

OTIMIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DE CORTE NO TORNEAMENTO DO AÇO INOXIDÁVEL 304 PARA A REDUÇÃO DA RUGOSIDADE SUPERFICIAL

Guilherme Augusto Vilas Boas Vasconcelos

Matheus Brendon Francisco

IEM-UNIFEI-Universidade Federal de Itajubá. Av. BPS. 1303 CEP:37500-903

e-mails guilhermevasconcelos01@yahoo.com.br; matheus_brendon@yahoo.com.br;

Carlos Henrique de Oliveira

IEI-UNIFEI-Universidade Federal de Itajubá. Campus avançado de Itabira. Rua irmã Ivone Drummond; nº 200. CEP: 35903-087. Itabira-MG

e-mail carlos.henrique@unifei.edu.br

Luís Felipe dos Santos Carollo

Centro Universitário de Itajubá- Av. Doutor Antônio Braga Filho Porto Velho CEP: 37501-002

e-mail felipecarollo@yahoo.com.br

Resumo. As técnicas de otimização, nos últimos anos, evoluíram muito, encontrando ampla aplicação em diversos tipos de indústrias, principalmente porque a tomada de decisão sobre problemas complexos envolve a otimização de processos e projetos de engenharia. Eles agora são capazes de resolver problemas cada vez maiores e mais complexos, graças a uma nova geração de computadores poderosos. Este trabalho apresenta um estudo de otimização em um processo de torneamento do aço inoxidável 304, utilizando o planejamento fatorial completo e o gradiente reduzido generalizado (GRG). O objetivo foi estabelecer os pontos ótimos das variáveis do processo que minimizam o valor da rugosidade na peça usinada. As variáveis utilizadas foram velocidade de corte (150-300 m/min), avanço (0,05-0,2 mm/rot) e profundidade de corte (0,2-2,0 mm). Para a experimentação foram utilizados 8 corpos de prova de Ø44,45 x 50 mm. A rugosidade Ra gerada pela otimização GRG foi de 0,44 µm e a rugosidade encontrada na experimentação foi de 0,675 µm. Essa diferença pode ser explicada devido aos ruídos presentes no processo não terem sido considerados. Contudo o valor encontrado na experimentação foi considerado como satisfatório.

Palavras-chave: Planejamento de experimentos. Otimização. Torneamento. Rugosidade. Aço Inoxidável 304.

1. INTRODUÇÃO

A usinagem do aço inoxidável de maneira geral, apresenta uma grande complexidade para as indústrias de manufatura, pois é um material de difícil usinabilidade devido à sua baixa condutividade térmica, alta resistência a tração, baixas taxas de remoção de cavaco, elevadas forças de corte e consequentemente altas potências de corte (Koyee *et al.* 2014). Sua alta taxa de endurecimento levam a modificações mecânicas causando vibrações e cavacos instáveis, e por fim causa também o desgaste prematuro das ferramentas de corte (Philip *et al.* 2018 e Policena *et al.*, 2018).

A complexidade da usinagem se dá, devido a estrutura dos aços inoxidáveis tem em sua composição química a presença de elementos de liga, como o cromo, níquel e o molibdênio onde em sua composição química a variação chega a ser de 10% a 20%. (Benardos e Vosniakos, 2003). O cromo é um elemento importante neste aço, pois é dele que se consegue algumas qualidades como: alta resistência a corrosão, corrosão sob tensão e pites, alta dureza, excelente ductilidade e alta tenacidade. Suas aplicações são nos setores químicos, petroquímicos e nas indústrias de gás. (Gamarra e Diniz, 2018).

O principal problema enfrentado pelas empresas de manufatura é a necessidade de manter a melhoria contínua, aumentar a produtividade e ao mesmo tempo, diminuir os custos de produção. Existem muitas variáveis que afetam os custos de qualidade e produção do produto, incluindo parâmetros de corte, materiais de ferramentas, geometria da ferramenta, tecnologia de revestimento, lubrificantes etc. As indústrias utilizam do método de tentativa e erro para avaliarem o comportamento dos seus processos produtivos, como exemplo, a obtenção de melhor acabamento de superfície, e acabam dispendendo muito tempo e dinheiro (Airao *et al.* 2018). Com o mercado cada vez mais competitivo, esse tipo de método vem sendo substituído pelas aplicações de ferramentas estatísticas. As otimizações de um processo de usinagem utilizando o método do planejamento de experimentos é um tema que merece destaque, visto que seus resultados buscam principalmente encontrar os pontos ótimos do processo afim de reduzir custo, aumentar a vida da ferramenta de corte (De Oliveira *et al.* 2019). Grine *et al.* (2011) e Haridy *et al.* (2011) afirmam que o Projeto de

