

ANÁLISE DAS FORÇAS DE USINAGEM GERADAS PELO FRESAMENTO FRONTAL DO AÇO INOXIDÁVEL DUPLEX FORTA® DX 2304

Yachel R. Mileski¹
Mauricio R. Policena²
André J. Souza³

Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) – Departamento de Engenharia Mecânica (DEMEC) – Laboratório de Automação em Usinagem (LAUS) – Rua Sarmento Leite, nº 425 – CEP 90050-170 – Porto Alegre, RS.

¹yachelmileski@gmail.com, ²mrpolicena@gmail.com, ³ajsouza@ufrgs.br

Resumo. Forta® DX 2304 é um aço inoxidável duplex de alta resistência mecânica combinada com boas resistências à corrosão localizada e sob tensão. Por suas propriedades, apresenta baixa usinabilidade. Assim, realizou-se o fresamento frontal a seco do Forta® DX 2304 com vistas a correlacionar as variáveis de entrada (velocidade de corte “ v_c ”, avanço por dente “ f_z ” e profundidade axial de corte “ a_p ”) com as forças de usinagem (F_U) resultantes do processo. No planejamento e na análise estatística utilizou-se o experimento de Box-Behnken. Avaliaram-se as parcelas estáticas (μF_U) e dinâmicas (ΔF_U) da força de usinagem para cada combinação de parâmetros. A Transformada Discreta de Wavelet foi aplicada no tratamento dos sinais gerados (aproximação A_4 e detalhamento D_1) e na análise das vibrações. Em todos os passes, o corte se manteve em regime estável alternado entre grãos macios (ferrita) e duros (austenita) sem a presença de vibração autoexcitada (chatter). A análise de variância confirmou que “ f_z ”, “ a_p ” e a interação “ $f_z \times a_p$ ” foram significativas para as quatro variáveis resposta (μF_U , ΔF_U , A_4 e D_1). O coeficiente de determinação (R^2) explicou mais de 95% dos dados do modelo.

Palavras chave: Fresamento de aço inoxidável duplex; Forta® DX 2304; Parcelas estática e dinâmica da força de usinagem; Box-Behnken Design; Transformada Discreta de Wavelet.

1. INTRODUÇÃO

O aço inoxidável duplex (DSS) surgiu como uma liga de ferrita-austenita, em um artigo publicado por Bain e Griffiths em 1927 (Alvarez-Armas, 2008). A liga original da família duplex (S32900), predominantemente ferrítica, teve a adição de nitrogênio (N), o que aumentou a quantidade de austenita para quase 50%, melhorando então as propriedades de corrosão a cloretos, em soldas e tenacidade (Philip et al., 2015). Assim, o DSS combina os benefícios de duas fases cristalográficas: ferrita e austenita. Isso resulta em alta resistência e alta ductilidade, fazendo com que o DSS apresente maior resistência ao escoamento e à corrosão sob tensão em ambientes com cloretos, em comparação ao aço inoxidável austenítico (ASS) (IMOIA, 2014).

Assim, o *lean* DSS foi projetado com o objetivo de competir com os tradicionais ASS 304/304L e 316 na indústria de petróleo e gás. Estas ligas são menos propensas à formação de fase sigma (σ) do que os DSS *standard* (2205) e *super* (2507), pois contêm menores teores de níquel (Ni) e molibdênio (Mo), e maiores teores de N e manganês (Mn). Há o caso do *lean* com pouquíssimo Mo representado pelo 2101 que contém menos de 3% Ni e cerca de 0,3% Mo. A corrosão por fendas (*crevice*) pode ser mais severa na classe *lean* devido aos baixos teores de Ni e a resistência à corrosão por pite pode ser prejudicada pelos altos teores de Mn (Lai et al., 2012).

O Forta® DX 2304 é classificado com *lean* DSS (valor equivalente de resistência à corrosão por pite PRE = 21 ~ 27) com boa resistência à corrosão localizada e corrosão sob tensão em combinação com alta resistência mecânica. Por isso é utilizado em pontes, componentes para projeto estrutural, tanques de armazenamento, vasos de pressão, trocadores de calor, aquecedores de água, rotores, impulsores e eixos (Outokumpu, 2018).

A usinabilidade do DSS 2304 é pouco explorada na literatura. Sabe-se que teores de Mn e Mo são superiores ao ASS 316, por exemplo. Altos teores de Mn induzem ao encruamento (Machado et al., 2015). Já o Mo é responsável pela estabilização da ferrita e formação de carbonetos, o que aumenta o desgaste da ferramenta e reduz a usinabilidade (Youssef, 2016). Entretanto, não foram encontrados estudos comparando a usinabilidade de ASS 316 com o DSS 2304 em fresamento. Segundo a Outokumpu (2018), devido à maior resistência do DSS 2304 em relação ao ASS 316, as forças de corte serão maiores, o que aumenta o risco de vibrações. Necessita de uma configuração estável, ferramenta mais curta possível, sistema de fixação rígido, além de ferramentas de corte com uma geometria positiva. Os DSS são propensos a encruar; assim, uma cunha não afiada gera uma superfície dura e diminui a vida útil da ferramenta. Problemas ocorrem quando a velocidade de corte é muito baixa. O resultado é um acabamento ruim e uma vida curta para a ferramenta.

