

FORÇAS DE CORTE DURANTE O TORNEAMENTO DOS AÇOS AISI 316, AISI 410 E UNS S32760

Marina Nogueira Fonseca, marinanogueira97@gmail.com¹

Adriane Lopes Mougo, adriane.mougo@gmail.com¹

¹Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, Campus Nova Iguaçu, RJ, Brasil

Resumo: A força de corte é uma das variáveis mais representativas do processo de usinagem. A medição desta força contribui para o entendimento do processo e possibilita o dimensionamento de máquinas ferramentas, o controle do consumo de energia e o aumento da produtividade. A força de corte depende fortemente dos parâmetros de corte, da geometria da ferramenta e da microestrutura da peça de trabalho e, consequentemente, a integridade da peça e o desgaste da ferramenta também são influenciados por esta variável. Os aços superduplex são largamente utilizados na indústria de petróleo e gás devido às suas propriedades de resistência mecânica e de corrosão associados à microestrutura bifásica de ferrita e austenita. Apesar de conferir elevada resistência ao material, cada fase possui características e propriedades particulares e são distribuídas aleatoriamente na peça, induzindo em vibrações durante o corte e aumentando ainda mais os problemas relacionados à usinagem. Portanto, o objetivo deste trabalho é comparar as forças de corte entre os aços AISI 316, AISI 410 e UNS S 32750 durante o torneamento para diferentes parâmetros de corte. O planejamento experimental será desenvolvido a partir de dois níveis de velocidade de corte (628,3 e 1005,3 m/min) e dois níveis de avanço (0,094 e 0,199 mm), mantendo a profundidade de corte constante.

Palavras-chave: Torneamento, força de corte, AISI 316, AISI 410, UNS S32760.

1. INTRODUÇÃO

A usinabilidade serve como indicativo do grau de dificuldade para usinar um material. Esta dificuldade pode ser quantificada e comparada sob diversos critérios, como a força e a potência de corte, a vida útil da ferramenta, o acabamento de superfície e a forma do cavaco gerado. Para o controle das condições de usinagem é necessária a utilização de sensores e equipamentos capazes de detectar sinais relacionados a alguma descontinuidade durante o processo de corte. Dentre estes sinais, a força de corte é bastante utilizada para a previsão da vida útil da ferramenta e da qualidade da peça usinada (Mougo *et al.*, 2014; Mougo *et al.*, 2015). As propriedades mecânicas do material são também grandes influenciadoras da usinabilidade (Bastos *et al.*, 2007; Vollertsen *et al.*, 2009). Para materiais com microestrutura heterogênea e cavacos reduzidos, pode haver oscilação das forças de corte quando a aresta de corte ativa estiver em contato com maior ou menor quantidade de fases com resistência mecânica variada (Mougo, 2016).

Os aços inoxidáveis superduplex são assim chamados por serem constituídos de duas fases microestruturais distribuídas de modo equivalente no material: a ferrita e a austenita. As fases ferrita e austenita apresentam, respectivamente, estrutura cristalina cúbica de corpo centrado (CCC) e cúbica de face centrada (CFC) (Callister and William, 2012). A estrutura CCC confere à fase ferrita baixa formabilidade e alta resistência mecânica, pois o arranjo desta estrutura cristalina não forma planos compactos, ou seja, os átomos não estão em contato contínuo (Lopes, 2011). Deste modo, é necessária uma maior quantidade de energia para iniciar a deformação deste material. Na estrutura CFC tanto os planos quanto as direções são compactos, além desta estrutura apresentar 12 sistemas de deslizamento que facilitam sua deformação. A deformação na direção compacta é mais provável de ocorrer devido a menor distância que a rede precisa se deslocar.

Para a formação da microestrutura bifásica são realizados balanceamentos dos elementos de liga como, por exemplo, a adição à matriz ferrítica de uma quantidade menor de níquel que seria necessário para transformar completamente uma estrutura ferrítica em austenítica. Estes balanceamentos têm por objetivo controlar os elementos estabilizadores de austenita (Ni, C, N) e os estabilizadores da ferrita (Cr, Mo, Si) (Pardal, 2012; Callister and William, 2012). A partir destes elementos é possível calcular o cromo e o níquel equivalente no material e, em seguida, determinar o tipo de aço inoxidável com auxílio do Diagrama de Schaeffer, apresentado na Figura (1).

