

Otimização no processo de fresamento do aço inoxidável duplex UNS S32205 utilizando Grey Relational Analysis

Wander Pinto Ribeiro¹, Harue Genghini Shibuta², Bárbara Salvador Barros da Silva³, Carlos Henrique de Oliveira⁴, Tarcísio Gonçalves de Brito⁵, Leonardo Albergaria de Oliveira⁶

¹Instituto de Engenharias Integradas (IEI), Universidade Federal de Itajubá, Brasil. Email: d2021100950@unifei.edu.br

²Instituto de Engenharias Integradas (IEI), Universidade Federal de Itajubá, Brasil. Email: harueshibuta@unifei.edu.br

³Instituto de Engenharias Integradas (IEI), Universidade Federal de Itajubá, Brasil. Email: d2019010014@unifei.edu.br

⁴Instituto de Engenharias Integradas (IEI), Universidade Federal de Itajubá, Brasil. Email: carlos.henrique@unifei.edu.br

⁵Instituto de Engenharias Integradas (IEI), Universidade Federal de Itajubá, Brasil. Email: tgbrito@unifei.edu.br

⁶Instituto de Engenharias Integradas (IEI), Universidade Federal de Itajubá, Brasil. Email: leoalber@unifei.edu.br

Resumen

El acero inoxidable dúplex UNS S32205, por sus propiedades mecánicas, es un material de difícil maquinado, incluso para el proceso de fresado final, representando un gran desafío para las industrias, principalmente petroleras, que fabrican piezas y equipos para cumplir con sus condiciones de operación con éxito. Este trabajo tiene como objetivo determinar los parámetros óptimos del proceso de fresado final utilizando el método "Análisis relacional de grises" (GRA). Para planificar los experimentos se utilizó la matriz ortogonal L16 (2³) de Taguchi. Las variables de control utilizadas fueron velocidad de corte (v_c), penetración de trabajo (a_e), avance por diente (f_z). La profundidad de corte (a_p) se mantuvo constante en 1 mm en todos los experimentos realizados. Las respuestas analizadas fueron rugosidad superficial R_a y R_t , tasa de remoción de material (MRR), poder de corte (P_c). Los parámetros óptimos determinados por el GRA demostrando la eficiencia del método utilizado.

Palabras clave: Fresado de extremos; Acero inoxidable dúplex; Optimización multiobjetivo; análisis relacional gris.

Abstract

UNS S32205 Duplex Stainless Steel, due to its mechanical properties, is a material of difficult machinability, including for the end milling process, representing a great challenge for industries, mainly oil companies, which manufacture parts and equipment to meet their operating conditions successfully. This work aims to determine the optimal parameters of the end milling process using the "Grey Relational Analysis" (GRA) method. To plan the experiments, the orthogonal matrix L16 (2³) of Taguchi was used. The control variables used were cutting speed (v_c), radial depth of cut (a_e), feed per teeth (f_z). The depth of cut (a_p) remained constant at 1mm in all experiments performed. The analyzed responses were surface roughness R_a and R_t , material removal rate (MRR), cutting power (P_c). The optimal parameters determined by the GRA proving the efficiency of the method used.

Keywords: End milling; Duplex stainless steel; Multifunctional optimization; Grey Relational Analysis.

1. INTRODUÇÃO

O aço inoxidável duplex (DSS) pertence a uma classe de materiais de difícil usinabilidade e isso se deve às suas características de alta tenacidade, baixa condutividade térmica e alto grau de encruamento, o que dificulta a fabricação de peças e equipamentos nos

mais diversos processos de usinagem, como o fresamento [1], [2], [3].

Originalmente, os aços inoxidáveis duplex (DSS) surgiram na França na primeira metade do século XX a partir de um aço inoxidável austenítico (ASS) 18% Cr – 9% Ni – 2,5% Mo. Predominantemente ferrítica (S32900), a liga original da família duplex teve a adição

de nitrogênio que aumentou a quantidade de austenita para quase 50%, melhorando consideravelmente as propriedades de corrosão a cloretos, em soldas e de tenacidade [4]. A utilização dos aços inoxidáveis DSS tem crescido desde os anos 1990 especialmente em função do seu custo quando comparado aos ASS devido à sua menor quantidade de níquel. O acréscimo de manganês e nitrogênio favorece a redução de níquel [5].

Para serem considerados DSS, os aços inoxidáveis exigem um valor equivalente de resistência à corrosão por pite (PRE) superior a 20. IMO, 2014 [6] menciona cinco tipos: *lean duplex* (PRE = 21-27), *lean duplex com Mo* (PRE = 27-34), *standard duplex* (PRE = 34-38), *super duplex* (PRE = 38-43) e *hiper duplex* (PRE = 49-53). *Standard duplex*, como UNS S32205 (22% Cr - 5,5% Ni - 3% Mo), PRE = 35, corresponde a 60% de todas as aplicações de DSS.

