

## FRESAMENTO DE AÇO PARA MOLDES E MATRIZES EM CONDIÇÕES CRIOGÊNICAS

Daniel de Carvalho Secco, danielseccsdj@gmail.com<sup>1</sup>  
Alessandro Roger Rodrigues, roger@sc.usp.br<sup>1</sup>  
Hidekasu Matsumoto, hidekasu@dem.feis.unesp.br<sup>2</sup>

<sup>1</sup>USP Campus de São Carlos, Av. Trabalhador São Carlense 400, CEP 13.566-590, São Carlos-SP

<sup>2</sup>UNESP Campus de Ilha Solteira, Av. Brasil Centro 56, CEP 15.385-000, Ilha Solteira-SP

**Resumo:** A fabricação de aços para moldes e matrizes requer a geração de formas complexas com bom acabamento superficial e sem grandes danos à ferramenta. Por ser um processo versátil e capaz de reproduzir diferentes formas geométricas com precisão, o fresamento é mais comumente utilizado para fabricação de moldes, porém, sua característica de corte interrompido gera ciclos de aquecimento e resfriamento na ferramenta que reduzem significativamente sua vida e tendem a empobrecer a integridade superficial da peça. Propondo estabilizar os ciclos térmicos na ferramenta e reduzir efeitos danosos do corte interrompido na peça, os fluidos criogênicos são aplicados ao fresamento. Nesta pesquisa determinou-se a influência da condição de refrigeração (criogênica, fluido abundante e a seco) sobre o desgaste da ferramenta (flanco principal), cavacos (forma e cor), rugosidade e microdureza da peça, ao fresar (de topo) o aço Villares VP100 (Equivalente ao AISI P20) utilizado na produção de moldes para injeção de plásticos. O Efeito do fluido criogênico na peça (observado nos resultados de microdureza) e na ferramenta (observado pela uniformidade de cor e forma dos cavacos) levou a menores valores de rugosidade na peça e maior vida da ferramenta, comparado às condições a seco e com fluido convencional. Nesta última, a instabilidade térmica levou a variações na forma e cor dos cavacos, e causou redução brusca na vida da ferramenta, comparado as outras condições.

**Palavras-chave:** Criogenia, Fresamento, moldes e matrizes, vida da ferramenta.

### 1. INTRODUÇÃO

Com o surgimento dos processos de usinagem de precisão no século XVIII, o calor tornou-se um fator limitante e desafiador, na medida em que reduzia drasticamente a vida da ferramenta, a produtividade e a qualidade do elemento usinado. Por volta de 1880, Frederick Winslow Taylor propôs a utilização dos fluidos de corte como um meio eficaz para minimizar o calor, conferindo maior produtividade, vida à ferramenta e qualidade à peça usinada. No século XX, porém, danos causados ao meio ambiente, ao operador e gastos com tratamento e descarte dos fluidos aquosos desfavoreceram sua aplicação e impulsionaram outras técnicas de aplicação de fluidos de corte, como a Mínima Quantidade de Lubrificante (MQL) e usinagem criogênica.

Na usinagem com MQL, o óleo de corte é conduzido por ar comprimido até a região de corte na forma de spray a uma taxa de 6 – 100 ml/h. É uma alternativa intermediária à usinagem a seco e à usinagem com fluido abundante. Sua principal função é lubrificar as superfícies em contato durante a usinagem. Tem-se apresentado como uma solução ecológica que proporciona uma boa lubrificação ao processo de usinagem, mas sua pobre capacidade refrigerante limita sua eficácia, sobre tudo, na usinagem de materiais de difícil usinabilidade (Attanasio et al., 2006; Su et al., 2007). Propondo lidar com o efeito danoso do calor na usinagem destes materiais, Uehara e Kumagai (1969 e 1970) citados por Yildiz e Nalbant (2008), registraram pela primeira vez uma aplicação criogênica no processo de usinagem.

