorra uma dilatação térmica muito grande durante a usinagem, são utilizados fluidos de corte com diversas composições. Os fluidos refrigerantes baseados em emulsão ainda estão sendo usados em grandes quantidades na indústria metal-mecânica, gerando elevados custos de consumo e de descartes, além do prejuízo ambiental. A indústria metal-mecânica, dentro do processo de corte de metais, tem uma vasta utilização de fluidos de corte que resulta em problemas de várias ordens, que vão desde a geração de efeitos nocivos no ambiente de trabalho até a agressão ao meio ambiente. Assim busca-se um processo menos nocivo ao meio ambiente, que gere menos problemas em relação à saúde do operador e que possa ser absorvido e reciclado pela natureza sem causar problemas ambientais. A usinagem a seco e sua compreensão volta a ser assunto de pauta para empresas que querem se enquadrar nas novas legislações ambientais dos atuais cenários aos quais estão inseridas.

A tendência para o desenvolvimento da usinagem com alta velocidade geralmente é realizada em condições a seco, principalmente no fresamento de materiais endurecidos como os utilizados para moldes e matrizes. Um dos motivos para a usinagem a seco deve-se ao fato de que para alguns formatos côncavos de moldes e matrizes fica difícil retirar o fluido da região de corte, diminuindo a visualização do operador da máquina durante o processo e aumentando os custos relativos ao processo de retirada do fluido. Outro motivo é que, segundo Vieira et al.⁽⁵⁾, diversos estudos de fresamento já demonstraram a ineficiência da aplicação de fluidos refrigerantes, do ponto de vista da vida da ferramenta. Quando se fura a seco, por exemplo, deseja-se obter a mesma vida de uma ferramenta utilizada com sistemas de refrigeração, devendo-se, para tanto, trabalhar com parâmetros de corte menores do que com o processo de furação convencional YUHARA⁽⁶⁾.

Porém, o processo de furação a seco ainda deve ser melhor estudado uma vez que fluidos ainda precisam ser utilizados porque promovem a lubrificação e a expulsão dos cavacos, evitando que os cavacos se soldem na aresta de corte e no furo. Sem a utilização de fluido a rugosidade de um furo pode ser duas vezes maior do que quando se utiliza fluido como elemento lubrificante/refrigerante GRAHAN⁽⁷⁾. Dessa forma, métodos alternativos de refrigeração para processos mais exigentes devem ser propostos e pesquisados, coberturas de ferramentas também devem apresentar características superiores para suportarem altas taxas de calor e ao mesmo tempo proporcionarem um efeito lubrificante como tem acontecido atualmente. Desta forma, novas ferramentas e coberturas devem permitir um equilíbrio entre a melhoria das condições de corte e o meio ambiente sem afetar a produtividade e não gerando altos custos de implantações e modificações do atual chão de fábrica conhecido.

Atualmente, poucos trabalhos têm sido desenvolvidos utilizando sistemas alternativos de resfriamento, Weinert et al.⁽⁸⁾, por exemplo, utilizaram como sistema alternativo o gelo seco (CO₂) em estado de agregado sólido na usinagem do aço Inoxidável austeníticos-ferríticos. Os testes conseguiram minimizar o efeito do desgaste de flanco e alterar o comportamento do cavaco, que se apresentou na forma de pequenas espirais e lascas, devido a grande diferença de temperatura entre a parte superior e inferior do cavaco. Com uma deformação mais reduzida a formação de lascas e rebarbas é minimizada e a temperatura da peça após a usinagem fica em torno de 18°C, muito inferior aos 55°C, conseguidos nos ensaios de MQL. Um problema encontrado na utilização destes sistemas de resfriamento está ligado à capacidade do fluido de remover o calor da região de corte. Pode ser muito complicado estabelecer modelos físicos e matemáticos para a compreensão do transporte condutivo/convectivo de calor e revelar as várias correlações na transferência de calor dos processos de usinagem. O valor do coeficiente de transferência de calor " h_m " para o ar é de

aproximadamente $0,06525 \text{ W.m}^{-2}.\text{C}^{-1}$ para regimes laminares sendo quase 10 vezes menor que o coeficiente da água, normalmente utilizada nas misturas com óleo, o qual é de aproximadamente $0,597 \text{ W.m}^{-2}.\text{C}^{-1}$. Pode-se dizer, portanto, que sua capacidade de retirar calor é muito inferior INCROPERA⁽⁹⁾.

