

INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL DA FORÇA DE USINAGEM NO TORNEAMENTO CILINDRICO DE ALGUNS MATERIAIS METÁLICOS

José Aécio Gomes de Sousa, aeciosousa@yahoo.com.br¹
Rodrigo Nogueira Cardoso, rodrignog@hotmail.com¹
Heitor Cunha Carvalho, heitorcarvalho@yahoo.com.br¹
Álison Rocha Machado, alisonm@mecanica.ufu.br¹

¹ Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Mecânica, Av. João Naves de Ávila, 2121, Uberlândia, MG 38.400-089, Brasil.

Resumo: As forças de usinagem exercida pela máquina-ferramenta durante a operação de remoção de material expressa o grau de usinabilidade dos materiais, por isso, um melhor entendimento do comportamento dessas forças poderá facilitar na seleção do material que possui a combinação correta de características para uma aplicação específica. Neste trabalho foi feito uma análise do comportamento das componentes da força de usinagem em quatro materiais distintos (Alumínio, Ferro Fundido, Aço ABNT 1020 e Aço ABNT 1050). Testes de torneamento contínuo foram conduzidos utilizando ferramentas de corte de metal duro P25 sem revestimentos e revestida com TiN. Foram avaliados a influência da velocidade de corte, do avanço, da profundidade de corte e do fluido de corte sobre a força de usinagem. Um dinamômetro Kistler® 9265B, devidamente calibrado, foi utilizado para a verificação das componentes da força de usinagem.

Palavras-chave: Força de Usinagem, Usinabilidade, Torneamento Contínuo, Condições de Corte

1. INTRODUÇÃO

Uma das linhas de pesquisas desenvolvidas no Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem (LEPU) da Universidade Federal de Uberlândia (UFU) é a análise do comportamento das forças em materiais diversos durante o processo de usinagem. Alguns parâmetros de usinagem, como a velocidade de corte, o avanço e a profundidade, podem influenciar no comportamento da força de usinagem, além da presença de fluido de corte e do revestimento na ferramenta.

O conhecimento do comportamento e da ordem de grandeza dos esforços de corte (ou força de usinagem) nos processos de usinagem é de fundamental importância para determinar a potência requerida para usinar um material (MARCONDES et al., 2003). Durante a usinagem, a peça exerce uma força sobre a ferramenta que é chamada de força de usinagem. A princípio não se tem o conhecimento da direção e nem do sentido desta força, tornando-se difícil medi-la. A melhor forma de trabalhar com a força de usinagem é trabalhar com suas componentes segundo diversas direções conhecidas. A decomposição da força de usinagem é efetuada de acordo com a norma DIN 6584. Note, através da Figura 1, que a força de usinagem (F) é decomposta em três componentes: Força de Corte (F_c), Força de Avanço (F_f) e Força Passiva (F_p).

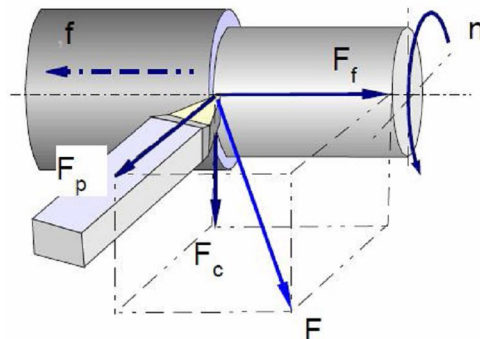


Figura 1 – Decomposição da Força de Usinagem (STOETERAU, 2007).

O alumínio apresenta grande variedade de aplicações na indústria automotiva, aeronáutica e construção civil. O baixo peso específico e a boa resistência à corrosão, além de sua excelente usinabilidade são propriedades que fazem parte deste material. A adição de elementos de liga ou o trabalho a frio são formas de aumentar a resistência do alumínio.

O aço é a liga ferro-carbono contendo geralmente 0,008% até aproximadamente 2,11% de carbono, além de certos elementos residuais, resultantes dos processos de fabricação (CHIAVERINI, 2002). Os aços são os materiais metálicos mais empregados na indústria mundial. Neste experimento foram utilizados os aços ABNT 1020 e ABNT 1050, por serem, ambos, amplamente utilizados nas indústrias brasileiras.

Ferro Fundido é a liga ferro-carbono-silício de teores de carbono acima de 2,11%, em quantidade superior à que é retida em solução sólida na austenita, de modo a resultar carbono parcialmente livre, na forma de veios ou lamelas de grafita (CHIAVERINI, 2002). O ferro fundido cinzento é o material que possui melhor característica de usinabilidade dentro do grupo dos ferros fundidos. O ferro fundido cinzento é de fundamental importância para a indústria devido a sua excelente resistência ao desgaste e à compressão, além da sua boa capacidade de absorver vibração.

