

ANÁLISE DA RUGOSIDADE R_a NO FRESAMENTO HELICOIDAL DO AÇO INOXIDÁVEL SUPERDUPLEX UNS S32760 UTILIZANDO METODOLOGIA DE SUPERFÍCIE DE RESPOSTA

José Veríssimo Ribeiro de Toledo, verissimo@unifei.edu.br¹

Thais Fernanda Sousa Pires, thaisfpres@yahoo.com¹

Robson Bruno Dutra Pereira, robsondutra@ufsj.edu.br²

Gilbert Silva, Gilbert@unifei.edu.br¹

João Roberto Ferreira, jorofe@unifei.edu.br¹

¹Universidade Federal de Itajubá, Av. BPS 1.303, 37.500-903 Itajubá, Minas Gerais, Brasil

²Universidade Federal de São João Del Rei, Rua Frei Orlando 170, 36.880-000 São João Del Rei, Minas Gerais, Brasil

Resumo. Os aços inoxidáveis superduplex apresentam boas propriedades mecânicas e representam um avanço significativo na fabricação de materiais resistentes à corrosão, com aplicação em ambientes severos como indústria petroquímica e plataformas de óleo e gás, porém apresentam difícil usinabilidade. O processo de fresamento helicoidal consiste no movimento de rotação da fresa em torno do seu próprio eixo, apresenta maior eficiência de processamento e menor custo comparado à perfuração convencional e permite a obtenção de furos de diâmetros diferentes com ajuste do diâmetro da trajetória helicoidal resultando em altos níveis de qualidade da superfície, precisão e correção da qualidade dimensional. O objetivo do desenvolvimento deste trabalho é a modelagem do processo de fresamento helicoidal do aço inoxidável super duplex UNS S32760. A metodologia de superfície de resposta será utilizada para avaliar a relação do comportamento da rugosidade R_a com os parâmetros velocidade de corte, avanço axial, avanço tangencial, comprimento em balanço da fresa, altura medida do furo e vazão do fluido de corte. O valor mínimo da rugosidade R_a analisado foi 0,1420 μm . A partir da obtenção dos resultados observou-se que os parâmetros f_z , v_c , l e b foram os fatores que mais influenciaram na rugosidade obtida.

Palavras chave: Fresamento helicoidal. Aço inoxidável super duplex. Rugosidade R_a , Metodologia de superfície de resposta

1. INTRODUÇÃO

Os aços inoxidáveis superduplex apresentam em sua estrutura composição de duas fases com proporções balanceadas de austenita e ferrita (KOYEE *et al.*, 2014), conferindo excelente resistência à corrosão dos aços austeníticos aliada à alta resistência mecânica dos aços ferríticos. É frequente o uso do número equivalente de resistência por pites (PRE) como forma de classificar as ligas resistentes à corrosão. Os aços inoxidáveis superduplex apresentam alta resistência à corrosão por pites, com PRE superior a 40, além de elevada resistência mecânica, devido à combinação de elementos como cromo, níquel, molibdênio e nitrogênio.

O desenvolvimento dos aços inoxidáveis representam um avanço significativo na fabricação de materiais resistentes à corrosão e são utilizados especialmente em ambientes severos, como indústria petroquímica, aeroespacial e de energia, plataformas de óleo e gás e plantas de dessalinização (SMIDERLE *et al.*, 2014; TAVARES *et al.*, 2018). A composição química dos aços inoxidáveis permite que se forme uma camada passiva de óxidos, quando em contato com o oxigênio, impedindo o contato do metal base com a atmosfera agressiva (CARBÓ, 2008). Devido suas propriedades, esses materiais apresentam boa estabilidade nas aplicações em ambientes severos e contribuem no avanço do desenvolvimento de materiais resistentes à corrosão. Os aços inoxidáveis apresentam difícil usinabilidade, caracterizado por associação de altas taxas de endurecimento e baixa condutividade que podem afetar a qualidade da superfície usinada (Policena, 2018; Oliveira *et al.*, 2019).

Durante a operação de usinagem dos aços inoxidáveis podem ocorrer formações instáveis de cavacos e vibrações, além de baixa condutividade térmica, em função da composição e boas propriedades mecânicas, o que pode resultar em maior absorção de calor pela aresta de corte, aumento nos mecanismos de desgaste da ferramenta como difusão, abrasão e aderência, redução do tempo de vida da ferramenta e comprometimento no acabamento superficial da peça (Korkut, 2004; Policena, 2018).

O processo de fresamento helicoidal consiste no movimento de rotação da fresa em torno do seu próprio eixo e tem custos de processamento mais baixos e maior eficiência de processamento comparado à perfuração convencional. Devido a trajetória helicoidal realizada pela fresa, permite a obtenção de furos de diâmetros diferentes com ajuste do diâmetro da

trajetória helicoidal, alterando a distância entre a fresa e o eixo do furo (Sun, 2020). Alta qualidade da superfície e precisão, correção da qualidade dimensional, geométrica e microgeométrica nos furos podem ser gerados pelo processo em uma única operação (Wang, 2019).