Nos ensaios realizados por Kim et al.⁽¹⁰⁾, com ferramentas de aço rápido e carbetos de Tungstênio com coberturas de TiN e TiAlN, com fluido em abundância, ar gelado e a seco. Observou-se que a vida da ferramenta foi 1,7 e 1,4 vezes maior com a aplicação do ar comprimido gelado a -9 e -35 °C, respectivamente, quando comparada com o ensaio com fluido em abundância, considerando-se uma mesma medida de desgaste de flanco em todos os ensaios. Ko et al.⁽¹¹⁾, realizou testes com materiais endurecidos com 58 HRC utilizando-se ferramentas de PcBN e de metal duro com revestimento de TiN. O sistema de resfriamento com ar gelado usado nos experimentos proporcionou um aumento de 30% no tempo de vida das ferramentas de metal duro com revestimento, quando comparada com ferramentas de PcBN, mostrando que é possível usar materiais endurecidos com um ferramental de baixo custo, utilizando ferramentas com revestimento de TiN.

Considerando o baixo custo do ferramental utilizado na usinagem de moldes e matrizes em relação ao custo final do produto, atualmente a usinagem com os sistemas de resfriamento mais comuns não visa uma maior vida de ferramentas, mas sim evitar as distorções térmicas da superfície usinada. O direcionamento de um sistema para a refrigeração da peça, evitando-se variações dimensionais, que utilize as baixas temperaturas (-10 °C) poderá surgir como fator que irá melhorar a qualidade do produto, sem que se agrida o meio ambiente com os fluidos sintéticos ou emulsionáveis tradicionais. Dessa forma, desenvolver trabalhos que tenham como objetivo minimizar a aplicação de óleos emulsionáveis torna-se primordial para manter as empresas do ramo metal/mecânico atuantes no cenário atual. Propostas alternativas como a usinagem a seco, a utilização de sistemas alternativos como o ar frio e resfriamento criogênico, devem ser objetos de variados testes e pesquisas futuras para o aprimoramento destas técnicas e uma correta, precisa e definitiva aplicação destas técnicas na produção industrial.

[2] METODOLOGIA

A máquina utilizada foi um Centro de Usinagem vertical HERMLE, modelo C 800 U, com três eixos e curso de 800, 600 e 500 mm para X, Y e Z, respectivamente. O motor do eixo árvore apresenta uma potência de 18 kW, com faixa de rotação de 20 a 24.000 rpm. Foram usadas três tipos de ferramentas nos testes de fresamento, todas de metal duro micro-ligado, sendo duas com o revestimento de (TiAl)N e uma com aplicação de uma placa de PcBN. A Fig. (1) mostra os detalhes construtivos da ferramenta Fr1 e a Fig. (2) mostra detalhes das ferramentas Fr2 e Fr3. A Fig. (2a) mostra as dimensões das duas ferramentas. Na Fig. (2b) é apresentada uma figura esquemática da ferramenta Fr2, e na Fig. (2c) o detalhe mostra a placa de PcBN aplicada na superfície de saída da ferramenta Fr3. As duas ferramentas são ponteiros maciças de metal duro micro-ligado, ambas são fixadas por contração térmica em uma haste cilíndrica DIN 1835, forma A com 16 mm de diâmetro e 135 mm de comprimento. A Tab. (1) mostra as dimensões das ferramentas Fr1, Fr2 e Fr3.

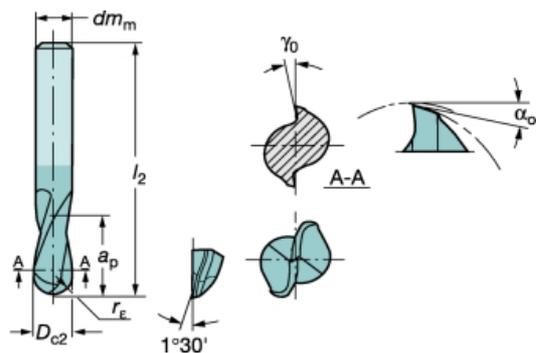


Figura 1. Ferramenta Fr1

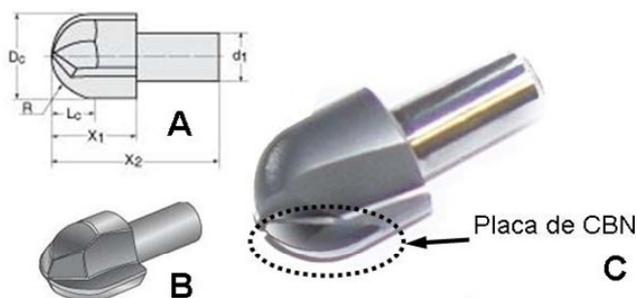


Figura 2. Ferramenta Fr2 e Fr3

Tabela 1. Dimensões das ferramentas empregadas nos experimentos.

