

MODELO MECANÍSTICO PARA A PRESSÃO ESPECÍFICA DE CORTE DO AÇO INOXIDÁVEL SUPERDUPLEX*

Felipe Oliveira Arydes¹
Marina Nogueira da Fonseca¹
Adriane Lopes Mougó²

Resumo

A pressão específica de corte pode ser utilizada também como índice de usinabilidade dos materiais e é influenciada principalmente pelo material da peça e pelos parâmetros de corte. Os aços duplex e superduplex apresentam estrutura bifásica composta de ferrita e austenita que conferem a este aço alta resistência mecânica, resistência à corrosão e conseqüentemente pela sua baixa usinabilidade, devido ao encruamento. O objetivo deste trabalho é propor um modelo mecanístico para a determinação da pressão específica de corte dos aços superduplex 32760 como uma combinação da pressão específica de corte de cada fase. Representando as fases austenítica e ferrítica foram utilizados os aços inoxidáveis austenítico AISI 316 e ferrítico AISI 410, respectivamente. O procedimento de calibração foi realizado para dois níveis de velocidade de corte e dois níveis de avanço por dente, com a profundidade constante. Os resultados mostraram que o modelo heterogêneo pode simular o material pela composição entre as fases e que a partir dos coeficientes de calibração.

Palavras-chave: Torneamento; Pressão específica de corte; Aço superduplex.

MECHANISTIC MODEL FOR SPECIFIC CUTTING PRESSURE OF THE SUPERDUPLEX STAINLESS STEEL

Abstract

The specific cutting pressure is the effective energy consumed to remove a unit of the volume from a material and is influenced by the workpiece material and by the cutting parameters. Duplex and superduplex stainless steels presents a biphasic structure composed of austenite and ferrite grains that give high mechanical resistance, corrosion resistance and low machinability due to its hardening. This paper deals with the study of the mechanistic model to determine the specific cutting pressure of superduplex stainless steel UNS S 32760 as a combination of the specific pressure of both of its phases: AISI 316 (austenitic phase) and AISI 410 (ferritic phase). The calibration procedure was made for two levels of cutting speed and two levels of feed per tooth, with a constant depth. The results show that the heterogeneous model can simulate the material by the composition between its phases and that from the respective AISI 316 and AISI 410 calibration coefficients.

Keywords: Turning; Specific cutting pressure; Superduplex stainless steel.

¹ Estudante, Graduação, Bolsista de Iniciação Científica, 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

A usinagem consiste no método baseado na retirada de material por cisalhamento com o objetivo de produzir peças, ferramentas e estruturas para diferentes setores industriais. A análise dos resultados da usinagem serve como um indicativo da resistência mecânica dos materiais, da resistência térmica, da rugosidade de superfície, entre outros [1].

Neste processo de fabricação muitos parâmetros são relevantes para calcular a área do cavaco e, finalmente, a pressão específica de corte. A pressão específica de corte é a força necessária de remoção de uma área de corte equivalente a 1mm^2 e depende de vários parâmetros, como por exemplo a composição química e os elementos de liga do material da peça e da ferramenta de corte, a utilização de fluido de corte, os parâmetros de usinagem, a rigidez da máquina ferramenta, a taxa de desgaste e a vida útil da ferramenta, entre outros [1].

O torneamento é a usinagem que consiste em dois movimentos: o movimento de rotação da peça e o de avanço da ferramenta. Este processo geralmente é aplicado em materiais em forma cilíndrica com a ferramenta avançando em sentido linear gerando formas simples, porém extremamente cuidadosas. Além disso, dentre os processos de usinagem, o torneamento é o mais simples e mais utilizado para a fabricação de componentes mecânicos nos mais diversos tipos de materiais, e entre estes materiais, encontram-se os aços inoxidáveis duplex e superduplex [2, 3, 4].

Estes aços apresentam propriedades extremamente relevantes na aplicabilidade industrial devido a sua excelente resistência a corrosão, seus altos valores de resistência mecânica e elevada tenacidade à impactos [5]. Essas características e as demais são explicadas pela sua principal característica: uma microestrutura bifásica composta por ferrita e austenita presentes em proporções semelhantes, onde cada fase concede determinadas características ao material [6].

