

ESTUDO DO ATRITO NO CONTATO FERRAMENTA- CAVACO*

Luísa de Amorim Makhoul Gomes¹
Adriane Lopes Mougo²

Resumo

O atrito ocasionado pelo contato cavaco-ferramenta pode ser determinante para o aumento das forças de corte durante o processo de usinagem. Caso este atrito seja significativo, o movimento do cavaco sobre a superfície de saída da ferramenta pode acelerar o desgaste de cratera e diminuir a vida útil da ferramenta de corte. Deste modo, o objetivo deste trabalho é estudar o atrito na zona de cisalhamento secundária pela medição das forças de corte durante o processo de torneamento dos aços inoxidáveis UNS S 32760, AISI 316 e AISI 410 e utilizar posteriormente estas forças no modelo de Merchant para determinar e comparar o coeficiente de atrito destes três materiais. Os parâmetros variáveis são o avanço da ferramenta e a velocidade de corte. A profundidade de corte foi mantida constante e não foi utilizado fluido de corte.

Palavras-chave: Torneamento; Aços inoxidáveis; Força de corte; Atrito

STUDY OF THE FRICTION IN THE CHIP-TOOL CONTACT

Abstract

The friction that happens through the chip-tool contact can be determinant for the increase of the cutting forces during the machining process. If this friction is significant, the movement of the chip on the output surface of the tool can accelerate crater wear and this reduce the life tool. Thus, the aim of this research paper is to study the friction in the second shear zone by measuring the cutting forces during the turning process of the stainless steels UNS S 32760, AISI 316 and AISI 410 and after using these forces in the Merchant model to determine and compare the coefficient of friction of these three materials. The variable parameters are the feed rate of the tool and the cutting speed. The depth of cut was kept constant and during this process, no cutting fluid was used.

Keywords: Turning; Stainless steel; Cutting Force; Friction Model.

¹ Estudante, Graduação, Bolsista de Iniciação Tecnológica, Departamento de Engenharia Mecânica, Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, Campus Nova Iguaçu, Rio de Janeiro, Brasil.

² Professora, Doutora, Departamento de Engenharia Mecânica, Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, Campus Nova Iguaçu, Rio de Janeiro, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

Usinagem é um processo de fabricação mecânica onde uma certa quantidade de material denominada de cavaco é removida com o auxílio de uma ferramenta de corte afiada, podendo esta ser mono ou multi cortante. O produto deste processo é uma peça que deve seguir as geometrias, dimensões e qualidades superficiais especificadas em projeto (6).

O processo de corte se dá inicialmente pelo recalque de uma pequena porção de material ainda ligada à peça na superfície de saída da ferramenta. A partir deste recalque o material sofre aumento progressivo da deformação plástica até que as tensões de cisalhamento se tornem suficientemente grandes para iniciar o deslizamento do material em uma zona de cisalhamento primária (ZCP). Para facilitar a compreensão do processo esta região é aproximada de um plano chamado de plano de cisalhamento primário. Com o avanço da ferramenta formam-se os cavacos que deslizam sobre a superfície de saída, formando a zona de cisalhamento secundária (ZCS) (3).

Apesar do processo de corte ser relativamente simples, é necessário ter consciência que seu processo é influenciado por complexos fenômenos que podem ser explicados pela metalurgia, tribologia plasticidade, elasticidade, transferência de calor e lubrificação (2). Assim, para a compreensão de diferentes grandezas relacionadas com a mecânica do corte de materiais metálicos é necessário um estudo cuidadoso sobre os mecanismos de formação do cavaco. Esta formação envolve fenômenos como a taxa de deformação do material ao passar pela ZCP e o atrito entre o cavaco e a superfície de saída da ferramenta de corte na ZCS. (1, 4)

No primeiro caso tem-se a deformação plástica do material à frente da aresta de corte que pode encruar a superfície usinada e formar cavacos mais duros, reduzindo a vida útil da ferramenta de corte. No segundo caso, tema deste trabalho, o coeficiente de atrito é de difícil previsão devido à falta de domínio sobre os fatores que influenciam na variação do comprimento de contato cavaco-ferramenta e, dentro deste comprimento, quanto de área efetiva do cavaco estaria exercendo pressão sobre a superfície de saída da ferramenta. Esta área efetiva depende das irregularidades microscópicas das superfícies. O atrito pode ser previsto pelo modelo de Merchant a partir das forças normal e tangencial à ZCS.

