**Otimização robusta da rugosidade Rt no fresamento de topo do Aço Inoxidável Duplex UNS S32205**

**Carlos Henrique de Oliveira1, Tarcísio Gonçalves de Brito 1, Anderson Paulo de Paiva 2, João Roberto Ferreira 2**

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

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

2 Instituto de Engenharia de Produção e Gestão (IEPG), Universidade Federal de Itajubá, Brasil. Email: andersonppaiva@unifei.edu.br

2Instituto de Engenharia de Produção e Gestão (IEPG), Universidade Federal de Itajubá, Brasil. Email: jorofre@unifei.edu.br

**Resumo**

El acero inoxidable dúplex se considera un material de baja maquinabilidad y la optimización robusta es una alternativa viable para establecer los parámetros óptimos para obtener un mejor acabado de la pieza en diferentes procesos de maquinado. Este trabajo presenta un método de proyecto de parámetro robusto y de intersección normal para determinar los valores óptimos de las variables de control, insensibles a la presencia de ruido, en el proceso de fresado de acero inoxidable dúplex UNS S32205. La respuesta analizada fue la rugosidad total Rt donde la media y la varianza se minimizaron para generar una frontera de Pareto equiespaciada. Los resultados mostraron la eficiencia del método para estimar Rt con un valor de 3.273 µm y varianza de 0.178 µm2. Para las pruebas de confirmación se utilizó el proyecto L9 de Taguchi, y el resultado de la prueba de hipótesis t de Student demostró la robustez del proceso.

**Palabras clave:** Fresado; Proyecto de parámetro robusto; Método de intersección normal; Acero inoxidable dúplex UNS S32205.

**Abstract**

The duplex stainless steel is considered a low machinability material and robust optimization is a viable alternative to establish the optimal parameters to obtain better workpiece finish in different machining process. This paper presents a method of robust parameters design (RPD) and normal boundary intersection (NBI), to determine the optimal values of the control variables, insensitive to the presence of noise, in the end milling process of duplex stainless steel UNS S32205. The response analysed was the total roughness Rt where mean and variance were minimized to generate an equispaced Pareto frontier. The results showed the efficiency of the method to estimate the roughness parameter with a value of 3.273 µm and a variance of 0.178 µm2. For the confirmation tests, Taguchi L9 design was used, and the result of the Student´s hypothesis test proved the robustness of the milling process.

**Keywords:** End Milling; Robust Parameter Design; Normal Boundary Intersection method; Duplex Stainless Steel UNS S32205

# Introdução

O aço inoxidável duplex (AID) é uma classe de material que contêm uma microestrutura equilibrada em proporções equivalentes de austenita e ferrita [1]. O AID combina as características de cada uma dessas fases. A austenita fornece ductilidade, tenacidade, soldabilidade e resistência à corrosão, enquanto a ferrita fornece resistência mecânica e de corrosão sob tensão [2]. Por estas razões, o material é empregado em muitos setores tais como petroquímica, gás natural liquefeito, usinas nucleares, de petróleo e gás, mas é um material de baixa usinabilidade devido à presença de altos teores de cromo, molibdênio e níquel, baixa condutividade térmica e alto grau de encruamento [3]. A fabricação de componentes em AID representa um grande desafio para indústria metal-mecânica, principalmente quando o processo de fresamento é utilizado [4].

O fresamento, em particular o de topo, é um processo muito utilizado e isto deve-se à capacidade de produzir formas geométricas complexas, além de criar perfis planos e curvilíneos, sendo empregado na fabricação de produtos que atendem os setores aeronáuticos, automotivo, de petróleo e gás [5], [6].

É comum no processo de fresamento de topo, a geração de superfícies irregulares durante o corte do material, e quando este material é aplicado em ambientes corrosivos, pode afetar a fadiga, facilitar o processo de corrosão e comprometer a qualidade do componente processado [7].Tratando-se de qualidade, a rugosidade é o parâmetro mais utilizado para caracterizar a superfície de uma peça usinada. Dentre os existentes pode-se citar a rugosidade total Rt [8].

As organizações manufatureiras além de se preocupar com a qualidade, necessitam melhorar o desempenho de seus processos industriais, por meio da redução de variabilidade. Esta variabilidade origina-se pela presença das variáveis de ruído, que identificadas ou não, influenciam no processo aumentando a probabilidade de produzir itens não-conformes [9].