Por exemplo, a presença da fase ferrítica confere um aumento considerável do limite de resistência mecânica e corrosiva sob tensão nos aços em questão, quando comparados com os inoxidáveis austeníticos. Desta forma, esse tipo de aço se diferencia dos inoxidáveis austeníticos e ferríticos, explicando assim a sua alta utilização no Brasil em setores industriais, como por exemplo, em indústrias petroquímicas e navais assim como sua utilização em trocadores de calor, tubulações bombas e outros componentes necessários para a produtividade deste setor [5].

O estudo dos aços superduplex faz parte de uma categoria de materiais ainda em expansão. É possível observar três linhas de pesquisa voltadas ao estudo destes aços. O primeiro grupo trata do comportamento do material em meio agressivo e a influência de tratamento térmico na resistência à corrosão [6, 7, 8]. O segundo grupo investiga a influência das condições de usinagem na qualidade das peças fabricadas [2, 3, 4, 9]. Por último, o terceiro grupo investiga a microusinagem dos aços inoxidáveis, duplex e superduplex [10, 11]. Dentre os aços mais estudados os aços austeníticos ganham destaque pela elevada resistência à corrosão associada aos 8% de níquel na sua composição química. A área de investigação destes aços trata da influência dos parâmetros de corte e do tamanho médio do grão na vida útil da ferramenta e na integridade da peça usinada. A usinagem do aço superduplex pode apresentar as mesmas problemáticas já estudadas para outros materiais heterogêneos. Assim, torna-se importante conhecer as características do material, principalmente aquelas que influenciarão na força de corte e, por consequência, na vida útil da ferramenta de corte [12].

É importante lembrar que muitas respostas são obtidas através de dados experimentais bastante custosos devido ao preço das ferramentas, das máquinas ferramentas e dos equipamentos de sensoriamento, além do risco de fabricar peças com erros geométricos e dimensionais causados pela seleção inadequada dos parâmetros de corte. Por este motivo torna-se evidente a necessidade do modelamento dos processos de usinagem para prever, por exemplo, a força de usinagem que é um dos fatores que indica a vida útil da ferramenta e a qualidade da peça fabricada.

Neste trabalho propõe-se calibrar um modelo mecanístico para a determinação da pressão específica de corte dos aços inoxidáveis a partir de dados experimentais de força de corte. A partir da obtenção dos coeficientes de calibração dos aços AISI316 e AISI 410 propõem-se um novo modelo linear para prever a pressão específica de corte do aço superduplex e reduzir a necessidade de futuros dados experimentais de força de corte para este aço.

2 CÁLCULO DA PRESSÃO ESPECÍFICA DE CORTE

No torneamento a força de corte experimental é obtida a partir da força resultante, apresentada na (Equação 1), formada entre a força de avanço F_f (direção x), a força passiva F_p (direção y) e a força de corte F_c (direção z), como mostra a (Figura 1). A pressão específica de corte (K_t) é obtida a partir da força resultante e da área da seção transversal do cavaco (A_c), (Equação 2). Onde A_c é dada pela multiplicação entre o avanço da ferramenta (f) e a profundidade de corte (a_p), como mostrado na (Equação 3).

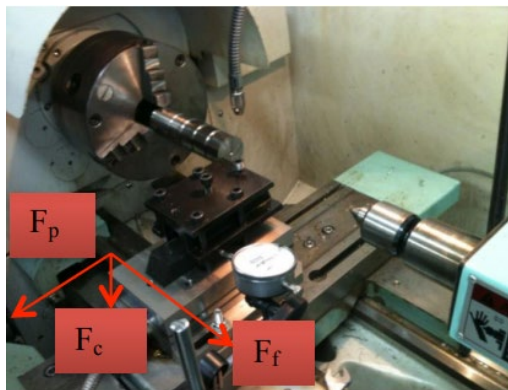


Figura 1. Decomposição das forças de corte no torneamento [2].

$$F_r = \sqrt{F_f^2 + F_p^2 + F_c^2} \quad (1)$$

$$F_r = K_t * (f * A_c) \quad (2)$$

$$A_c = f * a_p \quad (3)$$

Com a determinação da pressão específica a partir de dados experimentais da força de corte é possível calibrar uma equação utilizando o modelo mecanístico da (Equação 4). Onde V_c é a velocidade de corte.

