

OTIMIZAÇÃO DA RUGOSIDADE NO PROCESSO DE TORNEAMENTO INTERNO PELO MÉTODO DA RESTRIÇÃO NORMAL

Jéssica Tito Vieira

Universidade Federal de Itajubá, Av. BPS, 1303, Bairro Pinheirinho, Itajubá – MG

jessica.tito@hotmail.com

Lincoln Cardoso Brandão

Universidade Federal de São João del-Rei, Praça Frei Orlando, 170, Centro, São João del-Rei -MG

lincoln@ufsj.edu.br

Robson Bruno Dutra Pereira

Universidade Federal de São João del-Rei, Praça Frei Orlando, 170, Centro, São João del-Rei -MG

robsondutra@ufsj.edu.br

João Roberto Ferreira

Universidade Federal de Itajubá, Av. BPS, 1303, Bairro Pinheirinho, Itajubá – MG

jorofe@unifei.edu.br

Samuel Alves Freitas

Universidade Federal de Uberlândia, Rua Eng. Diniz 1178, Uberlândia -MG

samuelengmec@gmail.com

Resumo. O torneamento interno é um dos processos mais utilizados na indústria de diversos metal-mecânica. A sua grande aplicação faz com que cada vez mais os processos de torneamento visem a produção de peças com alta qualidade, buscando associar ao processo uma extrema precisão aliada ao controle estatístico. O presente trabalho estudou a otimização robusta do processo de torneamento interno de tubos do aço SAE 4130. Ensaios foram realizados seguindo um planejamento composto central de face centrada, combinando variáveis de controle, velocidade de corte, avanço e a posição de fixação do tubo na placa, e variáveis de ruído, comprimento em balanço e altura medida na superfície do furo. A metodologia utilizada foi a de superfície de resposta e foram aplicados o projeto de parâmetro robusto, a otimização do erro quadrático médio e o método de otimização bi-objetivo da restrição normal normalizado. Os resultados demonstraram os efeitos das variáveis de controle e ruído na resposta de rugosidade, sendo o menor valor de avanço que implicou na redução da rugosidade.

Palavras chave: Torneamento interno. Metodologia de superfície de resposta. Projeto de parâmetro robusto. Método da restrição normal normalizado. Rugosidade.

1. INTRODUÇÃO

Dentro da indústria de bens de consumo metal-mecânica, quase sempre se utiliza uma peça que passou pelo processo de torneamento, seja para fabricação total ou parcial dessa peça ou, ainda, para elaboração apenas de detalhes cilíndricos ou cônicos. De acordo com a definição apresentada por Ferraresi (1977), torneamento é o processo mecânico de usinagem destinado a obtenção de superfícies de revolução com auxílio de uma ou mais ferramentas monocortantes.

O torneamento interno é uma operação de usinagem que tem como objetivo aumentar o diâmetro interno de um furo pré-existente (SUYAMA, 2014). Geralmente, o furo é gerado a partir de um processo de furação ou mesmo de uma etapa anterior como a fundição (ou forjamento). Muitas vezes, o torneamento interno também tem como objetivo garantir ao furo tolerâncias de forma geométricas e prover uma qualidade superficial almejada.

No processo de torneamento interno, atingir uma qualidade superficial desejada é mais complicado do que quando se compara com o processo de torneamento externo. Na usinagem interna, geralmente, exige-se uma ferramenta com um comprimento maior, o qual é o elemento mais flexível do sistema, sendo em alguns casos o principal responsável pela ocorrência de vibrações, podendo assim interferir na qualidade superficial da peça torneada.

Diversos trabalhos utilizam o processo de torneamento com a metodologia de superfície de resposta (Response Surface Methodology – RSM). Esse método é bastante utilizado na otimização da qualidade superficial de peças torneadas. Vários autores empregaram e justificaram a importância de estudar a metodologia de superfície de resposta (RSM) aplicada à modelagem e otimização de processos. Nanavati (2013) estudou os efeitos dos parâmetros do processo de torneamento e do raio de ponta sobre a rugosidade média (R_a) usando as técnicas de otimização de Taguchi e a metodologia de superfície de resposta (RSM). Neseli e colaboradores (2011) aplicaram a metodologia de superfície

de resposta (RSM) a fim de otimizar o efeito dos parâmetros da geometria da ferramenta sobre a rugosidade no torneamento da liga AISI 1040 com a ferramenta P25.