De acordo com Yildiz e Nalbant (2008) o termo criogenia expressa o estudo e uso de materiais em temperaturas muito baixas, menores do que -150 °C. No entanto, Shokrani et al. (2013), explica que este termo não está consolidado e ainda muitos autores referem-se à aplicação do gás CO<sub>2</sub> (temperatura de ebulição de -78,5 °C a 1 atm) como usinagem em condições criogênicas. No torneamento a aplicação criogênica tornou-se mais comum, devido à acessibilidade e estabilidade das variáveis de saída que este processo permite (Alves; Da Silva, 2015). No fresamento a instabilidade deve-se à sua característica de corte interrompido que promove ciclos térmicos e mecânicos na ferramenta, reduzindo sua vida e a qualidade superficial da peça.

Há um particular interesse na aplicação de fluidos criogênicos no fresamento de materiais de difícil usinabilidade, pois sua excelente capacidade refrigerante reduz significativamente a temperatura de corte, e possivelmente efeitos danosos da oscilação térmica, principais responsáveis por acelerar o processo de desgaste da ferramenta, e reduzir a qualidade superficial da peça usinada.

## 2. OJETIVO

Determinar o efeito do resfriamento criogênico em comparação ao corte a seco e com fluido de corte convencional sobre a ferramenta e peça por meio da análise do desgaste de flanco primário, forma e cor dos cavacos, rugosidade e microdureza, durante o fresamento de um aço para moldes e matrizes.

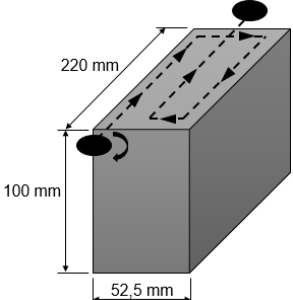
## 3. MATERIAIS E MÉTODOS

O material dos corpos de prova foi doado pela Villares Metals S/A, como uma parceria entre a empresa e a universidade com o principal objetivo de obter informações sobre sua usinabilidade. Trata-se do aço comercial VP100 para usinagem de moldes e matrizes, que é uma liga Cr-Ni-Mo e de dureza média de 32 HRC. Este material se estabeleceu comercialmente no ano de 2009 e ainda não possui similares normatizados (CONHEÇA..., 2009).

**Tabela 1. Composição química do aço VP 100**

| C    | P     | Mo   | Si  | S     | Ni  | Mn  | Cr   |
|------|-------|------|-----|-------|-----|-----|------|
| 0,22 | 0,027 | 0,25 | 0,4 | 0,002 | 0,4 | 1,9 | 0,58 |

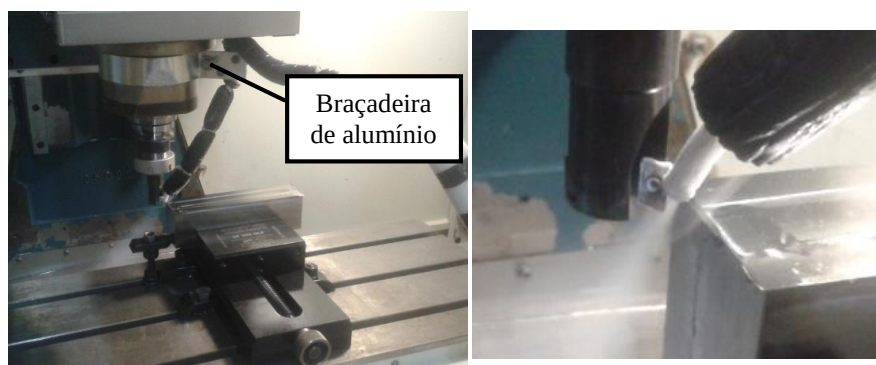
Os ensaios foram realizados em um centro de usinagem ROMI modelo Discovery 560, adotando fresamento frontal concordante em um ciclo de desbaste do tipo caracol com as condições, parâmetros de corte, resposta e geometria da peça descritos na Figura (1). Após cada ciclo apresentado nesta figura (volume de material removido de 11,55 cm<sup>3</sup>), era feita a análise do desgaste da ferramenta, rugosidade e coleta de cavacos.