Para minimizar o efeito das variáveis de ruído, Taguchi propôs a metodologia denominada de projeto de parâmetros robusto (RPD – *Robust Parameter Design*). O RPD tem como propósito determinar os níveis das variáveis controláveis que tornam o processo menos sensível à variação causada por estas variáveis de ruído. Welch *et al*. [10] idealizaram um projeto experimental combinando ambas as variáveis (ruído e controle) em uma única matriz por meio de um arranjo composto central (CCD - *Central Composite Design*), porém Myers *et al*. [11] foram os pioneiros em utilizar os conceitos RPD concomitantemente com a metodologia de superfície de resposta (RSM – *Response Surface Methodology*) e planejamento de experimentos (DOE *– Design of Experiments*). Esta proposição permite formular analiticamente as equações de média e variância separadamente, além de propiciar o estudo de interação das variáveis de controle com as de ruído.

Estabelecendo as equações de média (µ) e variância (σ2) é possível atribuir diferentes pesos (**w**) para cada uma delas a critério do “especialista do processo”. Utilizando um método de otimização, como o da interseção normal à fronteira (NBI – *Normal Boundary Intersection*), é possível estabelecer um conjunto de soluções ótimas denominada “Fronteira de Pareto”. O NBI foi proposto por Das e Dennis [12] para obter fronteiras convexas e com soluções equiespaçadas.

Pode-se verificar, na literatura, que muitas pesquisas foram desenvolvidas aplicando o método RPD e o NBI no processo de fresamento, tal como Brito *et al*. [13] no fresamento de topo do aço AISI 1045. Rodrigues *et al*. [14] no fresamento helicoidal da liga de alumínio Al7075 e Arruda *et al*.[15] no fresamento de topo esférico do AISI H13, mas existe uma escassez de estudos envolvendo o emprego do RPD e NBI no fresamento de topo do aço inoxidável duplex UNS S32205.

Este trabalho propõe a aplicação do método RPD-NBI no processo de fresamento de topo do aço inoxidável duplex UNS S32205 para análise da superfície usinada utilizando o parâmetro de rugosidade total Rt. A execução dos experimentos foi baseada no arranjo combinado CCD. A otimização biobjetiva foi realizada fundamentada nas modelagens de média e variância de Rt utilizando o método RPD-NBI. A fronteira de Pareto equiespaçada foi construída utilizando o problema de programação não linear e o algoritmo gradiente reduzido generalizado (GRG – *Generalized Reduced Gradient*) disponível no Excel®. O melhor ponto selecionado da fronteira foi o que apresentou o menor Erro Quadrático Médio (EQM) e o teste de hipótese t de Student foi utilizado para validar a robustez do processo.

# Metodologia RPD-NBI

## Projeto de parâmetros robusto

Segundo Ardakani e Noorossana [16], o RPD é um conjunto de técnicas para determinar o nível dos fatores controláveis que reduzem a sensibilidade das variáveis de respostas, em relação às variáveis de ruído, afim de aumentar a robustez do processo. De acordo com Montgomery [17], o RPD é uma abordagem para análise e melhoria de processos com foco na determinação dos níveis das variáveis de controle que visa garantir que a média (µ) da resposta do processo se estabeleça em um nível desejado (alvo) e garantir que a variabilidade (σ2) seja menor possível.

Quanto às técnicas utilizadas para a modelagem e análise dos dados, Montgomery [17] afirma que a RSM tem se mostrado uma estratégia eficiente nas pesquisas ao aplicar o RPD. O planejamento experimental pode ser desenvolvido empregando os arranjos cruzados ou combinados. Para o presente trabalho, a estratégia usada foi baseada em um arranjo combinado.

Segundo Köksoy [18], ao utilizar a abordagem da matriz combinada, estimativas de média e variância podem ser determinadas separadamente para cada variável de resposta, além de flexibilizar as interações entre os fatores de controle e ruído. Um modelo de segunda ordem capaz de relacionar as variáveis de controle, ruído e suas interações pode ser estabelecida utilizando RSM, conforme equação (1).

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1) |

Onde:

*y*(**x**,**z**) é a resposta de interesse.

*x1, x2, ..., xk* são os k fatores controláveis.

*z1, z2, ..., zs* são os s fatores incontroláveis.

*β0, βi, βii, βij, γi, γij e δij* são os coeficientes estimados pelo método dos mínimos quadrados ordinários.

*ε* é o erro experimental.

Uma vez que o modelo de superfície de resposta foi estabelecido para *y*(**x**,**z**), a equação de média da variável de resposta y pode ser extraída diretamente deste modelo de regressão utilizando os coeficientes dos termos constante, lineares, quadráticos e de interações das variáveis de controle (**x**).

Segundo Montgomery [17], a variância de *y*(**x**,**z**) é desenvolvido utilizando o princípio da propagação de erro, conforme equação (2).

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2) |

Onde:

é derivada da função *f*(**x**,**z**) em relação à i-ésima variável de ruído *Zi*.

é a variância associada às variáveis de ruído. De acordo com Köksoy [18] o valor de assume o valor igual a 1, pois o ruído varia entre -1 e +1 (níveis codificados) de acordo com o planejamento experimental projetado.