Aliado a metodologia de superfície de resposta, o projeto de parâmetro robusto, utilizando a estratégia de arranjo combinado, tem sido aplicado com sucesso, uma vez que reduz o número de experimentos e possibilita o estudo da interação entre variáveis de ruído e processo e obtenção de modelos de média e variância para a resposta de interesse a partir da propagação do erro em relação às variáveis de ruído (MYERS et al., 1992). Agrupado ao projeto de parâmetro robusto, a minimização do erro quadrático médio (mean square error - MSE) tem o intuito de aproximar do alvo a média modelada da resposta de interesse e, em paralelo, minimizar a variância desta mesma resposta (BOX; JONES, 1992).

O objetivo geral deste trabalho consistiu na análise, modelagem e otimização robusta do processo de torneamento interno de tubos do aço SAE 4130. Para isso, foram utilizados a metodologia de superfície de resposta, o projeto de parâmetro robusto, a minimização do erro quadrático médio e o método da restrição normal normalizado.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O processo de torneamento interno difere-se do processo de torneamento externo em vários aspectos. No torneamento externo, uma ferramenta é normalmente curta e rigidamente apertada, enquanto que nas operações de torneamento interno, a ferramenta utilizada é longa e com suporte de diâmetros menores. Dessa forma, torna-se bastante dinâmico, complicado e dependente dos fatores do processo atingir uma rugosidade ideal e minimizar os erros de forma no torneamento interno (MUNAWAR et al., 2011).

Na Figura 1 são apresentados os fatores que influenciam o processo de torneamento interno, o diâmetro do suporte da ferramenta de corte ($\varnothing D$), o comprimento em balanço do suporte da ferramenta (L), os parâmetros de corte como o número de rotações por minutos (n), o diâmetro interno a ser usinado ($\varnothing D_w$) e a velocidade de avanço (V_f). Esses fatores devem ser adequadamente selecionados para um melhor acabamento superficial da peça torneada.

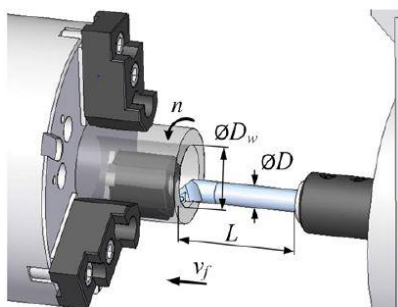


Figura 1. Representação geral do processo de torneamento interno.

Fonte: Sortino et al., 2012.

A utilização de um sistema rígido evita as vibrações que podem causar danos à usinagem interna. Contudo, a qualidade de uma operação de usinagem interna é determinada pela rigidez estática e dinâmica do sistema composto por máquina, sistema de fixação, ferramenta e peça (SUYAMA, 2014).

3. MÉTODO DA RESTRIÇÃO NORMAL

O método da restrição normal normalizado (Normalized Normal Constraint - NNC) (MESSAC et al., 2003), em sua versão melhorada, foi proposto com a finalidade de realizar uma exploração completa e equipada da fronteira de Pareto (SANCHIS et al., 2008).

O método da restrição normal normalizado melhorado (Enhanced Normalized Normal Constraint – ENNC) pode ser resolvido a fim de obter um ponto ótimo de Pareto associado, para os casos, $m = 2$, $m = 3$ e $m > 3$. Porém, é importante enfatizar que para o caso bi-objetivo, o método NNC não apresenta problema de exploração da fronteira de Pareto, sendo desnecessárias as implementações do ENNC, foi o caso aplicado no presente trabalho. Portanto, considerando a formulação nas Equações (1) e (2), o método NNC para o caso bi-objetivo pode ser formulado conforme segue:

$$\text{Min}_{(x \in \Omega)} \quad \{\bar{f}_2\} \quad (1)$$

$$\text{Sujeito a:} \quad \bar{N}_1^T (\bar{f} - \bar{Q}_{ij}) \leq 0 \quad (2)$$

A restrição do método NNC reduz o espaço viável, segundo o ponto ij Q. Para o caso bi-objetivo, esta redução é ilustrada na Fig. 2. Pode-se observar que à medida que o ponto Q_{ij} no plano de utopia é variado, o espaço restrito é atualizado e um novo ponto na fronteira de Pareto é obtido.