| Variáveis    | Parâmetros                 | Respostas          | Estratégia: Concordante                                                             |
|--------------|----------------------------|--------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| A seco       | $v_c$ (m/min) = <b>270</b> | Desgaste de flanco |  |
| Convencional | $a_p$ (mm) = <b>1</b>      | Rugosidade         |                                                                                     |
| Criogênico   | $a_e$ (mm) = <b>17,5</b>   | Cavacos            |                                                                                     |
|              | $n$ (rpm) = <b>3.438</b>   |                    |                                                                                     |
|              | $f$ (mm/z) = <b>0,12</b>   |                    |                                                                                     |

**Figura1. Dimensões do corpo de prova, parâmetros de corte e estratégia de usinagem.**

Foram realizadas duas réplicas, com parâmetros de corte fixos variando apenas o meio: a seco, fluido convencional e criogênico. Como refrigerante convencional aplicado em jorro foi utilizado um fluido semissintético de base mineral à uma concentração em água de 8%. Foram utilizadas 3 mangueiras de aplicação distribuídas à aproximadamente 120° ao redor da ferramenta. Para a aplicação criogênica, utilizou-se o nitrogênio líquido (LN<sub>2</sub>) pressurizado em um dewar de 50 litros (Cryofab, modelo CFN50).

A montagem experimental utilizada para aplicação do nitrogênio líquido pode ser vista na Figura (2). Adotou-se a técnica de resfriamento por spray, direcionando o fluxo de LN<sub>2</sub> na zona de corte. Nos ensaios, foi utilizada uma pressão de aplicação do LN<sub>2</sub> de 11 psi (~0,76 bar). Este foi conduzido à região de corte com auxílio de um tubo de cobre flexível isolado termicamente, fixo a uma braçadeira de alumínio presa ao cabeçote da máquina.

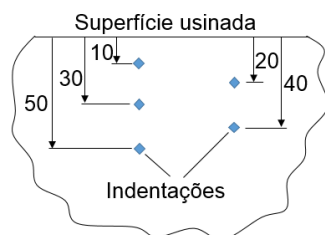


**Figura 2. Montagem experimental dos ensaios de usinagem criogênica.**

Adotou-se insertos de metal duro (ISO R390-11 T3 08M-PM 1030), revestidos com TiN, fixos no suporte de 25 mm de diâmetro (R390-025A25-11L). As imagens do cavaco, tanto quanto do desgaste de flanco (VB), foram feitas com auxílio de uma câmera (AxioCam ERc 5s) acoplada ao Stereo Microscópio Discovery V8 da Zeiss. De acordo com ISO 3685, de 1993, adotou-se critério de fim de vida VB = 0,3 mm (média entre os desgastes de um dos insertos, mantendo sempre o mesmo lado do suporte) (ISO, 1993). A evolução do desgaste foi acompanhada no gume primário de corte.

A rugosidade média aritmética (Ra) da peça foi avaliada com auxílio do Rugosímetro SJ.201P da Mitutoyo, adotando um cut-off de 0,8 x 5 mm. Fez-se as medidas logo após cada ciclo de usinagem em 6 regiões distintas da superfície usinada, em direções perpendiculares as marcas de avanço.