A diferença entre o aço duplex e superduplex está na quantidade de alguns componentes, como o cromo, molibdênio e nitrogênio. Esses componentes interferem na resistência a corrosão por pite. Esse processo pode ser quantificado pela resistência equivalente a corrosão por pite ou PRE (Pitting Resistance Equivalent) e pode ser calculada pela Eq. (1). Para PRE entre 35 e 40, podemos classificar o aço como duplex e valores acima de 40 caracterizam aços superduplex.

$$PRE = Cr\% + 3.3Mo\% + 16N\% \quad (1)$$

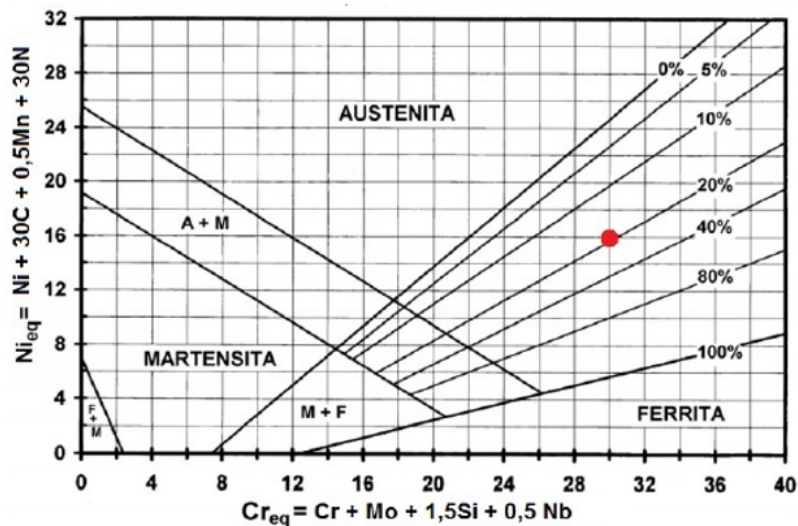


Figura 1: Diagrama de Schaeffer para determinação da microestrutura em função dos valores de Nieq e Creq (Modenesi *et al.*, 2005).

Apesar de possuir tais atributos favoráveis para a indústria, estes aços inoxidáveis bifásicos têm baixa condutividade térmica, alta tenacidade e taxa de endurecimento do trabalho, transformando-os em materiais de baixa usinabilidade. A presença de austenita e ferrita em diferentes fases com durezas discrepantes também os tornam difíceis de usar (Pardal *et al.*, 2009). Estas propriedades, como a baixa condutividade térmica e a resistência mecânica, causam uma elevada temperatura na interface peça/ferramenta, o que interfere na vida útil da ferramenta e no acabamento superficial da peça (?).

Na usinagem, a seleção adequada dos parâmetros de corte é imprescindível para um processo de qualidade. A velocidade de corte e avanço, por exemplo, influenciam nas características da superfície da peça, tais como o aumento das tensões residuais, da rugosidade, da dureza e do surgimento de microtrincas (Vogel *et al.*, 2013; Fonseca *et al.*, 2008; Tavares *et al.*, 2013). Entre estas características, o encruamento do material, dado pela deformação plástica à frio durante a formação do cavaco, aumenta a força de corte para passos subsequentes de usinagem e, por consequência, diminui a usinabilidade do material.

Este trabalho foi gerado a partir da pesquisa sobre o estudo da usinabilidade dos aços inoxidáveis, tendo como foco a análise das forças de corte do aço superduplex. O objetivo principal é fazer um estudo experimental das forças de corte durante o torneamento do aço UNS S 32750 e comparar com as forças dos aços AISI 316 e AISI 410. O planejamento experimental será desenvolvido a partir de dois níveis de velocidade de corte (60 e 100 m/min) e dois níveis de avanço (0,094 e 0,199 mm/rotação), mantendo a profundidade de corte constante.

2. MATERIAIS, EQUIPAMENTOS E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

2.1 Materiais e ferramenta

Os materiais utilizados neste trabalho são os aços superduplex UNS S 32760, AISI 316 e AISI 410. Este último é um aço martensítico no estado recozido, ou seja, com estrutura ferrítica. Deste modo, é possível usá-lo para simular a fase ferrítica do aço superduplex. O aço AISI 316 simula a fase austenítica deste aço. Os corpos de prova apresentam comprimento e diâmetro de 200 mm e 38 mm, respectivamente. As Tabelas (1) e (2) apresentam a composição química e as propriedades mecânicas destes aços fornecidos pelo fabricante.

Tabela 1: Composição química do aço inoxidável superduplex UNS S 32750 (% peso).

Aço	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	N	W	Co
AISI 316	0,015	0,52	1,48	0,025	0,020	16,81	10,35	2,05	0,48	0,052	-	0,12
AISI 410	0,13	0,35	0,55	0,023	0,0060	12,11	0,40	0,05	0,07	0,015	-	0,030
UNS S32760	0,014	0,40	0,60	0,020	0,0010	24,97	6,90	3,65	0,59	0,25	0,52	-

Tabela 2: Propriedades mecânicas dos aços

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

Usando os resultados da Tab. (1) para o aço superduplex é possível calcular o cromo e o níquel. Os resultados mostram C_{req} e N_{req} de 32,47 e 15,12, respectivamente. Usando o Diagrama de Schaeffer da Fig. (1) é possível confirmar que este aço possui microestrutura bifásica composta de austenita e ferrita.

A ferramenta de corte utilizada foi uma pastilha de metal duro da Sandvik com código TCMT 11 02 04-UM 2220, revestimento CVD $Ti(C,N)+Al_2O_3+TiN$, raio de ponta de 0,397 mm, ângulo de folga de 7° , comprimento efetivo da aresta de corte $LE = 10,34$ mm, espessura da pastilha $S = 2,381$ mm. O porta-ferramenta utilizado foi com código S16R STFCR-11. A pastilha utilizada é recomendada para operações de acabamento de aços inoxidáveis, considerando os parâmetros máximos de avanço de 0,2 mm/r(0,06-0,3), velocidade de corte de 230 m/min(300-195) e profundidade de corte 1,25 mm(0,3-3).