é a variância associada ao modelo *y*(**x**,**z**).

Com o desenvolvimento das equações de média e variância, a otimização pode ser processada empregando-se diversas técnicas de otimização múltipla disponíveis na literatura. Neste trabalho utilizou-se o método NBI para estabelecer os pontos ótimos robustos utilizando o algoritmo GRG.

## Método da Interseção Normal à Fronteira - NBI

O método NBI é capaz de estabelecer um conjunto de soluções viáveis e não dominadas conhecida como “Fronteira de Pareto”. Das e Dennis [12] desenvolveram este método para solucionar o problema de descontinuidade causadas pelas soluções não convexas pertencentes à fronteira, e foi idealizado para gerar pontos ótimos uniformemente distribuídos, independentemente da distribuição dos pesos (**w**) ou escalas entre diversas funções objetivo.

Para aplicar o método NBI, deve-se incialmente estabelecer a matriz “*payoff*”, onde seus elementos são calculados minimizando as *m* funções objetivos pertencentes ao problema de otimização. Ao determinar a solução, um ponto ótimoé encontrado e a função objetivo indica o menor valor para . Ao substituir o valor nas demais funções objetivos, determina-se os pontos de ancoragem.

Repetindo a otimização para cada uma das *m* funções objetivos, a matriz *payoff* é constituída. Os elementos da diagonal principal, dessa matriz, são denominados de pontos de utopia , que correspondem aos menores valores possíveis da cada função objetivo individual. Os piores valores são denominados de “Pseudo-Nadir” .

Identificados os vetores com os pontos de Utopia e Pseudo-Nadir, a próxima etapa do método NBI é normalizar cada função objetivo e por fim, soluciona-se o problema de otimização utilizando um modelo matemático para casos bi-objetivo, conforme equação (3).

|  |  |
| --- | --- |
|  | (3) |

A metodologia proposta neste trabalho foi dividida em três etapas, a primeira refere-se à seleção e o estabelecimento dos parâmetros de corte para as variáveis de controle e ruído, assim como a elaboração do planejamento e a realização dos experimentos.

A segunda consiste em modelar a variável de resposta Rt e obter os modelos de média (µ) , variância (σ2), de acordo com os conceitos do RPD e o alvo (T). O valor de T é obtido pela minimização ou maximação, dependendo da direção de otimização da variável de resposta.

A terceira trata-se da otimização da média (µ) e variância (σ2) utilizando o método RPD-NBI. Neste passo a matriz *payoff* é estabelecida e os pontos de Utopia e Pseudo-Nadir são determinados. Posteriormente as funções de média e variância são normalizadas. Os pesos (*w*) são definindos variando de 0 a 1 com incrementos de 0,05, cujo objetivo é fornecer graus de importância para µ e σ2, sendo possível gerar uma fronteira de Pareto uniformemente equiespaçada. O experimento de confirmação é realizado baseado na melhor solução, dentre os ótimos, definido pelo o que apresentou o menor erro quadrático médio (EQM), calculado conforme equação (4) . O valor médio (µ) dos valores de Rt obtidos nos experimentos de confirmação é comparado com o valor encontrado na otimização ao aplicar o método proposto, e usando o teste estatístico t de Student a hipótese da robustez do processo é confirmada.

|  |  |
| --- | --- |
|  | (4) |

# Procedimento experimental.

O material escolhido para esta pesquisa foi o aço inoxidável duplex UNS S32205 com dureza de 250 HB com dimensões de 106 x 100 x 120 mm. A sua composição química, considerando os principais elementos químicos, de acordo com IMOA [19], pode ser visualizada, conforme tabela 1.

**Tabela 1.** Composição química (% em peso) do aço inoxidável UNS S 32205

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **C** | **Cr** | **Ni** | **Mo** | **N** | **Mn** |
| 0,03 | 22,24 | 5,62 | 3,14 | 0,19 | 1,22 |

**Fonte:** Autoria própria

Para a coleta de dados, os experimentos do fresamento do aço inoxidável duplex UNS S32205 foram planejados utilizando um arranjo combinado. O arranjo composto central CCD foi elaborado para sete variáveis, sendo quatro delas variáveis de controle e três de ruído. O projeto fatorial de 1/2 fração foi selecionado com 64 pontos fatoriais, 8 pontos axiais e 10 centrais totalizando 82 experimentos. A distância axial ou o raio da região experimental (ρ) estabelecido foi de 2,83. Os níveis das variáveis de controle e ruído podem ser observados, conforme tabelas 2 e 3.



