

OTIMIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DE CORTE NO PROCESSO DE FRESAMENTO DE TOPO DO AÇO INOXIDÁVEL DUPLEX UNS S32205 UTILIZANDO FUNÇÃO DESIRABILITY

Harue Genghini Shibuta

Bárbara Salvador Barros da Silva

IEI-UNIFEI- Universidade Federal de Itajubá – campus Theodomiro Carneiro Santiago. Rua Irmã Ivone Drumond, 200 - Distrito Industrial II, Itabira - MG, 35903-087

harueshibuta@unifei.edu.br

barbara.sbarross@gmail.com

Gustavo Rocha de Queiroz

IEI-UNIFEI- Universidade Federal de Itajubá – campus Theodomiro Carneiro Santiago. Rua Irmã Ivone Drumond, 200 - Distrito Industrial II, Itabira - MG, 35903-087

gustavoqueiroz@unifei.edu.br

Tarcísio Gonçalves de Brito

IEI-UNIFEI- Universidade Federal de Itajubá – campus Theodomiro Carneiro Santiago. Rua Irmã Ivone Drumond, 200 - Distrito Industrial II, Itabira - MG, 35903-087

tgbrito@unifei.edu.br

Emerson José de Paiva

IEI-UNIFEI- Universidade Federal de Itajubá – campus Theodomiro Carneiro Santiago. Rua Irmã Ivone Drumond, 200 - Distrito Industrial II, Itabira - MG, 35903-087

emersonpaiva@unifei.edu.br

Carlos Henrique de Oliveira

IEI-UNIFEI- Universidade Federal de Itajubá – campus Theodomiro Carneiro Santiago. Rua Irmã Ivone Drumond, 200 - Distrito Industrial II, Itabira - MG, 35903-087

carlos.henrique@unifei.edu.br

Resumo: O fresamento é uma das operações de usinagem mais utilizadas e versáteis que resulta em superfícies plana ou complexas, dependendo da ferramenta e do material a ser usinado. Os aços inoxidáveis duplex possuem boas propriedades mecânicas e tem a característica de difícil usinabilidade. Para buscar uma melhor qualidade no acabamento da superfície usinada, o principal objetivo deste trabalho é analisar as variáveis de respostas R_a e R_t no processo de usinagem por fresamento de topo do aço inoxidável duplex UNS S32205 aplicando a Análise de Variância (ANOVA) e função desirability para a otimização das respostas. Portanto, foi utilizado o aço inoxidável duplex UNS S32205 para ser usinado com insertos de material duro revestidos (Ti, Al) N + TiN pelo processo de deposição física de vapor (Physical Vapor Deposition – PVD). Construiu-se uma matriz experimental para um fatorial com 20 experimentos utilizando o Minitab 2018, para quatro fatores e quatro center points. Os parâmetros de entrada utilizados foram a velocidade de corte (v_c), avanço (f_z), profundidade do corte (a_p) e penetração de trabalho (a_e). Após a realização dos experimentos conforme a matriz experimental, foi realizado a Análise de Variância para identificar quais variáveis mais influenciaram no processo. Para a otimização foi utilizada a função desirability para identificar a melhor combinação das variáveis de controle e respostas. Os resultados dos experimentos possibilitaram verificar que o parâmetro de maior influência nas duas variáveis de resposta foi o avanço (f_z) e a análise de variância apontou um ajuste de 98,56% na Rugosidade Média R_a e 91,29% R_t . A otimização foi eficiente para a estimativa das respostas que mais se aproxima de 1, conforme a literatura. Para a confirmação dos experimentos, os valores dos ensaios foram inseridos na máquina ferramenta e os resultados encontrados ficaram próximos dos valores otimizados. Com esses resultados é possível perceber o avanço tem efeito direto no acabamento das superfícies usinadas fresadas.

Palavras-chave: Aço Inoxidável Duplex, fresamento de topo, rugosidade, Otimização

1. INTRODUÇÃO

A usinagem é um dos processos de fabricação mais completos, e dentre todos os tipos, o fresamento é um dos processos mais importantes devido a sua alta flexibilidade e suas variadas formas de ser utilizado. Mas apesar dessas

características positivas, o fresamento é um processo que abrange diversas variáveis, o que o torna difícil de otimizado (Sandvik, 2011).

E os estudos que acercam os aços inoxidáveis duplex aumentaram nos últimos anos por conseguirem combinar as propriedades mecânicas e o custo-benefício para as indústrias e são amplamente utilizados na área de petróleo e tratamento químico. Esses aços possuem ótimas propriedades mecânicas, alta resistência à oxidação e a corrosão, mas tem a sua usinabilidade dificultada devido o alto teor de elementos de liga, o que desgasta as ferramentas e reduz a qualidade do acabamento superficial das peças produzidas (Raymundo et al., 2014, Policena et al., 2018).