2.2 Equipamentos

Para o processo de torneamento foi utilizado o torno convencional Nardini, modelo Mascote MS 205 X 1000, Figura (2). Esta máquina ferramenta pertence ao Laboratório de Pesquisas em Usinagem (LABUS), do CEFET/RJ - Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, Campus Maracanã. Este torno possui uma gama de 18 velocidades de rotação disponíveis. Além disto, esta máquina-ferramenta possui também 48 avanços longitudinais e 48 avanços transversais. As características do torno são apresentadas na Tab. (3).



Figura 2: Torno Nardini Mascote instalado no LABUS - CEFET/RJ (Nery, 2013).

Tabela 3: Dados técnicos do torno (Nery, 2013).

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%

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 ± 10 V e faixa mínima de tensão de ± 200 mV. Este digitalizador A/D enviou os dados ao computador através do programa LabVIEW Signal Express, com frequência de aquisição de 2000 Hz (Nery, 2013).

2.3 Procedimento experimental

Nesta etapa o planejamento experimental foi desenvolvido com o objetivo principal de verificar a variação na força de corte considerando os parâmetros de corte. Deste modo, será realizada a análise de variância para verificar se existe uma diferença significativa entre as médias de uma variável de saída com a variação de uma ou mais variáveis de entrada. No caso deste trabalho, a variável de saída é a força de corte e as variáveis de entrada são a velocidade de corte e avanço

da ferramenta. Serão utilizados dois níveis para cada parâmetro de entrada. Deste modo, tem-se o modelo chamado de Two-Factor Factorial Design. Os fatores são considerados independentes, ou seja, a variação na velocidade de corte não influencia no avanço da ferramenta, e vice-versa. A Tabela (4) apresenta esta configuração.

Tabela 4: Limites das variáveis de entrada

	Parâmetro	Limite inferior (-1)	Limite superior (+1)
P1	Rotação da peça (rpm)	500	800
P2	Avanço da ferramenta (mm)	0,094	0,199

Para cada fator tem-se duas hipóteses para avaliar:

- H0 - hipótese nula – a força de corte não varia com o parâmetro em questão
- H1 – hipótese alternativa - a força de corte varia com o parâmetro em questão

A ordem dos testes precisa garantir a aleatoriedade dos experimentos. Este fato é relevante para certificar que os resultados obtidos não sejam influenciados pelo desgaste da ferramenta, mas unicamente pelas variáveis de entrada. Considerando um planejamento experimental com 2 fatores, 2 níveis cada e 3 réplicas de cada experimento tem-se um total de 4 experimentos e 12 testes para cada aço inoxidável. As Tabelas (5) e (6) apresentam, respectivamente, os dados dos experimentos e a ordem randomizada de execução.

Tabela 5: Dados experimentais

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

Tabela 6: Planejamento experimental para torneamento dos aços

Testes	Experimentos	Réplica	Avanço (mm)	Rotação (rpm)
1	D	2	0,199	800
2	A	3	0,094	500
3	A	1	0,094	500
4	D	1	0,199	800
5	B	1	0,199	500
6	C	3	0,094	800
7	C	1	0,094	800
8	B	3	0,199	500
9	B	2	0,199	500
10	A	2	0,094	500
11	D	3	0,199	800
12	C	2	0,094	800

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção serão apresentados e discutidos os resultados obtidos a partir do torneamento dos aços inoxidáveis AISI 316, AISI 430 e UNS S32760 para diferentes valores de avanço da ferramenta e de rotação da peça de trabalho.

3.1 Forças de usinagem

As forças de usinagem foram obtidas para a mesma ferramenta de corte (pastilha xx), com dois níveis de velocidade de corte e dois níveis de avanço para os aços AISI 316, AISI 410 e UNS S32760. Os dois primeiros representam individualmente as fases austenita e ferrita que compõem o aço superduplex. A Figura (3) apresenta um exemplo das forças nas direções de corte (F_c), passiva (F_p) e de avanço (F_f) para os três materiais. Estas figuras foram obtidas a partir do torneamento com avanço de 0,094 mm e rotação de 500 rpm. Os resultados apresentaram oscilação das forças de usinagem para os três materiais nas três direções analisadas, sendo esta ocorrência mais visível para o aço AISI 410.

Deste modo, para se realizar uma análise comparativa mais precisa da variação destas forças, foi necessário realizar uma média de 20 rotações da peça contando a primeira rotação a partir de um tempo onde a oscilação da força apresentasse comportamento quase constante, como mostra esquematicamente a Fig. 3(a).