$$\ln K_t = a_0 + a_1 \ln f + a_2 \ln V_c + a_3 \ln (f * V_c) \quad (4)$$

Este modelo foi validado para o microfresamento para o aço superduplex UNS S32750 [12]. Com a (Equação 4) e os valores da força específica experimental, pode-se calcular os coeficientes a_0 , a_1 , a_2 e a_3 através do sistema de equação linear apresentado abaixo.

$$\begin{bmatrix} 1 & -\ln f_t^- & \ln V_c^- & \ln f_t^- \times \ln V_c^- \\ 1 & -\ln f_t^+ & \ln V_c^+ & \ln f_t^+ \times \ln V_c^+ \\ 1 & -\ln f_t^- & \ln V_c^- & \ln f_t^- \times \ln V_c^+ \\ 1 & -\ln f_t^+ & \ln V_c^+ & \ln f_t^+ \times \ln V_c^+ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{t1} \\ K_{t2} \\ K_{t3} \\ K_{t4} \end{bmatrix}$$

No entanto, os resultados obtidos a partir da (Equação 4) não fornecem uma relação mecânica entre o aço superduplex e os aços ferrítico AISI 410 e austenítico AISI 316. Para que esta relação seja alcançada, utiliza-se uma combinação que seja capaz de calcular o valor da pressão específica de corte do aço superduplex como sendo uma função linear dos outros dois aços, como apresentado na (Equação 5). Onde a , b e c são os novos coeficientes de calibração da pressão específica de corte e podem ser obtidos resolvendo um sistema semelhante ao da (Equação 4).

$$K_{t_superduplex} = aK_{t316} + bK_{t410} + c(5)$$

Assim, espera-se ser possível calcular a pressão específica do aço superduplex a partir das pressões específicas dos aços inox que simulam separadamente as fases ferrita (AISI 410) e austenita (AISI 316). Com a devida calibração da (Equação 5) não serão necessários exaustivos dados experimentais de usinagem para o superduplex, já que este aço é comercialmente mais caro que os demais.

2 MATERIAIS, EQUIPAMENTOS E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

2.1 Materiais e ferramenta de corte

Neste artigo, os materiais levados em conta foram o UNS S 32760 (aço inoxidável superduplex), o AISI 316 (aço inoxidável austenítico) e o AISI 410 (inoxidável ferrítico), sendo que o AISI 410 apresenta uma estrutura ferrítica adequada para simular a fase ferrítica do aço superduplex no geral, enquanto o AISI 316 simula a fase austenítica. Todos os corpos de prova envolvidos apresentam diâmetro e comprimento de, respectivamente, 38 mm e 200 mm cada. As (Tabela 1) e (Tabela 2) mostram as composições químicas e as propriedades mecânicas de cada aço fornecido pelo fabricante.

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

Aço	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Cu	N	W	Co
AISI 316	0,015	0,52	1,48	16,81	10,35	2,05	0,48	0,052	-	0,12
AISI 410	0,13	0,35	0,55	12,11	0,40	0,05	0,07	0,015	-	0,030
UNS S32760	0,014	0,40	0,60	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

A ferramenta de corte utilizada foi uma pastilha de metal duro com código TCMT110204 VP15TF da Mitsubishi Materials. O porta-ferramenta foi o modelo S16R-STFCR-11, como apresentado na (Figura 2).

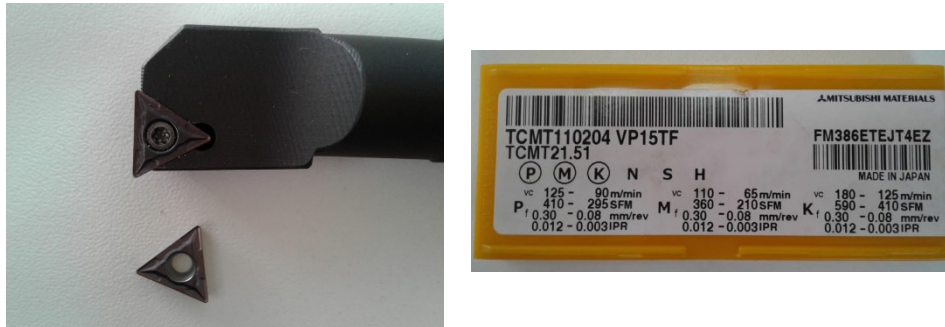


Figura 2. Porta ferramenta e pastilha para torneamento utilizados neste trabalho.

