

COBEF2023-0327 - OTIMIZAÇÃO DE MÉDIA E VARIÂNCIA DA RUGOSIDADE R_a NO FRESAMENTO DE TOPO DO AÇO INOXIDÁVEL DUPLEX UNS S32205

Wander Pinto Ribeiro
Gustavo Rocha de Queiroz
Harue Genghini Shibuta
Carlos Henrique de Oliveira
Leonardo Albergaria de Oliveira
Tarcísio Gonçalves de Brito

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

wander.p.ribeiro@gmail.com
gustavoqueiroz@unifei.edu.br
harueshibuta@unifei.edu.br
carlos.henrique@unifei.edu.br
leoalber@unifei.edu.br
tgbrito@unifei.edu.br

Resumo: O desempenho dos processos na indústria metalmeccânica é influenciado pela presença de variáveis de ruído que interferem nos valores de média e variância reduzindo a qualidade definida para os produtos. A utilização de setups não condizente das variáveis de controle inseridas nas máquinas ferramentas contribui para o aumento do deslocamento de média e variância em relação aos limites especificados pela engenharia, tal fenômeno pode ser observado principalmente em processos de fabricação onde existe a necessidade de se controlar o acabamento das superfícies de peças usinadas. Essas superfícies apresentam irregularidades quando observadas em detalhes utilizando equipamentos adequados. Os aços inoxidáveis duplex, devido às suas propriedades mecânicas, apresentam dificuldades na usinabilidade, inclusive para o processo de fresamento, representando um grande desafio para as indústrias que fabricam peças e equipamentos para atender condições de operacionalidade com qualidade. Este trabalho tem como objetivo estabelecer os parâmetros ótimos do processo de fresamento de topo do aço inoxidável duplex UNS S32205 e estabelecer valor de média e variância para a rugosidade R_a pela minimização do erro quadrático médio (EQM). A análise de variância foi realizada para identificar quais os parâmetros de corte foram os mais significativos. Pelo conceito de projeto de parâmetros robusto e a teoria de propagação de erro foi estabelecida equação de média e variância a resposta R_a , a partir da modelagem dual do processo, a otimização foi realizada utilizando o gradiente reduzido generalizado (GRG). A fronteira de Pareto foi construída em função dos diferentes pesos em relação à média e variância da rugosidade R_a . Os resultados mostraram que o método foi eficiente para um valor médio de $0,4464 \mu\text{m}$ e variância $0,0109 \mu\text{m}^2$. Para a confirmação dos ensaios, foi utilizado um arranjo ortogonal de Taguchi (L9).

Palavras-chave: aço inoxidável duplex, fresamento de topo, rugosidade R_a , otimização.

1. INTRODUÇÃO

O aço inoxidável duplex (DSS) apresentam microestrutura contendo austenita e ferrita. Tais ligas proporcionam ao DSS, como propriedades mecânicas, excelente resistência à corrosão por pites e sob tensão, justificando assim sua aplicação na indústria petrolífera e de gás (Gamarra e Diniz, 2018; Policena *et al.*, 2018; Selvaraj, 2018). Estes materiais são de difícil usinabilidade e isso se deve à alta tenacidade, baixa condutividade térmica e alto grau de endurecimento, dificultando a fabricação de peças e equipamentos nos diversos processos de usinagem, como o fresamento (Selvaraj, 2018).

O fresamento de topo é um processo que apresenta grande importância na indústria manufatureira, sendo utilizado para confecção de perfis, ranhuras, contornos, além de componentes mecânicos das indústrias de petróleo e gás (Kalidass e Palanisamy, 2018).

Devido à capacidade de endurecimento dos aços inoxidáveis duplex (*Duplex Stainless Steels* - DSS), e considerando suas propriedades termomecânicas, são geradas elevadas temperaturas nas áreas de contato entre ferramenta de corte – cavaco e ferramenta de corte – peça, ocorrendo maior força de corte, desgaste da ferramenta e diminuição da qualidade

da superfície usinada. A qualidade da superfície da peça é um dos pontos de grande importância para determinação da vida útil dos componentes fabricados (Policena *et al.*, 2018).

Vasconcelos *et al.* (2021) utilizaram planejamento fatorial completo e gradiente reduzido generalizado (GRG) para estabelecer pontos ótimos de variáveis de processo que minimizaram o valor da rugosidade na peça usinada. Concluíram que a análise estatística se revelou como uma ferramenta importante na modelagem da resposta R_a e que a otimização pelo GRG mostrou ser eficiente na determinação dos parâmetros ideais.

Paiva *et al.* (2009) utilizaram otimização multivariada e erro quadrático médio no processo de torneamento do aço temperado AISI 52100, combinando análise de componentes principais (ACP) com metodologia de superfície de resposta (RSM).

Duarte Costa *et al.* (2016) apresentaram uma nova abordagem híbrida multiobjetivo chamada NBI-MMSE, que combina as funções NBI com o erro quadrático médio multivariado (MMSE).

