

CONEM 2016
CONGRESSO NACIONAL DE
ENGENHARIA MECÂNICA

21-25
AGOSTO DE 2016
FORTALEZA - CEARÁ

OTIMIZAÇÃO ROBUSTA DO FRESAMENTO DE TOPO DE ACABAMENTO DO AÇO 1045 CONSIDERANDO O COMPRIMENTO EM BALANÇO DA FERRAMENTA

Vanessa Flavianne Santana Rodrigues, vanessafsrodrigues@hotmail.com¹

João Roberto Ferreira, jorofe@unifei.edu.br¹

Anderson Paulo de Paiva, andersonppaiva@unifei.edu.br¹

Robson Bruno Dutra, robsondutra@ufs.br²

Lincoln Cardoso Brandão, lincoln@ufs.br²

¹ Universidade Federal de Itajubá, Campus Prof. José Rodrigues Seabra, Av. BPS, 1303, Pinheirinho, CEP 37500-903 - Itajubá - MG,

² Universidade Federal de São João Del Rei, Campus Santo Antônio, Praça Frei Orlando, 170, Centro - CEP 36307-352 - São João del-Rei (MG)

Resumo: Na usinagem de cavidades, as geometrias usinadas podem restringir o comprimento em balanço da fresa de forma a evitar colisões entre ferramental e peça. Logo, o comprimento em balanço não depende da escolha do experimentador, mas da geometria usinada. A variação do comprimento em balanço pode influenciar no desempenho do processo, uma vez que está relacionada diretamente a deflexão da ferramenta, podendo acarretar vibrações, erros geométricos e microgeométricos em níveis indesejáveis. Neste sentido, o presente trabalho tem por finalidade a otimização da rugosidade total do processo de fresamento de topo do aço 1045. Foi realizado um projeto de parâmetro robusto considerando os parâmetros do processo, avanço, velocidade de corte e profundidade de usinagem, além da variável de ruído, comprimento em balanço. Variáveis de ruído caracterizam-se por variáveis incontrolláveis sendo, entretanto, em alguns casos, controláveis em laboratório. Para a modelagem e otimização foi realizado um arranjo de superfície de resposta CCD combinando variáveis de controle e ruído. Mediante as análises, o modelo quadrático de resposta foi significativo e apresentou bom ajuste, permitindo a otimização. Posteriormente foram obtidas as equações de média e variância a partir do projeto de parâmetro robusto. Finalmente, os métodos do erro quadrático médio (MSE - Mean square error) e o de interseção normal à fronteira (NBI - Normal boundary intersection) foram utilizados para obter um conjunto de resposta Pareto ótimas para as equações de média e variância tornando o processo robusto a variação do ruído considerado.

Palavras-chave: Fresamento de topo, Otimização robusta, comprimento em balanço, rugosidade total, método de interseção normal a fronteira.

1. INTRODUÇÃO

Na usinagem de moldes e matrizes exige-se a fabricação de formas complexas com o mínimo de variação possível em sua geometria. Uma vez que a maioria dos moldes apresentam cavidades, o comprimento em balanço da ferramenta deve ser definido com base na geometria a ser obtida.

O comprimento em balanço de uma ferramenta é definido como sendo a distância do ponto fixado no suporte da ferramenta até a sua extremidade de corte, podendo ser considerada como uma viga em balanço, conforme explica Souza (2002). A posição na qual a ferramenta é fixada no suporte não é padronizada, ou seja, é uma variável não controlável, pois a posição depende da aplicação. Porém, a atuação de forças gera efeitos diferenciados mediante tal escolha. Logo, este é um parâmetro que influencia diretamente o processo, pois sua definição gera efeitos nos esforços de corte, acabamento superficial da peça, erro geométrico, desgaste da ferramenta, etc.

Alguns estudos têm avaliado a influência do comprimento em balanço nas respostas dos processos de usinagem, o que confirma sua influência nos resultados esperados de um processo/produto. A título de conhecimento, Ferreira (2012) em sua dissertação avaliou o efeito do comprimento em balanço na deflexão da ferramenta e, consequentemente, no acabamento superficial. Após realizações de experimentos no fresamento de topo, considerando sete comprimentos

em balanço, concluíram que, de forma geral, maiores comprimentos em balanço aumentam as tendências de vibração para o sistema como um todo, além do desgaste da ferramenta, acarretando em erros de forma e de rugosidade altos.

Como a variação do comprimento em balanço pode ocasionar variações nos resultados obtidos em termos de qualidade no produto usinado, em especial a rugosidade, deve-se tentar minimizar a influência desta variável no processo, ou seja, tornar o processo robusto a esta variação.

