

CONEM2026-0418

OTIMIZAÇÃO NO TORNEAMENTO DO AÇO INOXIDÁVEL DUPLEX UNS S32205 E INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE CORTE NA RUGOSIDADE RA E TEMPERATURA DE CORTE

Vinicius Gonçalves Pereira, d2022002883@unifei.edu.br¹
Rogerio Fernandes Brito, rogbrito@unifei.edu.br¹
Carlos Henrique de Oliveira, carlos.henrique@unifei.edu.br¹
Clinton André Merlo, clintonmerlo@unifei.edu.br¹
Ricardo Luiz Perez Teixeira, ricardo.lui@unifei.edu.br¹
Ruben Alexis Miranda Carrillo, ruben.miranda@unifei.edu.br¹
Paulo Mohallem Guimarães, pauloguimaraes@unifei.edu.br¹
José Carlos de Lacerda, jlacerda@unifei.edu.br¹
Fábio Santos Nascimento, fabiosn@unifei.edu.br¹
Sandro Metrevelle Marcondes de Lima e Silva, metrevel@unifei.edu.br²
Henrique Marcio Pereira Rosa, henrique.rosa@ufv.br³
Deivyson Augusto Pereira, deivysonaugusto@unifei.edu.br¹
Antônio Marcos de Oliveira Siqueira, antonio.siqueira@ufv.br³
Carlos Eymel Campos Rodriguez, carloscampos@unifei.edu.br¹
Nayara Nunes Fonseca dos Reis, nayara.reis@unifei.edu.br¹
Júlio César Costa Campos, julio.campos@ufv.br³

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

²Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), Av. BPS, 1303, Bairro Pinheirinho, Itajubá, MG, 37500-903, Brasil.

³Universidade Federal de Viçosa (UFV), Avenida Peter Henry Rolfs, s/n, Campus Universitário, Viçosa, MG, 36570-900, Brasil.

Resumo: O torneamento de aços inoxidáveis duplex, como o UNS S32205, representa um desafio significativo para a engenharia de manufatura devido à sua elevada resistência mecânica e baixa condutividade térmica, características que favorecem a geração de calor e o desgaste prematuro da ferramenta. Neste contexto, este trabalho investiga a influência dos parâmetros de corte, velocidade de corte (v_c), avanço (f) e profundidade de corte (a_p), sobre a rugosidade média (R_a) e a temperatura de usinagem. A temperatura foi medida por meio de um termopar tipo K, instalado na face de saída da ferramenta, posicionado a aproximadamente 3 mm da aresta de corte principal, próximo ao raio de ponta. Para a condução dos experimentos, foi adotado um planejamento fatorial completo 2^3 com pontos centrais, permitindo a avaliação dos efeitos principais e das interações entre os fatores. Os dados obtidos foram analisados por meio de Análise de Variância (ANOVA) e testes de normalidade de Anderson-Darling, que confirmaram a adequação estatística dos modelos ajustados, com valores de p iguais a 0,273 para a rugosidade e 0,543 para a temperatura, ambos superiores a 0,05. Os resultados indicaram que a profundidade de corte (a_p) exerce influência significativa sobre a temperatura de usinagem, sendo responsável pelo aumento dos níveis térmicos com a elevação da seção de material removido. Em relação à rugosidade, verificou-se que o avanço (f) é o fator predominante, apresentando relação diretamente proporcional com os valores de R_a , comportamento consistente com a formação geométrica da superfície usinada. A velocidade de corte (v_c), por sua vez, apresentou comportamento não linear, com indícios de uma condição intermediária favorável à estabilidade do processo. A otimização multiobjetivo, realizada pelo método da desejabilidade, permitiu identificar uma condição operacional que equilibra qualidade superficial e desempenho térmico. A combinação ótima foi obtida com $v_c = 290$ (m/min), $f = 0,08$ (mm/rot) e $a_p = 0,40$ (mm), resultando em um valor de temperatura de 98 (°C) e rugosidade R_a de 0,586 (μ m). Os resultados demonstram que a adequada seleção dos parâmetros de corte possibilita a melhoria simultânea do acabamento superficial e do controle térmico no torneamento do aço duplex UNS S32205.

Palavras-chave: torneamento, aço inoxidável duplex UNS S32205, otimização multiobjetivo, rugosidade (R_a), temperatura de usinagem.

1. INTRODUÇÃO

O aço inoxidável duplex UNS S32205 é amplamente utilizado em ambientes corrosivos severos devido à sua microestrutura bifásica composta por frações equilibradas de austenita e ferrita. Segundo Gunn (2003), essa combinação proporciona limite de escoamento superior ao dos aços inoxidáveis austeníticos da série 300, favorecendo sua aplicação nas indústrias naval, petroquímica e de óleo e gás. Entretanto, a elevada resistência mecânica, a alta taxa de encruamento e a baixa condutividade térmica do material dificultam sua usinagem, intensificando os esforços mecânicos, a geração de calor e o desgaste da ferramenta, além de comprometer a integridade superficial da peça usinada (Krolczyk *et al.*, 2014).