Sai et al. (2001), com os estudos da rugosidade da superfície dos aços inoxidáveis, em especial do UNS S32550, no processo de fresamento, descobriram que os altos valores de velocidade de corte e taxas de avanço menores a qualidade da superfície usinada melhorava. E que durante o fresamento o acabamento da superfície é obtido a superposição de superfícies onduladas, resultado da passagem do gume da ferramenta de corte e devido aos esforços de corte removido pela passada seguinte., removendo uma porção de cavaco, e deixando a ondulação da superfície (Lucas et al., 2022). Segundo Brito (2012) a rugosidade é um dos fatores mais importantes para avaliar a qualidade da superfície que foi usinada porque influencia diretamente em características como a compatibilidade e o atrito entre a ferramenta e a peça.

Para a realização das análises das respostas utilizou-se o ANOVA (Análise de Variância), que segundo Stahle e Wold (1989), é um dos métodos estatísticos mais utilizados para avaliar o efeito de diversos fatores (velocidade de corte (vc), avanço por dente (fz), profundidade de corte (ap) e penetração de trabalho (ae)) e algumas respostas (rugosidade Ra e Rt). Esse processo permite o melhor ajuste do modelo e reduzindo a influência da variabilidade dos fatores sobre as variáveis de resposta e por isso é utilizado na análise dos parâmetros nos processos de usinagem (Sai et al., 2001).

E para a otimização dos parâmetros do fresamento, o método *desirability* atende os requisitos e o objetivo esperado para a pesquisa, pois, segundo Van Gyseghen et al. (2004) esse é um método de multicritérios que avalia um conjunto de respostas ao mesmo tempo, permitindo determinar as condições ideais para os parâmetros que estão sendo estudados. De acordo com Han (2015), esse método de otimização tem sido muito utilizado nas indústrias por ser flexível e simples.

Essa pesquisa tem como objetivo a análise das rugosidades Ra e Rt no fresamento de topo do aço inoxidável duplex UNS S32205 e determinar os parâmetros que mais influenciam no processo, a partir da análise de variância (ANOVA). E a otimização dos parâmetros de velocidade de corte (vc), avanço por dente (fz), profundidade de corte (ap) e penetração de trabalho (ae) pelo método *desirability*.

3. FUNÇÃO DESIRABILITY

O método *desirability* é a otimização para múltiplas respostas e que facilita para a obtenção de resultados ótimos do processo. Consistem em converter as respostas em funções individuais (d) que, juntas, geram a função global (D). Com a relação das respostas e variáveis independentes, as respostas se transformam para que fiquem no intervalo de $[0, 1]$, e vai aumentando conforme a aproximação dos limites propostos (Harrington, 1965, e Derringer e Suich, 1980).

A função *desirability* é modificada de acordo com o seu objetivo, que pode ser de minimização, normalização e maximização das respostas (Callado e Montgomery, 2003). Essas funções *desirability* são baseadas nas funções com o valor alvo (T) para a resposta (Y):

De minimização, Eq. (1), em que U é o maior valor aceitável para Y :

$$d = \begin{cases} 1 & \text{se } T < Y \\ \frac{U-Y}{U-T} & \text{se } T \leq Y \leq U \\ 0 & \text{se } Y > U \end{cases} \quad (1)$$

Para normalização, Eq. (2), em que U é o limite superior e L o limite inferior:

$$d = \begin{cases} 1 & \text{se } Y < L \text{ ou } Y > U \\ \frac{Y-L}{T-L} & \text{se } L \leq Y \leq T \\ \frac{U-Y}{U-T} & \text{se } T \leq Y \leq U \end{cases} \quad (2)$$

E para maximização, Eq. (3), que assim como na normalização, U é o limite superior e L o limite inferior:

$$d = \begin{cases} 1 & \text{se } Y < L \\ \frac{Y-L}{T-L} & \text{se } L \leq Y \leq T \\ 0 & \text{se } Y > T \end{cases} \quad (3)$$

Essas equações, que são baseadas no método de Derringer e Suich (1980) e esse é o modo mais popular e que, normalmente, está disponível nos softwares estatísticos. (Costa et al., 2011).

Segundo Paiva (2008), o índice global D , é a média geométrica das combinações das respostas, conforme Eq. (4):

$$D = (d_1(Y_1) \times d_2(Y_2) \times \dots \times d_k(Y_k))^{\frac{1}{k}} \quad (4)$$

Assim como para a *desirability* individual, os valores da variável D pertence ao intervalo $[0, 1]$ e que quanto mais próximo ao valor de 1, as respostas estarão próximas dos limites de especificações (Osborne et al., 1997).