**Figura 1.** Medição da rugosidade. Fonte: Autoria Própria.

**Tabela 2.** Níveis do processo das variáveis de controle

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | Níveis do processo | | | | |
| -2,83 | -1,00 | 0,00 | 1,00 | 2,83 |
| *vc* | 32,57 | 60,00 | 75,00 | 90,00 | 117,43 |
| *fz* | 0,04 | 0,10 | 0,13 | 0,16 | 0,21 |
| *ae* | 12,26 | 15,00 | 16,50 | 18,00 | 20,74 |
| *ap* | 0,43 | 0,80 | 1,00 | 1,20 | 1,57 |

Unidades: *vc* (m/min); *fz*(mm/dente); *ae* (mm) e ap (mm).

**Fonte:** Autoria Própria

**Tabela 3.** Níveis do processo das variáveis de ruído

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  | Níveis do processo | | |
| -1 | 0 | 1 |
| *vb* (mm) | 0 | 0,15 | 0,30 |
| *Q* (l/min) | 0 | 0,20 | 20 |
| *lt0* (mm) | 30 | 40 | 50 |

**Fonte:** Autoria Própria

Os ensaios foram realizados utilizando um centro de usinagem CNC Romi D600® com potência de 15kW e máxima rotação de 10000 rpm. A fresa de topo utilizada foi a CoroMill® R390-025A25-11M, ângulo de posição χr= 90º graus, haste cilíndrica, passo médio com 3 insertos e fixação mecânica por pinça. Os insertos utilizados na operação de corte foi a CoroMill®R390-11T308M-MM 2030.

Durante os experimentos, cada variável de controle foi alterada no comando numérico de centro de usingem. Em relação às variáveis de ruído, o desgaste do flanco da ferramenta (*vb*) foi controlado utilizando o analisador de imagem (*Global Image Analyzer*), o *software* Global Lab Image e o microscópio estereoscópico modelo SZ 61 com ampliação de 45 vezes. A vazão de fluido (*Q*) foi controlada utilizando duas válvulas reguladores fixadas na máquina-ferramenta. Para controlar o comprimento em balanço (*lt0*) foi usado um paquímetro analógico Digimess® com resolução de 0,05 mm.

Após o fresamento do bloco de aço UNS S32205 no sentido concordante e discordante utilizando os parâmetros definidos pelo arranjo experimental, a rugosidade Rt foi medida na superfície usinada utilizando um rugosímetro Mitutoyo Surftest 201®, conforme figura 1. A medição de Rt ocorreu em três pontos do bloco, sendo um no centro e um em cada extremidade, a fim de considerar o valor médio das leituras.

# Resultados e discussão

Finalizado a execução e medição de todos os experimentos, a matriz experimental com os valores da Rt pode ser observada conforme tabela 4. Estes dados foram utilizados como fonte para estabelecer a modelagem e a otimização do processo.

**Tabela 4.** Resultados experimentais

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Exp | Var. de controle (codificado) | | | | Var. de ruído (codificado) | | | Rt |
| *vc* | *fz* | *ae* | *ap* | *vb* | *Q* | *lt0* |
| 1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | 1 | 4,210 |
| 2 | 1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | 2,760 |
| 3 | -1 | 1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 | 3,667 |
| 4 | 1 | 1 | -1 | -1 | -1 | -1 | 1 | 5,039 |
| 5 | -1 | -1 | 1 | -1 | -1 | -1 | -1 | 3,810 |
| ˸  ˸ | ˸  ˸ | ˸  ˸ | ˸  ˸ | ˸  ˸ | ˸  ˸ | ˸  ˸ | ˸  ˸ | ˸  ˸ |
| 78 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3,503 |
| 79 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2,973 |
| 80 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2,837 |
| 81 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2,640 |
| 82 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3,136 |

Unidades: *vc* (m/min); *fz*(mm/dente); *ae* (mm); *ap* (mm); *vb* (mm); *Q* (l/min); *lt0* (mm) e Rt (µm).

**Fonte:** Autoria Própria

Os coeficientes do modelo foram estimados utilizando o método dos mínimos quadrados ordinários (OLS – *Ordinary Least Squares*), por meio do *software* estatístico Minitab 17®. Assim chegou-se as seguintes expressões para o modelo envolvendo as variáveis de controle e ruído, e a equação de média para Rt, conforme equações (5) e (6), respectivamente.

|  |  |
| --- | --- |
|  | (5) |

|  |  |
| --- | --- |
|  | (6) |

A equação de variância (σ2) foi baseada nas derivadas parciais de *Rt*(**x**, **z**) em relação à *vb*, *Q* e *lt0*, sendo que a variância associada ao modelo de *Rt*(**x**, **z**) foi de 0,136. Os coeficientes de σ2Rt(**x**) podem ser observados conforme equação (7).

|  |  |
| --- | --- |
|  | (7) |

Para estabelecer o alvo (T), minimizou-se a função *µRt* (**x**) solucionando o problema de otimização, conforme equação (8). O valor de T encontrado foi de 2,943µm.

|  |  |
| --- | --- |
|  | (8) |

## Otimização NBI

Para aplicar a otimização utilizando o NBI, calculou-se a matriz *payoff* contendo os pontos de Utopia e Pseudo-Nadir. Estes pontos foram determinados minimizando individualmente as equações *µRt*(**x**) e σ2Rt(**x**). Os valores encontrados podem ser observados, conforme tabela 5, e os termos em negrito representam os pontos de utopia para a média e variância de Rt.