O conhecimento das componentes ortogonais da força de usinagem permite o entendimento acerca da potência necessária de corte e as forças atuantes nos elementos da máquina-ferramenta. Permite avaliar também o desgaste das ferramentas e a formação de cavacos, podendo assim identificar a usinabilidade do material (Shaw, 2005). Selvaraj (2017) identificou que o avanço teve um percentual de contribuição superior a 60% para a rugosidade e a força de corte no fresamento do DSS 2205. O incremento na rotação reduziu os valores de ambas variáveis, mas aumentou o desgaste da ferramenta. A alta rotação combinada com baixos avanço e profundidade de corte resultaram na força de corte considerada ideal. Sambadana e Jagadeesha (2019) avaliaram as forças de corte com modelos previstos por elementos finitos (FEM) que foram similares com os dados experimentais no fresamento a seco do DSS 2205. As componentes da força de usinagem foram influenciadas pelo avanço por dente que aumentaram com o incremento do mesmo. A força radial apresentou o maior valor, seguida pela força tangencial e pela força axial.

Na análise de sinais, os dados de força adquiridos precisam ser processados. A Transformada Discreta de Wavelet (DWT) tem sido utilizada para analisar dados em função do tempo em uma grande variedade de aplicações. A análise de Wavelet provê uma caracterização espectro-temporal para identificar os modos dominantes em uma série de tempo e como esses modos variam com o passar do tempo (Sen et al., 2012). Para detectar a vibração baseados na DWT, realiza-se a decomposição de sinal multinível, isto é, o sinal de força é decomposto em um conjunto de coeficientes de aproximação (componente de baixa frequência) e de detalhamento (componente de alta frequência) (Ma et al., 2013).

Diante deste cenário, este trabalho pretende avaliar a relação entre as parcelas estáticas e dinâmicas da força de usinagem geradas no fresamento frontal a seco do Forta® DX 2304 e as variáveis independentes de entrada do processo (velocidade de corte v_c , avanço por dente f_z e profundidade axial de corte a_p). Através da aplicação da Transformada Discreta de Wavelet (DWT) no tratamento dos sinais gerados busca-se avaliar as vibrações de baixa e alta frequência geradas durante o corte do material. Os dados de saída, analisados estatisticamente, visam comparar a dispersão presente no conjunto de dados, possibilitando uma avaliação mais detalhada dos efeitos provocados pelas variáveis de controle.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A Tabela 1 apresenta a composição química do aço inoxidável duplex Forta® DX 2304 medida com espectrômetro de emissão atômica BRUKER Q2 ION e comparada com a norma ASTM A240/A240M.

Tabela 1. Composição química do aço inoxidável duplex Forta® DX 2304 (% massa).

	Cr	Ni	Mn	Si	Mo	Cu	C	P
Medido	20,5	5,12	1,79	0,52	0,42	0,40	0,06	0,05
Normalizado	21,5~24,5	3~5,5	2,5 max.	1,0 máx.	0,05~0,60	0,05~0,60	0,03	0,04 max.

Os corpos de prova foram placas retangulares com 100 x 90 x 6 mm com furações para a sua fixação no dinamômetro piezelétrico. O fresamento de topo foi realizado a seco no centro de usinagem ROMI Discovery 308 com potência máxima de 5,5 kW e rotação máxima de 4000 rpm. A ferramenta de corte foi uma fresa de topo Walter Tools Xtra-tec® F4042R.W20.02 com diâmetro nominal de 20 mm e suporte para dois insertos Walter Tools Tiger-tec Silver® ADMT10 classe WSM35 (metal-duro com cobertura PVD de TiAlN + Al₂O₃) com raio de ponta 0,4 mm. O comprimento da haste em balanço foi de 30 mm. O avanço da fresa foi na direção longitudinal (eixo x) com largura de corte (a_c) igual ao diâmetro nominal da ferramenta (20 mm). Em cada placa, seis passes com 34 mm de comprimento foram realizados, considerando a penetração da ferramenta na maior medida da placa (100 mm). A Figura 1 mostra o sistema experimental.

Para randomizar as combinações das variáveis de entrada utilizou-se o experimento de Box-Behnken (BBD) através do software Minitab® 18. O BBD é um método de otimização estatística que visa a obtenção dos melhores níveis em um conjunto de fatores que exerçam influência sobre determinado processo. O projeto propõe a utilização de três níveis para cada variável de controle, visando desenvolver uma superfície de resposta. Os projetos são constituídos pela combinação da análise fatorial com projetos de blocos incompletos. O BBD de três fatores requer apenas 12 execuções, mais as três execuções no ponto central (Policena et al., 2018). Este projeto de experimentos é indicado quando o número de execuções deve ser limitado pela restrição de material imposta pelo seu alto custo. Sendo assim, cada passe realizado utilizou uma combinação diferente dos parâmetros independentes de entrada (v_c , f_z e a_p) (ver Tab. 2). Os níveis dos parâmetros foram determinados com base nas informações disponibilizadas pelos fornecedores da ferramenta e do DSS utilizado.

Durante cada passe, as componentes ortogonais da força de usinagem (F_x , F_y , F_z) foram coletadas através de um Sistema Monitor constituído do dinamômetro piezelétrico Kistler® 9129AA (aquisição de sinais analógicos) fixado na mesa da máquina-ferramenta, do amplificador de carga Kistler® 5070A (condicionamento dos sinais analógicos) e de um computador dedicado contendo a placa de aquisição de dados DAQ Measurement Computing® PCIM-DAS 1602/16 (conversão A/D) e o software LabView™ 9.0 (processamento dos sinais digitais). Os dados foram adquiridos pela placa DAQ a uma taxa de 5 kS/s, e os sinais foram monitorados pelo LabVIEW™ no domínio do tempo durante o processo. A análise e o pós-processamento dos dados de força foram realizados utilizando o software Matlab® 2015. O tempo de aquisição de dados foi estimado de acordo com tempo de corte calculado em função dos parâmetros de corte.

