

AVALIAÇÃO DO EFEITO DA VELOCIDADE DE CORTE NOS ESFORÇOS DE USINAGEM E NO ACABAMENTO SUPERFICIAL DE UM AÇO ABNT 1045

Diego Carreras Bezerra

Escola Politécnica da USP, Av. Prof. Mello Moraes, 2231
05508-970 São Paulo S.P.
diego.carreras@poli.usp.br

Izabel Fernanda Machado

Escola Politécnica da USP, Av. Prof. Mello Moraes, 2231
05508-970 São Paulo S.P.
machadoi@usp.br

Resumo. *A usinabilidade de um material metálico é influenciada pela sua composição química, microestrutura, resistência e também pelos parâmetros de corte como: avanço e velocidade de corte, dentre outros. Existem três aspectos, que caracterizam, por assim dizer, a usinabilidade, que são a vida da ferramenta, o acabamento superficial e a potência requerida para o corte. Este trabalho tem por objetivo avaliar o efeito da velocidade de corte nos esforços de usinagem e no acabamento superficial de um aço utilizado para construção mecânica. O objetivo deste trabalho é relacionar a velocidade de corte com o acabamento superficial, em especial, com a rugosidade, e com as forças de corte e de avanço. Para isso foram feitos ensaios utilizando avanço de 0,2 mm/volta e profundidade de corte de 1 mm. Os corpos-de-prova do aço ABNT 1045 foram torneados em quatro diferentes velocidades (15, 50, 110 e 180 m/min) onde foram medidas as forças de corte e de avanço, utilizando-se um porta-ferramenta instrumentado com extensômetros ligado a um sistema de aquisição. Foram também medidas, as rugosidades das superfícies usinadas. A morfologia dos cavacos também foi avaliada para cada velocidade de corte. Verificou-se que pode se estabelecer uma relação entre as forças de corte e avanço, velocidade de corte e a rugosidade Ra. A velocidade de corte de 50m/min mostrou-se crítica nas condições avaliadas, diferenciando os mecanismos de corte.*

Palavras-chave: *força de corte, aço, acabamento superficial, rugosidade, velocidade de corte*

1. INTRODUÇÃO

A usinabilidade de um material, bem como outras propriedades de fabricação, é tão importante como as propriedades mecânicas. A usinabilidade de um material metálico é influenciada por vários fatores tais como: composição química, microestrutura, resistência mecânica do material, avanço, velocidade de corte, profundidade de corte e escolha do fluido de corte ⁽¹⁾. Trabalho realizado por Dimla ^(2, 3) fez uma revisão e avaliação dos diversos métodos que são utilizados para se avaliar o processo de usinagem e que dão indicações da usinabilidade do material. Dentre esses métodos estão: a emissão acústica, temperatura da ferramenta, forças de corte e vibração. A utilização de ultra-som, acabamento superficial também são indicados. Dentre as variáveis que podem caracterizar a usinabilidade três delas são amplamente utilizadas, que são a vida da ferramenta, o acabamento superficial e as forças de corte.

Os esforços de usinagem são importantes na avaliação do efeito dos parâmetros de usinagem. A força de usinagem é dada pela resultante dos esforços que atuam sobre a cunha cortante. O conhecimento ou mesmo a estimativa dos esforços de usinagem máximos também é utilizado para o dimensionamento do equipamento de usinagem ^(2, 3, 4), no projeto de ferramentas e dispositivos de usinagem. No entanto, esses esforços variam durante o processo de usinagem e podem ser utilizados para estudar os mecanismos de formação de cavaco ^(6, 7, 8, 9). As medidas de força de corte podem ser realizadas acoplado um porta-ferramenta instrumentado com sensores capazes de medir, direta ou indiretamente, as componentes da força de usinagem. O sinal dos sensores é conectado a uma interface, que amplifica e filtra os sinais, que fica ligada a um microcomputador. Esses sensores podem ser sensores piezelétricos ^(5, 13) ou extensômetros ^(3, 4). Vários trabalhos ^(10, 11, 12, 13) têm sido realizados no sentido de usar a força de corte como forma de avaliar o processo de usinagem. Esses trabalhos têm diferentes abordagens, onde as forças de corte são correlacionadas com parâmetros que vão desde rugosidade, desgaste de ferramenta até microestrutura e propriedades mecânicas. As forças envolvidas na usinagem podem ser avaliadas em termos da pressão específica de corte específica, k_s , dada em N/mm^2 (força de corte dividida pela área, que é dada pelo avanço (f) multiplicado pela profundidade de corte (a_p)). Fatores metalúrgicos como taxa de encruamento do material, também são relevantes. Se o material apresentar elevado encruamento durante a usinagem, as forças durante o corte também aumentarão. Processos de corte, onde ocorre o mecanismo de cisalhamento adiabático, são sensíveis a taxa de deformação do material e as forças de corte também serão maiores, mesmo em elevadas velocidades de corte ⁽¹⁾. O acabamento superficial é outro fator importante a ser analisado. Esta análise pode ser feita pela rugosidade ou por fatores mais complexos como pelo perfil de rugosidade ^(5, 14, 15, 16). A velocidade de corte também influencia diretamente no acabamento superficial, favorecendo ou não a formação de aresta postiça. A aresta postiça é uma porção do cavaco que fica aderida à face da ferramenta. A formação de aresta postiça é favorecida quando a usinagem é feita em velocidades de corte relativamente baixas ⁽²⁾.