Nesse contexto, este trabalho tem como objetivo a determinação de parâmetros robustos para a otimização da rugosidade R_a no fresamento de topo do aço inoxidável duplex UNS S32205. As variáveis velocidade de corte (v_c), penetração de trabalho (a_e), avanço por dente (f_z) e profundidade de corte (a_p).

2. PROJETO DE PARÂMETROS ROBUSTOS

Projeto de parâmetros robustos (*Robust Parameter Design* - RPD), é um conjunto de técnicas para determinação de níveis de variáveis de controle, visando: (a) garantir que o valor médio das respostas se estabeleça próximo ao alvo e (b) promover que a variabilidade dos valores em torno do alvo seja mínima (Montgomery, 2013).

A Metodologia de Superfície de Resposta (MSR), é um conjunto de técnicas matemáticas e estatísticas utilizadas para modelagem e análise de problemas onde a resposta de interesse sofre influência de diversas variáveis onde a resposta deve alcançar um resultado ótimo (Montgomery, 2013).

A abordagem Projeto de Parâmetro Robusto com arranjo combinado trata todas as variáveis da mesma forma, sendo elas variáveis controláveis e de ruído, usando um modelo capaz de delinear os efeitos principais e as interações destes parâmetros de processo (Montgomery, 2013).

Os arranjos combinados são definidos como o sequenciamento de experimentos nos quais as variáveis de ruído, para fins de experimentação, são tratadas como variáveis de controle e, dessa forma, variáveis de controle e ruídos são combinadas em um único arranjo experimental. A partir das informações coletadas nos experimentos, torna-se possível a construção de um modelo de superfície de resposta que relaciona as variáveis de controle, os ruídos e suas respectivas interações. A Eq. 1 descreve o modelo de segunda ordem desenvolvido a partir de um arranjo combinado (Montgomery, 2013).

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

Onde:

y – Resposta de interesse

x_i – Variáveis de controle

z_i – Variáveis de ruído

$\beta_0, \beta_i, \beta_{ii}, \beta_{ij}, \gamma_i, \delta_{ij}$ – Coeficientes a serem estimados

k – Número de variáveis de controle

r – Número de variáveis de ruído

ε – Erro experimental

Os coeficientes $\beta_0, \beta_i, \beta_{ii}, \beta_{ij}, \gamma_i, \delta_{ij}$ são estimados através do Método dos Mínimos Quadrados Ordinários (*Ordinary Least Squares* – OLS). Uma vez que o modelo de superfície de resposta foi estabelecido (Eq. 1), a equação para a média da resposta y pode ser extraída diretamente do modelo combinado, conforme Eq. 2:

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

O modelo de variância é desenvolvido utilizando o princípio da propagação de erro, empregando a derivação, conforme Eq. 3:

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

Observa-se ainda que grande parte dos trabalhos que envolvem Projeto de Parâmetro Robusto (PPR) utilizam a combinação de média e variância em uma função única que deve ser minimizada. Essa função é conhecida como Erro Quadrático Médio (EQM), (Brito, 2012). Essa função fica restrita ao espaço de experimentos da solução, de forma que $\text{Min} [\hat{y}(x) - T]^2 + \sigma^2$ (Paiva *et al.*, 2012; Shi *et al.*, 2011).

Considerando a existência de diferentes graus de importância entre média e variância, a função objetivo EQM pode assumir a forma $EQM_w = w_1 \times (\hat{y}(x) - T)^2 + w_2 \times \hat{\sigma}^2(x)$, onde os pesos w_1 e w_2 são definidos como constantes positivas pré-especificadas (Kazemzadeh *et al.*, 2008). Tais pesos também podem ser escolhidos em diferentes combinações convexas, de forma que possa ser gerado um conjunto de soluções, onde $w_1 + w_2 = 1$ com w_1 e $w_2 \geq 0$.

Neste trabalho, foi utilizado o conceito do erro quadrático médio (EQM), apresentado por K  ksoy e Yalcinoz (2006), sendo definido como a soma da variância com a diferença quadrática entre a média da resposta e o valor definido como alvo. Assim, a minimiza  o do EQM garante que o valor médio da resposta fique o mais próximo possível do seu alvo, com a menor variabilidade. Essa otimiza  o pode ser obtida conforme Eq. 4.

$$EQM(y) = [\mu(y) - T_y]^2 + \sigma^2(y) \quad (4)$$

$$\text{Sujeito a: } x^T x \leq \alpha^2$$

Onde:

$EQM(y)$ – Erro quadrático médio da resposta y

$\mu(y)$ – Modelo para a média da resposta y

T_y – Alvo da resposta y

$\sigma^2(y)$ – Modelo para variância da resposta y

$x^T x \leq \alpha^2$ - Restri  o esférica para o espaço experimental

Destaca-se que o conceito do erro quadrático médio tem sido empregado para a otimiza  o robusta de diferentes processos de fabrica  o, (Paiva *et al.*, 2012) e (Gomes *et al.*, 2012).