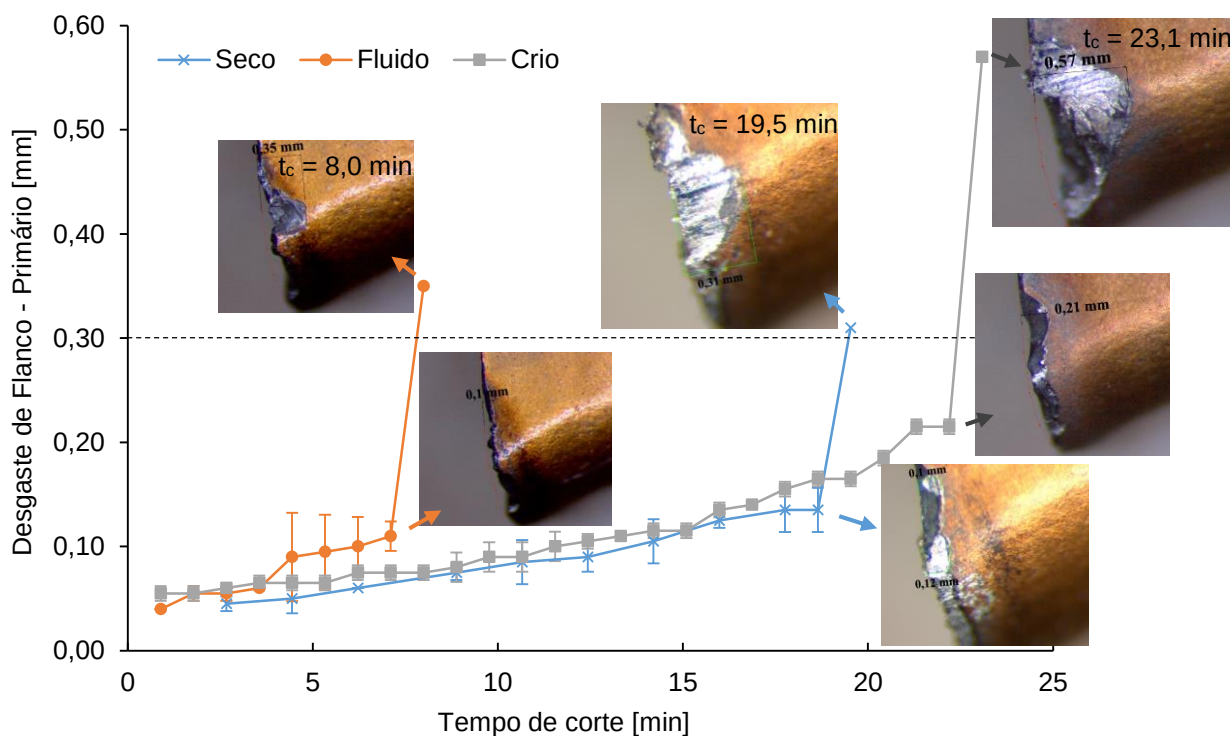
A caracterização da microdureza foi feita utilizando a escala Vickers em um microdurômetro LEICA, modelo VMHT MOT. Os pontos de medição da microdureza foram dispostos na seção transversal das amostras, da forma descrita pela Figura (3). Esta disposição foi utilizada visando respeitar o recomendado pela ISO 14577-1, de 2002 (ISO, 2002), que trata da mínima distância necessária entre as indentações sem que haja mútua interferência no valor medido. Este valor corresponde a 2,5 vezes o valor da diagonal do losango formado pela indentação. Foram feitas cinco medidas com carga de 10 gf equidistantes entre si de 10 µm a partir da superfície usinada, totalizando 50 µm de profundidade.