Os elementos de liga têm influência na usinabilidade dos aços carbono. O aumento das frações volumétricas de perlita aumenta o desgaste da ferramenta. Por outro lado, maiores teores de ferrita propiciam a formação de aresta postiça. A existência de uma perlita grosseira propicia uma melhora na usinabilidade. As inclusões formadas pela presença de enxofre e de fósforo, geralmente diminuem a formação de aresta postiça, melhorando o acabamento superficial. Teores de oxigênio presentes entre 200 e 300 ppm promovem a formação de inclusões globulares de MnS, melhorando a usinabilidade. Usualmente, os teores máximos de enxofre não passam de 0,05%. Em aços resulfurados este valor está entre 0,08% e 0,13%. No entanto, em alguns casos pode-se chegar a 0,35%. As inclusões de sulfeto, dependendo de seu tamanho, forma e orientação influenciam na usinabilidade ⁽¹⁾.

O objetivo deste trabalho é relacionar a velocidade de corte com o acabamento superficial, em especial, com a rugosidade, e com as forças de corte e de avanço. Para isso foram feitos ensaios utilizando avanço e profundidade de corte fixos e também o mesmo tipo de ferramenta. A morfologia dos cavacos também foi avaliada para cada velocidade de corte.

2. MATERIAIS, MÉTODOS E EQUIPAMENTOS

2.1 Material

O aço utilizado neste trabalho tem composição base do AISI 1045, que é apresentada na Tabela 1. O balanço fornece o teor de ferro.

Tabela 1. Composição química do material estudado.

%C	%Si	%Mn	%Cr	%Ni	%Mo	%S	%P
0,47	0,21	0,77	0,18	0,12	0,03	0,025	0,026

2.2 Metodologia

2.2.1 Metalografia

A preparação metalográfica consistiu em lixamento, polimento e ataque com o reagente Nital 3%, para posterior observação utilizando o microscópio óptico Olympus, no Laboratório de Fenômenos de Superfície (LFS), EPUSP.

2.2.2 Determinação da Dureza Vickers (HV 30)

A dureza Vickers foi determinada nas seções transversais e longitudinais da barra laminada. Foi utilizado o durômetro Struers do Laboratório de Fenômenos de Superfície (LFS), EPUSP. A carga utilizada foi de 30 kgf.

2.2.3 Acabamento Superficial

A rugosidade média (R_a) foi avaliada na superfície torneada utilizando-se um rugosímetro Mitutoyo SJ 201P. O cut-off (λ_c) utilizado foi o recomendado na norma ASTM 95 (neste caso, 0,8 mm ou 2,5 mm, selecionado com base na rugosidade média observada). A rugosidade foi medida 5 (cinco) vezes em cada amostra.

2.2.4 Avaliação da Força de Usinagem – Torneamento

A força de corte e de avanço foi medida utilizando o dispositivo apresentado nas Figuras 1 e 2, que é um porta-ferramenta instrumentado com extensômetros (dinamômetro) para medição da força de corte e de avanço. Este dinamômetro foi construído por Guimarães ⁽⁹⁾. A aquisição dos dados foi feita utilizando-se um sistema que apresenta uma configuração inicial (taxa de aquisição de 5000 Hz; tempo de aquisição de 3 s; filtro de passa baixa; configuração de dois canais, um para força de corte e outro para força de avanço). O software utilizado foi o Aqdados (software da Lynx Tecnologia Eletrônica). Esse software foi instalado em um microcomputador alocado para o sistema de aquisição e para o dispositivo para medir as forças de corte. O instrumento de medição (porta-ferramenta instrumentado) fica ligado ao sistema de aquisição (placa de aquisição de dados e módulos com filtros e amplificadores - ADS 2000). Para a calibração do porta-ferramenta instrumentado, foi utilizado um dinamômetro em contato com o mesmo. Durante a calibração a relação entre a força e a tensão é inserida no software do sistema de aquisição. Para os ensaios foi utilizado um torno convencional da marca ROMI com potência de 10HP.