O conhecimento das relações dos parâmetros do processo é fundamental na melhora dos ajustes. Deste modo, para efeitos de busca de qualidade e índices de competitividade, torna-se necessário avaliar alguns parâmetros que influenciam a rugosidade superficial, como acuracidade e geometria da ferramenta, e aplicação do processo de usinagem (Qin, 2014). Para análise das variáveis de entrada do processo e relação nos níveis de rugosidade será utilizada a Metodologia de Superfície de Resposta (RSM – *Response Surface Methodology*), que é um conjunto de técnicas estatísticas e matemáticas utilizada para modelagem e análise de processos, aplicada em situações em que a resposta de interesse é influenciada por diferentes variáveis (Montgomery, 2005).

O objetivo da realização desta pesquisa é analisar a rugosidade R_a obtida na operação de fresamento helicoidal do aço inoxidável superduplex UNS S32760. Para a realização dos ensaios foram usinados corpos-de-prova do aço inoxidável super duplex UNS S32760 com diâmetro de 24 mm e considerados os efeitos das variáveis de controle velocidade de corte (v_c), avanço axial (f_{za}) e avanço tangencial (f_{zt}) e das variáveis de ruído comprimento em balanço da fresa (l_{to}), altura medida do furo (l_b) e vazão do fluido de corte (Q) no acabamento superficial da peça.

2. METODOLOGIA

Os experimentos planejados de fresamento helicoidal foram realizados em um centro de usinagem vertical *ROMI® D 600*, que possui curso longitudinal da mesa (eixo X) de 600 mm, transversal (eixo Y) de 530 mm e 580 mm no curso do cabeçote (eixo Z). Este centro de usinagem possui um cabeçote vertical com cone do eixo-árvore ISO 40, avanço rápido de 30 m/min nos três eixos de programação (X, Y e Z), potência máxima no eixo-árvore de 15 kW, rotação máxima de 10.000 rpm e comando numérico *GE® FANUC Oi-MD*. A ferramenta de corte utilizada foi uma fresa inteiriça da linha *Coromill Plura* código ISO/ANSI R215.H4-10050DAC0P 1620 com 10 mm de diâmetro, $z=4$ dentes, $ap(max) = 0,7$ mm ângulo de hélice de 50° , ângulo de saída axial de 6° e ângulo de saída radial de -18° , sem quebra cavacos, classe ISO M com cobertura de TiAlN depositada por PVD da *Sandvik Coromant®* fixada em um mandril hidráulico *CoroChuck 930*, cone BT-40 normas JIS B 6339/DIN ISO 7388-2 código 930-B40-S-12-085 também da *Sandvik Coromant®*, mostrada em detalhe na Figura 1.

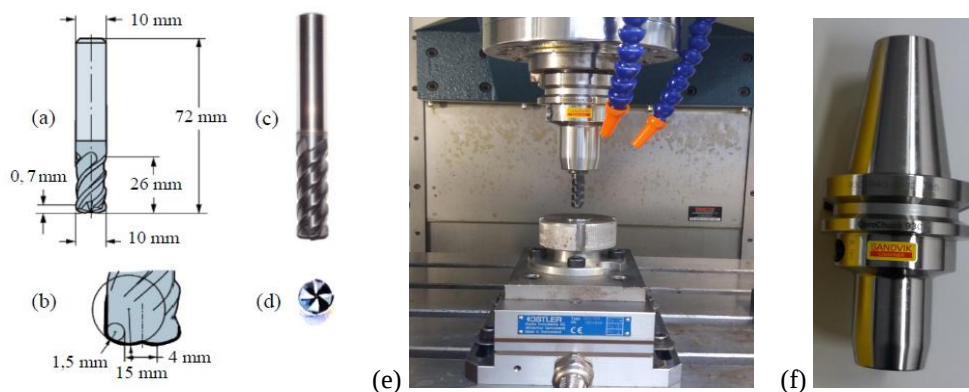


Figura 1. Fresa *Coromill Plura* código ISO/ANSI R215.H4-10050DAC0P 1620 da *Sandvik®* (a) dimensões; (b) detalhe duplo raio de ponta; (c) foto periferia; (d) foto frontal; (e) Setup experimental; (f) mandril hidráulico *CoroChuck 930* da *Sandvik Coromant®*

Os corpos de prova em aço inoxidável super duplex UNS S32760 foram fornecidos pela Villares Metals e apresentam uma dureza de 26 HRC (258 HBW). Foram previamente usinados com diâmetro de 24 mm e altura de 15 mm, tendo um ressalto com diâmetro de 25,40 mm para fixação dos mesmos com o objetivo de se obter furos passantes de 18 mm de diâmetro. A Tabela 1 apresenta a composição química do material usinado na experimentação que foi o aço inoxidável super duplex liga UNS S32760 (Villares Metals) e a composição química das amostras conforme certificado de qualidade do material.

