

ANÁLISE DA RUGOSIDADE OBTIDA NO FRESAMENTO FRONTAL DE ACABAMENTO DO AÇO INOXIDÁVEL DUPLEX FORTA® DX 2205

Rafael F. Garcia¹
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.

¹rafafg1985@gmail.com, ²mrpolicena@gmail.com, ³ajsouza@ufrgs.br

Resumo. As peças usinadas de aços inoxidáveis duplex standard 2205 são aplicadas na indústria petroquímica, de celulose, petróleo e gás. O acabamento superficial está intimamente relacionado à textura, sendo uma variável de saída da usinagem que reflete a qualidade e robustez do processo. O fresamento possui variáveis influentes, que associadas às características do material, afetam a qualidade da superfície usinada, o que é crítico para materiais expostos a ambientes corrosivos. Dessa forma, o estudo analisou o acabamento superficial gerado pelo fresamento frontal a seco do Forta® DX 2205. Os parâmetros de corte foram combinados, randomizados e otimizados pelo projeto de experimentos Box-Behnken Design (BBD). Os valores de rugosidade média (R_a) foram medidos nas diferentes combinações de parâmetros de corte, os perfis 3D de menor rugosidade foram registrados e a Curva de Abbott-Firestone e a Função de Distribuição de Amplitude representaram o perfil estatístico. O valor de rugosidade obtido ($R_a = 0,222 \pm 0,051 \mu\text{m}$) pelos parâmetros de corte otimizados ($v_c = 80 \text{ m/min}$, $f_z = 0,05 \text{ mm/dente}$ e $a_p = 0,6 \text{ mm}$) foi o menor dentre todos os passes realizados, demonstrando a eficácia do método.

Palavras chave: Fresamento de acabamento; Forta® DX 2205; Perfis de rugosidade; Box-Behnken Design.

1. INTRODUÇÃO

A origem dos aços inoxidáveis duplex (DSS) ocorreu na França por volta de 1933 a partir de um aço inoxidável austenítico (ASS) 18% Cr – 9% Ni – 2,5% Mo. A liga original da família duplex predominantemente ferrítica (S32900) teve a adição de nitrogênio que aumentou a quantidade de austenita para quase 50%, melhorando as propriedades de corrosão a cloretos, em soldas e de tenacidade (Philip et al., 2015). O uso de DSS tem aumentado desde a década de 1990 principalmente devido ao seu custo quando comparado aos ASS devido à sua menor quantidade de níquel. A diminuição desse elemento é fornecida pela adição de manganês e nitrogênio (Snis e Olsson, 2008).

Os aços inoxidáveis para serem considerados DSS exigem um valor equivalente de resistência à corrosão por pite (PRE) maior que 20. IMO A (2014) menciona cinco tipos: *lean duplex* (PRE = 21-27), *lean duplex com Mo* (PRE = 27-34), *standard duplex* (PRE = 34-38), *super duplex* (PRE = 38-43) e *hiper duplex* (PRE = 49-53). *Standard duplex*, como UNS S32205 (22% Cr - 5,5% Ni - 3% Mo), PRE = 35, corresponde a 60% de todas as aplicações de DSS.

Os processos de usinagem convencionais induzem perfis ranhurados na superfície devido à interação entre ferramenta e peça, o que é prejudicial em ambientes corrosivos, pois causa a fadiga do componente devido ao maior número de concentradores de tensões. As superfícies polidas são preferíveis às usinadas. Porém, o polimento de grandes componentes apresenta dificuldades do ponto de vista prático, além de ser oneroso (Jebaraj et al., 2017).

Pesquisas no fresamento de DDS utilizando diferentes ferramentas e condições de corte apresentam grande potencial a ser explorado. Saï et al., (2001) analisaram a microestrutura, a microdureza e a rugosidade com variação da velocidade de corte e do avanço no fresamento frontal de acabamento no DSS UNS S39274 usando insertos de metal-duro. Maior velocidade de corte combinada com pequeno avanço melhorou a qualidade da superfície usinada. A utilização de baixas velocidades de corte gerou altas rugosidades devido à formação de aresta postiça de corte. Philip et al., (2015) analisaram o fresamento frontal a seco e de acabamento no DSS UNS J92205 usando o projeto de experimento Box-Behnken de três fatores (rotação, velocidade de avanço e profundidade de corte axial). Desenvolveram um modelo matemático para prever a rugosidade média (R_a) e validaram o modelo com ensaios experimentais. Os autores observaram que a rotação no mais alto nível diminuiu a adesão de material na ferramenta e formação de aresta postiça, resultando em menor rugosidade.

