

CONEM2026-2025

OTIMIZAÇÃO MULTIOBJETIVO DA RUGOSIDADE MÁXIMA R_t E DA TEMPERATURA DE CORTE NO TORNEAMENTO DO AÇO INOXIDÁVEL DUPLEX UNS S32205

Vinicius Gonçalves Pereira, d2022002@unifei.edu.br¹
Rogerio Fernandes Brito, rogbrito@unifei.edu.br¹
Tarcísio Gonçalves de Brito, tgbrito@unifei.edu.br¹
Carlos Henrique de Oliveira, carlos.henrique@unifei.edu.br¹
Ricardo Luiz Perez Teixeira, ricardo.luiiz@unifei.edu.br¹
Eduardo Miguel da Silva, eduardosilva@ufsj.edu.br²
Luiz Felipe Blachi, d2022004510@unifei.edu.br¹
Maria Luisa Couy Viana, malucouy@unifei.edu.br¹

¹Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), Rua Irmã Ivone Drumond, 200, Itabira, MG, 35903-087, Brasil.

²Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ), Campus Santo Antônio, nº 170, 36307-352, São João del-Rei, MG, Brasil.

Resumo: Este trabalho tem como objetivo investigar e otimizar simultaneamente a rugosidade máxima da superfície usinada (R_t) e a temperatura de corte no processo de torneamento do aço inoxidável duplex UNS S32205, material amplamente empregado em setores industriais de petróleo e gás, devido sua resistência mecânica, boa tenacidade e excelente resistência à corrosão. Apesar dessas propriedades, o material apresenta dificuldades de usinabilidade, exigindo controle preciso dos parâmetros de corte para garantir um bom acabamento superficial, integridade do material e maior vida útil das ferramentas de corte. Nesse contexto, o estudo busca encontrar uma melhoria no desempenho do torneamento por uma abordagem experimental e estatística rigorosa. A abordagem experimental baseou-se em um planejamento fatorial completo (2^3) com três pontos centrais, totalizando 11 ensaios, para avaliar a influência da velocidade de corte (v_c), profundidade de corte (a_p) e avanço (f). Os dados foram submetidos à Análise de Variância (ANOVA), revelando um modelo com excelente ajuste estatístico ($R^2 = 99,88\%$) e ausência de curvatura significativa no planejamento fatorial ($pvalue = 0,699$). Os resultados indicaram que o avanço foi o parâmetro de maior impacto sobre a rugosidade superficial, enquanto a profundidade de corte e as interações de ordem superior influenciaram significativamente o comportamento térmico. A análise revelou que a profundidade de corte exerceu maior influência sobre a temperatura de corte, enquanto o avanço impactou de forma significativa a rugosidade. Com base nos modelos estatísticos obtidos, realizou-se a otimização multiobjetivo por meio da função Desirability, buscando minimizar simultaneamente temperatura e rugosidade. As condições ótimas encontradas correspondem a uma velocidade de corte de 290 (m/min), profundidade de corte de 0,40 (mm) e avanço de 0,08 (mm/ver), resultando em temperatura ajustada de 98 (°C) e rugosidade máxima R_t de 4,5 (μm). Assim conclui-se que a metodologia adotada é eficiente para o controle simultâneo de variáveis críticas no torneamento de aços inoxidáveis duplex, contribuindo para a definição de parâmetros de usinagem mais eficazes e sustentáveis em aplicações industriais.

Palavras-chave: torneamento, aço inoxidável duplex UNS S32205, rugosidade máxima, temperatura de corte, otimização multiobjetivo.

1. INTRODUÇÃO

Os aços inoxidáveis duplex são amplamente utilizados nas indústrias de petróleo e gás, química e naval devido à elevada resistência mecânica, boa tenacidade e excelente resistência à corrosão localizada (Nilsson, 1992). Entre esses materiais, o aço inoxidável duplex UNS S32205 destaca-se pela microestrutura bifásica de ferrita e austenita, que proporciona elevado desempenho mecânico e resistência à corrosão sob tensão, mas também dificulta sua usinagem.

A usinagem desses materiais está associada a elevadas forças de corte, intensa geração de calor e desgaste acelerado da ferramenta, comprometendo a integridade superficial e a estabilidade do processo (Korkut e Donertas, 2007; Grzesik, 2017; Davim, 2011). Além disso, a baixa condutividade térmica favorece o aumento da temperatura na zona de corte, intensificando os mecanismos de desgaste e prejudicando a qualidade superficial (Shaw, 2005; Trent e Wright, 2000).

A rugosidade máxima (R_t) e a temperatura de corte são parâmetros críticos na avaliação da integridade superficial, influenciando desgaste, fadiga e corrosão do componente usinado (Grzesik, 2017; Shaw, 2005). Nesse contexto, métodos baseados em Planejamento de Experimentos (DOE) e Análise de Variância (ANOVA) têm sido amplamente aplicados na modelagem e otimização de processos de usinagem (Montgomery, 2017). Além disso, técnicas de otimização multiobjetivo, como a Função Desejabilidade proposta por Derringer e Suich (1980), permitem otimizar simultaneamente respostas conflitantes, como rugosidade e variáveis térmicas (Wu, 2005).