Ferramenta R216.42 16030 – AK32G 1610 (Fr1)											
Código	l_2 [mm]	dm_m [mm]	a_p [mm]	r_ϵ [mm]	D_{c2} [mm]	γ_o [°]	α_o [°]	Z_n [Adm]	Cobertura	Classe ISO	
Fr1	125	16	32	16	16	1.5	12	2	(TiAl)N	H10F	
Ferramentas F1827R.Z.16.Z2.08 WXK15 (Fr2) e F1827R.Z.16.Z2.08 WCB80 (Fr3)											
Código	D_c [mm]	R [mm]	L_c [mm]	X_1 [mm]	X_2 [mm]	d_1 [mm]	γ_o [°]	α_o [°]	Z_n [Adm]	Cobertura	Classe ISO
Fr2	16	8	9	16	32	8	0	5	2	(TiAl)N	H15
Fr3	16	8	9	16	32	8	0	5	2	PcBN	80% cBN

Os corpos-de-prova tinham a seguinte dimensão; 14 x 48 x 100 mm, conforme Fig. (3). A parte utilizada para os testes de usinagem foi à superfície semicircular do corpo-de-prova que apresentava um raio de 14 mm e uma espessura de 5 mm. O motivo deste formato foi produzir uma variação da velocidade de corte de um valor mínimo a máximo na superfície semicircular, considerando uma estratégia de corte de 2 ½ eixos.

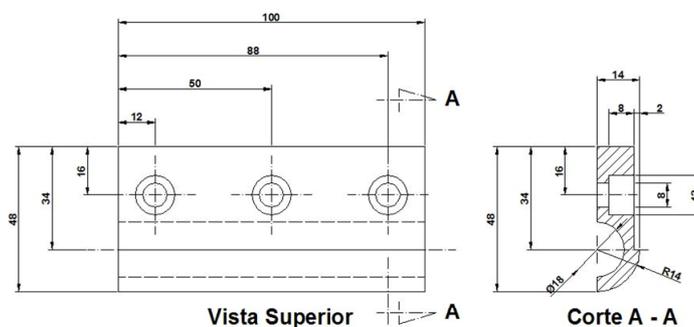


Figura 3. Detalhe do corpo-de-prova.

Os experimentos de fresamento foram realizados de duas formas: o primeiro utilizou uma estratégia de movimento raster usinando toda a superfície do corpo-de-prova. A segunda utilizou um deslocamento da ferramenta somente com movimento descendente exatamente sobre as linhas onde estavam montados os termopares Fig. (4a). Foram escolhidas duas velocidades de corte para os testes; 200 m/min para as duas ferramentas de metal duro com revestimento de (TiAl)N e 400 m/min para a ferramenta de PcBN. O valor da rotação do eixo árvore foi calculado segundo o ponto de contato médio da ferramenta na peça Fig. (4b). Dessa forma, a velocidade de corte variou de um valor mínimo a um valor máximo.



Figura 4. Detalhes da estratégia de corte utilizada: (a) Estratégia de usinagem raster, (b) Ponto de contato entre a ferramenta e a peça para cálculo do diâmetro médio.

A técnica empregada para medição da temperatura foi a fixação de termopares. Os furos para inserção dos termopares tinham 2,2 mm de diâmetro e os pinos de fixação dos termopares 2 mm. Os

furos foram feitos no sentido do comprimento do corpo-de-prova; o primeiro e o último a 5 mm das bordas e os demais equidistantes 22,5 mm. A Fig. (5) mostra um esquema da parte posterior do corpo-de-prova com a defasagem dos furos realizados para a fixação dos termopares nos corpos-de-prova. A desalinhamento dos furos teve como objetivo avaliar a variação da temperatura com a variação da velocidade de corte, uma vez que foram empregados valores de rotação fixos nos ensaios de fresamento. Dessa forma, a velocidade de corte variava de acordo com o ponto de contato entre o corpo de prova e a ferramenta. Os sistemas de resfriamento empregados foram o ar comprimido e o ar frio. A temperatura média do ar comprimido durante os testes foi de 12°C e do ar frio foi de -2°C. Os dois sistemas utilizaram à linha de ar pressurizado do laboratório. A Fig. (6) mostra o esquema da montagem do sistema de ar gelado.