**Tabela 5.** Matriz Payoff

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| *µRt* | **2,943** | 3,704 |
| σ2Rt | 1,358 | **0,136** |

**Fonte:** Autoria Própria

Os parâmetros robustos determinados para o fresamento do aço UNS S32205 caracterizam o ponto de ótimo como uma condição satisfatória para o processo, a medida em que o resultado esperado para a média da rugosidade Rt se mostra com um valor inferior em relação às observadas nos experimentos, além de apresentar uma redução na variabilidade do processo.

Para isso as funções de média e variância foram normalizadas, de acordo com as equações (9) e (10). A otimização NBI foi realizada resolvendo o problema de programação não linear, conforme equação (11). As soluções ótimas foram obtidas utilizando o algoritmo Gradiente Reduzido Generalizado (GRG).

|  |  |
| --- | --- |
|  | (9) |

|  |  |
| --- | --- |
|  | (10) |

|  |  |
| --- | --- |
|  | (11) |

Para os casos nos quais se torna necessário ajustar o processo atribuindo ponderações diferentes entre a média e a variância de Rt, a tabela 6 e a figura 2 apresentam a fronteira de Pareto construída para este problema. Dessa forma, chega-se a um conjunto de parâmetros robustos otimizados nos quais o processo pode ser configurado, de modo a se ter o melhor resultado para as respostas em diferentes cenários.

As condições de corte ótimas foram ensaiadas variando a vazão do fluido, balanço e condições da ferramenta, novas e desgastadas. A ideia básica em otimização de projeto robusto está relacionada a encontrar uma configuração de fatores controláveis que não sofra ação de fatores incontroláveis (ruídos). Para testar essa afirmação com o processo em estudo, um projeto L9 Taguchi foi utilizado para avaliar o comportamento da configuração ótima em um cenário entre variáveis de controle e fatores de ruído. A confirmação de corridas dos experimentos foi selecionada entre os vários pontos da fronteira de Pareto. O ponto escolhido, como ideal, para a confirmação deste trabalho, está associado ao peso W = 0,3 na qual apresentou o menor valor do erro quadrático médio (EQM). Após a execução dos ensaios e registros das respostas de confirmação foram obtidos os seguintes resultados, conforme tabela 7.