Embora existam diversos estudos sobre usinagem de aços inoxidáveis duplex, a otimização simultânea da rugosidade e da temperatura de corte ainda permanece limitada, especialmente em torneamento a seco. Dessa forma, este trabalho tem como objetivo otimizar simultaneamente a rugosidade máxima (R_t) e a temperatura de corte no torneamento do aço inoxidável duplex UNS S32205, utilizando planejamento fatorial completo 2^3 com pontos centrais, ANOVA e otimização multiobjetivo baseada na Função *Desirability*.

2. MÉTODO DA FUNÇÃO DESIRABILITY

O Método da Desejabilidade (*Desirability Method*), proposto por Harrington (1965) e posteriormente aprimorado por Derringer e Suich (1980), é amplamente utilizado na otimização simultânea de múltiplas respostas em processos de manufatura, especialmente em estudos de usinagem envolvendo respostas como rugosidade e temperatura (Korkut e Donertas, 2007; Grzesik, 2017).

O método consiste em modelar a relação entre variáveis independentes e respostas por meio de Planejamento de Experimentos (DOE) e transformar cada resposta em uma função individual de desejabilidade (d_i), variando no intervalo $0 \leq d_i \leq 1$, em que $d_i = 0$ representa condição inaceitável e $d_i = 1$ corresponde à condição ideal (Montgomery, 2017).

As condições ótimas são obtidas pela maximização da desejabilidade global (D), definida como a média geométrica das desejabilidades individuais, conforme a Eq. (1). Neste estudo, adotou-se igual importância para a rugosidade máxima (R_t) e a temperatura de corte, considerando o mesmo impacto de ambas na qualidade do processo.

$$D = ((d_1 \times Y_1) \times (d_2 \times Y_2) \times \dots \times (d_m \times Y_m))^{\frac{1}{m}} \quad (1)$$

Para problemas em que o objetivo é a minimização da resposta, como é o caso das variáveis analisadas neste trabalho, a função de desejabilidade individual é calculada pela Eq. (2), onde U é o limite superior aceitável, L é o limite inferior meta e r é o parâmetro de forma (*shape parameter*). Neste trabalho, adotou-se $r = 1$, garantindo uma transição linear para a desejabilidade individual.

$$d_i = \left(\frac{U_i - \hat{y}_i}{U_i - L_i} \right)^r \quad L_i \leq \hat{y}_i \leq U_i \quad (2)$$

Os valores de desejabilidade global (D) podem ser interpretados de acordo com a escala proposta por Derringer e Suich (1980), na qual valores entre 0,80 e 1,00 são classificados como excelentes soluções de compromisso entre respostas conflitantes, enquanto valores abaixo de 0,30 indicam que a condição operacional está fora da faixa de aceitação.

De acordo com Derringer e Suich (1980), os valores da função de desejabilidade podem ser interpretados da seguinte forma:

- $d_i = 1$ – valor desejável;
- $0,80 \leq d_i \leq 1$ – excelente custo-benefício;
- $0,63 \leq d_i \leq 0,80$ – valor adequado;
- $0,40 \leq d_i \leq 0,63$ – aceitável, mas com baixo custo-benefício;
- $0,30 \leq d_i \leq 0,40$ – valor dentro do limite de aceitação;
- $0 \leq d_i \leq 0,30$ – valor fora da faixa adequada.

Quando as respostas apresentam diferentes níveis de importância no processo de torneamento, a desejabilidade global pode ser calculada considerando pesos distintos para cada resposta, conforme a Eq. (3), na qual g_i representa o grau de importância atribuído à i -ésima resposta, e G corresponde à soma dos pesos (Derringer e Suich, 1980; Myers *et al.*, 2016).

$$D = \left[\prod_{i=1}^n d_i^{g_i}(\hat{Y}_i) \right]^{\frac{1}{G}} \quad (3)$$

Para problemas em que o objetivo é a minimização da resposta — como rugosidade superficial ou força de corte —, a função de desejabilidade aumenta à medida que o valor da resposta se aproxima do limite inferior desejado (Nilsson, 1992; Korkut e Donertas, 2007; Grzesik, 2017; Montgomery, 2017; Derringer e Suich, 1980; Wu, 2005; Myers *et al.*, 2016; Shaw, 2005).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Material e Procedimento Experimental

Os parâmetros de corte foram definidos com base nas recomendações do fabricante, em ensaios preliminares e em valores reportados na literatura (Bagaber e Yusoff, 2017; Boucherit *et al.*, 2021), visando garantir aplicabilidade prática e abranger ampla faixa operacional para identificação de condições ótimas de desempenho.

Os ensaios consistiram no torneamento externo do aço inoxidável duplex UNS S32205, com dureza de 214 HB (18 HRC), obtida a partir do certificado do fabricante. O material foi utilizado na forma de barras cilíndricas de 50,8 mm de diâmetro e 100 mm de comprimento, sendo usinados 50 mm em cada ensaio.

Segundo Kumar (2022), a composição química típica do aço inclui elevados teores de cromo, níquel, molibdênio e nitrogênio, responsáveis pela elevada resistência mecânica e à corrosão. Entretanto, a baixa condutividade térmica e a alta resistência mecânica tornam o UNS S32205 um material de difícil usinabilidade, impondo severas condições térmicas e mecânicas à ferramenta de corte.