Neste sentido, o objetivo deste trabalho foi realizar a modelagem e otimização robusta da resposta rugosidade total R_t no processo de fresamento de topo em aço 1045. A fim de considerar as variáveis de controle e ruído, foi utilizado um planejamento composto central (*central composite design* – CCD) para obter o modelo de resposta e consequentemente as funções de média e variância. O método de otimização do erro quadrático médio (*Mean Square Error* - MSE) e o método de interseção normal à fronteira (*Normal Boundary Intersection* - NBI) foram aplicados na otimização das equações de média e variância obtendo um conjunto de soluções Pareto ótimas para R_t . A variável de ruído escolhida foi o comprimento em balanço da ferramenta uma vez que não depende da escolha do programador do processo, sendo, entretanto, possível controlá-la experimentalmente. A rugosidade superficial, segundo Benardos e Vosniakos (2003), é amplamente usada como índice de qualidade e como requisito técnico para a maioria dos produtos mecânicos, visto que o alcance da qualidade superficial desejada é de grande importância para o comportamento funcional de um componente. Vale ressaltar que outras variáveis estão em estudo e posteriormente seus resultados serão divulgados em outros trabalhos.

2. PROJETO DE PARÂMETRO ROBUSTO

O projeto de parâmetro robusto (*Robust Parameter Design* – RPD) utilizado na área de engenharia de qualidade, surgiu no Japão e se espalhou pelo mundo através de consultorias prestadas pelo seu criador, o engenheiro Genichi Taguchi, conforme Myers *et al.* (1992). A abordagem, segundo os mesmos autores, tem por fim a redução da variabilidade do processo ou produto durante o projeto, ou controle de qualidade *off-line*, através da definição dos níveis mais adequados dos fatores controláveis, tornando o processo robusto em relação aos fatores não controláveis por intermédio de experimentação e análise estatística.

As variáveis de controle são parâmetros possíveis de se controlar a ação durante o processo produtivo, enquanto as variáveis não controláveis ou de ruído são aquelas que não dependem da escolha do experimentador.

Ao envolver os ruídos como parte do processo experimental, busca-se avaliar sua influência no processo juntamente com as variáveis de controle, de forma a reduzir a variabilidade. A escolha do planejamento experimental pode ser realizada de acordo com as intenções do investigador. No caso do RPD com arranjo cruzado, faz-se um planejamento chamado de arranjo interno relativo às variáveis de controle e o outro nomeado de arranjo externo para as variáveis de ruído. No entanto, conforme citado no trabalho de Kovach e Cho (2007), o número de experimentos gerados normalmente é alto, o que aumenta o custo e o tempo de análise, ou como alternativa para redução do número de ensaios, opta-se por experimentos fracionados, o que reduz a sensibilidade na avaliação e interpretação dos resultados.

Segundo Yuangyai *et al.* (2011), uma outra técnica utilizada para o RPD chamada de arranjo combinado ou simples, possui vantagens com relação à anterior. Nesta, realiza-se somente um planejamento de experimento incluindo ambas variáveis, de controle e ruído, o que leva a uma quantidade menor de ensaios, além de possibilitar a avaliação da interação entre variáveis de processo e ruído. Segundo Welch *et al.* (1990), esta abordagem reduz o custo e o tempo de experimentação e produz uma previsão mais acurada dos parâmetros do processo/produto garantindo a qualidade.

A partir deste tipo de arranjo é possível obter uma equação de regressão nomeada modelo de resposta que inclui tanto os fatores de controle e de ruído. Assim é possível avaliar os efeitos principais destes separados e suas interações, conforme salienta Shoemaker *et al.* (1991).

Conforme Montgomery (2009), a Equação 1 representa o modelo de resposta, onde $x_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ik})^T$ e $z_i = (z_{i1}, z_{i2}, \dots, z_{ir})^T$, $i = 1, 2, \dots, n$, são, respectivamente, variáveis controláveis e de ruído, sendo k e r o número de variáveis de controle e ruído, respectivamente.