A interação entre ferramenta e peça durante os processos de usinagem convencionais induzem perfis ranhurados na superfície, o que é prejudicial em ambientes corrosivos, uma vez que gera a ocorrência a fadiga do componente devido ao maior número de concentradores de tensões. As superfícies polidas são preferíveis às usinadas. Entretanto, o polimento de grandes componentes apresenta dificuldades do ponto de vista prático, além de ser oneroso [7].

Em função da sua difícil usinabilidade, muitas pesquisas, acerca de métodos estatísticos vêm sendo realizadas na tentativa de estabelecer os melhores parâmetros que minimizem ou maximizem as mais diversas características de qualidade no processo de fresamento. Philip, Chandramohan, Tajesh [4] utilizaram o planejamento Box-Behnken simultaneamente com a metodologia de superfície para minimizar a rugosidade de superfície R_a durante o fresamento do aço inoxidável duplex UNS S32205. Policena *et al.* [2] utilizaram o planejamento Box-Behnken e o método “Desirability” para encontrar os níveis de processo no fresamento do UNS S32205 para minimizar as rugosidades superficiais R_a e R_t . Os pesquisadores utilizaram metodologia de superfície de resposta e redes neurais para modelar as equações das respostas em função da velocidade de corte e avanço e, para obter os níveis ótimos das variáveis do processo, foram utilizados a curva de Abbott-Firestone (AFC) e distribuição de amplitude-probabilidade (APD).

Taguchi *et al.* [8] teve como meta de seu trabalho o projeto de parâmetros que utilizam experimentos estatísticos planejados, tendo desenvolvido um tipo de matriz especial que pode ser utilizado em várias situações. Essas matrizes são denominadas arranjos ortogonais [9].

Os parâmetros estatísticos de rugosidade caracterizam melhor a superfície usinada que os valores

aritméticos. A assimetria de uma distribuição avalia o grau de desvio ou espaçamento da simetria de um perfil de rugosidade. A curtose descreve o grau de achatamento. A curva de Abbott-Firestone (AFC) representa o perfil estatístico de rugosidade por meio de uma função de probabilidade cumulativa que indica o quanto acima ou abaixo de uma linha de referência está o perfil [10]. É usada para analisar falhas em superfícies de engenharia, como topografias (relações pico-vale), capacidade de suporte de carga na ação de rolamento e lubrificação (capacidade de retenção de óleo) em superfícies deslizantes [11]. A Função de Distribuição de Amplitude (ADM) representa a distribuição que o conjunto de valores medidos tem em relação ao menor valor [12]. Na usinagem de DSS 2205, KROLICZYK *et al.* [13] analisaram a influência da velocidade de corte nos valores de rugosidade e concluíram que tal parâmetro não influenciou significativamente as curvas de *Abbott-Firestone*. Policena *et al.* [2] estudaram o acabamento gerado no fresamento a seco do UNS S32205. Os autores variaram os parâmetros de corte e analisaram os perfis de maior e menor rugosidade (R_a e R_z). A distribuição dos valores medidos foi representada pelas curvas AFC e ADM que se mostraram importantes na caracterização e diagnóstico da superfície usinada.

Nesse sentido, esta pesquisa traz como proposta a aplicação da análise relacional cinza (*Grey Relational Analysis - GRA*) para estabelecer os níveis ótimos dos parâmetros de processo durante o fresamento de topo do aço inoxidável duplex UNS S32205. A velocidade de corte (v_c), a penetração de trabalho (a_e) e avanço por dente (f_z) foram controladas durante a usinagem do material. Para avaliar o desempenho da operação, as rugosidades de superfície (R_a e R_t) e MRR foram medidas, enquanto a potência de corte foi estimada baseada nas formulações encontradas na literatura.

2. ANÁLISE RELACIONAL CINZA (GREY RELATIONAL ANALYSIS - GRA)

A GRA foi desenvolvida por Ju-Long [14] e empregada para transformar um problema de múltiplas respostas, com objetivos conflitantes em uma única função. A aplicação deste método permite que as inconveniências, causadas pelas correlações entre as características de qualidade, sejam superadas [15, 16, 17].

O método normaliza os dados, sendo que valores das características de qualidade são estabelecidos entre 0 e 1, a fim de estabelecer os coeficientes relacionais cinza (GRC – *Grey Relational Coefficients*) e o grau relacional cinza (GRG – *Grey Relational Grade*) [18]. A normalização geralmente tem a propriedade de estabilizar as variâncias, ou seja, tornar os dados homocedásticos para cada grupo (com a mesma variância), pressuposto para qualquer análise paramétrica.

De acordo com Ju-Long [14], existem dois tipos de tolerância: quanto menor melhor (tipo S) e quanto maior melhor (tipo L). O primeiro tipo, envolve uma característica não-negativa, cujo valor ideal é zero. O segundo, tipo L, é aplicável quando não há valores nominais pré-determinados e quanto maior for o valor da característica, melhor será.