Nesse contexto, o controle da rugosidade superficial e da temperatura de corte torna-se essencial para garantir a funcionalidade e a vida útil dos componentes. Whitehouse (2011) destaca que a rugosidade média R_a é um parâmetro representativo da estabilidade do processo, enquanto Shaw (2005) afirma que a textura superficial no torneamento depende não apenas da geometria da ferramenta e do avanço, mas também de instabilidades dinâmicas e da formação de gume postiço. Além disso, Trent e Wright (2000) ressaltam que o controle térmico é fundamental para evitar a precipitação de fases deletérias, como a fase sigma (σ), prejudicial ao desempenho do material. Dessa forma, a otimização isolada de uma única variável torna-se insuficiente diante da interdependência entre os parâmetros de corte e as respostas do processo.

Diversos estudos investigaram a usinagem de aços duplex e superduplex. Selvaraj *et al.* (2014) analisaram a otimização da rugosidade, força de corte e desgaste da ferramenta no torneamento a seco de aços duplex nitrogenados, identificando o avanço como o principal parâmetro sobre a rugosidade superficial. Koyee *et al.* (2014a) aplicaram técnicas Taguchi e métodos fuzzy multicritério para otimização da qualidade superficial, enquanto Koyee *et al.* (2014b) utilizaram RSM, ANOVA e redes neurais artificiais para modelar e otimizar o torneamento de aços duplex e superduplex. Emmanuel *et al.* (2021) verificaram maior influência da profundidade de corte sobre a taxa de remoção de material, enquanto Gopal (2021) empregou DOE, RSM e redes neurais artificiais para previsão da rugosidade. Posteriormente, Senthilkumar *et al.* (2022) utilizaram a metodologia Taguchi e confirmaram o avanço como principal variável associada à rugosidade superficial.

Observa-se, entretanto, que esses estudos se concentram predominantemente na análise da rugosidade superficial, desgaste da ferramenta e produtividade, sem integrar de forma sistemática a medição experimental da temperatura de corte à otimização estatística do processo. Embora métodos como Taguchi, TOPSIS, lógica fuzzy e RSM sejam amplamente empregados, ainda são limitadas as pesquisas que associam a otimização multiobjetivo baseada na função de desejabilidade à avaliação experimental da temperatura de corte durante o torneamento a seco do aço inoxidável duplex UNS S32205.

Dessa forma, o presente trabalho propõe uma investigação sistemática utilizando delineamento fatorial completo (2^3) com três pontos centrais associado ao método de otimização multiobjetivo *Desirability*. O objetivo é identificar condições de usinagem capazes de minimizar simultaneamente a rugosidade R_a e a temperatura de corte, por meio da construção de superfícies de resposta e modelos de regressão aplicados ao torneamento do aço inoxidável duplex UNS S32205.

2. MÉTODO DA FUNÇÃO *DESIRABILITY*

O método da desejabilidade (*Desirability Method*) é uma das abordagens mais utilizadas para a otimização simultânea de múltiplas respostas em processos de manufatura. Proposto inicialmente por Harrington (1965) e posteriormente expandido por Derringer e Suich (1980), o método tem sido amplamente aplicado em problemas multicritério que envolvem objetivos potencialmente conflitantes.

Na usinagem, especialmente em operações de torneamento, o método é frequentemente empregado para otimizar simultaneamente variáveis como rugosidade superficial, forças de corte, desgaste da ferramenta e temperatura de usinagem, conforme relatado por Korkut e Donertas (2007), Grzesik (2017) e Montgomery (2017). A técnica baseia-se na conversão das respostas do processo, originalmente expressas em diferentes unidades e escalas, em uma escala adimensional entre 0 e 1, permitindo a obtenção de um único índice global de desempenho (Korkut e Donertas, 2007; Grzesik, 2017).

Essa abordagem é particularmente relevante no torneamento do aço inoxidável duplex UNS S32205, cuja elevada resistência mecânica e microestrutura bifásica influenciam diretamente sua usinabilidade (Shaw, 2005; Myers *et al.*, 2016). Entretanto, Shaw (2005) resalta que o método pode apresentar limitações quando existem fortes correlações estatísticas entre as respostas avaliadas, uma vez que essas dependências nem sempre são explicitamente consideradas na otimização.

A eficiência do método depende da adequada definição das funções de desejabilidade individuais e da atribuição criteriosa dos pesos das respostas, fatores que influenciam diretamente o resultado da otimização. Além disso, a validação experimental das condições ótimas é indispensável para garantir a confiabilidade e a aplicabilidade prática dos modelos obtidos. Segundo Fernandes e Souza (2024), a otimização multiobjetivo tornou-se essencial para a sustentabilidade industrial, permitindo reduzir o consumo de energia e aumentar a eficiência produtiva sem comprometer os requisitos técnicos do processo.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Material e procedimento experimental

Os experimentos consistiram no torneamento do aço inoxidável duplex UNS S32205 sob condições controladas, utilizando barras cilíndricas de 58 (mm) de diâmetro e 100 (mm) de comprimento, com dureza média entre 250 e 290 (HV). Segundo Kumar Gupta *et al.* (2021), o aço duplex 2205 (Tab. 1) apresenta elevados teores de cromo, níquel, molibdênio e nitrogênio, elementos responsáveis pela resistência à corrosão, estabilidade microestrutural e elevada resistência mecânica. Essas características resultam em alta resistência ao corte e baixa dissipação térmica, tornando o material desafiador para operações de torneamento.