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Para a coleta de dados, os experimentos do fresamento de topo do aço inoxidável duplex UNS S32205 foram planejados por arranjo combinado com quatro variáveis de controle e três variáveis de ruídos, totalizando 82 experimentos. As Tab. 1 e 2 apresentam as variáveis de controle e de ruídos com os respectivos níveis de opera  o.

Tabela 1. Variáveis de controle

Variáveis	Níveis				
	-2,83	-1	0	1	2,83
Velocidade de corte (v_c) [m/min]	32,50	60,00	75,00	90,00	117,40
Avanço por dente (f_z) [mm/dente]	0,04	0,10	0,13	0,16	0,21
Penetra��o de trabalho (a_e) [mm]	12,26	15,00	16,50	18,00	20,74
Profundidade de corte (ap) [mm]	0,43	0,80	1,00	1,20	1,57

Tabela 2. Variáveis de ruído

Variáveis	Níveis		
	-1	0	1
Desgaste de flanco (v_b) [mm]	0	0,15	0,30
Vazão do fluido (Q) [l/min]	0	10	20
Balanço da ferramenta (l_{to}) [mm]	30	40	50

O material usinado foi o aço inoxidável duplex UNS S 32205, em bloco com dimensões de 115 x 115 x 170 mm e com dureza média de 250 HB, cuja composição química é apresentada conforme Tab. 3.

Tabela 3. 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

Em relação aos equipamentos utilizados, os experimentos foram conduzidos em um centro de usinagem CNC da marca Eurostec, com 15 kW de potência e rotação máxima de 10.000 rpm. Como fluido de corte, empregou-se o óleo sintético Quimatic MEII. A ferramenta utilizada se constituiu de uma fresa de topo código R390-025A25-11M, com diâmetro de 25 mm, ângulo de posição $\chi_r = 90^\circ$, haste cilíndrica, passo médio com 3 insertos e fixação mecânica por pinça. Os insertos foram de metal duro ISO M30, código R390-11 T3 08M-MM 2030 (Sandvik-Coromant, 2018), revestidos com (Ti,Al)N + TiN pelo processo de deposição física de vapor (*Physical Vapor Deposition* - PVD), conforme Fig. 1.



Figura 1. Ferramenta de corte utilizada

Após o fresamento do bloco de aço inoxidável duplex UNS S32205, no sentido discordante/concordante utilizando os parâmetros definidos pelo arranjo experimental, a rugosidade de superfície R_a foi medida na superfície usinada por um rugosímetro portátil Mitutoyo Surftest SJ-201 M/P conforme Fig. 2, utilizando *cut-off* de 0,8 mm (Grouss, 2011).

A rugosidade R_a foi medida em três pontos do bloco, no centro e em cada extremidade, tal decisão possibilitou que o valor médio das leituras fosse considerado.



Figura 2. Rugosímetro portátil utilizado no experimento

Para a otimização do processo de fresamento de topo do aço inoxidável duplex UNS S32205, este trabalho fez uso da experimentação como método de pesquisa.

Dentre as diversas técnicas de experimentação neste trabalho foi utilizado o Projeto de Experimentos (DOE) de forma que os dados apropriados fossem coletados e depois analisados por métodos estatísticos, (Montgomery, 2013). Os conceitos de Projeto de Parâmetros Robusto juntamente com metodologia de superfície de resposta também foram aplicados a fim de formular analiticamente as equações de média e variância, separadamente, conforme idealizado por Myers *et al.* (1992).

O fundamento do projeto de parâmetro robusto consiste na minimização da variabilidade de produtos e processos com o objetivo de melhorar qualidade e confiabilidade (Souza *et al.* 2018). De acordo com Arkadani e Noorossana (2008), o objetivo do RPD é identificar os níveis dos parâmetros de controle que reduzem a sensibilidade das respostas em relação às variáveis de ruído, garantindo a robustez do processo.

A coleta de dados é uma das atividades mais importantes na execução do trabalho. Um banco de dados inadequado conduz a resultados questionáveis. Dessa forma, é extremamente importante o planejamento detalhado do experimento, bem como sua adequada execução e registro conforme os passos a seguir:

1º passo – Metodologia de Superfície de Resposta (MSR): utilizada para o planejamento dos experimentos, coleta dos dados, modelagem matemática das respostas e análise das influências dos parâmetros em R_a ;

2º passo – Otimização do Erro Quadrático Médio (EQM): utilizada para obter a combinação mais adequada dos parâmetros de usinagem que vão permitir a maximização dos resultados do processo.

O arranjo CCD foi definido utilizando o *software* estatístico MINITAB 19 tendo sido definidos 7 fatores, totalizando 82 experimentos.

