

**XIX Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica - 13 a 17/08/2012 – São Carlos-SP**  
Artigo CREEM2012

**Efeito do Fresamento na Integridade Superficial de um Aço para Moldes e Matrizes.**

**Flávio Henrique Manarelli<sup>(1)</sup>, Adriana Bruno Norcino<sup>(2)</sup>, Saimon Vendrame<sup>(3)</sup>, Alessandro Roger Rodrigues<sup>(4)</sup>.**

<sup>(1),(2),(3)</sup> Unesp / FEIS, Universidade Estadual Paulista, Curso de Engenharia Mecânica  
Campus Ilha Solteira - Bairro Centro - CEP 15385-000 – Ilha Solteira – São Paulo

<sup>(4)</sup> USP/ EESC, Universidade de São Paulo, Campus São Carlos – Bairro Centro – CEP 13566-590- São Carlos – São Paulo

E-mail para correspondência: flaviomanarelli@gmail.com

**Introdução**

A usinagem é tida como um dos processos de fabricação mais utilizados mundialmente. Segundo a definição, a usinagem trata-se de processos que ao conferir formas geométricas a peça, formam cavaco (Ferraresi, 1970). Em meio a inúmeras pesquisas a usinagem em altas velocidades de corte (*High Speed Cutting* - HSC), possui grande aplicação na indústria. A usinagem HSC começou a ser pesquisada com maior intensidade na década de 70 e até os dias atuais não há uma definição clara e conceitual para este processo. Apesar da falta de uma definição precisa, este tipo de usinagem é hoje reconhecido como a mais importante tecnologia de usinagem em desenvolvimento e implantação.

A tecnologia HSC traz várias vantagens, como por exemplo, economia de tempo, menores esforços de corte, melhor dissipação de calor, menor distorção da peça, melhor precisão, menores níveis de vibração mecânica, maior facilidade na remoção e armazenamento de cavacos e melhor acabamento superficial, visando sempre o crescimento da produtividade (Chevrier et al., 2003).

Apresenta como principal vantagem a possibilidade de trabalhar com velocidades de 5 a 10 vezes maiores do que as normalmente utilizadas e com avanços e profundidades de corte bastante menores do que aqueles adotados nas usinagens ditas convencionais. Embora possa ser utilizada em operações de desbaste, sua aplicação é principalmente indicada para operações de acabamento e semi-acabamento (Schützer, 2003).

A velocidade de corte depende, sobretudo, do tipo de material que esta sendo usinado, assim para cada tipo de material a velocidade pode ou não caracterizar altas velocidades de corte. Desta forma, ocorre ainda uma zona de transição entre velocidades ditas como convencionais e altas velocidades de corte (Oliveira, 2003). A figura 1 mostra tal relação.

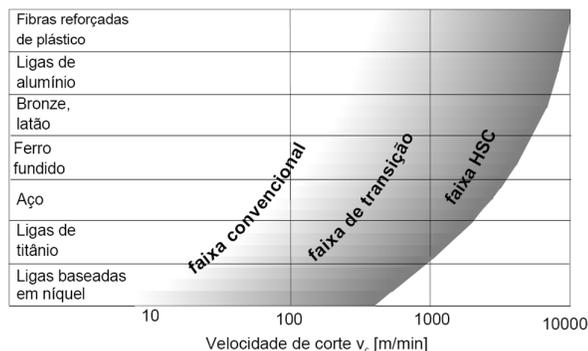


Figura 1 - Faixas de velocidade para diferentes materiais.

Fonte: Schulz (1996).

Segundo Flom e Komanduri (1989), a usinagem com altíssimas velocidades de corte (HSC) é um termo relativo ao material da peça, por causa das diferentes velocidades nas quais os materiais podem ser usinados com aceitável vida da ferramenta. Um modo de definir HSC é relacioná-la ao processo de formação do cavaco. Cisalhamentos localizados são ocasionados quando ocorre um efeito negativo da resistência ao

aumento da temperatura, devido à intensa deformação plástica, que é igual ou maior ao efeito positivo do encruamento. Neste contexto, HSC para um dado material pode ser definido como a velocidade acima da qual o cisalhamento localizado se desenvolve completamente na zona primária de cisalhamento. O estudo da formação do cavaco nos permite interpretar os fenômenos de deformação e recalque que ocorrem no momento do cisalhamento, mesmo após a usinagem. Na realidade é um registro do processo que aconteceu com o material durante a usinagem.

