

ANÁLISE DA RUGOSIDADE R_a NO FRESAMENTO DE TOPO DO AÇO INOXIDÁVEL DUPLEX UNS S32205 UTILIZANDO PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS

Carlos Henrique de Oliveira

Tarcísio Gonçalves de Brito

Emerson José de Paiva

IEI-UNIFEI-Universidade Federal de Itajubá. Campus Avançado de Itabira. Rua Irmã Ivone Drummond, nº 200. CEP:35903-087. Itabira-MG

e-mails carlos.henrique@unifei.edu.br; tgbrito@unifei.edu.br; emersonpaiva@unifei.edu.br.

Rogério Santana Peruchi

UFPB-Universidade Federal da Paraíba. Campus Universitário de João Pessoa - Campus I- Conj. Pres. Castelo Branco III C.P 5045. CEP: 58051-970. João Pessoa-PB

e-mails rogerioperechi@gmail.com.

João Roberto Ferreira

IEPG-UNIFEI-Universidade Federal de Itajubá. Av. BPS. 1303 C.P 50. 37500-903 Itajubá-MG

e-mail jorofe@unifei.edu.br.

Resumo. Com o avanço da indústria metal mecânica fica evidente a necessidade de aumentar a qualidade e eficiência dos processos produtivos, sendo a usinagem um dos processos de fabricação mais utilizados. Dentre os processos de usinagem, o fresamento destaca-se pela versatilidade de operações e por executar usinagens complexas e em diferentes materiais. Entre os diversos materiais, o emprego dos aços inoxidáveis duplex UNS S32205 destacam-se pelas excelentes propriedades mecânicas, alta resistência à corrosão, mas apresenta baixa usinabilidade. O objetivo deste trabalho é estudar a influência dos parâmetros de corte no fresamento de topo UNS S32205, utilizando planejamento de experimentos e análise de variância para avaliar o comportamento da rugosidade R_a , em função da velocidade de corte, avanço por dente e penetração de trabalho. Os resultados mostraram que o avanço por dente é o fator que mais influenciou na rugosidade da peça cujo menor valor observado foi de 0,326 μm .

Palavras chave: Aço inoxidável duplex UNS S32205. Fresamento de topo. Rugosidade de Superfície R_a . Projeto de Experimentos.

1. INTRODUÇÃO

Os aços inoxidáveis duplex apresentam uma microestrutura balanceada contendo austenita e ferrita. Estas ligas conferem ao material excelentes propriedades mecânicas, maior resistência à corrosão por pites e sob tensão, o que justifica a aplicação desses aços nas indústrias de petróleo e gás (Gamarrá e Diniz, 2018; Policena *et al.*, 2018; Selvaraj, 2018). Estes materiais são de difícil usinabilidade, pois apresenta baixa condutividade térmica, alta ductilidade e taxa de endurecimento, representando um desafio para o fresamento (Dhananchezian *et al.*, 2018; Sevaraj *et al.*, 2018).

O fresamento de topo é uma das operações mais empregadas nas indústrias de manufatura, frequentemente utilizado em perfis, ranhuras, contornos e bolsões, e também equipamentos das indústrias de petróleo e gás, plataformas *offshore*, componentes mecânicos e peças resistentes à corrosão fabricada de aços inoxidáveis (Kalidass e Palanisamy, 2014).

Devido à capacidade de endurecimento dos aços inoxidáveis duplex, em função das propriedades mecânicas e térmicas, favorece a geração de altas temperaturas nas interfaces ferramenta-cavaco e ferramenta-peça, o que promove maiores forças de corte, desgaste da ferramenta e deterioração da qualidade da superfície. O acabamento da peça é importante na determinação da vida útil dos componentes, e as rugosidades de superfície mínimas são exigidas em aplicações relacionadas a ambientes corrosivos (Krolczyk *et al.*, 2013; Policena *et al.*, 2018).

Com a ascensão do mercado de produtos fabricados para atender as necessidades das empresas que atuam no ramo de petróleo e gás, pesquisas referentes aos processos de usinagem por fresamento estão sendo discutidos por diversos pesquisadores, para estabelecer maior eficiência e menor custo, buscando melhor configuração de máquina-ferramenta, proporcionando o desenvolvimento de várias metodologias (Brito *et al.*, 2014; Costa *et al.*, 2016; Costa *et al.*, 2017). Para aplicar essas metodologias faz-se necessário a utilização do planejamento de experimentos (DOE – *Design of Experiments*), que é uma técnica estatística para maximizar o número de informação com um número mínimo de

experimentos, estabelecendo leis de causa e efeito com a finalidade de encontrar parâmetros ótimos em diferentes processos de fabricação (Richmireet *al.*, 2018; Sadeghifar *et al.*, 2018; Van *et al.*, 2018).