O *desirability* são fáceis de entender, fáceis de usar e são flexíveis para tomar decisões, que podem ser de acordo com as prioridades das respostas. (Costa et al., 2011).

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Para a realização dos ensaios no fresamento de topo foi utilizado um centro de usinagem CNC, da marca Eurostec, com rotação de 10.000 rpm e potência de 15kW. A ferramenta utilizada foi uma fresa de topo de código R390-025A25-11M, com diâmetro (D_c) de 25 mm, ângulo de posição $K_r = 90^\circ$, haste cilíndrica, passo médio com 3 insertos e fixação mecânica por pinça. Utilizou-se insertos de metal duro R390-11 T3 08M-MM GC2030, revestidos com (Ti,Al)N + TiN pelo processo de deposição física a vapor. O material usinado foi o aço inoxidável duplex UNS S32205, com as dimensões de 115x115x170 mm e dureza de 250 HB. A composição química do aço é a apresentada conforme Tab. 1:

Tabela 1. Composição química do aço inoxidável duplex UNS S32205 (% em peso) (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

Para cada ensaio foi utilizado uma aresta nova, seguindo o planejamento experimental, para cada linha dos experimentos com parâmetros de corte diferentes.

O processo de usinagem foi realizado sem fluido de corte e com os seguintes parâmetros, conforme Tab. 2:

Tabela 2. Parâmetros utilizados no processo de fresamento (Autoria própria)

Fator	Nível (-)	Nível (+)
Velocidade de corte (v_c) [m/min]	60	90
Avanço por dente (f_z) [mm/dente]	0,10	0,16
Profundidade de corte (a_p) [mm]	1,00	1,50
Penetração de trabalho (a_e) [mm]	15,00	18,00

A partir do momento que a ferramenta entra em contato com a superfície usinada, começa a perder vida (desgastes). As medidas das rugosidades foram realizadas no meio e nas duas extremidades de cada experimento, em seguida calculou-se as médias. Para a medição das respostas de rugosidades R_a e R_t foi utilizado um rugosímetro portátil Mitutoyo Surf test 201 e com parâmetro de cut-off ajustado para 0,8 mm, e os valores obtidos estão conforme Tab. 3:

Tabela 3. Dados experimentais e valores de rugosidade (Autoria própria)

	v_c [m/min]	f_z [mm/dente]	a_p [mm]	a_e [mm]	R_a [μm]	R_t [μm]
1	60	0,10	1,00	15,00	0,550	4,310
2	90	0,10	1,00	15,00	0,372	2,910
3	60	0,16	1,00	15,00	0,691	3,970
4	90	0,10	1,00	15,00	0,801	5,233
5	60	0,10	1,50	15,00	0,612	4,013
6	90	0,10	1,50	15,00	0,551	3,201
7	60	0,16	1,50	15,00	0,733	4,874
8	90	0,16	1,50	15,00	0,866	4,733
9	60	0,10	1,00	18,00	0,612	4,013
10	90	0,10	1,00	18,00	0,411	2,773
11	60	0,16	1,00	18,00	0,333	4,274
12	90	0,16	1,00	18,00	0,816	5,023
13	60	0,10	1,50	18,00	0,628	4,217
14	90	0,10	1,50	18,00	0,360	2,651
15	60	0,16	1,50	18,00	0,749	4,112
16	90	0,16	1,50	18,00	0,899	4,882
17	75	0,13	1,25	16,50	0,647	3,845
18	75	0,13	1,25	16,50	0,626	3,626
19	75	0,13	1,25	16,50	0,674	3,927
20	75	0,13	1,25	16,50	0,645	3,442

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Modelagem das respostas

O experimento no MINITAB® foi feito com uma matriz experimental para um fatorial com 20 experimentos, quatro fatores e quatro center points (CtPt). Com os resultados experimentais obtidos na Tab.3 foi estabelecido relações matemáticas, criando, assim, a modelagem das respostas conforme equações (5) e (6) em função dos quatro parâmetros de entrada.

$$R_a = -17,62 + 0,1082v_c + 215,5f_z + 8,61a_p + 1,344a_e - 1,792v_c f_z - 0,00988v_c a_e - 121,80f_z a_e - 15,22f_z a_e - 0,635a_p a_e + 0,852v_c f_z a_p + 0,137v_c f_z a_e + 0,00229v_c a_p a_e + 8,49f_z a_p a_e - 0,0637v_c f_z a_p a_e + 0,0241CtPt \quad (5)$$

$$R_t = 182,9 - 2,263v_c - 1465f_z - 147,2a_p - 9,75a_e + 18,46v_c f_z + 1,858v_c a_p + 0,1206v_c a_e + 79,90f_z a_e + 8,47a_p a_e - 15,14v_c f_z a_p - 0,986v_c f_z a_e - 0,1066v_c a_p a_e - 69,20f_z a_p a_e + 0,863v_c f_z a_p a_e - 0,364CtPt \quad (6)$$