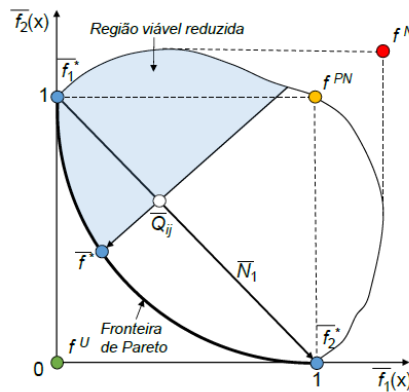


Figura **Erro! Nenhum texto com o estilo especificado foi encontrado no documento..** NNC para o caso bi-objetivo.
Fonte: PERREIRA, 2017.

4. MATERIAIS E METODOS

Os experimentos de torneamento interno foram realizados no laboratório de fabricação do DEMEC/UFSJ em um centro de torneamento ROMI GL 240-M com velocidade de avanço rápido longitudinal e transversal de 30 m/min, rotação máxima de 6.000 rpm e potência máxima na árvore de 22,5 kW, sendo programado por um comando CNC Fanuc Oi TD.

Utilizou-se uma barra de mandrilar com o código A16R-PCLNR 09 e uma ferramenta para o torneamento interno com o código ISO CNMG 09 03 04-PF. Os corpos de prova utilizados nos experimentos foram provenientes de tubos de aço SAE 4130 com 1000 mm de comprimento, 40,8 mm de diâmetro externo e 34,1 mm de diâmetro interno. Os tubos foram cortados com 45 mm de comprimento e realizou-se um passe com profundidade de corte de 0,5 mm no diâmetro interno para remoção da camada de oxidação e garantia de um experimento de usinagem mais uniforme.

As variáveis de controle (X) avaliadas foram: a velocidade de corte (vc), avanço (f) e posição de fixação do corpo de prova (fp). A velocidade de corte e o avanço são variáveis importantes no torneamento e podem influenciar na produtividade, temperatura, vida da ferramenta, acabamento, dentre outros fatores. A escolha de controlar a posição de fixação do corpo de prova surgiu com a possibilidade de avaliar o efeito do posicionamento do tubo na placa do torno em relação às respostas analisadas. A Figura 3 expõe as posições de fixação do corpo de prova e os comprimentos em balanço da barra de mandrilar empregados. Os níveis das variáveis de controle foram definidos considerando pré-testes realizados e recomendações do fabricante da ferramenta, conforme Tab. 1. A profundidade de corte (ap) foi fixada em 1 mm.

Além das variáveis de controle, como variáveis de ruído (Z), foram considerados o comprimento em balanço da barra de mandrilar (lto) e a altura medida no furo (lb). O objetivo de realizar um planejamento combinando variáveis de controle e ruído é, principalmente, tornar o processo robusto à variação do ruído. Variáveis de ruído são variáveis que não podem ser mantidas constantes a nível industrial ou nas quais há dificuldade de controle. No entanto, experimentalmente, pode-se controlá-las e investigar seu efeito e interação com as demais variáveis de processo, além de buscar minimizar seu efeito na resposta.

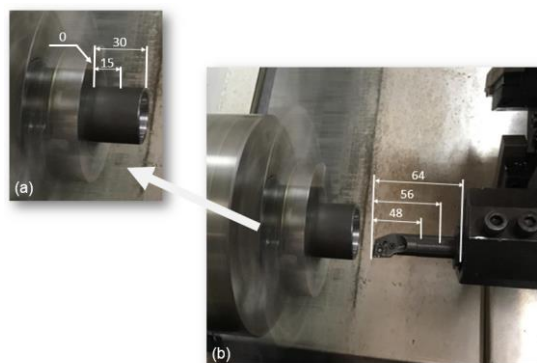


Figura 3. Detalhe dos testes de usinagem: (a) Posição de fixação do corpo de prova e (b) comprimento em balanço da barra de mandrilar.

Tabela 1. Variáveis de controle, ruído e níveis definidos para os testes experimentais.