**Figura 3. Pontos de medição da microdureza (dimensões em micrometros).**

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

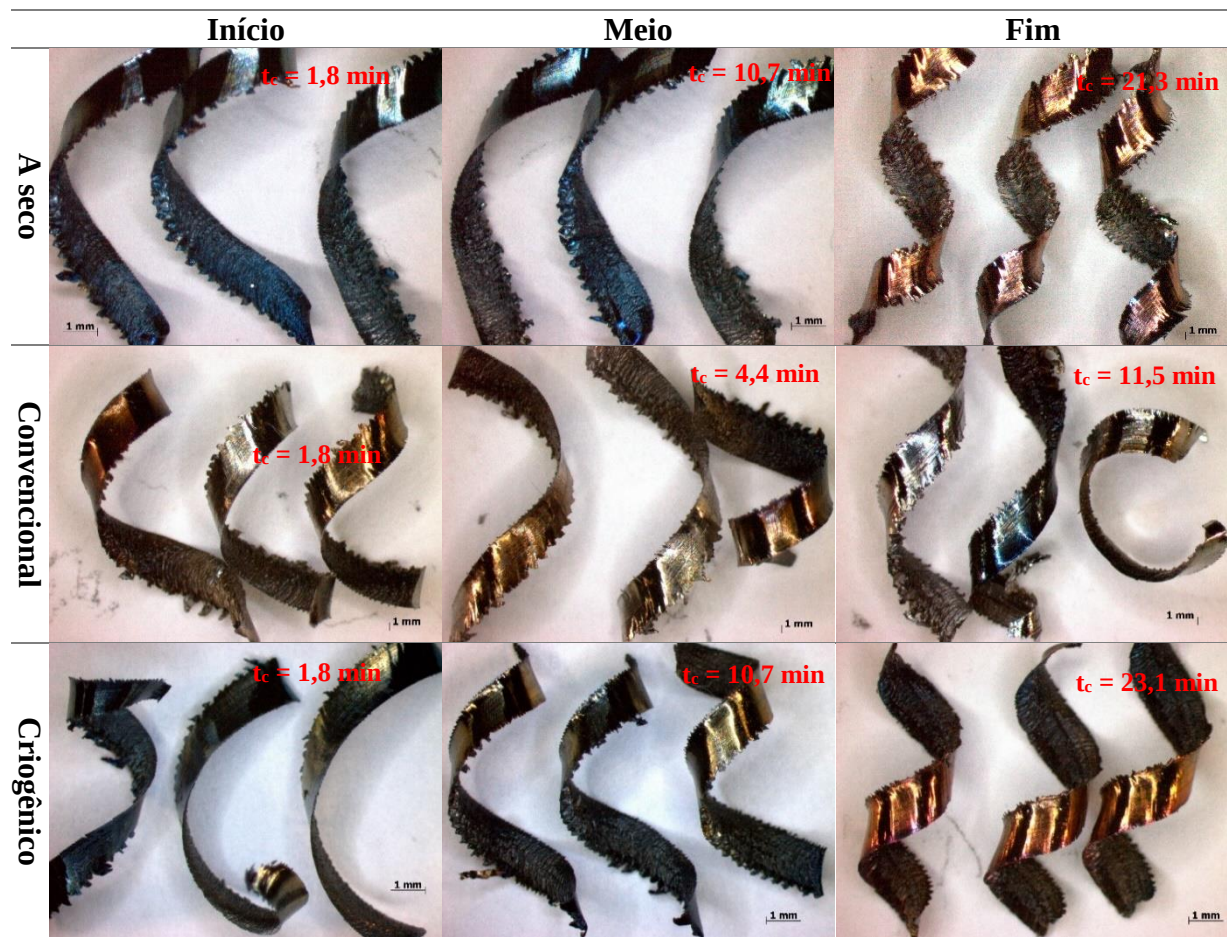
A Figura 33 representa a evolução do desgaste de flanco no gume primário de corte.



**Figura 3. Evolução do desgaste de flanco no flanco primário. Coeficientes de variação (CV) de: 15,1% a seco, 18,9% com fluido convencional e 7,9% com fluido criogênico.**

As imagens apresentadas no interior do gráfico de vida da ferramenta (Figura 3) representam lascamentos que ocorreram nos últimos ensaios das três condições de corte, causando a interrupção dos ensaios. Sendo assim, considera-se que a ferramenta propriamente não atingiu o fim de sua vida pelo progressivo desgaste de flanco, mas por uma abrupta interrupção dos ensaios causada por avarias na forma de lascamentos. Este fenômeno sugere uma grande instabilidade térmica nos três casos, mas especialmente, na condição com fluido convencional. Comparando o desempenho da ferramenta nas condições a seco, com fluido convencional e criogênica (Figura 3), nota-se que o menor tempo de vida da ferramenta foi obtido na condição com fluido de corte convencional. Com apenas 8 minutos de usinagem, a ferramenta na condição com fluido de corte convencional sofreu lascamentos que inviabilizaram a continuação dos ensaios. Em termos percentuais, este valor representa um tempo aproximadamente 188% menor do que na condição criogênica e 144% menor do que na condição a seco.