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

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	22,20	3,14	5,62	0,19	0,02	0,05

Fonte: IMO, 2012.

Os parâmetros de usinagem desempenham um papel crítico na determinação das forças de corte, que, por sua vez, influenciam o desgaste da ferramenta e a qualidade da peça usinada. Foram avaliados velocidade de corte, avanço e profundidade de corte, definidos por meio de um planejamento fatorial completo, conforme a Tab. 2.

Tabela 2. Parâmetros do planejamento fatorial.

Fator	Nível (-)	Nível (+)
Velocidade de corte (v_c) (m/min)	190	290
Avanço (f) (mm/rev)	0,08	0,16
Profundidade de corte (a_p) (mm)	0,4	1,2

Fonte: autoria própria, 2026.

A matriz experimental foi definida a partir de um planejamento fatorial completo 2^3 , com três pontos centrais, totalizando 11 experimentos (8 pontos fatoriais e 3 pontos centrais). O planejamento foi elaborado com o *software* Minitab® 2018 para a investigação do processo de torneamento do aço inoxidável duplex UNS S32205, conduzido em condições de usinagem a seco. As respostas analisadas foram a temperatura de corte ($^{\circ}\text{C}$) e o parâmetro de rugosidade máxima R_t (μm). Para a realização dos ensaios, utilizou-se um torno CNC (Controle Numérico Computadorizado) da marca Eurotec, modelo CY-K6136/750, com potência de 14,4 (kW) e rotação máxima de 3400 (rpm). A máquina pode ser vista na Fig. 1.



Figura 1. Torno CNC Eurotec usado no processo de usinagem.

Fonte: autoria própria, 2026.

Foram utilizados insertos de metal duro revestidos Sandvik® Coromant ISO TNMG 160404-MF 2220, com revestimento CVD $\text{TiCN}+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiN}$, montados em porta-ferramenta ISO DTJNR 2020K 16, responsável pelos ângulos de posição principal (93°), inclinação (-6°) e saída (-6°).

A temperatura de corte foi medida por termopares tipo K calibrados, soldados na superfície secundária de folga do inserto a 3 mm da ponta de corte, utilizando descarga capacitiva e aquisição de dados por módulo Agilent® 34970A, conforme Fig. 2(a-b). Os dados foram analisados por modelos de regressão obtidos do planejamento fatorial e validados por ANOVA.

A rugosidade máxima (R_t) foi medida com rugosímetro Mitutoyo® SJ-210, utilizando *cut-off* de 0,8 mm conforme a norma ISO 4288 (ISO, 1996), conforme Fig. 2(c). A matriz experimental foi composta por 11 ensaios de um planejamento fatorial completo 2^3 com três pontos centrais. As medições de R_t foram realizadas no início, centro e fim da superfície usinada, em três posições espaçadas de 120° , totalizando nove medições por ensaio. A Fig. 2(d) apresenta as temperaturas experimentais do experimento 4, correspondente à condição mais severa.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para cada condição experimental, foram realizadas medições com o objetivo de garantir a repetibilidade e a confiabilidade dos resultados. Os valores de temperatura de corte, registrados no último instante de tempo, e de rugosidade máxima (R_t) são apresentados na Tab. 3.

O coeficiente de determinação ajustado (R^2_{adj}) de 99,98% e o reduzido erro residual obtidos confirmam a precisão do planejamento fatorial completo 2^3 . A inclusão de pontos centrais e termos de interação permitiu ao modelo capturar a variabilidade das respostas com alta fidelidade. A validação experimental reitera a robustez do modelo, demonstrando que os resultados apresentam elevada capacidade preditiva e podem ser aplicados com segurança em condições industriais, descrevendo adequadamente o processo de usinagem do aço inoxidável duplex UNS S32205.



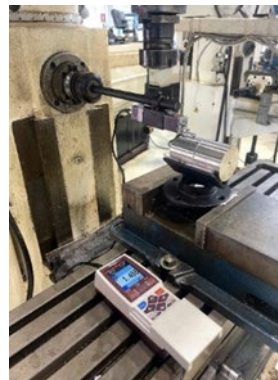
(a)

Figura 2 (a): **Detalhe do termopar soldado na superfície secundária de folga.**



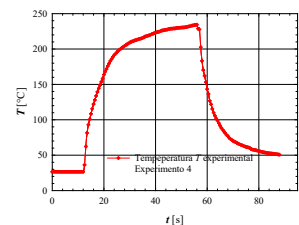
(b)

Figura 2 (b): **Montagem para aquisição dos dados de temperatura.**



(c)

Figura 2 (c): **Medição da rugosidade após o processo de usinagem.**



(d)

Figura 2 (d): **Gráfico com as temperaturas experimentais para o Experimento 4 – Caso mais severo.**

Fonte: autoria própria, 2026.