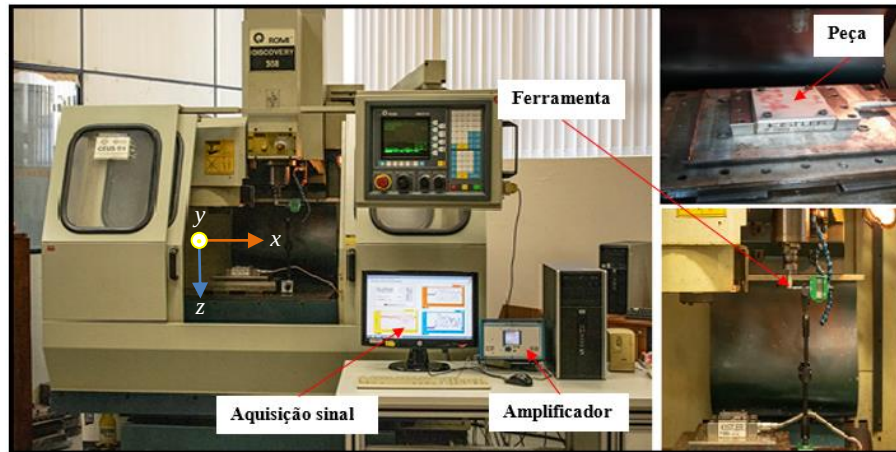


Figura 1. Configuração do sistema experimental.

A seleção dos dados para o pós-processamento desconsiderou a entrada e a saída da fresa na placa (instabilidades). Os intervalos de pontos de amostragem (IPA) e os tempos de aquisição seguiram o modelo proposto por Garcia (2019).

Após a coleta dos dados de força, a força resultante, ou força de usinagem (F_U) foi calculada através da Eq. (1), bem como as parcelas estáticas e dinâmicas de cada passe. A parcela estática (μF_U) representa a média aritmética de 1800 pontos de F_U considerados no IPA, enquanto que a parcela dinâmica (ΔF_U) indica a flutuação de F_U . Considerando um intervalo de confiança de 95%, $\Delta F_U = \pm 1,96 \sigma$, onde σ é o desvio-padrão dos pontos de F_U no IPA.

$$F_U = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2} \quad \text{ou} \quad F_U = \mu F_U \pm \Delta F_U \quad (1)$$

Para aplicação da DWT na força de usinagem (F_U) é necessário, primeiramente, escolher qual o tipo de “família” da transformada será utilizada. Em situação semelhante, Sória (2016) afirma que a família Daubechies “db6” com 4 níveis apresenta melhores respostas, com curvas de resposta mais suavizadas. Assim, com a família e o nível da DWT selecionados, utilizou-se o toolbox do Matlab® 2015 para determinar a melhor aproximação e o melhor detalhamento do sinal de F_U . O sinal da aproximação no quarto nível A_4 apresenta as baixas frequências e as maiores amplitudes do sinal, enquanto que o primeiro nível de detalhamento D_1 exibe frequências maiores e amplitudes muito menores que A_4 .

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Tabela 2 apresenta os valores referentes às parcelas estáticas (μF_U) e dinâmicas (ΔF_U) das forças de usinagem (F_U), e as aproximações (A_4) e detalhamentos (D_1) de F_U de acordo com cada passe realizado.

Tabela 2. Relação entre as forças de usinagem e os parâmetros de entrada.

Passe	v_c (m/min)	f_z (mm/z)	a_p (mm)	t_{aq} (s)	IPA	μF_U [N]	ΔF_U [N]	A_4 RMS [N]	D_1 RMS [N]
1	80	0,125	0,2	30	27644 – 30000	75	46	79	0,7
2	80	0,200	0,4	30	16144 – 18500	178	108	186	1,4
3	80	0,125	0,6	20	27644 – 30000	195	127	206	1,2
4	95	0,050	0,6	20	61516 – 63500	116	72	121	0,9
5	110	0,050	0,4	20	53286 – 55000	84	47	88	0,7
6	95	0,050	0,2	30	61516 – 63500	59	28	61	0,5
7	110	0,125	0,2	15	20186 – 21900	85	53	89	0,6
8	80	0,050	0,4	30	72644 – 75000	94	54	98	0,7
9*	95	0,125	0,4	15	23016 – 25000	146	93	154	1,1
10	95	0,200	0,2	15	13866 – 15850	135	81	141	0,9
11	95	0,200	0,6	15	13866 – 15850	307	194	323	3,0
12	110	0,125	0,6	15	20186 – 21900	208	134	219	1,6
13	110	0,200	0,4	15	11786 – 13500	167	116	177	1,4
14*	95	0,125	0,4	15	23016 – 25000	138	84	145	1,1
15*	95	0,125	0,4	15	23016 - 25000	140	87	147	1,1

*Passes com as variáveis de controle no ponto central.

3.1 Análise de Forças

A Figura 2 apresenta uma demonstração gráfica das parcelas estáticas e dinâmicas de F_U . Analisando o gráfico, os passes onde ocorreram os menores valores médios da força de usinagem ($\mu F_U < 100$ N) foram aqueles com $a_p = 0,2$ mm e $f_z \leq 0,125$ mm/z (passes 1, 6, 7) e $a_p = 0,4$ mm e $f_z = 0,050$ mm/z (passes 5 e 8). No caso, as forças resultantes são menores nos passes onde a área da seção transversal de corte é menor. O contrário ocorre justamente quando se tem maiores valores de a_p (0,6 mm) e f_z (0,2 mm/z), no caso, o passe 11. Esse fato é justificado pois o aumento do avanço e da profundidade de corte resulta em um aumento das vibrações e das forças resultantes, pois, conforme Diniz et al. (2013), a área da seção transversal de corte (avanço e profundidade) é diretamente proporcional às forças de corte pois ocorre um incremento do comprimento de contato entre ferramenta-peça.