O *software* MINITAB 19 gerou um conjunto de corridas considerando quatro fatores controláveis (velocidade de corte - v_c , avanço por dente - f_z , profundidade de usinagem - a_e , e penetração de trabalho - a_p) e três variáveis de ruído (desgaste de flanco - v_b , vazão do fluido de corte - Q e balanço da ferramenta - lt_0), conforme Tab. 4.

Tabela 4. Matriz experimental

Experimentos	Variáveis de controle				Variáveis de ruído			Respostas
	v_c	f_z	a_e	a_p	v_b	Q	lt_0	R_a
1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	0,520
2	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0,347
3	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1	0,630
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
80	0	0	0	0	0	0	0	0,380
81	0	0	0	0	0	0	0	0,340
82	0	0	0	0	0	0	0	0,397

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O modelo de superfície de resposta do arranjo combinado escrito em termos das variáveis de controle e ruído consideradas neste trabalho é apresentado conforme Eq. 5.

$$R_a(x, z) = \beta_0 + \beta_1 f_z + \beta_2 a_p + \beta_3 v_c + \beta_4 a_e + \beta_{11} f_z^2 + \beta_{22} a_p^2 + \beta_{33} v_c^2 + \beta_{44} a_e^2 + \beta_{12} f_z a_p + \beta_{13} f_z v_c + \beta_{14} f_z a_e + \beta_{23} a_p v_c + \beta_{24} a_p a_e + \beta_{34} v_c a_e + \gamma_1 v_b + \gamma_2 lt_0 + \gamma_3 Q + \delta_{11} f_z v_b + \delta_{12} f_z lt_0 + \delta_{42} a_e lt_0 + \delta_{43} a_e Q \quad (5)$$

As variáveis de controle v_c , f_z , a_e e a_p , foram expressas em sua forma codificada. Os coeficientes foram estimados utilizando o Método dos Mínimos Quadrados Ordinários (OLS), utilizando o *software* estatístico MINITAB 19, que proporcionaram um R^2 ajustado de 93,91%. Desta forma foi possível estimar os coeficientes do modelo conforme Eq. 6:

$$R_a(x, z) = 0,4256 + 0,01597 v_c + 0,05574 f_z + 0,00198 a_e + 0,00826 a_p + 0,13823 v_b - 0,05342 Q + 0,00452 lt_0 + 0,04525 v_c^2 + 0,06038 f_z^2 + 0,06725 a_e^2 + 0,04563 a_p^2 + 0,08814 v_c f_z - 0,00517 v_c a_e - 0,01127 v_c a_p + 0,03502 v_c v_b + 0,00005 v_c Q + 0,00117 v_c lt_0 + 0,00542 f_z a_e + 0,01033 f_z a_p - 0,07577 f_z v_b - 0,00805 f_z Q + 0,00295 f_z lt_0 - 0,00548 a_e a_p + 0,00492 a_e v_b - 0,00173 a_e Q - 0,00555 a_e lt_0 + 0,01014 a_p v_b + 0,00392 a_p Q - 0,00545 a_p lt_0 \quad (6)$$

Com a construção do modelo $R_a(x, z)$, foi possível estabelecer as equações de média e variância da rugosidade R_a conforme Eqs. 7 e 8:

$$\mu(R_a) = 0,4256 + 0,01597 v_c + 0,05574 f_z + 0,00198 a_e + 0,00826 a_p + 0,04525 v_c^2 + 0,06038 f_z^2 + 0,06625 a_e^2 + 0,04563 a_p^2 + 0,08814 v_c f_z - 0,00517 v_c a_e - 0,01127 v_c a_p + 0,00542 f_z a_e + 0,01033 f_z a_p - 0,00548 a_e a_p \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \sigma^2(R_a) = & 0,02477 + 0,00969v_c - 0,02006f_z + 0,00149a_e + 0,00234a_p + 0,00123v_c^2 + 0,00581f_z^2 \\ & + 0,00006a_e^2 + 0,00015a_p^2 - 0,00530v_cf_z + 0,00033v_ca_e + 0,00070v_ca_p \\ & - 0,00075f_za_e - 0,00163f_za_p + 0,00015a_ea_p \end{aligned} \quad (8)$$

A Fig. 3 mostra a superfície de resposta para a média da rugosidade R_a . Pode ser observado que o aumento da velocidade de corte (v_c) juntamente com o avanço por dente (f_z) contribuem para o acréscimo do valor da rugosidade R_a .

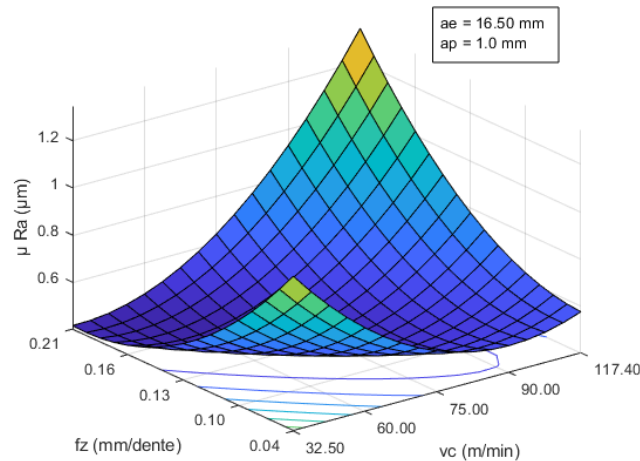


Figura 3. Superfície de resposta para a média de R_a : velocidade de corte (v_c) e avanço por dente (f_z)

Pode ser observado que diminuindo a velocidade de corte (v_c) e aumentando o avanço por dente (f_z) a variância da rugosidade R_a foi maximizada, conforme Fig. 4.