O processo de usinagem condiciona o desempenho da peça em serviço, desta forma para gerarmos superfícies integras e melhoradas é preciso entender as relações entre metalurgia, usinabilidade e testes mecânicos. Esse é o conceito de integridade superficial, originalmente definido em 1964 para operações de retificação, aplica-se para qualquer operação de acabamento. As superfícies por mais perfeitas que sejam apresentam irregularidades, tais irregularidades compreendem dois grupos de erros: macrogeométricos e microgeométricos. O primeiro tipo é tido como erros de forma, verificáveis por meio de instrumentos convencionais de medição como micrômetros, relógios comparadores e projetores de perfil, entre esses erros incluem-se divergências de ondulações, ovalização, retitude, planeza, circularidade, etc. Já erros microgeométricos são conhecidos como um conjunto de irregularidades, isto é pequenas saliências e reentrâncias que caracterizam uma superfície e podem ser avaliadas com aparelhos eletrônicos, a exemplo do rugosímetro.

A rugosidade desempenha um papel importante no comportamento dos componentes mecânicos, pois influi na resistência ao desgaste, na fadiga, na qualidade de aderência que a estrutura oferece às camadas protetoras.

Dependendo da sua grandeza, orientação e do grau de irregularidade, algumas causas podem ser apontadas como: vibrações no sistema peça-ferramenta, desgaste da ferramenta e próprio método de conformação da peça, dentre outros.

### Metodologia

O planejamento experimental dos ensaios de fresamento foi executado segundo a literatura técnica sobre usinagem convencional e altas velocidades de corte, visando avaliar as possíveis variáveis de usinagem e suas respectivas influências na rugosidade e na microestrutura dos corpos de prova usinados. O VP-100 fornecido pela Villares Metals, é um aço microligado ao Cr-Ni-Mn, e não possui similares normatizados sendo descrito como substituto do AISI P20 (DIN 1.2738). É indicado pelo fabricante para confecção de porta-moldes, moldes para injeção de plásticos não clorados, matrizes para extrusão de termoplásticos, moldes para sopro, entre outras aplicações. Assim a escolha do perfil de usinagem visou simular a parede de um molde. A principal vantagem deste aço é a uniformidade da sua seção, o que garante na fabricação de moldes que possuem cavidades profundas, a integridade da superfície em qualquer parede.

O ensaio estabelecido para a usinagem das peças é o de fresamento de topo em centro de usinagem vertical CNC, marca ROMI, modelo Discovery 560, com rotação máxima de 10.000 rpm e potência de 11 kW. Para o estudo da usinagem com alta velocidade de corte foram adotados dois níveis de velocidade, HSC e convencional. Além disso buscando a influência do avanço, este foi utilizado em duas condições como descreve a tabela 1, a seguir. Para todas as condições a profundidade de corte ( $a_p$ ) foi de 2,0mm.

Tabela 1 – Variáveis de entrada e níveis adotados na usinagem

Parâmetros de Corte	Condições de Usinagem			
	C1	C2	C3	C4
Velocidade de Corte [m/min]	200	200	450	450
Avanço por Dente [mm/dente]	0,1	0,2	0,1	0,2

Os corpos de prova foram blocos de dimensões 100x22x15mm, com corte concordante, no qual a velocidade de corte e de avanço possuem o mesmo sentido na entrada da aresta no material a ser cortado. A trajetória foi um fresamento de topo retilíneo com incremento lateral ( $a_e$ ) constante de 10mm. Foram feitos quatro passes com a mesma profundidade ( $a_p$ ) de 2mm, fazendo assim uma parede com diferença total de 8mm do topo. A figura 2 (a) mostra o corpo de prova antes do ensaio e a figura 2 (b) após o ensaio.