**Tabela 6.** Resultados da otimização utilizando o método RPD-NBI

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Ponto | w | Var. Codificadas | | | | Var. Decodificadas | | | | *µRt* | *σ2Rt* | *EQMRt* |
| *vc* | *fz* | *ae* | *ap* | *vc* | *fz* | *ae* | *ap* |
| 1 | 0 | -1,432 | 0,878 | -0,755 | 0,180 | 53,513 | 0,156 | 15,368 | 1,036 | 3,704 | 0,136 | 0,716 |
| 2 | 0,05 | -1,085 | 0,948 | -0,843 | -0,316 | 58,730 | 0,158 | 15,236 | 0,937 | 3,628 | 0,137 | 0,607 |
| 3 | 0,10 | -1,188 | 0,938 | -0,666 | -0,276 | 57,176 | 0,158 | 15,502 | 0,945 | 3,552 | 0,137 | 0,508 |
| 4 | 0,15 | -1,294 | 0,924 | -0,389 | -0,314 | 55,587 | 0,158 | 15,916 | 0,937 | 3,476 | 0,137 | 0,421 |
| 5 | 0,20 | -1,225 | 0,839 | -0,169 | -0,568 | 56,627 | 0,155 | 16,246 | 0,886 | 3,401 | 0,139 | 0,349 |
| 6 | 0,25 | -1,086 | 0,706 | -0,156 | -0,568 | 58,705 | 0,151 | 16,267 | 0,886 | 3,334 | 0,152 | 0,305 |
| **7** | **0,30** | **-0,954** | **0,587** | **-0,138** | **-0,537** | **60,688** | **0,148** | **16,293** | **0,893** | **3,273** | **0,178** | **0,287** |
| 8 | 0,35 | -0,826 | 0,475 | -0,120 | -0,502 | 62,605 | 0,144 | 16,320 | 0,900 | 3,220 | 0,214 | 0,291 |
| 9 | 0,40 | -0,702 | 0,366 | -0,103 | -0,466 | 64,464 | 0,141 | 16,346 | 0,907 | 3,173 | 0,261 | 0,314 |
| 10 | 0,45 | -0,582 | 0,262 | -0,086 | -0,431 | 66,263 | 0,138 | 16,372 | 0,914 | 3,131 | 0,316 | 0,352 |
| 11 | 0,50 | -0,465 | 0,160 | -0,070 | -0,397 | 68,018 | 0,135 | 16,395 | 0,921 | 3,095 | 0,380 | 0,403 |
| 12 | 0,55 | -0,352 | 0,061 | -0,054 | -0,364 | 69,725 | 0,132 | 16,419 | 0,927 | 3,063 | 0,451 | 0,466 |
| 13 | 0,60 | -0,241 | -0,036 | -0,038 | -0,331 | 71,387 | 0,129 | 16,443 | 0,934 | 3,036 | 0,529 | 0,538 |
| 14 | 0,65 | -0,133 | -0,130 | -0,023 | -0,298 | 73,012 | 0,126 | 16,466 | 0,940 | 3,012 | 0,614 | 0,619 |
| 15 | 0,70 | -0,027 | -0,221 | -0,008 | -0,267 | 74,598 | 0,123 | 16,488 | 0,947 | 2,993 | 0,705 | 0,708 |
| 16 | 0,75 | 0,077 | -0,311 | 0,007 | -0,236 | 76,148 | 0,121 | 16,510 | 0,953 | 2,977 | 0,802 | 0,803 |
| 17 | 0,80 | 0,178 | -0,399 | 0,021 | -0,206 | 77,667 | 0,118 | 16,531 | 0,959 | 2,964 | 0,903 | 0,904 |
| 18 | 0,85 | 0,277 | -0,485 | 0,035 | -0,176 | 79,155 | 0,115 | 16,552 | 0,965 | 2,955 | 1,010 | 1,010 |
| 19 | 0,90 | 0,374 | -0,570 | 0,049 | -0,147 | 80,614 | 0,113 | 16,573 | 0,971 | 2,948 | 1,122 | 1,122 |
| 20 | 0,95 | 0,470 | -0,652 | 0,062 | -0,118 | 82,046 | 0,110 | 16,593 | 0,976 | 2,944 | 1,238 | 1,238 |
| 21 | 1 | 0,563 | -0,734 | 0,075 | -0,090 | 83,452 | 0,108 | 16,613 | 0,982 | 2,943 | 1,358 | 1,358 |

Unidades: *vc* (m/min); *fz*(mm/dente); *ae* (mm); *ap* (mm); *µR*t (µm) e *σ2Rt* (µm2).

**Fonte:** Autoria Própria

**Tabela 7.** Resultados dos ensaios de confirmação

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Exp. | *vb* | *Q* | *lt0* | *Rt* |
| 1 | 0,00 | 0,0 | 30 | 2,822 |
| 2 | 0,00 | 0,2 | 40 | 4,087 |
| 3 | 0,00 | 20,0 | 50 | 3,694 |
| 4 | 0,15 | 0,0 | 40 | 3,689 |
| 5 | 0,15 | 0,2 | 50 | 3,620 |
| 6 | 0,15 | 20,0 | 30 | 3,794 |
| 7 | 0,30 | 0,0 | 50 | 3,249 |
| 8 | 0,30 | 0,2 | 30 | 2,881 |
| 9 | 0,30 | 20,0 | 40 | 3,736 |
|  |  |  | ***µRt*** | **3,508** |

Unidades: *vb* (mm); *Q* (l/min), *lt0* (mm) e *Rt* (µm).

**Fonte:** Autoria Própria

Para avaliar a robustez do processo, o teste estatístico t de Student para uma amostra foi realizada. O resultado obtido pode ser observado na tabela 8. O objetivo foi verificar se a média de Rt, obtida pelos dados coletados durante os experimentos de confirmação, são iguais estatisticamente com a média calculada pela otimização NBI. Como a hipótese nula foi aceita, pois o valor-P foi maior que o nível de significância de 5%, concluiu-se que não há diferença entre as médias, mesmo com a presença das variáveis de ruído. Logo, pode-se afirmar que a robustez do processo de fresamento foi alcançada.

