

ANÁLISE DA RUGOSIDADE R_a NO TORNEAMENTO DO AÇO INOXIDÁVEL SUPER DUPLEX UNS S32750 UTILIZANDO PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS

Carlos Filipe Nascimento
Carlos Henrique de Oliveira
Fabiana Ferreira Silva Vieira
Patrícia Frederico
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: carlosfelipen8@gmail.com; carlos.henrique@unifei.edu.br; fabnany@yahoo.com.br; patriciafrederico@hotmail.com; tgbrito@unifei.edu.br; emersonpaiva@unifei.edu.br.

Resumo. O avanço tecnológico na indústria metal mecânica faz com que as empresas priorizem a qualidade de seus produtos em diferentes processos de fabricação e o torneamento, devido à sua versatilidade, destacou-se entre as diversas aplicações e tipos de produtos usinados. Em se tratando de fabricação de peças, o aço inoxidável super duplex UNS S32750 é aplicado em empresas marítimas e petroquímicas devido as suas propriedades mecânicas e à corrosão, porém de difícil usinabilidade. Este trabalho tem como objetivo estudar a influência dos parâmetros de usinagem na rugosidade R_a , utilizando o planejamento de experimentos (DOE – Design of Experiments) e análise de variância (ANOVA), a taxa de remoção de material (MRR) que será calculada analiticamente, no processo de torneamento empregando insertos de metal duro revestido pelo processo de deposição química a vapor (CVD) e sem fluido de corte, sendo selecionadas as seguintes variáveis de entrada: velocidade de corte (v_c), profundidade de corte (a_p) e avanço (f). Os resultados mostraram que o avanço foi o fator que mais influenciou na rugosidade da superfície, com menor valor observado de $0,30\mu m$.

Palavras Chave: Análise de Variância (ANOVA). Qualidade. Torneamento sem fluido. Parâmetros de corte.

1. INTRODUÇÃO

A usinagem é um processo industrial no qual o material é transformado pela remoção de material. Essa técnica de fabricação é fundamental para a indústria na fabricação de peças (Gouarir *et al.*, 2018).

Dentre os processos de usinagem, o torneamento é uma das mais importantes operações e frequentemente utilizado para a produção de peças (Diniz, *et al.*, 2014; Sarikaya *et al.*, 2016; Prasath *et al.*, 2018). Durante o processo de torneamento, surgem problemas que influenciam na qualidade do produto no decorrer da usinagem em diversos tipos de material. Assim a rugosidade é um indicador crítico de qualidade para as superfícies usinadas (Benardos e Vosniakos, 2003; Arbizu e Pérez, 2003; Diniz, *et al.*, 2014; Khare *et al.*, 2018).

Em se tratando de diversos tipos de materiais, o aço inoxidável super duplex é de difícil usinabilidade, por apresentar características como alta ductilidade e baixa condutividade térmica, o que eleva a temperatura da região de corte, aderindo o material no inserto causando um aumento nos valores de rugosidades de superfície. Pesquisas realizadas, mostram a dificuldade de se modelar e prever a rugosidade, de tal maneira que se busque parâmetros ótimos no processo de torneamento, afim estabelecer um melhor acabamento da superfície para os produtos usinados (Nomani *et al.*, 2017; Gamarra e Diniz, 2018).

Estas abordagens de propostas no âmbito dos métodos de otimização são realizadas para tratar estes relacionamentos, a fim de propiciar suporte na tomada de decisões (Paiva, 2008). O Planejamento de Experimentos (DOE) é uma técnica que analisa e identifica a magnitude de várias fontes de variação que influenciam em um processo (Montgomery, 2013).

Este trabalho, tem o objetivo de estabelecer os parâmetros que minimizem a rugosidade média da superfície (R_a), utilizando o DOE e ANOVA no processo de torneamento do aço super duplex UNS S32750. A análise de variância foi realizada para estabelecer as variáveis que mais influenciam no valor do acabamento, e o cálculo da taxa de remoção de material foi realizado analiticamente utilizando a equação existente na literatura. Os experimentos foram realizados com inserto de metal duro, revestido pela técnica CVD (TiCN, Al₂O₃ e TiN) e sem fluido de corte.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

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, conforme Tab. 1, juntamente com os seus respectivos níveis de operação.

Os experimentos foram conduzidos no torno CNC da marca CYK613 com 15kW de potência e rotação de 10.000 rpm. O material usinado foi o aço inoxidável super duplex UNS S32750, com dimensões 51 mm de diâmetro, 103 mm de comprimento. Para os ensaios utilizou-se a ferramenta de corte ISO MWLNR-2525M08 e inserto de metal duro ISO WNMG 080408 revestido pela técnica de deposição de vapor químico (CVD) com revestimento de TiCN+Al₂O₃+TiN (Sandvik Coromant, 2018).