Para normalizar as respostas do processo nos casos “quanto menor melhor” e “quanto maior melhor”, devem ser utilizadas as expressões analíticas, respectivamente, conforme Equações (1 e 2).

$$y_i(k) = \frac{\max x_i(k) - x_i(k)}{x_i(k) - x_i(k)} \quad (1)$$

$$y_i(k) = \frac{x_i(k) - \min x_i(k)}{x_i(k) - x_i(k)} \quad (2)$$

Onde: $x_i(k)$, é o valor da resposta determinada durante os experimentos, $y_i(k)$ é a resposta normalizada, $\max x_i(k)$ e $\min x_i(k)$ são os valores máximo e mínimo dos dados originais obtidos durante o experimento.

Após a normalização dos dados calcula-se os coeficientes GRC. Esses coeficientes fazem a relação entre o dado ideal (representado pelo vetor unitário $y_0^{(k)}$) e o experimental de cada resposta analisada no processo, conforme Equação (3).

$$\phi_i = \frac{\Delta_{min} + \lambda \Delta_{max}}{\Delta_{0i}(k) + \lambda \Delta_{max}} \quad (3)$$

Onde: λ = é o coeficiente de distinção ou de identificação $0 \leq \lambda \leq 1$ (valor utilizado no trabalho foi $\lambda = 0,5$); $\Delta_{0i}(k) = |y_0(k) - y_i(k)|$ = a diferença absoluta $y_0^{(k)}$ e $y_i^{(k)}$ e $y_0^{(k)} = (1,1,1,\dots,1)$ de tamanho n, onde n é o número de respostas.

$$\Delta_{min} = \forall k^{min} \in \forall k^{min} = \text{o menor valor de } \Delta_{0i} = |y_0(k) - y_i(k)|$$

$$\Delta_{max} = \forall k^{max} \in \forall k^{max} = \text{o maior valor de } \Delta_{0i} = |y_0(k) - y_i(k)|$$

Para determinar o GRG, deve-se realizar a média dos coeficientes GRC de cada linha experimental do arranjo ortogonal de acordo com o número de respostas analisadas no processo, conforme Equação (4).

$$\gamma_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \phi_i(k) \quad (4)$$

Onde: γ_i é o GRG do i^{th} experimento e n é o número de respostas.

Para a otimização do método GRA são necessários os seguintes passos, conforme Quadro 1.

Quadro 1 - Passos para aplicação do método GRA

Passo 1	<ul style="list-style-type: none"> • Estabelecer o arranjo ortogonal de Taguchi e executar os experimentos • Normalizar os dados originais
Passo 2	<ul style="list-style-type: none"> • Calcular os coeficientes relacional cinza (GRC) • Calcular o grau relacional cinza (GRG) • Determinar combinação ótima
Passo 3	<ul style="list-style-type: none"> • Realizar a análise de variância (ANOVA) • Realizar experimentos de confirmação

Fonte: Elaboração própria.

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Para a coleta dos dados dos experimentos no fresamento de topo foi utilizado o aço inoxidável UNS S32205 conforme Tabela 1.

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

C	Si	Mn	P	S	N	Al
0,013	0,47	1,22	0,019	0,010	0,19	0,008
Cr	Mo	Ni	Cu	W	Co	
22,24	3,14	5,62	0,19	0,02	0,05	

Fonte: Elaboração própria.

O passo 1 tem seu início a partir do estabelecimento de um arranjo ortogonal. Um experimento Taguchi é um experimento planejado que permite escolher um produto ou processo que funcione mais consistentemente no ambiente operacional. Experimentos Taguchi reconhecem que nem todos os fatores que causam variabilidade podem ser controlados. Esses fatores incontrolláveis são denominados fatores de ruído.

Os experimentos Taguchi identificam fatores controláveis (fatores de controle) que minimizam o efeito dos fatores de ruído. Durante a experimentação, os fatores de ruído podem ser manipulados para forçar a ocorrência de variabilidade e determinar configurações ideais de fatores de controle que tornem o processo ou produto robusto ou resistente a variações causadas por fatores de ruído.

Um processo planejado com este objetivo irá produzir saída mais consistente. Um produto planejado com este objetivo irá fornecer um desempenho mais consistente independente do ambiente no qual ele é usado.

Experimentos de Taguchi utilizam matrizes ortogonais que estimam os efeitos dos fatores na média e variação da resposta. Uma matriz ortogonal significa que o experimento é balanceado de forma que os níveis de fatores são ponderados igualmente.

Por esse motivo, cada fator pode ser avaliado independentemente de todos os outros fatores e o efeito de um fator não afeta a estimativa de outro fator. Isso pode reduzir o tempo e o custo associados ao experimento quando se utilizam experimentos fracionários.

