

# **ESTUDO EXPERIMENTAL DA CONDUÇÃO DE CALOR NA USINAGEM DE MATERIAIS ENDURECIDOS APLICADOS À PRODUÇÃO DE MOLDES E MATRIZES UTILIZANDO ALTAS VELOCIDADES DE CORTE**

## **Lincoln Cardoso Brandão**

Universidade Federal de São João del Rei - UFSJ  
Praça Frei Orlando, 170 – Centro  
São João del Rei – Minas Gerais  
[lincoln@sc.usp.br](mailto:lincoln@sc.usp.br)

## **Reginaldo Teixeira Coelho**

Escola de Engenharia de São Carlos – USP  
Av. Trabalhador Sãocharlense, 400 – Centro  
São Carlos – São Paulo  
[rtcoelho@sc.usp.br](mailto:rtcoelho@sc.usp.br)

## **Ricardo Arai**

Escola de Engenharia de São Carlos – USP  
Av. Trabalhador Sãocharlense, 400 – Centro  
São Carlos – São Paulo  
[rarai@sc.usp.br](mailto:rarai@sc.usp.br)

**Resumo:** *O trabalho trata do estudo teórico-experimental da condução de calor em materiais endurecidos, utilizados na fabricação de moldes e matrizes, submetidos ao fresamento com altas velocidades de corte. Os materiais utilizados foram os aços AISI P20 e AISI D2, sendo os ensaios realizados com ferramentas de ponta esférica (Ball-Nose) com revestimento de (TiAl)N e os corpos de prova com a forma de  $\frac{1}{4}$  (um quarto) de um tubo com diâmetro de 28 mm e comprimento de 100 mm. Os testes realizados demonstram a variação da temperatura em função de diferentes sistemas de resfriamento. Empregou-se ar comprimido e ar resfriado, comparando-se as temperaturas na peça com o sistema sem refrigeração alguma. Foram avaliadas também as possíveis deformações sofridas pela superfície usinada, sujeitas às variações de temperatura dos sistemas de refrigeração testados.*

**Palavras-chave:** *Temperatura, Condução de calor, Altas velocidades de corte, Moldes e matrizes.*

## **1. INTRODUÇÃO**

Para os sistemas de manufatura que utilizam o processo de usinagem como principal meio de produção, novas técnicas, conceitos de automação e estratégias surgem com a finalidade de aumentar e melhorar o desempenho. Para potencializar este aumento de produtividade, a tecnologia de usinagem com alta velocidade (**HSM** – High Speed Machining) ou com alta velocidade de corte (**HSC** - High Speed Cutting) surge como uma nova ferramenta. Isto se deve ao fato do processo HSM proporcionar altas taxas de remoção de material, minimização de tempos improdutivos, forças

de corte mínimas, facilidade na expulsão dos cavacos e dissipação do calor o que resulta em baixa distorção das peças aumentando a precisão das partes e o acabamento superficial (FALLBÖHMER, 2000).

A indústria de moldes e matrizes produz componentes com formatos próximos à sua forma final. Muitos destes componentes exigem que os moldes e matrizes apresentem complicados formatos a serem esculpidos. A complicada geometria dessas superfícies, o elevado grau de dureza dos materiais das diferentes matrizes utilizadas e a precisão dimensional exigida necessitam que seja usada uma avançada tecnologia nestes processos de usinagem (ELBESTAWI, 1997). A rápida produção de moldes e matrizes utilizando a técnica HSM incorporada às seqüências de fabricação pode reduzir o tempo de produção e o custo. Isto insere no mercado produtos novos mais rapidamente e com custos muito baixos através da elevada queda dos tempos de projeto, de produção e de ciclos de prototipagem (ALTAN, 2001).

Dessa forma, o desenvolvimento de pesquisas na seqüência de fabricação de moldes e matrizes, utilizando a tecnologia HSM, busca a diminuição de tempos, redução de custos, além de permitir a produção de matrizes no estado final endurecido com dureza acima de 50 HRc, minimizando a utilização do processo de retificação e o polimento manual comumente utilizado. Assim, com a utilização da tecnologia HSM espera-se encontrar soluções, em termos de ferramentas, velocidades de corte e taxas de avanço, além de acabamento superficial e sistemas de resfriamento que possibilitem o aprimoramento na fabricação de moldes e matrizes.