O efeito de instabilidade térmica pode ser observado pelas variações de forma e cor dos cavacos, especialmente na condição com fluido convencional (Figura 4), que foram todos coletados em um mesmo ciclo de usinagem (11,55 cm<sup>3</sup>). Ou seja, considerando amostras de cavacos referente a um único ensaio com aplicação de fluido convencional, pode-se observar que houve oscilação térmica (variação da forma e cor dos cavacos) na região de corte, superior aos ensaios a seco e com aplicação do fluido criogênico, levando, por sua vez, ao rápido fim de vida da ferramenta, comparado às outras condições. Este resultado sugere um contato inconstante do fluido, especialmente com o cavaco. Ou seja, durante alguns instantes o fluido manteve contato com o cavaco, protegendo-o inclusive da formação de óxidos, como se observa da Figura 4 (cavacos prateados), em outros, no entanto, o fluido evaporou antes de alcançar esta região, permitindo a formação de óxidos (cavacos dourados e/ou marrons) que altera a coloração original do metal.

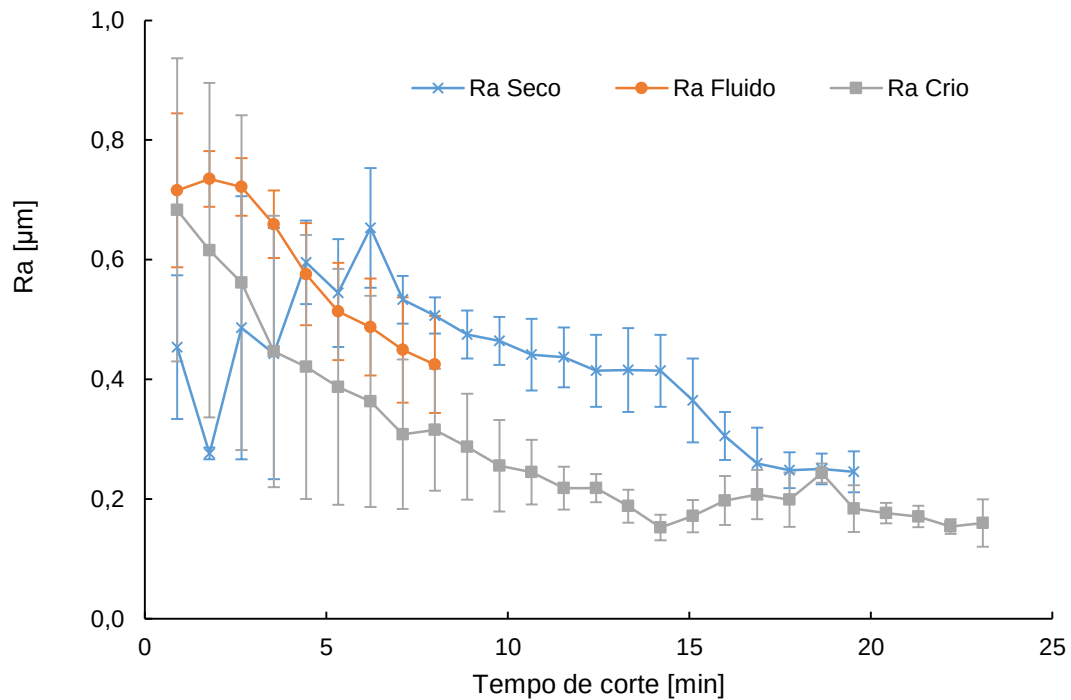


**Figura 4. Cor e forma dos cavacos.**

A rugosidade da peça variou muito nas duas réplicas das três condições, levando à grande dispersão dos resultados observado na Figura 5. Esta dispersão foi maior nos primeiros 5 minutos, o que reflete, possivelmente, o efeito de acomodação da aresta de corte. Na condição a seco este efeito levou a valores instáveis de rugosidade nos instantes iniciais de usinagem. Apesar deste fenômeno, observa-se uma tendência de redução da rugosidade com o tempo nas três condições. Na condição criogênica, a magnitude da redução foi maior e, próximo do fim da vida da ferramenta, tornou-se semelhante a rugosidade na condição a seco. Isso ocorre pois, com os lascamentos na aresta de corte, o efeito benéfico