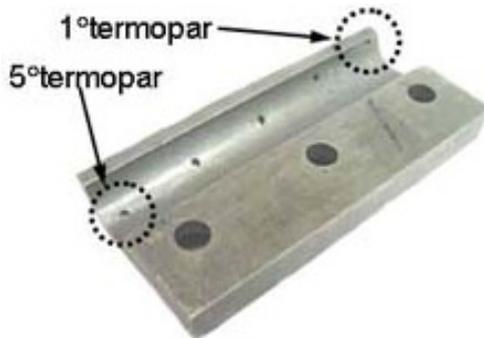


Figura 5. Vista posterior do corpo-de-prova com detalhe para desalinhamento dos termopares

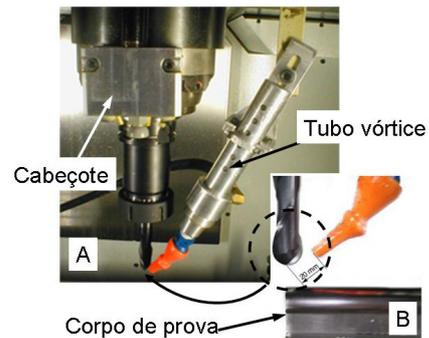


Figura 6. Detalhe da montagem do sistema de ar gelado

[3] ANÁLISE DOS RESULTADOS

As Figuras (7), (8) e (9) mostram os gráficos dos experimentos realizados sem sistema de resfriamento, com sistema de ar comprimido e com sistema de ar gelado, respectivamente. Os gráficos representam o processo de fresamento utilizando a estratégia raster, movimento ascendente e descendente, retirando um sobremetal de 0,2 mm no aço AISI D2. Para os experimentos sem sistema de resfriamento nota-se que ocorre um aumento gradativo do primeiro para o quinto termopar. Para os testes com os sistemas auxiliares de resfriamento, observa-se que gradativamente os picos máximos de temperatura decaem com a utilização de um sistema como o ar comprimido para o sistema de ar frio. O comportamento das curvas de temperatura foi similar para o aço AISI H13, porém ocorreram variações dos picos máximos de temperatura e entre os dois materiais e entre as três ferramentas utilizadas.

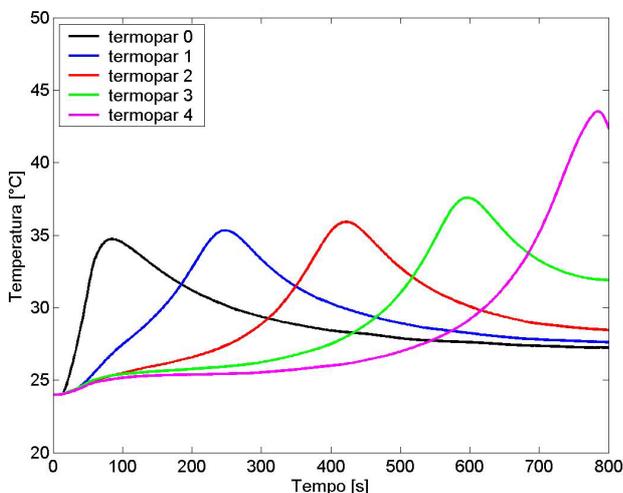


Figura 7. Gráfico de temperatura para o aço AISI D2 com a Ferramenta Fr1 sem sistema de resfriamento

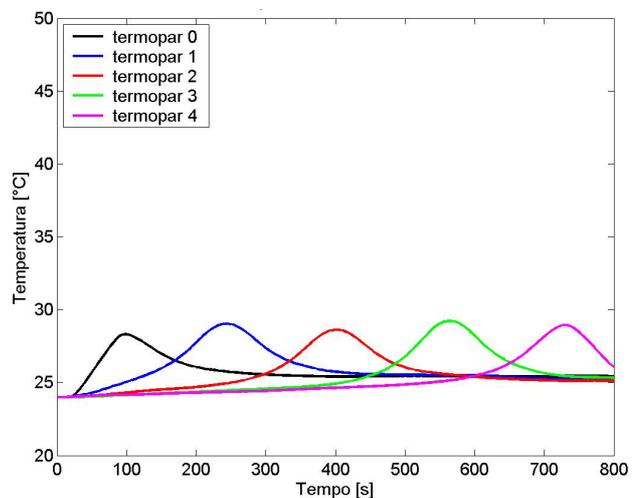


Figura 8. Gráfico de temperatura para o aço AISI D2 com a Ferramenta Fr3 com sistema de ar comprimido