Esta pesquisa tem como objetivo analisar o fresamento de topo do aço inoxidável duplex UNS S32205, visto a importância para diversos segmentos industriais, aplicando planejamento de experimento (DOE) e análise de variância (ANOVA) para determinar as variáveis que influenciam na rugosidade R_a .

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Os experimentos foram conduzidos em um centro de usinagem CNC da marca Eurostec com 15kW de potência e rotação de 10.000 rpm. Para os ensaios utilizou-se a fresa de topo código R390-025A25-11M, com diâmetro (D_c) de 25 mm, ângulo de posição $K_r = 90^\circ$, haste cilíndrica, passo médio com 3 insertos e fixação mecânica por pinça. Foram utilizados insertos de metal duro R390-11 T3 08M-MM GC2030, classe ISO M30 revestidos com (Ti,Al)N + TiN pelo processo de deposição física de vapor (Sandvik Coromant, 2018). O material usinado foi o aço inoxidável duplex UNS S32205, com dimensões 160 mm de diâmetro, 300 mm de comprimento e dureza média de 250 HB, a composição química, conforme Tab. 1.

Tabela 1. Composição química (% em peso) do aço inoxidável duplex UNS S32205 (IMOA, 2014)

C	Si	Mn	P	S	N	Al	Cr	Mo	Ni	Cu	W	Co
0,013	0,47	1,22	0,019	0,010	0,19	0,008	22,24	3,14	5,62	0,19	0,02	0,05

Para a coleta dos dados, foi utilizado o arranjo fatorial de 2^3 com 3 pontos centrais totalizando 11 experimentos para as variáveis de controle, juntamente com os seus respectivos níveis de operação, conforme Tab. 2.

Tabela 2. Parâmetros de processos utilizados no processo de fresamento (Autoria própria)

Fator	Nível (-)	Nível (+)
A - Velocidade de corte (v_c) [m/min]	60	70
B - Penetração de trabalho (a_e) [mm]	15	18
C - Avanço por dente (f_z) [mm/dente]	0,08	0,12

Após o fresamento do aço inoxidável duplex, no sentido concordante, sem fluido de corte, a rugosidade R_a foi medida utilizando o rugosímetro portátil Mitutoyo SJ-201 em três pontos, medido no centro e em cada extremidade do corpo de prova, considerando o valor médio das leituras. Após execução e medição dos experimentos, construiu a matriz experimental, conforme Tab. 3. A profundidade de usinagem (a_p) foi mantida em 1,00 mm para todos os experimentos.

Tabela 3. Matriz experimental e valores de rugosidade R_a para o fresamento de topo do UNS S32205 (Autoria própria)

Experimento	v_c [m/min]	a_e mm	f_z mm/dente	R_a [μm]
1	60	15	0,08	0,326
2	70	15	0,08	0,562
3	60	18	0,08	0,362
4	70	18	0,08	0,383
5	60	15	0,12	0,412
6	70	15	0,12	0,566
7	60	18	0,12	0,647
8	70	18	0,12	0,697
9	65	16,5	0,10	0,607
10	65	16,5	0,10	0,614
11	65	16,5	0,10	0,599

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Modelo matemático

Com os resultados experimentais foi possível estabelecer relações analíticas para a resposta analisada e os parâmetros do processo. O modelo de regressão foi utilizado para representar a relação aproximada entre a resposta de

interesse e as variáveis de controle utilizadas no processo de fresamento. O modelo matemático, conforme a Eq. (1), representa a rugosidade de superfície R_a em função dos parâmetros de máquina e suas interações.

$$R_a = -13,550 + 0,258.v_c + 0,753.a_e + 72,800.f_z - 0,0146.v_c.a_e - 1,593.v_c.f_z - 3,890.a_e.f_z + 0,09250v_c.a_e.f_z \quad (1)$$