O objetivo do trabalho é investigar o comportamento da força de usinagem no torneamento cilíndrico com a variação da velocidade de corte, do avanço e da profundidade. Também foi investigado a influência do fluido de corte e do revestimento de TiN (Nitreto de Titânio) nas pastilhas de metal duro P25 durante o torneamento.

2. MÉTODO EXPERIMENTAL

Foram escolhidos quatro materiais distintos para análises das forças: Alumínio Puro, Ferro Fundido, Aço ABNT 1020 e o ABNT 1050. Antes de iniciar os testes de usinagem, os materiais foram submetidos a ensaio de dureza. Os resultados obtidos estão disponíveis na Tabela 1.

Tabela. 1 - Dureza dos Materiais Utilizados nos Experimentos.

Dureza Brinell 62,5 kg		Dureza Brinell 187,5 kg		Dureza Brinell 187,5 kg		Dureza Brinell 187,5 kg	
Ensaio	Alumínio	Ensaio	FoFo	Ensaio	Aço 1020	Ensaio	Aço 1050
1	112	1	167	1	180	1	219
2	110	2	162	2	180	2	219
3	110	3	167,2	3	180	3	215
4	112	4	166,2	4	180	4	219
5	112	5	167,3	5	180	5	219
Média	111,2	Média	165,94	Média	180	Média	218,2
D.P.	1,1	D.P.	2,2	D.P.	0	D.P.	1,8

A Figura 2 mostra o torno mecânico IMOR MAX II 520 utilizado durante os ensaios de usinagem e o detalhe do suporte usado no torneamento.

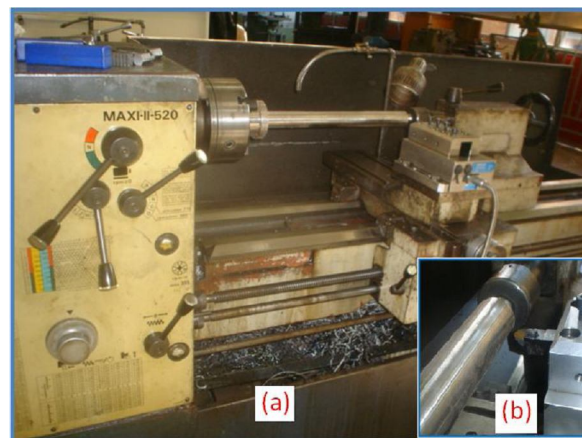


Figura 2 – (a) Torno Mecânico IMOR MAX II 520 e (b) Detalhe do Suporte.

Todos os experimentos foram submetidos a 1 teste com mais 2 repetições. Os valores referentes à rotação, ao avanço e à profundidade usados nos experimentos estão dispostos na Tabela 2.

Tabela 2 - Parâmetros Utilizados na Usinagem.

Rotação (rpm)	28; 56; 90; 112; 140; 180; 224; 280; 355; 450; 560; 710 e 900
Avanço (mm/volta)	0,138; 0,176; 0,204; 0,242 e 0,298
Profundidade de Corte (mm)	0,25; 0,5; 1; 1,5; 2; 2,5 e 3

Um dinamômetro Kistler® 9265B foi utilizado para medição das forças de usinagem. Este equipamento foi montado sobre o carro transversal (o carro porta-ferramenta foi substituído pelo dinamômetro) e o dispositivo de fixação da guia foi montado sobre o mesmo. Antes de iniciar os experimentos, foram realizados testes para verificar sua calibração.

Foi utilizado um óleo à base vegetal 'Vasco 1000' nos ensaios com fluido de corte (condição jorro) na concentração de 6%. Um refratômetro 'Hand Refractometer Atago' foi utilizado para o controle da concentração.

As ferramentas utilizadas na usinagem foram pastilhas de metal duro SPUN 120308 P25 sem revestimento e revestida de TiN. O suporte utilizado tem especificação CSBPR 2020 K12 (Sandvik). Para a fixação do suporte no dinamômetro Kistler® 9265B foi utilizado um torque de 75 N.m para o aperto dos parafusos. O aperto dos parafusos foi feito de acordo com o manual do dinamômetro Kistler® 9265B. Após a montagem da ferramenta no suporte a seguinte geometria era produzida: $\gamma_o = 6^\circ$; $\alpha_o = 5^\circ$; $\chi_r = 75^\circ$; $\chi'_r = 15^\circ$ e $\lambda = 4^\circ$.

Um tacômetro digital 'DT-2236 Luttron' foi utilizado para verificar se a rotação indicada na tabela do torno estava de acordo com a rotação da placa porta-castanhas. Também foi utilizado um relógio comparador de resolução de 0,001 mm para verificar se o avanço indicado na tabela do torno estava de acordo com o avanço do carro-principal.