Tabela 1. Composição química (% peso) do aço inoxidável Super duplex UNS S32760

Aço	Qtd.	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	W	Cu	N	PREN
UNS S32760	Min.	0,00	0,00	0,00	24,00	6,00	3,0	0,50	0,50	0,20	≥ 40
	Máx.	0,03	1,00	1,00	26,00	8,00	4,0	1,00	1,00	0,30	
Amostra CQ - 1526190	-	0,019	0,41	0,51	25,36	6,90	3,66	0,73	0,57	0,252	41,47-42,67

Os experimentos foram conduzidos com base em um planejamento composto central (*Central Composite Design* – CCD) combinados com variáveis de controle e de ruído, de forma a viabilizar a obtenção de superfícies de segunda ordem. O planejamento experimental é composto de projeto fatorial a meia fração com $n_f = 2^{(k+r-1)} = 2^{(3+3)-1} = 32$ pontos fatoriais, $n_c = 9$ pontos centrais e $n_a = 2k = 2 \times 3 = 6$ pontos axiais totalizando 47 experimentos. O CCD tem o objetivo de estimar modelos de segunda ordem, com capacidade de previsão da estratégia de experimentação sequencial que permite garantir economia na experimentação e busca de região de curvatura e máximo crescimento da função estimada (Box *et al.*, 1951). No planejamento composto central, os pontos fatoriais ou fracionados são usados para estimar os efeitos lineares e interações de segunda ordem.

Os fatores de controle avaliados foram a velocidade de corte (v_c), o avanço axial (fza) e avanço tangencial por dente (fzt) onde tanto fza e fzt variou entre 0.1 e 0.20 mm/volta e v_c entre 35 e 65 m/min e no caso dos fatores de ruído, o comprimento em balanço (lto) variou entre 27 e 31 mm, a altura medida do furo (lb) entre início e fim e a vazão do fluido de corte (Q) entre 5 e 20 lts/min. Tal planejamento teve por finalidade a modelagem e estimativa dos efeitos das variáveis do processo na resposta considerada.

A medição de respostas de rugosidade dos corpos de prova usinados foi realizada com a utilização de um rugosímetro portátil da Mitutoyo® modelo SJ-210, com deslocamento transversal (Z) de 350 μ m e longitudinal (X) de 16 mm, velocidade de medição de até 0,75 mm/s, velocidade de retorno de 1 mm/s. O medidor é auxiliado por um computador e pelo software *USB communication tool* também da Mitutoyo®. Foi considerado um *cut-off* de 0,25 mm para as medições de rugosidade. A Figura 4 ilustra o set up experimental e as posições das medições de rugosidade.

Para a realização das medições foram considerados 2 operadores, cada um realizando três medições. Realizadas em três posições radiais equidistantes de 120° e três posições no sentido da altura medida no furo de 4 mm cada uma e com espaçamento entre as posições de 0,5 mm.

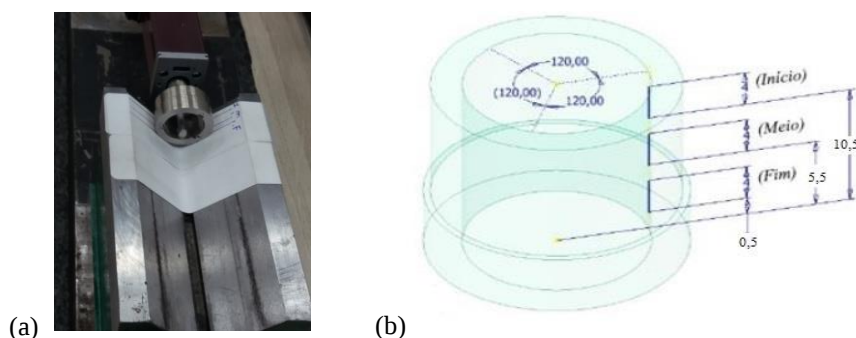


Figura 2. (a) Setup de medição; (b) Posições de medição dos corpos de prova

A metodologia de superfície de resposta sugere a construção de um parâmetro para a resposta esperada, tendo como primeira etapa encontrar uma aproximação adequada para a relação verdadeira entre resposta de interesse e variáveis do processo e restrições operacionais consideradas no planejamento experimental (Castilho 2007). Foram obtidos os modelos de superfície de resposta para a resposta de interesse Ra em função dos parâmetros do fresamento helicoidal.

Após os ensaios experimentais e medições foram utilizados métodos de regressão e inferência estatística, como o método dos mínimos quadrados ordinários, mínimos quadrados ponderados e teste t para modelagem e teste de significância dos efeitos das variáveis avaliadas na resposta de interesse, no caso a rugosidade média (Ra). Além disso o nível de significância (α) adotado foi de 0,05.