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 exercem influência direta na magnitude das forças de corte geradas durante o processo, as quais afetam significativamente tanto o desgaste da ferramenta quanto a qualidade final da superfície da peça usinada. Neste estudo, foram analisadas as variáveis velocidade de corte, avanço e profundidade de corte, definidas a partir de um planejamento fatorial completo, cujos níveis experimentais estão apresentados na Tab. 2.

Tabela 2. Parâmetros do planejamento fatorial.

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

Fonte: autoria própria, 2026.

Foi adotado um planejamento fatorial completo 2^3 com três pontos centrais, totalizando 11 ensaios experimentais. Os pontos centrais foram incluídos para avaliar a repetitividade do processo e verificar a presença de curvatura nos modelos estatísticos. Os pontos centrais foram incluídos para avaliar a repetitividade do processo e verificar a presença de curvatura nos modelos estatísticos. Além disso, os pontos centrais permitiram estimar o erro experimental e avaliar a adequação estatística dos modelos, mesmo com número reduzido de graus de liberdade residuais. A matriz experimental foi gerada no software Minitab® 2018 e aplicada ao torneamento a seco do aço inoxidável duplex UNS S32205. As variáveis de resposta analisadas foram a temperatura de usinagem ($^{\circ}\text{C}$) e a rugosidade superficial R_a (μm). Os ensaios foram realizados em um torno CNC Eurostec, modelo CY-K6136/750, apresentado na Fig. 1.



Figura 1. Torno CNC Eurostec 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 de $\text{TiCN} + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiN}$, montados em porta-ferramenta ISO DTJNR 2020K 16. Os insertos, indicados para operações de desbaste à esquerda, apresentam ângulo de aresta de corte de 93° e ângulos de inclinação e saída de -6° .

A temperatura de corte foi medida com termopares tipo K previamente calibrados, soldados na pastilha por descarga capacitiva e posicionados a 3 (mm) da ponta de corte. Os sensores foram conectados ao módulo Agilent® 34970A para aquisição dos dados térmicos, posteriormente utilizados na modelagem estatística via Metodologia de Superfície de Resposta. O arranjo experimental é apresentado na Fig. 4(a).

A rugosidade média (R_a) foi medida com rugosímetro portátil Mitutoyo SJ-210, calibrado com bloco padrão do fabricante, conforme mostrado na Fig. 4(b).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Em cada condição experimental, foram realizadas medições visando garantir a repetibilidade dos ensaios e a confiabilidade dos dados obtidos. Os resultados correspondentes à temperatura (T) e à rugosidade (R_a) encontram-se apresentados na Tab. 3.



(a)



(b)

Figura 2 (a): **Montagem para aquisição dos dados de temperatura.** Figura 2 (b): **Medição da rugosidade após o processo de usinagem.** Fonte: autoria própria, 2026.

Tabela 3. **Dados experimentais e valores de temperatura (T) e rugosidade (R_a).**

v_c (m/min)	a_p (mm)	f (mm/rot)	T (°C)	R_a (μ m)
190	0,4	0,08	115	0,396
290	0,4	0,08	98	0,586
190	1,2	0,08	184	0,537
290	1,2	0,08	234	1,524
190	0,4	0,16	123	2,215
290	0,4	0,16	102	2,207
190	1,2	0,16	200	2,339
290	1,2	0,16	202	2,067
240	0,8	0,12	151	1,283
240	0,8	0,12	150	1,221
240	0,8	0,12	148	1,150

Fonte: autoria própria, 2026.

A análise de normalidade dos resíduos no gráfico de probabilidade da temperatura (Fig. 5) confirmou distribuição normal dos erros ($P = 0,543$), validando a confiabilidade das predições. Na ANOVA da rugosidade média (R_a) (Tab. 4), o avanço (f) apresentou a maior influência sobre a textura superficial. Esse comportamento está associado ao aumento do espaçamento entre as marcas da ferramenta, elevando picos e vales da superfície usinada. Além disso, maiores avanços intensificam forças de corte, vibrações e a formação de aresta postiça de corte (BUE), prejudicando o acabamento superficial (Moganapriya *et al.*, 2018; Vijay Kumar *et al.*, 2018).

A análise de variância da temperatura de corte (Tab. 5) indicou significância estatística do modelo ($P = 0,001$), identificando a profundidade de corte (a_p) como o fator de maior influência ($F = 7817,36$). Esse comportamento também foi observado no gráfico de efeitos principais (Fig. 6), no qual o aumento de a_p de 0,4 (mm) para 1,2 (mm) elevou significativamente a temperatura. Esse efeito está associado ao aumento da área de contato e do volume de material deformado plasticamente, intensificando a geração de calor na zona de corte (Tanikic, 2020). Em aços inoxidáveis, esse fenômeno é agravado pela baixa dissipação térmica e pela usinagem a seco, favorecendo o acúmulo de calor na interface cavaco-ferramenta (Akshaya *et al.*, 2026).