A temperatura é um dos principais fatores que influenciam o desgaste de ferramenta, e as deformações na peça. Determinar tecnicamente com precisão as temperaturas na região de corte é muito difícil, pois existem três fontes principais de calor na formação de cavacos, sendo estas:

- ↳ **Zona primária de produção de calor:** é a região de cisalhamento, onde a deformação plástica resulta na fonte de maior geração de calor do processo;
- ↳ **Zona secundária de produção de calor:** ocorre uma deformação plástica adicional do cavaco, ocorrendo considerável produção de calor devido ao atrito do cavaco sobre a superfície de saída da ferramenta;
- ↳ **Zona terciária de produção de calor:** segundo Jasper (1998) pode ser desprezada quando se considera uma ferramenta afiada, pois normalmente ocorre na superfície de folga da ferramenta sendo minimizada quando esta ainda não apresenta desgaste nesta superfície.

Segundo Sales (1999), o calor gerado pelo cisalhamento no interior do cavaco pode ser considerado benéfico, sendo que este calor aumenta nas zonas primárias e secundárias, diminuindo a continuidade da deformação plástica. Desta forma, o calor gerado no processo de formação de cavacos deve ser considerado um aliado da ferramenta devido ao amolecimento do cavaco produzido diminuindo a resistência mecânica do material recalcado, mas ao mesmo tempo aumenta a temperatura da ferramenta, prejudicando sua resistência ao desgaste. Adicionalmente, a temperatura aquece localmente a peça, provocando-lhe deformações indesejáveis e afetando sua precisão dimensional.

Ainda não sendo totalmente dominados os conceitos da tecnologia HSM, pode-se dizer que devido às altas taxas 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.

Segundo Salomon (1931) apud Dewes (1999) a temperatura de corte atinge um ponto crítico em uma velocidade intermediária, onde a partir deste ponto ocorre um decréscimo da temperatura com o aumento da velocidade de corte. Porém não foi o que encontrou McGee (1979) que sugeriu um aumento da temperatura com a velocidade de corte até o ponto de fusão da peça usinada, não ocorrendo nenhuma redução de temperatura com altas taxas de velocidade, conforme Fig. (1).

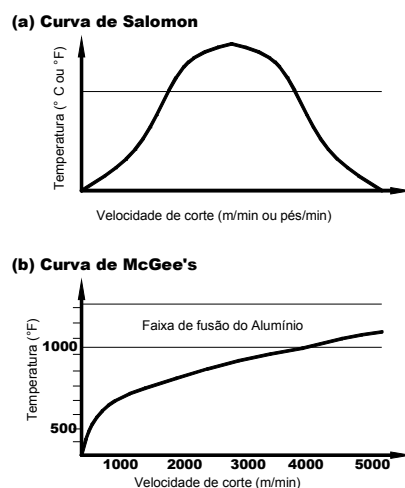


Figura 1. Curvas de Salomon e de McGee (McGee, 1979 apud Dewes, 1999)

Pelo fato de que a tecnologia HSM se utiliza altas taxas de avanço e contato mínimo na região de formação de cavaco, o aumento da temperatura nesta região pode não ser significativo para promover alterações dimensionais, micro e macro-estruturais na superfície usinada. Porém, Braghini Jr. (2002) encontrou erros de paralelismo da ordem de 60  $\mu\text{m}$  na usinagem do aço AISI H13 com alta velocidade de corte, demonstrando que mesmo com pequenas variações de temperatura o formato final de um produto pode ficar comprometido com distorções que possam ocorrer no material. Dessa forma, mais estudos devem ser conduzidos no intuito de verificar em quais situações a variação de temperatura é significativa para provocar alterações dimensionais.

O objetivo deste trabalho é relacionar o aumento da temperatura com eventuais distorções que possam ocorrer nos aços AISI P20 e AISI D2, quantificando estas deformações e fazendo um mapeamento destas variações ao longo da superfície usinada. Um estudo comparativo com estes mapeamentos é também proposto com o objetivo de qualificar os sistemas de resfriamento quanto à sua capacidade de retirar calor do processo e de corrigir ou provocar deformações no material.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

Os ensaios foram realizados em um centro de usinagem vertical HERMLE C 800 U, de três eixos, com potência do motor principal de 18 kW e a faixa de rotação de 20 a 24.000 RPM, com CNC SIEMENS 840D. A tabela 1 apresenta as condições de corte e as ferramentas utilizadas. A Tabela (2) mostra a composição química e dureza dos dois materiais utilizados nos ensaios.