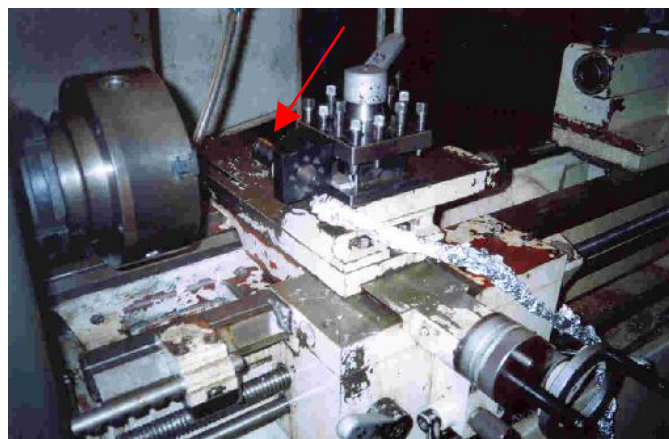


Figura 1. Porta-ferramenta instrumentado indicado pela seta vermelha. Construção do dispositivo realizada por Guimarães ⁽⁹⁾.



Figura 2. Conjunto de equipamentos utilizados nas medidas de força de corte. Dispositivo para medir força de corte (porta-ferramenta instrumentado), sistema de aquisição e microcomputador utilizado nos ensaios de usinagem.

As dimensões dos copos-de-prova foram de aproximadamente 50 mm de diâmetro e 150 mm de comprimento. A ferramenta utilizada foi de metal duro plana do tipo TPNM 160304. Nos ensaios, foram utilizadas ferramentas novas em cada avaliação. Os parâmetros de corte utilizados foram avanço de 0,205 mm/volta e profundidade de corte (a_p) de 1 mm. Foram utilizadas rotações de 1120, 710, 280 e 90 rpm, que resultaram em velocidades de corte de cerca de 180, 110, 50 e 15 m/min, respectivamente.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Caracterização do Material

A caracterização microestrutural do material estudado e as medidas de dureza obtidas são apresentados nas Figura 3 e na Tabela 2, respectivamente. A microestrutura da seção longitudinal da barra de aço ABNT 1045 apresenta um alinhamento devido ao processo de conformação, mas não apresenta diferença de dureza em relação à seção transversal.

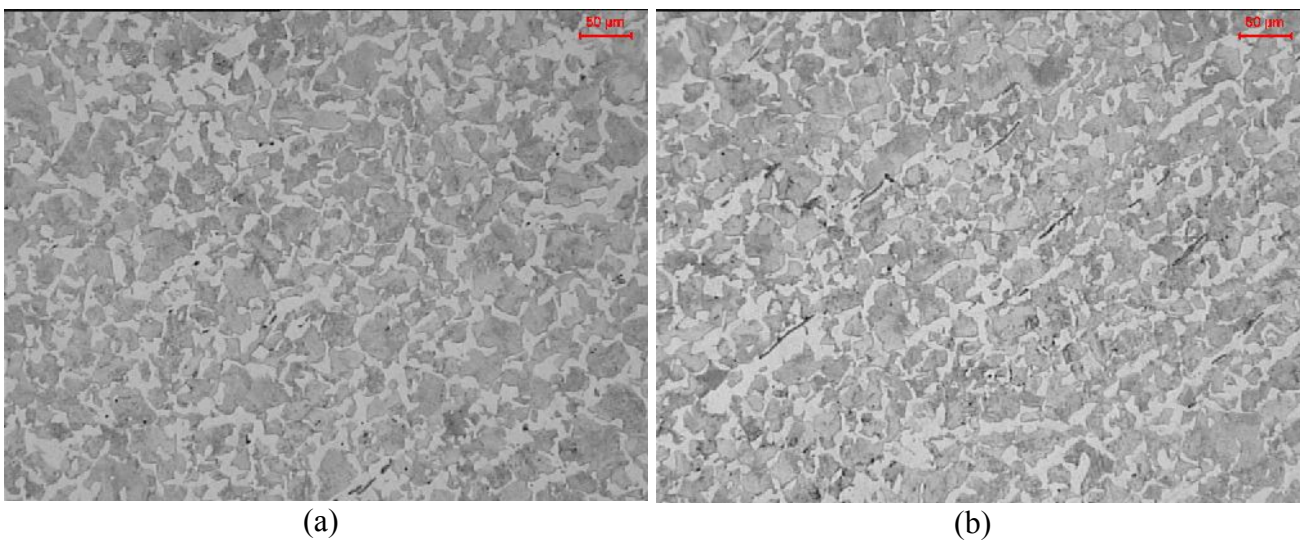


Figura 3. Microestrutura do aço estudado. As regiões mais escuras são constituídas de perlita e as mais claras de ferrita. As regiões alinhadas em preto são sulfeto de manganês. (a) Seção transversal e (b) seção longitudinal da barra.