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

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor- F	Valor- p
Modelo	8	5,1708	0,6463	145,93	0,0068
Linear	3	4,4251	1,4750	333,10	0,0030
v_c	1	0,1006	0,1006	22,71	0,0413
a_p	1	0,1412	0,1412	31,89	0,0299
f	1	4,1833	4,1833	944,78	0,0011
Interações de 2 fatores	3	0,4507	0,1502	33,91	0,0289
$v_c \times a_p$	1	0,0355	0,0355	8,02	0,1054
$v_c \times f$	1	0,2654	0,2654	59,91	0,0163
$a_p \times f$	1	0,1499	0,1499	33,84	0,0283
Interações de 3 fatores	1	0,1407	0,1407	31,77	0,0301
$v_c \times a_p \times f$	1	0,1407	0,1407	31,77	0,0301
Curvatura	1	0,1542	0,1542	34,82	0,0276
Erro	2	0,0089	0,0044	-	-
Total	10	5,1797	-	-	-

Fonte: autoria própria, 2026.

A significância das interações e da curvatura ($P = 0,018$) indica comportamento não linear das variáveis analisadas no torneamento do aço UNS S32205. A otimização apresentada na Fig. 7 permitiu determinar uma condição de usinagem capaz de equilibrar temperatura de corte e rugosidade superficial, obtida com $v_c = 290$ (m/min), $f = 0,08$ (mm/rot) e $a_p = 0,40$ (mm) (Tab. 6). Nessas condições, foram obtidos aproximadamente 98 ($^{\circ}\text{C}$) de temperatura e rugosidade R_a de 0,586 (μm), indicando desempenho satisfatório quanto à redução da temperatura de usinagem e ao acabamento superficial.

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	0,0009
Linear	3	18267,0	6089,0	2609,57	0,0004
v_c	1	24,5	24,5	10,50	0,0834
a_p	1	18240,5	18240,5	7817,36	0,0001
f	1	2,0	2,0	0,86	0,4522
Interações de 2 fatores	3	1448,5	482,8	206,93	0,0048
$v_c \times a_p$	1	1012,5	1012,5	433,93	0,0023
$v_c \times f$	1	338,0	338,0	144,86	0,0068
$a_p \times f$	1	98,0	98,0	42,00	0,0230
Interações de 3 fatores	1	242,0	242,0	103,71	0,0095
$v_c \times a_p \times f$	1	242,0	242,0	103,71	0,0095
Curvatura	1	125,5	125,5	53,77	0,0181
Erro	2	4,7	2,3	-	-
Total	10	20087,6	-	-	-

Fonte: autoria própria, 2026.

Figura 3 apresenta o gráfico de probabilidade normal dos valores de rugosidade média (R_a). Observa-se que os dados experimentais estão distribuídos de forma aproximadamente linear ao longo da linha de referência, indicando aderência à distribuição normal. A ausência de desvios significativos ou pontos discrepantes sugere consistência estatística dos dados dentro do domínio experimental. As estatísticas descritivas (média de 1,411 (μm) e desvio padrão de 0,7197) evidenciam uma dispersão moderada, compatível com a variabilidade esperada no processo de usinagem.

A Figura 4 apresenta o gráfico dos efeitos principais, evidenciando a influência das variáveis de corte sobre a rugosidade média (R_a). Conforme previsto pela teoria da usinagem, o avanço (f) apresentou a maior influência sobre a rugosidade superficial, com comportamento diretamente proporcional. O aumento do avanço de 0,08 (mm/rot) para 0,16 (mm/rot) elevou os valores de R_a de aproximadamente 0,76 (μm) para valores superiores a 2,2 (μm). Esse comportamento está associado à reprodução geométrica do raio de ponta da ferramenta sobre a superfície usinada.

A velocidade de corte (v_c) apresentou comportamento não linear, indicando que sua influência depende da interação com o avanço e com a profundidade de corte. Observou-se redução da rugosidade em condições intermediárias de velocidade, possivelmente associada à diminuição do gume postiço e à melhoria do mecanismo de cisalhamento do material. Entretanto, em velocidades mais elevadas, verificou-se um aumento dos valores de R_a , possivelmente relacionado à intensificação das vibrações e ao desgaste da ferramenta. Comportamento semelhante foi observado para a profundidade de corte (a_p), na qual condições intermediárias apresentaram valores de rugosidade menores em comparação aos níveis extremos avaliados.

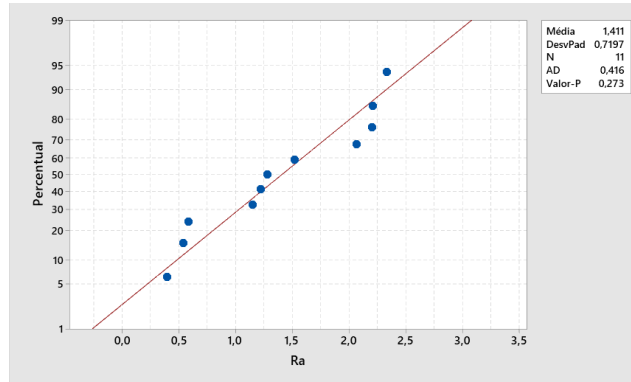


Figura 3. Teste de normalidade de Anderson Darling para R_a . Fonte: autoria própria, 2026.

Figura 5 apresenta o gráfico de probabilidade normal dos valores de temperatura de usinagem. Observa-se que os pontos experimentais estão distribuídos de forma aproximadamente linear ao longo da linha de referência, indicando boa aderência à distribuição normal. As estatísticas descritivas (média de 155,2 (°C) e desvio padrão de 44,82) revelam uma dispersão significativa, coerente com a variabilidade térmica do processo. O valor de $P = 0,543$, superior ao nível de significância de $\alpha = 0,05$, confirma a não rejeição da hipótese de normalidade, validando a consistência estatística dos dados experimentais.