Inicialmente, foi verificado o número de pontos medidos para cada rotação da peça a partir da velocidade de rotação e da frequência de aquisição. Para este procedimento é necessário dividir o valor da rotação da peça (500 ou 800 rpm) por 60 a transformar esta variável em unidade de medida derivada do SI para frequência, sendo expressa em termos de

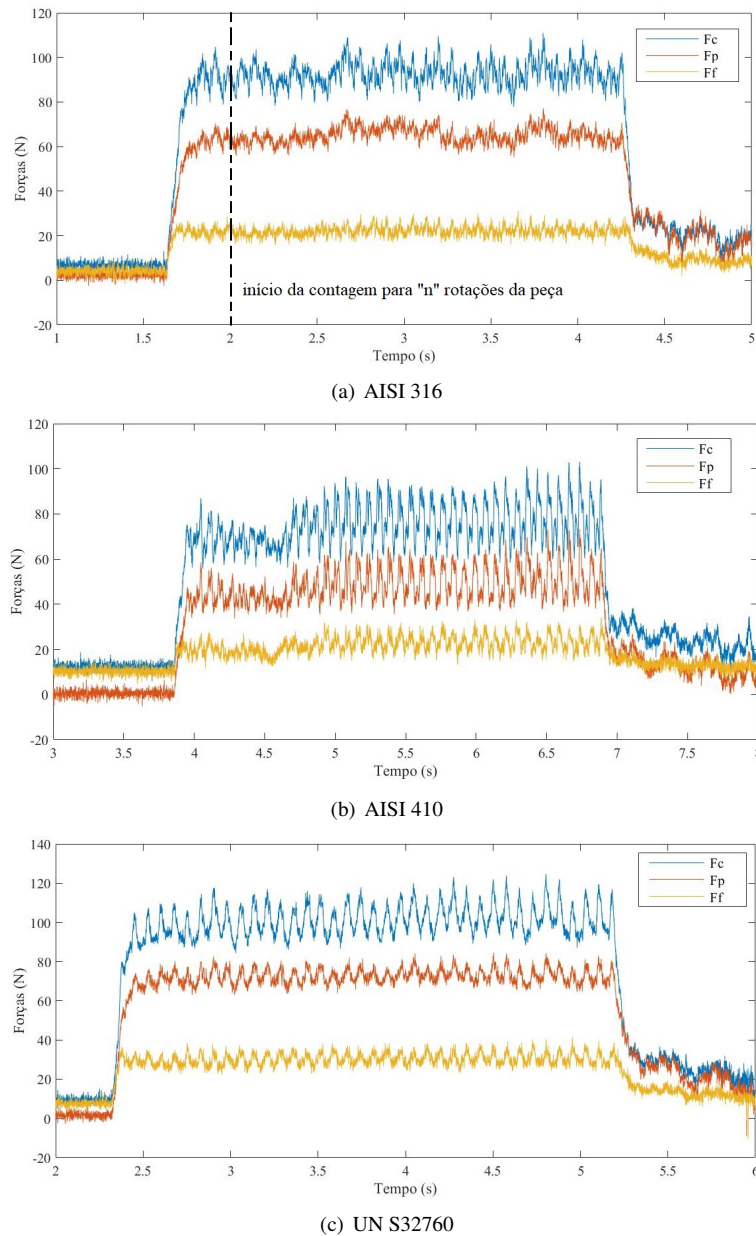


Figura 3: Força de corte no torneamento.

ciclos por segundo (rotações/segundo). Em seguida divide-se este resultado pelo valor da frequência de aquisição. Neste trabalho a frequência de aquisição (f_a) do sinal da força foi de 1400 Hz. A Tabela (7) apresenta estes resultados. A Figura (4) apresenta o resultado para a média das forças de usinagem para 20 rotações da peça.

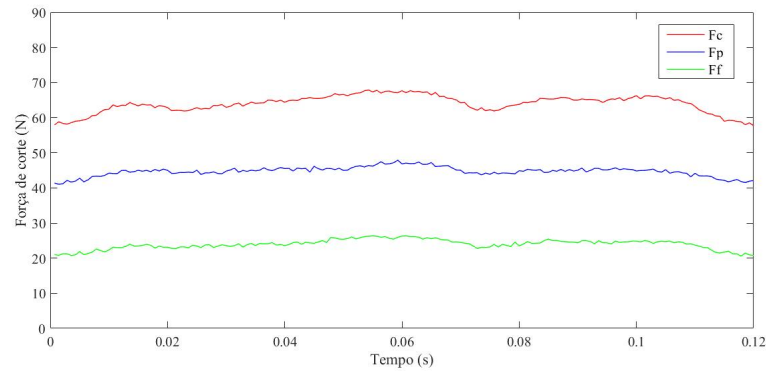
Tabela 7: Dados para calcular a média das forças para "n" rotações da peça

n (rpm)	n (Hz)	1/Hz	nº pontos=($f_a \cdot (1/Hz)$)
500	8,333	0,12	168
800	13,333	0,075	105