Tabela 1. Parâmetro utilizados no processo de torneamento (Autoria Própria)

Fator	Nível (-)	Nível (+)
A- Velocidade de corte (v_c) [m/min]	160	180
B- Profundidade de corte (a_p) [mm]	0,40	1,00
C- Avanço (f) [mm/rot]	0,10	0,20

Após o torneamento do aço inoxidável super duplex, sem fluido de corte, a rugosidade R_a foi medida utilizando o rugosímetro portátil Mitutoyo SJ-201 (com *cut-off* de 0,8mm) em três pontos do corpo de prova, a fim de considerar o valor médio das leituras. Após a execução e medição de todos os experimentos, as respostas R_a e taxa de remoção de material foram inseridas na matriz experimental para análises conforme Tab. 2, e a taxa de remoção de material (MRR), foi calculada conforme Eq. (1).

$$MRR \left[\frac{\text{cm}^3}{\text{min}} \right] = v_c \left[\frac{\text{m}}{\text{min}} \right] \cdot f \left[\frac{\text{mm}}{\text{rot}} \right] \cdot a_p [\text{mm}] \quad (1)$$

Tabela 2. Matriz experimental e valores de rugosidade R_a para o torneamento do UNS S32750 (Autoria própria)

Sequencia experimental	Fatores			Resposta	
	v_c	a_p	f	R_a	MRR
	[m/min]	[mm]	[mm/rot]	[μm]	[cm ³ /min]
1	160	0,4	0,10	0,89	6,40
2	180	0,4	0,10	0,30	7,20
3	160	1,0	0,10	1,80	16,00
4	180	1,0	0,10	0,50	18,00
5	160	0,4	0,20	1,26	12,80
6	180	0,4	0,20	1,89	14,40
7	160	1,0	0,20	1,98	32,00
8	180	1,0	0,20	1,56	36,00
9	170	0,7	0,15	1,19	17,85
10	170	0,7	0,15	1,20	17,85
11	170	0,7	0,15	1,22	17,85

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Modelo matemático

Com os resultados experimentais é possível estabelecer relações analíticas para a resposta analisada e os parâmetros do processo. Foi utilizado o modelo de regressão para estimar a relação entre a resposta de interesse e as variáveis de controle no processo de torneamento do aço inoxidável super duplex UNS S32750. O modelo matemático que representa a rugosidade de superfície R_a em função dos parâmetros de máquina e suas interações, pode ser observada, conforme a Eq. (2).

$$R_a = 12,293 - 0,07817 \cdot v_c + 6,767 \cdot a_p - 110,77 \cdot f - 0,03083 \cdot v_c \cdot a_p + 0,7233 \cdot v_c \cdot f + 42,17 \cdot a_p \cdot f - 0,2833 \cdot v_c \cdot a_p \cdot f - 0,0692 \cdot C_t \cdot P_t \quad (2)$$

3.2. Análise de variância (ANOVA)

A investigação dos parâmetros significativos que afetam a rugosidade R_a foi verificada pela ANOVA e os cálculos foram realizados utilizando o software MINITAB®, conforme Tab. 3. O modelo desenvolvido apresentou R^2 e $R^2(\text{adj})$ de 99,98% e 99,92%, respectivamente. Isto significa que a proporção da variabilidade da rugosidade é bem explicada pelas variáveis de controle utilizadas no processo de torneamento do aço inoxidável super duplex.

As variáveis influenciam significativa na rugosidade R_a . Os parâmetros de processo e o modelo matemático são significativos, apresentando o $P\text{-Value}$ menor que o nível de significância de 5%. Para o processo de torneamento, quanto maior forem os valores das variáveis de entrada, maior serão os esforços de corte e as rugosidades de superfície, o que influencia na taxa de remoção do material, explicando a teoria do processo com o modelo proposto. Pode-se perceber que o maior valor observado para o MRR é de 36,00 cm³/min, ao utilizar os maiores parâmetros de corte para usinagem do aço UNS S32750.

Tabela 3. Análise de variância para a rugosidade R_a .