Todas as análises estatísticas foram conduzidas no software livre R (R CORE TEAM, 2020), sendo utilizados os pacotes: *rsm* (Lenth, 2009), para superfície de resposta; *olsrr* (Hebbali, 2020), para teste de homoscedasticidade; *ggplot2* (Wickham, 2016), para os gráficos de efeitos principais e de interações.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A rugosidade superficial Ra foi avaliada a partir da rugosidade medida na direção axial da superfície dos furos. Os valores das respostas de rugosidade média Ra variaram entre 0,1420 e 0,2838 μ m. Pode-se verificar que os níveis mais

baixos obtidos são equivalentes aos de superfícies acabadas por retificação. A Tabela 2 apresenta os resultados experimentais da rugosidade média Ra obtidos a partir do planejamento composto central considerando as variáveis de processo avanço axial (f_{za}), avanço tangencial (f_{zt}) e a velocidade do corte (v_c) e as variáveis de ruído, comprimento em balanço da fresa (l_{to}), altura do furo (l_b) e vazão do fluido de corte (Q) para o total de 53 experimentos.

Tabela 2. Matriz experimental com resposta de rugosidade (Ra)

Ordem de execução	Ordem Padrão	Variáveis de controle			Variáveis de ruído			Ra [μm]
		f_{za} [-]	f_{zt} [-]	v_c [-]	l_{to} [-]	l_b [-]	Q [-]	
9	1	0,1	0,1	35	27	-1	-1	0,1632
5	2	0,2	0,1	35	27	-1	1	0,2333
11	3	0,1	0,2	35	27	-1	1	0,2415
3	4	0,2	0,2	35	27	-1	-1	0,218
6	5	0,1	0,1	65	27	-1	1	0,1928
16	6	0,2	0,1	65	27	-1	-1	0,1855
8	7	0,1	0,2	65	27	-1	-1	0,2037
1	8	0,2	0,2	65	27	-1	1	0,2495
28	9	0,1	0,1	35	31	-1	1	0,2013
52	10	0,2	0,1	35	31	-1	-1	0,1460
20	11	0,1	0,2	35	31	-1	-1	0,2427
26	12	0,2	0,2	35	31	-1	1	0,2838
19	13	0,1	0,1	65	31	-1	-1	0,1930
15	14	0,2	0,1	65	31	-1	1	0,2048
51	15	0,1	0,2	65	31	-1	1	0,2367
22	16	0,2	0,2	65	31	-1	-1	0,2362
29	17	0,1	0,1	35	27	1	1	0,1420
32	18	0,2	0,1	35	27	1	-1	0,1473
24	19	0,1	0,2	35	27	1	-1	0,2077
12	20	0,2	0,2	35	27	1	1	0,2202
2	21	0,1	0,1	65	27	1	-1	0,1940
34	22	0,2	0,1	65	27	1	1	0,1723
31	23	0,1	0,2	65	27	1	1	0,1640
14	24	0,2	0,2	65	27	1	-1	0,2112
46	25	0,1	0,1	35	31	1	-1	0,1810
10	26	0,2	0,1	35	31	1	1	0,1838
17	27	0,1	0,2	35	31	1	1	0,2358
47	28	0,2	0,2	35	31	1	-1	0,2638
23	29	0,1	0,1	65	31	1	1	0,181
13	30	0,2	0,1	65	31	1	-1	0,1678
33	31	0,1	0,2	65	31	1	-1	0,2425
36	32	0,2	0,2	65	31	1	1	0,1943
45	33	0,031079	0,15	50	29	0	0	0,1497
50	34	0,268921	0,15	50	29	0	0	0,1750
18	35	0,15	0,031079	50	29	0	0	0,0982
30	36	0,15	0,268921	50	29	0	0	0,1993
35	37	0,15	0,15	14,32379	29	0	0	0,2572
7	38	0,15	0,15	85,67621	29	0	0	0,2107
4	45	0,15	0,15	50	29	0	0	0,1598
27	46	0,15	0,15	50	29	0	0	0,1290
38	47	0,15	0,15	50	29	0	0	0,1415
25	48	0,15	0,15	50	29	0	0	0,1475
48	49	0,15	0,15	50	29	0	0	0,1747
53	50	0,15	0,15	50	29	0	0	0,1670
37	51	0,15	0,15	50	29	0	0	0,1465
49	52	0,15	0,15	50	29	0	0	0,1578
21	53	0,15	0,15	50	29	0	0	0,1383

Através do teste de homocedasticidade de Breush-Pagan permitiu-se verificar se a variância dos erros dos modelos de regressão depende dos valores das variáveis independentes. Neste caso os dados são heterocedásticos, realizou-se então a modelagem através dos mínimos quadrados ponderados (*weighted least squares* – WLS) na qual os resultados que apresentam erros maiores são menos considerados no modelo. A Tabela 3 apresenta a análise dos resultados obtidos e o teste t, sendo que x1 é fza, x2 é fzt, x3 é vc, z1 é lto, z2 é lb e z3 é Q.