Supõe-se que os ruídos são controláveis no experimento e que são normalmente distribuídos com média zero e variância $\sigma_{z_i}^2 = 1$. Pode-se estimar a média e a variância do processo conforme Equações 2 e 3, sendo que σ^2 pode ser estimado pelo erro residual gerado na ANOVA.

$$y(x, z) = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^k \lambda_i z_i + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^r \delta_{ij} x_i z_j + \varepsilon \quad (1)$$

$$E_z[y(x, z)] = f(x) = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j \quad (2)$$

$$V_z[y(x, z)] = \sigma_{z_i}^2 \left\{ \sum_{i=1}^r \left[\frac{\partial y(x, z)}{\partial z_i} \right]^2 \right\} + \sigma^2 \quad (3)$$

3. OTIMIZAÇÃO DUAL

A otimização das Equações 2 e 3 podem ser realizadas aplicando métodos diferenciados. O MSE, proposto por Lin e Tu (1995), visa minimizar a variância $\hat{\sigma}^2$ do processo e aproximar a média $\hat{\mu}$ do alvo T através da Equação 4.

$$MSE = [(\hat{\mu} - T)^2 + \hat{\sigma}^2] \quad (4)$$

Considerando que em certas situações deseja-se priorizar uma ou outra função, novamente os autores Lin e Tu (1995) criaram uma variação da Equação 4. Assim cada equação assume um degrau de importância diferente conforme o interesse no estudo, logo pesos são atribuídos para cada equação, sendo ω_1 o peso desejado para a média e ω_2 o peso para a variância. Estes podem ser combinados de forma convexa de maneira que $\omega_1 + \omega_2 = 1$, sendo ω_1 e ω_2 maiores ou iguais a 0. Segundo Tang e Xu (2002), as combinações geram soluções multi-objetivo ótimas para a situação. O modelo é apresentado abaixo.

$$MSE = [\omega_1(\hat{\mu} - T)^2 + \omega_2\hat{\sigma}^2] \quad (5)$$

Visto que normalmente os problemas reais buscam otimização simultânea de mais de uma função objetivo, o método NBI foi desenvolvido por Das e Dennis (1998) com intuito de gerar fronteiras de Pareto com pontos uniformemente distribuídos, para otimizações não lineares.

Conforme Arcos (2013) apresentou em sua tese, são necessários cinco passos para a elaboração do NBI biobjetivo. Inicialmente deve-se otimizar cada função objetivo individualmente, $f_i(x^*)$, $i=\{1, 2\}$. Em seguida cria-se uma matriz payoff Φ composta pela Utopia e Nadir de cada $f_i(x^*)$, ou seja, pelos valores mínimos e máximos de cada função. Os pontos de Utopia são aqueles que contem os valores ótimos de cada função $f^U = [f_1^*(x_1^*) \ f_2^*(x_2^*)]^T$ e os pontos de Nadir são aqueles que apresentam os piores valores de cada função $f^N = [f_1(x_2^*) \ f_2(x_1^*)]^T$.

$$\Phi = \begin{bmatrix} f_1^*(x_1^*) & f_1(x_2^*) \\ f_2(x_1^*) & f_2^*(x_2^*) \end{bmatrix} \quad (6)$$

De acordo com Brito *et al.* (2014), quando as funções objetivo possuem escalas ou unidades diferentes, os valores utilizados para formar a matriz Φ são utilizados para normalizá-las de forma a obter soluções Pareto ótimas eficientes para as fronteiras, sendo $\bar{f}(x)$ o valor normalizado da função objetivo que é obtido através da Equação 8.

$$\bar{f}(x) = \frac{f_i(x) - f_i^U}{f_i^N - f_i^U}, \quad i = 1, \dots, m \quad (7)$$

Segundo a tese de Brito (2015), o NBI pode ser escrito como um problema de programação não linear que em sua forma simplificada está escrita abaixo, onde w é o peso atribuído no escalonamento, considerando $g_i(x)$ as restrições e especificamente, $x^T x \leq \hat{\rho}^2$ como restrição do espaço experimental.

$$\begin{aligned} & \text{Min } \bar{f}_1(x) \\ & \text{s. a: } g_1(x) = \bar{f}_1(x) - \bar{f}_2(x) + 2w - 1 = 0 \\ & \quad g_2(x) \leq x^T x \leq \hat{\rho}^2 \\ & \quad 0 \leq w \leq 1 \end{aligned} \quad (8)$$

4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Para obter os resultados apresentados no trabalho, foram conduzidos 32 experimentos de fresamento de topo em corpos de prova cúbicos 40x40 mm de aço 1045, utilizando uma fresa de metal duro de 20 mm de diâmetro e quatro dentes num centro de usinagem ROMI Discovery 560, com curso da mesa de 560 mm longitudinal, 406 mm latitudinal, 508 mm no curso do cabeçote, potência máxima no eixo-árvore de 15 kW e rotação máxima de 10.000 rpm. As variáveis de controle consideradas no processo foram o avanço (f_z , mm/rot), a velocidade de corte (v_c , m/min) e a profundidade de corte (a_p , mm). O comprimento em balanço (l_b , mm) também foi incluído no planejamento de experimentos como variável de ruído. O processo é ilustrado com a Figura 1(a).