Tabela 2. Dureza Vickers (HV 30) na seções transversal e longitudinal e seus respectivos desvios.

	Dureza HV 30
Seção Longitudinal	221±4
Seção Transversal	220±5

3.2 Avaliação da Relação Entre as Velocidades de Corte e os Esforços de Usinagem

As Figuras 4 e 5 mostram a relação entre a força de corte (F_c , N) e a força de avanço (F_a , N) com as velocidades de corte (V_c , m/min). Já a Figura 6 mostra o efeito da velocidade de corte na relação F_a/F_c . A Figura 7 mostra como variaram os valores da pressão específica de corte (k_s , N/mm²) com a velocidade de corte (V_c , m/min). k_s é F_c (força de corte) dividido pelo produto do avanço (f , mm/volta) com a profundidade de corte (a_p , mm).

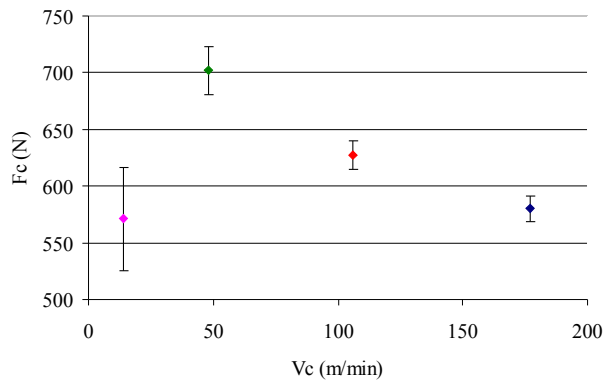


Figura 4. Efeito da velocidade de corte (V_c , m/min) no valor da força de corte (F_c , N).

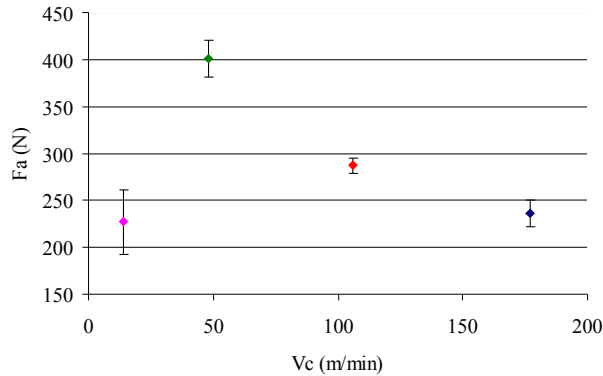


Figura 5. Efeito da velocidade de corte (V_c , m/min) no valor da força de avanço (F_a , N).

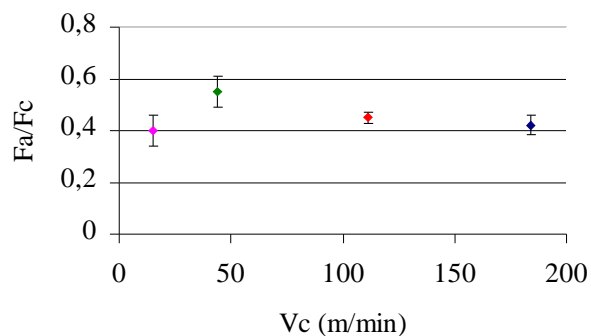


Figura 6. Efeito da velocidade de corte (V_c , m/min) na relação força de avanço sobre força de corte (F_a/F_c).

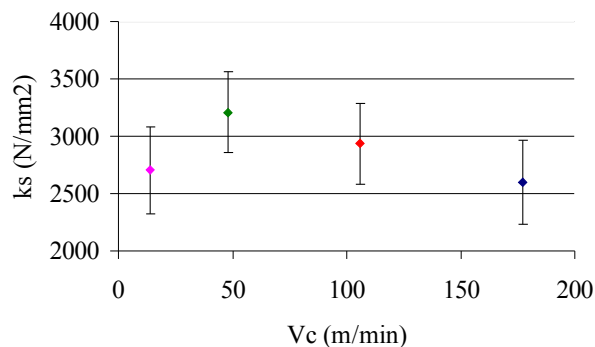


Figura 7. Efeito da velocidade de corte (V_c , m/min) no valor da pressão específica de corte (k_s , N/mm²).