2.2 Equipamentos

Para o processo de torneamento foi utilizado o torno convencional Nardini, modelo Mascote MS 205 X 1000 (Figura 3). 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. As características do torno são apresentadas na (Tabela 3).



Figura 3. Torno Nardini Mascote instalado no LABUS – CEFET/RJ [13].

Tabela 3. Dados técnicos do torno [13].

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 $\pm 10 V$ 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 [13].

2.3 Procedimento experimental

Nesta etapa o planejamento experimental foi desenvolvido com o objetivo principal de verificar a variação da pressão específica de corte considerando os parâmetros de corte (avanço da ferramenta e velocidade de corte). 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 (Tabela 4) e (Tabela 5) apresentam, respectivamente, os dados dos experimentos e a ordem randomizada de execução.

Tabela 4. Dados experimentais

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

Tabela 5. Planejamento experimental para torneamento dos aços

Testes	Experimentos	Réplicas	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

3.1 Cálculo da força resultante

As forças de usinagem foram obtidas para a mesma ferramenta de corte, 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 4) apresenta um exemplo das forças nas direções de corte (F_c), passiva (F_p) e de avanço (F_f) para o aço AISI 316. Esta figura foi obtida a partir do torneamento com avanço de 0,094 mm e rotação de 500 rpm.

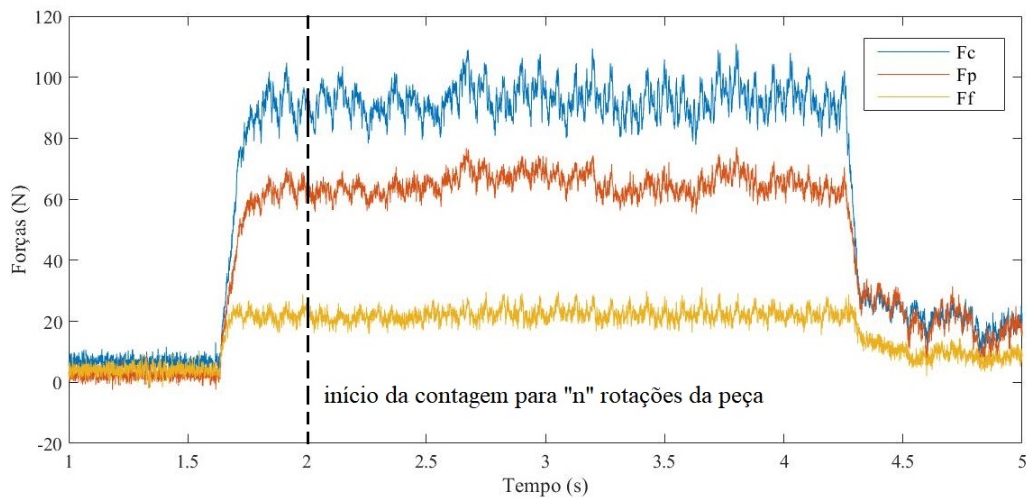


Figura 4. Força de corte completa no torneamento do aço inox AISI 316.

Os resultados apresentaram oscilação das forças de usinagem para os três materiais nas três direções de força 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 da força 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 a marcação na (Figura 4).

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 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 6) apresenta estes resultados. A (Figura 5) apresenta o resultado para a média das forças de usinagem para 20 rotações da peça para o aço AISI 316.

Tabela 6. Dados para calcular a média das forças para "n" rotações da peça.