O gráfico de efeitos principais da temperatura (Fig. 6) confirma a predominância da profundidade de corte (a_p) em relação às demais variáveis analisadas. O aumento da profundidade de corte de 0,4 (mm) para 1,2 (mm) resultou em elevação significativa da temperatura, elevando os valores de aproximadamente 110 (°C) para níveis superiores a 200 (°C). Esse comportamento está associado ao aumento da carga mecânica e do atrito na interface cavaco-ferramenta, o que intensifica a geração de calor durante o processo. Em contrapartida, a velocidade de corte (v_c) e o avanço (f) apresentaram variações menos pronunciadas, com tendência de redução nos níveis intermediários, sugerindo condições de usinagem mais favoráveis à dissipação térmica e à estabilidade do processo.

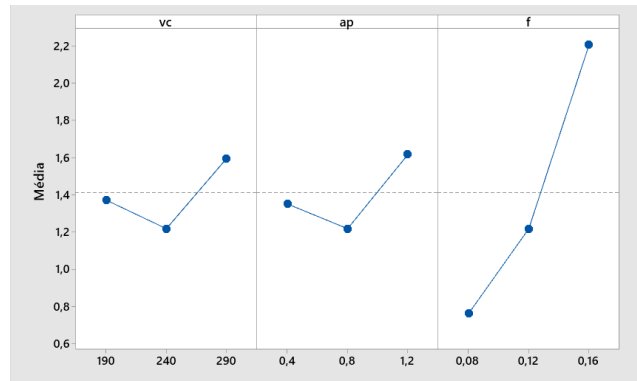


Figura 4. Efeitos Principais para R_a . Fonte: autoria própria, 2026.

5. MODELAGEM MATEMÁTICA

A partir dos resultados obtidos, utilizando a matriz experimental para o planejamento fatorial com 11 experimentos foi possível gerar modelos de regressão que representam a rugosidade média (R_a) (Eq. 1) e a temperatura (T) (Eq. 2) em função dos parâmetros de corte (v_c , a_p e f), em termos de unidades não codificadas, conforme estratégia adotada durante as análises no Minitab® 18. Os coeficientes de determinação (R^2) obtidos foram de 99,83% para a rugosidade média (R_a) e 99,98% para a temperatura de corte (T), evidenciando elevada capacidade de ajuste dos modelos de regressão aos dados experimentais. Esses resultados indicam que as equações propostas apresentam elevada confiabilidade preditiva dentro das faixas investigadas dos parâmetros de corte do processo.

$$R_a = -0,474 - 0,00541 \cdot v_c - 4,215 \cdot a_p + 14,95 \cdot f + 0,02323 \cdot v_c \cdot a_p + 0,0416 \cdot v_c \cdot f + 31,23 \cdot a_p \cdot f - 0,1658 \cdot v_c \cdot a_p \cdot f - 0,2659. \quad (1)$$

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

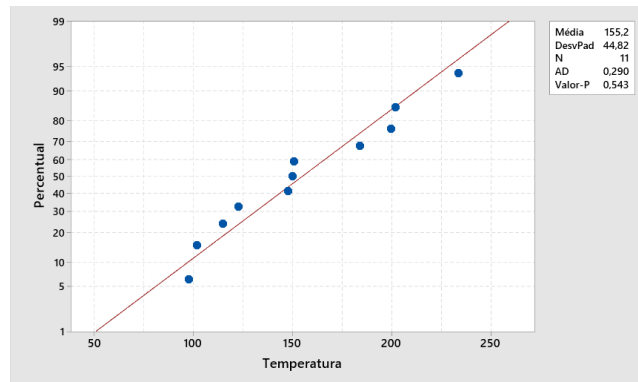


Figura 5. Teste de normalidade dos resíduos de Anderson Darling para temperatura. Fonte: autoria própria, 2026.

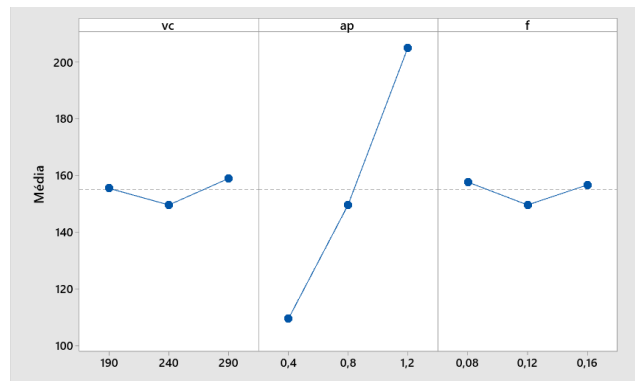


Figura 6. Efeitos principais para temperatura. Fonte: autoria própria, 2026.