Os parâmetros estatísticos de rugosidade caracterizam melhor a superfície usinada que os valores aritméticos. A assimetria de uma distribuição avalia o grau de desvio ou espaçamento da simetria de um perfil de rugosidade. A curtose descreve o grau de achatamento. A curva de Abbott-Firestone (AFC) representa o perfil estatístico de rugosidade por meio de uma função de probabilidade cumulativa que indica o quanto acima ou abaixo de uma linha de referência está o

perfil (Petropoulos et al., 2010). É usada para analisar falhas em superfícies de engenharia, como topografias (relações pico-vale), capacidade de suporte de carga na ação de rolamento e lubrificação (capacidade de retenção de óleo) em superfícies deslizantes (Pawlus e Grabon, 2008). A Função de Distribuição de Amplitude (ADM) representa a distribuição que o conjunto de valores medidos tem em relação ao menor valor (Tavares, 2005). Na usinagem de DSS 2205, Krolczyk et al., (2015) analisaram a influência da velocidade de corte nos valores de rugosidade e concluíram que tal parâmetro não influenciou significativamente as curvas de Abbott-Firestone. Policena et al., (2018) estudaram o acabamento gerado no fresamento a seco do DSS 2205. Os autores variaram os parâmetros de corte e analisaram os perfis de maior e menor rugosidade (R_a e R_z). A distribuição dos valores medidos foi representada pelas curvas AFC e ADM que se mostraram importantes na caracterização e diagnóstico da superfície usinada.

Projetos de experimentos são ferramentas estatísticas que facilitam a estruturação de uma sequência de testes, otimizando o planejamento, execução, análise de dados e reduzindo custos com tempo e recursos. O Box-Behnken Design (BBD) é um método de otimização estatística baseado na Metodologia de Superfície de Resposta (MSR) que propõe a utilização de três níveis para pelo menos três parâmetro de entrada. Os projetos são constituídos pela combinação de análise fatorial com delineamentos de blocos incompletos (Manohar et al., 2013).

Há grande demanda por pesquisas na usinagem de DSS *standard*. Dessa forma, o objetivo deste trabalho é analisar o perfil de rugosidade, a topografia da superfície e os parâmetros de corte relativos aos menores valores de rugosidade gerados no fresamento frontal a seco do Forta® DX 2205 e otimizados através do BBD.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A Tabela 1 apresenta a composição química do aço inoxidável Forta® DX 2205 fornecido pela empresa Outokumpu 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 2205 (% massa).

	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	Cu	C	P	S	N
Medido	20,72	5,45	3,91	1,8	0,39	0,19	0,052	0,024	0,012	<0,005
ASTM	22-23,5	4,5-6,5	3,0-3,5	2,0 max.	1,0 max.	1,0 max.	0,03 max.	0,03 max.	0,02 max.	0,14-0,20

Os elementos de liga possuem propriedades específicas que conferem aos aços inoxidáveis certas características. O cromo forma um filme de óxido estável (Cr_2O_3) que protege o aço contra a corrosão atmosférica e a oxidação em altas temperaturas. O molibdênio melhora as condições de resistência a altas temperaturas, mas dificulta a usinagem, assim como o níquel. O níquel ajuda a estabilizar a fase austenítica, melhorando a ductilidade, resistência mecânica e soldabilidade (IMOA, 2014). O manganês permite a formação de sulfatos na forma de inclusões, que se deformam plasticamente durante a formação do cavaco produzindo baixa resistência ao cisalhamento (Machado et al., 2015).

O experimento foi realizado em placas retangulares medindo 100 x 90 x 6 mm (Fig. 1a) com furos para fixação na mesa do centro de usinagem ROMI Discovery 308 com potência máxima de 5,5 kW e rotação máxima de 4000 rpm. Foi utilizado um cabeçote fresador Walter Tools Xtra-tec® modelo F4042R.W20.02, com 20 mm de diâmetro nominal e suporte para dois insertos de metal-duro Tiger-tec Silver® modelo ADMT10 classe WSM35, com cobertura PVD ($\text{TiAlN} + \text{Al}_2\text{O}_3$) e raio de ponta $r_e = 0,4$ mm. Foi realizado o fresamento de topo em canais cuja largura de corte (a_e) corresponde ao diâmetro da ferramenta ($d = 20$ mm) (Fig. 1b). Em cada chapa, seis passes com 34 mm de comprimento (amostras) foram usinados usando diferentes combinações dos parâmetros de entrada (velocidade de corte " v_c ", avanço por dente " f_z " e profundidade de corte axial " a_p ") por meio do BBD usando o software Minitab® 18, o que resultou em 15 amostras iniciais (ver Tab. 2) e mais três passes de validação do modelo, sem repetição. Perfis 2D de rugosidade e valores de R_a foram adquiridos em três pontos da região estável (desconsiderando a entrada e a saída da fresa) de cada amostra com o rugosímetro portátil Mitutoyo SJ-201P (Fig. 1c) utilizando comprimento de amostragem de 0,8 mm e comprimento de avaliação de 4 mm. Em seguida, calculou-se a média aritmética dos três valores de rugosidade coletados. As imagens das superfícies usinadas foram captadas com o auxílio de um microscópio Zeiss®, modelo Axio Lab. A1, equipado com uma câmera digital de resolução de 5 MP, lente de 2,5 mm e ampliação 25x.

Posteriormente, os gráficos 3D dos perfis de rugosidade foram obtidas usando o interferômetro óptico Bruker Contour GT-K3D auxiliado pelo software Vision 64. Na análise de interferometria, foi utilizada uma lente de 2,5x que possui uma resolução lateral de 3,998 μm com zoom digital de 1x. Foi realizada uma imagem única, no tamanho padrão de 2559 μm no eixo X e 1919 μm no eixo Y. O software Matlab R2015a foi usado para traçar as curvas AFC e ADM relativas aos perfis de rugosidade mais regulares.