O gráfico da Fig. (8) mostra a temperatura registrada pelos termopares no teste realizado com a ferramenta Fr1. À medida que a ferramenta se desloca ao longo do comprimento dos corpos-de-prova, cada termopar registra simultaneamente os valores de temperatura do ensaio, atingindo a temperatura máxima quando a ferramenta se localiza sobre cada um deles. Nota-se que cada um dos termopares apresenta um comportamento distinto, pois percebe-se que os termopares das extremidades apresentam os maiores picos de temperatura. O primeiro termopar registra um valor de temperatura maior que os imediatamente posteriores em função de uma secção inicial de corte maior, devido ao fato do sistema de zeramento da máquina posicionar o centro da ferramenta exatamente com a extremidade do corpo-de-prova. Assim, inicialmente tem-se uma largura de corte de 1,78 mm, em um movimento descendente, que proporciona uma maior secção de corte no início do fresamento. A partir do primeiro movimento ascendente da ferramenta o valor do deslocamento da ferramenta passa a ser constante em função da penetração de trabalho “ae” programada de 0,25 mm. Neste experimento observa-se que o calor que transfere-se para o corpo-de-prova acumula-se a cada deslocamento ascendente/descendente da estratégia raster aumentando a temperatura do corpo-de-prova sucessivamente. Independente da velocidade de corte utilizada no experimento para a ferramenta Fr1, Fr2 ou Fr3 a influência da velocidade de corte não é significativa, pois no caso de ferramentas de PcBN como a Fr3 os picos de temperatura são menores em função da alta condutividade térmica da ferramenta de cBN que diminui o valor de calor destinado ao corpo-de-prova.

Nas Figuras (8) e (9) o comportamento dos experimentos apresenta uma redução da temperatura a medida que a ferramenta se desloca sobre o corpo-de-prova. Nota-se que somente quando a ferramenta está sobre o ponto de localização do termopar temos alguns picos mais elevados de temperatura. Para o sistema de ar frio Fig. (9) nota-se um decréscimo acentuado da temperatura do corpo-de-prova após a passagem da ferramenta, mostrando que o sistema de ar frio é eficiente para a diminuição da temperatura do corpo-de-prova de uma forma geral chegando a valores de 18°C como observa-se no gráfico do primeiro termopar. A Fig. (10) mostra um resumo de todas as temperaturas com os sistemas de resfriamento e com os dois aços empregados. Para os experimentos sem sistema de resfriamento observa-se uma similaridade entre o comportamento das curvas de temperatura para o aço AISI H13 e AISI D2 com maiores picos de temperatura para a ferramenta Fr2. Os experimentos com os sistemas de resfriamento mostram também um resultado similar para os dois aços e como ocorreu no experimento sem resfriamento, na maioria dos experimentos, a ferramenta Fr2 também apresenta os maiores picos de temperatura. Para todos os experimentos realizados a ferramenta Fr3 obteve em média uma tendência de atingir os menores valores de temperatura.

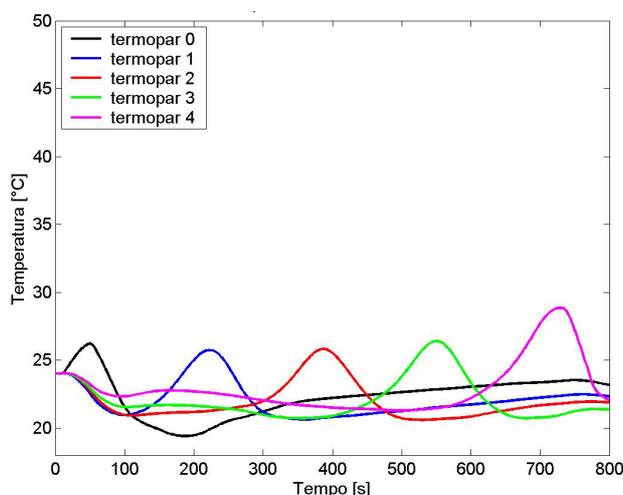


Figura 9. Gráfico de temperatura para o aço AISI D2 com a Ferramenta Fr3 com sistema de ar frio

As Figuras (11), (12) e (13) mostram os gráficos de temperatura dos testes de fresamento com o movimento descendente exatamente sobre a linha onde foram montados os termopares. A Fig. (11)

mostra o experimento sem sistema de resfriamento, a Fig. (12) com o sistema de ar comprimido e a Fig. (13) mostra o experimento com o sistema de ar frio. Observa-se que assim como ocorre no fresamento com a estratégia de usinagem raster as temperaturas são menores quando se utiliza o sistema de ar frio. Para o experimento sem sistema de resfriamento nota-se que os picos de temperatura são similares para todos os termopares, demonstrando que independente da posição de montagem do termopar e, da velocidade de corte que é menor na parte superior do corpo-de-prova e maior da parte inferior, considerando os valores médios, os picos de temperatura não se alteram. A Fig. (14) mostra o resumo de todos os picos de temperatura dos experimentos realizados com os aços AISI H13 e AISI D2.