Para medição dos parâmetros de rugosidade dos corpos de prova usinados, foi utilizado um medidor de rugosidade e perfil Form Talysurf Intra da Taylor Hobson, Figura 1(b). O processo de medição é apresentado na Figura 2(b). Foi realizado um estudo GR&R (*Gage repeatability and reproducibility*) envolvendo dois operadores, afim de garantir a confiabilidade dos resultados das medições.

Os corpos de prova usinados foram de aço 1045, conforme Figura 2(a), no formato cúbico de aproximadamente 40x40mm. Foi utilizado uma fresa de metal duro com quatro dentes ($z = 4$) com 20mm de diâmetro, com porta ferramenta código R390-020A20-11L da Sandvik e insertos com aresta de corte reforçada da Mitsubishi código AOMT123604PEER-H, Figura 3.

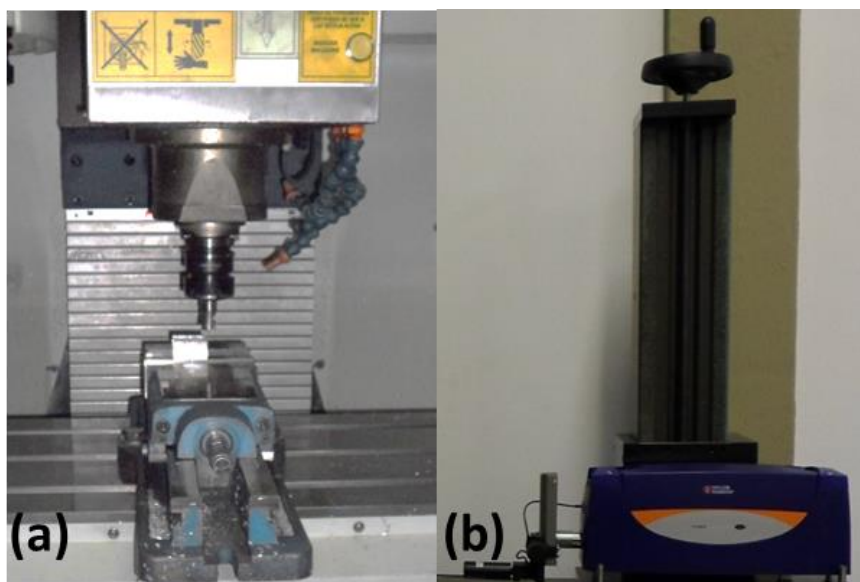


Figura 1. (a) Setup experimental; (b) Medidor de perfil e rugosidade

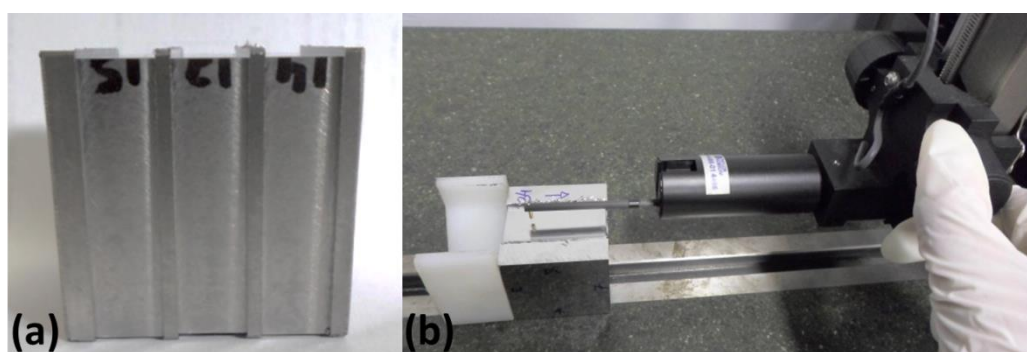


Figura 2. (a) Corpo de prova de aço 1045; (b) Medição de rugosidade dos corpos de prova



Figura 3. Insertos

Para realização das análises serão utilizados os *softwares* Minitab 17.1 e Microsoft Excel 2010.

De forma geral, o trabalho seguiu os passos conforme descritos abaixo:

- 1º. Procedimento experimental: Realização de um fatorial completo e posteriormente uma superfície de resposta com arranjo composto central (*Central Composite Design – CCD*);
- 2º. Modelagem da resposta: Obtenção do modelo de resposta para a rugosidade total utilizando o método dos mínimos quadrados ponderados (*Weighted Least Squares - WLS*);
- 3º. Equações de média e variância: Definição das equações de média e variância a partir do modelo gerado;
- 4º. Otimização: Realização das otimizações individuais de cada função objetivo de acordo com o alvo. Criação da matriz *payoff*. Normalização das funções e execução do NBI para diferentes pesos;
- 5º. Fronteira de Pareto: Apresentação da fronteira de Pareto conforme os valores obtidos nas otimizações.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

1º. Procedimento experimental: O resultado do planejamento experimental é apresentado na Tabela 1.