Tabela 3. Teste t para os coeficientes do modelo de rugosidade

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	0,168871	0,002924	57,756	< 2e-16
x1	0,002374	0,002042	1,163	0,255965
x2	0,020807	0,001897	10,966	4,83e-11
x3	-0,003603	0,001883	-1,913	0,067263
z1	0,008379	0,002009	4,171	0,000319
z2	-0,009706	0,003430	-2,830	0,009047
z3	0,004964	0,003467	1,432	0,164598
I(x1^2)	0,005448	0,003953	1,378	0,180340
I(x2^2)	0,002736	0,003950	0,693	0,494882
I(x3^2)	0,017270	0,003407	5,069	3,12e-05
x1:x2	0,003694	0,003548	1,041	0,307838
x1:x3	-0,002577	0,003350	-0,769	0,448968
x1:z1	-0,004110	0,003442	-1,194	0,243710
x1:z2	-0,003913	0,003383	-1,157	0,258376
x1:z3	0,004829	0,003327	1,452	0,159046
x2:x3	-0,007824	0,003357	-2,331	0,028127
x2:z1	0,006584	0,003358	1,961	0,061096
x2:z2	-0,001768	0,003464	-0,510	0,614205
x2:z3	-0,004320	0,003406	-1,268	0,216366
x3:z1	-0,002457	0,003642	-0,675	0,506102
x3:z2	-0,001107	0,003303	-0,335	0,740257
x3:z3	-0,007241	0,003357	-2,157	0,040808

Residual standard error: 1,213 on 25 degrees of freedom Multiple R-squared: 0,9739, Adjusted R-squared: 0,9521 F-statistic: 44,51 on 21 and 25 DF, p-value: 7.252e-15.

Pelo coeficiente de determinação ajustado R^2_{aj} , o modelo para rugosidade explica 95,21% da variabilidade dos dados. O modelo codificado de regressão que descreve Ra considerando os níveis testados é dado pela equação 1.

$$Ra = 0,1688 + 0,024x_1 + 0,021x_2 - 0,0036x_3 + 0,0084z_1 + 0,0097z_2 + 0,0049z_3 + 0,0054x_1^2 + 0,0027x_2^2 + 0,0049x_3^2 + 0,0037x_1x_2 - 0,0026x_1x_3 - 0,0041x_1z_1 - 0,0039x_1z_2 + 0,0048x_1z_3 - 0,0078x_2x_3 + 0,0066x_2z_1 - 0,0018x_2z_2 \quad (1)$$