Variáveis de controle		Níveis			unidade
		-1	0	1	
x1	Vc	90	120	150	m/min
x2	f	0,07	0,095	0,12	mm/rot
x3	fp	0	15	30	mm
Variáveis de ruído					
z1	lto	48	56	64	mm
z2	lb	Início	Meio	Fim	mm

A resposta (Y) analisada nos resultados foi a rugosidade Rz, que é definida como rugosidade máxima e é uma medida de amplitude. Para medição das respostas de rugosidade dos corpos de prova usinados, foi utilizado um medidor de rugosidade e perfil *Form Talysurf Intra* da *Taylor Hobson®* com deslocamento transversal de 50 mm, campo de medição de $\pm 0,5$ mm, velocidade de deslocamento de até 10 mm/s, velocidade de medição de até 0,5mm/s, velocidade de retorno de até 10 mm/s e medição dos parâmetros de rugosidade e ondulação.

A Figura 4 ilustra as posições de medição de rugosidade. As medições de rugosidade foram realizadas em três posições radiais equidistantes de 120° e três posições no sentido da altura medida no furo de 5 mm cada uma e com espaçamento entre as posições de 13 mm, conforme a Figura 4. Foi considerado um cut off de 0,25 mm para perfis periódicos, segundo a norma ISO 4288 – 1996 (HOBSON, 2011). O resultado médio das três posições radiais equidistantes foi tomado para análise de acordo com o nível do fator de ruído altura medida no furo.

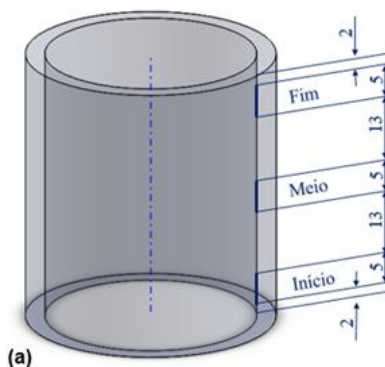


Figura 4. Posições de medição de rugosidade no cilindro usinado.

Para a modelagem e otimização robusta do processo de torneamento interno, experimentos foram planejados e realizados por meio de um arranjo composto central de face centrada (Face Centered Central Composite Design - FCD). O planejamento contém trinta e dois ensaios segundo um fatorial meia fração, dezesseis pontos, dez pontos centrais e seis pontos axiais, desconsiderando os quatro pontos axiais das variáveis de ruído. Os experimentos foram conduzidos em ordem aleatória.

5. ANÁLISES DE RESULTADOS

A Figura 5(a) mostra o perfil de rugosidade com o menor valor de Rz encontrado, o qual corresponde ao ensaio 25 na posição de 120°. Para este experimento a altura medida foi no meio do furo, lb = 0. A Figura 5 (b) mostra o perfil de rugosidade com maior valor de Rz coletado, correspondente ao ensaio 15 na posição de 240°, sendo que o perfil de maior valor de Rz foi obtido entre as três posições medidas. Para esse experimento, a altura medida foi no início do furo, lb = -1.

A ANOVA para Rz é apresentada na Tab. 2. A Figura 6 apresenta o gráfico de efeitos lineares e quadráticos para Rz. Em relação aos efeitos lineares, apenas vc e f foram estatisticamente significativos. A variável de ruído lto apresentou significância no efeito linear positivo, sendo que o nível mais baixo de lto implicou a redução de Rz. Em relação aos efeitos quadráticos das variáveis de processo, houve significância apenas no efeito de vc, no qual a convexidade era voltada para cima, de modo que o nível central vc acarretou uma redução na rugosidade máxima Rz. É importante considerar Rz com a finalidade de avaliar a dispersão do perfil de rugosidade, pois parâmetros de dispersão podem ser mais sensíveis às variáveis de ruído (PEREIRA, 2017).

A Figura 7 apresenta os gráficos de interação para a resposta Rz. Em relação às interações processo*processo, vc*f e f*fp apresentaram significância estatística. Na interação vc*f, pôde-se observar que vc no nível central e f no nível mais baixo implicaram a redução de Rz. Já na interação f*fp, com o menor nível de f e fp no nível mais alto e central tenderam a reduzir os valores de Rz.