Tabela 1. Planejamento experimental

Ordem dos ensaios	Fatores de Controle			Ruído	Resposta
	f_z [mm/rot]	v_c [m/min]	a_p [mm]	l_b [mm]	R_t [μm]
1	0,05	300,00	0,50	35	4,0318
2	0,13	300,00	0,50	35	6,3761
3	0,05	340,00	0,50	35	2,7323
4	0,13	340,00	0,50	35	5,5862
5	0,05	300,00	1,00	35	3,8023
6	0,13	300,00	1,00	35	6,2727
7	0,05	340,00	1,00	35	2,4112
8	0,13	340,00	1,00	35	7,1218
9	0,05	300,00	0,50	45	2,7958
10	0,13	300,00	0,50	45	6,5747
11	0,05	340,00	0,50	45	2,1953
12	0,13	340,00	0,50	45	5,9510
13	0,05	300,00	1,00	45	2,9000
14	0,13	300,00	1,00	45	6,3172
15	0,05	340,00	1,00	45	2,2895
16	0,13	340,00	1,00	45	7,3310
17	0,09	320,00	0,75	40	4,3825
18	0,09	320,00	0,75	40	3,9704
19	0,09	320,00	0,75	40	5,0498
20	0,09	320,00	0,75	40	4,6254
21	0,09	320,00	0,75	40	3,1598
22	0,09	320,00	0,75	40	4,5755
23	0,01	320,00	0,75	40	1,6000
24	0,17	320,00	0,75	40	3,9322
25	0,09	280,00	0,75	40	3,3465
26	0,09	360,00	0,75	40	3,2923
27	0,09	320,00	0,25	40	1,7166
28	0,09	320,00	1,25	40	3,7828
29	0,09	320,00	0,75	40	1,8160
30	0,09	320,00	0,75	40	2,0966
31	0,09	320,00	0,75	40	1,9619
32	0,09	320,00	0,75	40	1,8269

2º. Modelagem da resposta: A análise dos dados gerou o modelo de resposta para R_t apresentado na Equação 9. De forma geral, ele apresentou um bom ajuste, visto que o p-valor do teste para falta de ajuste (*Lack of fit – LOF*) foi 0,623 e os coeficientes de determinação foram $R^2 = 99,77\%$, $R_{adj}^2 = 99,59\%$ e $R_{pred}^2 = 97,29\%$.

$$R_t(x, z) = 115,0 - 125,8f_z - 0,0574v_c - 18,31a_p - 0,441l_b + 49f_z^2 + 0,001v_c^2 + 1,93a_p^2 + 0,306f_zv_c + 15,1f_z a_p + 1,1175f_z l_b + 0,047v_c a_p + 0,001v_c l_b + 0,011a_p l_b \quad (9)$$

3º. Equações de média e variância: A partir do modelo de resposta, as equações de média e variância do parâmetro são apresentadas abaixo.

$$R_t(x) = 115,0 - 125,8f_z - 0,0574v_c - 18,31a_p + 49f_z^2 + 0,001v_c^2 + 1,93a_p^2 + 0,306f_zv_c + 15,1f_z a_p + 0,047v_c a_p \quad (10)$$

$$\sigma^2 = (-0,441l_b + 1,1175f_z l_b + 0,001v_c l_b + 0,011a_p l_b)^2 - 1,032 \quad (11)$$

4º. Otimização: Inicialmente foi encontrado os valores das otimizações individuais para média e para a variância, obtendo como valores ótimos, respectivamente, 0,653 e 1,032. Posteriormente, o MSE ponderado foi realizado para ambas as funções. Com intuito de melhorar a otimização biobjetivo, o NBI foi realizado. A Tabela 2 apresenta a matriz *payoff*, formada pelos pontos de Utopia e Nadir de cada função. Considerando estes pontos, as funções normalizadas e diferentes pesos, o NBI foi realizado. A Tabela 3 e 4 apresentam os resultados da otimização através do MSE e do NBI.