O desgaste de flanco foi monitorado e toda vez que VBB (desgaste de flanco médio) ultrapassava o valor de 0,1 mm a aresta de corte era substituída por uma nova.

O monitoramento do desgaste foi feito por meio de um estéreo microscópio 'SZ6145TR – OLYMPUS' com auxílio do software de captura de imagens 'Image Pro-Express'.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Alumínio

Apresentam-se agora os resultados obtidos no torneamento do alumínio. A Figura 3 mostra o estudo da variação das componentes da força de usinagem em função da velocidade de corte. Note que há uma diminuição nas forças com o aumento a velocidade de corte. Esse comportamento é devido o aumento da velocidade de corte promover o aumento da temperatura de usinagem, tornando, dessa forma, o material mais dúctil e menos resistente ao cisalhamento promovido durante o processo de usinagem.

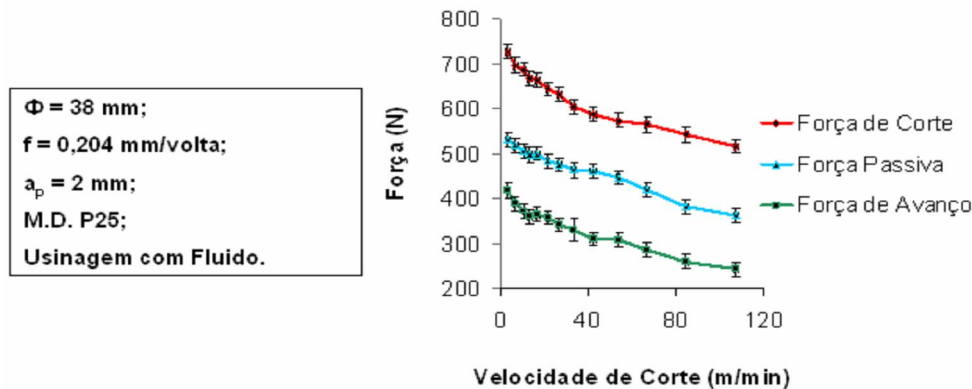


Figura 3 – Força versus Velocidade de Corte.

A Figura 4 mostra a influência do fluido de corte no gráfico da força de corte versus velocidade de corte. Note que há uma redução significativa na força quando se utiliza fluido de corte durante a usinagem. Segundo Machado et al. (2009), a redução da força de corte é devido à presença do fluido de corte reduzir a área de contato na interface cavaco-ferramenta, reduzindo, dessa forma, a zona de aderência na superfície de saída do cavaco.

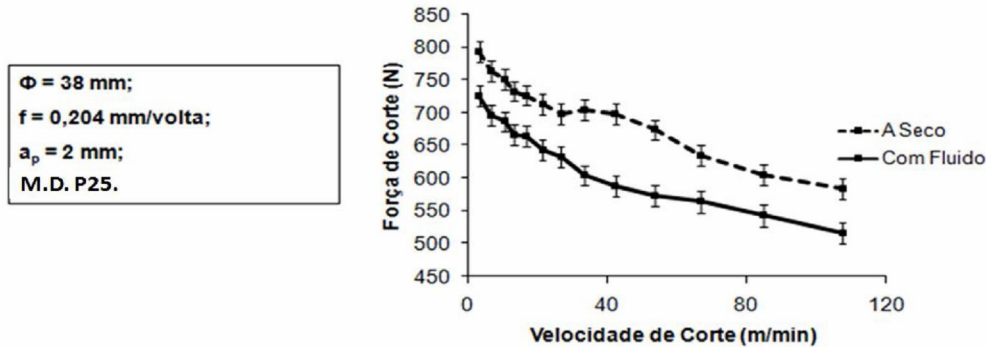


Figura 4 – Força de Corte em Função da Velocidade de Corte.

A Figura 5 mostra a influencia do revestimento no gráfico da força de corte versus velocidade de corte. Note que há uma diminuição da força quando se utiliza a pastilha revestida. Trent e Wright (2000) afirmam que a redução da força de corte é devido o revestimento atuar de forma a reduzir a adesividade do cavaco com a ferramenta, diminuindo, dessa forma, a área de contato cavaco-ferramenta.