A obtenção das forças no corte ortogonal a partir de dados unicamente experimentais é bastante custosa e demorada, pois esta depende de inúmeras variáveis como as propriedades do material, os parâmetros de corte, as condições de contato cavaco-ferramenta (coeficiente de atrito), o material da ferramenta e a rigidez da máquina-ferramenta que atua diretamente na dinâmica do corte.

Neste trabalho as forças de corte serão obtidas experimentalmente e a partir destas serão calculados os coeficientes de atrito para condições específicas de material, ferramenta e parâmetro de corte. Serão utilizados dois parâmetros em dois níveis cada: avanço e velocidade de corte. Os materiais utilizados serão o aço inoxidável superduplex UNS S 32760 e os aços inox AISI 316 e AISI 410 que simulam, respectivamente, as fases austenita e ferrita presentes no aço bifásico.

2 PROCEDIMENTO ANALÍTICO

No processo de usinagem existem três pares de forças principais, como mostrado na Figura 1. O primeiro par é formado pela força tangencial (F_t) e normal (F_n) na zona de cisalhamento secundária, o segundo par é formado pela força tangencial (F_z) e

força normal (F_{nz}) na zona de cisalhamento primária e o terceiro é formado pela força na direção do corte (F_c) e de avanço (F_f) na aresta de corte da ferramenta. Na zona de cisalhamento secundária o atrito tende a dificultar o escoamento do cavaco, a formar o desgaste de cratera e a contribuir para a diminuição da vida útil da ferramenta de corte. O cálculo do ângulo de atrito β , coeficiente de atrito μ e das forças F_r e F_n são apresentadas nas Equações 1, 2 e 3. Na equação 3 as forças F_c e F_f são as forças de corte e de avanço obtidos com o dinamômetro e γ é o ângulo de folga da ferramenta.

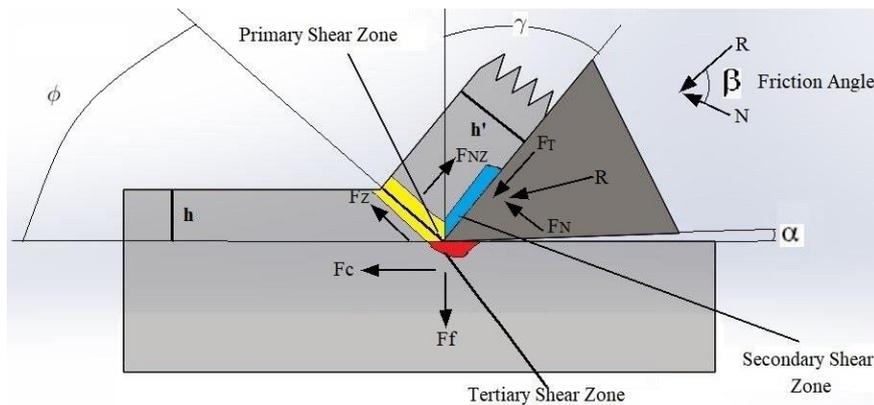


Figura 1. Forças de corte e zonas de cisalhamento

$$\tan \beta = \mu = \frac{F}{N} \quad (1)$$

$$F = F_c \sin \gamma + F_f \cos \gamma \quad (2)$$

$$N = F_c \cos \gamma - F_f \sin \gamma \quad (3)$$

A Equação (4) é um modelo mecanístico para determinar o coeficiente de atrito a partir do avanço da ferramenta (f) e da velocidade de corte (V_c). Resolvendo o sistema da Equação (5) é possível obter os coeficientes de calibração (a_0, a_1, a_2, a_3) e, posteriormente, dentro dos limites de calibração, obter a curva da evolução do atrito para cada material.