Tabela 2. Matriz *payoff*

0,653	3,150
1,275	1,032

Tabela 3. Resultados da otimização por MSE

w	Fatores de Controle (codificados)			MSE	
	f_z [mm/rot]	v_c [m/min]	a_p [mm]	$R_t(x)$ [μm]	$\hat{\sigma}^2(x)$ [μm]
0,00	0,500	0,199	0,029	3,992	1,032
0,05	-0,967	1,170	-0,724	1,528	1,102
0,10	-1,174	1,060	-0,571	1,218	1,135
0,15	-1,273	0,984	-0,490	1,074	1,155
0,20	-1,333	0,927	-0,437	0,989	1,168
0,25	-1,375	0,882	-0,399	0,930	1,178
0,30	-1,407	0,843	-0,369	0,887	1,187
0,35	-1,433	0,810	-0,345	0,854	1,194
0,40	-1,454	0,780	-0,325	0,826	1,200
0,45	-1,472	0,753	-0,308	0,804	1,205
0,50	-1,488	0,727	-0,293	0,784	1,210
0,55	-1,502	0,703	-0,279	0,767	1,215
0,60	-1,515	0,680	-0,266	0,752	1,219
0,65	-1,527	0,657	-0,253	0,739	1,223
0,70	-1,539	0,634	-0,242	0,726	1,228
0,75	-1,550	0,611	-0,230	0,715	1,232
0,80	-1,561	0,586	-0,219	0,703	1,236
0,85	-1,573	0,559	-0,207	0,693	1,241
0,90	-1,585	0,527	-0,193	0,682	1,246
0,95	-1,601	0,485	-0,177	0,670	1,253
1,00	-1,641	0,343	-0,136	0,653	1,274

Tabela 4. Resultados da otimização por NBI

w	Fatores de Controle (codificados)			NBI	
	f_z [mm/rot]	v_c [m/min]	a_p [mm]	$R_t(x)$ [μm]	$\hat{\sigma}^2(x)$ [μm]
0,00	0,208	0,641	-1,295	3,170	1,034
0,05	-0,064	1,254	-1,119	2,925	1,034
0,10	-0,197	1,267	-1,088	2,714	1,038
0,15	-0,322	1,274	-1,050	2,519	1,044
0,20	-0,440	1,273	-1,007	2,336	1,050
0,25	-0,550	1,267	-0,960	2,165	1,058
0,30	-0,655	1,254	-0,909	2,004	1,066
0,35	-0,753	1,236	-0,856	1,853	1,076
0,40	-0,847	1,212	-0,801	1,710	1,086
0,45	-0,936	1,182	-0,745	1,575	1,097
0,50	-1,020	1,147	-0,687	1,448	1,109
0,55	-1,100	1,106	-0,629	1,328	1,122
0,60	-1,176	1,059	-0,570	1,215	1,135
0,65	-1,248	1,005	-0,511	1,110	1,149
0,70	-1,316	0,944	-0,452	1,012	1,164
0,75	-1,381	0,875	-0,394	0,923	1,180
0,80	-1,442	0,798	-0,337	0,842	1,196
0,85	-1,499	0,709	-0,282	0,771	1,214
0,90	-1,552	0,607	-0,229	0,713	1,232
0,95	-1,600	0,486	-0,178	0,670	1,253
1,00	-1,643	0,336	-0,130	0,653	1,275

5º. Fronteira de Pareto:

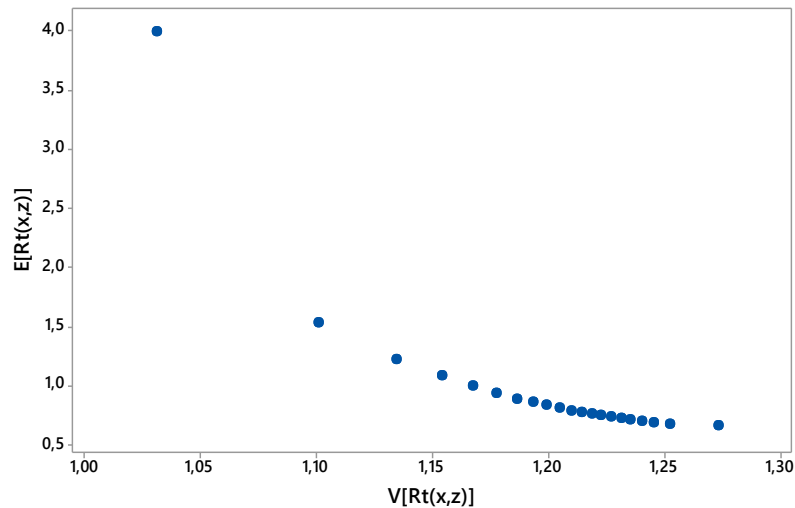


Figura 4. Fronteiras de Pareto para WMSE (MSE ponderado)