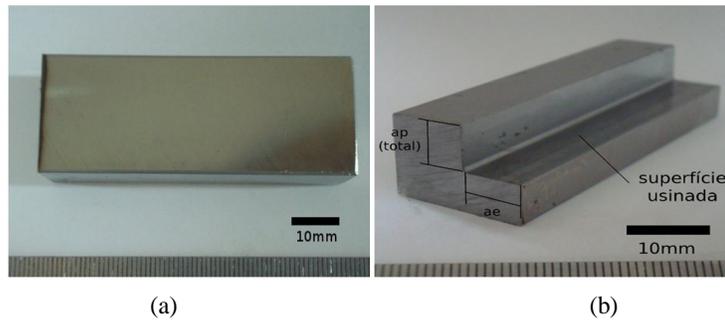


Figura 2 – (a) Corpo de Prova antes da Usinagem e (b) Corpo de prova após a Usinagem.

A fresa utilizada foi a Sandvick modelo R390-11 T3 08M-PM 4230, com diâmetro externo ( $D_C$ ) de 25mm. O ângulo de folga da ferramenta ( $21^\circ$ ) foi mantido constante ao longo dos ensaios, assim como o ângulo de posição ( $90^\circ$ ) e o raio de ponta do inserto (0,8 mm). Com a utilização desta ferramenta, temos uma relevante influência do raio de ponta na geometria do cavaco, pois quando utilizamos  $a_p$  com um valor abaixo de 1mm ocorre mudança na área onde o corte é realizado.

A análise qualitativa da rugosidade foi feita em um perfilômetro ótico 3D Veeco, modelo Wyko NT9100 no Laboratório de Usinagem de Precisão, da Escola de Engenharia de São Carlos. O posicionamento das amostras se deu de modo que a superfície usinada estivesse perpendicular ao feixe de luz, desta forma imagens planas e tridimensionais foram obtidas em três regiões da superfície usinada, conforme figura 2 (b), por meio do software Vision.

O cavaco resultante da usinagem, trás na sua microestrutura um registro das deformações que ocorreram no processo de cisalhamento. Então fez - se análise da micrografia da seção transversal ao plano de cisalhamento. Os cavacos foram recolhidos, separados e catalogados para cada uma das quatro condições, com o auxílio de um suporte na mesa do centro de usinagem como mostra a figura 3.



Figura 3 – Fixação do corpo de prova e coletor de cavaco.

Após os ensaios os cavacos foram embutidos em baquelite, com o auxílio de um suporte ao qual foram colados, para garantir que a seção revelada seja a lateral. A baquelite foi escolhida pois garante que não hajam bolhas entre os cavacos, os quais possuem uma interface muito delicada com o suporte, como mostra a Figura 4.

O procedimento seguinte foi o lixamento, com lixas de granulação 220, 320, 400, 600, 1000, nesta ordem, limpando a amostra e rotacionando  $90^\circ$  o sentido de lixamento a cada troca de lixa. Por fim foram polidas com alumina  $1,0\mu\text{m}$ ,  $0,3\mu\text{m}$  e pasta de diamante.

Para revelar a microestrutura foi utilizado Nital a 2%, intercalado com polimento em pasta de diamante em três seções. Este processo faz com que o ataque fique mais homogêneo, e sem alguns sinais de oxidação. O ataque deve ser realizado em um tempo não superior a um segundo, para não prejudicar as “bordas” na interface cavaco-baquelite.

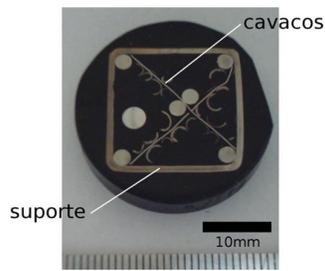


Figura 4– Amostra de cavaco embutida

As micrografias foram feitas com um microscópio óptico Carl Zeiss Jena, modelo Neophot 21. Para obtenção das imagens no microscópio ótico, foi empregada a câmera digital Sony, modelo Cyber-Shot DSC-W80 (7,2 mega pixels de resolução).

### Resultados e Discussão

As análises tratam - se de dois resultados principais. O primeiro é a rugosidade da superfície usinada, porque influencia diretamente nas características do produto final, confecção de moldes e matrizes. O segundo é a deformação da microestrutura do cavaco, que revela a influencia dos parâmetros de corte no cisalhamento. Esse está ligado a usinabilidade e produtividade.