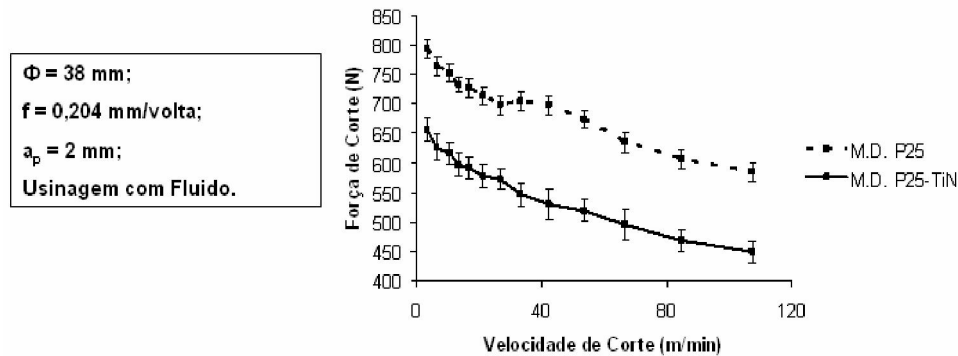


Figura 5 – Força de Corte versus Velocidade de Corte.

A Figura 6 mostra o estudo da variação das componentes da força de usinagem em função do avanço de corte. Note que há um aumento quase que linear das forças. Esse comportamento é devido o aumento do avanço ter como consequência um aumento da área dos planos de cisalhamento primário e secundário, o que necessitará de uma maior força para “cisalhar” o material.

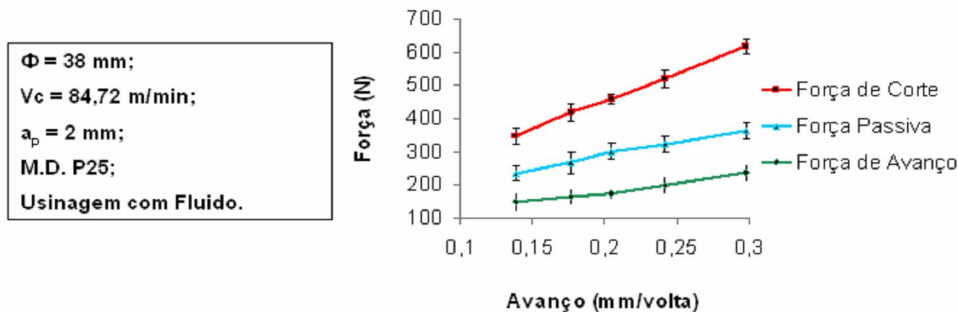


Figura 6 – Força versus Avanço.

A Figura 7 mostra o estudo da variação das componentes da força de usinagem em função da profundidade de corte. Note que há um aumento progressivo das forças com o acréscimo da profundidade. Esse comportamento é devido o aumento na profundidade ter como consequência um aumento da área dos planos de cisalhamento primário e secundário, assim como o avanço, necessitará de uma maior força para “cisalhar” o material.

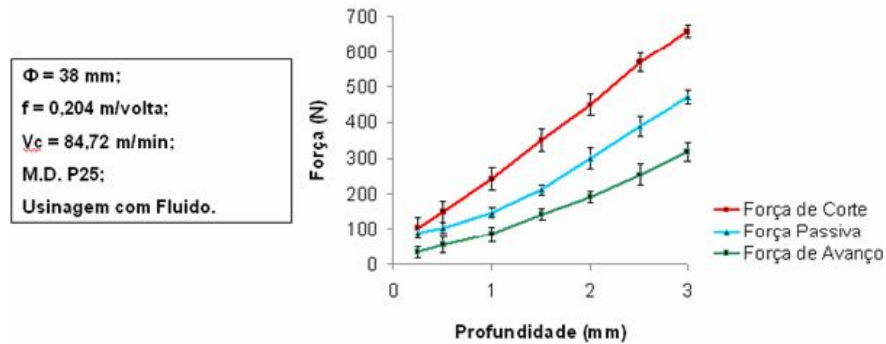


Figura 7 - Força versus Profundidade.

3.2. Aços

As Figuras 8 e 9 mostram o estudo da variação das componentes da força de usinagem em função da velocidade de corte para o aço ABNT 1020 e para o aço ABNT 1050, respectivamente. Note que, diferente dos materiais monofásicos (não apresenta APC - Aresta Postiça de Corte), o aço ABNT 1020 e o aço ABNT 1050 apresentam intervalo de velocidade de corte onde há presença da APC. Segundo Machado et al. (2009), esse comportamento das forças é devido à instabilidade do sistema cavaco-ferramenta-peça provocado pelo aparecimento e desaparecimento da aresta postiça de corte (APC). Quando a APC se faz presente, esta tende a reduzir as forças de usinagem, pois, reduz o comprimento de contato com o cavaco e aumenta o ângulo de saída efetivo. As condições de corte de força mínima nos gráficos representam maiores dimensões da APC (ALGARTE et. Al., 1995). Quando a APC desaparece por completo, o aço ABNT 1020 e o aço ABNT 1050 se comportam como materiais monofásicos, dessa forma, o acréscimo da velocidade de corte tornam os materiais mais dúcteis, provocando, assim, uma redução na resistência ao cisalhamento dos materiais.