Onde:

R_a – rugosidade média

R_t – rugosidade total

v_c – velocidade de corte

f_z – avanço por dente

a_p – profundidade de corte

a_e – penetração de trabalho

CtPt – center points

A investigação dos parâmetros significativos que influenciam a rugosidade R_a e R_t foi verificada pela ANOVA utilizando o software MINITAB®, conforme Tabs. 4 e 5. O modelo obtido influencia na resposta avaliada, ou seja, conforme equação de regressão pode ser utilizada para prever os valores. O modelo desenvolvido apresentou R^2 (adj) de

99,77% e 98,56% respectivamente. Isto significa que a proporção da variabilidade da rugosidade é bem explicada pelos parâmetros utilizados no processo de fresamento de topo do aço.

Tabela 4. Análise da variância para a rugosidade R_a (Autoria própria)

Termo	G.I.	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	F-Value	P-Value
<i>Ra</i>	16	0,510548	0,031909	82,22	0,002
<i>Erro</i>	3	0,0197004	0,000388		
<i>Total</i>	19	0,511712			

Tabela 5. Análise da variância para a rugosidade R_t (Autoria própria)

Termo	G.I.	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	F-Value	P-Value
<i>Rt</i>	16	10,341616	0,64635	13,45	0,027
<i>Erro</i>	3	0,1442	0,04806		
<i>Total</i>	19	10,4858			

Em relação aos parâmetros e suas interações, todas as que exercem influência significativa na rugosidade são apresentadas em negritos (Tabs. 6 e 7). Os parâmetros de processo e o modelo matemático são significativos, pois apresentaram o *P-Value* menor que o nível de significância de 5%.

Tabela 6. Análise da variância para a rugosidade R_a (Autoria própria)

Termo	G.I.	SQ Aju.	QM Aju.	F-Value	P-Value
Modelo	16	0,510548	0,031909	82,22	0,002
Linear	4	0,252126	0,063032	162,41	0,001
v_c	1	0,001766	0,001766	4,5	0,123
f_z	1	0,200682	0,200682	517,08	0,000
a_p	1	0,041219	0,041219	106,21	0,002
a_e	1	0,008459	0,008459	21,80	0,019
2- Interações	6	0,176485	0,029414	75,79	0,002
$v_c \cdot f_z$	1	0,156796	0,156796	404,00	0,000
$v_c \cdot a_p$	1	0,004222	0,004222	10,88	0,046
$v_c \cdot a_e$	1	0,001602	0,001602	4,13	0,135
$f_z \cdot a_p$	1	0,009995	0,009995	25,75	0,015
$f_z \cdot a_e$	1	0,003028	0,003028	7,80	0,068
$a_p \cdot a_e$	1	0,000842	0,000842	2,17	0,237
3- Interações	4	0,078221	0,019555	50,39	0,004
$v_c \cdot f_z \cdot a_p$	1	0,008105	0,008105	20,88	0,020
$v_c \cdot f_z \cdot a_e$	1	0,024017	0,024017	61,88	0,004
$v_c \cdot a_p \cdot a_e$	1	0,018218	0,018218	46,94	0,006
$f_z \cdot a_p \cdot a_e$	1	0,027881	0,027881	71,84	0,003
4- Interações	1	0,001851	0,001851	4,77	0,117
$v_c \cdot f_z \cdot a_p \cdot a_e$	1	0,001851	0,001851	4,77	0,117
<i>Curvatura</i>	1	0,001865	0,001865	4,80	0,116
<i>Erro</i>	3	0,000388	0,000388		
<i>Total</i>	19	0,511712			

$S = 0,0197004$ $R^2 = 99,77\%$ $R^2 (adj) = 98,56\%$

Tabela 7. Análise da variância para a rugosidade R_t (Autoria própria)