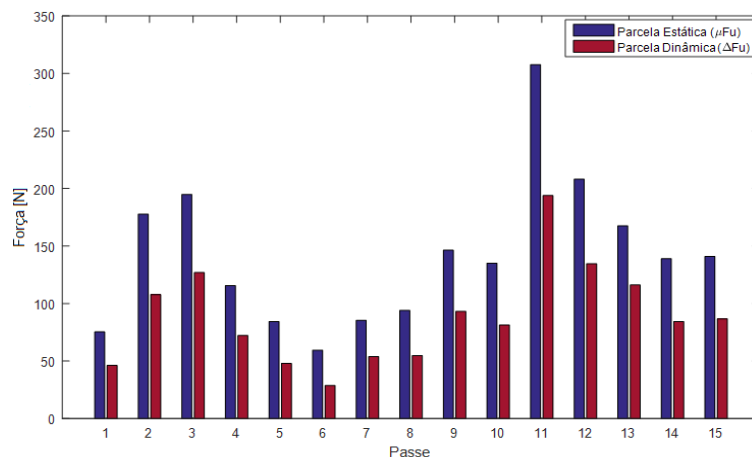


Figura 2. Parcelas estáticas e dinâmicas da força de usinagem em cada passe.

Em nenhum caso a parcela dinâmica (ΔF_U) é superior à parcela estática (μF_U), indicando que o processo atuou em regime estável de operação (Sória, 2016). A magnitude da força estática é interpretada como um valor médio dentro de um domínio de tempo especificado dos dados amostrados para estabelecer a magnitude da força de corte. Por outro lado, a força dinâmica está associada aos componentes oscilatórios analisados no domínio da frequência dessa amostragem (Dimla Snr., 2000). A análise da estabilidade em fresamento é complicada devido à ferramenta rotativa, múltiplos dentes de corte, forças de corte periódicas, direções de carga de cavacos e múltiplos graus de liberdade em dinâmica estrutural (Wiercigroch e Budak, 2001). Sória (2016) mostrou que em alguns casos o acréscimo no valor da profundidade axial de corte torna o corte mais próximo de regiões instáveis, causando vibrações *chatter*. Na operação de fresamento, três processos ocorrem simultaneamente: cisalhamento; deslizando entre o cavaco e a face da ferramenta; e deslizando entre a peça e o flanco da ferramenta. Além disso, há um efeito de regeneração causado por uma espessura variável do cavaco, e cada um desses processos pode ser responsável pela geração de vibrações (Wiercigroch e Budak, 2001). As ligas duplex têm uma estrutura formada por cerca de 50% de ferrita e 50% de austenita; assim, grãos de diferentes durezas coexistem lado a lado. A ferramenta alternará o corte entre grãos macios e duros, tendendo a iniciar uma vibração autoexcitada (*chatter*) na ação de corte (Koyee et al., 2014).

Após a realização da análise das parcelas da força de usinagem, foi aplicada a DWT utilizando a família *Daubechies* db6 com quatro níveis. A Figura 3a apresenta os valores RMS das aproximações A_4 (baixa frequência) e a Fig. 3b dos detalhamentos D_1 (alta frequência) para os 15 passes. O passe 11 apresenta os maiores valores de A_4 com aproximadamente 320 N, enquanto o passe 6 apresenta os menores, cerca de 60 N. No passe 11 tem-se o maior nível para o avanço por dente e profundidade axial de corte, o que pode ter contribuído para o incremento da força devido a uma maior seção transversal de corte, o que elevou os esforços.

Segundo Diniz et al. (2013), a área da seção transversal de corte é diretamente proporcional as forças de corte. Outro fator que pode ter interferido no resultado é a formação dos cavacos. Childs et al. (2000) abordam que a frequência de formação de cavacos é linearmente proporcional à velocidade de corte e inversamente proporcional ao avanço. Na ausência de vibração regenerativa, se ocorrer uma variação periódica da força de corte devido à formação localizada de cavacos descontínuos, serrilhados ou cisalhados, pode ocorrer uma vibração autoexcitada. Além disso, a presença de altos teores de Mn aumenta a resistência e a tenacidade do material (Machado et al., 2015) o que pode induzir ao encruamento exigindo maior energia para a formação do cavaco do Forta DX 2304 (Oliveira Jr., 2013). Os maiores valores de D_1 ocorrem no passe 11, cerca de 3 N e os menores no passe 6 (0,5 N). São valores baixos que indicam um corte em regime estável. Acredita-se que os parâmetros de corte contribuíram nas menores oscilações periódicas (baixas frequências e maiores amplitudes) representadas pela aproximação (A_4). Sória (2016) afirma que um contato maior entre ferramenta-peça (como é o caso do passe 11, por possuir os maiores níveis de f_z e a_p) intensifica a vibração em baixas frequências.