3.2. Análise de variância (ANOVA)

A investigação dos parâmetros significativos que afetaram a rugosidade R_a foi verificada pela ANOVA e os cálculos foram realizados utilizando o software MINITAB®, conforme Tab.4. O modelo obtido influência na resposta avaliada, ou seja, a equação de regressão linear pode ser utilizada para prever os valores de R_a , pois apresentou R^2 e $R^2(\text{adj})$ de 99,99% e 99,93% respectivamente. Isto significa que a variabilidade da rugosidade é bem explicada pelas variáveis de controle utilizadas no processo de fresamento. Somente a interação entre velocidade de corte e avanço por dente não exerce influência significativa na rugosidade R_a . Os parâmetros de processo e o modelo matemático são significativos, pois apresentaram o P -Value menor que o nível de significância de 5%.

Tabela 4. Análise de variância para a rugosidade R_a (Autoria própria).

Termo	G. L	SQ Aju.	QM Aju.	F-Value	P-Value
Modelo	8	0,16663	0,020829	369,74	0,003
Linear	3	0,09212	0,030707	545,1	0,002
v_c	1	0,02657	0,026565	471,57	0,002
a_e	1	0,00622	0,006216	110,35	0,009
f_z	1	0,05934	0,059340	1053,37	0,001
2- Interações	3	0,04546	0,015152	268,97	0,004
v_c*a_e	1	0,01272	0,012720	225,8	0,004
v_c*f_z	1	0,00035	0,000351	6,23	0,130
a_e*f_z	1	0,03239	0,032385	574,88	0,002
3- Interações	1	0,00154	0,001540	27,34	0,035
$v_c*a_e*f_z$	1	0,00154	0,001540	27,34	0,035
Curvatura	1	0,02751	0,027511		
Erro	2	0,00011	0,000056		
Total	10	0,16674			
$S = 0,0075056$		$R^2 = 99,93\%$	$R^2 \text{ (Aju)} = 99,66\%$		

3.3. Análise dos resíduos do modelo e efeitos principais das variáveis de controle

Para verificar se os resíduos seguem uma distribuição normal, foi realizado o teste de normalidade de Anderson Darling, conforme Fig. 1. O P -Value foi 8,7%, portanto, maior que o nível de significância de 5%, o que permite dizer que os resíduos são normalmente distribuídos. Isto mostra que o modelo está bem ajustado, o que explica a variabilidade dos parâmetros de corte para a rugosidade R_a .

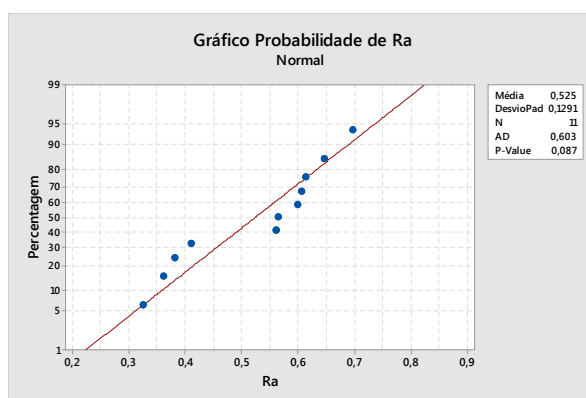


Figura 1. Teste de normalidade de Anderson-Darling (Autoria própria).

O impacto das variáveis controláveis do processo e suas interações para a rugosidade R_a foi avaliado utilizando o Diagrama de Pareto, conforme Fig. 2. Observa-se que as barras que ultrapassaram a linha de Lenth, são os parâmetros

significativos para o modelo. É possível identificar que o avanço por dente (f_z) é o fator que mais influência a rugosidade.

Para reduzir a rugosidade R_a , o valor da velocidade de corte deve ser 60 m/min, a penetração de trabalho de 15,0 mm e avanço de 0,08 mm/dente, de acordo com a análise dos efeitos principais, conforme Fig. 3. Em relação ao processo de fresamento, as velocidades de corte ($v_c = 60$ m/min) próximas ao menor nível (-1) do DOE permite menor vibração ao sistema ferramenta-peça com consequente redução do valor de rugosidade, a penetração de trabalho ($a_e = 15$ mm, menor nível (-1) do DOE), permite que o centro da fresa trabalhe dentro da superfície usinada, mantendo a relação a_e/D_c igual a 60%, fornecendo uma maior estabilidade ao processo de fresamento de topo, e o avanço por dente ($f_z = 0,08$ mm/dente, menor nível (-1) do DOE), em função do efeito geométrico da ponta da ferramenta, causa menores irregularidades e colabora para um melhor acabamento do corpo de prova.