Experimentos de matriz ortogonal se concentram primariamente nos efeitos principais. Também é possível adicionar um fator de sinal ao experimento de Taguchi para criar um experimento de resposta dinâmica. Um experimento de resposta dinâmica é usado para melhorar a relação funcional entre um sinal e uma resposta de saída.

Para esta pesquisa, os experimentos foram planejados utilizando o arranjo ortogonal de Taguchi L16 (2^3), com duas réplicas, totalizando 16 experimentos. Dessa forma, o arranjo foi projetado para três variáveis de controle do processo e seus respectivos níveis, conforme Tabela 2; para profundidade de corte, o a_p foi fixado em 1mm para todos os experimentos.

Tabela 2. Parâmetros de processos utilizados no processo de fresamento

Fator	Nível 1	Nível 2
Velocidade de corte (v_c) [m/min]	60	70
Penetração de trabalho (a_e) [mm]	15	18
Avanço por dente (f_z) [mm/dente]	0,08	0,12

Fonte: Elaboração própria.

Em relação aos equipamentos utilizados, os experimentos foram conduzidos em um centro de usinagem CNC da marca Eurostec®, com 15kW de potência e rotação máxima de 10.000 rpm. O material usinado foi o aço inoxidável UNS S32205, com dimensões 115 x 115 x 170 mm de comprimento e com dureza média de 250HB, sem fluido de corte. A ferramenta utilizada se constituiu de uma fresa de topo código R390-025A25-11M, com diâmetro de 25mm, ângulo de posição $\alpha_r = 90^\circ$, haste cilíndrica, passo médio com 3 insertos e fixação mecânica por pinça. Os insertos foram de metal duro ISO M30, código R390-11 T3 08M-MM 2030 [18], revestidos com (Ti,Al)N +TiN pelo processo de deposição física de vapor (*Physical Vapor Deposition* - PVD), conforme Figura 1.



Figura 1. Ferramenta de corte utilizada

Após o fresamento do bloco de aço inoxidável duplex UNS S32205, no sentido concordante/discordante e utilizando os parâmetros definidos conforme arranjo experimental, as rugosidades de superfície foram medidas por um rugosímetro portátil Mitutoyo® Surftest SJ-201 M/P, aos níveis precisão nos intervalos de 0,010 - 100 μ m para R_a , e 0,020 - 350 μ m para R_t [20], utilizando *cut-off* de 0,8mm conforme Fig. 2 [21].

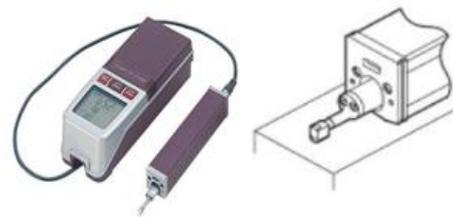


Figura 2. Rugosímetro portátil utilizado no experimento

As medições ocorreram em três pontos do bloco, sendo um no centro e um em cada extremidade, a fim de se considerar o valor médio das leituras. A taxa de remoção de material (*Material Removal Rate* - MRR) e a potência de corte (P_c) foram calculadas conforme Equações (5 e 6). Para a MRR, a massa do corpo de prova foi mensurado antes e depois de cada passe usando uma balança digital com resolução de 0,001kg ou 1g. As massas foram anotadas em uma planilha de Excel® e em seguida os valores de MRR foram calculados. Com isso, após a execução e medição de todos os experimentos, foi construída a matriz experimental conforme Tabela 3.

Tabela 3 - Matriz experimental e valores coletados no fresamento de topo do aço inoxidável duplex UNS S32205

Exp.	v_c	a_e	f_z	R_a	R_t	MRR	P_c
1	1	1	1	0,373	2,946	2,511	0,207
2	1	1	2	0,416	3,981	3,838	0,269
3	1	2	1	0,376	2,892	3,044	0,238
4	1	2	2	0,762	4,904	4,600	0,328
5	2	1	1	0,555	3,529	2,847	0,243
6	2	1	2	0,569	3,784	4,563	0,349
7	2	2	1	0,377	3,706	3,633	0,276
8	2	2	2	0,653	4,619	5,401	0,388
9	1	1	1	0,360	2,938	2,499	0,196
10	1	1	2	0,405	3,956	3,821	0,271
11	1	2	1	0,385	2,727	3,098	0,245
12	1	2	2	0,759	4,894	4,556	0,367
13	2	1	1	0,528	3,537	2,902	0,237
14	2	1	2	0,552	3,695	4,454	0,336
15	2	2	1	0,362	3,685	3,570	0,251
16	2	2	2	0,669	4,578	5,362	0,395

Unidades: v_c (m/min), a_e (mm), f_z (mm/dente), R_a e R_t (μm), MRR (cm^3/min), P_c (kW)

Fonte: Elaboração própria.

$$MRR = \frac{v_1 - v_2}{t\rho} \quad (5)$$

[22]