Os parâmetros medidos para rugosidade foram  $R_a$  (rugosidade média aritmética),  $R_q$  (rugosidade média quadrática),  $R_y$  (rugosidade máxima) e  $R_z$  (rugosidade média), porém para efeito de análise apenas o valor de rugosidade  $R_a$  será considerado por ser o mais presente em trabalhos científicos, representando a média aritmética das amplitudes entre os picos e vales presentes nas irregularidades da superfície. Essas imperfeições tem sua origem no valor do avanço e nas vibrações do conjunto máquina ferramenta e fixação. Além disso podemos apontar como causa a deformação da superfície causada pelas tensões da ferramenta. A figura 5 mostra uma visão geral do comportamento da rugosidade  $R_a$ .

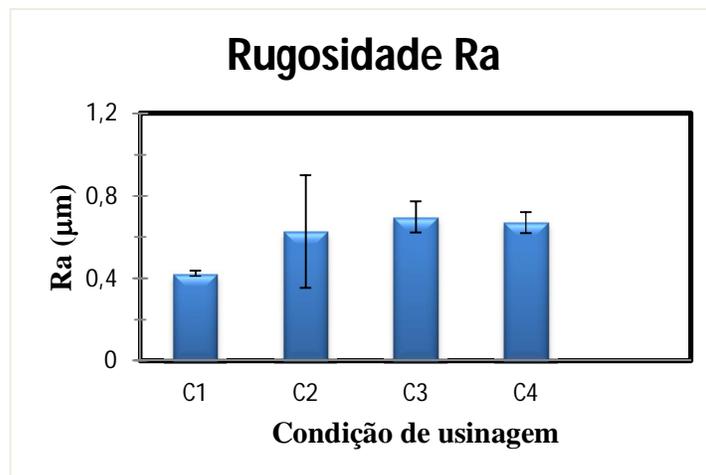


Figura 5 – Rugosidade média ( $R_a$ ) em função dos das condições de usinagem.

De acordo com a norma NBR 8404/1984 o qual indica o Estado de Superfícies em Desenhos Técnicos, os valores médios encontrados são de aproximadamente 0,42 – 0,67  $\mu\text{m}$  o que indica o estado de superfície entre N6 e N5 (0,8 - 0,4  $\mu\text{m}$ ), valores comumente encontrados para retificação, ou usinagem de precisão, como o caso que aqui se trata.

Comparando-se as condições C1 e C2, podemos notar uma tendência ao aumento da rugosidade média. Essas condições possuem parâmetros de corte iguais, excetuando-se o avanço, sendo maior em C2. Isso comprova conforme indicação da literatura de que o avanço tem grande influencia no valor da rugosidade, ou seja, a rugosidade aumenta com o avanço.

Nas condições C3 e C4, a influência do avanço fica menos conclusiva, porém nota-se uma tendência a um aumento, quando comparado com as outras duas condições. Isto se deve ao aumento da velocidade de corte, que entre outras coisas provoca um aumento considerável nas forças envolvidas podendo ter causado o

aumento da vibração do sistema.

A perfilometria óptica 3D, mostrada na figura 6, nos permite avaliar qualitativamente a topografia usinada e assim observar o perfil de rugosidade, onde na escala de cor o vermelho representa os picos mais altos e o azul o vale mais profundo.