Tabela 3. Dados experimentais e valores de temperatura T (°C) e rugosidade R_t (μm).

v_c (m/min)	a_p (mm)	f (mm/rev)	T (°C)	R_t (μm)
190	0,4	0,08	115	3,8
290	0,4	0,08	98	4,5
190	1,2	0,08	184	5,9
290	1,2	0,08	234	8,0
190	0,4	0,16	123	8,2
290	0,4	0,16	102	9
190	1,2	0,16	200	10,1
290	1,2	0,16	202	11,5
240	0,8	0,12	151	8,6
240	0,8	0,12	150	8,7
240	0,8	0,12	148	8,8

Fonte: autoria própria, 2026.

A Análise de Variância (ANOVA) para a rugosidade R_t é apresentada na Tab. 4. Adotou-se um nível de significância de 5%, de modo que parâmetros e interações com valor-p superior a 0,05 não são considerados estatisticamente significativos. Os resultados indicam que o avanço (f) foi o fator de maior impacto sobre a rugosidade, seguido pela profundidade de corte (a_p) e pela velocidade de corte (v_c).

Tabela 4. Análise de Variância para rugosidade R_t (μm).

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor- F	Valor- p
Modelo	8	53,3964	6,6745	667,45	0,001
Linear	3	50,07	16,69	1669	0,001
v_c	1	3,125	3,125	312,5	0,003
a_p	1	12,5	12,5	1250	0,001
f	1	34,445	34,445	3444,5	0
Interações de 2 fatores	3	0,725	0,2417	24,17	0,04
$v_c \times a_p$	1	0,5	0,5	50	0,019
$v_c \times f$	1	0,045	0,045	4,5	0,168
$a_p \times f$	1	0,18	0,18	18	0,051
Interações de 3 fatores	1	0,08	0,08	8	0,106
$v_c \times a_p \times f$	1	0,08	0,08	8	0,106
Curvatura	1	2,5214	2,5214	252,14	0,004
Erro	2	0,02	0,01	-	-
Total	10	53,4164	-	-	-

Fonte: autoria própria, 2026.

Os termos de interação não significativos foram mantidos no modelo para preservar sua hierarquia e evitar viés na estimativa dos efeitos significativos (Montgomery, 2017; Myers *et al.*, 2016). Procedimento análogo foi aplicado à análise da temperatura de corte, revelando comportamento distinto daquele observado para a rugosidade (R_t). Conforme a Tab. 5, o parâmetro de maior influência foi a profundidade de corte (a_p), seguida pela velocidade de corte (v_c) e pelo avanço (f).

A análise de variância demonstra que, além dos fatores isolados, as interações entre velocidade de corte e avanço ($v_c \times f$), bem como a interação tripla entre os três parâmetros, apresentaram significância estatística, com valor-p inferior a 0,05. Tais interações evidenciam a complexidade do fenômeno térmico no torneamento do aço inoxidável duplex UNS S32205, conforme apresentado na Tab. 5.

Tabela 5. Análise de variância para temperatura T ($^{\circ}\text{C}$).

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor- F	Valor- p
Modelo	8	20083,0	2510,4	1075,87	0,001
Linear	3	18267,0	6089,0	2609,57	0,000
v_c	1	24,5	24,5	10,50	0,083
a_p	1	18240,5	18240,5	7817,36	0,000
f	1	2,0	2,0	0,86	0,452
Interações de 2 fatores	3	1448,5	482,8	206,93	0,005
$v_c \times a_p$	1	1012,5	1012,5	433,93	0,002
$v_c \times f$	1	338,0	338,0	144,86	0,007
$a_p \times f$	1	98,0	98,0	42,00	0,023
Interações de 3 fatores	1	242,0	242,0	103,71	0,010
$v_c \times a_p \times f$	1	242,0	242,0	103,71	0,010
Curvatura	1	125,5	125,5	53,77	0,018
Erro	2	4,7	2,3	-	-
Total	10	20087,6	-	-	-

Fonte: autoria própria, 2026.

Para validar a integridade estatística do modelo, aplicou-se o teste de normalidade de Anderson–Darling aos resíduos de R_t . A análise revelou média de 7,918 (μm) e desvio padrão de 2,311 (μm). O valor- p obtido (0,169) é superior ao nível de significância de 5%, indicando que os resíduos seguem uma distribuição normal, conforme a Fig. 3.

A Figura 4 apresenta os gráficos de efeitos principais, que demonstram a sensibilidade da rugosidade às variáveis de entrada. A relevância de cada parâmetro é evidenciada pela inclinação das retas: quanto maior a inclinação, maior o

impacto da variável na resposta. Observa-se que o avanço (f) apresenta a maior inclinação, sendo o parâmetro de maior influência no acabamento superficial, seguido pela profundidade de corte (a_p) e pela velocidade de corte (v_c).

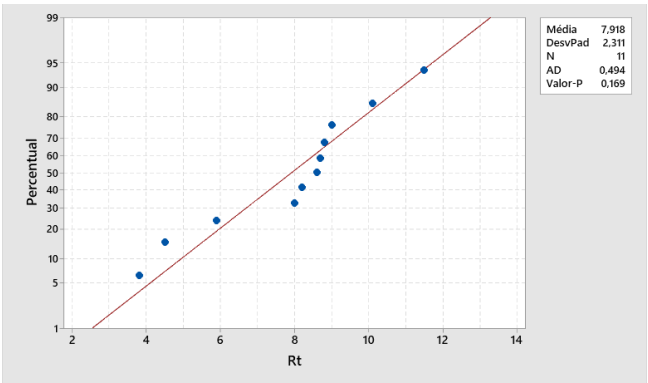


Figura 3. Teste de normalidade dos resíduos de Anderson Darling para R_t .
Fonte: autoria própria, 2026.