Os resultados apresentados nas Figuras de 4 a 7 mostram que a velocidade de corte de 50 m/min mostrou-se crítica. Na velocidade de corte mais baixa, provavelmente, ocorreu a formação de aresta postiça de forma mais intensa. Nesta velocidade também são observados os maiores desvios nos valores dos esforços. O aumento na velocidade levou primeiramente a um aumento nos esforços, que diminuíram posteriormente, devido ao aumento da temperatura e da deformação do material junto à região do cavaco. Na faixa de velocidade de corte de 50 m/min, observa-se uma nítida mudança de comportamento já observada na literatura ^(4, 5, 15).

Observa-se também, que a força de avanço é mais influenciada pela velocidade de corte do que a força de corte nas condições estudadas. Neste caso, as durezas obtidas foram próximas nas seções longitudinal e transversal da barra não sendo esta a razão para a diferença de comportamento. A explicação para a maior influência da velocidade nas forças de avanço pode estar relacionada com a direcionalidade da microestrutura na seção longitudinal da barra e com a sua maior heterogeneidade.

Os desvios encontrados, calculados utilizando teoria de propagação de erro, foram maiores no caso das forças de corte. Esse efeito já era esperado, pois a força de avanço é cerca de 50% da força de corte.

3.3 Avaliação da Relação entre as Velocidades de Corte e a Rugosidade

A Figura 8 mostra o efeito da velocidade de corte na rugosidade média (R_a). Foram feitas 5 (cinco) medições em cada corpo-de-prova. O valor de rugosidade apresentado é o maior medido em cada um dos corpos-de-prova. É importante ressaltar, que os valores de rugosidade não apresentaram grandes variações entre as medições realizadas.

Observa-se na Figura 8 uma forte correlação entre os valores de R_a e a velocidade de corte nas condições de ensaio realizadas. As outras medidas de rugosidade realizadas, R_p , que é a altura máxima do perfil acima da linha média, e R_t que é a altura máxima do pico ao vale, mostraram o mesmo comportamento que a rugosidade média R_a .

A diminuição na rugosidade está associada ao aumento de temperatura e de deformação do cavaco. Na velocidade mais baixa, provavelmente, ocorreu intensa formação de aresta postiça. Com o aumento da velocidade de corte e da deformação plástica, houve uma diminuição de rugosidade, que tende a um valor em torno de 4 micrometros para as condições de ensaio realizadas.

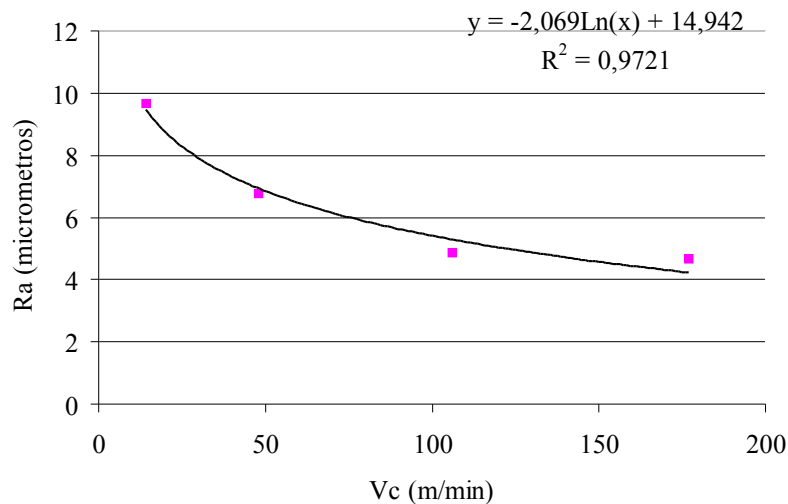
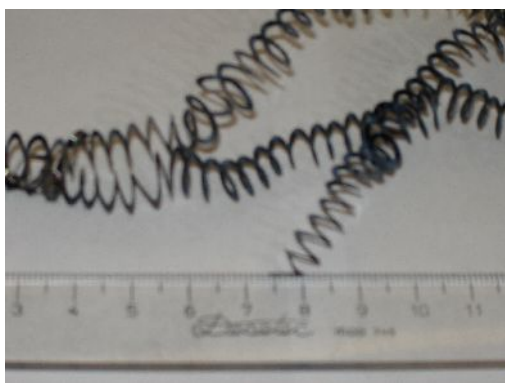