6. OTIMIZAÇÃO DOS PARÂMETROS PELO MÉTODO *DESIRABILITY*

A análise de otimização pelo método da desejabilidade, apresentada na Fig. 7, demonstra que os resultados obtidos são coerentes e consistentes com o comportamento previamente observado das variáveis de processo. A condição ótima identificada corresponde à velocidade de corte de 290 (m/min), profundidade de corte de 0,40 (mm) e avanço de 0,08 (mm/rot), confirmando a tendência de utilização de elevada velocidade de corte associada a baixos valores de avanço e profundidade de corte. Nessa configuração, a temperatura de corte atinge o valor de 98 (°C), enquanto a rugosidade média (R_a) apresenta valor de 0,5860 (μm). Observa-se que ambas as respostas estão dentro das faixas desejáveis estabelecidas, indicando um compromisso adequado entre desempenho térmico e qualidade superficial. Além disso, a proximidade dos pontos experimentais em relação às linhas de referência evidenciando boa concordância entre os valores preditos e os observados, reforçando a confiabilidade do modelo.

O valor de desejabilidade global obtido ($D = 0,9498$), resultante de uma otimização multiobjetivo conduzida com pesos iguais atribuídos à rugosidade média (R_a) e à temperatura de corte (T), indica elevada adequação simultânea das respostas analisadas, evidenciando que a condição otimizada apresentou desempenho satisfatório tanto em relação à estabilidade térmica quanto ao acabamento superficial. O índice de desejabilidade varia entre 0 e 1, sendo que valores próximos de 1 indicam maior proximidade das condições ideais estabelecidas para as variáveis de resposta. Além disso, a desejabilidade individual da temperatura atingiu o valor máximo ($d = 1,0000$), indicando que essa variável foi completamente otimizada dentro dos limites definidos. Para a rugosidade média (R_a), obteve-se um valor de desejabilidade individual de $d = 0,90221$, indicando uma condição altamente satisfatória para o acabamento superficial. A combinação dessas desejabilidades individuais resultou em elevada desejabilidade composta, confirmando a eficiência do método na determinação de parâmetros de corte adequados para o torneamento do aço inoxidável duplex UNS S32205.

Ainda nessa figura é possível obter os valores ótimos dos parâmetros, em vermelho, sendo eles representados na Tab.

6.

Tabela 6. Combinação ótima dos parâmetros.

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

Fonte: autoria própria, 2026.

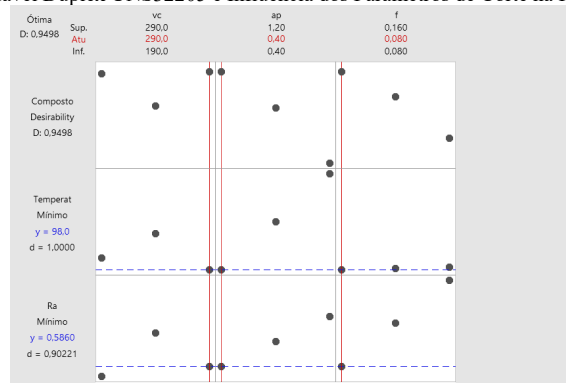


Figura 7. Otimização pelo método *Desirability*. Fonte: autoria própria, 2026.

7. CONFIRMAÇÃO

O ensaio de confirmação foi conduzido nas condições ótimas de usinagem, correspondentes a $v_c = 290$ (m/min), $f = 0,08$ (mm/rot) e $a_p = 0,40$ (mm), com o objetivo de verificar a capacidade preditiva do modelo proposto. Para a rugosidade R_a , o valor predito foi de $0,586$ (μm), enquanto a média experimental obtida a partir de quatro repetições foi de $0,568$ (μm), resultando em erro relativo de 3,16%. Para a temperatura, o modelo previu $98,0$ ($^{\circ}\text{C}$), ao passo que a média experimental foi de $97,0$ ($^{\circ}\text{C}$), correspondendo a erro relativo de 1,02%. Os resultados detalhados do ensaio de confirmação são apresentados na Tab. 7, evidenciando boa concordância entre os valores preditos e experimentais, com desvios baixos e plenamente aceitáveis, confirmando a adequação do modelo para representar o comportamento do processo nas condições investigadas.

Tabela 7. Dados do ensaio de Confirmação.

Resposta	Valor predito	Média experimental	Erro relativo (%)
Temperatura T ($^{\circ}\text{C}$)	98	97	1,02
Rugosidade R_a (μm)	0,586	0,568	3,16

Fonte: autoria própria, 2026.

8. CONCLUSÕES

Os testes estatísticos aplicados ao torneamento do aço inoxidável duplex UNS S32205 demonstraram boa concordância entre os modelos ajustados e os dados experimentais, confirmando a capacidade preditiva da modelagem proposta para as variáveis analisadas. A análise de variância (ANOVA) evidenciou que o avanço (f) exerceu maior influência sobre a rugosidade média (R_a), enquanto a profundidade de corte (a_p) foi o parâmetro predominante para a temperatura de usinagem, apresentando o maior valor da estatística F ($F = 7817,36$). O efeito da profundidade de corte sobre a temperatura está associado ao aumento da deformação plástica e do atrito na interface cavaco-ferramenta, favorecendo maior geração de calor durante o processo de corte.

A otimização multiobjetivo pelo método da desejabilidade permitiu determinar uma condição otimizada de usinagem com $v_c = 290$ (m/min), $f = 0,08$ (mm/rot) e $a_p = 0,40$ (mm). Nessas condições, foram obtidos aproximadamente 98 ($^{\circ}\text{C}$) de temperatura T e rugosidade média R_a de $0,586$ (μm), indicando equilíbrio adequado entre a redução da temperatura de usinagem e qualidade superficial. O valor de desejabilidade global ($D = 0,9498$) confirmou elevada adequação simultânea das respostas avaliadas, demonstrando a eficiência do método na definição de parâmetros de corte para o torneamento do aço duplex UNS S32205.