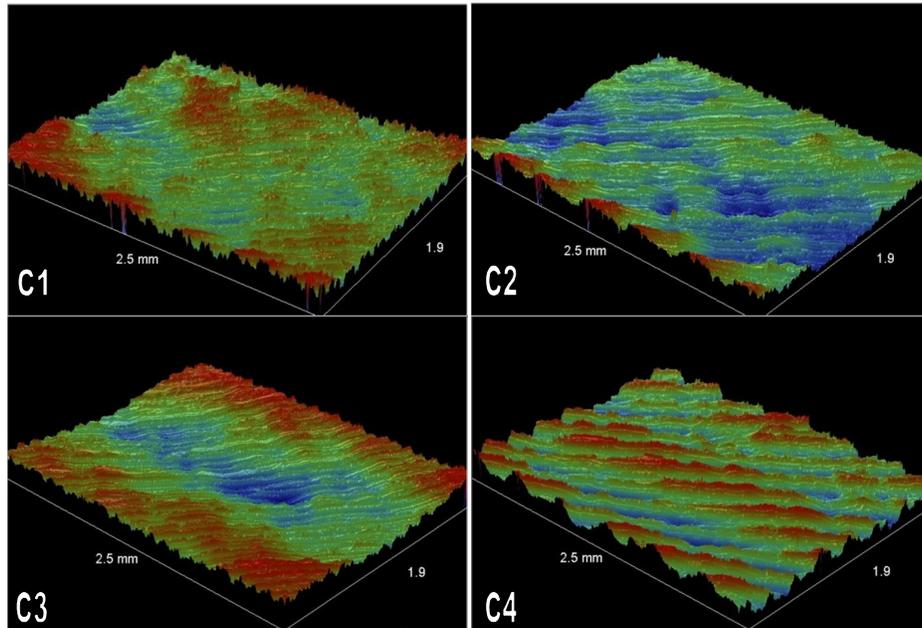


Figura 6 – Perfilometria Óptica 3D das Condições de Usinagem

A análise da microestrutura do cavaco buscou evidenciar o tipo de formação existente. A formação de cavaco segmentado assegura que a usinagem ocorreu segundo os fenômenos de alta velocidade de corte.

As condições C1 e C2, representadas pelos cavacos da figura 7 (a) e (b) respectivamente, são de velocidade convencional, os quais apresentam a microestrutura deformada com lamelas justapostas, porém não distintas. A deformação ocorreu de forma constante em toda seção do cavaco.

Na figura 7 (a), a parte superior é a face do cavaco que não teve contato com a ferramenta, e percebe-se a formação típica “em serra” que é resultado do processo cíclico de formação do cavaco, o qual resumidamente trata-se de recalque inicial, acúmulo de discordâncias, cisalhamento e escoamento sobre a superfície de saída. Assim podemos definir como cavaco típico de condição convencional.

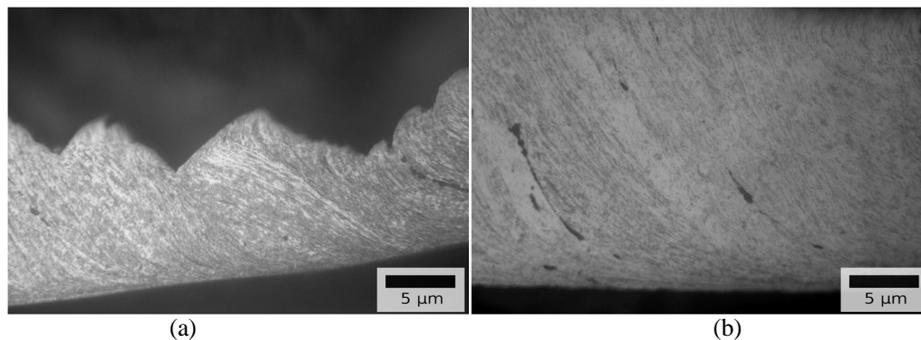


Figura 7 – (a) Microestrutura do cavaco da condição C1 e (b) Microestrutura do cavaco da condição C2.

O cavaco da condição C3 - Figura 8 (a) - apresenta lamelas distintas e com pouca ou quase nenhuma deformação em seu interior, porém concentrada em bandas estreitas nas regiões limites dessas. Essa microestrutura evidencia o fenômeno de alta velocidade de corte, em que altas taxas de deformação são empregadas fazendo com que o cavaco mude do tipo contínuo para o segmentado.

A condição C4-Figura 8 (b), não apresenta as lamelas tão distintas como na C3, embora as regiões limites estejam mais deformadas. O fato desta distinção dos cavacos, apesar da mesma velocidade, pode estar relacionado com o avanço, que na segunda condição era maior. Esta condição de avanço modifica a

área de corte alterando assim a pressão específica de corte, que é a força empregada pela área do plano de cisalhamento.