Termo	G.I.	SQ Aju.	QM Aju.	F-Value	P-Value
Modelo	16	10,3416	0,64635	13,45	0,027
Linear	4	5,5280	1,38200	28,75	0,010
v_c	1	0,3561	0,35611	7,41	0,072
f_z	1	5,0659	5,06588	105,40	0,002
a_p	1	0,0022	0,00219	0,05	0,845
a_e	1	0,1038	0,10385	2,16	0,238
2- Interações	6	3,7654	0,62757	13,06	0,030
$v_c \cdot f_z$	1	3,6567	3,65670	76,08	0,003
$v_c \cdot a_p$	1	0,0771	0,07715	1,61	0,295
$v_c \cdot a_e$	1	0,0022	0,00219	0,05	0,845
$f_z \cdot a_p$	1	0,0001	0,00008	0,00	0,971
$f_z \cdot a_e$	1	0,0046	0,00459	0,10	0,778
$a_p \cdot a_e$	1	0,0247	0,02473	0,51	0,525
3- Interações	4	0,2859	0,07147	1,49	0,388
$v_c \cdot f_z \cdot a_p$	1	0,1671	0,16708	3,48	0,159
$v_c \cdot f_z \cdot a_e$	1	0,0626	0,06263	1,30	0,337
$v_c \cdot a_p \cdot a_e$	1	0,0157	0,01569	0,33	0,608
$f_z \cdot a_p \cdot a_e$	1	0,0405	0,04050	0,84	0,426
4- Interações	1	0,3390	0,33902	7,05	0,007
$v_c \cdot f_z \cdot a_p \cdot a_e$	1	0,3390	0,33902	7,05	0,007
<i>Curvatura</i>	1	0,4233	0,42326	8,81	0,059
<i>Erro</i>	3	0,1442	0,04806		
<i>Total</i>	19	10,4858			

$S = 0,219237$ $R^2 = 98,62\%$ $R^2 (adj) = 91,29\%$

4.2. Análise dos resíduos do modelo e efeitos principais das variáveis de controle

Para verificar se os resíduos seguem uma distribuição normal, foi realizado o teste de normalidade de Anderson Darling, conforme Figs. 1 e 2. O *P-Value* foi 34,7%, para R_a e 57,8% para R_t , portanto é maior que o nível de significância de 5%, o que permite dizer que os resíduos são normalmente distribuídos. A média de R_a e R_t foram, respectivamente, de 0,629 μm e 4,001 μm , e o desvio padrão de 0,164 μm e 0,289 μm . Isto mostra que o modelo está bem ajustado, o que explica a variabilidade dos parâmetros de corte.

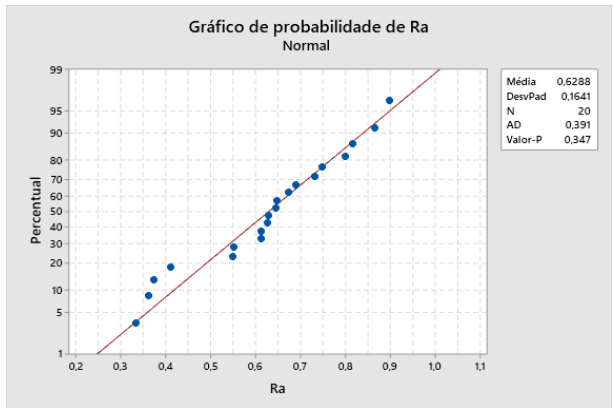


Figura 1. Teste de normalidade dos resíduos de Anderson Darling para R_a (Autoria própria)

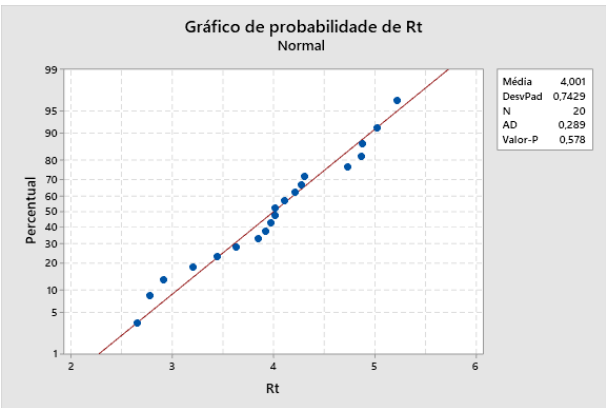


Figura 2. Teste de normalidade dos resíduos de Anderson Darling para R_t (Autoria própria)

Os Gráficos de Efeitos Principais (Figs. 3 e 4) apresentam a relevância das variáveis em relação ao impacto causado nas respostas. A inclinação das retas apresenta a relevância das variáveis, como a reta do avanço por dente (f_z) é a mais inclinada, esse é o parâmetro que tem uma maior relevância no resultado das respostas. Como o objetivo é ter valores de rugosidade mais baixos, os valores de parâmetros que apresentam um valor da rugosidade R_a mais baixo são: velocidade de corte (vc) de 60m/min, avanço por dente (f_z) de 0,30 mm/dente, profundidade de corte (ap) de 1,00 mm e penetração de trabalho (ae) de 18,00 mm. E para R_t : velocidade de corte (vc) de 75m/min, avanço por dente (f_z) de 0,10 mm/dente, profundidade de corte (ap) de 1,25 mm e penetração de trabalho (ae) de 16,50 mm.