$$\ln \mu = a_0 + a_1 \ln f + a_2 \ln V_c + a_3 \ln(f \cdot V_c) \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} 1 & -\ln f_t^- & \ln V_c^- & \ln(f_t^- V_c^-) \\ 1 & -\ln f_t^+ & \ln V_c^- & \ln(f_t^+ V_c^-) \\ 1 & -\ln f_t^- & \ln V_c^+ & \ln(f_t^- V_c^+) \\ 1 & -\ln f_t^+ & \ln V_c^+ & \ln(f_t^+ V_c^+) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mu_{Exp1} \\ \mu_{Exp2} \\ \mu_{Exp3} \\ \mu_{Exp4} \end{bmatrix} \quad (5)$$

3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O processo de torneamento foi realizado com um torno convencional Nardini, modelo MS 205 X 1000 e as características do equipamento está presente na (Tabela 1). Os materiais das peças são UNS S 32760, AISI 316 e AISI 410 com composição química presente na (Tabela 2). A (Tabela 3) apresenta as propriedades

mecânicas desses aços fornecidos pelo fabricante. Os corpos de prova têm comprimento de 200 mm e diâmetro de 38 mm.

Tabela 1. Dados técnicos do torno. Fonte [7]

Dados	Características
Rotações	18: 31,5 – 2500 rpm
Potência do motor principal	6,75 CV
Avanço longitudinal	48: 0,042 – 1,013 mm
Avanço transversal	48: 0,021 – 0,5 mm
Eficiência	80%

Tabela 2. Composição química dos aços (%)

Aço	C	Si	Mn	P	Cr	Ni	Mo	Cu	N	W	Co
AISI316	0,015	0,52	0,025	0,025	16,81	10,35	2,05	0,48	0,052	0	0,12
AISI410	0,13	0,35	0,023	0,023	12,11	0,4	0,05	0,07	0,015	0	0,03
SD32760	0,014	0,4	0,6	0,02	24,97	6,9	3,65	0,59	0,25	0,52	0

Tabela 3. Propriedades mecânicas dos aços

Aço	Dureza (HB)	Tensão de escoamento (MPa)
AISI 316	178	605
AISI 410	143	563
UNS S32760	247	803

Para realizar o processo de corte foi utilizada uma ferramenta de corte (pastilhas) recomendada para torneamento de aços inoxidáveis. O porta-ferramenta utilizado foi o S16R STFRCR-11. A pastilha escolhida foi de metal duro TCMT110204 VP15TF da *Mitsubishi Materials*, com raio de ponta de 0,4 mm, ângulo de ponta de 60°, ângulo de folga de 7° e espessura de 2,381 mm.

Para aquisição das forças de corte foi utilizado um dinamômetro marca Kistler, modelo 9257BA. Este dinamômetro tem capacidade de emissão de forças nos eixos x, y e z com sensibilidade de 10 mV/N para x,y e 5,0 mV/N para z. Com este sensor é possível medir a força de avanço F_f (direção x), a força passiva F_p (direção y) e a força de corte F_c (direção z). Os sinais do dinamômetro são transferidos para um condicionador de sinais Kistler modelo 5233A1, com 3 canais, sinal de saída de $\pm 5V$ e filtro embutido com frequência de corte de 200 Hz.

O condicionador direciona os sinais para uma placa de aquisição de dados (digitalizador A/D), da National Instruments, modelo USB6221 BNC com 8 canais de entrada analógicos, resolução de 16 bits, taxa de amostragem de 250 kS/s, faixa máxima de tensão de $\pm 10 V$ e faixa mínima de tensão de $\pm 200 mV$. Este digitalizador A/D enviou os dados ao computador através do programa LabVIEW Signal Express, com frequência de aquisição de 2000 Hz [4].

Considerando um planejamento experimental com 2 fatores, 2 níveis cada e 3 repetições de cada experimento tem um total de 4 experimentos e 12 testes para cada aço inoxidável. A Tabela (5) mostra os dados experimentais que foram alterados em cada etapa do experimento, mostrando quais os valores de avanço (f) e rotação (n) que foram usados.