No caso das interações processo*ruído, observou-se significância estatística para as interações fp*lb e fp*lto. Na interação fp*lb, observou-se que níveis mais altos de fp proporcionaram robustez em relação à variação da altura

medida no furo para resposta Rz. Pode-se observar graficamente na Fig. 6 que na interação fp*lto, independente dos níveis da posição de fixação, o aumento do comprimento em balanço acarreta o aumento da rugosidade máxima. Isso representa uma dificuldade no RPD, impossibilitando alcançar a robustez de fp em relação à variação do comprimento em balanço.

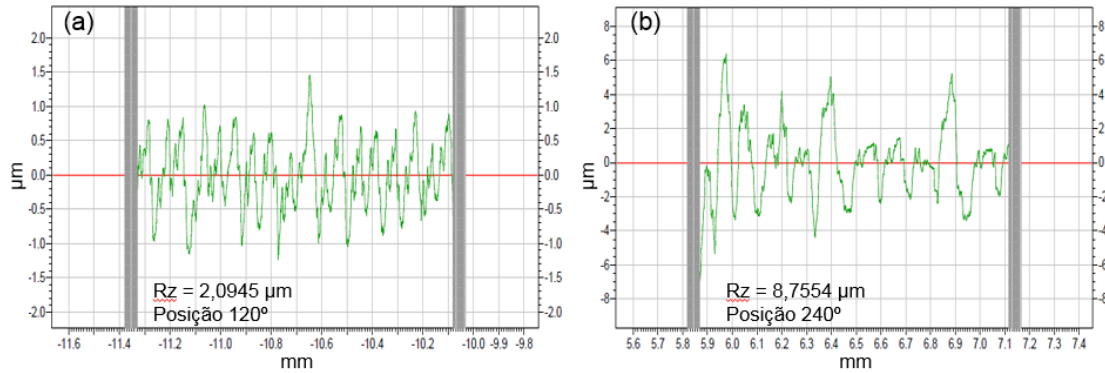


Figura 5. Perfil de rugosidade Rz.

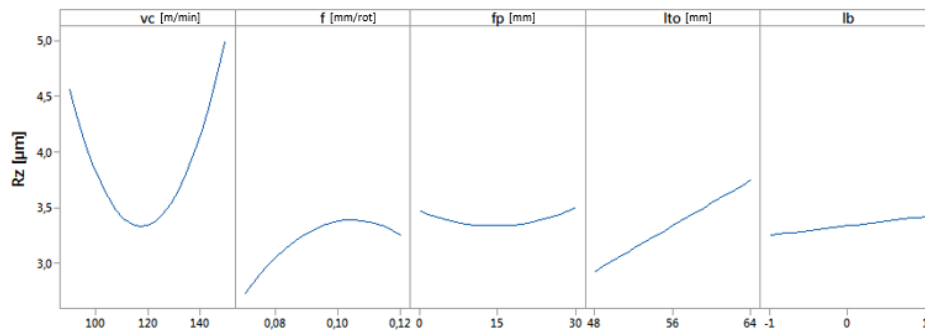


Figura 6. Gráficos de efeito linear e quadrático para Rz.

Tabela 2. ANOVA para Rz.

FV	GL	SQ	MQ	F	P-valor
Modelo	18	2105,10	116,95	57,74	0,000
Bloco	1	127,38	127,38	62,89	0,000
Linear	5	243,41	48,68	24,03	0,000
vc	1	29,60	29,60	14,61	0,002
f	1	34,98	34,98	17,27	0,001
fp	1	0,17	0,17	0,08	0,777
lto	1	51,09	51,09	25,22	0,000
lb	1	2,21	2,21	1,09	0,316
Quadrático	3	399,49	133,17	65,74	0,000
vc*vc	1	39,47	39,47	19,49	0,001
f*f	1	2,57	2,57	1,27	0,280
fp*fp	1	5,79	5,79	2,86	0,115
Interações	9	124,06	13,78	6,81	0,001
vc*f	1	17,92	17,92	8,85	0,011
vc*fp	1	0,04	0,04	0,02	0,888
vc*lto	1	8,25	8,25	4,07	0,065
vc*lb	1	3,54	3,54	1,75	0,209
f*fp	1	10,13	10,13	5,00	0,044
f*lto	1	7,89	7,89	3,89	0,070
f*lb	1	15,82	15,81	7,81	0,015
fp*lto	1	19,18	19,18	9,47	0,009
fp*lb	1	2,64	2,64	1,31	0,274
Erro	13	26,33	2,03		
Falta de ajuste	5	18,17	3,63	3,56	0,054
Erro puro	8	8,16	1,02		
Total	31	2131,43			
S	R2	Raj2			
1,42322	98,76%	97,05%			