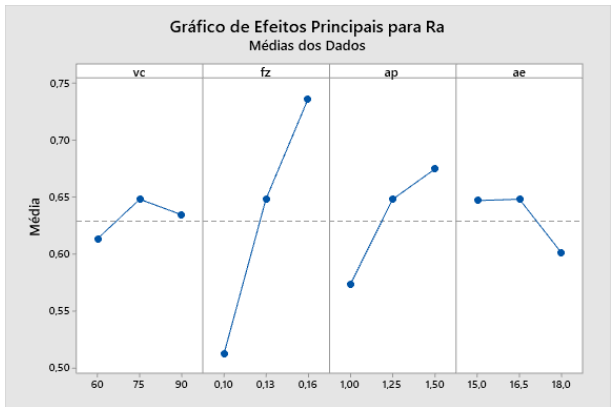


Figura 3. Gráfico de Efeitos Principais para R_a (Autoria própria)

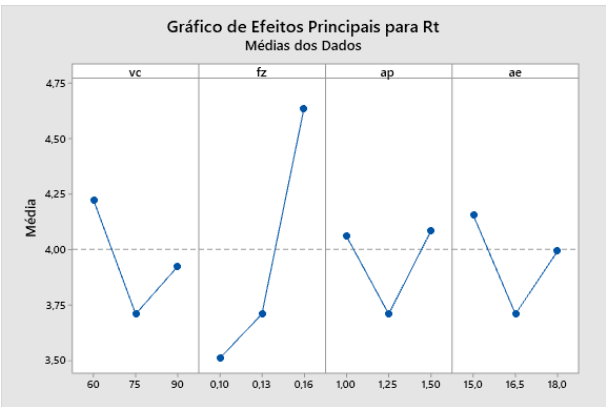


Figura 4. Gráfico de Efeitos Principais para R_t (Autoria própria)

3.3. Otimização dos parâmetros pela função *desirability*

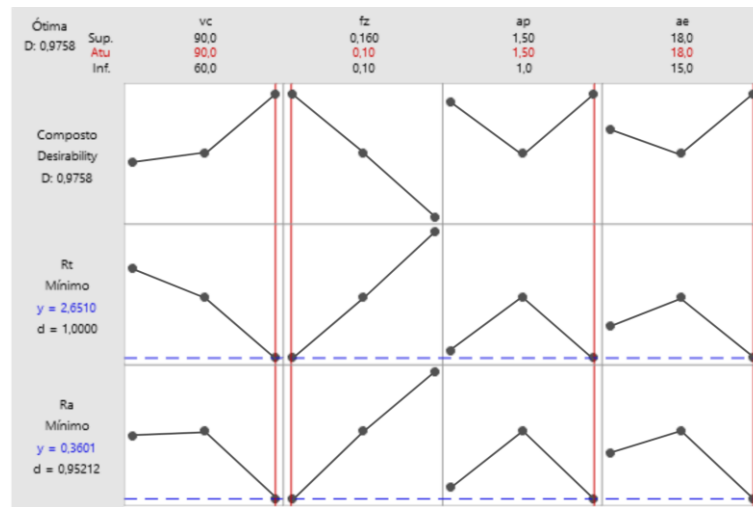
Para otimizar os parâmetros e, de fato, ver uma combinação ideal de valores para o melhor resultado de ambas as rugosidades, utilizou-se a função *desirability*. O objetivo da otimização é a minimização dos valores das respostas de rugosidade, sendo assim, a ótima combinação dos parâmetros seriam as que resultariam no menor valor de R_a e R_t .

Segundo Derringer e Suich (1980), os valores das respostas das *desirability* individual estão entre [0,1], e que podem ser classificadas conforme Tab. 8:

Tabela 8. Classificação valores *desirability* (Derringer e Suich, 1980)

Faixa de valores	Classificação
$0 \leq d_i < 0,30$	Fora da faixa adequada
$0,30 \leq d_i < 0,40$	Limite de aceitação
$0,40 \leq d_i < 0,63$	Aceitável, mas pobre
$0,63 \leq d_i < 0,80$	Adequada
$0,80 \leq d_i < 1,00$	Excelente
$d_i = 1,00$	Valor desejável

A partir da Fig. 5 é possível obter o valor da *desirability* individual de R_a (0,95) e de R_t (1,00), que correspondem, respectivamente a um valor excelente e o valor desejável dos parâmetros. Para a *desirability* global (D) utiliza os valores das *desirability* individuais, e que assim como a individual, fica com valores entre [0,1].