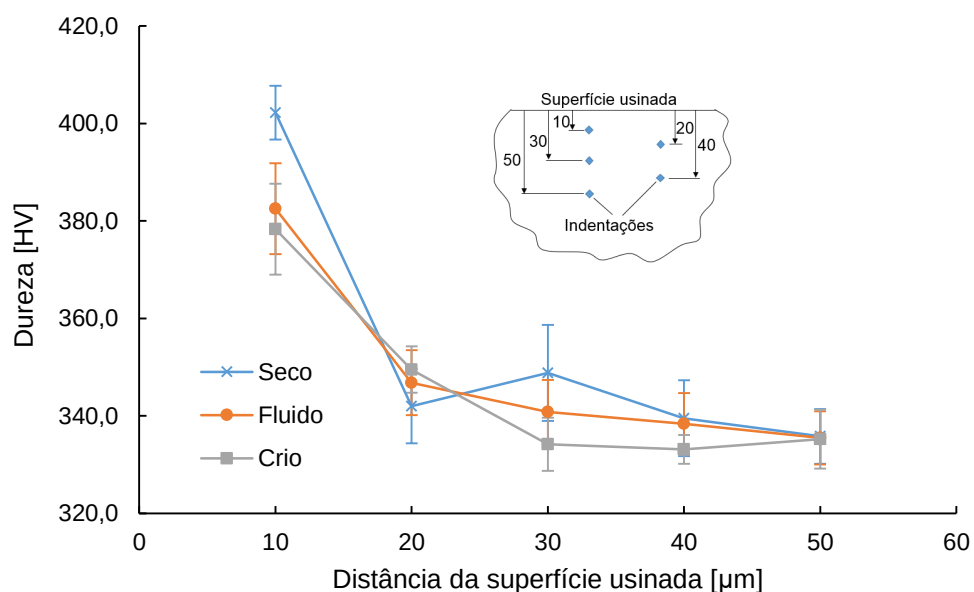


do fluido criogênico na peça, que permite menores valores de rugosidade, é sobreposto pelo efeito maléfico da aresta da ferramenta em seus estágios finais de corte.



**Figura 5. Desvio médio aritmético (Ra). Coeficientes de variação (CV): 16,3% a seco, 13,9% com fluido convencional e 27,2% com fluido criogênico.**

O efeito do fluido convencional e criogênico na peça pode ser observado com auxílio da Figura 6. Sugere-se, por meio desta, que houve redução da temperatura da peça durante a usinagem, levando a menores níveis de encruamento na subsuperfície de corte ( $10\mu\text{m}$ ), e por sua vez, na microdureza (Figura 6). Nota-se ainda, que os valores de microdureza são maiores conforme a proximidade da superfície usinada, e diminuem com a profundidade de análise até se aproximarem da microdureza obtida no material bruto ( $\sim 335,2 \text{ HV}$ ).



**Figura 6. Perfil da microdureza ao longo da secção transversal da peça. Coeficiente de variação (CV): (a) 2,08% a seco, (b) 1,95% com fluido convencional e (c) 1,63% com fluido criogênico**

## 5. CONCLUSÕES

Sob condições criogênicas houve aumento da vida da ferramenta e uma tendência de redução da rugosidade da peça, justificado pela uniformidade de forma e cor dos cavacos, indicando boa estabilidade térmica durante o corte, e pela redução da microdureza na subsuperfície da peça usinada.

Nos últimos minutos da usinagem, a rugosidade da peça tornou-se semelhante nas condições a seco e criogênica, pois nos estágios finais de corte da ferramenta, o efeito benéfico do fluido criogênico na rugosidade foi sobreposto pelo efeito maléfico, na mesma, da degradação da aresta de corte.

Considerando os lascamentos da ferramenta, a forma e cor dos cavacos em um mesmo ciclo de usinagem, houve instabilidade térmica, especialmente, na usinagem sob aplicação de fluido convencional, em que a vida da ferramenta foi muito inferior às outras duas condições, efeito possivelmente justificado por ciclos de evaporação do fluido na região de corte.

