

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
INSTITUTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Dissertação de Mestrado

**OTIMIZAÇÃO ROBUSTA DO
FRESAMENTO DE TOPO DO AÇO
INOXIDÁVEL DUPLEX UNS S32205**

Autor: Guilherme Augusto Vilas Boas Vasconcelos

Orientador: Prof. Dr. João Roberto Ferreira

Itajubá

Agosto de 2022

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
INSTITUTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Dissertação de Mestrado

**OTIMIZAÇÃO ROBUSTA DO
FRESAMENTO DE TOPO DO AÇO
INOXIDÁVEL DUPLEX UNS S32205**

Autor: Guilherme Augusto Vilas Boas Vasconcelos

Orientador: Prof. Dr. João Roberto Ferreira

Curso: Mestrado em Engenharia Mecânica

Área de concentração: Projeto, Materiais e Processos

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica como requisito à obtenção do título de Mestre em Ciências em Engenharia Mecânica.

Itajubá

Agosto de 2022

DEDICATÓRIA

À Deus Pai criador de todas as coisas,

Aos meus queridos pais Carlos Rogério de Vasconcelos e Helenice Ribeiro da Silva Vasconcelos,

Aos meus queridos Avós Maria Aparecida e João Ribeiro (IN MEMORIAN),

Aos meus queridos irmãos Pedro Vasconcelos e Júlia Vasconcelos,

À minha querida e amada esposa Rayssa Simone Moraes de Vasconcelos,

À minha querida filha Mariah.

AGRADECIMENTOS

Até aqui me ajudou o Senhor. A Ele primeiramente meu agradecimento, pois sem Ele seria impossível chegar até aqui. Que o Senhor continue me abençoando, guiando meus passos e me dando sabedoria para seguir sempre em frente.

Aos meus pais, Carlos Rogério de Vasconcelos e Helenice Ribeiro da Silva Vasconcelos por terem acreditado em mim e terem me dado uma nova oportunidade de viver, minha dívida com vocês será eterna diante de tudo que me proporcionaram até hoje.

A minha querida e amada esposa Rayssa Simone Moraes de Vasconcelos por todo amor, carinho, atenção, motivação e compreensão pelos momentos de renúncia e ausência. Agradeço também pelo melhor presente que eu poderia estar recebendo de você, nossa pequena Mariah Moraes de Vasconcelos.

Aos familiares e amigos pela amizade, orações, apoio e suporte de sempre.

Ao meu orientador, professor João Roberto Ferreira, por me acolher como aluno e orientado durante esses dois anos. Foram dois anos atípicos para todos nós, mas que sem dúvidas foram de muito proveito. Agradeço por todo conhecimento compartilhado, pelas experiências divididas e sobretudo pelo respeito e confiança.

Ao meu coorientador e hoje amigo Carlos Henrique de Oliveira, por todo apoio, compreensão, incentivo, ensinamento e paciência. Sem dúvidas sem sua ajuda todo esse sonho não seria possível.

Ao amigo Matheus Brendon Francisco pela amizade, companheirismo, por todo apoio e incentivo nos momentos difíceis, pelos artigos escritos e publicados juntos que foram de grande relevância e aprendizado pra mim.

Ao técnico José Veríssimo Ribeiro de Toledo, do Laboratório de Manufatura e Automação do Instituto de Engenharia de Produção e Gestão da Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI, pela ajuda, atenção e colaboração na execução dos experimentos de fresamento deste trabalho.

Ao professor Tarcísio Gonçalves de Brito pelos materiais, ferramentas e por todo auxílio nesta pesquisa.

À empresa RCS Usinagem de Precisão e Manutenção Eireli pela usinagem do suporte de fixação e dos corpos de provas utilizados nos experimentos e para o desgaste da ferramenta.

Aos professores do programa de pós-graduação em Engenharia Mecânica da UNIFEI pelos ensinamentos e experiências compartilhadas.

À Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI, por permitir, apoiar e possibilitar a realização deste trabalho.

E a todos que de forma direta e/ou indireta contribuíram para a realização deste trabalho.

EPÍGRAFE

*“... As vezes a paz de
um sorriso pode
desarmar uma guerra...”*

(Armandinho)

VASCONCELOS, G. A. V. B Otimização Robusta no Fresamento de Topo do Aço Inoxidável duplex UNS S32205. 2022. 103 p. Dissertação (Mestrado em Projeto, Materiais e Processos) – Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá.