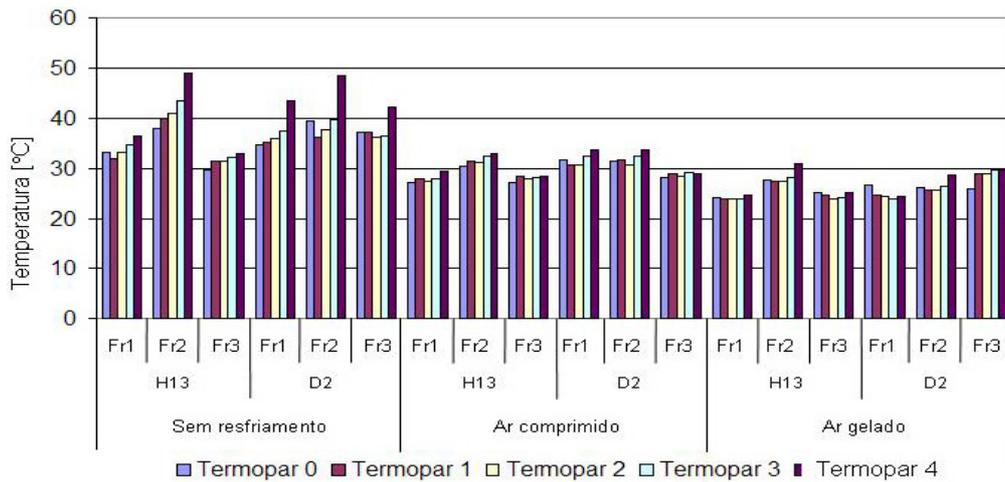


Figura 10. Resumo dos picos máximos de temperatura dos experimentos realizados com os aços AISI H13 e AISI D2 utilizando estratégia raster

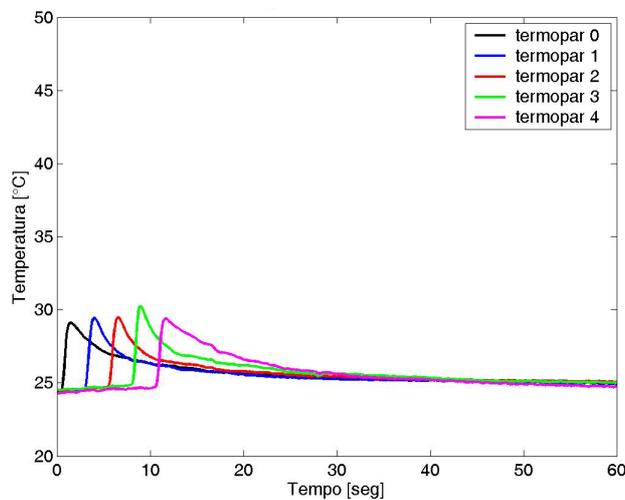


Figura 11. Gráfico de temperatura para o aço AISI D2 com a ferramenta Fr1 sem sistema de resfriamento

Para o experimento realizado com os sistemas de ar comprimido e ar frio, nota-se que os picos máximos de temperatura são ligeiramente menores que os picos do experimento realizado sem sistema de resfriamento. Para o experimento com o sistema de ar comprimido nota-se um pequeno decréscimo da temperatura a partir do primeiro termopar, demonstrando assim a queda dos picos máximos de temperatura à medida que o sistema de ar comprimido é utilizado, conforme Fig. (12). Os valores dos picos de temperatura para o experimento com ar frio decrescem mais significativamente que os picos com o sistema de ar comprimido, apesar das diferenças não serem significativas nota-se uma eficiência maior do sistema de ar frio neste experimento. O mesmo perfil de temperatura foi encontrado para os experimentos com o aço AISI H13. A Fig. (14) mostra um

resumo de todos os picos máximos de temperatura para os dois sistemas de resfriamento com os dois aços empregados. Observa-se na Fig. (14) que os valores médios de temperatura ficaram na faixa de 30°C considerando-se todos os termopares e todas as ferramentas empregadas nos experimentos, podendo-se definir que os picos máximos de temperatura, quando se utiliza a estratégia descendente, são idênticos independente do sistema de resfriamento empregado ou da variação da velocidade de corte em função da geometria complexa do corpo-de-prova.