Tabela 5. Dados experimentais

Experimento	f (mm)	n (rpm)
A	0,094	500
B	0,199	500
C	0,094	800
D	0,199	800

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A (Tabela 6) mostra as três forças que podem ser medidas experimentalmente: a força de corte (F_c), a força passiva (F_p) e a força de avanço (F_f). Com esses valores, foi possível calcular as forças na superfície de saída e determinar o coeficiente de atrito que é mostrado na (Tabela 7). Usando os dados da Tabela (7) para resolver o sistema da Equação (5) foram obtidos os coeficientes de calibração da Tabela (8).

Tabela 6. Resultados experimentais [5]

Exp.	f_t (mm)	n (rpm)	Superduplex Força (N)			AISI 316 Força (N)			AISI 410 Força (N)		
			F_c	F_p	F_f	F_c	F_p	F_f	F_c	F_p	F_f
A	0.094	500	67.84	48.08	28.99	63.97	44.69	23.93	57.10	32.50	22.59
B	0.199	500	107.26	72.04	31.75	109.93	76.76	29.11	94.23	69.17	28.70
C	0.094	800	68.14	50.56	30.71	68.04	48.71	26.94	55.25	31.39	23.62
D	0.199	800	101.63	72.90	30.39	92.55	65.29	22.09	77.77	50.00	23.12

Tabela 7. Resultado experimental para o coeficiente de atrito

Experimento	f (mm)	n (rpm)	$\mu - SD$	$\mu - 316$	$\mu - 430$
A	0,094	500	0,5806	0,5208	0,5449
B	0,199	500	0,4346	0,4006	0,4440
C	0,094	800	0,6071	0,5452	0,5808
D	0,199	800	0,4379	0,3704	0,4360

Tabela 8. Coeficientes de calibração

Aço	a_0	a_1	a_2	a_3
AISI316	-1,4573	-0,2764	0,1237	-0,1527
AISI410	-1,6631	-0,2346	0,1416	-0,0931
UNS S32760	-1,8510	-0,2924	0,1740	-0,1185

Com os dados da Tabela (8) foram plotadas as curvas do coeficiente de atrito em função do avanço da ferramenta e da rotação da peça. A Figura 2 apresenta as curvas do coeficiente de atrito para os aços AISI 316, AISI 410 e o aço inoxidável superduplex, considerando a rotação de 500 rpm. É possível observar que o aumento do avanço tende a diminuir o coeficiente de atrito para os três materiais.

A princípio a menor espessura do cavaco diminui o ângulo de cisalhamento primário e, por consequência, o comprimento de contato cavaco-ferramenta. Este fato faz com que as forças de corte sejam menores e, finalmente, o coeficiente de atrito tende a ser menor também. No entanto, a Figura 2 mostra o contrário: o coeficiente de atrito diminui com o aumento da espessura do cavaco. Este fenômeno pode ser explicado pelo mecanismo de formação do cavaco. Sabe-se que quanto maior o avanço da ferramenta, considerando a profundidade de corte constante, o cavaco tende a ser mais descontínuo ou quebrado. Assim, quanto mais fácil for a quebra do cavaco, menor será a área de contato e o coeficiente de atrito entre o cavaco formado e a superfície de saída da ferramenta de corte.

Considerando o avanço até 0,16 mm é possível observar que o coeficiente de atrito do aço superduplex é superior ao dos aços AISI 316 e AISI 410. O aço superduplex apresenta cromo e molibdênio em maior quantidade e, a princípio, tenderia a formar mais carbonetos quando ligado ao carbono, fragilizando o material. No entanto, o superduplex também possui maior concentração de nitrogênio, que é adicionado com o objetivo de conferir maior resistência mecânica à liga. A grande quantidade de cromo (24,97) deste aço ajuda na formação de um filme estável que garante a

proteção contra ações corrosivas do meio. Este filme garante que a área de contato cavaco - ferramenta seja contínua e, por consequência, maior do que a dos outros aços.