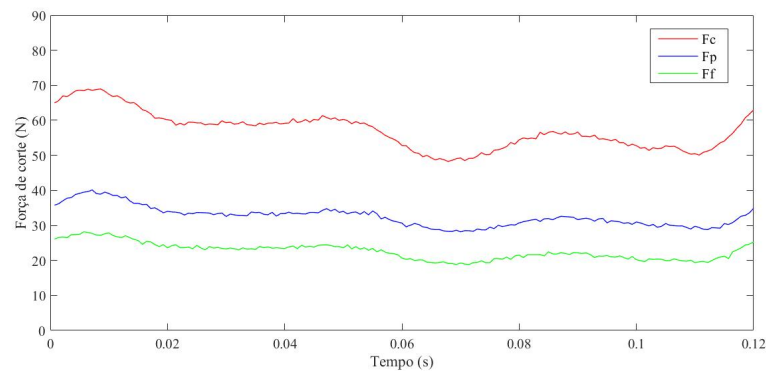
A partir destes resultados foi realizado o cálculo da força resultante, Equação (2) para facilitar a comparação entre os três materiais graficamente e pela análise de variância. A Figura (5) apresenta a variação da força resultante calculada para os três materiais. É possível observar a tendência de aumento da força resultante média para o nível mais alto de avanço (f_t) da ferramenta. A velocidade de corte, a princípio, apresenta pouca influência neste resultado.

$$F_r = \sqrt{F_c^2 + F_p^2 + F_f^2} \quad (2)$$

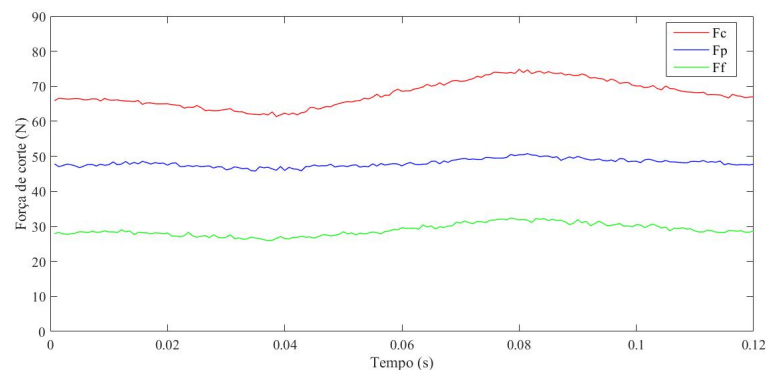
As forças resultantes médias para $f_t = 0,094$ mm e velocidades de rotação de 500 rpm e 800 rpm ficaram em torno de 80 N para os três materiais. Já para $f_t = 0,199$ mm e para os dois níveis de rotação, esta força ficou em torno de 120 N. Para determinar com clareza a influência dos parâmetros na força de corte considerando todos os resultados e não unicamente a média destes, foi realizada a análise de variância - ANOVA.



(a) AISI 316



(b) AISI 410



(c) UN S32760

Figura 4: Força de corte no torneamento.

3.2 Análise de Variância - ANOVA

O tratamento estatístico dos dados da força resultante foi realizado através da análise de variância (ANOVA) considerando dois fatores e dois níveis. Para isso, compara-se o valor do Fator F do fator analisado, na tabela ANOVA, com o valor de $F_{critico}$ da Tabela de distribuição F de Fisher-Snedecor [8], para um nível de significância $\alpha = 5\%$.

Para se obter o valor de $F_{critico}$ utiliza-se o grau de liberdade do parâmetro analisado (avanço ou velocidade de corte) como numerador e o erro como denominador na Tabela de distribuição de Fisher. Se o fator F (ANOVA) for maior que $F_{critico}$ significa que a hipótese nula é rejeitada e, portanto, o parâmetro influencia na variável de resposta (força de corte).

O resultado da ANOVA é comumente apresentado no modelo da Tabela (8), onde SQ é a soma dos quadrados, GL é o grau de liberdade e MQ são os quadrados médios. A primeira coluna desta tabela apresenta a fonte de variação, a segunda coluna apresenta a soma dos quadrados de cada um dos fatores e sua variabilidade e a terceira coluna mostra os graus de liberdade que está relacionado com o número de níveis de cada fator.

A partir dos valores encontrados nas Tab. (8) e (9), coluna GL (grau de liberdade), é possível entrar na Tabela de distribuição de Fisher com o numerador (velocidade de rotação ou avanço) igual a 1 e o denominador (erro) igual a 8. Considerando $\alpha = 5\%$ tem-se o valor de $F_{critico}$ igual a 5,32. Deste modo, tanto para o aço AISI 316 quanto para o aço AISI 410 tem-se Fator F (144,44; 46,18) > $F_{critico}$ (5,32), indicando a influência deste parâmetro de corte na força resultante média. A velocidade de rotação, ao contrário, apresenta valores do Fator F irrelevantes. Os valores do Fator F para a linha Interação também está abaixo de 5,32, indicando que os dois parâmetros não interferem entre si durante a