Tabela 1. Condições de usinagem e as ferramentas utilizadas nos ensaios de fresamento

Material usinado	Velocidade de corte [m/min]	Avanço por dente [mm/rot.]	Taxa de avanço [mm/min]	Rotação [rpm]	Profundidade de corte [mm]	Código das Ferramentas
Aço AISI P20	503	0,06	1.200	10.000	0,2	R216.42 16030 – AK32G 1610
Aço AISI D2	230	0,07	643	4.590	0,2	R216.42 16030 – AK32G 1610 e F1827R.Z.16.Z2.08 W XK15 F1827R.Z.16.Z2.08 WCB 80

Tabela 2. Composição química e dureza dos materiais utilizados

Material usinado	Característica dos materiais usinados									Dureza [HRc]
	C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]	Cr [%]	Ni [%]	Mo [%]	Cu [%]	
AISI D2	1,48	0,27	0,33	0,02	0,01	11,78	0,19	0,88	0,07	57
AISI P20	0,38	0,32	0,79	0,01	0,02	1,84	0,89	0,39	0,09	30

O formato do corpo de prova foi de  $\frac{1}{4}$  de circunferência com diâmetro de 28 mm, comprimento de 100 mm e espessura de 5mm Fig. (2), montado em uma morsa especial para a fixação.



Figura 2. Modelo do corpo de prova utilizado nos ensaios

Na parte interna do corpo de prova foram montados 5 termopares, de forma que o primeiro e o último ficaram a 6 mm das extremidades e os demais distribuídos de forma equidistante ao longo do comprimento e da circunferência, simultaneamente. Os termopares utilizados foram do tipo T (Cobre-Constantan) para a faixa de temperatura de  $-10$  a  $180$  °C, sendo estes calibrados para uma faixa de aplicação de  $10$  a  $90$ °C. Do corpo de prova o sinal dos termopares passou por um circuito amplificador sendo em seguida levado a uma placa de aquisição A/D (modelo PCI – MIO – 16E – 4 – National Instruments) instalada em um computador PC. Para a aquisição dos dados foi utilizado o programa LabView, onde o programa fazia a conversão do sinal de entrada em volts para graus Celsius segundo as curvas de calibração de cada termopar.

Foi utilizado o fresamento de forma ascendente e descendente, uma vez que essa estratégia de corte é comumente uma das mais utilizadas, por manter a ferramenta em contato o maior tempo possível com a peça, minimizando o tempo de corte. Para cada material foram realizados três ensaios específicos sendo estes; a seco, com ar comprimido direto da linha de pressão do laboratório e com ar gelado. Neste último utilizou-se um sistema de resfriamento, modelo R-900 que utiliza o princípio do vórtice para o resfriamento do ar de entrada abaixando a temperatura do ar na saída. As Fig. (3) e (4) mostram os dois sistemas montados no cabeçote da máquina.