Termo	GDL	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	8	2,94219	0,36777	1576,17	0,001
Linear	3	1,91405	0,63802	2734,36	0,000
v_c	1	0,35280	0,35280	1512,00	0,001
a_p	1	0,28125	0,28125	1205,36	0,001
f	1	1,28000	1,28000	5485,71	0,000
2-interações	3	1,00325	0,33442	1433,21	0,001
$v_c.a_p$	1	0,38720	0,38720	1659,43	0,001
$v_c.f$	1	0,55125	0,55125	2362,50	0,000
$a_p.f$	1	0,06480	0,06480	277,71	0,004
3-interações	1	0,01445	0,01445	61,93	0,016
$v_c.a_p.f$	1	0,01445	0,01445	61,93	0,016
Curvatura	1	0,01044	0,01044	44,73	0,022
Erro	2	0,00047	0,00023		
Total	10	2,94265			
S = 0,0152753		$R^2 = 99,98\%$		$R^2(\text{Adj}) = 99,92\%$	

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

A fim de verificar se os resíduos seguem uma distribuição normal, foi realizado o teste de normalidade de Anderson Darling, conforme Fig. 1. O $P\text{-Value}$ foi 52,6%, portanto, maior que o nível de significância de 5%, o que permite afirmar que os resíduos são normalmente distribuídos. Isto mostra que o modelo está bem ajustado, explicando a variabilidade dos parâmetros de corte para a rugosidade R_a .

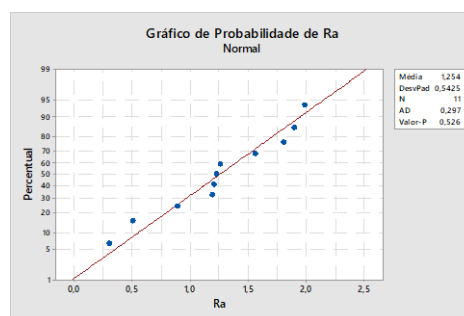


Figura 1. Teste de normalidade de Anderson-Darling

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. Pode-se observar que as barras que ultrapassaram a linha de $Lenth$ são os parâmetros significativos para o modelo. É possível identificar que o avanço (f) é o fator que mais influencia na rugosidade, seguida pela interação entre velocidade de corte (v_c) / avanço (f), velocidade de corte (v_c) / profundidade de corte (a_p), velocidade de corte (v_c), interação entre profundidade de corte (a_p) / avanço (f) e finalmente pela interação

entre velocidade de corte (v_c) / profundidade de corte (a_p) / avanço (f), respectivamente, para este aço de difícil usinabilidade.

Para reduzir a rugosidade R_a , o valor da velocidade de corte deve ser 180 m/min, a profundidade de corte de 0,40 mm e avanço de 0,10 mm/rot, de acordo com a análise dos efeitos principais, conforme Fig. 3.

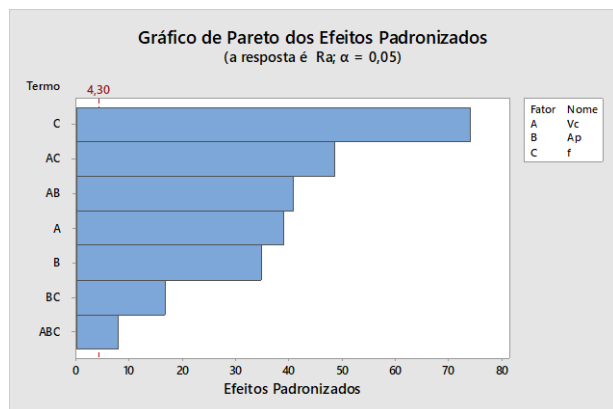


Figura 2. Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados

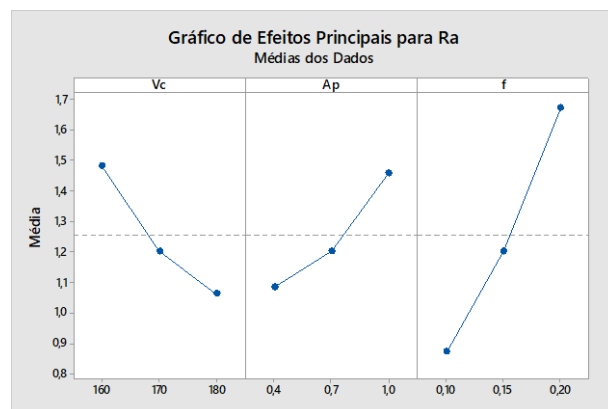


Figura 3. Efeitos principais dos parâmetros de corte

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 torneamento do aço inoxidável super duplex UNS S32750. O modelo linear apresentou um ajuste de 99,67% e foi possível verificar que as variáveis de controle do processo e as todas as interações influenciaram significativamente na rugosidade.