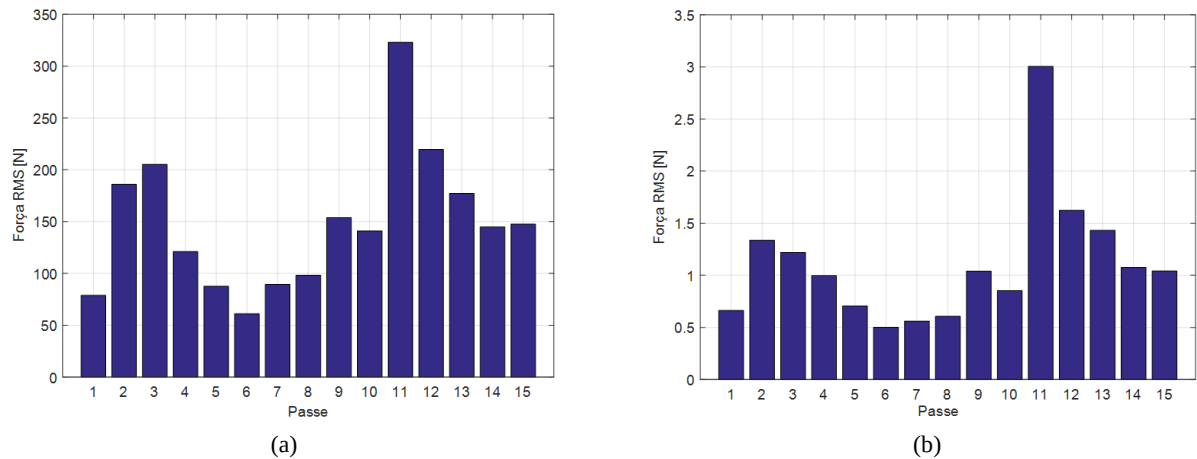


Figura 3. Força de Usinagem (RMS): (a) Aproximações (A_4); (b) Detalhamentos (D_1).

Para identificar a estabilidade do regime nos 15 passes, as forças de usinagem (F_U), aproximações (A_4) e detalhamento (D_1) são apresentados nos passes 6 (Fig. 4) e 11 (Fig. 5). Evidencia-se a diferença de comportamento entre os dois passes.

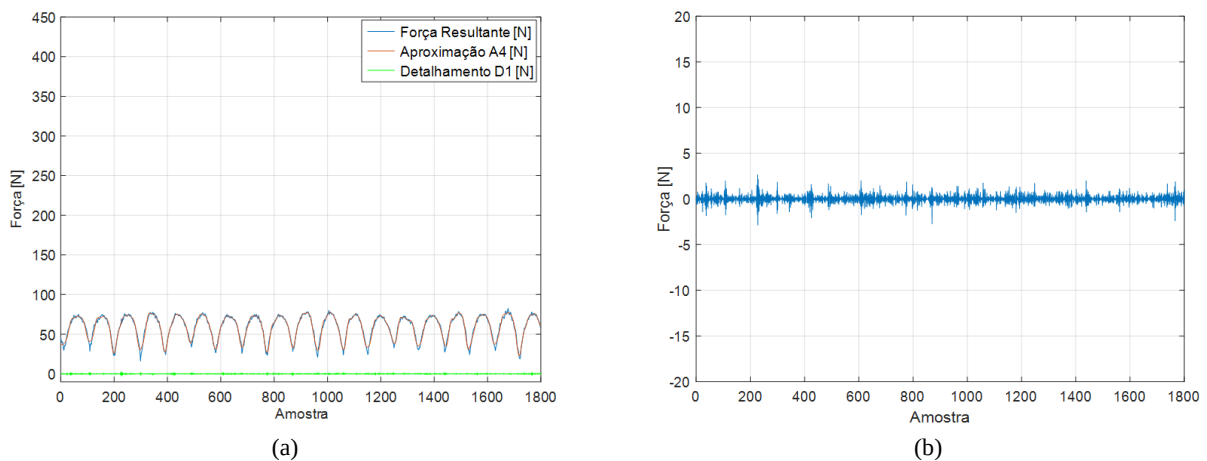


Figura 4. DWT do Passe 6 ($v_c = 95$ m/min, $f_z = 0,050$ mm/z, $a_p = 0,2$ mm): (a) F_U e A_4 ; (b) D_1 .

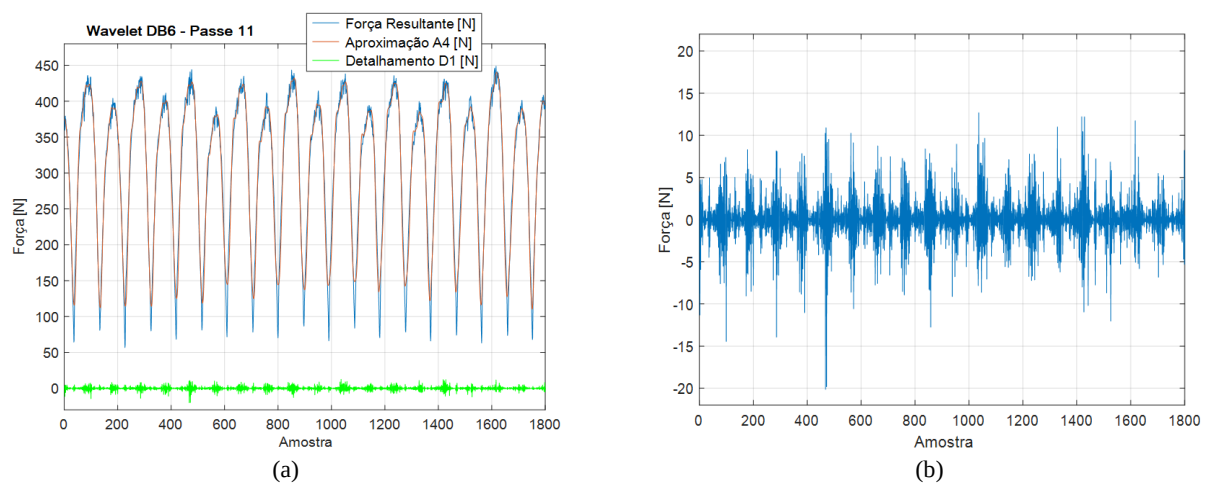


Figura 5. DWT do Passe 11 ($v_c = 95$ m/min, $f_z = 0,200$ mm/z, $a_p = 0,6$ mm): (a) F_U e A_4 ; (b) D_1 .