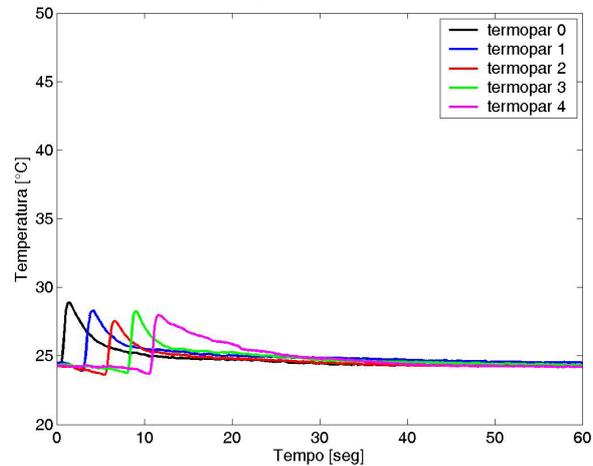


Figura 12. Gráfico de temperatura para o aço AISI D2 com a ferramenta Fr1 com sistema de ar comprimido.

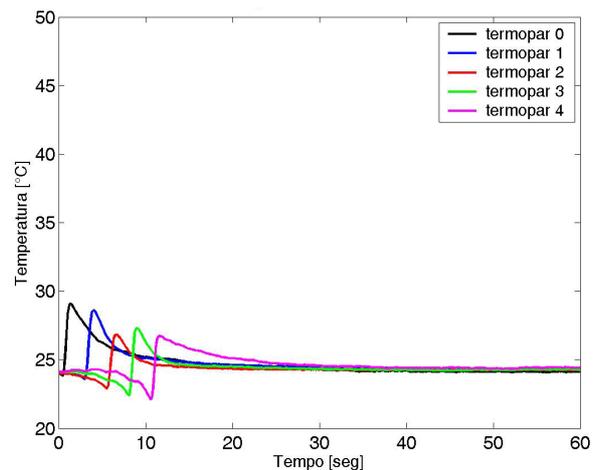


Figura 13. Gráfico de temperatura para o aço AISI D2 com a ferramenta Fr1 com sistema de ar frio

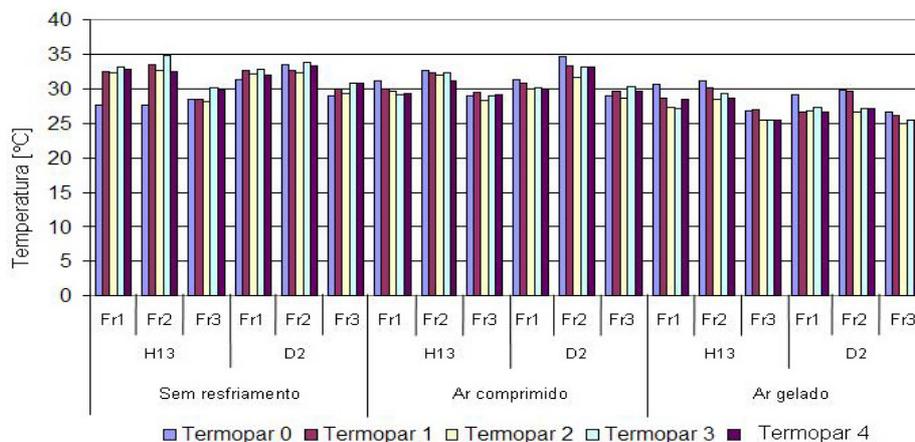


Figura 14. Resumo dos picos máximos de temperatura dos experimentos realizados com os aços AISI H13 e AISI D2 utilizando a estratégia descendente

[4] CONCLUSÃO

As seguintes conclusões podem ser apresentadas para o fresamento de aços endurecidos usando-se ferramentas de Metal Duro com cobertura de (TiAl)N e ferramentas de PcBN, utilizando sistemas de ar comprimido e ar frio, alternativos à usinagem sem refrigeração:

- Comparando-se as geometrias a ferramenta Fr1 apresentou os menores valores de pico máximo de temperatura para ambos os aços. Em relação aos aços usinados a mesma ferramenta apresentou picos de temperatura maiores para o aço AISI D2.
- Comparando-se os materiais das ferramentas, a Fr2 apresentou os maiores valores de picos máximos de temperatura, para ambos materiais usinados. Quando se compara os aços usinados a ferramenta Fr3 apresentou maiores valores de pico máximo para o aço AISI D2.
- O sistema de ar comprimido apresentou-se eficiente na redução da temperatura no processo. A faixa de temperatura manteve-se abaixo dos picos registrados nos testes sem sistema de refrigeração. Para os termopares montados próximos ao início do fresamento os valores foram próximos à temperatura ambiente, e atingiu picos de temperatura máximos de 33 °C no quinto termopar. O ar comprimido funciona como um bom sistema de resfriamento para usinagens de materiais endurecidos.
- O sistema de ar frio mostrou um aumento menor de temperatura com relação ao sistema de ar comprimido, ficando também próximo a temperatura ambiente, comparando-se os picos de temperatura dos dois sistemas.
- O sistema de ar frio não foi mais eficiente na redução da temperatura, devido a uma distância mínima necessária entre o bocal de saída do ar e a ferramenta de corte. Contudo, o ar frio foi o único a registrar redução na temperatura do corpo-de-prova, ao longo do testes. O mesmo padrão de comparação, entre geometrias e entre os materiais de ferramentas para ambos os sistemas alternativos de refrigeração, se repetiu.