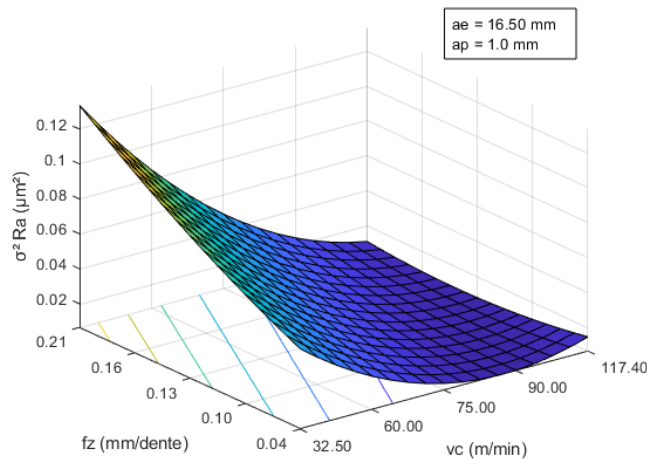


Figura 4. Superfície de resposta para a variância de R_a : interação entre avanço por dente (f_z) e penetração de trabalho (a_e)

Após a definição das equações de média e variância, o passo seguinte foi realizar a otimização do processo conforme Eq. 9. O valor calculado como alvo (T) de $0,3992 \mu\text{m}$ foi determinado minimizando o modelo $R_a(x,z)$ utilizando o algoritmo GRG.

$$\text{Minimizar EQM } (R_a) = w_1 \times [\mu(R_a) - 0,3992]^2 + w_2 \times \sigma^2(R_a) \quad (9)$$

$$\text{Sujeito a: } f_z^2 + a_p^2 + v_c^2 + a_e^2 \leq 4,00$$

Onde:

EQM (R_a) – erro quadrático médio para rugosidade R_a

w_1 e w_2 – pesos atribuídos à média e variância da rugosidade R_a

$\mu(R_a)$ – modelo para média

$\sigma^2(y) (R_a)$ – modelo para variância

Utilizando o Solver, disponível no *software* Microsoft Excel 2019, os parâmetros robustos para o fresamento do aço inoxidável duplex UNS S32205 foram determinados com o emprego do método erro quadrático médio (EQM), conforme Tab. 5.

Tabela 5. Parâmetros robustos determinados com emprego do EQM

		v_c	f_z	a_e	a_p	$\mu(R_a)$	$\sigma^2(R_a)$
Peso $\mu(R_a)$	Peso $\sigma^2(R_a)$	(m/min)	(mm/dente)	(mm)	(mm)	(μm)	(μm^2)
0,00	1,00	53,09	0,16	15,73	1,13	0,5461	0,0064
0,05	0,95	49,55	0,16	16,09	1,00	0,4945	0,0065
0,10	0,90	51,64	0,16	16,18	0,96	0,4815	0,0067
0,15	0,85	52,75	0,16	16,22	0,95	0,4771	0,0068
0,20	0,80	53,54	0,16	16,24	0,94	0,4744	0,0069
0,25	0,75	54,21	0,16	16,25	0,93	0,4722	0,0070
0,30	0,70	54,83	0,16	16,27	0,93	0,4702	0,0071
0,35	0,65	55,44	0,16	16,28	0,93	0,4682	0,0072
0,40	0,60	56,05	0,15	16,28	0,93	0,4661	0,0074
0,45	0,55	56,69	0,15	16,29	0,93	0,4639	0,0076
0,50	0,50	57,36	0,15	16,30	0,93	0,4616	0,0079
0,55	0,45	58,09	0,15	16,31	0,93	0,4591	0,0082
0,60	0,40	58,89	0,15	16,32	0,93	0,4564	0,0087
0,65	0,35	59,78	0,15	16,33	0,94	0,4535	0,0092
0,70	0,30	60,79	0,15	16,34	0,94	0,4502	0,0099
0,75	0,25	61,97	0,14	16,35	0,94	0,4464	0,0109
0,80	0,20	63,38	0,14	16,36	0,95	0,4421	0,0122
0,85	0,15	65,15	0,14	16,38	0,95	0,4370	0,0142
0,90	0,10	67,56	0,13	16,40	0,96	0,4318	0,0174
0,95	0,05	71,38	0,13	16,44	0,97	0,4270	0,0237
1,00	0,00	92,06	0,09	16,63	1,04	0,4175	0,0827

A Fig. 5 apresenta a fronteira de Pareto construída a partir da determinação dos parâmetros robustos. Foi escolhido o primeiro ponto fora da aglutinação, relacionado aos pesos $w_1 = 0,75$ e $w_2 = 0,25$, que é uma característica do método de somas ponderadas.