Os parâmetros de entrada recomendados pela empresa Outokumpu em operações de acabamento para o DSS Forta® DX 2205 são: velocidade de corte ($v_c = 80$ a 110 m/min) e avanço por dente ($f_z = 0,1$ a 0,2 mm/dente). A profundidade de corte axial (a_p) foi determinada com base no raio de ponta do inserto ($r_e = 0,4$ mm), variando em 50% acima e 50% abaixo do valor do raio, ou seja, entre 0,2 e 0,6 mm. A análise de variância (ANOVA) foi realizada para esclarecer o efeito de cada parâmetro de entrada sobre a variável resposta (R_a) para um intervalo de confiança de 95%

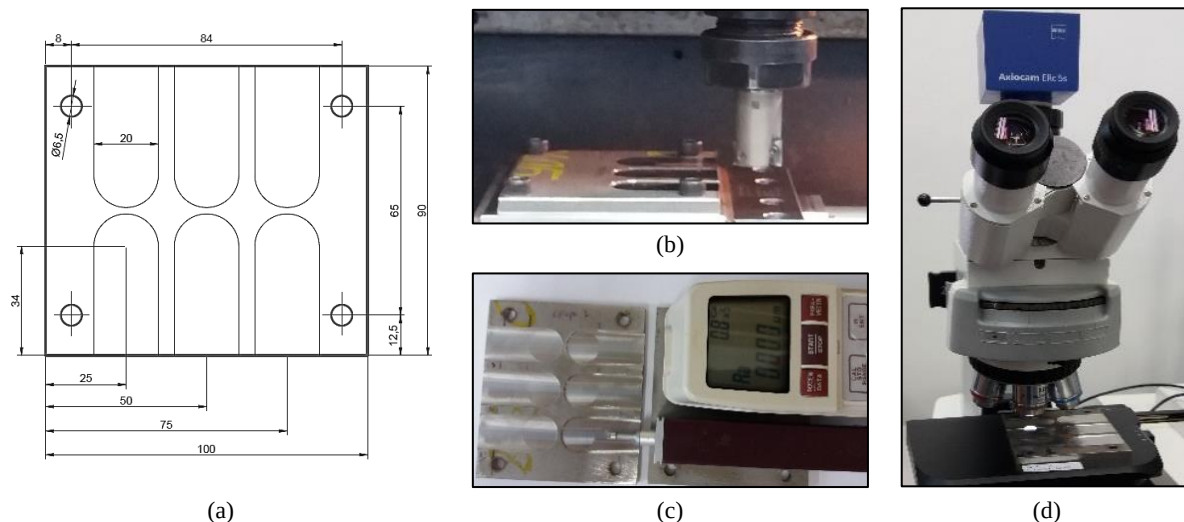


Figura 1. (a) Dimensões do corpo de prova após a usinagem; (b) Ação de corte da ferramenta na usinagem dos canais; (c) Medição de rugosidade nas superfícies usinadas; (d) Registro das imagens de textura nas amostras geradas.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Análise da Rugosidade nas Superfícies Usinadas

A Tabela 2 apresenta os valores medidos de R_a para todas as combinações de parâmetros de corte. Cada um dos valores de R_a representa a média aritmética de três medições realizadas na superfície usinada em cada amostra.

Tabela 2. Valores de R_a medidos após o fresamento frontal do Forta® DX 2205.

Passe	v_c [m/min]	f_z [mm/dente]	a_p [mm]	Media R_a [μm]
1	80	0,125	0,2	0,640
2	80	0,200	0,4	0,723
3	80	0,125	0,6	0,483
4	95	0,050	0,6	0,323
5	110	0,050	0,4	0,370
6	95	0,050	0,2	0,353
7	110	0,125	0,2	0,343
8	80	0,050	0,4	0,283
9*	95	0,125	0,4	0,433
10	95	0,200	0,2	0,573
11	95	0,200	0,6	0,637
12	110	0,125	0,6	0,410
13	110	0,200	0,4	0,613
14*	95	0,125	0,4	0,500
15*	95	0,125	0,4	0,433

*Réplicas do ponto central (valores médios dos parâmetros de corte)

A Figura 2 mostra o perfil de rugosidade (R_a) para os maiores (passe 2) e menores (passe 8) valores medidos. A profundidade de corte axial (a_p) e a velocidade de corte (v_c) foram iguais em ambos os casos. No maior valor de R_a (passe 2), alguns valores ultrapassam a faixa de $\pm 1,5 \mu\text{m}$, com alternância no perfil e regularidade, indicando distúrbios no corte (Fig. 2a). A combinação do menor v_c com um maior avanço por dente (f_z) resultou nos maiores valores de rugosidade, possivelmente porque a espessura do cavaco aumentou com o aumento de f_z . A textura da superfície usinada (Fig. 2b) apresenta ranhuras irregulares, diferentes espaçamentos, três sulcos proeminentes, um à esquerda, outro central e último à direita. A distância dos mesmos assemelha-se ao f_z do passe (0,2 mm/dente).