Experimentos (DOE) é um método estruturado e organizado, utilizado na determinação do relacionamento entre os diferentes fatores de entrada e saídas do processo, envolvendo a definição do conjunto de experimentos, nos quais todos os fatores relevantes são variados sistematicamente (Montgomery, 2013) e (Montgomery, 2009). Portanto, esta pesquisa tem como objetivo determinar os fatores (velocidade de corte, avanço e profundidade de corte) que mais influenciam na rugosidade superficial da peça usinada durante o processo de torneamento do aço inoxidável 304 e quais os parâmetros ótimos que minimizam o valor de R_a .

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Para a realização dos experimentos, foi utilizado um torno CNC da marca ROMI, com 15 kW de potência e rotação máxima de 4000 rpm. Para os ensaios utilizou-se um inserto de metal duro com código TNMG-160408, classe ISO M25. O suporte foi o MTJNR 2525 M16 com fixação por grampo e parafuso e $K_r = 95^\circ$. O material usinado foi o aço inoxidável 304, com dimensões de $\varnothing 44,45$ mm x 50 mm com dureza média de 200 HB, sua composição química pode ser observada na “Tab. 1”.

Tabela 1. Composição química do aço inoxidável 304 (Imoa, 2014)

C	Si	Mn	P	S	N	AL	Cr	Mo	Ni	Cu	W	Co
0,013	0,47	1,22	0,019	0,01	0,19	0,008	22,24	3,14	5,62	0,19	0,02	0,05

Para a coleta de dados, foi utilizado um arranjo fatorial completo 2^x , com 3 variáveis e 2 níveis, totalizando 8 experimentos para as variáveis controláveis. Os níveis de operação dos parâmetros de corte encontram-se na “Tab. 2”.

Tabela 2. Parâmetros de processos utilizado no processo de torneamento (Autoria Própria)

Parâmetros	Níveis	
	-1	+1
Velocidade de corte (v_c) [m/min]	150	300
Avanço (f_n) [mm/rot]	0,05	0,20
Profundidade de corte (a_p) [mm]	0,20	2,0

Após a realização de todos os experimentos, utilizando o fluido de corte MET CUT e com vazão máxima de 15 bar, a rugosidade R_a foi medida com o auxílio do rugosímetro portátil da marca Mitutoyo. Foram realizadas 3 medições equidistantes a 120° e perpendicular ao sulco da usinagem e considerado o valor médio das leituras. Após a medição, construiu-se a matriz experimental, conforme “Tab. 3”.

Tabela 3. Matriz experimental e valores de rugosidade R_a para o torneamento do aço inoxidável 304 (Autoria Própria)

Ordem corridas	Pontos Centrais	Blc	v_c [m/min]	f_n [mm/rot]	a_p [mm]	R_a [μ m]	σ_{R_a}
1	1	1	300	0,05	0,2	0,346	0,022
2	1	1	150	0,05	2	0,684	0,027
3	1	1	150	0,05	0,2	0,361	0,016
4	1	1	300	0,2	0,2	1,973	0,263
5	1	1	150	0,2	2	1,816	0,206
6	1	1	300	0,2	2	1,665	0,120
7	1	1	150	0,2	0,2	2,193	0,186
8	1	1	300	0,05	2	0,632	0,093

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Modelo Matemático

Com os resultados obtidos por meio do processo de experimentação, foi possível estabelecer relações estatísticas para os parâmetros do processo. Foi utilizado um modelo de regressão linear para representar a relação entre a resposta de interesse com as variáveis estabelecidas previamente no processo. O modelo matemático, de acordo com a “Eq. 1”, representa a rugosidade R_a em função dos parâmetros de usinagem e suas interações. A “Tabela 4” apresenta o sumário

do modelo. Percebe-se que o valor encontrado para R^2 ajustado é de 90,74%, ou seja, o modelo consegue explicar uma quantidade significativa dos dados do processo.

$$Ra = 0,213 - 0,00073 Vc + 9,37 fn - 0,0106 Ap \quad (1)$$

Tabela 4. Resumo dos parâmetros encontrados para o modelo gerado via planejamento de experimentos.