Os ensaios de confirmação apresentaram baixos erros relativos entre os valores experimentais e preditos, validando a confiabilidade dos modelos obtidos e da metodologia empregada. De modo geral, os resultados demonstram que a adequada seleção dos parâmetros de corte contribui diretamente para a estabilidade térmica do processo, redução da rugosidade superficial e melhoria do desempenho do torneamento a seco do aço inoxidável duplex UNS S32205.

9. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à mineradora Vale S.A. pelo apoio financeiro concedido por meio do edital UNIFEI/VALE S.A nº 01/2020. Agradecem também à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), por meio do Processo nº APQ-02317-18, intitulado “Aplicação de Técnicas de Problemas Inversos para o Estudo Térmico de Ferramentas de Usinagem de Diferentes Geometrias e Revestimentos”, registrado na UNIFEI sob nº 42/2019, cujo financiamento possibilitou a aquisição de materiais de usinagem e ferramentas de corte utilizados nesta pesquisa. Os autores agradecem ainda ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão da bolsa de iniciação científica PIBIC/CNPq ao discente Vinicius Gonçalves Pereira, vinculada ao projeto “Análise dos Efeitos dos Parâmetros de Usinagem na Temperatura da Interface de Corte em Processos de Torneamento Utilizando Técnicas de Problemas Inversos em Condução de Calor” (vigência: 01/09/2024 a 31/08/2025, Edital nº 004/2024, registro

na CPPG UNIFEI/Itabira nº 14/2019), desenvolvido na Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI) sob orientação do Prof. Dr. Rogério Fernandes Brito. Os autores agradecem também ao Laboratório de Transferência de Calor (LabTC) pelo empréstimo do equipamento Agilent® 34970^a, utilizado na aquisição dos dados térmicos, em especial ao Prof. Dr. Sandro Metrevelle Marcondes de Lima e Silva, pelo suporte técnico e científico prestado durante a execução desta pesquisa. Os autores reconhecem ainda o apoio do Grupo de Estudos em Qualidade e Produtividade (GEQProd) e do Grupo de Pesquisa em Gestão Energética e Fabricação (InGED), ambos da Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), campus Itabira, bem como da Fundação de Apoio ao Ensino, Pesquisa e Extensão de Itajubá (FAPEPE) e da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo suporte técnico, científico e institucional indispensável à realização deste trabalho.

10. REFERÊNCIAS

- Akshaya, R., Vikkash, T., Saravanamurugan, S., Thenarasu, M., Balaji, K. and Rameshkumar, K., 2026. “Sustainable control of optimized coolant quantity using an effervescent atomizer for enhanced machining performance”. *International Journal of Thermofluids*, Vol. 33, pp. 101606.
- 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.
- Derringer, G. and Suich, R., 1980. “Simultaneous optimization of several response variables.” *Journal of Quality Technology*, Vol. 12, No. 4, pp. 214–219.
- Emmanual, L., Karthikeyan, T., Sakthivel, M., Kishore, S. and Harish, K., 2021. “Optimization of machining parameters of super alloy 2205 by WC inserts”. *Materials Today: Proceedings*, Vol. 46, pp. 7681–7687.
- Farooq, M.U., Anwar, S., Ullah, R. and Guerra, R.H., 2023. “Sustainable machining of additive manufactured SS-316L underpinning low carbon manufacturing goal”. *Journal of Materials Research and Technology*, Vol. 24, pp. 2299–2318.
- 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.
- Fernandes, L.R. and Souza, A.J., 2024. “Multi-objective optimization of turning processes: a sustainability perspective.” *Journal of Cleaner Production*, Vol. 410, pp. 137–152.
- 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: Theory, Modelling and Applications*. 2nd ed., Elsevier, Amsterdam.
- Gunn, R.N., 2003. *Duplex Stainless Steels: Microstructure, Properties and Applications*. Woodhead Publishing, Cambridge.
- Harrington, E.C., 1965. “The desirability function.” *Industrial Quality Control*, Vol. 21, No. 10, pp. 494–498.
- IMOA, 2012. *Practical Guidelines for the Fabrication of Duplex Stainless Steels*. International Molybdenum Association, London.
- 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 Donertas, M.A., 2007. “The influence of feed rate and cutting speed on tool wear and surface roughness in machining of duplex stainless steel.” *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 191, pp. 59–63.
- Koyee, R.D., Eisseler, R. and Schmauder, S., 2014a. “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., 2014b. “Modeling and optimization of turning duplex stainless steels”. *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 16, No. 4, pp. 451–467.
- Krolczyk, G.M., Legutko, S. and Nieslony, P., 2014. “Influence of cutting parameters on surface roughness and tool wear during machining of duplex stainless steel.” *Measurement*, Vol. 54, pp. 129–138.
- Kumar Gupta, M., Mia, M., Jamil, M. and Singh, G., 2021. “Machinability of duplex stainless steels: A review.” *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 68, pp. 341–367.
- Moganapriya, C., Rajasekar, R., Ponappa, K., Venkatesh, R. and Jerome, S., 2018. “Influence of Coating Material and Cutting Parameters on Surface Roughness and Material Removal Rate in Turning Process Using Taguchi Method”. *Materials Today: Proceedings*, Vol. 5, No. 2, pp. 8532–8538.
- Montgomery, D.C., 2017. *Design and Analysis of Experiments*. 9th ed., Wiley, New York.
- 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, New York.
- 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.