Os valores mais baixos de R_a foram medidos no passe 8 com alguns valores superiores a $\pm 0,5 \mu\text{m}$ e perfil irregular. A combinação da menor v_c com o menor f_z produziu um perfil mais constante com ondulação mínima (Fig. 2c). A textura (Fig. 2d) mostra ranhuras regularmente espaçadas semelhantes ao f_z do passe (0,05 mm/dente).

A diferença entre os maiores e menores valores de rugosidade média indica dependência do avanço por dente, uma vez que foi o único parâmetro de corte que variou entre os dois valores, corroborando Diniz et al., (2013) que relatam aumento de R_a com incremento do avanço. Esses valores ocorreram na relação a_p/r_c igual a 1, favorecendo a quebra do cavaco na menor rugosidade e deteriorando-se na outra situação.

3.2 Análise Estatística

A análise de variância (ANOVA) foi realizada para avaliar os efeitos dos fatores independentes e interações, permitindo uma avaliação dos efeitos (linear e quadrático) sobre a variável resposta R_a . Foi utilizado um intervalo de confiança de 95%, ou seja, para valores de $\alpha < 0,05$, assume-se que a variável de controle em questão é significativa na resposta. Quanto mais baixo for o valor-p, maior será a influência do parâmetro na variável de resposta. A Tabela 3 mostra a ANOVA com dados R_a .

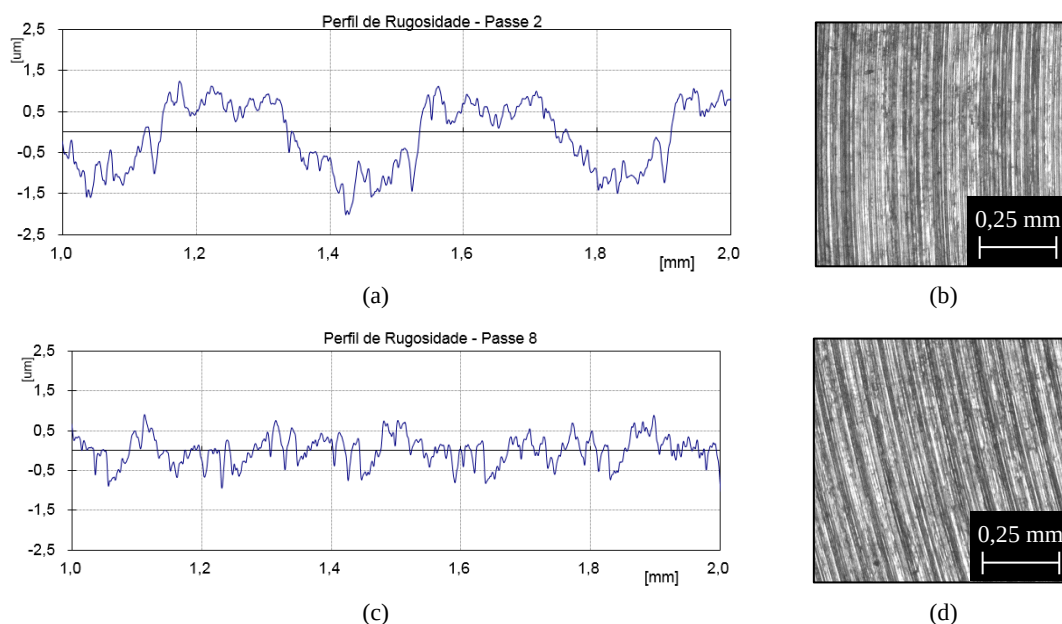


Figura 2. (a) Perfil de rugosidade do passe 2 ($R_a = 0,723 \mu\text{m}$); (b) Imagem da superfície usinada do passe 2; (c) Perfil de rugosidade do passe 8 ($R_a = 0,283 \mu\text{m}$); (d) Imagem da superfície usinada do passe 8.

Tabela 3. ANOVA para valores de R_a .

Fator	SQ	GDL	MQ	Valor-F	Valor-p	Proporção (%)
v_c	0,019339	1	0,019339	4,25984	0,094	7,58
$v_c \times v_c$	0,001436	1	0,001436	0,31635	0,598	0,56
f_z	0,185035	1	0,185035	40,75821	0,001	72,53
$f_z \times f_z$	0,001823	1	0,001823	0,40164	0,554	0,71
a_p	0,000401	1	0,000401	0,08842	0,778	0,16
$a_p \times a_p$	0,000138	1	0,000138	0,03037	0,868	0,054
$v_c \times f_z$	0,009669	1	0,009669	2,12992	0,205	3,79
$v_c \times a_p$	0,012469	1	0,012469	2,74669	0,158	4,89
$f_z \times a_p$	0,002178	1	0,002178	0,47971	0,519	0,85
Erro	0,022699	5	0,004540	-	-	-
Total SQ	0,255129	14	-	-	-	-