S	R2	R2(aj)	R2(pred)
0,235791	94,71%	90,74%	78,82%

3.2. Análise do gráfico de Pareto e efeitos principais

O gráfico de Pareto é um gráfico que representa quais dos fatores tem influência significativa no processo (Montgomery, 2005). Nota-se na “Fig. 1” que as barras que ultrapassam a linha de Lenth, são os fatores significativos do processo e é possível identificar que o avanço e a interação entre avanço e profundidade de corte, exercem maior influência na rugosidade R_a .

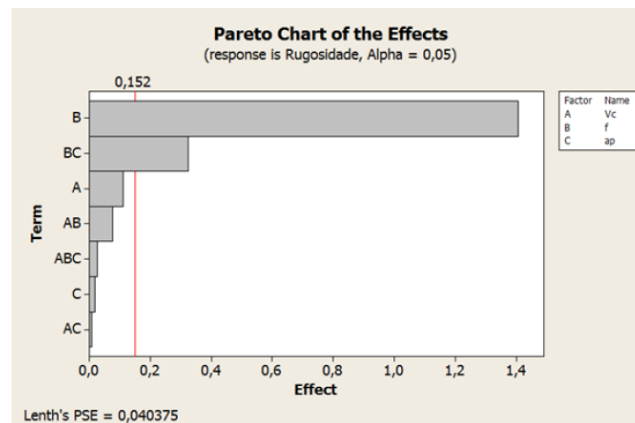


Figura 1. Gráfico de Pareto (Autoria Própria)

O gráfico dos efeitos principais apresenta a influência dos fatores controláveis na variável de resposta. Na “Fig. 2” é possível verificar que a rugosidade R_a é mínima ao utilizar a velocidade no nível +1, o avanço no -1 e na profundidade de corte no +1. Entretanto, o avanço foi a variável que mais influenciou na resposta do processo. Isso comprova o que diz a teoria quando Segundo Machado (2009) a rugosidade da superfície é diretamente proporcional ao quadrado do avanço e inverso o raio da ponta da ferramenta. Assim, quanto maior o avanço maior será a altura dos picos e vales, provocando um aumento da rugosidade da superfície.

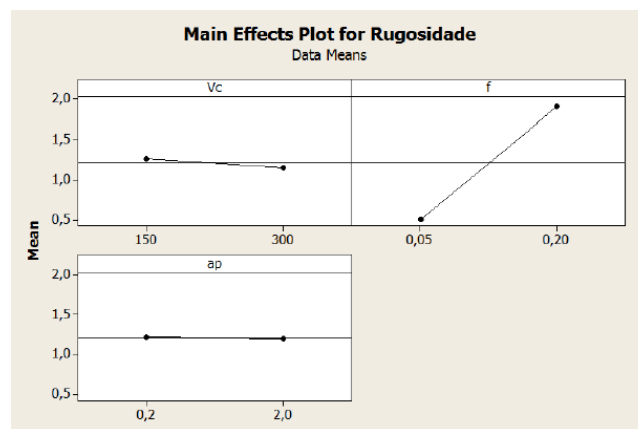


Figura 2. Gráfico dos efeitos principais para a Rugosidade R_a (Autoria Própria)

3.3. Otimização do processo

O método de otimização utilizado neste trabalho foi o Gradiente Reduzido Generalizado (GRG). Luenberger e Ye (2008) relatam que esse método apresenta três vantagens significantes: se o processo termina antes da confirmação do ótimo, a última resposta encontrada é viável e provavelmente próxima do ponto ótimo; se o método gera uma sequência de respostas convergentes, o ponto limite garante, pelo menos, um mínimo local e, por fim, o método não depende de convexidade da função. Este algoritmo é amplamente utilizado por estar disponível na ferramenta *Solver* do EXCEL.