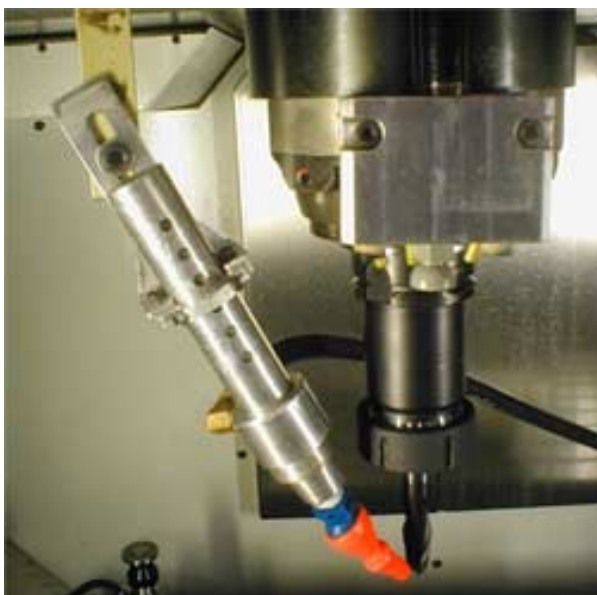


Figura 3. Sistema de resfriamento com ar gelado

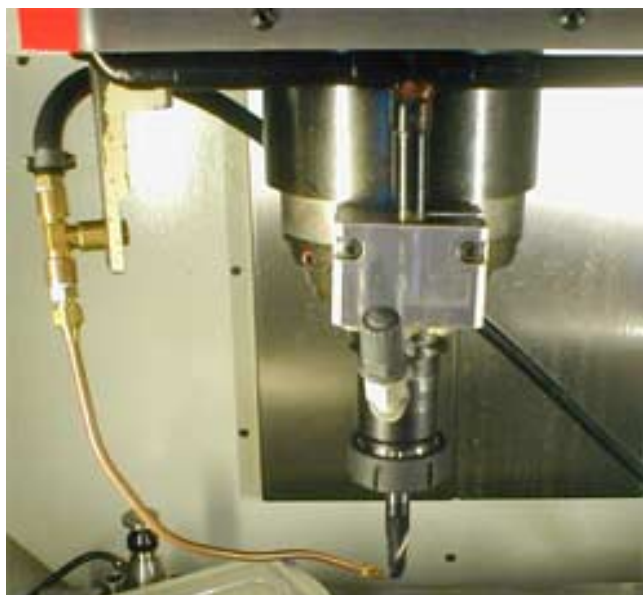


Figura 4. Sistema de resfriamento com ar comprimido convencional

A utilização destes sistemas teve o objetivo de avaliar a capacidade de retirar calor do processo e provocar o resfriamento da peça tanto pelo sistema de ar comprimido convencional, assim como pelo sistema de ar gelado. Os valores de pressão e vazão utilizados nos ensaios estão apresentados na Tab. (3). Inicialmente foram realizados ensaios a seco e posteriormente ensaios com os dois sistemas de resfriamento alternativos, onde foram comparadas as curvas de temperatura para cada um dos ensaios. Foram realizados 12 ensaios, sendo um ensaio com réplica para cada condição de resfriamento.

Tabela 3. Valores de temperatura, pressão e vazão para os ensaios de fresamento

Ensaio	Temperatura média [°C]	Vazão [m <sup>3</sup> /h]	Pressão na entrada do sistema de resfriamento [bar]
Seco	24	0	0
Ar comprimido	10	22	6
Ar gelado	- 4	22	6

Para a medição dos corpos de prova foi utilizado o sistema para referenciamento automático da máquina. Foram distribuídos cinco perfis ao longo do formato da peça com vinte pontos de medição em cada perfil. O primeiro e o último ponto eram posicionados a 1 mm das extremidades e os demais distribuídos de forma equidistante. Dessa forma, conseguiu-se obter perfis ao longo do comprimento da peça e obter uma referência a respeito das variações dimensionais do perfil final da peça.

### 3. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os gráficos das Fig. (4) e (5) mostram o comportamento da temperatura ao longo do fresamento do corpo de prova de aço AISI D2. O comportamento da temperatura foi similar para o aço AISI P20, apenas apresentando uma variação de temperatura menor em função da diferença de dureza

dos dois materiais. A Fig. (6) mostra um gráfico resumido da temperatura máxima atingida em cada termopar para as três ferramentas utilizadas no fresamento do aço AISI D2 com os três sistemas de refrigeração. Observa-se um aumento das temperaturas na usinagem a seco para todas as ferramentas utilizadas. Os valores de temperatura encontrados nos ensaios a seco demonstram que uma boa parte do calor gerado no processo ainda é transferido para o material elevando consideravelmente a temperatura da peça Fig. (4).

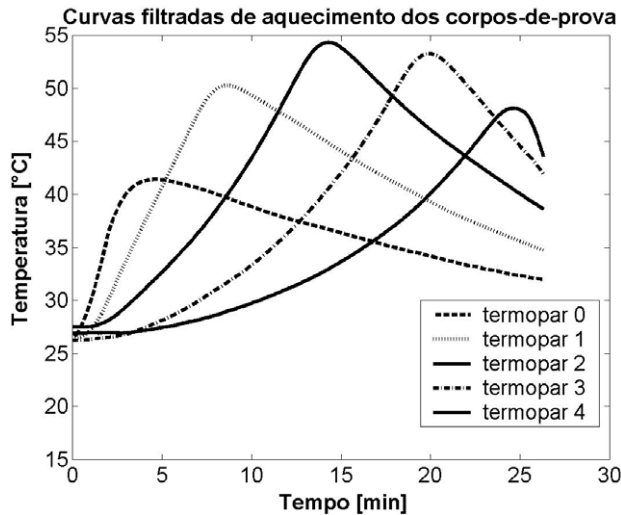


Figura 4 – Curvas de aquecimento para o Aço AISI D2 ensaio a seco (R216.42 16030 – AK32G 1610)

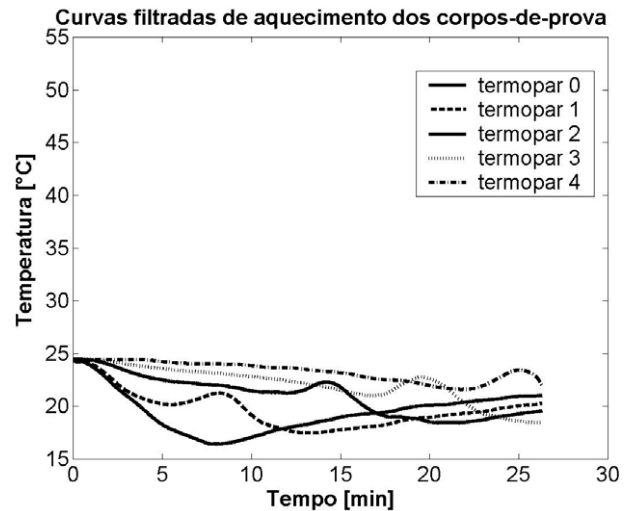


Figura 5 – Curvas de aquecimento para o Aço AISI D2 ensaio com ar gelado (R216.42 16030 – AK32G 1610)