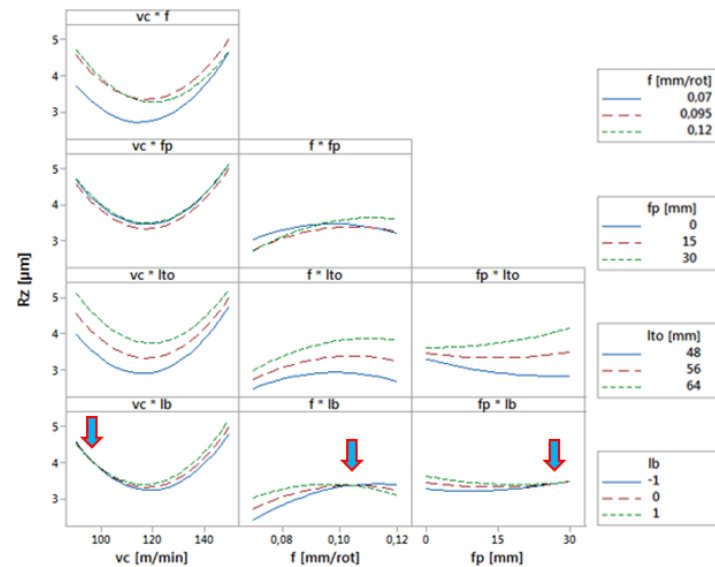


Figura 7. Gráficos de interação para Rz.

Para proceder à otimização bi-objetivo de $E[Rz]$ e $Var[Rz]$, inicialmente foi realizada a otimização dessas funções individualmente, a fim de obter os pontos de âncora e a matriz payoff. A Tabela 3 apresenta a matriz payoff, composta pelos dois pontos de âncora nas colunas.

Realizando a otimização biobjetivo por meio do método NNC, foram obtidos os resultados resumidos na Tab. 4, com a fronteira de Pareto associada apresentada na Figura 8. Pode-se observar que a fronteira de Pareto apresentou 11 soluções Pareto ótimas.

Tabela 3. Matriz payoff para $E[Rz] \times Var[Rz]$.

$E[Rz]$	2,646	4,750
$Var[Rz]$	2,261	2,052

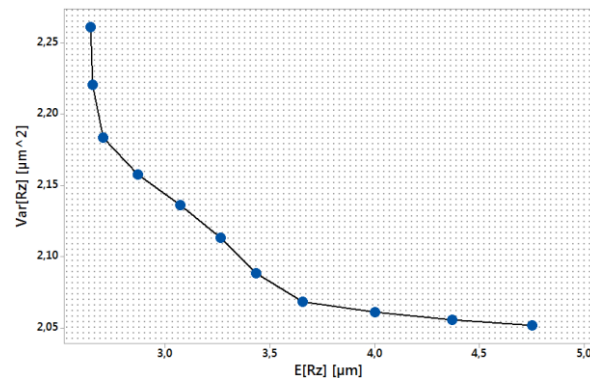


Figura 8. Fronteira de Pareto para $E[Rz] \times Var[Rz]$.

Tabela 4. Resultados da otimização entre $E[Rz]$ e $Var[Rz]$ pelo método NNC.

W	Decodificado			Codificado			Respostas	
	Vc	f	fp	Vc	f	fp	$E[Rz]$	$Var[Rz]$
				m/min	mm/rot	mm	μm	μm ²
0	1,000	0,850	-1,000	150,00	0,12	0	4,75028	2,05150
0,1	0,845	0,802	-1,000	145,35	0,11	0	4,36861	2,05541
0,2	0,643	0,675	-1,000	139,28	0,11	0	4,00053	2,06067
0,3	0,374	0,512	-1,000	131,21	0,11	0	3,65692	2,06837
0,4	0,056	0,072	-0,949	118,31	0,09	0,755	3,43356	2,08805
0,5	0,113	0,448	-0,765	116,60	0,08	3,521	3,26486	2,11319
0,6	0,155	0,708	-0,605	115,34	0,08	5,923	3,07295	2,13601
0,7	0,191	0,924	-0,463	114,28	0,07	8,051	2,86949	2,15769
0,8	0,142	1,000	-0,059	115,73	0,07	14,111	2,70544	2,18329
0,9	0,145	1,000	0,314	115,64	0,07	19,715	2,65687	2,22040
1	0,156	1,000	0,589	115,31	0,07	23,837	2,64608	2,26128