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

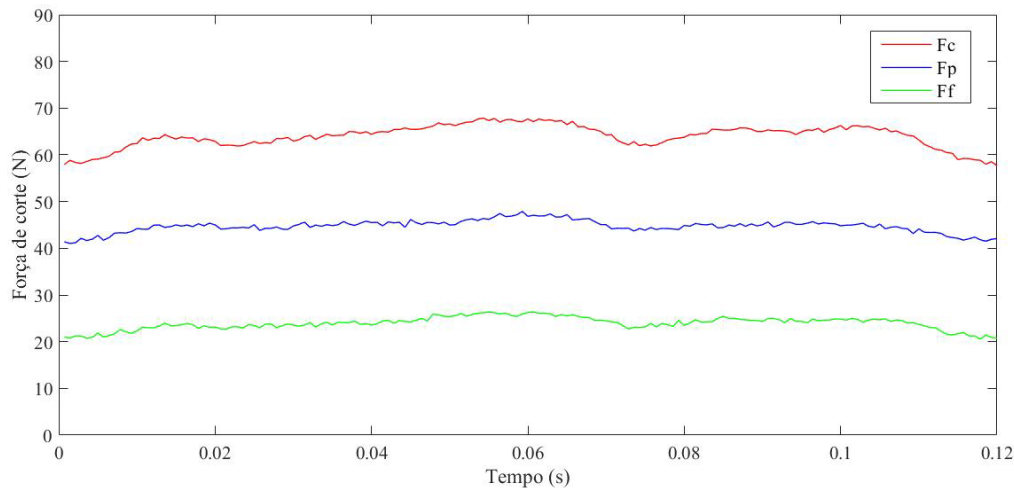


Figura 5. Força de corte completa no torneamento do aço inox AISI 316.

A partir destes resultados foi realizado o cálculo da força média resultante pela (Equação 1) para facilitar o cálculo da pressão específica de corte. A (Tabela 7) apresenta os valores destas forças.

Tabela 7. Valor da força média resultante

Avanço (mm)	0,094	0,199	0,094	0,199
Rotação (rpm)	500	500	800	800
Fr_SD (N)	88,15	133,46	89,71	131,68
Fr_316 (N)	85,07	140,62	89,56	129,25
Fr_410 (N)	70,54	112,10	70,99	107,84

3.2 Modelo mecanístico da pressão específica de corte

A partir da(Equação 2) foi calculada a pressão específica de corte experimental, considerando a área do cavaco como o avanço vs. profundidade de corte. Com este resultado o modelo mecanísticoda (Equação 4) foi resolvido e os coeficientes de calibração são apresentados na (Tabela 8). As(Figuras6, 7, 8) apresentama variação da pressão específica de corte em função do avanço e da rotação da ferramenta utilizando o modelo calibrado para cada material.

Tabela 8. Coeficientes de calibração do modelo mecanístico para os três aços.

Coefficiente	Superduplex	AISI 316	AISI 410
a0	11,7495	12,2026	12,0812
a1	-0,3818	-0,3731	-0,3687
a2	-0,2337	-0,2575	-0,2843
a3	0,6155	-0,6488	-0,6529

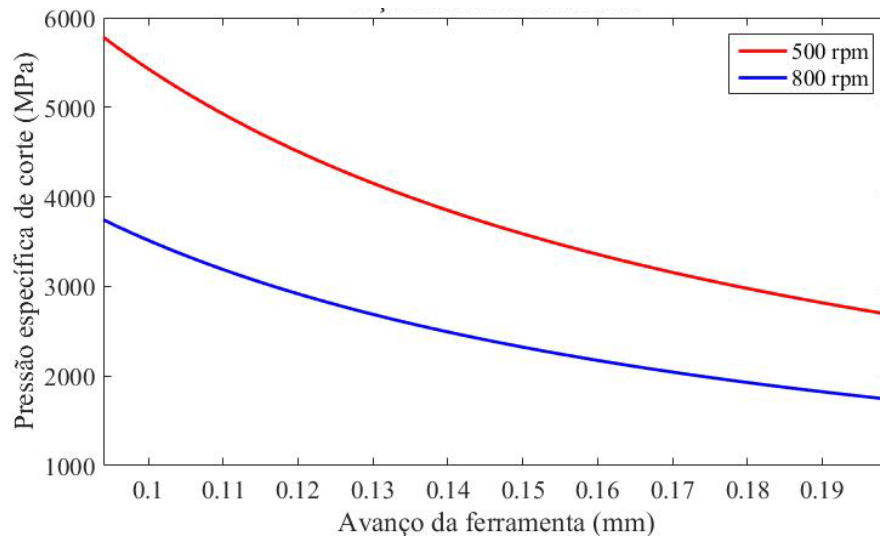


Figura 6. AISI 316: Variação da pressão específica de corte a partir do modelo mecânico calibrado.