Os dois sistemas alternativos de refrigeração da peça se mostraram eficientes em remover calor da peça. O sistema que utilizou basicamente ar comprimido conseguiu manter a temperatura da peça próxima à temperatura ambiente, e o sistema de ar gelado conseguiu proporcionar uma diminuição de temperatura para os termopares posicionados nas extremidades da peça, Fig. (5), mostrando-se eficiente não somente em remover o calor introduzido durante o processo, como também proporcionar uma queda da temperatura na peça.

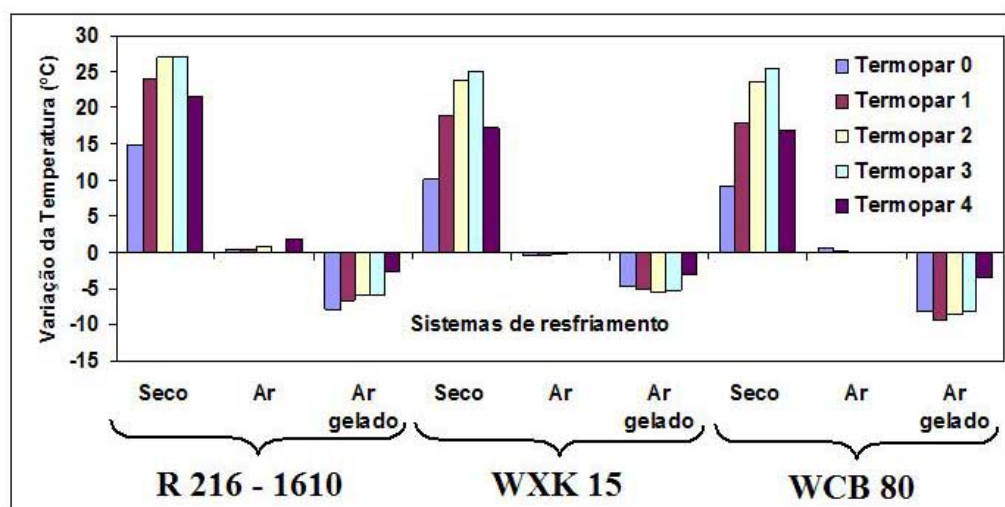


Figura 6 – Gráfico do comportamento das temperaturas em função dos sistemas de resfriamento para as três ferramentas utilizadas no fresamento do aço AISI D2



Em ambos ensaios nota-se uma elevação um pouco maior da temperatura para os termopares que foram montados no meio do corpo de prova. Este fato se deve, ao acúmulo do calor ao longo da usinagem e sendo registrado simultaneamente pelos termopares posteriores ao movimento da ferramenta. Além disso, o primeiro e o quinto termopar foram montados próximos às extremidades e por isso facilmente trocam calor com a morsa de fixação e com o meio ambiente, fato este é notado e se repete para os dois materiais e com as três ferramentas utilizadas. Os valores de temperatura encontrados para a ferramenta de CBN (F1827R.Z.16.Z2.08 WCB 80) apresentaram o mesmo comportamento que os ensaios com as outras ferramentas, não apresentando grandes variações de temperatura, demonstrando que a ferramenta de CBN com aproximadamente 80% na composição (WCB80) não foi capaz de auxiliar na retirada de calor nesta operação.

A figura (7) apresenta perfil da usinagem do aço AISI D2 usinado a seco, e as fig. (8) e (9) mostram os perfis com ar comprimido e ar gelado, respectivamente. Para a usinagem a seco observa-se uma certa distorção dimensional na superfície usinada, constatada através dos cinco perfis medidos ao longo do comprimento. Nos três primeiros perfis na Fig. (7) não ocorreu uma deformação considerável, entretanto nos dois últimos perfis percebe-se um formato côncavo de até 12  $\mu\text{m}$ . Essa deformação se atribui à dilatação resultante do maior aquecimento na parte central do corpo de provas além de ser este trecho onde a velocidade de corte foi maior. Para o perfil usando os sistemas de resfriamento com ar, Fig. (8), observa-se o formato côncavo bem localizado na parte central do corpo de prova demonstrando que o sistema foi eficiente em remover calor na parte inferior do corpo de prova inclusive onde a velocidade de corte era alta provocando deformações de cerca de 25  $\mu\text{m}$ .