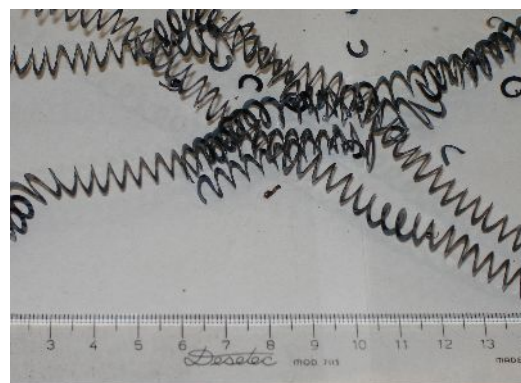
Figura 8. Efeito da velocidade de corte na rugosidade média (Ra) do aço estudado.

3.4 Avaliação da Relação entre as Velocidades de Corte e o Cavaco Formado

As Figuras a seguir apresentam os cavacos formados nas diferentes velocidades de corte. Os cavacos formados nas maiores velocidades de corte apresentaram morfologia e tamanho semelhantes. Os cavacos formados no corte com velocidade de 50 m/min foram menores, mas semelhantes aos anteriores. Já os formados durante o corte com velocidade de 15 m/min apresentaram-se em lascas. Verifica-se neste caso, uma diferença no mecanismo de corte.



(a)



(b)

Figura 9. Cavaco formado com velocidades de corte de 180 e 110 m/min, (a) e (b) respectivamente.



(a)



(b)

Figura 10. Cavaco formado com velocidades de corte de 50 e 15 m/min, (a) e (b) respectivamente.

As Figuras 11 e 12 apresentam micrografias dos cavacos obtidos em cada uma das velocidades de corte. São observadas diferenças mais significativas nos cavacos formados em velocidades de corte mais baixas. O recalque calculado para a velocidade crítica de corte de 50 m/min foi de 2,12, enquanto para as velocidades de 110 e 180 m/min os recalques calculados foram de 2,87 e 3,21, respectivamente. Para a velocidade de 15 m/min o valor encontrado foi de 2,58. A Figura 13 mostra os resultados do valor calculado do recalque com a velocidade de corte. A gráfico mostra comportamento oposto ao observado nas Figuras anteriores. É importante notar, que as condições de corte estão próximas ao estado plano de deformação, não havendo influência do estado de tensão e sim apenas do material e de suas características microestruturais ou propriedades mecânicas. Quanto maior o esforço de corte, menor foi a deformação do material. O recalque é dado pela relação entre a espessura do cavaco medida dividida pelo avanço utilizado. Foram medidas 5 espessuras de cavacos. Foi feita, então, uma média para serem obtidos os valores de recalque apresentados.

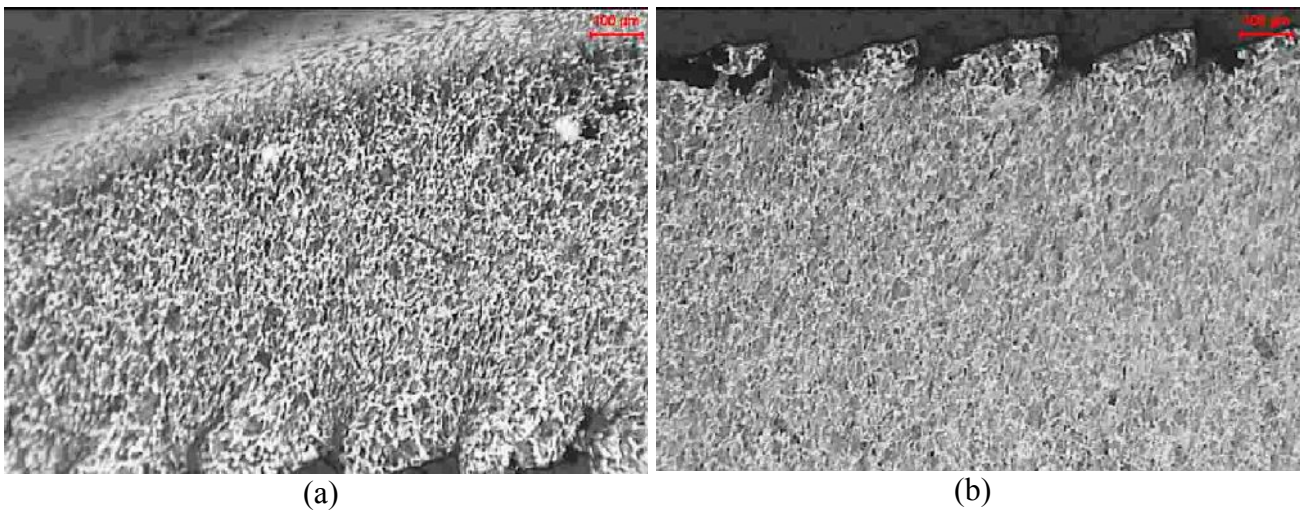


Figura 11. Micrografia do cavaco obtido durante o ensaio com velocidades de corte de 180 e 110 m/min, (a) e (b) respectivamente.