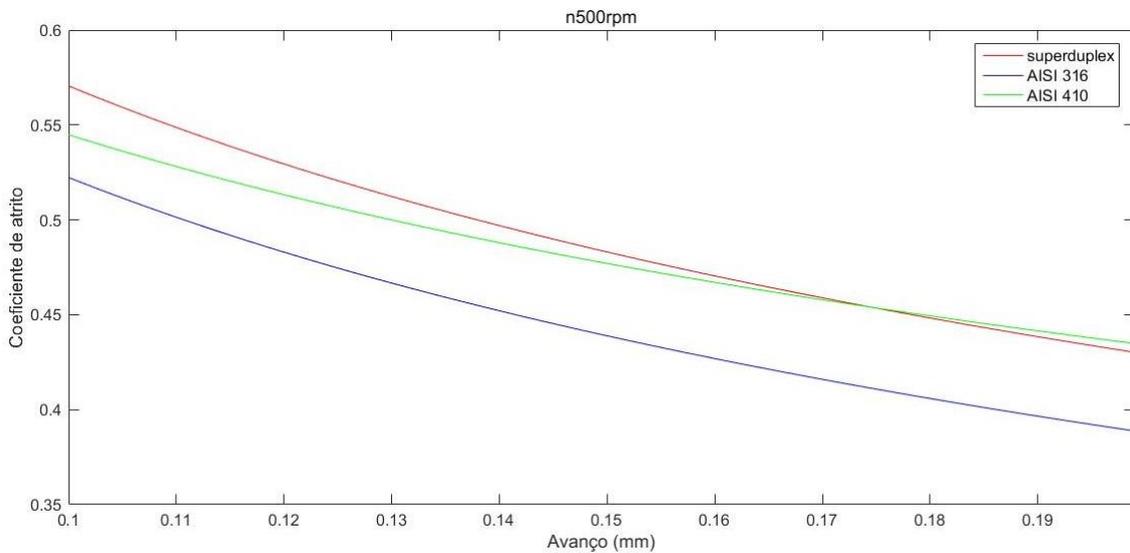


Figura 2. Evolução do coeficiente de atrito em função do avanço da ferramenta para as rotações de 500 rpm e 800 rpm.

A Figura 3 apresenta a evolução do coeficiente de atrito em função da rotação da peça, considerando o avanço de 0,199mm. Para os aços AISI 410 e superduplex a curva do coeficiente de atrito tende a diminuir para menores valores de velocidade de corte devido a formação de aresta postiça de corte (APC). Com a formação da APC, o comprimento de contato cavaco ferramenta tende a ser menor e, por consequência, o coeficiente de atrito também. A curva do aço austenítico AISI 316 se manteve quase constante.

A partir da Tabela 2 é possível observar que os aços ferrítico AISI 410 e superduplex apresentam altos teores de carbono (0,13%) e nitrogênio (0,25), respectivamente. Como já foi explanado, estes dois elementos tendem a formar uma camada de proteção contra a oxidação da nova superfície formada do cavaco. Esta camada preenche os espaços vazios entre o cavaco e a ferramenta, aumentando a área de contato efetiva e o coeficiente de atrito.

Finalmente, o aço austenítico AISI 316 apresenta baixo coeficiente de atrito devido a quantidade de C e N somado ao teor intermediário de Cr e Mo que podem gerar carbonetos na microestrutura, tornando-a frágil e quebradiça. A tendência de encruamento deste aço também facilita a formação de cavacos mais descontínuos e menor coeficiente de atrito. A Figura 4 apresenta os cavacos formados para os três aços, indicando a aderência da aresta postiça no cavaco para os aços AISI 410 e superduplex.