## 6. AGRADECIMENTOS

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de mestrado, à Villares Metals pela doação do material da peça utilizado nos ensaios e ao Grupo de Pesquisa em Usinagem (GPU) da UNESP Campus de Ilha Solteira pelo apoio durante execução dos ensaios.

## 7. REFERÊNCIAS

- ATTANASIO, A. et al. Minimal quantity lubrication in turning: Effect on tool wear. **Wear**, v. 260, p. 333 – 338, 2006.
- ALVES, G. C.; DA SILVA, E. J. Fluidos de corte criogênicos aplicados ao torneamento: um estudo do estado da arte. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO, 8., 2015, Salvador. **Anais...** Salvador: ABCM, 2015.
- CONHEÇA os diferenciais do centro de distribuição e serviços da Villares Metals. Cdestaques, São Paulo, n. 33, p.3-3, set. 2009. Disponível em: <<http://www.villaresmetals.nl/portuguese/files/CDestaque33.pdf>>. Acesso em: 27 ago. 2015.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION STANDARDIZATION. **ISO 3685**: Tool-life testing with single-point turning tools, Geneva, 1993.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION STANDARDIZATION. **ISO 14577-1**: Metallic materials — Instrumented indentation test for hardness and materials parameters — Part 1: Test method, Geneva, 2002
- SHOKRANI, A. et al. State-of-the-art cryogenic machining and processing. **International Journal of Computer Integrated Manufacturing**, New York, v. 26, n. 7, p. 616 - 648, 2013.
- SU, Y. et al. Refrigerated cooling air cutting of difficult-to-cut materials. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 47, p. 927 – 933, 2007.
- UEHARA, K.; KUMAGAI, S. Chip formation, surface roughness and cutting force in cryogenic machining. **Annals of CIRP**, Amsterdam v. 17, n. 1, p. 409–416, 1969.
- UEHARA, K.; KUMAGAI, S. Characteristics of tool wear in cryogenic machining. **Annals of CIRP**, Amsterdam, v. 18, n. 1, p. 273–277, 1970.
- YILDIZ, Y.; NALBANT, M. A review of cryogenic cooling in machining processes. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, New York, v. 48, n. 9, p. 947–964, 2008.

## 8. DIREITOS AUTORAIS

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

## CRIOGENIC MILLING OF MOLDS AND DIE STEEL

Daniel de Carvalho Secco, danielseccodj@gmail.com<sup>1</sup>

Alessandro Roger Rodrigues, roger@sc.usp.br<sup>1</sup>

Hidekasu Matsumoto, hidekasu@dem.feis.unesp.br<sup>2</sup>

<sup>1</sup>USP Campus de São Carlos, Av. Trabalhador São Carlense 400, CEP 13.566-590, São Carlos-SP

<sup>2</sup>UNESP Campus de Ilha Solteira, Av. Brasil Centro 56, CEP 15.385-000, Ilha Solteira-SP

**Resumo:** *The molds and dies manufacturing require the generation of complex shapes with good surface finish and without high damages to the tool. By being a versátil process able to reproduce different shapes with accuracy, the milling is commonly used to manufacture molds, however, its interrupted cutting characteristic create heating and cooling cycles at the tool that significantly reduce its life and tend to worsen the surface integrity of the workpiece. Proposing to stabilize the thermal cycles at the tool and to reduce the damaging effects of the interrupted cutting at the part, the cryogenic fluid were applied on milling. This research determined the influence of cooling condition (cryogenic, wet and dry) on the tool wear (major edge), chips (shape and color), surface roughness and microhardness at the part, while milling (front) the steel Villares VP100 (equivalent to AISI P20) used in the manufacturing of molds and dies for plastic injection. The cryogenic effects at the part (reducing of the microhardness) and in the thermal tool stability led to the lowest values of surface roughness and increase tool life, compared to dry and wet conditions. In that last one, the thermal instability led to range on chips shape and color, and caused the abrupted reducing at the tool life, compared to the others conditions.*

**Keywords:** *Cryogenic, Milling, Molds and dies, tool life.*