V. G. Pereira, R. F. Brito e C. H. de Oliveira.

- Otimização no Torneamento do Aço Inoxidável Duplex UNS32205 e Influência dos Parâmetros de Corte na Rugosidade R_a e Temperatura de Corte. Shaw, M.C., 2005. *Metal Cutting Principles*. 2nd ed., Oxford University Press, New York.
- 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, Oxford.
- Vijay Kumar, M., Kiran Kumar, B.J. and Rudresha, N., 2018. "Optimization of Machining Parameters in CNC Turning of Stainless Steel (EN19) by Taguchi's Orthogonal Array Experiments". *Materials Today: Proceedings*, Vol. 5, No. 5, pp. 11395–11407.
- Whitehouse, D.J., 2011. *Handbook of Surface and Nanometrology*. 2nd ed., CRC Press, Boca Raton.

11. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

CONEM2026-0418

OPTIMIZATION IN THE TURNING OF DUPLEX STAINLESS STEEL UNS S32205 AND INFLUENCE OF CUTTING PARAMETERS ON R_a ROUGHNESS AND CUTTING TEMPERATURE

Vinicius Gonçalves Pereira, d2022002883@unifei.edu.br¹
Rogerio Fernandes Brito, rogbrito@unifei.edu.br¹
Carlos Henrique de Oliveira, carlos.henrique@unifei.edu.br¹
Clinton André Merlo, clintonmerlo@unifei.edu.br¹
Ricardo Luiz Perez Teixeira, ricardo.lui@unifei.edu.br¹
Ruben Alexis Miranda Carrillo, ruben.miranda@unifei.edu.br¹
Paulo Mohallem Guimarães, pauloguimaraes@unifei.edu.br¹
José Carlos de Lacerda, jlacerda@unifei.edu.br¹
Fábio Santos Nascimento, fabiosn@unifei.edu.br¹
Sandro Metrevelle Marcondes de Lima e Silva, metrevel@unifei.edu.br²
Henrique Marcio Pereira Rosa, henrique.rosa@ufv.br³
Deivyson Augusto Pereira, deivysonaugusto@unifei.edu.br¹
Antônio Marcos de Oliveira Siqueira, antonio.siqueira@ufv.br³
Carlos Eymel Campos Rodriguez, carloscampos@unifei.edu.br¹
Nayara Nunes Fonseca dos Reis, nayara.reis@unifei.edu.br¹
Júlio César Costa Campos, julio.campos@ufv.br³

¹Federal University of Itajubá (UNIFEI), Rua Irmã Ivone Drumond, 200, Distrito Industrial II, Itajubá, MG, 35903-087, Brazil.

²Federal University of Itajubá (UNIFEI), Av. BPS, 1303, Pinheirinho neighborhood, Itajubá, MG, 37500-903, Brazil.

³Federal University of Viçosa (UFV), Avenida Peter Henry Rolfs, s/n, University Campus, Viçosa, MG, 36570-900, Brazil.

Abstract: Duplex stainless steel turning, particularly of UNS S32205, represents a significant challenge in manufacturing engineering due to its high mechanical strength and low thermal conductivity, characteristics that promote heat generation and premature tool wear. In this context, this study investigates the influence of the cutting parameters, cutting speed (v_c), feed rate (f), and depth of cut (a_p), on average surface roughness (R_a) and machining temperature. The temperature was measured using a type K thermocouple installed on the rake face of the cutting tool, positioned approximately 3 mm from the main cutting edge, near the tool nose radius. A complete 2^3 factorial design with center points was adopted to conduct the experiments, allowing the evaluation of the main effects and interactions among the factors. The obtained data were analyzed using Analysis of Variance (ANOVA) and Anderson–Darling normality tests, which confirmed the statistical adequacy of the fitted models, with p -values of 0.273 for roughness and 0.543 for temperature, both higher than 0.05. The results indicated that the depth of cut (a_p) exerts a significant influence on machining temperature, being responsible for increasing thermal levels as the removed material cross-section increases. Regarding surface roughness, the feed rate (f) was identified as the predominant factor, showing a directly proportional relationship with R_a values, consistent with the geometric formation of the machined surface. In turn, the cutting speed (v_c) exhibited a nonlinear behavior, with indications of an intermediate condition favorable to process stability. Multi-objective optimization performed using the desirability method enabled the identification of an operational condition that balances surface quality and thermal performance. The optimal combination was obtained with $v_c = 290$ (m/min), $f = 0.08$ (mm/rev), and $a_p = 0.40$ (mm), resulting in a temperature of 98 (°C) and a surface roughness R_a of 0.586 (μm). The results demonstrate that the proper selection of cutting parameters enables simultaneous improvement in surface finish and thermal control during the turning of duplex stainless steel UNS S32205.

Keywords: turning, UNS S32205 duplex stainless steel, multi-objective optimization, surface roughness (R_a), machining temperature.