Para o sistema de resfriamento com o ar gelado Fig. (9) observa-se fenômeno oposto ao fresamento a seco, nota-se um formato convexo para os três últimos perfis, atingindo cerca de 30  $\mu\text{m}$ , fato este que se deve a uma contração da peça durante a usinagem devido à diminuição da temperatura. Para a usinagem do aço AISI P20, fatos semelhantes ocorreram, com a diferença de que os valores das distorções foram maiores que os encontrados para o aço AISI D2.

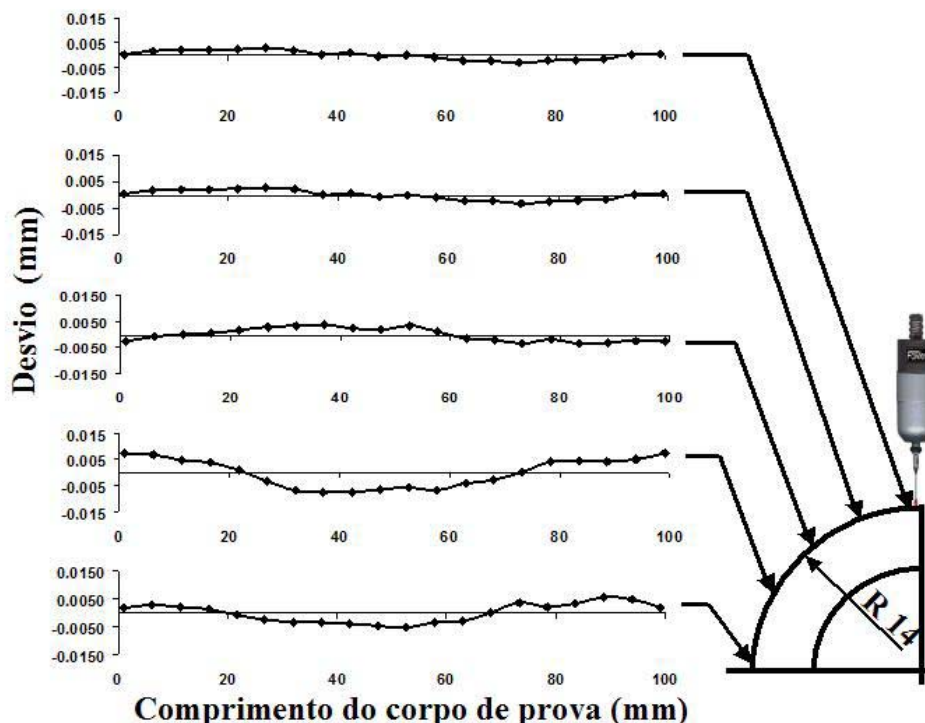


Figura 7 – Gráfico do perfil do corpo de prova após ensaio de usinagem do aço AISI D2 a seco (F1827R.Z.16.Z2.08 WXX15)