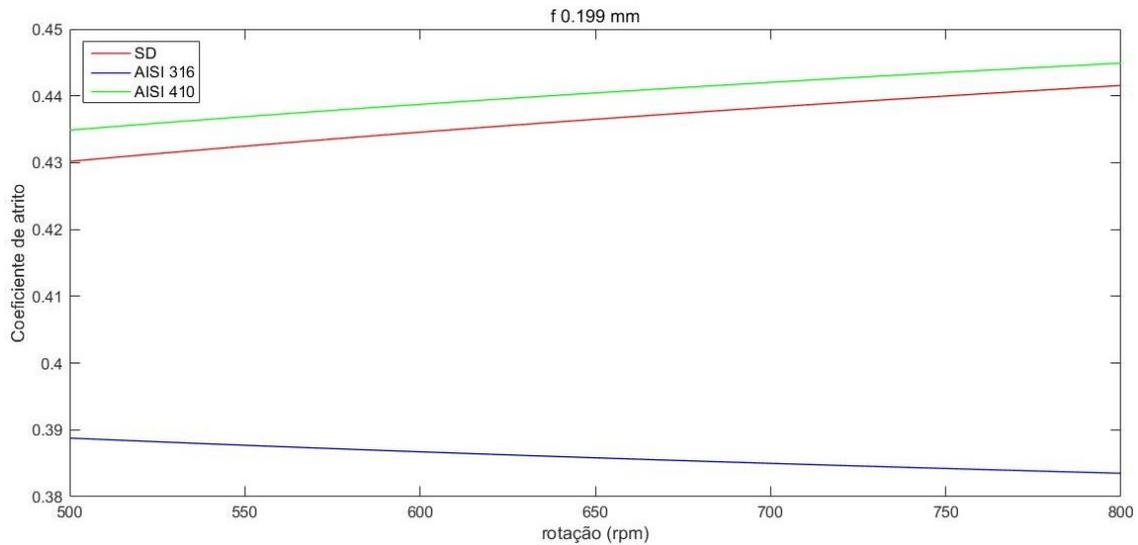


Figura 3. Evolução do coeficiente de atrito em função da rotação para os avanços de 0.094 mm e 0.199 mm.