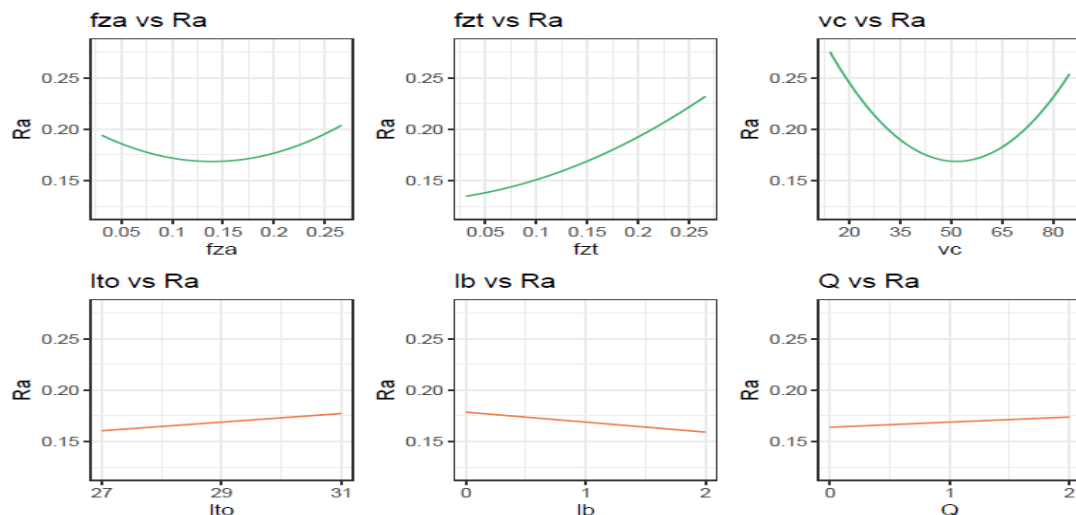


Figura 3. Gráficos de efeitos principais entre os parâmetros de controle e ruído

No que diz respeito aos efeitos lineares e considerando o nível de significância adotado $\alpha = 0,05$, observa-se que apenas fzt e vc apresentaram-se estatisticamente significativos com $p\text{-valor} < \alpha$. A Fig. 5 ilustra o efeito isolado de cada variável de controle na resposta R_a . Percebe-se que a mudança nos níveis de fza produz um efeito positivo, ou seja, aumenta a resposta R_a . Por outro lado, a mudança nos níveis de fzt produz um efeito positivo ou seja, provoca um acréscimo em R_a . Portanto o efeito de fza e fzt não podem ser justificados com base na $ap^* = \frac{fza \cdot \pi \cdot Db}{fzt}$. Nesta equação observa-se, primeiramente considerando fza constante, que há uma relação inversamente proporcional entre fzt e ap^* . Como R_a é medida na direção axial do furo, a rugosidade tende a diminuir com a redução de ap^* , redução esta que é função do aumento de fzt . No fresamento helicoidal, portanto, o maior número de voltas, que depende de um ap^* pequeno, favorece a obtenção de superfícies com rugosidades mais baixas. O mesmo raciocínio pode ser aplicado ao efeito de fza na rugosidade média, considerando fzt constante e a relação proporcional entre fza e ap^* . A variável de controle vc tem efeito negativo na resposta do ponto extremo direito até ponto central e efeito positivo a partir do ponto central de seu nível.

Considerando os efeitos quadráticos das variáveis de controle, verifica-se que apenas vc^*vc apresentou significância estatística, $p\text{-valor} < \alpha$.

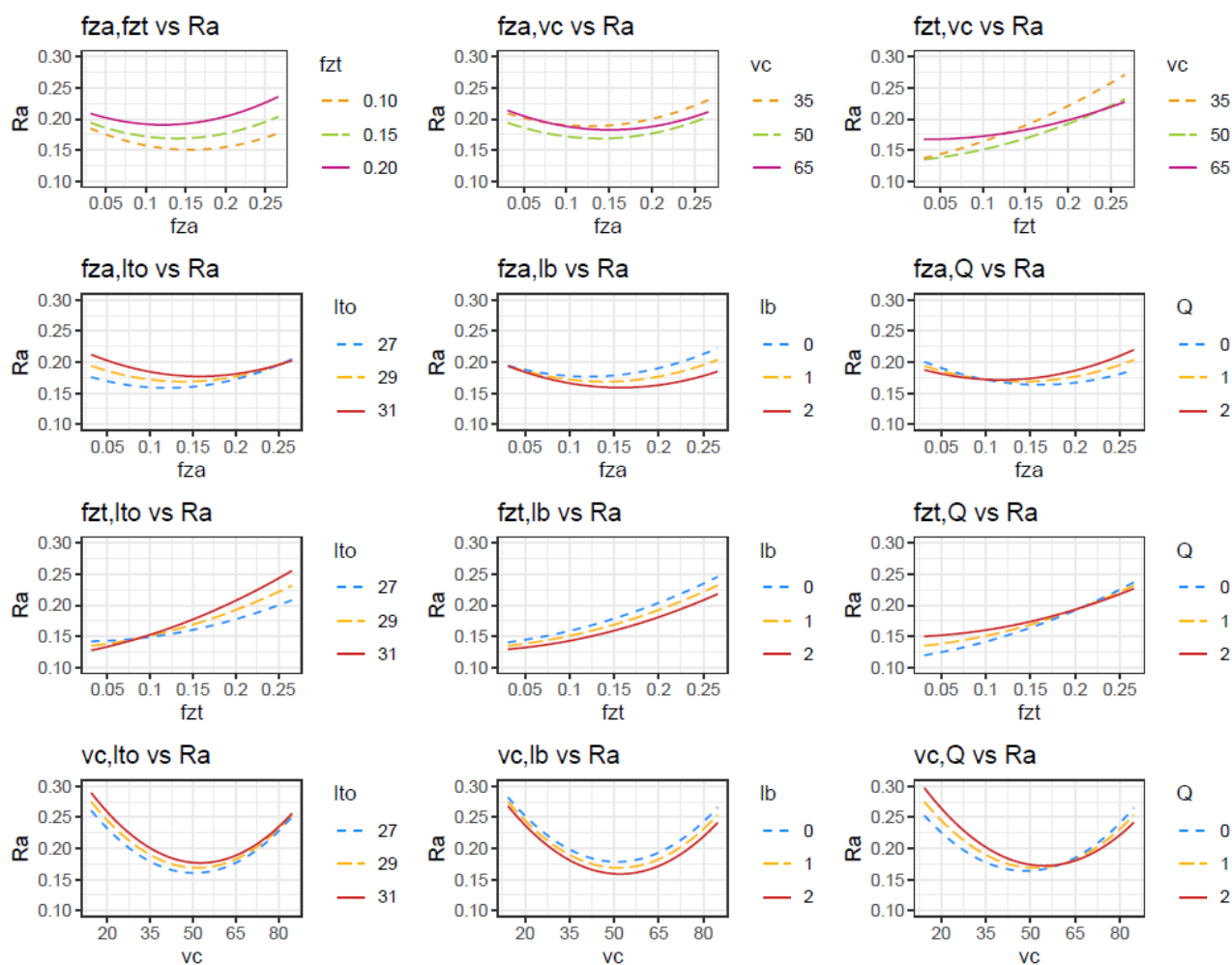


Figura 4. Gráficos de interações entre os parâmetros de controle e ruído

O comprimento de balanço da ferramenta, lto , apresentou um efeito linear positivo e a altura medida do furo, lb um efeito linear negativo no R_a . Portanto, seria difícil obter rugosidade constante em todas as profundidades usinadas, e, quanto maior for a profundidade do furo e a balanço da ferramenta, alto é o R_a . O efeito linear positivo de lto na rugosidade pode ser resultado da deflexão da ferramenta, vibrações ou instabilidade causadas pela variável de ruído no corte.