Com o objetivo de minimizar o viés e a variância das respostas, a otimização do erro quadrático médio de Rz foi realizada. A Figura 9 apresenta as superfícies de resposta de MSERz. Os resultados da otimização de MSERz são resumidos na Tabela 5. Pode-se observar que os resultados da otimização de MSERz foram próximos aos resultados da otimização entre $E[Rz]$ e $Var[Rz]$, considerando o subproblema com peso $w = 0,8$. Logo, na otimização da soma do viés e da variância, o viés tem apresentado melhores resultados por estar mais próximo da utopia que a variância. Na prática pode ser mais econômico e viável encontrar níveis das variáveis de processo que geram um nível de resposta com mínima sensibilidade em relação às variáveis de ruído do que controlar as causa de variação relativas às variáveis de ruído.

Tabela 5. Otimização de MSERz.

Codificado			Decodificado			Respostas		
vc	f	fp	vc	f	fp	$E[Rz]$	$Var[Rz]$	$MSE[Rz]$
			m/min	mm/rov	mm	μm	μm^2	μm^2
-0,158	-1,00	-0,251	115,20	0,070	11,235	2,745	2,172	2,1820

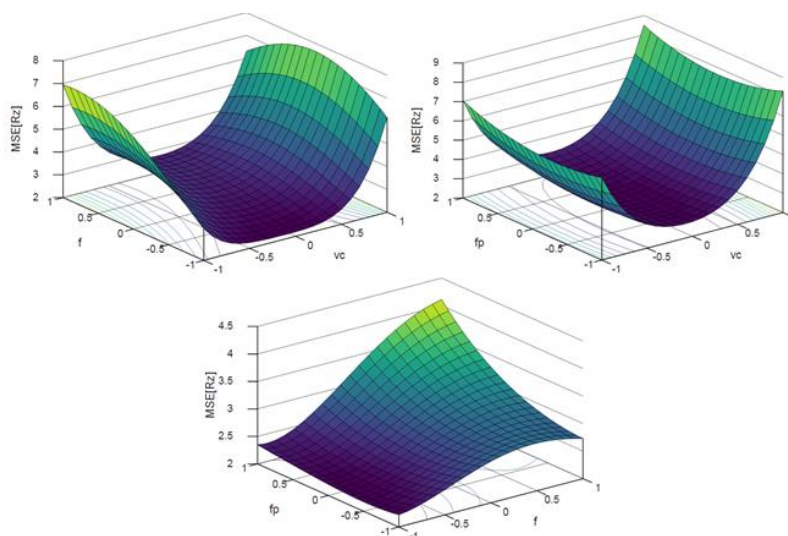


Figura 9. Superfícies de resposta para MSERz, xfixo = xCtPt.

6. CONCLUSÕES

Considerando os resultados encontrados, as seguintes conclusões podem ser apresentadas na análise, modelagem e otimização do processo de torneamento interno de tubos do aço SAE 4130:

- A rugosidade foi avaliada considerando a resposta Rz, sendo obtido um modelo com capacidade de previsão regular para rugosidade máxima.
- O erro quadrático médio de Rz foi otimizado com a finalidade de minimizar o viés e a variância, simultaneamente, garantindo maior probabilidade de atendimento das especificações.
- Para MSERz foram obtidos $E(Rz) = 2,745 \mu m$ e $Var(Rz) = 2,172 \mu m^2$, com níveis robustos ótimos das variáveis de processos $vc = 115,26$ m/min, $f = 0,07$ mm/rot e $fp = 11,23$ mm.