No passe 6 (Fig. 4a) a magnitude dos valores de F_U e A_4 variam de 20 a 80 N (amplitude pico a pico de 60 N). O valor da velocidade de corte é médio ($v_c = 95$ m/min) enquanto os valores de avanço por dente (f_z) e profundidade axial de corte (a_p) são mínimos. Outokumpu (2018) e IMO A (2014) indicam uma faixa de velocidades de corte de 130 a

150 m/min para fresamento de acabamento do Forta® DX 2304. O detalhamento D_I (Fig. 4b) apresenta valores variando entre ± 3 N. Com parâmetros de corte inferiores ($v_c = 30$ m/min, $f_z = 0,04$ mm/dente, $a_p = 0,5$ mm), Sória et al. (2019) obtiveram ± 5 N no fresamento do aço inoxidável AISI 304, o que corrobora a influência de f_z e principalmente de a_p .

Conforme supracitado, o passe 11 (Fig. 5a) apresenta os maiores valores de F_U e A_4 entre todos os passes, variando entre 50 N a 450 N (amplitude pico a pico de 400 N). A seção transversal de corte é máxima (f_z e a_p máximos) com v_c média. A elevação dessas variáveis contribuiu no maior esforço de corte, aliadas a uma relação $a_p/r_e = 1,5$, o que pode ter induzido instabilidades de alta frequência no corte (Sória, 2016). Os detalhamentos D_I (Fig. 5b) confirmam essa tendência, com valores variando de -20 N a +13 N, porém, dentro do regime estável não caracterizando vibração *chatter*. Feng et al. (2015) aborda que a mudança abrupta de amplitude dos sinais de decomposição pode ser vista como uma evidência de vibração *chatter*. O incremento no detalhamento evidencia a qualidade da topografia da superfície que deve ser analisada em diferentes zonas.

3.2 Análise Estatística

Com o objetivo de avaliar os efeitos dos fatores independentes e os efeitos das interações destes fatores, a análise de variância (ANOVA) foi realizada para comparar a dispersão presente no conjunto de dados. Esta análise possibilitou uma avaliação mais detalhada dos efeitos (linear e quadrático) e interações dos fatores principais empregados sobre as parcelas estáticas (μF_U) e dinâmicas (ΔF_U) da força de usinagem, sobre a sua aproximação (A_4) e sobre o seu detalhamento (D_I). Para essa análise foi utilizado um intervalo de confiança de 95%, ou seja, para valores de $\alpha < 0,05$, admite-se que a variável de controle em questão, é significativa na resposta. Vale ressaltar que, quanto menor for o valor-p, maior será a influência do parâmetro na resposta analisada. A Tabela 3 apresenta os resultados da análise de variância (ANOVA) sobre as variáveis resposta após o fresamento dos corpos de prova do Forta® DX 2304. A coluna denominada “Cont. [%]” mede o percentual de contribuição de cada termo em relação à soma total de quadrados. A contribuição é muitas vezes aproximada, mas eficaz guia sobre a importância relativa de cada termo no modelo.

Tabela 3. ANOVA para valores das quatro variáveis resposta no fresamento do aço inoxidável Forta® DX 2304.

Fator	μF_U		ΔF_U		A_4		D_I	
	Valor-p	Cont. [%]	Valor-p	Cont. [%]	Valor-p	Cont. [%]	Valor-p	Cont. [%]
v_c	0,97	0,00	0,581	0,11	0,922	0,005	0,497	0,48
f_z	0,0003	41,04	0,00008	42,98	0,0003	41,31	0,002	35,12
a_p	0,0002	48,54	0,00006	49,25	0,0002	48,42	0,001	40,21
$v_c \times v_c$	0,246	0,93	0,313	0,46	0,242	0,91	0,178	2,23
$f_z \times f_z$	0,880	0,01	0,762	0,06	0,929	0,004	0,300	1,21
$a_p \times a_p$	0,267	0,85	0,182	0,75	0,266	0,81	0,397	0,78
$v_c \times f_z$	0,978	0,00	0,442	0,22	0,958	0,001	0,924	0,009
$v_c \times a_p$	0,935	0,00	1,000	0,00	0,935	0,003	0,308	1,17
$f_z \times a_p$	0,022	5,76	0,012	4,61	0,020	5,80	0,011	13,91
R^2	97,3%		98,4%		97,4%		95,5%	

Verifica-se que o efeito linear do avanço por dente (f_z) e da profundidade axial de corte (a_p), e a interação entre eles ($f_z \times a_p$) mostraram-se significativos (valores tabelados em negrito) nas parcelas estáticas (μF_U), dinâmicas (ΔF_U) da força de usinagem, nos dados RMS de aproximação (A_4) e detalhamento (D_I) no nível de confiança de 95%, com valor-p menores que 5% e distintos percentuais de contribuição. O maior percentual de contribuição foi de a_p , seguida por f_z e por fim $f_z \times a_p$. A interação $f_z \times a_p$ teve maior influência sobre D_I . Isto pode ser explicado, pois a espessura variável do cavaco (Wiercigroch e Budak, 2001) afeta f_z , e o corte alternado de grãos com diferentes durezas (Koyee et al., 2014) afeta a_p . Esta combinação tende a gerar vibrações em alta frequência. Na variação da velocidade de corte de 80 a 110 m/min, o referido parâmetro não se mostrou significativo no fresamento do DX 2304 para as quatro variáveis de resposta. A parcela estática considerou uma média aritmética de 1800 pontos, enquanto que a parcela dinâmica considerou o desvio-padrão nesse intervalo. Portanto, quando a instabilidade for pequena, a parcela dinâmica da força não sofrerá seus efeitos.