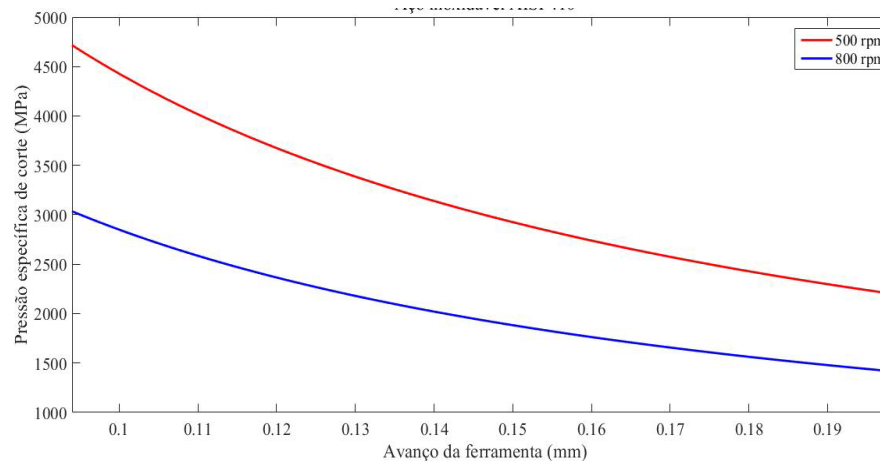


Figura 7. AISI 410: Variação da pressão específica de corte a partir do modelo mecânico calibrado.

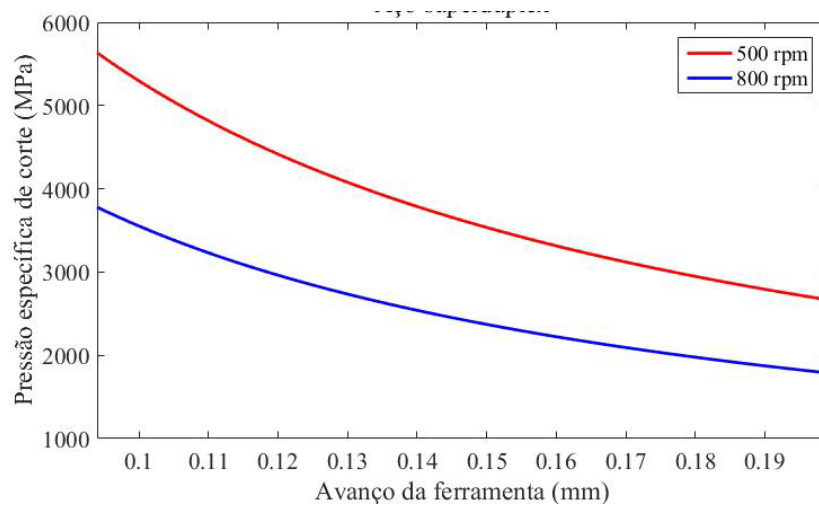


Figura 8. UNS S32760: Variação da pressão específica de corte a partir do modelo mecânico calibrado.

É possível observar que para os três aços a pressão específica de corte é menor para a rotação da ferramenta de 800 rpm. Esta ocorrência pode ser explicada pelo fenômeno de amaciamento térmico do aço ocasionado pelo aquecimento da peça para maiores rotações. Este amaciamento facilita o corte do aço, diminuindo a força de corte e, por consequência, diminuindo a pressão específica de corte. Pode-se notar também a tendência de diminuição deste resultado quando se aumenta o avanço da ferramenta.

A (Figura 9) apresenta os resultados para os três aços considerando apenas a rotação de 500 rpm da peça, que não sofre influência do aumento de temperatura. É possível observar que a curva calibrada do aço superduplex se encontra entre os dois aços inoxidáveis que simulam as fases separadas de ferrita e austenita. Deste modo, será posposta na próxima seção uma equação simples e linear que correlaciona estes resultados.