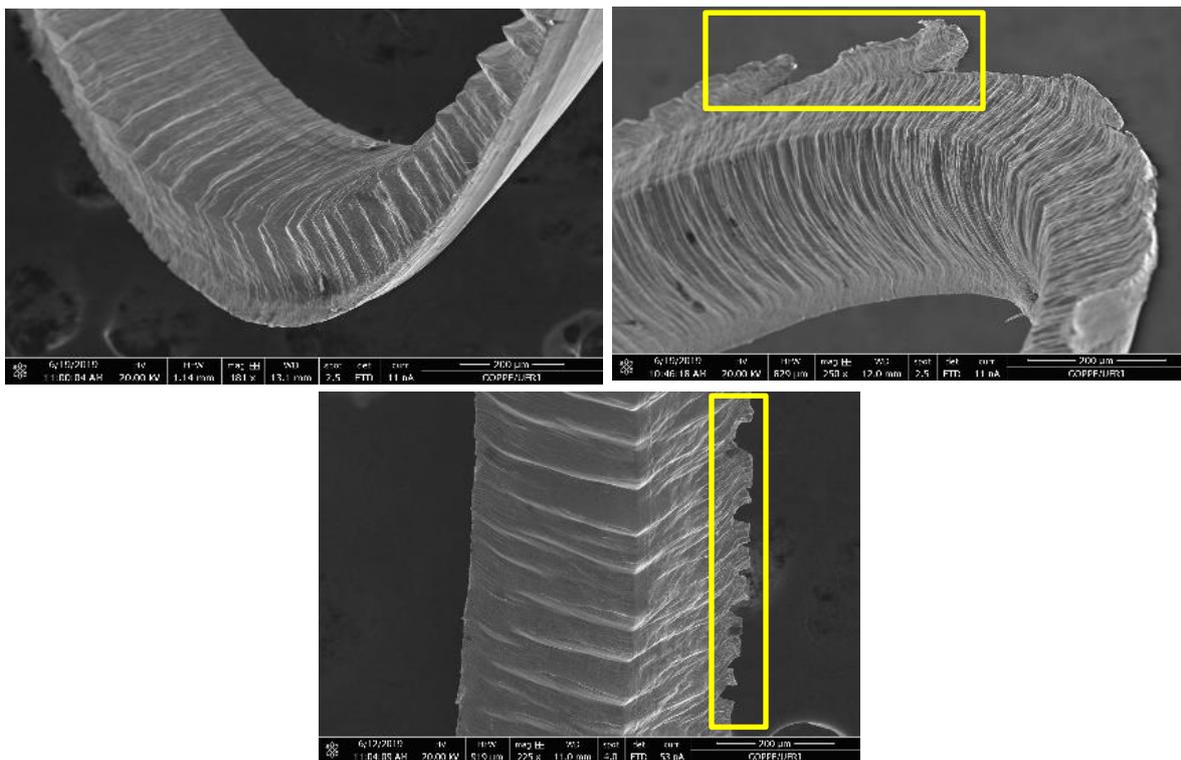


Figura 4. Imagem MEV do cavaco formado para os aços (a) AISI 316, (b) AISI 410 e (c) Superduplex 32760. Destaque para a formação da aresta postíca.

5 CONCLUSÕES

Os aços duplex e superduplex são utilizados na indústria petrolífera e de gás devido à alta resistência mecânica aliada com excelente resistência à corrosão. Esta característica é conferida ao material devido sua microestrutura bifásica composta

de grãos de ferrita e austenita. O estudo do comportamento destes aços durante o processo de fabricação por usinagem é bastante custoso devido ao preço elevado deste material frente à outros aços inoxidáveis largamente utilizados na indústria, como os aços austenítico AISI 316 e ferrítico AISI 410. Dentro da usinagem, a análise do atrito gerado a partir do contato cavaco-ferramenta é de extrema importância no controle das forças de corte, desgaste de cratera na superfície de saída e, por consequência, na vida útil da ferramenta de corte.

Portanto, este trabalho apresentou um estudo do coeficiente de atrito em função do avanço da ferramenta e da velocidade de corte para os três aços citados acima. A partir dos resultados foi possível concluir principalmente que:

- O aumento do avanço reduziu o coeficiente de atrito para os três aços. Apesar de ir contra alguns trabalhos encontrado na literatura, este resultado pode ser explicado pelo mecanismo de formação do cavaco, onde níveis maiores de avanço tendem a formar cavacos menores, mais descontínuos. Deste modo, ocorre a redução da área efetiva de contato cavaco-ferramenta e gera menor coeficiente de atrito;
- Baixa velocidade de corte também tende a diminuir o coeficiente de atrito devido a tendência de formação de aresta postiça de corte, recaindo na mesma questão da menor área de contato efetiva. A formação desta aresta foi confirmada por imagens de MEV do cavaco;
- Os aços inox superduplex e ferrítico AISI 410 apresentam maior coeficiente de atrito que o aço inox austenítico AISI 316, independente das condições de usinagem. Este fato pode ser explicado pela quantidade relativa de alguns elementos químicos presentes nestes dois primeiros aços. O austenítico é altamente encruável e, portanto, em altas taxas de deformação oriundas do processo de usinagem tende a formar cavacos mais frágeis, resultando no menor coeficiente de atrito.

Agradecimentos

A autora Luísa de Amorim Makhoul Gomes agradece à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro – FAPERJ pela bolsa de iniciação tecnológica concedida no Processo n.º 260.028/2019.

REFERÊNCIAS

- 1 Cristino, V. A. M., Rosa, P. A. R., Martins, P. A. F. Avaliação experimental da condição tribológica no corte ortogonal. Revista da Associação Portuguesa de Análise Experimental de Tensões, 2009.
- 2 Dimas, N. A. Modelagem Numérico Experimental do Corte Ortogonal. Projeto final. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2018.
- 3 Ferraresi, D. Fundamentos da usinagem dos metais. Editora Blucher, 2003
- 4 Figueiredo, F., Silveira, J., Dimas, N., Borges, L. Numerical-experimental models for orthogonal cutting. Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, Curitiba Paraná, 2017.
- 5 Fonseca, M. N, Mouro, A. L. Forças de corte durante o torneamento dos aços AISI 316, AISI 410 e UNS S32760. Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, Salvador Bahia, 2018.
- 6 Groover, M. P. Introdução aos processos de fabricação. Editora LTC, 2012.
- 7 Nery, W. S. Investigação experimental da variação da rugosidade com o aumento das forças de usinagem no torneamento. Dissertação de mestrado, 2013. CEFET/RJ.