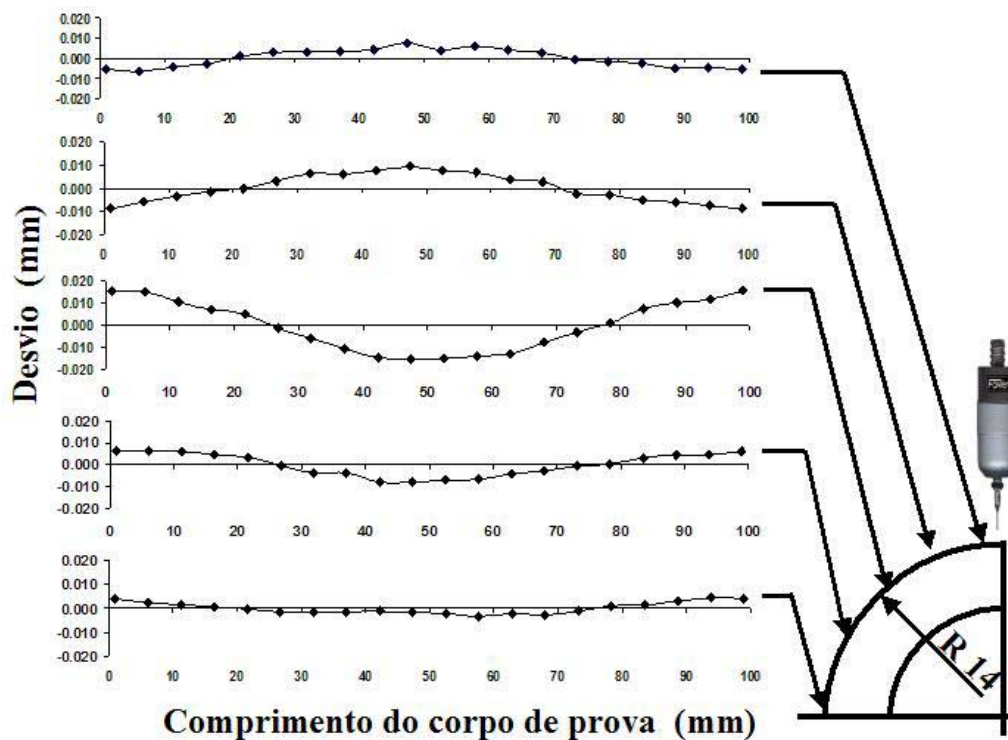


Figura 8 – Gráfico do perfil do corpo de prova após ensaio de usinagem do aço AISI D2 com ar comprimido (F1827R.Z.16.Z2.08 WXX15)

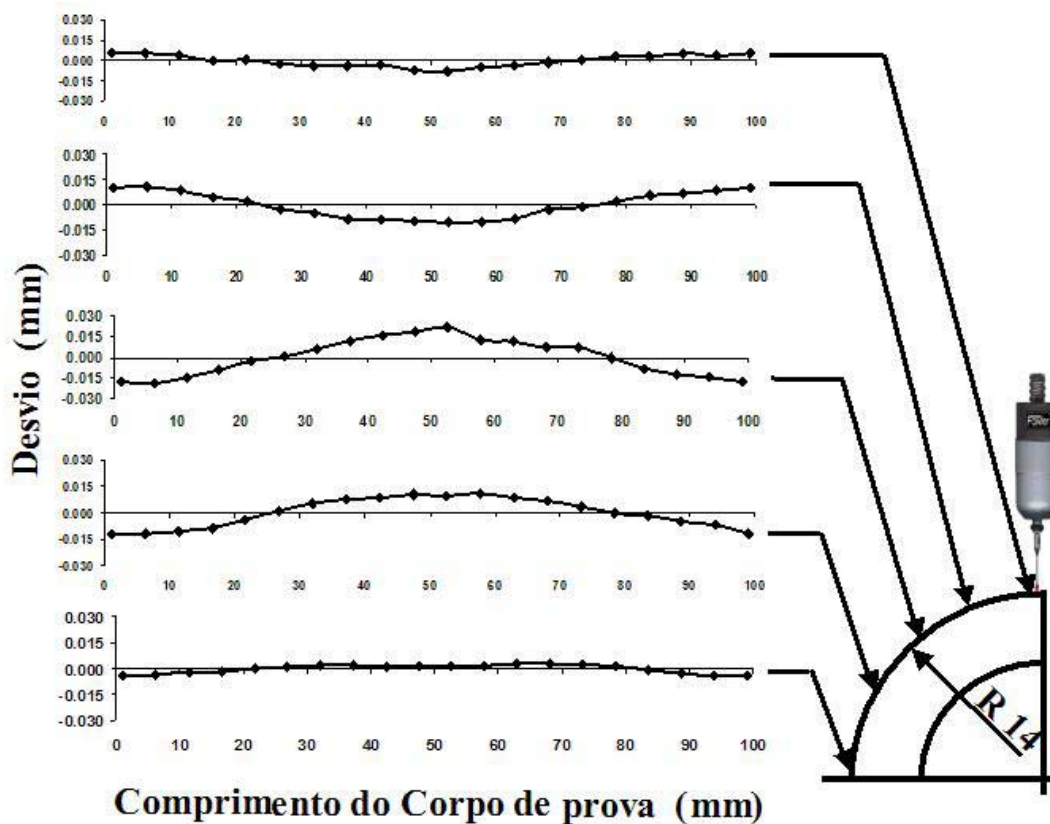


Figura 9 – Gráfico do perfil do corpo de prova após ensaio de usinagem do aço AISI D2 com ar gelado (F1827R.Z.16.Z2.08 WXX15)



#### 4. CONCLUSÕES

Conforme os resultados apresentados no fresamento dos aços AISI D2 e P20 com altas velocidades de corte, as seguintes conclusões podem ser tiradas:

1. Existe um aumento de temperatura nas peças de aço endurecido fresadas com altas velocidades de corte, o qual deve ser considerado. Nas condições testadas houve um aumento de cerca de 27,16 °C graus no aço AISI D2 fresado a seco com WC e uma diminuição de cerca de 7,83 °C quando foi refrigerado com ar a – 4 graus. Para o aço AISI P20 os valores foram 13,91°C e 5,15°C nas mesmas condições. Usando-se CBN os valores foram de 25,39 °C e 8,27 °C, respectivamente.
2. Os dois sistemas de resfriamento para o processo de usinagem, alternativos aos fluidos de corte tradicionais, se mostraram eficientes para a refrigeração dos corpos de prova, conseguindo reduzir satisfatoriamente a temperatura da peça.
3. O resfriamento com ar gelado se apresenta como uma boa perspectiva de resfriamento no futuro, na forma de um sistema alternativo, podendo ser empregado em processos onde são esperados aumentos significativos de temperatura e provoquem maiores deformações em produtos usinados e desgaste de ferramentas.
4. As deformações encontradas nos corpos de prova mostram que pequenas variações geométricas podem ocorrer mesmo em processos de usinagem com altas velocidades de corte onde não se considera o calor como fator de influência.
5. A medição da topografia da superfície fresada mostrou que os diferentes sistemas de refrigeração provocaram distorções de até 30 µm no aço AISI D2 e de 85 µm no aço AISI P20. Nas superfícies obtidas a seco e com ar comprimido a superfície se mostrou de forma côncava, enquanto que aquelas obtidas com ar gelado o formato foi convexo.

#### 5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a CAPES e a FAPESP pelo suporte financeiro a SANDVIK e Gerdau Açominas S.A. - Aços Finos Piratini pelo fornecimento do ferramental e das amostras de aço ferramenta, respectivamente.

#### 6. REFERÊNCIAS

- Altan, T. et al. (2001). “Manufacturing of dies and molds”. Annals of the CIRP, Paris, v.46, n.1, p.57-62.
- Braghini Jr., A. (2002). “Metodologia para escolha de fluidos de corte não agressivos ao meio ambiente para aplicações em usinagem dos metais”. 230p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.
- Dewes, R.C. et al. (1999). “Temperature measurement when high speed machining hardened mould/die steel”. Journal of Materials Processing Technology, Amsterdam, v.92/93, p.293-301, Aug.
- Elbestawi, M.A. et al. (1997). “High speed milling of dies and molds in their hardened state”. Annals of the CIRP, Paris, v.46, n.1, p.57-62.
- Fallböhmer, P. et al. (2000). “High speed machining of cast iron and alloy steels for die and mold manufacturing”. Journal of Materials Processing Technology, Amsterdam, v.98, n.1, p.104-115, Jan.
- Jaspers, S. P. F. C.; Dautzenberg, 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.

- McGee, F.J. (1979). High Speed machining – study: methods for aluminium workpieces, American Machinist, p.121-126.
- Sales, W.F.et al. (1999). Nem sempre o fluido com maior poder de refrigerante garante temperaturas de corte mais baixas. Máquinas e Metais, São Paulo, ano 36, n.407, p.46-61, dez.

## **EXPERIMENTAL STUDY OF THE HEAT CONDUCTION IN THE MACHINING OF MATERIALS HARDENED APPLIED TO THE PRODUCTION OF MOLDS AND DIES USING HIGH SPEEDS CUTTING**

### **Lincoln Cardoso Brandão**

Universidade Federal de São João del Rei - UFSJ  
Praça Frei Orlando, 170 – Centro  
São João del Rei – Minas Gerais  
[lincoln@sc.usp.br](mailto:lincoln@sc.usp.br)

### **Reginaldo Teixeira Coelho**

Escola de Engenharia de São Carlos – USP  
Av. Trabalhador São-carlense, 400 – Centro  
São Carlos – São Paulo  
[rtcoelho@sc.usp.br](mailto:rtcoelho@sc.usp.br)

### **Ricardo Arai**

Escola de Engenharia de São Carlos – USP  
Av. Trabalhador São-carlense, 400 – Centro  
São Carlos – São Paulo  
[rara@sc.usp.br](mailto:rara@sc.usp.br)

**Abstract:** *This work deals with the theoretical-experimental study of heat conduction in hardened materials for the production of molds and dies using High Speed Cutting. The employed materials were the steels AISI P20 e AISI D2, being the tests carried out with (TiAl)N coated ball nose in a work piece with the shape of a 1/4 of a tube with diameter of 28 mm and length of 100 mm. This investigation demonstrates the variation of temperature as a function of different cooling systems, that is compressed and cold air. Possible geometric deformation of the machined surfaces due to these variations in temperature for distinct cooling systems was also evaluated.*

**Keywords:** *Temperature, Conduction of Heat, High Speed Cutting, Molds and dies.*