Sendo v_1 e v_2 os pesos inicial e final da peça respectivamente, t é o tempo de corte durante o experimento e ρ é a densidade do material, para o aço inoxidável duplex é igual a $7,8\text{g}/\text{cm}^3$.

$$P_c = \frac{MRR \times K_c}{60 \times 10^6} \quad k_c = \frac{k_{cl}}{h_m^{m_c}} \quad (6)$$

[23]

k_{cl} e m_c são valores fornecidos pelo fabricante da ferramenta de corte; e h_m é a espessura média do cavaco.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Estabelecido o arranjo ortogonal de Taguchi e tendo executado os experimentos, efetuou-se então, a normalização dos dados, que é a segunda parte do **passo 1**. Isso deve-se à diferenças das grandezas correspondentes a cada variável de resposta mensurada durante o fresamento do aço inoxidável duplex UNS S32205.

Normalização significa tornar normal, ou seja, tornar a distribuição de frequências dos valores parecidos com a distribuição normal ou, pelo menos, torná-la simétrica. A normalidade é um pressuposto de uma série de testes estatísticos uni- e multivariados.

A normalização pode ser realizada de diferentes maneiras, que requerem o exame da distribuição de frequência dos dados. A transformação normalizadora

geralmente tem a propriedade de estabilizar as variâncias, ou seja, tornar os dados homocedásticos para cada grupo (com a mesma variância), pressuposto para qualquer análise paramétrica.

O objetivo da normalização é alterar os valores das colunas numéricas no conjunto de dados para uma escala comum, sem distorcer as diferenças nos intervalos de valores. Esse método é necessário apenas quando os parâmetros tiverem intervalos muito diferentes.

De acordo com a teoria da GRA, existem três critérios de otimização, sendo elas: (i) “quanto menor melhor”; (ii) “nominal é melhor” e (iii) “quanto maior melhor”.

A abordagem “quanto menor melhor” foi utilizada para as rugosidades superficiais R_a e R_t , pois elas devem ser minimizadas no processo, enquanto a MRR e P_c foram classificadas como “quanto maior melhor”, uma vez que seus resultados devem ser maximizados. Os resultados da normalização para essas quatro variáveis de respostas, podem ser visualizados conforme Tabela 4.

O **passo 2** contempla os cálculos do Coeficiente Relacional Cinza (GRC), do Grau Relacional Cinza (GRG) e também a determinação da combinação ótima.

A teoria Grey, tem sido aplicada nos mais variados campos de pesquisa como sistemas sociais, ecologia, economia, produção, geografia, tráfego, gerenciamento, educação etc. Foca em situações onde há a incerteza, variedade de dados de entrada, dados discretos e informações insuficientes para a tomada de decisão.

A análise relacional Grey (GRA) é um método de otimização multiobjetivo que converte várias respostas em um único objetivo. GRA é uma ferramenta de análise de processos com múltiplas características de desempenho. O desempenho geral do experimento depende do coeficiente relacional cinza (GRC) e do grau relacional de Grey (GRG). Neste método, todas as características de desempenho são convertidas em GRG.

O GRG indica o nível de associação entre a sequência de referência e a sequência de comparabilidade. Um maior valor de grau relacional cinza infere um grau relacional mais forte entre a sequência comparativa e referencial (ideal).

Após a normalização dos dados, calculou-se o GRC (*Grey Relational Coefficient*) que expressa a relação entre os resultados ideais (vetor unitário = 1) e os experimentais normalizados.

Em seguida, foi calculado o GRG (*Grey Relational Grade*). O GRG fornece o ranking dentre uma

seqüência de dados, qual é a melhor alternativa. Na pesquisa em questão, o GRG determina, para cada linha do arranjo de Taguchi, quais são os parâmetros mais significativos do processo. Neste caso, o maior valor observado está na linha 16, conforme Tabela 4.

material na formação do cavaco, diminuindo sua ductilidade de tal maneira que a adesão do cavaco na aresta de corte desgastada fica facilitada, o que promove um aumento de atrito na região da usinagem, contribuindo para o desgaste acelerado da ferramenta. Durante o processo duas arestas da ferramenta permanecem no corte, enquanto somente uma aresta