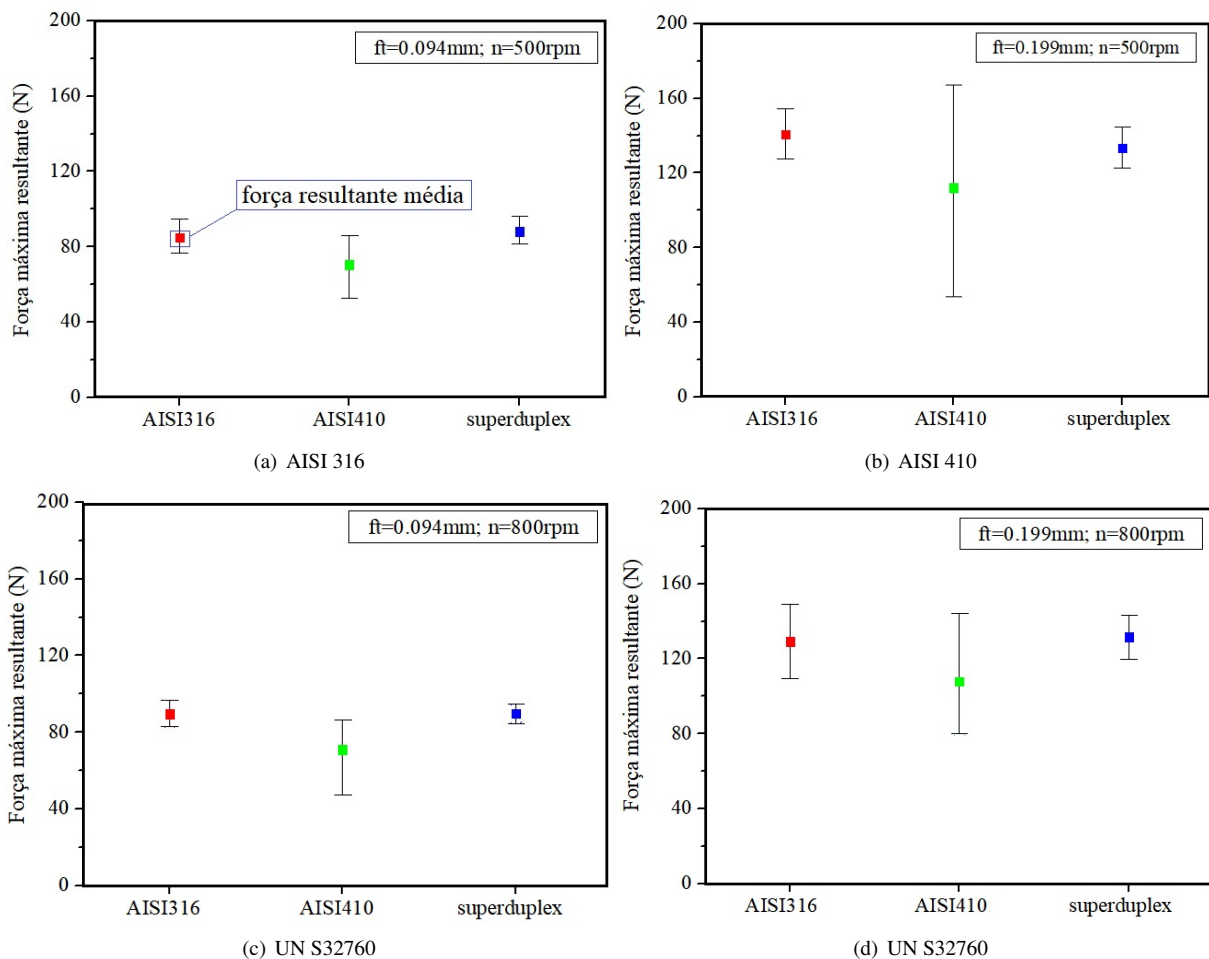


Figura 5: Força de corte no torneamento.

aquisição das forças.

A partir da Tab. (10) é possível encontrar o valor de $F_{critico}$ também igual a 5,32. No entanto, para o aço superduplex tanto a velocidade quanto o avanço são parâmetros influentes na força média resultante, já que o Fator F para estes dois parâmetros são, respectivamente, 3164,17 e 87,06. De modo geral, o avanço novamente se apresenta como parâmetro de maior relevância para a manipulação das forças de corte.

Tabela 8: Análise de variância para a força máxima resultante para o aço AISI 136

Fonte	SQ	GL	MQ	Fator F	Prob.>F
Avanço (mm)	6802,36	1	6802,36	144,44	0
Velocidade rotação (rpm)	35,42	1	35,42	0,75	0,4111
Interação	188,59	1	188,59	4	0,0804
Erro	376,75	8	47,09		
Total	7403,12	11			

Tabela 9: Análise de variância para a força máxima resultante para o aço AISI 410

Fonte	SQ	GL	MQ	Fator F	Prob.>F
Avanço (mm)	4611,43	1	4611,43	46,18	0,0001
Velocidade rotação (rpm)	10,9	1	10,9	0,11	0,7496
Interação	16,65	1	16,65	0,17	0,6938
Erro	798,92	8	99,87		
Total	5437,9	11			

Considerando a velocidade de corte com pouca influência nas forças de usinagem, todos os resultados com o avanço $f_t = 0,094\text{ mm}$ foram agrupados para cada aço, independente do valor da velocidade. Este procedimento foi realizado também para o avanço $f_t = 0,199\text{ mm}$. Os resultados são apresentados na Fig. (6). Nesta figura é possível observar que a força média resultante para os aços AISI 316 e superduplex são próximos a 80 N e 140N, enquanto que a força média do aço AISI 410 fica em torno de 70N e 110N.