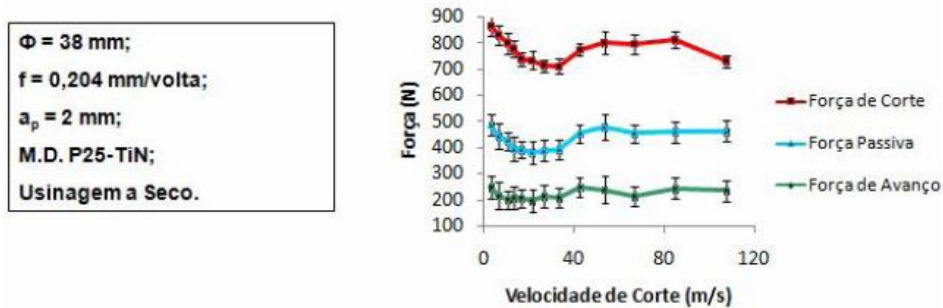


Figura 8 – Força versus Velocidade de Corte (ABNT 1020).

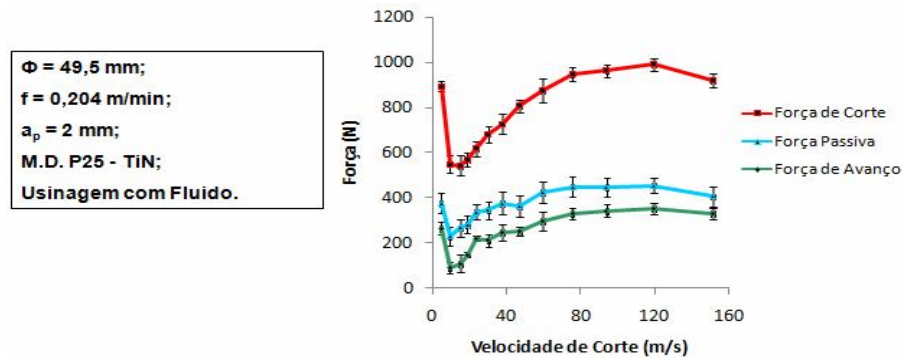


Figura 9 – Força versus Velocidade de Corte (ABNT 1050).

As Figuras 10 e 11 mostram a influência do fluido de corte no gráfico da força de corte versus velocidade de corte para o aço ABNT 1020 e para o aço ABNT 1050, respectivamente, note que há uma redução significativa na força quando se utiliza fluido de corte durante a usinagem (esse comportamento também ocorreu no alumínio puro – Figura 4). Segundo Machado et al. (2009), a redução da força de corte é devido o fluido de corte reduzir a área de contato na interface cavaco-ferramenta, diminuindo, dessa forma, a zona de aderência na superfície de saída do cavaco.

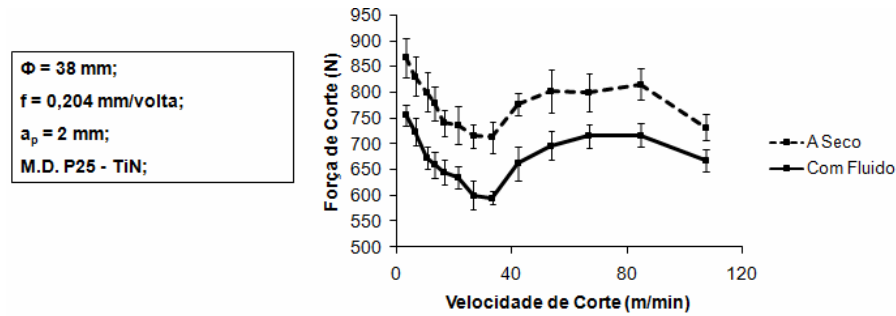


Figura 10 – Força de Corte versus Velocidade de Corte (ABNT 1020).

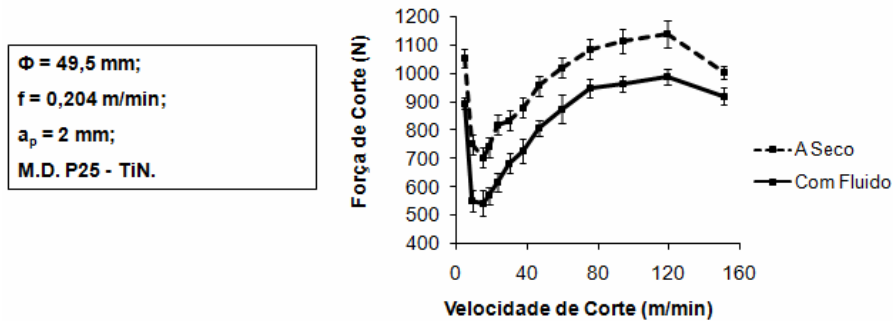


Figura 11 – Força de Corte versus Velocidade de Corte (ABNT 1050).