O modelo geral para o GRG é baseado na conversão das restrições do problema para uma irrestrição, utilizando substituição direta. Dessa forma, segundo Chen e Fan (2002), os vetores das variáveis de processo x pode ser dividido em dois subvetores x^B e x^N , para escrever o problema programação não linear (*Nonlinear Programming* – NLP) de maneira reduzida conforme a “Eq.2”.

$$\text{Minimizar } F(x) = f[x^B(x^N), x^N] \quad (2)$$

$$\text{Sujeito a: } l_N \leq x^N \leq \mu_N$$

Onde x^B é o vetor de variáveis básicas m , x^N é o vetor de variáveis não básicas $n-m$ e o vetor x^N apresenta limite inferior l_N e limite superior μ_N . O algoritmo GRG define uma direção de movimento para a otimização da função objetivo após inicializar-se com um ponto viável x^K . Esta direção de movimento é obtida pelo gradiente reduzido conforme a “Eq. 3”.

$$r^k(x_N) = \left[\frac{\partial f^k}{\partial x_N^k} \right]^T - \left[\frac{\partial f^k}{\partial x_B^k} \right]^T \left[\frac{\partial g^k}{\partial x_B^k} \right]^{-1} \left[\frac{\partial g^k}{\partial x_N^k} \right] \quad (3)$$

A busca do ponto ótimo do algoritmo é interrompida quando a magnitude do gradiente reduzido atinge o valor erro desejado. Caso contrário, uma nova busca é realizada para localizar um novo ponto na direção do gradiente reduzido. Este procedimento é executado até que a melhor solução viável seja encontrada. Dessa forma, utilizando o algoritmo mencionado, obtém-se os seguintes parâmetros ótimos:

- Velocidade de corte: 300 m/min
- Avanço: 0,05 mm/min
- Profundidade de corte: 2 mm

Substituindo esses parâmetros na “Eq. 1”, obtém-se um valor teórico de rugosidade, igual a 0,44 μm . Para a confirmação desta otimização, foi usinado 1 corpo de prova, com o objetivo de comprovar a eficácia da ferramenta estatística e também verificar se o resultado da rugosidade está condizente com ensaios experimentais. Após a usinagem do experimento final, também foram realizadas 3 medições equidistantes a 120° graus e perpendicular ao sulco da usinagem e feita a média aritmética dos valores encontrados, conforme “Tab. 5”.

Tabela 5. Matriz de medição de confirmação (Autoria Própria)

Medições	Rugosidade R_a (μm)
1	0,618
2	0,611
3	0,797
Média	0,675

O resultado final obtido, após a experimentação de confirmação, mostra que há uma discrepância entre o valor de rugosidade otimizado e o valor experimentado. Isso pode ser explicado devido à presença de variáveis de ruídos no processo de usinagem, por exemplo, o desgaste da ferramenta de corte, as vibrações, as variações relacionadas com a força de corte, a concentração do fluido de corte, dentre outras. Entretanto, o valor de rugosidade da superfície encontrado é um acabamento equiparado ao processo de retificação, portanto é significativo para o processo de torneamento (Machado, 2009). Esse resultado comprova que a metodologia de otimização Gradiente Reduzido Generalizado (GRG) é eficiente para determinar os pontos ótimos do processo de torneamento.

4. CONCLUSÕES

A análise estatística mostrou ser uma ferramenta muito eficaz para a previsão de modelagem da rugosidade R_a em função dos parâmetros de corte utilizados no processo de torneamento do aço inoxidável 304. O modelo de regressão linear apresentou um R^2 (aj) de 90,74%, ou seja, o modelo consegue explicar uma quantidade significativa dos dados do processo. A análise mostra também que os fatores que mais influenciaram o processo foi o avanço (f_n) e a interação entre avanço (f_n) e profundidade de corte (a_p). A análise dos efeitos principais mostrou que, para obter baixas rugosidades R_a , o processo deve trabalhar com o avanço no nível -1 (0,05 mm/rot), a velocidade de corte no nível +1 (300 m/min) e a profundidade de corte no nível +1 (2,0 mm), porém o fator determinante para o processo é o avanço. A otimização realizada pelo método do Gradiente Reduzido Generalizado (GRG) mostrou ser eficiente na determinação dos parâmetros ideais para o processo, onde os valores dos parâmetros para se obter uma baixa rugosidade da superfície são velocidade de corte (300 m/min) avanço (0,05 mm/rot) e profundidade de corte de (2 mm). A diferença entre o valor de rugosidade proposto pela otimização e o encontrado pela experimentação, pode ser explicado devido aos ruídos contidos no processo e os mesmos não terem sido previstos no modelo. Entretanto, a rugosidade encontrada na experimentação é significativa para o processo de torneamento, visto o seu acabamento ser equiparado ao processo de retificação.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer o suporte financeiro das seguintes agências de fomento brasileiras: CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico), CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) e FAPEMIG (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais). Os autores também gostariam de agradecer a empresa RCS Usinagem de Manutenção e Precisão Eireli pelo apoio na realização dos experimentos.