Em relação ao processo de torneamento, as velocidades de corte ($v_c = 180$ m/min) próximas ao maior nível (+1) do DOE permite menor vibração ao sistema ferramenta-peça com consequente redução do valor de rugosidade, a profundidade de corte ($a_p = 0,40$ mm, menor nível (-1) do DOE), permite uma maior estabilidade no processo de torneamento, e o avanço ($f = 0,10$ mm/rot, menor nível (-1) do DOE), em função do efeito geométrico da ponta da ferramenta, causa menores irregularidades e contribui para um melhor no acabamento da superfície do corpo de prova. Nestas condições de corte, o menor valor encontrado para a rugosidade R_a foi de $0,30\mu\text{m}$, com uma taxa do material removida (MRR) de $7,20\text{ cm}^3/\text{min}$.

5. AGRADECIMENTOS

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

6. REFERÊNCIAS

- Arbizu, P.I. e Pérez, C.J.L., 2003. "Surface Roughness Prediction by Factorial Design of Experiments in Turning Processes." *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 143-144 (1), p. 390–396.
- Benardos, P.G. e Vosniakos, G.C., 2003. "Predicting Surface Roughness in Machining: A Review." *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 43 (8), p. 833-844.
- Diniz, A.E., Marcondes, F.C., Coppini, N.L., 2014. *Tecnologia da Usinagem dos Materiais*. Artliber, 9ª edição.
- 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*. 40 (1), p. 1-13.
- Gouarir, A., Martínez-Arellano, G., Terrazas, G., Benardos, P., e Ratchev, S., 2018. "In-Process Tool Wear Prediction System Based on Machine Learning Techniques and Force Analysis", *Procedia CIRP (Hpc)*, Vol. 77, p. 501-504.
- Khare, S.K., Agarwal, S. e Srivastava, S., 2018. "Analysis of Surface Roughness during Turning Operation by Taguchi Method". *Materials Today: Proceedings*, Vol. 5(4), p. 28089-28097.
- Montgomery, D. C., 2013. *Design and Analysis of Experiments*. John Wiley & Sons, New Jersey, 6ª edição.
- Nomani, J., Pramanik, A., Hilditch, T. e Littlefair, G., 2017. "Stagnation Zone during the Turning of Duplex SAF 2205 Stainless Steels Alloy", *Materials and Manufacturing Processes*, Vol. 32 (13), p. 1486-1489.

- Paiva, E.J., 2008. Otimização de Processos de Manufatura com Múltiplas Respostas Baseadas em Índices de Capacidade. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá.
- Prasath, K.M., Pradheep, T. e Suresh, S., 2018. "Application of Taguchi and Response Surface Methodology (RSM) in Steel Turning Process to Improve Surface Roughness and Material Removal Rate." *Materials Today: Proceedings*, Vol. 5(11), p. 24622–24631.
- Sandvik Coromant, 2018. "Sandvik Coromant". <https://www.sandvik.coromant.com>
- Sarikaya, M., Yilmaz, V. e Güllü, A., 2016. "Analysis of Cutting Parameters and Cooling/Lubrication Methods for Sustainable Machining in Turning of Haynes 25 Superalloy.". *Journal of Cleaner Production*, Vol. 173, p. 172–181.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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

ANALYSIS OF SURFACE ROUGHNESS R_a IN THE TURNING OF STAINLESS STEEL UNS S32750 USING DESIGN OF EXPERIMENTS

Carlos Filipe Nascimento
Carlos Henrique de Oliveira
Fabiana Ferreira Silva Vieira
Patrícia Frederico
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: carlosfelipen8@gmail.com; carlos.henrique@unifei.edu.br; fabnany@yahoo.com.br; patriciafrederico@hotmail.com; tgbrito@unifei.edu.br; emersonpaiva@unifei.edu.br.

Abstract. *The growing technological advance in metal mechanics industry means that companies prioritize the quality of their products in different manufacturing processes and turning, due to its versatility, has been emphasizing among the different applications and types of steel. The UNS S32750 super duplex stainless steel is applied in marine and petrochemical companies due to its mechanical properties and corrosion, but of difficult machinability. This work aims to study the influence of cutting parameters on R_a roughness using DOE (Design of Experiments) and analysis of variance (ANOVA) and material removal rate (MRR) that will be calculated analytically in the turning process employing coated carbide cutting tools by the chemical vapor deposition (CVD) and non-fluid, the following input variables being select: cut speed (v_c), cut depth (a_p) and feed rate (f). The results showed that the feed is the factor that most influenced the roughness of the surface, with a lower observed value of $0.30 \mu\text{m}$.*

Keywords: Analysis of Variance (ANOVA). Quality. Dry Turning. Cutting Parameters.

RESPONSIBILITY NOTICE

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