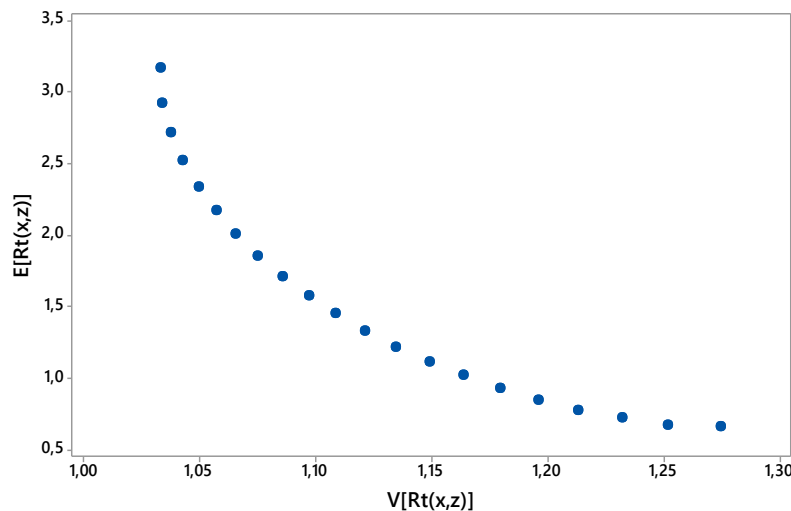


Figura 5. Fronteiras de Pareto para NBI

A vantagem de utilizar o método NBI é que ele explora melhor a fronteira de Pareto no espaço de solução das duas funções objetivos em questão. O método do MSE que consiste na soma ponderada do viés e da variância não consegue explorar bem o espaço de solução. Neste caso específico muitos pontos se acumularam próximo a utopia de $E[R_d]$, não explorando bem a região que daria uma variância em níveis mais baixos. O método NBI apresenta uma fronteira equispçada, de forma que o gestor possa escolher o cenário que melhor atenda às suas necessidades, considerando as respostas avaliadas.

Uma vez que utilizou-se o RPD, as soluções Pareto ótimas obtidas tornam o processo de fresamento de acabamento robusto à variação do comprimento em balanço da fresa. Entretanto, sabe-se que em algumas regiões, onde priorizou-se a média, a variância do processo, existente devido ao ruído considerado, é maior.

6. CONCLUSÃO

Este artigo apresentou a otimização robusta do processo de fresamento de topo considerando o comprimento em balanço como variável de ruído, avaliando como resposta o acabamento superficial. A robustez do processo se dá ao minimizar os efeitos do comprimento em balanço, uma vez que em usinagem de cavidades certamente este influi na geração de vibrações e erros de forma.

O planejamento experimental envolveu um CCD com arranjo combinado obtendo um modelo de regressão para o parâmetro R_a . Os valores obtidos para os coeficientes de determinação (R^2) e LOF confirmam o bom ajuste do modelo. A partir do modelo de regressão, as equações de média e variância foram extraídas e então otimizadas individualmente.

O MSE ponderado foi aplicado para obter a otimização biobjetivo e sua respectiva fronteira de Pareto apresentou pontos ótimos que se concentraram mais próximos da utopia da média de R_a .

Com intuito de explorar melhor o espaço de soluções, o NBI-MSE foi aplicado. Os pontos ótimos obtidos se apresentam melhores do que os do MSE, pois permitem mais possibilidades de escolha em pontos próximos a utopia da variância e da média, como apresentado nas Figuras 4 e 5.

A Tabela 3 apresenta mediante os pesos, os níveis codificados de cada variável de controle para obter os valores otimizados das funções de média e variância da rugosidade total. Temos que o peso $w=1$ minimiza a função de média enquanto $w=0$ minimiza a função de variância. Logo, de acordo com o estudo, em futuros experimentos, escolhendo valores codificados de $-1,020$ para f_z , de $1,147$ v_c e de $-0,687$ para a_p , $E(R_t)$ e $\hat{\sigma}^2$, alcançam respectivamente 1,496 e 1,275, ambos valores medianos para as funções.

7. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a FAPEMIG pelo apoio financeiro e ao suporte oferecido pela UFSJ em pareceria com a UNIFEI.