O coeficiente de determinação (R^2) representa a porcentagem de variação nas respostas que são exploradas pelo modelo. No caso, os modelos explicam mais de 95% dos dados e o restante da variabilidade total se deve a outros fatores não investigados, ou fatores de ruído. Tal resultado representa uma grande confiabilidade, tendo em vista que para efeitos de análise estatística, o valor de $R^2 \geq 70\%$ representa que o modelo está adequado (Montgomery, 2007).

Observação. O projeto de experimentos de Box-Behnken prevê a execução de mais três passes de validação da otimização realizada após os 15 passes iniciais. Com a otimização multivariada feita através do Minitab®18, os níveis

ideais dos parâmetros (dentro dos valores limites aplicados) foram determinados ($v_c = 110$ m/min, $f_z = 0,05$ mm/z e $a_p = 0,2$ mm) com o intuito de minimizar as variáveis de resposta simultaneamente (μF_U , ΔF_U , A_4 , D_1).

As variáveis de saída estimadas (valores RMS) foram $\mu F_U = 57,45$ N, $\Delta F_U = 26,75$ N, $A_4 = 59,26$ N e $D_1 = 0,49$ N. Entretanto, devido às restrições de acesso aos laboratórios impostas pela pandemia de COVID-19, não foi possível a realização dos passes para a validação desses resultados.

4. CONCLUSÕES

O presente trabalho analisou a relação entre as parcelas estáticas (μF_U) e dinâmicas (ΔF_U) da força de usinagem (F_U) geradas no fresamento frontal a seco do Forta® DX 2304 e as variáveis independentes de entrada do processo (velocidade de corte v_c , avanço por dente f_z e profundidade axial de corte a_p). A aplicação da Transformada Discreta de Wavelet (DWT) no tratamento dos sinais gerados possibilitou avaliar as vibrações de baixa frequência (aproximação A_4) e de alta frequência (detalhamento D_1) geradas durante o corte do material. As principais conclusões foram:

- Os parâmetros a_p e f_z apresentam elevada influência na F_U que foi confirmada com a aplicação da DWT e realização de análise estatística.
- Em nenhum caso ΔF_U foi superior à μF_U , indicando que o processo atuou em regime estável. O corte de ligas duplex alterna entre grãos macios (ferrita) e duros (austenita), tendendo a iniciar uma vibração autoexcitada (*chatter*) o que não ocorreu no experimento.
- Com parâmetros que elevaram a seção transversal de corte máximos (f_z e a_p) aliados a uma v_c média, obteve-se uma variação de 50 a 450 N para A_4 . Os valores RMS de D_1 confirmam essa tendência, com valores entre -20 e 13 N.
- A análise de variância (ANOVA) confirmou que a_p , f_z , e a interação $f_z \times a_p$ foram significativos para as quatro variáveis resposta (μF_U , ΔF_U , A_4 e D_1) com diferentes percentuais de contribuição.
- A interação $f_z \times a_p$ teve maior influência sobre D_1 devido à combinação dos efeitos relacionados com a espessura variável do cavaco e com o corte alternado de grãos com diferentes durezas. Esta combinação tende a gerar vibrações em alta frequência.
- O modelo representa uma grande confiabilidade em função de o coeficiente de determinação (R^2) explicar mais de 95% dos dados para as quatro variáveis resposta analisadas.

5. AGRADECIMENTOS

À Outokumpu, pela doação do material; à Walter Tools, pela doação das ferramentas; ao LAFUN-UFRGS pela análise da composição química.

6. REFERÊNCIAS

- Alvarez-Armas, I., 2008. "Duplex stainless steels: Brief history and some recent alloys". *Recent Patents on Mechanical Engineering*, Vol. 1, n.1, p.51-57.
- Childs, T., Maekawa, K., Obikawa, T., Yamane, Y., 2000. *Metal Machining: Theory and Applications*. 1.ed., Wiley.
- Dimla Snr., D.E., 2000. "Sensor signals for tool-wear monitoring in metal cutting operations – a review of methods". *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, Vol. 40, n.8, p.1073-1098.
- Diniz, A.E., Marcondes, F.C., Coppini, N.L., 2013. *Tecnologia da Usinagem dos Materiais*. 8.ed., Artliber, São Paulo.
- Feng, J., Sun Z., Jiang Z., Yang L., 2015. "Identification of chatter in milling of Ti-6Al-4V titanium alloy thin-walled workpieces based on cutting force signals and surface topography". *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, Vol. 82, p. 1909-1920.
- Garcia, R. F., 2019. *Análise comparativa do fresamento frontal de acabamento em aços inoxidáveis duplex DX 2205 e LDX 2101*. 76 f. Dissertação. Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Porto Alegre, Brasil.
- Gunn, R.N., 1997. "Duplex Stainless Steel: Microstructure, Properties, and Applications". Cambridge: Woodhead Publishing
- IMOA, 2014. *Practical guidelines for the fabrication of duplex stainless steels*. 3.ed. International Molybdenum Association, Pittsburgh.
- Jebaraj, A.V., Ajaykumar, L., Deepak, C.R., Aditya, K.V.V., 2017. "Weldability, machinability and surfacing of commercial duplex stainless steel AISI2205 for marine applications – A recent review". *J. Adv. Res.*, Vol. 8, n.3, p.183-199.
- Korkut, I., Kasap, M., Ciftci, I., Seker, U., 2004. "Determination of optimum cutting parameters during machining of AISI 304 austenitic stainless steel". *Mater. Des.*, Vol. 25, n.4, p.303-305.
- Koyee, R.D., Eisseler, R., Schmauder, S., 2014. "Application of Taguchi coupled fuzzy multi-attribute decision making (FMADM) for optimizing surface quality in turning austenitic and duplex stainless steels". *Meas.*, Vol. 58, n.1, p.375-386.
- Lai, J.K.L., Lo, K.H., Shek, C.H., 2012. "Duplex stainless steel". In: *Stainless Steels: An Introduction and Their Recent Developments*, Chapter 5, p. 52-63
- Ma, L., Melkote, S., Castle, J., 2013. "A model-based computationally efficient method for on-line detection of chatter in milling". *J. Manuf. Sci. Eng.*, Vol. 135, No.3, A. 031007, 11p.
- Machado, A.R., Abrão, A.M., Coelho, R.T., Silva, M.B., 2015. *Teoria da Usinagem dos Materiais*. Editora Blucher. 3º Edição.
- Montgomery, D.C., 2007. *Applied Statistics and Probability for Engineers*. 4.ed., Wiley, Hoboken.