Sobre a variável de ruído lb , segundo Li & Liu (2013), o efeito da altura medida no furo na rugosidade pode ser justificado pelo alisamento da superfície pelas arestas de corte periféricas no início do furo. Resultando em rugosidades menores no início do furo que no fim do furo. No caso da vazão de fluido de corte Q , apresentou um efeito linear positivo de pequena variação, provocando pouca alteração nos valores da rugosidade R_a .

Conforme mostrado na Fig. 4, o efeito das interações $fzt*vc$, $fzt*lto$ e $vc*Q$ são significativas, o que evidencia que o efeito de uma variável de controle depende do nível das demais, não podendo ser avaliada apenas de forma isolada.

Dentre as interações geradas pelo modelo, pode-se dizer que $fzt*vc$ causam um aumento de Ra quando o avanço tangencial e a velocidade de corte atingem valores altos. Da mesma forma que $fzt*lto$ também aumentam Ra com níveis altos de comprimento em balanço e velocidade de corte. No caso da interação $vc*Q$, em valores médios de vc em torno de 50 m/min obtém-se baixas rugosidades independente da vazão de fluido de corte.

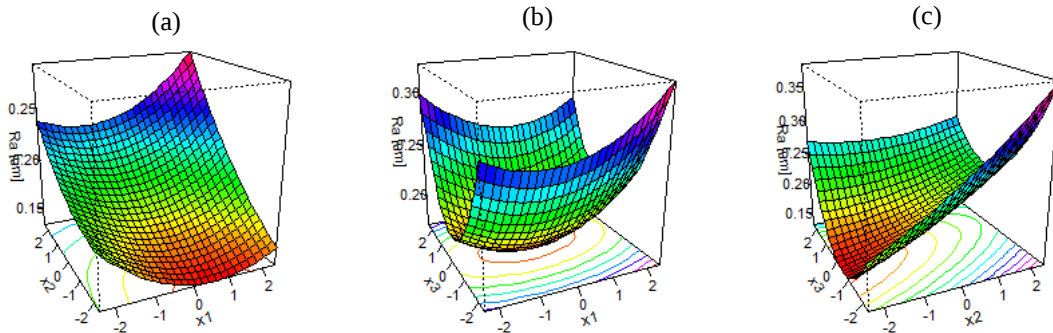


Figura 5. Gráficos de superfície de resposta do valores de rugosidade Ra

A Figura 5 apresenta as superfícies de resposta dos valores médios de rugosidade Ra , de acordo com os fatores avaliados pelo CCD. De acordo com a Fig. 5 (a), para um valor médio de fza (0,15 mm/volta) e avanço tangencial fzt na faixa de 0,27 mm/volta obtêm-se baixos valores de rugosidade Ra em torno de 0,15 µm para a Fig. 5 (b) os valores baixos de rugosidades Ra estão nas condições centrais do planejamento, isto é, fza e vc em torno de 0,15 mm/volta e 50 m/min.

Na Figura 5 (c), observa-se que os níveis menores da rugosidade Ra são obtidos com valores de fzt em torno de 0,03 mm/volta e vc num valor médio de 50 m/min.

4. CONCLUSÕES

Neste trabalho, foram conduzidos experimentos com base em um planejamento composto central (*Central Composite Design* – CCD) combinados com variáveis de controle e de ruído, de forma a viabilizar a obtenção de superfícies de segunda ordem e avaliar a qualidade do fresamento helicoidal no aço superduplex UNS S32760.

Os valores de rugosidade média Ra medidos variaram entre 0,1420 a 0,2838 µm, sendo esses valores próximos aos considerados retificados. A análise de Ra mostrou que os dados são heterocedásticos, portanto através da redução do modelo por mínimos quadrados ponderados foi obtido um coeficiente de determinação ajustado R^2_{aj} de 95,21%. Foi possível observar o efeito positivo de fza em Ra a partir do nível central e níveis menores de Ra com vc em torno de 50 m/min.

De acordo com o teste t, os fatores fzt , vc , lto e lb foram significativos. O efeito linear positivo de lto na rugosidade pode ser resultado da deflexão da ferramenta, vibrações ou instabilidade causadas pela variável de ruído no corte e o efeito linear negativo da variável de ruído lb pode ser justificado pelo alisamento da superfície pelas arestas de corte periféricas durante o processo.