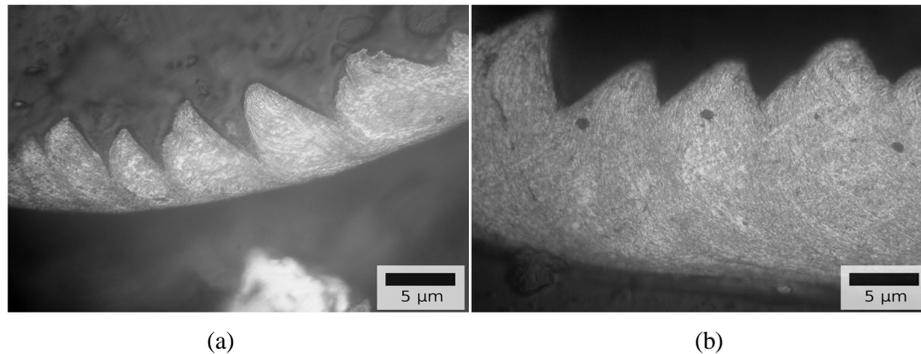


Figura 8 – (a) Microestrutura do cavaco da condição C3 e (b) Microestrutura do cavaco da condição C4.

### Conclusões

A rugosidade apresentou-se em média valores maiores para as condições de alta velocidade de corte (HSC). Esse resultado pode estar relacionado com as maiores forças envolvidas devido ao aumento da velocidade, que tendem a aumentar a vibração do sistema.

A análise da microestrutura do cavaco permitiu verificar nas condições convencionais o cavaco do tipo contínuo. Já para a condição C3 a característica é de cavaco segmentado mostrando ser uma condição HSC, e a condição C4 encontra-se em uma transição entre as duas velocidades. Assim, a condição de alta velocidade de corte não depende somente da velocidade de corte, mas também do avanço.

A alta velocidade de corte (HSC) é uma alternativa, que apesar de ainda possuir um custo inicial alto, reduz o tempo de produção, pois além de ser mais rápida pode eliminar etapas de acabamento. Através do estudo da fenomenologia do corte pode-se adequar o processo, tornando-o cada vez mais eficiente para diferentes produções. Esta é uma alternativa para a indústria de moldes e matrizes tornar-se cada vez mais competitiva.

### Agradecimentos

Os autores agradecem o Prof. Dr. Renato Goulart Jasinevicius (EESC/USP) por permitir o uso das dependências do Laboratório de Usinagem de Precisão, da Escola de Engenharia de São Carlos, e ao Grupo de Pesquisa em Usinagem (GPU) da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira (FEIS/UNESP).

### Referências Bibliográficas

- Chevrier, P.; Tidu, A.; Bolle, B.; Cezard, P.; Tinnes, J. P. Investigation of surface integrity in high speed end milling of a low alloyed steel. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Amsterdam, v.43, n. 11, p.1135-1142, 2003.
- Ferraresi, D. *Fundamento da usinagem dos metais*. São Paulo: Edgard Blücher, 1970. 754 p.
- Flom, D. G.; Komanduri, R. High Speed machining. In: \_\_\_\_\_. Davis, J. R. (Ed.). *Metals handbook: machining*. 9.ed. Ohio: ASM, 1989. v.16, p. 597-606
- Machado, A. R.; Abrão, A. M.; Coelho, R. T.; Silva, M. B. Integridade superficial. In: \_\_\_\_\_. *Teoria da Usinagem dos Materiais*. São Paulo: Edgard Blücher, 2009. p. 276-304.
- Oliveira, F. G. HSM - Conceitos e Aplicações. In: SANTOS, A. V. et al. *Usinagem em Altíssimas Velocidades*. São Paulo: Érica, 2003. p. 29-35.
- Schützer, K.; Schulz, H. Histórico da usinagem com altíssima velocidade até os dias atuais. In: Santos, A. V. et al. *Usinagem em altíssimas velocidades*. São Paulo: Érica, 2003. Cap. 1, p.13-28.
- SHAW, M. C. *Metal cutting principles*. 1 ed. New York: Oxford Science Publications, 1997. 594 p.