- Oliveira Jr., C.A., 2013. *Torneamento do aço inoxidável super duplex UNS S32750 e influência na resistência à corrosão*. 124 f. Dissertação (Mestrado) em Engenharia Mecânica, FEM-UNICAMP, Campinas, Brasil.
- Outokumpu, 2018. 10 Jun. 2018 <<https://www.outokumpu.com/en/products/forms/hot-rolled-coil-strip-and-plate>>
- Philip, S.D., Chandramohan, P., Rajesh, P.K., 2015. "Prediction of surface roughness in end milling operation of duplex stainless steel using response surface methodology". *J. Eng. Sci. Technol. (JESTEC)*, Vol. 10, n. 3, p. 340-352.
- Policena, M.R., Devitte, C., Fronza, G., Garcia, R.F., Souza, A.J., 2018. "Surface roughness analysis in finishing end-milling of duplex stainless steel UNS S32205". *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, Vol. 98, n. 5-8, p. 1617-1625.
- Sambadana, S., Jagadeesha, T., 2019. "Finite element modeling of cutting forces in face milling of duplex stainless steel 2205". *2nd NFEST*, Feb 18–22, Kurukshetra, India.
- Selvaraj, D.P., 2017. "Optimization of cutting force of duplex stainless steel in a dry milling operation". *Mater. Today-Proc.*, Vol. 4, n.10, p.11141-11147.
- Sen, A.K., Litak, G., Syta, A., Rusinek, R., 2012. "Intermittency and multiscale dynamics in milling of fiber-reinforced composites". *Meccanica*, Vol. 48, p.783–789.
- Shaw, M.C., 2005. *Metal Cutting Principles*. 2.ed. Oxford Series on Advanced Manufacturing, New York.
- Sória, B., 2016. *Estudo no Comportamento das Vibrações em Fresamento Frontal do Aço Inoxidável AISI 316 Utilizando Transformada de Wavelet*. Dissertação (Mestrado) em Engenharia Mecânica, PROMEC-UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil.
- Sória, B.S., Policena, M.R., Souza, A.J., 2019. "Effects of tool state on the output parameters of front milling using discrete wavelet transform". In: *ICEMSO 2019*, Berlin, Germany, Jul 22-23, 2019. Conf. Proc., Part VII, pp. 845-849, 2019.
- Youssef, H.A., 2016. *Machining of stainless steels and super alloys: traditional and nontraditional techniques*. Wiley, Alexandria University, Alexandria, Egypt.
- Wiercigroch, M., Budak, E., 2001. "Sources of nonlinearities, chatter generation and suppression in metal cutting". *Philos. T. Roy. Soc. A*, Vol. 359, p.663–693.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.

ANALYSIS OF THE MACHINING FORCES GENERATED BY END MILLING OF STAINLESS-STEEL DUPLEX FORTA® DX 2304

Yachel Rogério Mileski¹

Mauricio Rodrigues Policena²

André João de Souza³

Federal University of Rio Grande do Sul (UFRGS) – Department of Mechanical Engineering (DEMEC) – Laboratory of Automation in Machining (LAUS) – 425 Sarmiento Leite St. – Zip Code 90050-170 – Porto Alegre, RS, Brazil.

¹yachelmileski@gmail.com, ²mrpolicena@gmail.com, ³ajsouza@ufrgs.br

Abstract. Forta® DX 2304 is a duplex stainless-steel of high mechanical resistance combined with good resistance to localized and stressed corrosion. Due to its properties, it presents low machinability. Thus, the dry end milling of the Forta® DX 2304 was carried out in order to correlate the input variables (cutting speed " v_c ", feed per tooth " f_z ", and axial depth of cut " a_p ") with the machining forces (F_U) resulting from the process. The Box-Behnken Design was used in the planning and statistical analysis of the experiment. The static (μF_U) and dynamic (ΔF_U) components of the machining force were evaluated for each parameter combination. The Discrete Wavelet Transform (DWT) was applied to treat the generated signals (A_4 approximation and D_1 detailing) and in the analysis of vibrations. In all passes, the cut was maintained in a stable regime alternating between soft grains (ferrite) and hard grains (austenite) without the presence of self-excited vibration (chatter). The variance analysis confirmed that " f_z ", " a_p ", and the " $f_z \times a_p$ " interaction were significant for the four response variables (μF_U , ΔF_U , A_4 , and D_1). The coefficient of determination (R^2) explained more than 95% of the model data.

Keywords: Milling duplex stainless-steel; Forta® DX 2304; Static and dynamic components of machining force; Box-Behnken Design; Discrete Wavelet Transform.

RESPONSIBILITY NOTICE

The authors are the only ones responsible for the printed material included in this paper.