A coluna denominada "proporção" mede a porcentagem de contribuição de cada termo do modelo em relação à soma total dos quadrados. Verifica-se que apenas o efeito linear do avanço por dente (f_z) foi significativo sobre os valores médios de rugosidade, com p-valor $< 0,05$ e com um percentual de contribuição no acabamento gerado em R_a de 72,53%. Os demais fatores principais (v_c e a_p), assim como a interação dos fatores, não foram significativos ao intervalo de confiança de 95%. No entanto, nota-se que o efeito linear da velocidade de corte (v_c) tem um efeito "parcialmente"

significativo sobre R_a , isto é, apresenta um p-valor entre 0,05 e 0,10 (intervalo de confiança de 90,6%), com percentual de contribuição de 7,58%. A Figura 3 mostra os gráficos que ilustram estes efeitos lineares de f_z e v_c sobre R_a . Observa-se na Figura 3a (fatores principais) que a rugosidade média (R_a) diminui com a diminuição de f_z e com o aumento de v_c . A Figura 3b (interações dos fatores) confirma que o aumento do avanço por dente resulta em maior rugosidade para todos os casos. Pela interação entre $f_z \times a_p$ vê-se que para f_z mínimo e médio a rugosidade diminui com o aumento de a_p , e a interação $v_c \times f_z$ mostra que menores valores de R_a são obtidos com os menores valores de f_z e v_c .

O coeficiente de determinação (R^2) representa a porcentagem de variação da resposta que é explorada pelo modelo. Quanto maior o valor, melhor o modelo se ajusta aos dados. No experimento, o valor de R^2 obtido resultou em 91,1%, o que explica mais de 90% dos dados.

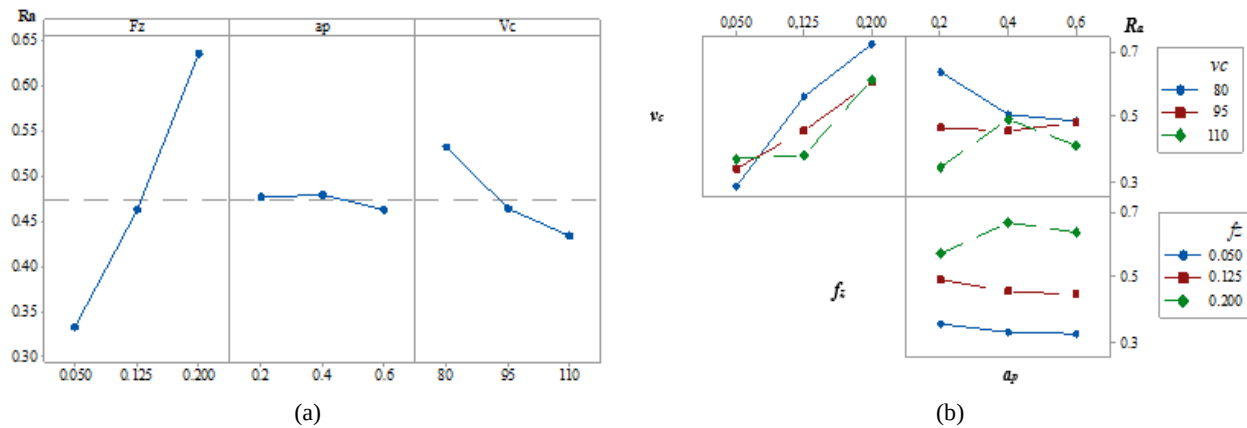


Figura 3. Gráfico dos efeitos para R_a : (a) fatores principais; (b) interações.

Gráficos de superfície foram gerados e plotados visando completar a análise (Fig. 4). Nas Figuras 4a e 4c ocorre uma redução do R_a à medida que f_z diminui, o que reforça os resultados obtidos pela ANOVA. A Figura 4b mostra uma rugosidade uniforme com maiores valores para pequenas v_c e redução de R_a com o incremento do parâmetro.

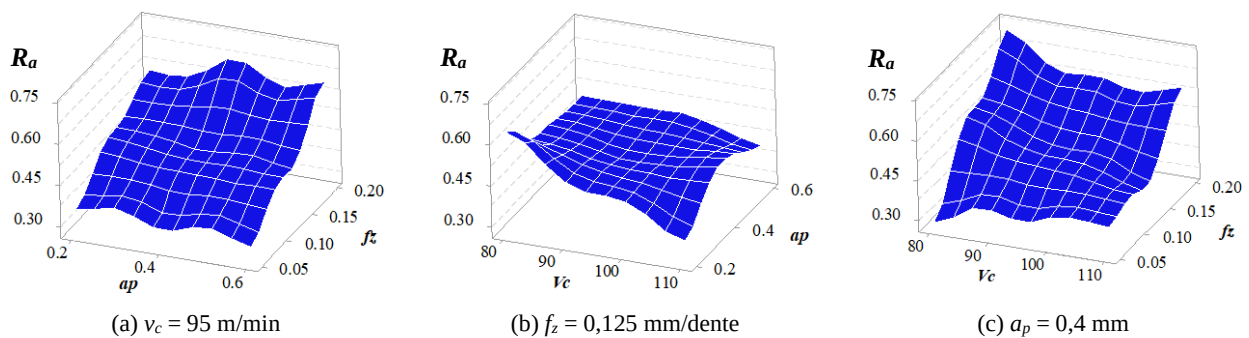


Figura 4. Gráficos de superfície de resposta dos valores médios para R_a .