Dando continuidade à análise, procedeu-se ao teste de normalidade de Anderson–Darling para os resíduos da temperatura de corte, cujos resultados são apresentados no gráfico de probabilidade da Fig. 5. A distribuição apresentou média de 156,8 (°C) e desvio padrão de 44,69 (°C). O valor- p obtido (0,643) é superior ao nível de significância de 0,05, indicando que os resíduos seguem uma distribuição normal e validando o modelo estatístico para essa resposta.

No gráfico de efeitos principais para a temperatura (Fig. 6), observa-se que a variável de maior impacto é a profundidade de corte (a_p), evidenciada pela maior inclinação da reta em relação aos demais fatores. O aumento da temperatura é diretamente proporcional ao incremento dos parâmetros de corte, sendo que os maiores valores térmicos foram registrados quando a profundidade de corte atingiu o nível superior de 1,2 (mm). Esse comportamento é seguido, em ordem de influência, pela velocidade de corte (v_c) e pelo avanço (f), ambos operando em seus níveis mais elevados. Esse fenômeno decorre do maior volume de material removido por unidade de tempo, o que eleva o trabalho de deformação plástica e o atrito na interface ferramenta–cavaco.

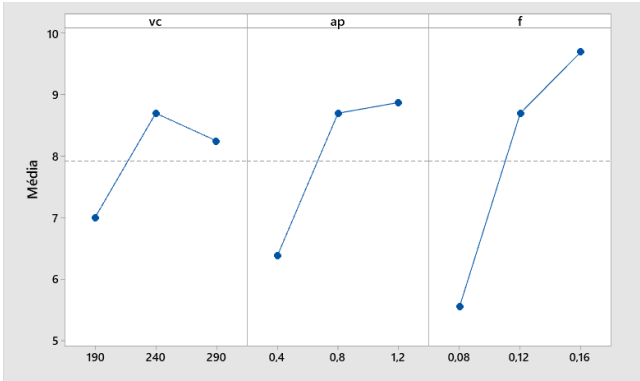


Figura 4. Efeitos Principais para R_t .
Fonte: autoria própria, 2026.

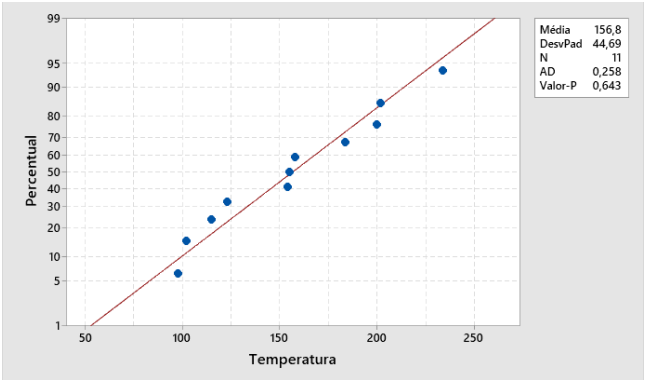


Figura 5. Teste de normalidade dos resíduos de Anderson Darling para Temperatura.

Fonte: autoria própria, 2026.

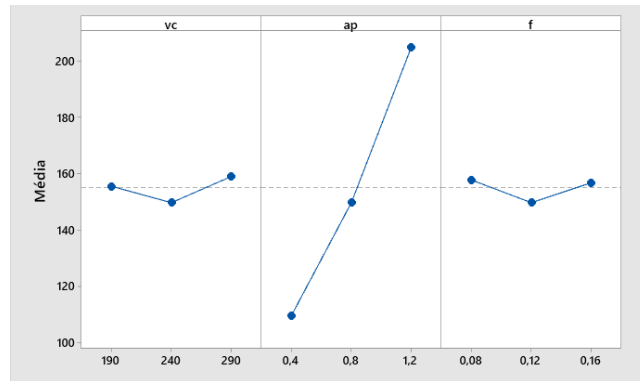


Figura 6. Efeitos Principais para temperatura.

Fonte: autoria própria, 2026.

5. MODELAGEM MATEMÁTICA

A partir dos dados experimentais do planejamento fatorial completo 2^3 , com três pontos centrais, utilizou-se o *software* Minitab® 2018 para a análise de regressão múltipla. Esse procedimento permitiu a obtenção de modelos matemáticos que descrevem o comportamento da rugosidade (R_t) e da temperatura (T) de corte em função das variáveis de entrada (v_c , a_p e f). As equações de regressão em unidades não codificadas, utilizadas para prever as respostas dentro do domínio experimental, são apresentadas a seguir:

Equação (4) – Equação de regressão em unidades não codificadas para a rugosidade (R_t):

$$R_t = -0,80 - 0,00500 \cdot v_c - 2,35 \cdot a_p + 44,38 \cdot f + 0,02750 \cdot v_c \cdot a_p + 0,0625 \cdot v_c \cdot f + 20,6 \cdot a_p \cdot f - 0,1250 \cdot v_c \cdot a_p \cdot f + 1,0750 \quad (4)$$