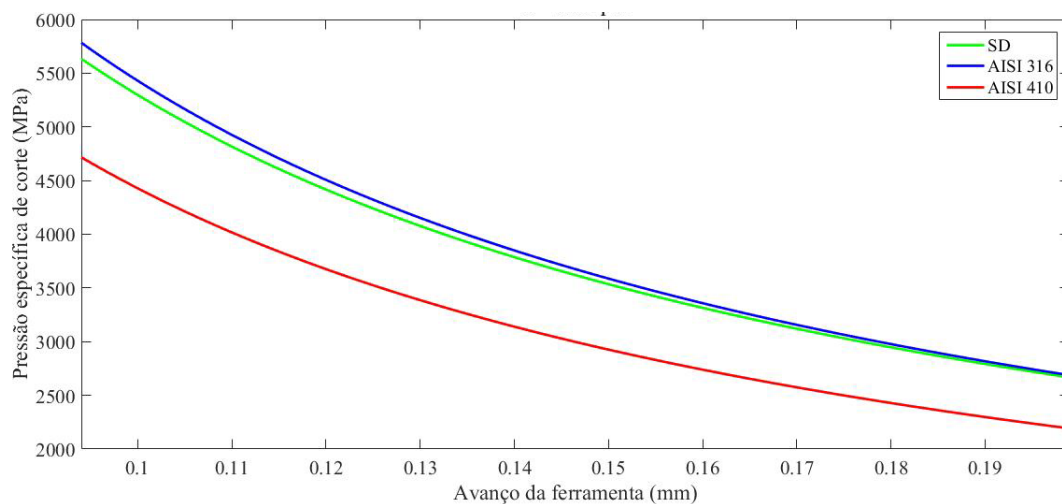


Figura 9. Variação da pressão específica de corte a partir do modelo mecânico calibrado e da rotação de 500 rpm para os três aços.

3.3 Modelo linear de Kt para o superduplex UNS S 32760

Utilizando os coeficientes de calibração da (Tabela 8) na (Equação 5) é possível calibrar os coeficientes a, b e c, como apresentado na (Tabela 9). Com estes resultados é possível calcular a pressão específica de corte do aço superduplex a partir da pressão específica de corte dos aços AISI 316 e AISI 410 que simulam, respectivamente, as fases austenita e ferrita do UNS S 32760. A (Figura 10) apresenta as curvas obtidas pelos dois modelos para rotação da ferramenta de 500 rpm.

Tabela 9. Coeficientes de calibração do modelo linear.

a	b	c
-0,9714	1,9256	-0,0130

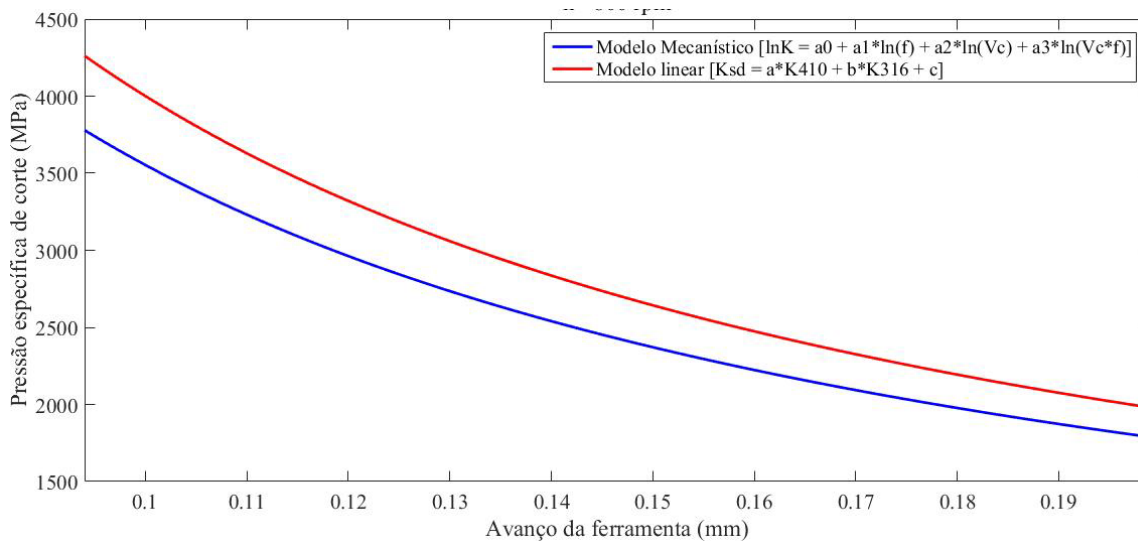


Figura 10. Variação da pressão específica de corte a partir dos modelos mecanístico e linear para o aço superduplex com rotação da ferramenta de 500 rpm.

Pode-se observar que as duas curvas seguem o mesmo perfil. Assim, apresentam maiores valores de pressão específica de corte para menores valores de avanço da ferramenta de corte. Com o aumento progressivo deste avanço, a pressão específica tende a diminuir para os dois modelos.