5. AGRADECIMENTOS

Ao Núcleo de Otimização da Manufatura e de Tecnologia da Inovação (NOMATI) da Universidade Federal de Itajubá, campus de Itajubá, ao Centro de Inovação em Manufatura Sustentável (CIMS) da Universidade Federal de São João Del Rei, campus de São João Del Rei, CNPq, Fapemig e à Capes pelo apoio para a realização deste trabalho.

6. REFERÊNCIAS

- Bordinassi, E. C. Contribuição ao estudo da integridade superficial de um aço inoxidável superduplex após torneamento. Tese de Doutorado – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos. 201 pag. ed. eev. São Paulo, 2006.
- Box, G. E. P.; Wilson, K. B. On the Experimental Attainment of Optimum Conditions. *Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)*, v. 13, n. 1, p. 1-45, 1951.
- CASTILHO E. *Process Optimization A statistical Approach*, 1th Edition, New York, Springer Science Business Media, 2007, 480p.
- Korkut, I.; Kasap, M.; Ciftci, I.; Seker, U. Determination of optimum cutting parameters during machining of AISI 304 austenitic stainless steel. *Materials & Design*, v.25, p.303-305, 2004.

- Koyee, R. D., Heisel, U., Eisseler, R., & Schmauder, S. (2014). Modeling and optimization of turning duplex stainless steels. *Journal of Manufacturing Processes*, 16(4), 451-467.
- Li, Z.; Liu, Q. Surface topography and roughness in hole-making by helical milling. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 66, n. 9-12, p. 1415-1425, 2013.
- Liu, C.; Wang, G.; Dargusch, M. Modelling, simulation and experimental investigation of cutting forces during helical milling operations. *International Journal Advanced Manufacturing Technology*, v.63, p.839-850, 2012.
- Montgomery, D. C. Design and Analysis of Experiments. New Jersey: John Wiley & Sons, 2005. 643p.
- Oliveira, C. A. J. Torneamento do aço inoxidável super duplex UNS S32750 e influência na resistência à corrosão. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, São Paulo, 2013.
- Pereszalai, C; Geier, N. Comparative analysis of wobble milling, helical milling and conventional drilling of CFRPs. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v.106, p.3913-3930, 2020.
- Policena, M. R., Devitte, C., Fronza, G., Garcia, R.F. e Souza, A.J., 2018. "Surface Roughness Analysis in Finishing End-Milling of Duplex Stainless Steel UNS S32205". *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 98, p. 1617-1625.
- Qin, X.; Zhang, X.; Li, H.; Rong, B.; Wang, D.; Zhang, H.; Zuo, G. Comparative analyses on tool wear in helical milling of Ti-6Al-4V using diamond-coated tool and TiAlN-coated tool. *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*, v. 8, n. 1, p. 1-14, 2014.
- Sun, L.; Gao, H.; Wang, B.; Bao, Y.; Wang, M.; Ma, S. Mechanism of reduction of damage during helical milling of titanium/CFRP/aluminium stacks. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v.107, p.4741-4753, 2020.
- Wang, C.; Zhao, J; Zhou, Y. Mechanics and dynamics study of helical milling process for nickel-based superalloy. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v.106, p.2305-2316, 2019.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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

ANALYSIS OF RA ROUGHNESS IN STEEL HELICAL MILLING STAINLESS SUPER DUPLEX UNS S32760 USING RESPONSE SURFACE METHODOLOGY

José Veríssimo Ribeiro de Toledo, verissimo@unifei.edu.br¹

Thais Fernanda Sousa Pires, thaisfp@unifei.edu.br¹

Robson Bruno Dutra Pereira, robsondut@ufs.j.edu.br²

Gilbert Silva, gilbert@unifei.edu.br¹

João Roberto Ferreira, jorofe@unifei.edu.br¹

¹Federal University of Itajubá, Avenue BPS 1.303, 37.500-903 Itajubá, Minas Gerais, Brazil

²Federal University of São João Del Rei, Frei Orlando Street 170, 36.880-000 São João Del Rei, Minas Gerais, Brazil

Abstract. Superduplex stainless steels have good mechanical properties and represent a significant advance in the manufacture of materials resistant to corrosion, with application in harsh environments such as the petrochemical industry and oil and gas platforms, however they have difficult machinability. The helical milling process consists of rotating the cutter around its own axis, has greater processing efficiency and lower cost compared to conventional drilling and allows to obtain holes of different diameters with adjustment of the diameter of the helical path resulting in high levels of surface quality, precision and correction of dimensional quality. The objective of the development of this work is the modeling of the helical milling process of UNS S32760 super duplex stainless steel. The response surface methodology will be used to assess the relationship of Ra roughness behavior with the parameters cutting speed, axial feed, tangential feed, cutter length, measured hole height and cutting fluid flow. The minimum value of the Ra roughness analyzed was 0.1420 μm . From obtaining the results, it was observed that the parameters f_z , v_c , l_{to} and l_b were the factors that most influenced the roughness obtained.

Keywords: Helical milling. Super duplex stainless steel. Ra roughness. Response surface methodology.

RESPONSIBILITY NOTICE

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