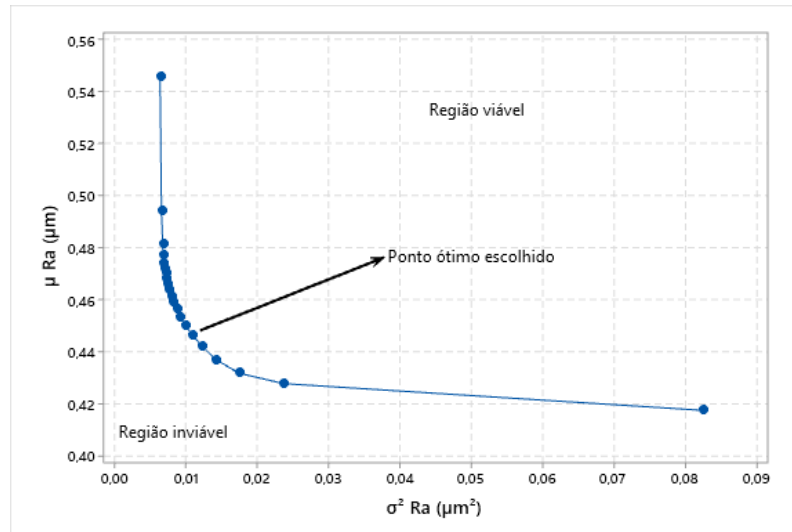


Figura 5. Fronteira de Pareto

Pode ser observado que o PPR (Projeto de Parâmetro Robusto) elaborado para o fresamento de topo do aço inoxidável duplex UNS S32205 indica o ponto ótimo apresentando uma configuração satisfatória para o processo justificando assim pequena variação nos valores de média ($w_1 = 0,75$) e variância ($w_2 = 0,25$) da rugosidade R_a , conforme Tab. 6.

Tabela 6. Parâmetros robustos determinados pela fronteira de Pareto para EQM

	Variáveis de controle				$\mu(R_a)$	$\sigma^2(R_a)$	$EQM(R_a)$
	v_c	f_z	a_e	a_p			
Valores ótimos (decodificados)	61,97	0,14	16,35	0,94	0,4464	0,0109	0,00440
Valores ótimos (codificados)	-0,8690	0,4760	-0,1000	-0,2907			
Unidade	m/min	mm/dente	mm	mm	μm	μm^2	-----

Os parâmetros robustos definidos para o processo de fresamento de topo do aço inoxidável duplex UNS S32205 indicam o ponto de ótimo como um estado eficaz para o processo, na dimensão em que o resultado desejado para a média da rugosidade R_a se apresenta como um valor baixo quando comparado aos valores observados nos experimentos.

Os valores ótimos das variáveis de controle foram inseridos na máquina-ferramenta e variou-se o desgaste de flanco da ferramenta (v_b), vazão do fluido (Q) e balanço da ferramenta (l_{t0}) conforme projeto L9 de Taguchi. Após a execução dos ensaios de confirmação obteve-se os seguintes resultados, conforme Tab. 7.

Tabela 7. Resultados dos experimentos de confirmação

v_b	Q	l_{t0}	$R_a(Real)$
0,00	0	30	0,431
0,00	10	40	0,427
0,00	20	50	0,474
0,15	10	30	0,456
0,15	20	40	0,441
0,15	0	50	0,482
0,30	20	30	0,451
0,30	0	40	0,470
0,30	10	50	0,513
Média (real)			0,4606
Valor Previsto			0,4464
Erro			3,18%

Os resultados dos experimentos de confirmação mostraram que o valor médio da rugosidade R_a real e o previsto foram próximos, com erro de 3,18%, sendo considerado uma pequena variação em se tratando do parâmetro em análise. Portanto, devido à baixa variação entre o número real e o previsto, ficam validados os resultados obtidos na otimização do processo no fresamento de topo do aço inoxidável duplex UNS S32205.

Os resultados dos testes de confirmação foram verificados empregando a Análise de Variância (ANOVA), conforme Tab. 8. Conclui-se que os fatores de ruído não influenciam significativamente a resposta de rugosidade R_a , uma vez que os P -value são superiores a 5%.

Tabela 8. Análise de variância para experimento de confirmação de μR_a

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor – P
v_b	2	0,001738	0,000869	6,38	0,135
Q	2	0,003814	0,001907	14,01	0,067
lt_0	2	0,000151	0,000075	0,55	0,643
Erro	2	0,000272	0,000136		
Total	8	0,005974			

5. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou uma aplicação do método EQM para minimização da média e variância da resposta R_a no processo de fresamento de topo do aço inoxidável duplex UNS S32205, buscando-se assim a minimização do erro quadrático médio calculado a partir dos modelos de média e variância estabelecidos para a resposta R_a .