Considerando o desvio padrão, é possível afirmar que os valores das forças do aço superduplex encontram-se dentro

Tabela 10: Análise de variância para a força máxima resultante para o aço superduplex UNS S32760

Fonte	SQ	GL	MQ	Fator F	Prob.>F
Avanço (mm)	8251,65	1	8251,65	3164,17	0
Velocidade rotação (rpm)	227,03	1	227,03	87,06	0
Interação	328,85	1	328,85	126,1	0
Erro	3,3396	8	0,41744		
Total	8828,39	11			

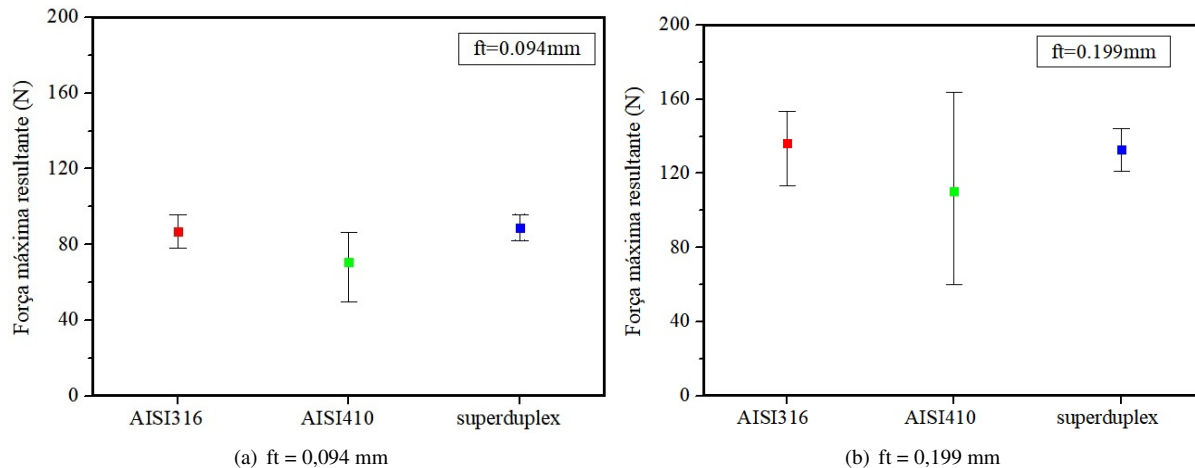


Figura 6: Força máxima resultante de corte considerando apenas os valores do avanço da ferramenta.

da faixa de valores dos outros dois aços inoxidáveis que simulam suas fases separadamente.

4. CONCLUSÕES

Nesta seção serão apresentadas as principais conclusões obtidas neste trabalho. O objetivo principal deste trabalho foi apresentar um estudo sobre a usinabilidade dos aços inoxidáveis AISI 316, AISI 410 e UNS S32760 através da análise das forças de usinagem experimentais.

- Os valores das forças de usinagem decompostas nas três direções apresentaram oscilações de 10N à 20N, sendo mais evidente para os resultados do aço AISI 410. Por este motivo foi desenvolvido um método para calcular a média de "n" rotações da peça a partir da quantidade de pontos obtidos por rotação. Esta quantidade de pontos é função da frequência de aquisição adicionada ao sistema de aquisição antes de iniciar o processo de corte. Para este trabalho a frequência de aquisição foi de 1400 Hz e os pontos foram de 168 e 105 para as rotações de 500 e 800 rpm, respectivamente.
- Os resultados obtidos a partir dos valores médios de 20 rotações apresentaram perfis mais contínuos e, portanto, foi possível calcular as forças resultantes e analisar a influência dos parâmetros de corte. A partir do gráfico de variação de dados foi observado que as forças médias para os três aços ficou em torno de 80N e 120N para avanços de 0,094 mm e 0,199 mm, respectivamente. A velocidade de corte não se apresentou como uma variável relevante na mudança dos valores das forças de usinagem.
- A partir dos resultados da análise de variância foi constatado que para os aço AISI 316 e AISI 410 somente o avanço da ferramenta influencia na variação das forças de usinagem. Já para o superduplex UNS S32760 os dois parâmetros se mostraram influentes, sendo novamente a variação do avanço o fator com maior interferência nas forças.
- Considerando apenas os valores de avanço, foi constatado que as forças do aço AISI 316 e UNS S32760 são próximos à 80N e 140N para $ft=0,094\text{mm}$ e $ft=0,199\text{mm}$, respectivamente. Para o aço AISI 410 a força média resultante ficou próximo à 70N e 110N para os valores de avanço citados acima. A ordem de magnitude das forças são condizentes com os resultados das propriedades de resistência mecânica da Tab. (2).
- Para continuidade deste trabalho pretende-se calcular a pressão específica de corte e correlacionar matematicamente estes valores obtidos do aço superduplex com aqueles obtidos pelos aços AISI 316 e AISI 410. Assim, pretende-se diminuir a necessidade de dados de força de corte experimentais do aço superduplex, que como foi visto apresenta baixa usinabilidade e é comercialmente 3x mais caro que o aço AISI 316 e 6x mais caro que o aço AISI 410.