RESUMO

O estudo sobre o fresamento de topo do aço inoxidável duplex vem ganhando destaque, devido aos desafios encontrados em sua baixa usinabilidade. Isso ocorre, pois, esses materiais apresentam baixa condutividade térmica, alta tenacidade e alta taxa de encruamento. Entretanto, para garantir qualidade final em produtos manufaturados, é importante que o processo de fresamento seja bem planejado, visando menores desgastes nas fresas durante o processo e ao mesmo tempo apresentando bons indicadores de produtividade. Assim, este trabalho tem como objetivo realizar uma otimização robusta multiobjetivo no processo de fresamento de topo do aço inoxidável duplex UNS S32205. Foram realizados experimentos seguindo um planejamento composto central combinando as variáveis de controle: velocidade de corte, avanço por dente, profundidade de corte e largura fresada e as variáveis de ruído: desgaste de flanco (v_b), vazão de fluido (Q) e o balanço da ferramenta (I_{t0}). As variáveis de respostas avaliadas foram a rugosidade da peça usinada e a taxa de remoção de material. Foram aplicadas as metodologias de superfície de resposta, de projeto de parâmetro robusto, do erro quadrático médio e da interseção normal à fronteira. Em seguida, foram analisados e discutidos os efeitos das variáveis de controle e de ruído, bem como as interações destas sobre as características de interesse. O desgaste da ferramenta foi a variável que mais influenciou a rugosidade R_a . A taxa de remoção de material foi influenciada por todas as variáveis controláveis do processo. Os valores obtidos para a rugosidade R_a variaram entre 0,24 a 1,10 μm e a taxa de remoção de material variou entre 40,39 a 187,52 mm^3/s . A otimização da média e da variância de cada característica de interesse foi realizada, bem como a otimização do erro quadrático médio. Assim, 21 soluções Pareto-ótimas foram obtidas, contribuindo para a melhoria da qualidade superficial e da produtividade no processo de fresamento. Nos ensaios de confirmação empregou-se um arranjo ortogonal de Taguchi (L9) onde obteve-se os *setups* ótimos capazes de mitigar a influência das variáveis de ruído, o que corroborou a boa adequação da metodologia proposta.

Palavras chaves: Fresamento de Topo, Aço inoxidável duplex UNS S32205, Projeto de Parâmetro Robusto (PPR), Metodologia de Superfície de Resposta (MSR), Erro Quadrático Médio (EQM).

VASCONCELOS, G. A. V. B Optimization in Duplex Stainless Steel End Milling UNS S32205. 2022. 103 p. Dissertation (Master in Design, Materials and Processes) - Institute of Mechanical Engineering, Federal University of Itajubá.

ABSTRACT

The study on the end milling of duplex stainless steel has been gaining prominence due to the challenges encountered in its low machinability. This occurs, therefore, these materials have low thermal conductivity, high tenacity and high rate of hardening. However, to ensure final quality in manufactured products, it is important that the milling process is well planned, aiming at lower mill wear during the process and at the same time presenting good productivity indicators. Thus, this work aims to perform a robust multi-objective optimization in the end milling process of the duplex stainless steel UNS S32205. Experiments were carried out following a central composite planning combining the control variables: cutting speed, feed per tooth, depth of cut and milled width and noise variables: flank wear (v_b), fluid flow (Q) and tool balance (lt_0). The response variables evaluated were the surface roughness and the material removal rate. The methodologies of response surface, robust parameter design, mean quadratic error and normal boundary intersection were applied. So, the effects of control and noise variables were analyzed and discussed, as well as their interactions on the response characteristics. Tool wear was the variable that most influenced the surface roughness. The material removal rate was influenced by all controllable process variables. The values obtained for R_a roughness ranged from 0.24 to 1.10 μm and the material removal rate ranged from 40.39 to 187.52 mm^3/s . The Mean and variance optimization of each characteristic of interest was performed, as well as the mean quadratic error optimization. Thus, 21 Pareto-optimal solutions were obtained, contributing to the improvement of surface quality and productivity of the milling process. In the confirmation tests a Taguchi orthogonal arrangement (L9) were used where the optimal setups were obtained capable of mitigating the influence of noise variables, which corroborated the good adequacy of the proposed methodology.

Keywords: End Milling, UNS S32205 duplex stainless steel, Robust Parameter Design (RPD), Response Surface Methodology (MSR), Mean Square Error (MSE).