Equação (5) – Equação de regressão em unidades não codificadas para temperatura (T):

$$T = 206,7 - 0,6850 \cdot v_c - 187,4 \cdot a_p - 377 \cdot f + 1,3875 \cdot v_c \cdot a_p + 2,250 \cdot v_c \cdot f + 1431 \cdot a_p \cdot f - 6,875 \cdot v_c \cdot a_p \cdot f - 7,58 \quad (5)$$

6. OTIMIZAÇÃO DOS PARÂMETROS PELO MÉTODO *DESIRABILITY*

Para a determinação das condições ideais de usinagem, aplicou-se o método da função de desejabilidade (*Desirability*). O objetivo foi a minimização simultânea da rugosidade (R_t) e da temperatura de corte, por meio da combinação otimizada dos parâmetros de entrada (v_c , a_p e f), cujas predições são apresentadas na Tab. 6.

Segundo Derringer e Suich (1980), a desejabilidade individual (d_i) varia no intervalo (0, 1), no qual valores próximos à unidade indicam o atendimento das metas estabelecidas. Com base no gráfico de otimização (Fig. 7), obteve-se $d_{Rt} = 0,9091$ e $d_{Temp} = 1,0000$. Esses resultados indicam, respectivamente, desempenho excelente e o atendimento do valor-alvo para as respostas analisadas.

A desejabilidade global (D), que consolida as respostas individuais, foi calculada conforme a Eq. (3), considerando igual importância para ambas as respostas, conforme sugerido por Candiotti *et al.* (2014). O valor obtido ($D = 0,9535$) é classificado como excelente, confirmando a robustez da solução. As condições ótimas identificadas pelo modelo são apresentadas na Tab. 6.

Os valores ótimos dos parâmetros, destacados em vermelho na Fig. 7, são apresentados na Tab. 6.

Tabela 6. Combinação ótima dos parâmetros.

Variável	Configuração
v_c (m/min)	290
a_p (mm)	0,40
f (mm/rev)	0,080

Fonte: autoria própria, 2026.

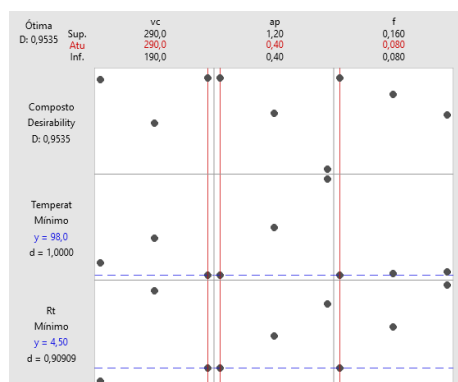


Figura 7. Otimização pelo método *Desirability*.
Fonte: autoria própria, 2026.

6.1. Ensaio de Confirmação

Após a otimização simultânea da temperatura de corte e da rugosidade máxima (R_t) pelo método da função de desejabilidade (*Desirability*), os parâmetros de corte foram fixados em seus níveis ótimos: $v_c = 290$ (m/min), $a_p = 0,40$ (mm) e $f = 0,08$ (mm/rev), resultando em uma desejabilidade global (D) de 0,95.

Nessas condições, o modelo previu uma temperatura de 98 (°C) e uma rugosidade máxima (R_t) de 4,50 (μm) (intervalo de confiança de 95%). Para validar essas previsões, foram realizados quatro ensaios experimentais, conforme a Tab. 7.

Tabela 7. Dados do ensaio de Confirmação.

Resposta	Valor predito	Média experimental	Erro relativo (%)
Temperatura T (°C)	98,0	100,2	2,24
Rugosidade R_t (μm)	4,50	4,64	2,66

Fonte: autoria própria, 2026.

7. CONCLUSÃO

O presente trabalho investigou a influência dos parâmetros de corte na rugosidade e na temperatura de corte durante o torneamento a seco do aço inoxidável duplex UNS S32205, utilizando planejamento fatorial e a função de desejabilidade (*Desirability*). As principais conclusões são:

i) A ANOVA demonstrou que o avanço (f) foi o principal fator na rugosidade máxima (R_t), enquanto a profundidade de corte (a_p) exerceu maior influência sobre a temperatura de corte, em concordância com Selvaraj *et al.* (2014), Fatima *et al.* (2022) e Senthilkumar *et al.* (2022);

ii) Os modelos de regressão apresentaram elevada fidelidade estatística ($R^2_{adj} = 99,98\%$), indicando que o planejamento fatorial completo 2^3 foi eficaz em representar a variabilidade do processo. Esse comportamento também foi observado em estudos baseados em DOE, RSM e ANOVA aplicados à usinagem de aços inoxidáveis duplex e superduplex (Gopal, 2021; Koyee *et al.*, 2014; Bagaber e Yusoff, 2017; Shareef *et al.*, 2024);

iii) A função de desejabilidade identificou uma condição ótima com desejabilidade global de 0,9535, correspondente a $v_c = 290$ m/min, $a_p = 0,40$ mm e $f = 0,080$ mm/rev, demonstrando a eficiência da otimização multiobjetivo na definição de parâmetros de corte mais adequados para o torneamento do aço inoxidável duplex UNS S32205 (Bagaber e Yusoff, 2017; Kant e Sangwan, 2014; Nguyen *et al.*, 2025; Tanikic, 2020);

iv) Os ensaios de validação experimental apresentaram baixa dispersão e resultados próximos aos preditos pelo modelo ($T = 98,0$ °C e $R_t = 4,50$ μm), dentro do intervalo de confiança de 95%, comportamento também relatado em estudos de otimização aplicados ao torneamento de aços inoxidáveis (Selvaraj *et al.*, 2014; Gopal, 2021; Fatima *et al.*, 2022; Bagaber e Yusoff, 2017).