Tabela 4 - Matriz com os resultados encontrados ao aplicar o método GRA

Exp	Níveis			Dados Normalizados				GRC				GRG
	v _c	a _e	f _z	R _a	R _t	MRR	P _c	R _a	R _t	MRR	P _c	
1	1	1	1	0,968	0,899	0,004	0,055	0,939	0,833	0,334	0,346	0,613
2	1	1	2	0,861	0,424	0,461	0,367	0,782	0,465	0,481	0,441	0,542
3	1	2	1	0,960	0,924	0,188	0,211	0,926	0,868	0,381	0,388	0,641
4	1	2	2	0,000	0,000	0,724	0,663	0,333	0,333	0,644	0,598	0,477
5	2	1	1	0,515	0,632	0,120	0,236	0,508	0,576	0,362	0,396	0,460
6	2	1	2	0,480	0,514	0,711	0,769	0,490	0,507	0,634	0,684	0,579
7	2	2	1	0,958	0,550	0,391	0,402	0,922	0,526	0,451	0,455	0,589
8	2	2	2	0,271	0,131	1,000	0,965	0,407	0,365	1,000	0,934	0,677
9	1	1	1	1,000	0,903	0,000	0,000	1,000	0,838	0,333	0,333	0,626
10	1	1	2	0,888	0,435	0,456	0,377	0,817	0,470	0,479	0,445	0,553
11	1	2	1	0,938	1,000	0,206	0,246	0,889	1,000	0,387	0,399	0,669
12	1	2	2	0,007	0,005	0,709	0,859	0,335	0,334	0,632	0,780	0,520
13	2	1	1	0,582	0,628	0,139	0,206	0,545	0,573	0,367	0,386	0,468
14	2	1	2	0,522	0,555	0,674	0,704	0,511	0,529	0,605	0,628	0,568
15	2	2	1	0,995	0,560	0,369	0,276	0,990	0,532	0,442	0,409	0,593
16	2	2	2	0,231	0,150	0,987	1,000	0,394	0,370	0,974	1,000	0,685

Fonte: Elaboração própria.

O GRG é calculado a partir da soma dos coeficientes de Grey divididos pelo número total de respostas, como mostra a Equação (7):

$$\gamma(i) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \xi_k(i) \quad (7)$$

Onde (i) são os coeficientes relacionais Grey (GRC). A partir dos GRG calculados é estabelecido uma classificação de acordo com os valores obtidos. Quanto maior for o valor do GRG melhor é o ponto experimental dentre os testados pelo método.

Ao somar os níveis 1 e 2 para cada parâmetro de processo, em função dos coeficientes GRG, determina-se a diferença entre o maior e menor valor entre eles. Este cálculo permite classificar as variáveis de controle, indicando a mais influente no processo. De acordo com o ranqueamento realizado pode-se verificar que a penetração de trabalho (a_e) foi a mais influente sobre R_a, R_t, MRR e P_c, conforme Tabela 5.

Tabela 5 - Valores ótimos obtidos pelo método GRA

Parâmetros	Níveis		Rank
	1	2	
v _c	0,580	0,577	3
a _e	0,551	0,606	1
f _z	0,582	0,575	2

Fonte: Elaboração própria.

A geração de calor durante a usinagem sem fluido de corte aumenta a resistência mecânica do volume de

troca calor com o meio ambiente. Fazendo com que penetração de trabalho (a_e) seja a mais influenciada no nível 2, conforme Figura 3.

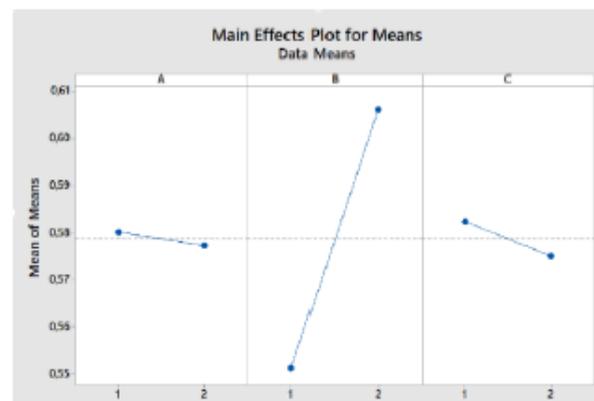


Figura 3. Gráfico dos efeitos principais

A metodologia GRA foi utilizada para determinar o grau de relacionamento entre uma observação referencial com observações levantadas, para estabelecer um grau de proximidade com o estado meta, ou seja, o resultado desejado. Os níveis ótimos encontrados levando em conta os parâmetros conforme Tabela 6.

Tabela 6. Valores encontrados no processo para os níveis ótimos

Parâmetros			R _a	R _t	MRR	P _c
v _c	a _e	f _z	(μ m)	(μ m)	(cm ³ /min)	(kW)
1	2	1	0,376	2,892	3,044	0,238
1	2	1	0,385	2,727	3,098	0,245
Média			0,381	2,810	3,071	0,242

Fonte: Elaboração própria.

O **passo 3** aborda a realização da análise de variância (Anova) e também os experimentos de confirmação.

A investigação dos parâmetros significativos que afetam os resultados, foi verificada pela técnica ANOVA utilizando o software MINITAB®.

O teste de significância foi importante para avaliar se o modelo é estatisticamente significativo. Além disso, a ANOVA também permite verificar quais dentre os termos do modelo são significativos e quais podem ser removidos. O ajuste dos modelos é representado através do coeficiente de determinação (R²), que representa o percentual de contribuição na resposta que é explicada pelo modelo construído.