O modelo de superfície de resposta desenvolvido utilizando arranjo combinado apresentou uma qualidade de ajuste adequada uma vez que o R^2 (*adj.*) foi de 93,91 %.

A fronteira de Pareto, com 21 pontos ótimos foi construída variando os pesos w_1 e w_2 , na média e variância de R_a respectivamente. O melhor ponto selecionado foi $w_1 = 0,75$ e $w_2 = 0,25$, e nessas condições os valores das variáveis de controle são: $v_c = 61,97$ m/min; $f_z = 0,14$ mm/dente; $a_e = 16,35$ mm e $a_p = 0,94$ mm. Para esses parâmetros de corte, o valor médio da rugosidade foi $0,4464 \mu\text{m}$ e variância igual a $0,0109 \mu\text{m}^2$.

Os experimentos de confirmação mostram que a diferença entre as respostas reais e as teóricas resultou em 3,18% validando assim os resultados ótimos obtidos com os modelos desenvolvidos.

A ANOVA dos experimentos de confirmação mostrou que as variáveis de ruído não influenciaram na rugosidade R_a pois apresentam P -value acima de 5%

6. AGRADECIMENTOS

À mineradora Vale S.A., à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e ao Grupo de Estudos em Qualidade e Produtividade (GEQProd) da Universidade Federal de Itajubá - campus Itabira, pelo apoio na realização deste trabalho.

7. REFERÊNCIAS

- Ardakani, M. K.; Noorossana, R. “A new optimization criterion for robust parameter design — the case of target is best”. *Int. J. Adv. Manuf. Technol. Eng.*, vol. 38, n.º 9-10, pp. 851-859, 2008, <https://doi.org/10.1007/s00170-007-1141-6>
- Dambatta, M. M.; Sayuti, M.; Sarhan A. A. D.; Bin Ab Shukor, H. B. A.; Derahman, N. A. B.; Manladan, S. M. 2019. “Prediction of specific grinding forces and surface roughness in machining of Al6061-T6 alloy using ANFIS technique”. *Industrial Lubrification and Technology*, Vol. 71, N 2, p. 309-317, <https://doi.org/10.1108/ILT-03-2018-0098>
- Duarte Costa, D. M.; Brito, T. G.; Paiva, A. P.; Leme, R. C.; Balestrassi, P. P. “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* (2016), <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.01.062>
- 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.
- Garcia, R. F.; Policena, M.; Souza, A. J. 2021, “Análise das forças de usinagem geradas pelo fresamento frontal do aço inoxidável Forta DX 2303, 11º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, <http://dx.doi.org/10.26678/ABCM.COBEP2021.COB21-0034>.