3.3 Testes de Validação dos Parâmetros Otimizados

Após os 15 passes iniciais, a otimização dos parâmetros de entrada foi gerada com o software Minitab® 18 resultando nos menores níveis de v_c e f_z e o maior nível de a_p ($v_c = 80$ m/min, $f_z = 0,05$ mm/dente e $a_p = 0,6$ mm). Posteriormente, três passes de validação foram efetuados conforme prevê o método de otimização estatística baseado no Box-Behnken Design (BBD). A rugosidade foi medida novamente nos passes 16, 17 e 18. Os menores valores medidos de R_a ocorreram no passe 16 (Tab. 4). Seu perfil de rugosidade (Fig. 5a) mostra uma uniformidade de picos e vales com amplitudes menores. As marcas da ferramenta na superfície usinada são suaves e rasas (Fig. 5b). O valor de rugosidade média gerado R_a foi $0,222 \pm 0,051$ μm . O perfil de ondulação também é menor validando a otimização. A incerteza de medição foi calculada considerando a maior diferença entre os valores máximo e médio, ou entre os valores médio e mínimo.

A Figura 6 analisa o perfil 3D das superfícies usinadas nos passes 8 e 16 com uma escala variando de +2,5 μm (vermelho) a -2,5 μm (azul). A uniformidade dos picos e vales foi verificada ao longo da superfície do passe 8 (Fig. 6a). Os picos estão concentrados em uma região central à esquerda (indicada por elipse) no passe 16 (Fig. 6b). A diferença

dos parâmetros de corte nos passes 8 e 16 ocorreu para $a_p = 0,6$ mm. As curvas Abbott-Firestone (AFC) e Função de Distribuição de Amplitude (ADM) foram geradas em outra análise que apresenta os parâmetros estatísticos da rugosidade.

Tabela 4. Valores de R_a medidos após os ensaios de validação.

Passe	v_c (m/min)	f_z (mm/dente)	a_p (mm)	Media R_a (μ m)
16	80	0,05	0,6	0,173
17				0,220
18				0,273
Resultado da Medição:				$0,222 \pm 0,051$

No passe 8 (Fig. 6c), a AFC mostra uma maior declividade (linha pontilhada vermelha) e a ADM (Fig. 6e) apresenta distribuição quase simétrica em torno da média com pouca dispersão de valores. No passe 16 (Fig. 6d), há uma AFC com menor declividade (linha pontilhada verde) e na ADM (Fig. 6f) uma maior concentração de valores em torno da média com distribuição quase simétrica e rugosidade variando de $\pm 0,4$ μ m. Entretanto, o processo de fresamento é complexo, o material possui propriedades ainda desconhecidas e, portanto, muitas variáveis podem contribuir para os resultados.

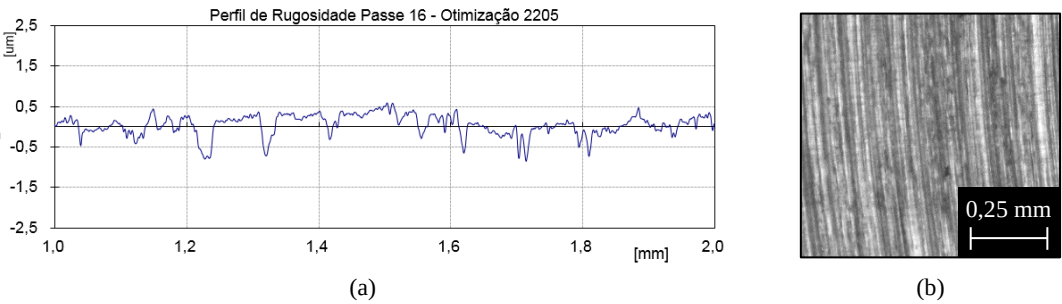


Figure 5. a) Perfil de rugosidade passe 16; b) Superfície usinada passe 16.