As Figuras 12 e 13 mostram a influência do revestimento no gráfico da força de corte versus velocidade de corte para o aço ABNT 1020 e para o aço ABNT 1050, respectivamente.. Note que há uma diminuição da força quando se utiliza a pastilha revestida (esse comportamento também ocorreu no alumínio puro – Fig. 3). Trent e Wright (2000) afirmam que a redução da força de corte é devido o revestimento atuar de forma a reduzir a adesividade do cavaco com a ferramenta, diminuindo, dessa forma, a área de contato cavaco-ferramenta.

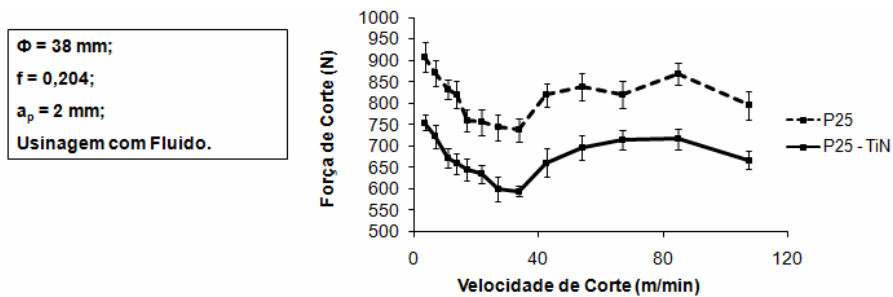


Figura 12 – Força de Corte versus Velocidade de Corte (ABNT 1020).

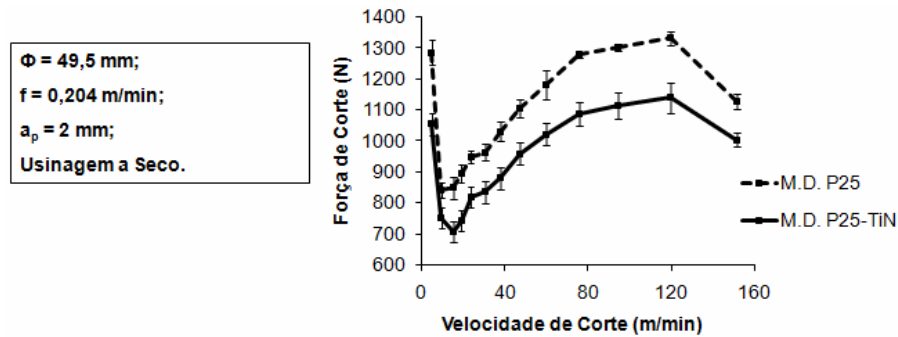


Figura 13 – Força de Corte versus Velocidade de Corte (ABNT 1050).

Observa-se que tanto o fluido de corte quanto o revestimento da ferramenta vão eliminar a APC. Entretanto, ambos alteram suas dimensões e possivelmente as velocidades críticas, onde a APC desaparece.

3.3. Ferro Fundido

Apresentam-se agora os resultados obtidos no torneamento do ferro fundido cinzento. A Figura 14 mostra o estudo da variação das componentes da força de usinagem em função da velocidade de corte. Note que, diferente dos materiais vistos anteriormente, o ferro fundido cinzento apresenta força de avanço maior que a força de corte. Segundo Trent e Wright (2000), esse comportamento é devido a menor deformação plástica no plano primário do que no plano secundário de cisalhamento. Note também que a APC persiste mesmo a altas velocidades de corte (superiores a 100 m/min). Trent e Wright (2000), afirmam que esse intervalo relativamente grande de surgimento da APC é devido o ferro fundido cinzento apresentar cavacos descontínuos, tornando a APC mais estável.

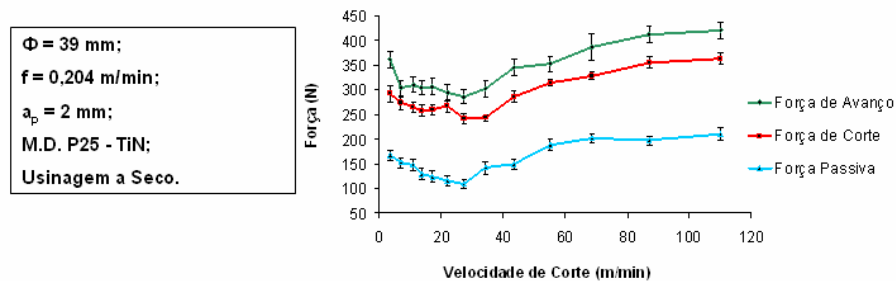


Figura 14 – Comparação entre Força versus Velocidade de Corte.