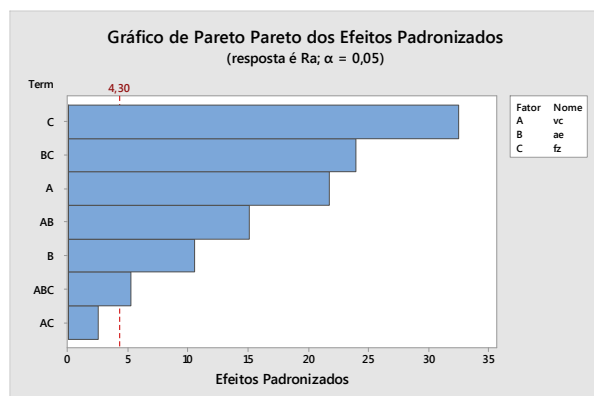


Figura 2. Gráfico de Pareto do efeito padronizado (Autoria própria)

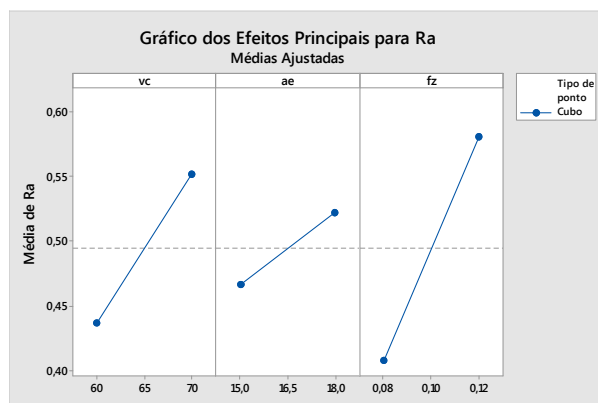


Figura 3. Efeitos principais dos parâmetros de corte (Autoria própria)

4. CONCLUSÕES

Em relação ao planejamento de experimento, mostrou ser eficiente para a modelagem da rugosidade R_a , em função dos parâmetros de corte utilizados no fresamento do aço inoxidável UNS S32205. O modelo linear apresentou um ajuste de 99,93% e o avanço por dente foi a variável que mais influenciou na rugosidade, sendo que o mesmo não aconteceu entre a sua interação com a velocidade de corte. A análise dos efeitos principais revelou que ao utilizar as variáveis de entrada nos menores níveis (-1) do DOE, o valor da rugosidade R_a é minimizado. Nestas condições de corte, o menor valor encontrado foi de 0,326 μ m.

5. AGRADECIMENTOS

Ao Grupo de Estudos em Qualidade e Produtividade (GEQProd) da Universidade Federal de Itajubá, campus de Itabira, ao Núcleo de Otimização da Manufatura e de Tecnologia da Inovação (NOMATI) da Universidade Federal de Itajubá, campus de Itajubá, CNPq, Fapemig e à Capes pelo apoio para a realização deste trabalho.

6. REFERÊNCIAS

- Brito, T.G., Paiva, A.P., Ferreira, J.R., Gomes, J.H.F. e Balestrassi, P.P., 2014. "A normal boundary intersection approach to multiresponse robust optimization of the surface roughness in end milling process with combined arrays". *Precision Engineering*, Vol. 38, p. 628-638.
- Costa, D.M.D., Brito, T.G., Paiva A.P., Leme, R.C. e Balestrassi, P.P., 2016. "A normal boundary intersection with multivariate mean square error approach for dry end milling process optimization of the AISI 1045 steel". *Journal of Cleaner Production*, Vol. 135, p. 1658-1672.
- Costa, D.M.D., Belinato, G., Brito, T.G., Paiva A.P., Ferreira, J.R. e Balestrassi, P.P., 2017. "Weighted principal component analysis combined with Taguchi's signal-to-noise ratio to the multiobjective optimization of dry end milling process: a comparative study". *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, Vol. 39 (5), p. 1663-1681.
- Dhananchezian, M., Priyan, M.R. e Narayanan, S.S., 2018. "Study the Effect of Cryogenic Cooling on Machinability Characteristics during Turning Duplex Stainless Steel 2205". *Materials Today: Proceedings*, Vol. 5 (5), p. 12062-12070.
- Gamarra, J.R. e Diniz, A.E., 2018. "Taper turning of super duplex stainless steel: tool life, tool wear and workpiece surface roughness." *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, Vol. 40 (1), p. 1-13.