**Tabela 8.** Teste de hipótese (t-Student) para uma amostra

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Resposta | Teste de hipótese | Valor-P |
| *Rt* (confirmação) | H0: µ = 3,273  H1: µ ≠ 3,273 | 0,140 |

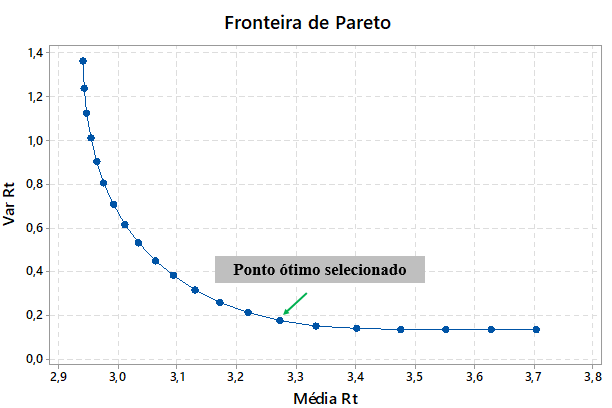
**Fonte:** Autoria Própria

A efetividade do método RPD-NBI foi verificada comparando os resultados da média otimizada com a média dos ensaios de confirmação. Como a média Rt otimizada foi igual a 3,273 µm e a média confirmada igual a 3,508 µm, a diferença entre elas de 7,18%, pode ser negligenciada.

# Conclusão

A otimização robusta da rugosidade Rt no fresamento de topo do aço inoxidável duplex UNS S 32205 foi realizada aplicando a metodologia RPD-NBI. Após a otimização, utilizando os conceitos de projeto de parâmetro robusto e o método da interseção normal à fronteira, 21 soluções de Pareto-ótimo foram obtidas de forma equiespaçada. No melhor ponto, o que apresentou o menor valor de EQM, os níveis ótimos das variáveis de controle foram *vc* = 60,688 m/min, *fz* = 0,148 mm/dente, *ae* = 16,293 mm e *ap* = 0,893 mm. O valor médio de Rt foi de 3,273 µm e variância de 0,178 µm2.

Os experimentos de confirmação foram realizados para avaliar a robustez do processo em relação às variáveis de ruído utilizadas no estudo. O projeto de Taguchi L9 foi usado como planejamento experimental. Os testes confirmatórios foram realizados considerando os níveis ótimos das variáveis de controle. O teste de hipótese t-Student foi realizado e os resultados mostraram que o processo de fresamento é robusto confirmando a eficácia do RPD. A efetividade do método RPD-NBI foi verificada, e a diferença entre a média de Rt obtida na otimização do NBI (*µRt* = 3,273 µm) com o ensaio de confirmação (*µRt* = 3,508 µm) foi de 7,18%, sendo considerado uma pequena variação levando em consideração à baixa usinabilidade do aço inoxidável duplex UNS S32205.



**Figura 2.** Fronteira de Pareto *µRt* x *σ2Rt*. Fonte: Autoria Própria.

# Agradecimentos

Este trabalho é apoiado pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) por meio do projeto CNPq 304665/2018-5, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) por meio do projeto número TEC-APQ-03171-16.

Os autores também agradecem ao Grupo de Estudo em Qualidade e Produtividade (GEQProd) da Universidade Federal de Itajubá, campus de Itabira , e ao Núcleo de Otimização da Manufatura e da Tecnologia da Inovação (NOMATI) da Universidade Federal de Itajubá, campus de Itajubá pelo apoio para a realização deste trabalho.

# Referências

[1] R. P. Martinho, F. J. G. Silva, C. Martins, and H. Lopes. “Comparative study of PVD and CVD cutting tools performance in milling of duplex stainless steel”. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 102, n.° 5-8, pp. 2423-2439, 2019. Disponible en: https://doi.org/10.1007/s00170-019-03351-8

[2] A. Mavi. “Evaluation of Cutting Parameters by Determination of the Grey Correlation Analysis Methods of the Effects on the Cutting Force and Surface Roughness of Duplex Stainless Steels (2205)”. *Teh. Vjesn. - Tech. Gaz*, vol. 27, n.° 1, pp. 270-275, 2020. Disponible en: https://doi.org/10.17559/TV-20181220075328

[3] M. Kumar Gupta, M. Boy, M. Erdi Korkmaz, N. Yaşar, M. Günay, and G. M. Krolczyk. “Measurement and analysis of machining induced tribological characteristics in dual jet minimum quantity lubrication assisted turning of duplex stainless steel”. *Measurement*, vol. 187, n.° 1, pp. 110353, 2022. Disponible en: https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.110353

[4] P. Amaro, P. Ferreira, and F. Simões. “Comparative Analysis of Different Cutting Milling Strategies Applied in Duplex Stainless Steel”. *Procedia Manuf*, vol. 47, n.° 1, pp. 517-524, 2019. Disponible en: https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.04.132