A Figura 15 mostra a influência do revestimento no gráfico da força de corte versus velocidade de corte para o ferro fundido cinzento. Note que há uma diminuição da força quando se utiliza a pastilha revestida (esse comportamento também ocorreu no alumínio puro, no aço ABNT 1020 e no aço ABNT 1050).

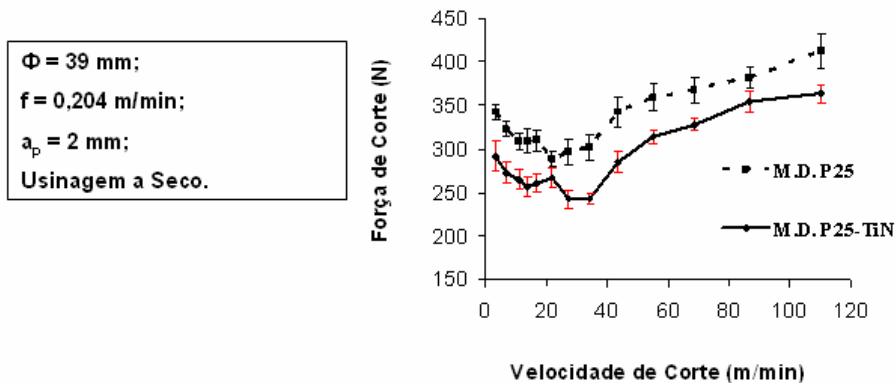


Figura 15 – Força de Corte versus Velocidade de Corte.

A Figura 16 mostra o estudo da variação da velocidade de corte sobre a força de avanço para os materiais analisados anteriormente. Note que há diferenças entre os valores de força de corte para cada material. Pode-se concluir, em relação aos valores de força de corte apresentados na Figura 16, que o ferro fundido possui melhor usinabilidade dentre os demais.

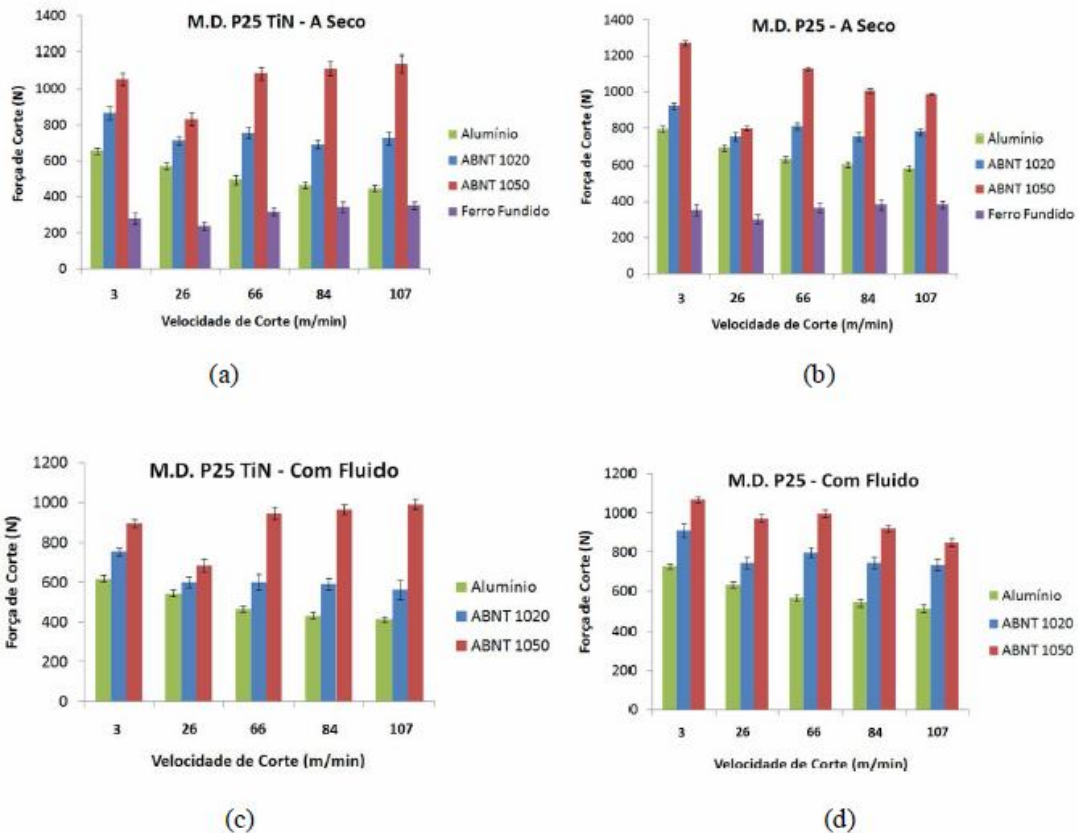


Figura 15 – Força de Corte versus Velocidade de Corte.