Na Fig. 5, o *desirability* global possui um valor de $D = 0,98$, que é classificado como um valor excelente. Os valores de “y” correspondendo aos valores preditos de R_a (0,36 μm) e R_t (2,65 μm).

4.4. Confirmação

A combinação ótima dos parâmetros que resultam na minimização dos valores das rugosidades é apresentada, conforme Tab. 9

Tabela 9. Combinação ótima dos parâmetros (Autoria própria)

	v_c [m/min]	f_z [mm/dente]	a_p [mm]	a_e [mm]
Combinação ótima	90	0,10	1,50	18,00

A confirmação foi realizada para testar os pontos de ótimo do experimento conforme Tab. 10. E pode ser observado que os valores encontrados na pratica estão dentro dos limites ótimos do *desirability*.

Tabela 10. Confirmação dos testes (Autoria própria)

	[μm]
Rugosidade R_a	0,380
	0,420
	0,340
Rugosidade R_t	2,680
	2,880
	2,610

4. CONCLUSÃO

A partir dos resultados obtidos por meio da ANOVA e do *desirability* na análise da rugosidade R_a e R_t no processo de fresamento de topo do aço inoxidável duplex UNS S32205, pode-se concluir que:

- Os parâmetros utilizados foram eficazes para realizar as análises e verificar as suas relações com as rugosidades R_a e R_t
- A modelagem das respostas obtidas pode ser utilizada para prever o valor das rugosidades devido o ajuste de 99,77% para R_a e 98,62% para R_t .
- O parâmetro que mais influencia na rugosidade é o avanço por dente (f_z), isso é comprovado pelo *P-value* das interações de f_z com os outros parâmetros e pelo gráfico de Efeitos Principais de ambas as rugosidades.

- Os valores utilizados para o experimento se aproximam da melhor combinação de parâmetros, devido o seu *desirability* global de 0,98, que é classificado como excelente, por estar próximo do valor máximo de 1,00.
- A melhor combinação dos parâmetros, visando a minimização das rugosidades foi de: v_c de 90 m/min, f_z de 0,10 mm/dente, a_p de 1,50mm e a_e de 18,00 mm.

Assim, estabelecendo o avanço por dente (f_z) como o parâmetro de maior influência na rugosidade, é importante se atentar aos valores atribuídos a ele, pois será muito importante para o valor final das rugosidades.

Para trabalhos futuros o ideal seria pesquisar acerca da otimização por meio da função *desirability* no fresamento e, também, realizar análises mais aprofundadas da influência do avanço por dente (f_z) na rugosidade e as suas combinações com os outros parâmetros e o como influenciam nas qualidades superficiais das peças usinadas.

3. AGRADECIMENTOS

À mineradora Vale S.A pelo apoio financeiro através do edital: UNIFEI/VALE S.A nº 01/2020, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), ao Grupo de Estudos em Qualidade e Produtividade (GEQProd) da Universidade Federal de Itajubá, campus de Itabira, Grupo de Pesquisa em Gestão Energética e Fabricação (InGED) campus Itabira, Fundação de Apoio ao Ensino, Pesquisa e Extensão de Itajubá (Fapepe) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes) pelo apoio para a realização deste trabalho.

4. REFERÊNCIAS

- Brito, T. G. 2012. Otimização Do Fresamento De Topo Do Aço Abnt 1045, Utilizando Projeto De Parâmetro Robusto. 125 P. Dissertação (Mestrado Em Projeto E Fabricação) – Instituto De Engenharia Mecânica, Universidade Federal De Itajubá.
- Calado, V.; Montgomery, D. C. 2003. Planejamento de experimentos usando o Statistica. 1ª ed. Rio de Janeiro: E-Papers Serviços Editoriais.
- Derringer, G., Suich, R. 1980. Simultaneous Optimization Of Several Response Variables. Journal Of Quality Technology, V 12, N 4, Pp.214-219. Gestão & Tecnologia, V. 2, N. 1.
- Lucas, E. O., Mundim, R. B., Costa, E. S., Siqueira, A. M. O. 2022. Estudo Da Topografia Superficial No Fresamento Da Liga De Alumínio 6351 T6. The Journal Of Engineering And Exact Sciences, 8(3), 14027–01e.
- Massart, D. L., Vander Heyden, Y. 2004. Selection Of Reversed-Phase Liquid Chromatographic Columns With Diverse Selectivity Towards The Potential Separation Of Impurities In Drugs”. Journal Of Chromatography A, N 1042, Pp. 69-80.
- Paiva, E. J. 2008. Otimização De Processos De Manufatura Com Múltiplas Respostas Baseada Em Índices De Capacidade. 118 P. Dissertação (Mestrado Em Engenharia De Produção)- Instituto De Engenharia De Produção, Universidade Federal De Itajubá.
- Policena, M. R., Devitte, C., Fronza, G., Garcia, R. F., Souza, A. J., 2018. Surface Roughness Analysis In Finishing End-Milling Of Duplex Stainless Steel Uns S32205. The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology.
- Raymundo, E. A. Et Al. 2014. Análises Dos Cavacos Gerados No Processo De Fresamento Do Aço Inoxidável Dúplex Uns S31803 (Saf 2205). Revista Unisal.
- Sai, W.B.; Salah, N.B.; And Lebrun, J.L. 2001. Influence Of Machining By Finishing Milling On Surface Characteristics. International Journal Of Machine Tools And Manufacture, 41(3), 443-450.
- Sandvik Coromant. 2011. Manual Técnico De Usinagem, Sandviken, Suécia.
- Stahle, L., e Wold, S. 1989. Analysis of variance (ANOVA). Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 6(4), 259–272.
- Van Gyseghem, E., Jimidar, M., Sneyers, R., Redlich, D., Verhoeven, E., Vera Candiotti, L. Et Al.. 2014. Experimental Design And Multiple Response Optimization. Using The Desirability Function In Analytical Methods Development. Talanta, V. 124, P. 123–138.

5. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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

OPTIMIZATION OF CUTTING PARAMETERS IN THE END MILLING PROCESS OF DUPLEX UNS S32205 STAINLESS STEEL USING DESIRABILITY FUNCTION

Harue Genghini Shibuta

Bárbara Salvador Barros da Silva

IEI-UNIFEI- Universidade Federal de Itajubá – *campus* Theodomiro Carneiro Santiago. Rua Irmã Ivone Drumond, 200 - Distrito Industrial II, Itabira - MG, 35903-087

harueshibuta@unifei.edu.br

barbara.sbarross@gmail.com

Gustavo Rocha de Queiroz

IEI-UNIFEI- Universidade Federal de Itajubá – *campus* Theodomiro Carneiro Santiago. Rua Irmã Ivone Drumond, 200 - Distrito Industrial II, Itabira - MG, 35903-087

gustavoqueiroz@unifei.edu.br

Tarcísio Gonçalves de Brito

IEI-UNIFEI- Universidade Federal de Itajubá – *campus* Theodomiro Carneiro Santiago. Rua Irmã Ivone Drumond, 200 - Distrito Industrial II, Itabira - MG, 35903-087

tgbrito@unifei.edu.br

Emerson José de Paiva

IEI-UNIFEI- Universidade Federal de Itajubá – *campus* Theodomiro Carneiro Santiago. Rua Irmã Ivone Drumond, 200 - Distrito Industrial II, Itabira - MG, 35903-087

emersonpaiva@unifei.edu.br

Carlos Henrique de Oliveira

IEI-UNIFEI- Universidade Federal de Itajubá – *campus* Theodomiro Carneiro Santiago. Rua Irmã Ivone Drumond, 200 - Distrito Industrial II, Itabira - MG, 35903-087

carlos.henrique@unifei.edu.br

Abstract. Milling is one of the most used and versatile machining operations those results in flat or complex surfaces, depending on the tool and material being machined. Duplex stainless steels have good mechanical properties and are difficult to machine. To seek a better quality in the finish of the machined surface, the main objective of this work is to analyze the response variables R_a and R_t in the machining process by end milling of duplex stainless steel UNS S32205 applying Analysis of Variance (ANOVA) and desirability function. for optimizing responses. Therefore, duplex stainless steel UNS S32205 was used to be machined with hard material inserts coated (Ti, Al) N + TiN by the process of physical vapor deposition (PVD). An experimental matrix was constructed for a factorial with 20 experiments using Minitab 2018, for four factors and four center points. The input parameters used were cutting speed (vc), feed (fz), depth of cut (ap) and width of cut (ae). After carrying out the experiments according to the experimental matrix, the Analysis of Variance was performed to identify which variables most influenced the process. For optimization, the desirability function was used to identify the best combination of control variables and responses. The results of the experiments made it possible to verify that the parameter with the greatest influence on the two response variables was the advance (fz) and the analysis of variance showed an adjustment of 98.56% in the Average Roughness R_a and 91.29% R_t . The optimization was efficient for the estimation of the answers that are closer to 1, according to the literature. To confirm the experiments, the test values were inserted into the machine tool and the results found were close to the optimized values. With these results, it is possible to see the feed has a direct effect on the finish of the milled machined surfaces.

Keywords: Duplex Stainless Steel, end milling, roughness, Optimization

RESPONSIBILITY NOTICE

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