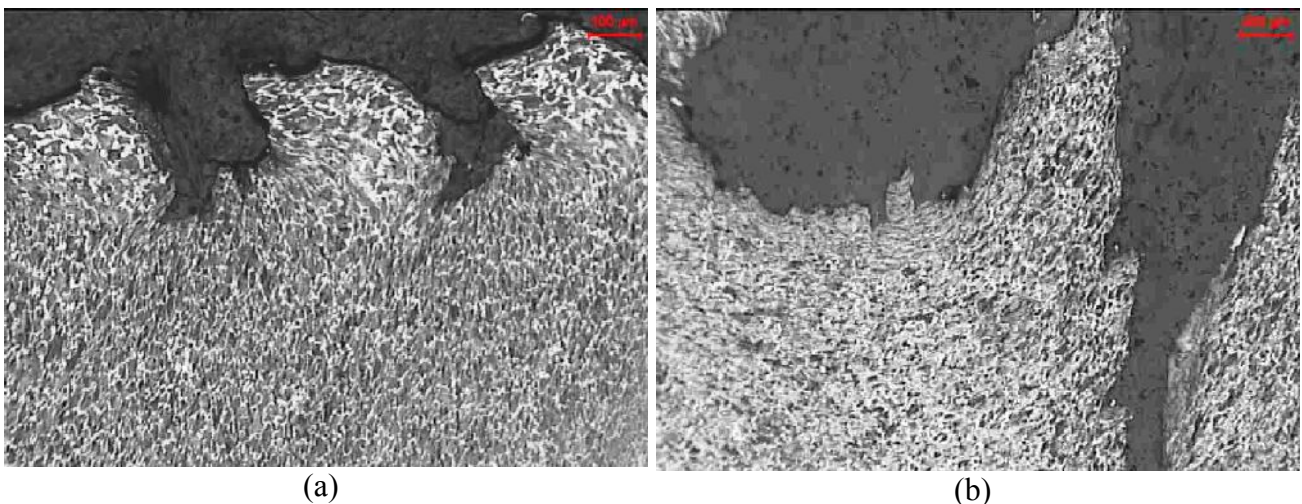


Figura 12. Micrografia do cavaco obtido durante o ensaio com velocidades de corte de 50 e 15 m/min, (a) e (b) respectivamente.

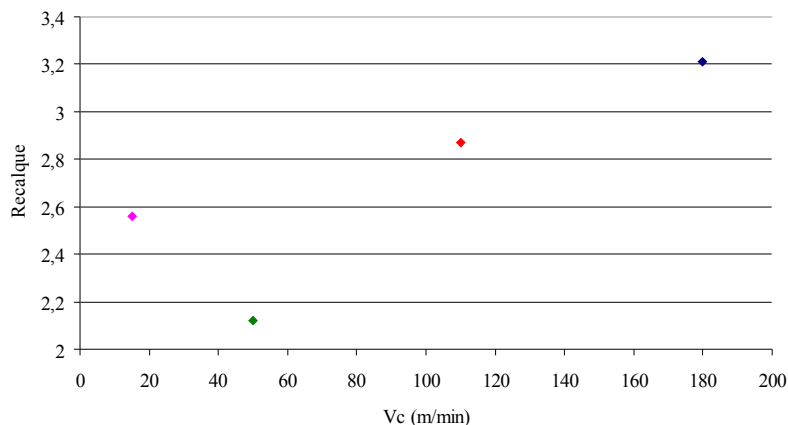


Figura 13. Relação entre o recalque e as velocidades de corte.

4. CONCLUSÕES

As observações feitas neste trabalho permitiram chegar às seguintes conclusões:

1. A força de avanço é mais influenciada pela velocidade de corte do que a força de corte, sendo que para as condições estudadas.
2. A velocidade de 50m/min mostrou-se crítica em termos de esforços, havendo mudança de comportamento do material. Essa mudança deve estar relacionada com a diminuição na formação de aresta postiça, aumento de temperatura e deformação do cavaco.
3. A rugosidade média Ra tem uma forte dependência com a velocidade de corte nas condições estudadas.
4. O cavaco tem seu tamanho e morfologia influenciados pelas velocidades de corte. Quanto maior o esforço de corte, menor foi a deformação do material dada pelo recalque nas velocidades de corte de 50, 110 e 180 m/min.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq pela bolsa de iniciação científica PIBIC/CNPq do autor Diego Carreras Bezerra e à Aços Villares, CONSTRUMEC Villares-FINEP processo 01.04.0807.00 pelo apoio financeiro. Os autores também agradecem ao Sr. Jovinilo Oliveira Santos e ao Sr. Francisco Faustino dos Reis pelo apoio técnico que possibilitou a realização deste trabalho.