6. REFERÊNCIAS

- Airao, J. et al. An Experimental Study of Surface Roughness Variation in End Milling of Super Duplex 2507 Stainless Steel. *Materials Today: Proceedings*, v. 5, n. 2, p. 3682–3689, 2018.
- Benardos, P. G.; vosniakos, G. C. Predicting surface roughness in machining: A review. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, v. 43, n. 8, p. 833–844, 2003.
- Chen, M. C., fan, S. S. Tolerance evaluation of minimum zone straightness using nonlinear programming techniques: a spreadsheet approach. *Comp. Ind. Eng.* 43 (3), p. 437- 453, 2002.
- De Oliveira, C. H. et al. Análise da rugosidade R_a no fresamento de topo do aço inoxidável duplex uns s32205 utilizando planejamento de experimentos. 10º Congresso Brasileiro de Engenharia de Produção. January 2019, 2019.
- Gamarra, J. R.; diniz, A. E. 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*, v. 40, n. 1, p. 1–13, 2018.
- Grine, K. et al. Using the design of experiment to model the effect of silica sand and cement on crushing properties of carbonate sand. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, v. 44, n. 1, p. 195–203, 2011.
- Haridy, S.; Gouda, S. A.; WU, Z. An integrated framework of statistical process control and design of experiments for optimizing wire electrochemical turning process. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 53, n. 1–4, p. 191–207, 2011.
- Imoa, 2014. “International Molybdenum Association”. <<https://www.imoa.info/molybdenum-media-centre/downloads>>.
- Koyee, R. D. et al. Modeling and optimization of turning duplex stainless steels. *Journal of Manufacturing Processes*, v. 16, n. 4, p. 451–467, 2014.
- Luenberger, D. G.; YE, Y. *Linear and nonlinear programming*. 3 ed. New York: Springer, 516 p. 2008.
- Machado, A. R.; Abrão, A. M.; Coelho, R. T.; Silva, M. B. *Teoria da Usinagem dos Materiais*. 1ª ed. São Paulo: Editora Blucher, 2009.
- Montgomery, D. C. *Design and Analysis of Experiments*. 7 ed. New York: John Wiley & Sons, 2009.
- Montgomery, D. C. *Design and Analysis of Experiments*. 8ª ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2013.
- Philip Sevaraj, D.; Chandramohan, P.; Chandrasekar, P. Experimental investigations of nitrogen alloyed duplex stainless steel in dry milling process. *Journal of Engineering Science and Technology*, v. 13, n. 2, p. 321–331, 2018.
- Policena, M. R. et al. Surface roughness analysis in finishing end-milling of duplex stainless steel UNS S32205. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 98, n. 5–8, p. 1617–1625, 2018.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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

OPTIMIZATION OF CUTTING PARAMETERS IN TURNING STAINLESS STEEL 304 TO REDUCE SURFACE RUGOSITY

Abstract. Optimization techniques have been used a lot in recent years, finding wide applications in several types of industries, mainly because decision making on complex problems involves the optimization of engineering process and projects. This work presents an optimization study in a 304 stainless steel turning process, using the complete factorial design and the generalized reduced gradient (GRG). They can solve ever bigger and more complex problems, thanks to a new generation of powerful computers. The objective was to establish the optimum points of the process variable that minimize the roughness value in the machined part. The variables used were cutting speed (150-300 m/min), feed (0.05-0.2 mm/rot) and depth of cut (0.2-2 mm). For the experimentation 8 specimens of Ø44,45 x 50 mm were used. The Ra roughness generated by the GRG algorithm was 0.44 μm and the roughness found in the experiment was 0.675 μm . This difference can be explained because the noise present in the process was not considered. However, the value found in the experiment was satisfactory.

Keywords: Design of experiments. Optimization. Turning. Roughness. Stainless Steel 304.

RESPONSIBILITY NOTICE

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