A Tabela 3 mostra o percentual de redução da força de corte quando se passou da usinagem a seco para a usinagem com fluido de corte, e, também, quando se passou da ferramenta sem revestimento para a ferramenta revestida.

Tabela 3 – Percentual de Redução da Força de Corte.

Material	A Seco → Com Fluido	Sem Revestimento → Com Revestimento
Alumínio	12,32%	18,96%
Aço ABNT 1020	16,88%	14,22%
Aço ABNT 1050	17,71%	13,65%
Ferro Fundido	-	17,63%

4. CONCLUSÕES

O presente trabalho realizou um estudo do comportamento das forças de usinagem em quatro materiais distintos (Alumínio Puro, Ferro Fundido, Aço ABNT 1020 e Aço ABNT 1050). Foram avaliados a influência da velocidade de corte, do avanço e da profundidade de corte sobre as forças de usinagem. Neste trabalho, também foi avaliado, a influência do revestimento TiN nas pastilhas de metal duro P25 assim como as condições de usinagem (usinagem a seco e usinagem com fluido de corte).

Os resultados mostraram que a presença do revestimento de TiN agiu de modo a reduzir a adesividade do cavaco com a ferramenta fazendo com que os valores da força de corte sofressem uma redução. O fluido de corte, assim como o revestimento de TiN, foi eficaz na redução das forças de corte, atuando de forma a reduzir a área de contato na interface cavaco-ferramenta e fazendo com que o cavaco escoasse com mais facilidade. A presença da aresta postíça de

corte nos materiais bifásicos (aço ABNT 1020, aço ABNT 1020 e no ferro fundido), alterou comportamento da curva força de corte em função da velocidade de corte em relação à curva do alumínio puro (material monofásico).

5. AGRADECIMENTOS

Às instituições FAPEMIG, CNPQ e CAPES pelo apoio financeiro para a realização deste trabalho.

6. REFERÊNCIAS

- Algarte, R. D., Da Silva, M. B., Machado, A. R. "Morfologia da APC no torneamento do aço ABNT 1020", Anais do XXIII COBEM, Belo Horizonte, Dezembro, 1995.
- Chiaverini, V., "Aços e Ferros Fundidos". ABM, 7ª Edição, 2002.
- Machado, A.R.; e Da Silva, M.B. ; Coelho, R. T; Abrão, A. M.- "Teoria da Usinagem dos Materiais" 1ª ed. São Paulo: Editora Blucher, 2009.
- Marcondes, F.C., Diniz, A.E., Coppini, N.L., "Tecnologia da Usinagem dos Metais", 4ªed., Editora Artliber, São Paulo, 2003.
- Stoeterau, R. L. "Processos de Usinagem". Disponível em: (<http://www.lmp.ufsc.br/disciplinas/emc5240/Aula-10-U-2007-1-Forcas.pdf>). - acessado em 14 de setembro de 2009.
- Trent, E.M.; Wright, P. K., "Metal Cutting", 2ª ed., Butterworth-Heinemann, Woburn, USA, 2000.

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE MACHINING FORCE DURING CYLINDRICAL TURNING OF SEVERAL METAL MATERIALS.

José Aécio Gomes de Sousa, aeciosousa@yahoo.com.br¹
Rodrigo Nogueira Cardoso, rodrignog@hotmail.com¹
Heitor Cunha Carvalho, heitorcarvalho@yahoo.com.br¹
Álison Rocha Machado, alisonm@mecanica.ufu.br¹

¹ Faculty of Mechanical Engineering, Federal University of Uberlandia, Av. Joao Naves de Avila, 2121, Uberlandia, MG 38.400-089, Brazil

Resumo: *The machining forces acting during the removal operation express the machinability of materials, therefore a better understanding of the behavior of this forces could facilitate the selection of a material for a specific application. This paper presents an analysis of the behavior of the components of machining force in four different materials (Pure Aluminum, Cast Iron, 1020 Steel and 1050 Steel). Continuous turning tests were carried out using P25 cemented carbide tools without coating and coated with TiN. The influence of the cutting speed, feed rate, depth of cut and cutting fluid on the machining forces was evaluated the influence of the cutting fluid on the cutting forces.*

Keywords: *Machining Forces, Machinability, Continuous Turning, Cutting Conditions.*