A ANOVA foi capaz de verificar se as mudanças ocorridas nos fatores (causas) de interesse sobre a variável resposta (característica de qualidade), e toda as combinações foram testadas. A técnica foi utilizada para verificar as causas que afetaram as variáveis de respostas, com 98,68% de contribuição, conforme Tabela 7.

Tabela 7 - Análise de variância (ANOVA)

Termo	G. L.	SQ Ajust.	QM Ajust.	Valor F	% de contribuição
v _c	1	0,000016	0,000016	0,00	0,00%
a _e	1	0,006064	0,006064	0,75	98,68%
f _z	1	0,000104	0,000104	0,01	1,32%
Erro Residual	4	0,032310	0,008077		
Total	7	0,038495			

Fonte: Elaboração própria.

Na etapa de confirmação dos resultados, foram realizados oito experimentos de confirmação medindo em três pontos as variáveis R_a, R_t, MRR e P_c, e calculadas as médias após cada passada.

Os experimentos de confirmação mostraram que os resultados ótimos reais se aproximam dos resultados otimizados, e a maior diferença encontrada foi de 1,43%, verificada para as rugosidades superfície R_a, 1,21% para R_t e 2,25% para MRR e 2,36% para potência de corte.

A maior variação causada na potência de corte deve-se ao fato de que essa grandeza foi calculada e não medida durante o processo. Portanto, os valores reais aproximam-se dos valores ótimos calculados, neste contexto, ficando validados os resultados obtidos para a otimização do processo de fresamento de topo do aço inoxidável duplex UNS S32205 utilizando o método (GRA), nos ensaios de confirmação foram utilizados os parâmetros: v_c = 60m/min, a_e = 18mm e f_z = 0,08mm/dente, conforme Tabela 8.

Tabela 8 - Experimentos de confirmação

Experimento	R _a	R _t	MRR	P _c
1	0,370	2,805	3,330	0,268
2	0,382	2,748	2,489	0,278
3	0,392	2,609	3,105	0,248
4	0,374	2,711	3,046	0,263
5	0,380	2,733	2,942	0,255
6	0,372	3,009	3,331	0,232
7	0,350	2,779	2,876	0,224
8	0,379	2,810	2,896	0,210
Média dos experimentos de confirmação	0,375	2,776	3,002	0,247
Média dos experimentos utilizando o método	0,381	2,810	3,071	0,242
% de variação	↑ 1,43%	↑ 1,21%	↑ 2,25%	↓ 2,36%

Fonte: Elaboração própria.

5. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou uma aplicação do método GRA para as respostas R_a, R_t e P_c no processo de fresamento de topo do aço inoxidável duplex UNS S32205, em uma análise de “quanto menor melhor”, e para MRR “quanto maior melhor”.

Para a normalização das respostas a análise da otimização pelo método GRA mostrou-se ser capaz para a otimização do processo de usinagem por fresamento.

Pelos cálculos dos coeficientes GRC e GRG conseguiu-se a determinação de uma combinação ótima dos resultados para o parâmetro penetração de trabalho a_e no processo de usinagem por fresamento.

Na abordagem da análise de variância (ANOVA) observou-se que o parâmetro penetração de trabalho a_e obteve uma contribuição de 98,68%.

Para os experimentos de confirmação os valores ótimos foram para os níveis v_c = 60m/min no nível (1), a_e = 18mm no nível (2) e f_z = 0,08mm/dente no nível (1), mostrando que esses valores estão dentro do planejamento experimental.

Do ponto de vista do processo de usinagem do aço inoxidável duplex UNS S32205 foi possível encontrar

as respostas e parâmetros ótimos pelo método GRA (Grey Relational Analysis).