[5] L. G. de Oliveira, C. H. de Oliveira, T. G. de Brito, E. J. de Paiva, A. P. de Paiva, and J. R. Ferreira. “Nonlinear optimization strategy based on multivariate prediction capability ratios: Analytical schemes and model validation for duplex stainless steel end milling”. *Precis. Eng*, vol. 66, Nov., pp. 229-254, 2020. Disponible en: https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2020.06.005

[6] E. M. Widodo, T. A. Purnomo, and N. Ariyanto. “Machinery parameter optimization of CNC milling programming towards process time”. *J. Phys. Conf. Ser*, vol. 1517, n.° 1, pp. 1-6, 2020. Disponible en: https://doi.org/10.1088/1742-6596/1517/1/012044

[7] M. R. Policena, C. Devitte, G. Fronza, R. F. Garcia, and A. J. Souza. “Surface roughness analysis in finishing end-milling of duplex stainless steel UNS S32205”. *Int. J. Adv. Manuf. Technol*, vol. 98, n.° 5-8, pp. 1617-1625, 2018. Disponible en: https://doi.org/10.1007/s00170-018-2356-4

[8] J. Rajaguru and N. Arunachalam. “A comprehensive investigation on the effect of flood and MQL coolant on the machinability and stress corrosion cracking of super duplex stainless steel”. *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 276, n.° September 2019, pp. 116417, 2020. Disponible en: https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.116417

[9] T. G. Brito, A. P. Paiva, T. I. Paula, D. N. Dalosto, J. R. Ferreira, and P. P. Balestrassi. “Optimization of AISI 1045 end milling using robust parameter design”. *Int. J. Adv. Manuf. Technol*, vol. 84, n.° 5-8, pp. 1185-1199, 2015. Disponible en: https://doi.org/10.1007/s00170-015-7764-0

[10] W. J. Welch, T.-K. Yu, S. M. Kang, and J. Sacks. “Computer Experiments for Quality Control by Parameter Design”. *J. Qual. Technol*, vol. 22, n.° 1, pp. 15-22, 1990. Disponible en: https://doi.org/10.1080/00224065.1990.11979201

[11] R. H. Myers, A. I. Khuri, and G. Vining. “Response Surface Alternatives to the Taguchi Robust Parameter Design Approach”. *Am. Stat*, vol. 46, n.° 2, pp. 131-139, 1992. Disponible en: https://doi.org/10.1080/00031305.1992.10475869

[12] I. Das and J. E. Dennis. “Normal-Boundary Intersection: A New Method for Generating the Pareto Surface in Nonlinear Multicriteria Optimization Problems”. *SIAM J. Optim*, vol. 8, n.° 3, pp. 631-657, 1998. Disponible en: https://doi.org/10.1137/S1052623496307510

[13] T. G. Brito, A. P. Paiva, J. R. Ferreira, J. H. F. Gomes, and P. P. Balestrassi. “A normal boundary intersection approach to multiresponse robust optimization of the surface roughness in end milling process with combined arrays”. *Precis. Eng*, vol. 38, n.° 3, pp. 628-638, 2014. Disponible en: https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2014.02.013

[14] V. F. S. Rodrigues, J. R. Ferreira, A. P. de Paiva, L. G. P. de Souza, R. B. D. Pereira, and L. C. Brandrão. “Robust modeling and optimization of borehole enlarging by helical milling of aluminum alloy Al7075”. *Int. J. Adv. Manuf. Technol*, vol. 100, n.° 9-12, pp. 2583-2599, 2019. Disponible en: https://doi.org/10.1007/s00170-018-2832-x

[15] É. M. Arruda, A. P. de Paiva, L. C. Brandão, and J. R. Ferreira. “Robust optimisation of surface roughness of AISI H13 hardened steel in the finishing milling using ball nose end mills”. *Precis. Eng*, vol. 60, n.° 1, pp. 194-214, 2019. Disponible en: https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2019.07.013

[16] M. K. Ardakani and R. Noorossana. “A new optimization criterion for robust parameter design — the case of target is best”. *Int. J. Adv. Manuf. Technol. Eng*, vol. 38, n.° 9-10, pp. 851-859, 2008. Disponible en: https://doi.org/10.1007/s00170-007-1141-6

[17] D. C. Montgomery. “Designs and Analysis of Experiments”. *John Wiley & Sons*, vol. 1, n.° 9, 2017.

[18] O. Köksoy. “A nonlinear programming solution to robust multi-response quality problem”. *Appl. Math. Comput*, vol. 196, n.° 2, pp. 603-612, 2008. Disponible en: https://doi.org/10.1016/j.amc.2007.06.023

[19] IMOA. “Practical Guidelines for the Fabrication of Duplex Stainless Steel. 3rd ed. edited by International Molybdenum Association”. Londres. Disponible en: https://www.imoa.info/download\_files/stainless-steel/Duplex\_Stainless\_Steel\_3rd\_Edition.pdf