5. REFERÊNCIAS

Bastos, I.N., Tavares, S.S., Dalard, F. and Nogueira, R.P., 2007. "Effect of microstructure on corrosion behavior of superduplex stainless steel at critical environment conditions". *Scripta Materialia*, Vol. 57, No. 10, pp. 913–916.

- Callister, J. and William, D., 2012. *Ciência Engenharia de Materiais - Uma Introdução*. LTC.
- Fonseca, M.C., Barbosa, M.F.M., Bartholo, R.N., Marques, A., Pardal, J.M. and Araujo, A.C., 2008. “Estudo das tensões residuais geradas na usinagem por fresamento de amostras de aço superduplex”. In *V Congresso Nacional de Engenharia Mecânica*. Salvador - Bahia.
- Lopes, J.T.B., 2011. *Estrutura e propriedades dos materiais: estrutura cristalina*. Material didático, <https://jorgeteofilofiles.wordpress.com/2011/08/epm-apostila-capitulo031.pdf>.
- Modenesi, P.J., Marques, P.V. and Bracarense, A.Q., 2005. *Soldagem-fundamentos e tecnologia*. Editora UFMG.
- Mougo, A.L., 2016. “Microfresamento do aço superduplex: uma comparação mecanística com os aços inoxidáveis austenítico e ferrítico para as forças de usinagem e avaliação da superfície usinada”. *Tese de Doutorado*.
- Mougo, A.L., Campos, F.O. and Araujo, A.C., 2014. “Experimental analysis of micromilling cutting forces on super duplex stainless steel”. In *International Conference on Micromanufacturing*. Malásia - Singapura.
- Mougo, A.L., Campos, F.O. and Araujo, A.C., 2015. “Size effect in micromilling of superduplex stainless steel”. In *International Conference on Micromanufacturing*. Milão - Italia.
- Nery, W.S., 2013. “Investigação experimental da variação da rugosidade com o aumento das forças de usinagem no torneamento”. *Dissertação*.
- Pardal, J., Tavares, S. and Fonseca, M.C., 2009. “Influence of the grain size on deleterious phase precipitation in superduplex stainless steel UNS S32750”. In *Materials Characterization*. Vol. 60.
- Pardal, J.M., 2012. *Aços Inoxidáveis Superduplex. Efeitos dos tratamentos térmicos nas propriedades mecânicas, magnéticas e resistência à corrosão*. Blucher.
- Tavares, S., Silva, V., Pardal, J. and Corte, J., 2013. “Investigation of stress corrosion cracks in a {UNS} {S32750} superduplex stainless steel”. *Engineering Failure Analysis*, Vol. 35, No. 0, pp. 88–94.
- Vogel, J.P., Nery, W.S. and Araujo, A.C., 2013. “Estudo do efeito do avanço nas forças e no acabamento de um torneamento de aço superduplex”. In *V Congresso Nacional de Engenharia Mecânica*. Penedo - Rio de Janeiro.
- Vollertsen, F., Biermann, D., Hansen, H., Jawahir, I. and Kuzman, K., 2009. “Size effects in manufacturing of metallic components”. *{CIRP} Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 58, No. 2, pp. 566–587.

6. Agradecimentos

Ao Laboratório de Pesquisa em Usinagem - LABUS do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca do Rio de Janeiro, Campus Maracanã, por disponibilizar a máquina-ferramenta e o sistema de aquisição de força de corte para este trabalho.

7. RESPONSABILIDADE AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

CUTTING FORCES DURING THE TURNING PROCESS OF AISI 316, AISI 410 AND UNS S32760 STAINLESS STEELS

Marina Nogueira Fonseca, marinanogueira97@gmail.com¹

Adriane Lopes Mougo, adriane.mougo@gmail.com¹

¹Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, Campus Nova Iguaçu, RJ, Brasil

Abstract: Cutting force is one of the most representative variables of the machining process. The measurement of this force contributes to the understanding of the process and allows the design of the machine tools, the control of energy consumption and the increase of productivity. The cutting force depends on the cutting parameters, the tool geometry and the workpiece microstructure. Super duplex stainless steel is an extremely corrosion resistant alloy designed to work in very demanding applications in which parts are exposed to corrosive environments. Its chemical composition and microstructure cause high corrosion resistance due to pits and cracks by chlorides, but the machinability of these alloys is generally poor and results in long production cycles and high tool costs. This article presents an experimental study on turning superduplex UNS S32760 stainless steel and compare the cutting forces with AISI 316 and AISI 410 steels using different feed per tooth and cutting velocity. The design of experiments was developed from two cutting speed levels (628.3 and 1005.3 m / min) and two advance levels (0.094 and 0.199 mm), by keeping the cutting depth constant at 0,25 mm.

Palavras-chave: Turning process, cutting forces, AISI 316, AISI 410, UNS S32760.