7. REFERÊNCIAS

- ABCM, 2004. "Journal of the Brazilian Society of Engineering and Mechanical Sciences". 1 Feb. 2007 <<http://www.abcm.org.br/journal/index.shtml>>.
- Ferraresi, D. *Fundamentos da Usinagem dos Metais*. Ed. Edgard Blücher, São Paulo, Brasil, 1977. 751 p.
- Sanchis, J.; Martinez, M.; Blasco, X.; Salcedo, J. V. *A new perspective on multiobjective optimization by enhanced normalized normal constraint method*. Structural and multidisciplinary optimization, v. 36, n. 5, p. 537-546, 2008.
- Sortino, M. et al. *Development of a practical model for selection of stable tooling system configurations in internal turning*. International Journal of Machine Tools & Manufacture, v. 61, p. 58-70, 2012.
- Suyama, D. I. *Uma contribuição ao estudo do torneamento interno em aços endurecidos*. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas-SP, 2014.

- Perreira, D. B., *Otimização robusta multi-objetivo do processo de fresamento helicoidal do aço AISI H13 endurecido pelo método da restrição normal*. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá-MG, 2017a.
- Myers, R. H.; Khuri, A. I.; Vining, G. *Response surface alternatives to the Taguchi robust parameter design approach*. The American Statistician, v. 46, n. 2, p. 131-139, 1992.
- Nanavati, J. I. ; Makadia, A. J. *Optimization of machining parameters for turning operations based on response surface methodology*. Measurement, v. 46, n. 6, p.1521–1529, 2013.
- Neseli, S.; Yaldiz, S.; Turkes, E. *Optimization of tool geometry parameters for turning operations based on the response surface methodology*. Measurement, v. 44, n. 3, p. 580–587, 2011.
- Messac, A.; Ismail-Yahaya, A.; Mattson, C. A. *The normalized normal constraint method for generating the Pareto frontier*. Structural and multidisciplinary optimization, v. 25, n. 2, p. 86-98, 2003.
- Munawar, M. et al. *Investigation of cutting Parameters Effect for Minimization of Surface Roughness in Internal Turning*. International Journal of Precision and Manufacturing, v. 12, n. 1, p. 121-127, 2011.
- Box, G. E. P.; Jones, S. *Designing products that are robust to the environment*. Total Quality Management, v. 3, n. 3, p. 265-282, 1992
- Hobson, T. *Exploring Surface Texture: A fundamental guide to the measurement of surface finish*. 7 ed. England: Leicester LE49JQ, 2011. 40 p.

8. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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

Optimization of the roughness of the internal turning process by the normal constraint method

Jéssica Tito Vieira

Universidade Federal de Itajubá, Av. BPS, 1303, Bairro Pinheirinho, Itajubá – MG
jessica.tito@hotmail.com

Lincoln Cardoso Brandão

Universidade Federal de São João del-Rei, Praça Frei Orlando, 170, Centro, São João del-Rei -MG
lincoln@ufsj.edu.br

Robson Bruno Dutra Pereira

Universidade Federal de São João del-Rei, Praça Frei Orlando, 170, Centro, São João del-Rei -MG
robsondutra@ufsj.edu.br

João Roberto Ferreira

Universidade Federal de Itajubá, Av. BPS, 1303, Bairro Pinheirinho, Itajubá – MG
jorofe@unifei.edu.br

Samuel Alves Freitas

Universidade Federal de Uberlândia, Rua Eng. Diniz 1178, Uberlândia -MG
samuelengmec@gmail.com

Abstract. Internal turning is one of the most widely used manufacturing processes in the metal-mechanical industry. Its great application means that increasingly the turning processes are aimed at the production of high quality parts, seeking to associate the process with metrology and statistical control. This study presents studied the multi-objective robust optimization of the internal turning process of the SAE 4130 steel. Cutting tests were carried out following a face centred central composite design combining control variables, the cutting velocity, feed and fixing position of the whole on the plate, the noise variables, tool overhang and borehole width. The experiments were carried out through the response surface methodology and robust parameter design, mean square error optimization and normalized normal constraint method were applied. The effects of process and noise variables were discussed in the outcomes of roughness, being the smallest feed rate value that implied the reduction of roughness.

Keywords: Internal turning. Response surface methodology. Robust parameter design. Normalized normal constraint method. Roughness.

RESPONSIBILITY NOTICE

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