6. AGRADECIMENTOS

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

7. REFERÊNCIAS

- [1] GAMARRA, J. R.; DINIZ, A. E. Taper turning of super duplex stainless steel: tool life, tool wear and workpiece surface roughness. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2018, 40 (1), p. 1-13. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/s40430-018-0991-1>>.
- [2] POLICENA, M. R.; et al. Surface roughness analysis in finishing end-milling of duplex stainless steel UNS S32205. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2018, v. 98, p. 1617-1625. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs00170-018-2356-4>>.
- [3] SELVARAJ, D. P. Optimization of surface roughness of duplex stainless steel in dry turning operation using taguchi technique. *Materials Physics and Mechanics*, 2018, 40 (1), p. 63-70. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.18720/MPM.4012018_8>.
- [4] PHILIP, S. D.; CHANDRAMOHAN, P.; RAJESH, P. K. A. Prediction of surface roughness in end milling operation of duplex stainless steel using response surface methodology. *Journal of Engineering Science and Technology*, 2015, 10 (3), p. 340-352. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/Chandramohan-Palanisamy/publication/282060733_Prediction_of_surface_roughness_in_end_milling_operation_of_duplex_stainless_steel_using_response_surface_methodology/links/5808b69408ae63c48feca20e/Prediction-of-surface-roughness-in-end-milling-operation-of-duplex-stainless-steel-using-response-surface-methodology.pdf>.
- [5] SNIS, M.; OLSSON, J. Reduce costs for storage and distribution of desalted water – use duplex stainless steel. *Desalination*, 2008, Vol. 223, No. 1-3, p. 476-486. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.desal.2007.04.068>>.
- [6] INTERNATIONAL MOLYBDENUM ASSOCIATION. *Practical Guidelines for the Fabrication of Duplex Stainless Steels*. 3rd edition. Londres: IMO, 2014. ISBN 9781907470097. Disponível em: <<https://www.imoa.info/molybdenum-media-centre/downloads>>.
- [7] JEBARAJ, A. V.; AJAYKUMAR, L.; DEEPAK. C. R.; ADITYA, K. V. Weldability, machinability and surfacing of commercial duplex stainless steel AISI 2205 for marine applications – A recent review. *Journal of Advanced Research*, 2017, p. 183-199. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jare.2017.01.002>>.
- [8] TAGUCHI, G.; ELSAYED, E. A.; HSIANG, T. C. *Engenharia da qualidade em sistemas de produção*. Rio de Janeiro: McGraw-Hill, 1990.
- [9] ROSS, P. J. *Aplicações das técnicas Taguchi na engenharia da qualidade*. São Paulo: McGraw-Hill, 1991.
- [10] PETROPOULOS, P. G. N.; PANDAZARAS, N. P.; DAVIM, J. P. Surface texture characterization and evaluation related to machining. 2010 In: *Surface Integrity in Machining*. Springer, London, p. 37-66. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-1-84882-874-2_2>.
- [11] PAWLUS, P.; GRABON, W. The method of truncation parameters measurement from material ratio curve. *Precision Engineering*, 2008, 32 (4), p. 342-347. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2008.01.002>>.
- [12] TAVARES, S.M.O., Analysis of surface roughness and models of mechanical contacts. Dissertação (Mestrado) em Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia (Universidade do Porto), 2005. Disponível em: <https://paginas.fe.up.pt/~em00021/eramus/project_english.pdf>.
- [13] KROLCZYK, G.; LEGUTKO, S.; GAJEK, M. Predicting the surface roughness in the dry machining of duplex stainless steel (DSS), *Metalurgija*, vol. 52, pp. 259-262, 2013. Disponível em: <<https://hrcak.srce.hr/file/136497>>.
- [14] JU-LONG, D. P. Control problems of grey systems. *Systems & Control Letters*, 1982, 1 (5), p. 288-294. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/S0167-6911\(82\)80025-X](https://doi.org/10.1016/S0167-6911(82)80025-X)>.
- [15] MIA, M; DHAR, N. R. Optimization of surface roughness and cutting temperature in high-pressure coolant-assisted hard turning using Taguchi method.

The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017 (88), p. 739-753. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s00170-016-8810-2>>.

[16] SHI, K.; et al. Multiobjective Optimization of Surface Integrity in Milling TB6 Alloy Based on Taguchi-Grey Relational Analysis. *Advances in Mechanical Engineering*, 2014, 6 (12), p. 280-313. Disponível em: <<https://doi.org/10.1155%2F2014%2F280313>>.

[17] SONAWANE, G. D.; SARGADE, V. G. Evaluation and multi-objective optimization of nose wear, surface roughness and cutting forces using grey relation analysis (GRA). *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2019, 41 (557). Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s40430-019-2057-4>>.

[18] GOPAL, P. M.; PRAKASH, K. S. Minimization of cutting force, temperature and surface roughness through GRA, TOPSIS and Taguchi techniques in end milling of Mg hybrid MMC. *Measurement*, 2018, 116 (1), p. 178-192. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.measurement.2017.11.011>>.

[19] SANDIVIK Coromant. Ferramentas Sólidas Rotativas. 2018. Disponível em: <<https://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/products/news/pages/solid-round-tools.aspx>>.

[20] MITUTOYO. 2008. Disponível em: <https://www.atecorp.com/atecorp/media/pdfs/data-sheets/mitutoyo-sj-201p_manual.pdf>.

[21] GROUSS, A. *Applied metrology for manufacturing engineering*. Quebec: John Wiley & Sons, 2011.

[22] HANIF, M.; et al. Investigating the effects of electric discharge machining parameters on material removal rate and surface roughness on AISI D2 steel using RSM-GRA integrated approach. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2019, 101, p. 1255–1265. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s00170-018-3019-1>>.

[23] VOSNIAKOS, George-Christopher; BENARDOS, Panorios; KRIMPENIS, Agathoklis A.. *Intelligent Optimisation of 3-Axis Sculptured Surface Machining on Existing CAM Systems*. _____. *Machining of Complex Sculptured Surfaces*. Londres: Springer, 2012. p. 157-189. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4471-2356-9_5>.