- Gomes, J.H.F., Campos, P.H.S., Lopes, L.G.D., Costa, S.C., Paiva, A.P., 2012, “Otimização robusta da diluição e da largura do cordão na soldagem com arame tubular para aplicações de revestimento do aço carbono ABNT 1020 com aço inoxidável ABNT 316L”, Anais do VII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica (CONEM), São Luís (MA), Brasil.
- Grouss, A. “Applied metrology for manufacturing engineering”. John Wiley & Sons, Inc., USA, 2011.
- Hanif, M.; Ahmad, W.; Hussain, S; et al. “Investigating the effects of electric discharge machining parameters on material removal rate and surface roughness on AISI D2 steel using RSM-GRA integrated approach”. *Int J Adv Manuf Technol* 101, 1255–1265, 2019.
- IMOA, 2014. “International Molybdenum Association”. <<https://www.imoa.info/molybdenum-media-centre/downloads>>.
- Kalidass, G.; Palanisamy, P., “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, 2014.
- Köksoy, O.; Yalcinoz, T., 2006, “Mean square error criteria to multiresponse process optimization by a new genetic algorithm”, *Appl. Math. Comput.*, n. 175, p. 1657-1674
- Lin, D. K. J.; Tu, W., 1995, “Dual response surface optimization”, *Journal of Quality Technology* 27:34-39
- Montgomery, D.C., 2013, “Design and Analysis of Experiments”, Ed. John Wiley, New York, 757p.
- Myers, R. H.; Khuri, A. I.; Vining, G. “Response Surface Alternatives to the Taguchi Robust Parameter Design Approach”. *Am. Stat.*, vol. 46, n.º 2, pp. 131-139, 1992, <https://doi.org/10.1080/00031305.1992.10475869>
- Paiva, A. P.; Paiva, E. J.; Ferreira, J. R.; Balestrassi, P. P. “A multivariate mean square error optimization of AISI 52100 hardened steel turning”, *Int J Adv Manuf Technol* 43, 631–643 (2009). <https://doi.org/10.1007/s00170-008-1745-5>
- Paiva, A. P.; Pontes, F. J.; Balestrassi, P. P.; Ferreira, J. R.; Silva, M. B. Optimization of Radial Basis Function neural network employed for prediction of surface roughness in hard turning process using Taguchi’s orthogonal arrays, *Expert Systems with Applications*, Volume 39, Issue 9, 2012, Pages 7776-7787, ISSN 0957-4174, <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2012.01.058>.
- Policena, M.R., Devitte, C., Fronza, G., Garcia, R.F. e Souza, A.J., 2018. “Surface Roughness Analysis in Finishing EndMilling of Duplex Stainless Steel UNS S32205”. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 98, p. 1617-1625.
- Ross, P. J. “Aplicações das Técnicas Taguchi na Engenharia da Qualidade”. Editora Makron, McGraw-Hill. São Paulo, 1991.
- Sandivik Coromant. “Ferramentas Sólidas Rotativas”, 2018.
- 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.
- Shi, K., Zhang, DP., Ren, J., Yao, C. e Yuan, Y., 2014. “Multiobjective Optimization of Surface Integrity in Milling TB6 Alloy Based on Taguchi-Grey Relational Analysis”. *Advances in Mechanical Engineering*, Vol. 6 (12), p. 280-313.
- Souza, B.; Santos, A. P. L.; Filho, M. L. S. “Use of the Robust Design Methodology for Identification of Factors that Contribute to the Intensity of the “Orange Peel” Aspect on Painted Bumper Surfaces”. *Gestão & Produção*, Vol. 25, n. 3, p. 513-530, 2018, <https://doi.org/10.1590/0104-530X3160-18>
- Taguchi, G.; Elsayed, E. A.; Hsiang, T. C. “Engenharia da Qualidade em Sistemas de Produção”. McGraw-Hill, 1990.
- Vining, G. G., Myers, R. H. Combining Taguchi and response surface philosophies: a dual response approach. *Journal of Quality Technology* 22:38-45, 1990.
- Vasconcelos, G. A. V. B; Oliveira, C. H.; Carolho, L. F. S. “Otimização dos Parâmetros de Corte no Torneamento do Aço Inoxidável 304 para Redução da Rugosidade Superficial”. Anais do 11º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação (COBEF), Curitiba (PR), Brasil, <http://dx.doi.org/10.26678/ABCM.COBEF2021.COB21-0160>
- Vosniakos, G. C.; Bernardos, P.; Krimpenis, A. A. “Intelligent Optimisation of 3-Axis Sculptured Surface Machining on Existing CAM Systems”. *Machining of Complex Sculptured Surfaces* (pp. 157-189)

8. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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

COBEF2023-0327 - OPTIMIZATION OF MEAN AND VARIANCE OF RUGOSITY R_a IN DUPLEX STAINLESS STEEL END MILL UNS S32205

Wander Pinto Ribeiro
Gustavo Rocha de Queiroz
Harue Genghini Shibuta
Carlos Henrique de Oliveira
Leonardo Albergaria de Oliveira
Tarcísio Gonçalves de Brito

IEI-UNIFEI - Federal University of Itajubá. *Campus Theodomiro Carneiro Santiago*. 200, Irmã Ivone Drumond Street. Zip Code: 35903-087. Itabira-MG
wander.p.ribeiro@gmail.com
gustavoqueiroz@unifei.edu.br
harueshibuta@unifei.edu.br
carlos.henrique@unifei.edu.br
leoalber@unifei.edu.br
tgbrito@unifei.edu.br

Abstract: *The performance of the processes in the metalworking industry is influenced by the presence of noise variables that interfere in the mean and variance values reducing the quality defined for the products. The use of setups not consistent with the control variables inserted into the machine tools contributes to the increase of the mean and variance displacement in relation to the limits specified by engineering, such phenomenon can be observed especially in manufacturing processes where there is the need to control the surface finish of machined parts. These surfaces present irregularities when observed in detail using adequate equipment. The duplex stainless steels, due to their mechanical properties, present difficulties in machinability, including for the milling process, representing a great challenge for the industries that manufacture parts and equipment to meet operational conditions with quality. This work aims to establish the optimal parameters for the end milling process of duplex stainless steel UNS S32205 and to establish the mean and variance value for the roughness R_a by minimizing the mean square error (RMSE). Analysis of variance was performed to identify which cutting parameters were the most significant. By the concept of robust parameter design and the theory of error propagation the mean and variance equation was established the response R_a , from the dual process modeling, optimization was performed using generalized reduced gradient (GRG). The Pareto frontier was constructed as a function of the different weights in relation to the mean and variance of the roughness R_a . The results showed that the method was efficient for a mean value of $0.4464 \mu\text{m}$ and variance $0.0109 \mu\text{m}^2$. A Taguchi orthogonal arrangement (L9) was used to confirm the tests.*

Keywords: duplex stainless steel, end milling, R_a roughness, optimization.

RESPONSIBILITY NOTICE

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