Finalmente, pode-se afirmar que houve uma boa concordância entre os resultados do modelo mecanístico e linear para calcular a pressão específica do aço superduplex. Deste modo é possível prever a usabilidade do aço superduplex sem a necessidade de exaustivos dados experimentais.

4 CONCLUSÃO

O material tido como objeto de estudo foi o UNS S32750 e para o objetivo deste artigo também foram utilizados os aços inoxidáveis ferrítico AISI 430 e austenítico AISI 316. O processo de usinagem utilizado foi o torneamento, com processo de calibração para dois níveis de velocidade de corte e também dois níveis de avanço por dente.

Em seguida, foi feita uma análise gráfica utilizando-se a pressão específica de corte e o avanço da ferramenta a partir do modelo mecanístico desenvolvido ao decorrer do artigo posteriormente calibrado, fazendo assim uma determinação da variação da pressão específica de corte do material.

Depois foi analisado e posteriormente desenvolvido um modelo linear para a determinação dos coeficientes de calibração para a equação da pressão específica de corte do superduplex proposto. Para este modelo, também foi feita uma análise gráfica utilizando os mesmos parâmetros, porém desta vez, foi levado em conta o modelo mecanístico já calibrado com a rotação da ferramenta a 500 rpm.

Finalmente, através da análise gráfica e linear foi possível determinar que os dois métodos utilizados apresentavam uma pequena taxa de diferença, podendo assim ser determinado como satisfatório o resultado encontrado para o problema em questão, visto à disponibilidade de recursos encontrados.

Agradecimentos

Ao Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca do Rio de Janeiro pelas bolsas de iniciação científica. Ao Laboratório de Pesquisa em Usinagem (LABUS) do CEFET Maracanã por disponibilizar a máquina-ferramenta e o sistema de aquisição de força de corte para este trabalho.

REFERÊNCIAS

- 1 Machado ÁR, Coelho RT, Abrão AM, Silva MB. Teoria da Usinagem dos Materiais. 3ª Edição. São Paulo: Editora Blucher; 2015.
- 2 Vogel J P, Nery WS, Araujo, AC. Estudo do efeito do avanço nas forças e no acabamento de um torneamento de aço superduplex. V Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, 2013. Penedo - Rio de Janeiro.
- 3 Oliveira CA, Diniz AE, Bertazzoli R. Correlating tool wear, surface roughness and corrosion resistance in the turning process of super duplex stainless steel. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. 2013; 36:775–785.
- 4 Fonseca MC, Barbosa MFM, Bartholo RN. Estudo das tensões residuais geradas na usinagem por fresamento de amostras de aço superduplex. V Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, 2008. Salvador – Bahia.
- 5 Pardal JM. Aços Inoxidáveis Superduplex. Efeitos dos tratamentos térmicos nas propriedades mecânicas, magnéticas e resistência à corrosão. Editora Blucher; 2012.
- 6 Pardal J, Tavares S, Fonseca MC. Influence of the grain size on deleterious phase precipitation in superduplex stainless steel UNS S32750. Materials Characterization. 2009; 60(3):165-172.
- 7 Tavares S, Silva V, Pardal J. Investigation of stress corrosion cracks in a UNS32750 superduplex stainless steel. Engineering Failure Analysis. 2013; 35(0): 88–94.
- 8 Bastos IN, Tavares SS, Dalard F. Effect of microstructure on corrosion behavior of superduplex stainless steel at critical environment conditions. Scripta Materialia. 2007; 57(10):913–916.
- 9 Bordinassi EC, Stipkovic MF, Batalha GF. Superficial integrity analysis in a super duplex stainless steel after turning. Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering. 2006; 18:335–338.
- 10 Araujo AC, Mougou AL, Campos FO. Experimental Analysis of Micromilling Cutting Forces on Super Duplex Stainless Steel. International conference on MicroManufacturing, 2014. Nanyang, Singapura.
- 11 Mougou, AL, Campos FO, Araujo AC. Size Effect in Micromilling of Superduplex Stainless Steel. International Conference on MicroManufacturing, 2015. Milão, Itália.
- 12 Mougou AL. 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, 2016. COPPE/UFRJ.
- 13 Nery, WS. Investigação experimental da variação da rugosidade com o aumento das forças de usinagem no torneamento. Dissertação de mestrado, 2013. CEFET/RJ.