6. REFERÊNCIAS

1. METALS HANDBOOK - **Machining**. USA: ASM. v.16. 1989
2. DIMLA E. DINLA Sr.; LISTER, P.M. On-line metal cutting tool condition monitoring. I: Force and vibration analysis. **International Journal of Machine Tools & Manufacturing**. v. 40, p. 739-768, 2000.
3. Dimla E. Dinla Sr., Sensor signals for tool-wear monitoring in metal cutting operations – a review of methods. *International Journal of Machine Tools & Manufacturing*. v. 40, p. 1073-1098, 2000.
4. SHAW, M. C. **Metal Cutting Principles**. Great Britain: Clarendon Press. 1984. 651p.
5. FERRARESI, D. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**. São Paulo: Edgard Blücher Ltda. 1977. 751p.
6. KATAYAMA, S.; HASHIMURA, M. Effect of carbon phosphorus and nitrogen contents in steel on machined surface cutting. **ISIJ International**. v. 30. p. 457-563, 1990.

7. KOVAC, P., SIDJANIN, L. Investigation of chip formation during milling. **International Journal of Production Economics**. v. 51, p. 149-153, 1997.
8. **Catálogo de Dinamômetros Piezoelétricos** – Kiestler AG. Suíça. 2002.
9. GUIMARÃES, A.R. **Sistema para a medição das componentes da força de usinagem em operações de torneamento**. Trabalho de Formatura. 2000. Departamento de Engenharia Mecânica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 2000. 96f.
10. ABOUELATTA, O. B.; MÁLD, J. Surface roughness prediction based on cutting parameters and tool vibrations in turning operations. **Journal of Materials Processing Technology**. v. 118, p. 269-277, 2001.
11. HAMID, A. A.; ALI, Y. Experimental determination of dynamic forces during transient orthogonal turning. **Journal of Materials Processing Technology**. v. 55, p. 162-170, 1995.
12. LIN, W. S.; LEE, B. Y.; WU, C. L. Modeling the surface roughness and cutting force for turning. **Journal of Materials Processing Technology**. v. 108, p. 286-293, 2001.
13. STRAFFORD, K. N. Indirect monitoring of machinability in carbon steels by measurement of cutting forces. **Journal of Materials Processing Technology**. v. 67. p. 150-156, 1997.
14. ASTAKHOV, V. P. A treatise on material characterization in the metal cutting process. Part 2: Cutting as the fracture of workpiece material. **Journal of Materials Processing Technology**. v. 96. pp. 34-41, 1999.
15. DINIZ, A. E.; Marcondes, F. C.; Coppini, N. L. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**. 2ª ed. São Paulo: Editora Artliber. 2000. 244p.
16. GRZESIK, W. A revised model for predicting surface roughness in turning. **Wear**. v. 194. p. 143-148. 1996.

EFFECT OF CUTTING SPEED ON THE CUTTING FORCES AND SURFACE FINISHING OF AN ABNT 1045 STEEL

Diego Carreras Bezerra

Escola Politécnica da USP, Av. Prof. Mello Moraes, 2231
05508-970 São Paulo S.P.
diego.carreras@poli.usp.br

Izabel Fernanda Machado

Escola Politécnica da USP, Av. Prof. Mello Moraes, 2231
05508-970 São Paulo S.P.
machadoi@usp.br

Abstract. *The machinability of a metallic material is related to its chemical composition, microstructure, strength and cutting parameters, such as: feed and cutting speed. Three main points characterize the machinability: tools wear, finishing and cutting forces. The main objective of this work is to evaluate the effect of the cutting speed on the cutting forces and surface finishing of an ABNT 1045 steel. Steel samples were machined and the cutting forces were measured by using a toolholder equipped with a load cell. Roughness was also measured on the machined surface. The results made it possible to establish a relationship between the cutting speed and the roughness (Ra). The critical value of cutting speed found was 50 m/min. The built up edge formation decreased and the chip formation and roughness seemed to change at this cutting speed. An increase in chip deformation was also observed.*

Keywords: *cutting force, steel, surface finishing, roughness and cutting speed.*