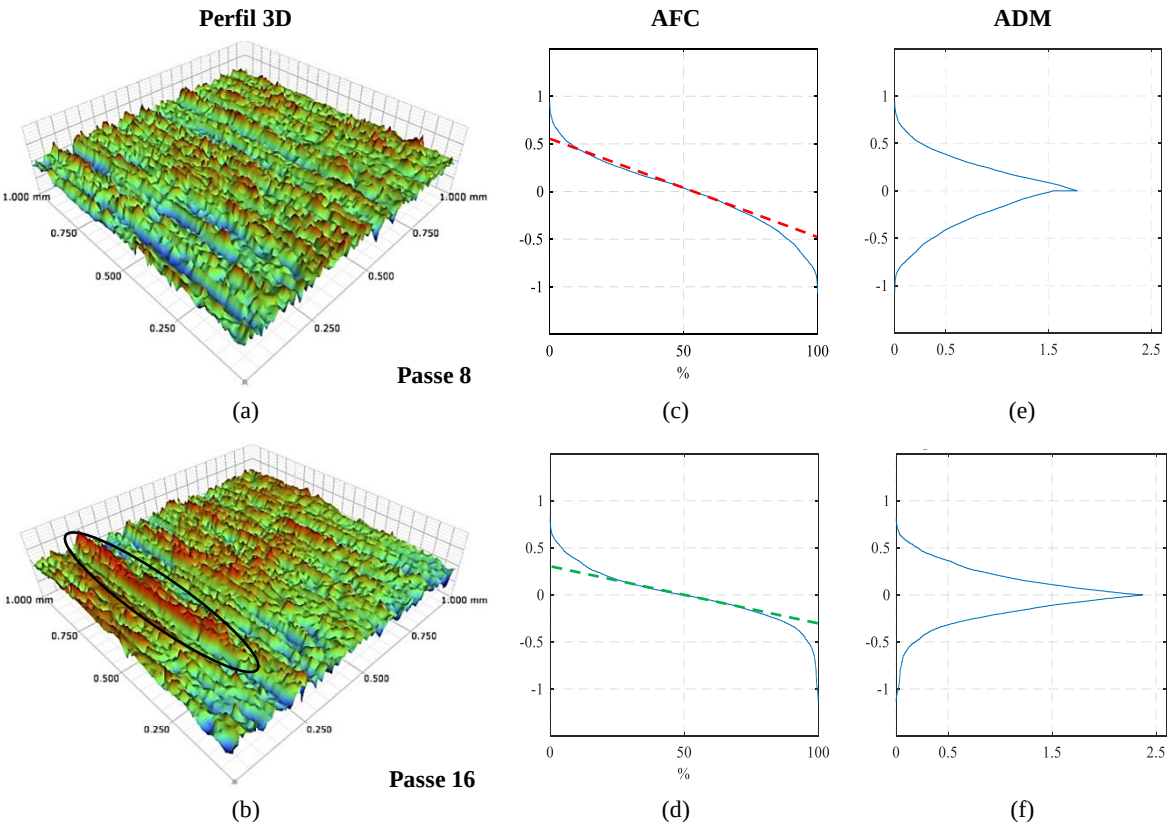


Figure 6. Análise dos perfis 3D das superfícies usinadas, curvas AFC e ADM.

As rugosidades medidas foram satisfatórias em comparação com outros processos de usinagem de aços inoxidáveis duplex, inclusive no acabamento de superfícies planas. Philip et al., (2015) obteve $R_a \cong 0,55 \mu\text{m}$ com algumas variáveis de entrada análogas ($r_e = 0,4 \text{ mm}$, $v_c = 47 \text{ m/min}$, $v_f = 40 \text{ mm/min}$ e $a_p = 0,4 \text{ mm}$), fresamento a seco e otimizado com BBD para DSS UNS J92205. Airao et al., (2018) relataram valores de $R_a \cong 0,60 \mu\text{m}$ para parâmetros próximos aos otimizados no estudo ($r_e = 0,4 \text{ mm}$, $v_c = 87,92 \text{ m/min}$, $f_z = 0,12 \text{ mm/dente}$ e $a_p = 0,5 \text{ mm}$) para o fresamento a seco do SDSS UNS S32507. Policena et al., (2018) alcançou $R_a = 0,182 \mu\text{m}$ aplicando $r_e = 0,4 \text{ mm}$, $v_c = 30 \text{ m/min}$, $f_z = 0,05 \text{ mm/dente}$ e $a_p = 0,2 \text{ mm}$. O menor valor de rugosidade obtido no presente estudo ($R_a = 0,222 \pm 0,051 \mu\text{m}$) está de acordo com o descrito na literatura, validando os parâmetros de corte otimizados com BBD. Vale ressaltar que a taxa de remoção de material é oito vezes maior do que no estudo anterior. Os resultados do experimento são semelhantes aos processos de acabamento (folha escovada) produzidos pela empresa Outokumpu (2018) com valores de rugosidade média entre 0,1 e 0,4 μm .

4. CONCLUSÕES

O estudo do acabamento gerado pelo fresamento a seco do Forta® DX 2205 gerou as seguintes conclusões:

- A ANOVA indicou que apenas o avanço por dente teve influência significativa sobre o R_a . Os outros fatores principais e as interações dos parâmetros de corte influenciaram o acabamento superficial, mas não mostraram significância para $\alpha = 0,05$.
- As interações dos fatores $f_z \times a_p$ e $v_c \times f_z$ mostraram que, para f_z mínimo, a rugosidade R_a diminui com o aumento de a_p e com a diminuição de v_c .
- A análise do perfil 3D nas superfícies usinadas com melhor acabamento possibilitou o mapeamento da distribuição de picos e vales, auxiliando na comparação com as análises estatísticas.
- Os parâmetros estatísticos de rugosidade superficial avaliados através das curvas Abbott-Firestone (AFC) e distribuição de amplitudes (ADM) caracterizaram as diferenças aritméticas para as melhores superfícies geradas pelo fresamento frontal.
- Os menores níveis de rugosidade para todos os passes realizados ($R_a = 0,222 \pm 0,051 \mu\text{m}$) foram obtidos com os parâmetros de corte otimizados por BBD ($v_c = 80 \text{ m/min}$, $f_z = 0,05 \text{ mm/dente}$ e $a_p = 0,6 \text{ mm}$) comprovando a eficácia do método.