Os resultados demonstram elevada capacidade preditiva dos modelos estatísticos, permitindo descrever de forma confiável a relação entre os parâmetros de corte e as respostas de usinagem avaliadas. Além disso, a integração entre planejamento de experimentos, modelagem estatística e otimização multiobjetivo mostrou-se uma abordagem robusta e eficaz para a otimização da usinagem do aço inoxidável duplex UNS S32205.

Do ponto de vista industrial, os parâmetros otimizados contribuem para a redução das cargas térmicas e para a melhoria da integridade superficial, favorecendo estratégias de usinagem mais eficientes e sustentáveis. Trabalhos futuros podem investigar a influência das condições ótimas de corte sobre microestrutura, tensões residuais, desgaste da ferramenta e integridade superficial do material usinado.

8. AGRADECIMENTOS

À mineradora Vale S.A., pelo apoio financeiro por meio do edital UNIFEI/VALE S.A. nº 01/2020; à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), por meio do processo nº APQ-02317-18; ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq); ao Grupo de Estudos em Qualidade e Produtividade (GEQProd) e ao Grupo de Pesquisa em Gestão Energética e Fabricação (InGED), ambos da Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), campus Itabira; à Fundação de Apoio ao Ensino, Pesquisa e Extensão de Itajubá (FAPEPE); e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo apoio à realização deste trabalho.

9. REFERÊNCIAS

- Bagaber, S.A. and Yusoff, A.R., 2017. "Multi-objective Optimization of Cutting Parameters to Minimize Power Consumption in Dry Turning of Stainless Steel 316". *Journal of Cleaner Production*, Vol. 157, pp. 30–46.
- Boucherit, S., Berkani, S., Yallese, M.A., Khettabi, R. and Mabrouki, T., 2021. "Modeling and Optimization of Cutting Parameters during Machining of Austenitic Stainless Steel AISI304 Using RSM and Desirability Approach". *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*, Vol. 65, No. 1, pp. 10–26.
- Candioti, L.V., de Zan, M.M., Câmara, M.S., Goicoechea, H.C., 2014. "Experimental design and multiple response optimization using desirability functions in analytical methods development". *Talanta*, Vol. 124, pp. 123–138.
- Davim, J.P., 2011. *Machining of Stainless Steels and Alloys*. Springer.
- Derringer, G. and Suich, R., 1980. "Simultaneous optimization of several response variables". *Journal of Quality Technology*, Vol. 12, No. 4, pp. 214–219.
- Fatima, A., Wasif, M. and Mumtaz, M.O., 2022. "Optimization of process parameters in turning of nuclear grade steel alloy (AISI-410) for sustainable manufacture". *Journal of Engineering Research*, Vol. 10, No. 2, pp. 1–10.
- Gopal, M., 2021. "Prediction of surface roughness in turning of duplex stainless steel (DSS) using response surface methodology (RSM) and artificial neural network (ANN)". *Materials Today: Proceedings*, Vol. 46, pp. 6704–6711.
- Grzesik, W., 2017. *Advanced Machining Processes of Metallic Materials*. 2nd ed. Elsevier.
- Harrington, E.C., 1965. "The desirability function". *Industrial Quality Control*, Vol. 21, No. 10, pp. 494–498.
- IMO - International Molybdenum Association, 2012. *Practical Guidelines for the Fabrication of Duplex Stainless Steels*.
- ISO, 1996. *ISO 4288: Geometrical Product Specifications (GPS) — Surface texture: Profile method — Rules and procedures for the assessment of surface texture*. International Organization for Standardization, Geneva.
- Kant, G. and Sangwan, K.S., 2014. "Prediction and optimization of machining parameters for minimizing power consumption and surface roughness in machining". *Journal of Cleaner Production*, Vol. 83, pp. 151–164.
- Korkut, I. and Donertaş, M.A., 2007. "The influence of feed rate and cutting speed on cutting forces, surface roughness and tool-chip contact length during face milling of stainless steel". *Materials & Design*, Vol. 28, pp. 308–312.
- Koyee, R.D., Eisseler, R. and Schmauder, S., 2014. "Application of Taguchi coupled Fuzzy Multi Attribute Decision Making (FMADM) for optimizing surface quality in turning austenitic and duplex stainless steels". *Measurement*, Vol. 58, pp. 375–386.
- Koyee, R.D., Heisel, U., Eisseler, R. and Schmauder, S., 2014. "Modeling and optimization of turning duplex stainless steels". *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 16, No. 4, pp. 451–467.
- Kumar, G.S. 2022. "Optimization of machining parameters for 2205 duplex stainless steel". *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 301, pp. 102745.
- Montgomery, D.C., 2017. *Design and Analysis of Experiments*. 9th ed. Wiley.
- Myers, R.H., Montgomery, D.C. and Anderson-Cook, C.M., 2016. *Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments*. 4th ed. Wiley.
- Nguyen, V.-C., Nguyen, A.-T., Pham, N.-L. and Nguyen, T.-D., 2025. "Multi-objective optimization of SUS430C steel turning process using hybrid machine learning and evolutionary algorithm approach". *Results in Engineering*, Vol. 25, pp. 104233.
- Nilsson, J.O., 1992. "Super duplex stainless steels". *Materials Science and Technology*, Vol. 8, No. 8, pp. 685–700.
- Selvaraj, D.P., Chandramohan, P. and Mohanraj, M., 2014. "Optimization of surface roughness, cutting force and tool wear of nitrogen alloyed duplex stainless steel in a dry turning process using Taguchi method". *Measurement*, Vol. 49, pp. 205–215.
- Senthilkumar, K.M., Navaneeth, V.R., Prabhu, S., Ramesh Kumar, M. and Giriraj, M., 2022. "Optimization of surface roughness during turning operation in super duplex stainless steel". *Materials Today: Proceedings*, Vol. 50, pp. 1–4.
- Shareef, I., Potluri, D.K.R. and Horton, G., 2024. "Effect of materials and process parameters on machinability of stainless steels". *Manufacturing Letters*, Vol. 41, pp. 696–707.
- Shaw, M.C., 2005. *Metal Cutting Principles*. 2nd ed. Oxford University Press.
- Tanikic, D., 2020. "Computationally intelligent optimization of metal cutting regimes". *Measurement*, Vol. 152, pp. 107358.
- Trent, E.M. and Wright, P.K., 2000. *Metal Cutting*. 4th ed. Butterworth-Heinemann.
- Wu, F.C., 2005. "Optimization of correlated multiple quality characteristics using desirability function". *Quality Engineering*, Vol. 17, No. 1, pp. 119–126.

10. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

CONEM2026-2025 MULTI-OBJECTIVE OPTIMIZATION OF MAXIMUM ROUGHNESS R_t AND CUTTING TEMPERATURE IN TURNING OF DUPLEX STAINLESS STEEL UNS S32205

Vinicius Gonçalves Pereira, d2022002@unifei.edu.br¹
Rogerio Fernandes Brito, rogbrito@unifei.edu.br¹
Tarcísio Gonçalves de Brito, tgbrito@unifei.edu.br¹
Carlos Henrique de Oliveira, carlos.henrique@unifei.edu.br¹
Ricardo Luiz Perez Teixeira, ricardo.lui@unifei.edu.br¹
Eduardo Miguel da Silva, eduardosilva@ufs.j.edu.br²
Luiz Felipe Blachi, d2022004510@unifei.edu.br¹
Maria Luisa Couy Viana, malucouy@unifei.edu.br¹

¹Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), Rua Irmã Ivone Drumond, 200, Itabira, MG, 35903-087, Brasil.

²Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ), Campus Santo Antônio, nº 170, 36307-352, São João del-Rei, MG, Brasil.

Abstract: This study aims to investigate and simultaneously optimize the maximum surface roughness (R_t) and cutting temperature during the turning process of duplex stainless steel UNS S32205, a material widely used in the oil and gas industry due to its high mechanical strength, good toughness, and excellent corrosion resistance. Despite these properties, this material exhibits poor machinability, requiring precise control of cutting parameters to ensure adequate surface finish, material integrity, and extended cutting tool life. In this context, the present study seeks to improve turning performance through a rigorous experimental and statistical approach. The experimental procedure was based on a full factorial design (2^3) with three center points, totaling 11 experimental runs, in order to evaluate the influence of cutting speed (v_c), depth of cut (a_p), and feed rate (f). The experimental data were analyzed using Analysis of Variance (ANOVA), revealing a statistical model with excellent goodness of fit ($R^2 = 99.88\%$) and no significant curvature in the factorial design (p -value = 0.699). The results indicated that feed rate was the parameter with the greatest influence on surface roughness, whereas depth of cut and higher-order interactions significantly affected the thermal behavior. The analysis also showed that depth of cut exerted the strongest influence on cutting temperature, while feed rate significantly impacted surface roughness. Based on the obtained statistical models, multi-objective optimization was performed using the Desirability function, aiming to simultaneously minimize cutting temperature and surface roughness. The optimal cutting conditions corresponded to a cutting speed of 290 m/min, depth of cut of 0.40 mm, and feed rate of 0.08 mm/rev, resulting in a predicted cutting temperature of 98 °C and a maximum surface roughness R_t of 4.5 μm . Therefore, it can be concluded that the adopted methodology is effective for the simultaneous control of critical variables in the turning of duplex stainless steels, contributing to the definition of more efficient and sustainable machining parameters for industrial applications.

Keywords: turning, duplex stainless steel UNS S32205, maximum roughness, cutting temperature, multi-objective optimization.