8. REFERÊNCIAS

- Arcos, Julián Ignacio López. Otimização de produto na fase conceitual via modelação numérica, Dissertação de Mestrado em Engenharia de Produção Itajubá: UNIFEI, 2013.
- Benardos, P. G., & Vosniakos, G.-C. (2003). Predicting surface roughness in machining: a review. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 43(8), 833–844. doi:10.1016/S0890-6955(03)00059-2
- Brito, Tarcísio Gonçalves. Método da Interseção Normal à Fronteira para otimização bi-objetivo do fresamento de topo do aço ABNT 1045, Tese de Doutorado submetida ao Programa de Pós Graduação em Engenharia de Produção. Itajubá: UNIFEI, 2015.
- Brito, T. G., Paiva, a. P., Ferreira, J. R., Gomes, J. H. F., & 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*, 38(3), 628–638. doi:10.1016/j.precisioneng.2014.02.013
- Das, I., Dennis, J. Normal-Boundary Intersection: A New Method for Generating the Pareto Surface in Nonlinear Multicriteria Optimization Problems. *SIAM Journal on Optimization*, v. 8, n. 3, p. 631–657, 1998.
- Ferreira, Alexandre Marcos. Estudo dos Erros de Forma no Fresamento de Geometrias Complexas. Joinville: IST, 2012. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica.
- Kovach J., Cho, B.R.. Constrained robust design experiments and optimization with the consideration of uncontrollable factors, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 38 (2007) 7–18.
- Köksoy, Onur. Multiresponse robust design: Mean square error (MSE) criterion. *Applied Mathematics and Computation* vol.175 (2006) (p.1716–1729);
- Lin, D. K. J.; Tu W. Dual Response Surface Optimiation Wanzhu Journal of Quality Technology, vol. 27, nº 1, Janeiro de 1995;
- Myers Raymond H. et al. Response Surface Alternatives to the Taguchi Robust Parameter Design. *The American Statistician*, Vol. 46, No. 2 (May, 1992), pp. 131-139Published;
- Montgomery, D. C. (2009) *Design and Analysis of Experiments*, John Wiley & Sons, 6ª ed;
- Souza, A. F. Contribuições ao fresamento de geometrias complexas aplicando a tecnologia de usinagem com altas velocidades. Tese. São Carlos: USP, 2002.
- Shoemaker Anne C. et al. (1991). Quality Economical Experimentation Methods for Robust Design. *Technometrics*, Vol. 33, No. 4 (Nov., 1991), pp. 415-427;
- Tang, L. C., & Xu, K. (2002). Response Surface Optimization. *October*, 34(4), 437–447.
- Welch W. J., Yu T. K., Kang S. M., and Sacks J. (1990). Computer experiments for quality control by parameter design. *Journal of Quality Technology*, volume 22, páginas 15-22;
- Yuangyai Chumpol et al. Robust parameter design for multiple-stage nanomanufacturing IIE Transactions (2012) nº44, (p. 80-589) DOI: 10.1080/0740817X.2011.635176;

9. RESPONSABILIDADE AUTURAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

ROBUST OPTIMIZATION OF AISI 1045 STEEL END MILLING CONSIDERING THE TOOL OVERHANG

Vanessa Flavianne Santana Rodrigues, vanessafsrodrigues@hotmail.com¹

João Roberto Ferreira, jorofe@unifei.edu.br¹

Anderson Paulo de Paiva, andersonppaiva@unifei.edu.br¹

Robson Bruno Dutra, robsondutra@ufs.br²

Lincoln Cardoso Brandão, lincoln@ufs.br²

¹ Universidade Federal de Itajubá, Campus Prof. José Rodrigues Seabra, Av. BPS, 1303, Pinheirinho, CEP 37500-903 - Itajubá - MG,

² Universidade Federal de São João Del Rei, Campus Santo Antônio, Praça Frei Orlando, 170, Centro - CEP 36307-352 - São João del-Rei (MG)

Abstract. *In machining cavities, machined geometries may restrict the tool overhang in order to avoid collisions between tooling and piece. Therefore, the tool overhang does not depend on the experimenter choice, but on the machined geometry. Its variation can influence in the process performance, once it is directly related to the tool deflection and can result in vibrations, geometric and microgeometric errors in undesirable levels. In this sense, the aim of this work is the total roughness robust optimization of AISI 1045 steel end milling process. A robust parameter design was carried out considering the process parameters, feed, cutting speed and depth of cut, in addition of the noise variable, tool overhang. A noise variable is characterized by uncontrollable variables, being, however, in some cases, controllable in laboratory. For modeling and optimization, it was done a central composite design combining process and noise factors. Upon analysis, the quadratic model was significant and showed good fit. Subsequently, mean and variance equations were set up. Finally, mean square error (MSE) and normal boundary intersection (NBI) methods were used to obtain a set of optimal Pareto responses for mean and variance equations making the process robust to the considered noise variation.*

Keywords: *End milling, robust optimization, tool overhanging, average roughness, normal to boundary intersection.*