5. AGRADECIMENTOS

À empresa Outokumpu, pela doação do material; à Walter Tools, pela doação das ferramentas; ao LAFUN-UFRGS, pela análise da composição química; ao Laboratório de Tribologia (LATRIB-UFRGS), pela captação das imagens e dos perfis 3D das superfícies usinadas; e à CAPES, pela bolsa de estudos concedida (Grant #2017/1691358).

6. REFERÊNCIAS

- Airao, J., Chaudhary, B., Bajpai, V. e Khanna, N., 2018. "An experimental study of surface roughness variation in end milling of super duplex 2507 stainless steel", *Materials Today: Proceedings*, Vol. 5, No. 2, p. 3682-3689.
- Diniz, A. E., Marcondes, F. C. e Coppini, N. L., 2013. *Tecnologia da Usinagem dos Materiais*. 8. Ed., Artliber, São Paulo.
- 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. e Aditya, K. V. V., 2017. "Weldability, machinability and surfacing of commercial duplex stainless steel AISI 2205 for marine applications – A recent review". *Journal of Advanced Research*, Vol. 8, No. 3, p. 183-199.
- Krolczyk, G. M., Nieslony, P., Legutko, S., Hloch, S. e Samardzic, I., 2015. "Investigation of selected surface integrity features of duplex stainless steel (DSS) after turning", *Metalurgija*, Vol. 54, No. 1, p. 91-94.
- Machado, A. R., Mendes, A. M., Coelho, R. T. e Silva, M. B., 2015. *Teoria da Usinagem dos Materiais*. 3. Ed., Blucher, São Paulo.
- Manohar, M., Joseph, J., Selvaraj, T. e Sivakumar, D., 2013. "Application of Box Behnken design to optimize the parameters for turning Inconel 718 using coated carbide tools". *International Journal of Scientific & Engineering Research*, Vol. 4, No. 4, p. 620-642.
- Outokumpu, 2018. *Hot rolled coil, strip and plate: The perfect start*. 16. Jun. 2018.
<<https://www.outokumpu.com/en/products/forms/hot-rolled-coil-strip-and-plate>>
- Pawlus, P. e Grabon, W., 2008. "The method of truncation parameters measurement from material ratio curve", *Precision Engineering*, Vol. 32, No. 4, p. 342-347.

- Petropoulos, P. G. N., Pandazaras, N. P. e Davim, J. P., 2010. "Surface texture characterization and evaluation related to machining". In: *Surface Integrity in Machining*. Springer, London, p. 37-66.
- Philip, S.D., Chandramohan, P. e Rajesh, P.K., 2015. "Prediction of surface roughness in end milling operation of duplex stainless steel using response surface methodology". *Journal of Engineering Science and Technology*, Vol. 10, No. 3, p. 340-352.
- Policena, M. R., Devitte, C., Fronza, G., Garcia, R. F. e Souza, A. J., 2018. "Surface roughness analysis in finishing end-milling of duplex stainless steel UNS S32205". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 98, N. 5-8, p. 1617-1625.
- Saï, W. B., Salah, N. B. e Lebrun, J. L., 2001. "Influence of machining by finishing milling on surface characteristics". *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 41, N. 3, p. 443-450.
- Snis, M. e Olsson, J., 2008 "Reduce costs for storage and distribution of desalted water – use duplex stainless steel". *Desalination*, Vol. 223, No. 1-3, p. 476-486.
- Tavares, S.M.O., 2005. *Analysis of surface roughness and models of mechanical contacts*. Dissertação (Mestrado) em Engenharia Mecânica, Facoltà di Ingegneria (Università di Pisa)/Faculdade de Engenharia (Universidade do Porto).

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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

ANALYSIS OF MACHINED SURFACE ROUGHNESS AFTER FINISHING END MILLING OF DUPLEX STAINLESS STEEL FORTA® DX 2205

Rafael F. Garcia¹

Mauricio R. Policena²

André J. Souza³

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

¹rafafg1985@gmail.com, ²mrpolicena@gmail.com, ³ajsouza@ufrgs.br

Abstract. The machined parts of standard duplex stainless steel 2205 are applied in the petrochemical, cellulose, oil, and gas industry. The surface finish is closely related to the texture, being a response variable of machining that reflects the process's quality and robustness. The milling has influential variables associated with the material's characteristics and affects the machined surface quality, which is critical for materials exposed to corrosive environments. Thus, the study analyzed the surface finish generated by dry milling of Forta® DX 2205. The cutting parameters were combined, randomized, and optimized by the Box-Behnken design of experiments. Average roughness (R_a) values were measured in the different combinations of cutting parameters, the 3D profiles of lesser roughness were recorded, and the Abbott-Firestone Curve and the Amplitude Distribution Function represented the statistical profile. The average roughness value obtained ($R_a = 0.222 \pm 0.051 \mu\text{m}$) by the optimized cutting parameters ($v_c = 80 \text{ m/min}$, $f_z = 0.05 \text{ mm/tooth}$ and $a_p = 0.6 \text{ mm}$) was the lowest level in all runs demonstrating the effectiveness of the method.

Keywords: Forta® DX 2205, Finishing end milling, Roughness profiles, Box-Behnken Design.

RESPONSIBILITY NOTICE

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