[5] AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a SANDVIK e a GERDAU Açominas S.A - Aços Finos Piratini pelo fornecimento do ferramental e do material utilizado para a confecção dos corpos de prova, respectivamente.

[6] REFERÊNCIAS

- [1] JASPERS, S. P. F. C.; DAUTENBERG, J. H.; TAMINAU, D. A. (1998). Temperature measurement in orthogonal metal cutting. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. v.14, n.1, p. 7-12, July – Sep.
- [2] KOPAC, J.; SOKOVIC, M.; DOLINSEK, S. (2001). Tribology of coated tools in conventional and HSC machining. *Journal of Materials Processing Technology*. Amsterdam, v.118, n.1/3, p.377-384, Dec.
- [3] SREEJITH, P. S.; NGOI, B. K. A. (2000). Dry machining: Machining of the future. *Journal of Materials Processing Technology*. v.101, n.1/3, p.287-291, April.
- [4] SILVA, L.R. (2002). Estudo da geometria da aresta de corte de ferramentas aplicadas ao torneamento de superligas à base de Níquel com alta velocidade de corte. 208p. Tese (Doutorado) - Escola da Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. São Carlos. 2002.
- [5] VIEIRA, J.M.; MACHADO, A.R.; EZUGWU, E.O (2001). Performance of cutting fluids during face milling of steels. *Journal of Materials Processing Technology*. v.116, n.2/3, p. 244-251, Oct.
- [6] YUHARA, D.A. (2000). Aplicação de revestimentos PVD em ferramentas de corte. Disponível em:<www.brasimet.com.br>. Acesso em: 8 dez. 2003.

- [7] GRAHAM, D. (2000). Dry Out. Cutting Tool Engineering. Northbrook. v.52. n.3. Mar. Disponível em: <http://www.ctemag.com/article/viewArticle.asp?ARTICLE_ID=223>. Acesso em: 12 Dez. 2003.
- [8] WEINERT, K.; HESTERBERG, S.; WITTKOP, S. (2004). O uso do gelo seco como refrigerante na usinagem. Máquinas e Metais. São Paulo, ano 40, n.457, p.40-49, fev.
- [9] INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P.; (1990). Fundamentals of heat and mass transfer. 3rd ed New York: Wiley, 919 p.
- [10] KIM, S.W.; LEE, C. M.; LEE, D. W.; KIM, J. S.; JUNG, Y. H. (2001). Evaluation of machinability by cutting environments in high speed milling of difficult-to-cut materials. Journal of Materials Processing Technology. Amsterdam, v.111, n.1/3, p.256-260, Apr.
- [11] KO, J.T.; KIM, S.H.; CHUNG, B.G. (1999). Air-cooling method for turning of hardened material. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. Amsterdam, v.15. n.7, p.470-477, Jul.

STUDY OF THE TEMPERATURE IN MACHINING HARDENED STEEL WITH VARIATION OF CUTTING SPEED

Brandão, L.C. lincoln@sc.usp.br

Federal University of São João del Rei – UFSJ
Praça Frei Orlando, 170 – Centro
São João Del Rei – Minas Gerais

Coelho, R.T. rtcoelho@sc.usp.br

Engineering School of São Carlos – EESC/USP
Avenida Trabalhador São-carlense, 400 – Centro
São Carlos – São Paulo

Abstract: This work evaluates the temperature in hardened materials in function of the variation of the cutting speed in complex geometries during a milling process. Workpiece with circumference $\frac{1}{4}$ in AISI D2 and H13 steel with hardness of 57 and 53 HRC were machined. The tests were carried out using only the down milling and off-set strategy with Ball Nose end mill in a machining center. The technique of embedded thermocouple was used where the temperature of the workpiece was measured in function of the variation of the cutting speed for each point of contact between the cutter and the insertion point of thermocouple in the workpiece. Two cooling systems were used, frozen air and compressed air with the objective of evaluating the capacity to reduce the temperature of the process. The conclusions demonstrate that the cutting speed didn't influence in the increase of the temperature of the workpiece and that the two cooling systems were efficient in reducing the temperature of the workpiece.

Keywords: *Temperature, High Speed Cutting, Molds and Dies, Frozen Air.*