- IMOA, 2014. "International Molybdenum Association". <<https://www.imoa.info/molybdenum-media-centre/downloads>>.
- Kalidass, S.e Palanisamy, P., 2014. "Experimental Investigation on the Effect of Tool Geometry and Cutting Conditions Using Tool Wear Prediction Model for End Milling Process", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 89, p. 95-109.
- Krolczyk, G., Legutko, S. e Stoic, A., 2013. "Influence of cutting parameters and conditions onto surface hardness of Duplex Stainless Steel after turning process", *TehničkiVjesnik - Technical Gazette*, Vol. 20, p. 1077 - 1080.
- 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". *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 98, p. 1617-1625.
- Richmire, S., Hall, K. e Haghshenas M., 2018. "Design of experiment study on hardness variations in friction stir welding of AM60 Mg alloy". *Journal of Magnesium and Alloys*, Vol. 6(3), p. 215-228.
- Sadeghifar, M., Sedaghati, R., Jomaa, W. e Songmene, V., 2018. "Finite element analysis and response surface method for robust multi-performance optimization of radial turning of hard 300M steel". *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 94 (5-8), p. 2457-2474.
- Selvaraj, D. P., 2018. "Optimization of Surface Roughness of Duplex Stainless Steel in Dry Turning Operation Using Taguchi Technique". *Materials Physics and Mechanics*, Vol. 40, p. 63-70.
- Selvaraj, D. P.; Chandramohan, P., e Chandrasekar, P., 2018. "Experimental investigations of nitrogen alloyed duplex stainless steel in dry milling process". *Journal of Engineering Science and Technology*, Vol. 13 (2), p. 321-331.
- Van, H.D., Van, C.N., Ngoc, T.T. e Manh, T.S., 2018. "Influence of heat treatment on microstructure and mechanical properties of a CMnSi TRIP steel using design of experiment". *MaterialsToday: Proceedings*, Vol. 5 (11), p. 24664-24674.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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

ANALYSIS OF SURFACE ROUGHNESS R_a IN THE DUPLEX STAINLESS STEEL UNS S32205 END MILLING USING DESIGN OF EXPERIMENTS

Carlos Henrique de Oliveira
Tarcísio Gonçalves de Brito
Emerson José de Paiva

IEI-UNIFEI-Universidade Federal de Itajubá. Campus Avançado de Itabira. Rua Irmã Ivone Drummond, nº 200. CEP:35903-087. Itabira-MG
e-mails:carlos.henrique@unifei.edu.br; tgbrito@unifei.edu.br; emersonpaiva@unifei.edu.br.

Rogério Santana Peruchi

UFPB-Universidade Federal da Paraíba.Campus Universitário de João Pessoa - Campus I- Conj. Pres. Castelo Branco III C.P 5045. CEP: 58051-970.João Pessoa-PB
e-mails:rogerioperuchi@gmail.com.

João Roberto Ferreira

IEPG-UNIFEI-Universidade Federal de Itajubá. Av. BPS. 1303 C.P 50. 37500-903 Itajubá-MG
e-mails:jorofe@unifei.edu.br.

Abstract. With the advancement of the mechanical metal industry it is evident the need to increase the quality and efficiency of the production processes, being the machining one of the most used manufacturing processes. Among the machining processes, milling stands out for the versatility of operations and for performing complex machining and in different materials. Among the various materials, the use of duplex stainless steels UNS S32205 stand out for excellent mechanical properties, high corrosion resistance, but has low machinability. The objective of this work is to study the influence of cutting parameters on the UNS S32205 end milling, using design of experiments and analysis of variance to evaluate the behavior of surface roughness R_a , in function of the cutting speed, feed per tooth and work penetration. The results showed that the feed per tooth is the factor that most influenced the surface roughness of the piece whose lowest observed value was 0.326 μm .

Keywords: Duplex Stainless Steel UNS S32205. End Milling. Surface Roughness R_a . Design of Experiments.

RESPONSIBILITY NOTICE

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