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – OPERAÇÕES DE FRESAMENTO	9
FIGURA 2 – FRESAMENTO CONCORDANTE E DISCORDANTE	10
FIGURA 3 - REPRESENTAÇÃO DE UM FRESAMENTO DE TOPO	11
FIGURA 4 - REPRESENTAÇÃO DA PENETRAÇÃO DE TRABALHO E DA LARGURA DE CORTE.....	13
FIGURA 5 - POSICIONAMENTO DA ARESTA DE CORTE.....	14
FIGURA 6 - RUGOSIDADE MÉDIA (R_A)	17
FIGURA 7 – LINHA MÉDIA	19
FIGURA 8 – DIREÇÕES DA APLICAÇÃO DO FLUIDO DE CORTE	21
FIGURA 9 - SUPERFÍCIE DE RESPOSTA PARA MODELO LINEAR E MODELO QUADRÁTICO	28
FIGURA 10 - ARRANJO CCD.....	30
FIGURA 11 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DE UM PROCESSO.....	31
FIGURA 12 - DESVANTAGENS DO MÉTODO DE SOMAS PONDERADAS	36
FIGURA 13 - FRONTEIRA DE PARETO	38
FIGURA 14 – FLUXOGRAMA METODOLOGIA PRP-EQM-NBI.....	40
FIGURA 15 - CORPO DE PROVA	41
FIGURA 16 – DETALHAMENTO DO CORPO DE PROVA	42
FIGURA 17 - CENTRO DE USINAGEM ROMI® D 600	43
FIGURA 18 - FRESA DE TOPO R390-025A25-11M.....	43
FIGURA 19 - INSERTO DE METAL DURO R390-11T308M-MM 2030	44
FIGURA 20 - MICROSCÓPIO ÓPTICO SZ 61® OLYMPUS	45
FIGURA 21 - CONDIÇÕES DE USINAGEM: (A) SEM FLUIDO; (B) MÍNIMA VAZÃO; (C) MÁXIMA VAZÃO	45
FIGURA 22 – CONJUNTO DE FERRAMENTAS	46
FIGURA 23 – PROCEDIMENTO DE MEDIÇÃO DA RUGOSIDADE	46
FIGURA 24 – BALANÇA.....	47
FIGURA 25 – BASE TROCA RÁPIDA.....	48
FIGURA 26 – PARAFUSO, PINO GUIA E ARRUELA FACETADA	49
FIGURA 27 – DISPOSITIVO MONTADO.....	49
FIGURA 28 - ARRANJO CCD COMBINADO.....	51
FIGURA 29 – EFEITOS PRINCIPAIS SOBRE A RUGOSIDADE R_A	62
FIGURA 30 – EFEITOS DAS INTERAÇÕES SOBRE A RUGOSIDADE R_A	63
FIGURA 31 – EFEITOS PRINCIPAIS SOBRE A TAXA DE REMOÇÃO DE MATERIAL	66

FIGURA 32 – EFEITOS DAS INTERAÇÕES SOBRE A TAXA DE REMOÇÃO DE MATERIAL (MRR)	67
FIGURA 33 – ALVO (T) PARA RUGOSIDADE R_A	69
FIGURA 34 – ALVO (T) PARA TAXA DE REMOÇÃO DE MATERIAL (MRR).....	69
FIGURA 35 – FRONTEIRA DE PARETO EQM_{RA} E EQM_{MRR}	72

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – DEFINIÇÃO DE RUGOSIDADE	18
TABELA 2 - COMPRIMENTO DA AMOSTRAGEM PARA PERFIS APERIÓDICOS	18
TABELA 3 - COMPRIMENTO DA AMOSTRAGEM PARA PERFIS PERIÓDICOS	19
TABELA 4 - CARACTERÍSTICAS DAS PRINCIPAIS TÉCNICAS DE DOE	26
TABELA 5 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO AÇO INOXIDÁVEL DUPLEX UNS S32205 (% EM PESO).....	42
TABELA 6 – NÍVEIS PARA AS VARIÁVEIS DE CONTROLE	50
TABELA 7 – NÍVEIS PARA AS VARIÁVEIS DE RUÍDO	50
TABELA 8 – PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS	52
TABELA 9 - PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL COM RESPOSTAS	56
TABELA 10 - ANOVA PARA A RUGOSIDADE R_A	60
TABELA 11 - ANOVA PARA A TAXA DE REMOÇÃO DE MATERIAL	64
TABELA 12 – MATRIZ <i>PAYOFF</i> EQM_{RA} X EQM_{MRR}	70
TABELA 13 - RESULTADOS DA OTIMIZAÇÃO PARA O EQM_{RA} E EQM_{MRR}	71
TABELA 14 – NÍVEIS DAS VARIÁVEIS DE CONTROLE	74
TABELA 15 – PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS L9 DE TAGUCHI.....	74
TABELA 16 – RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS DE CONFIRMAÇÃO	75
TABELA 17 – ANOVA DAS VARIÁVEIS DE RUÍDO PARA A RUGOSIDADE R_A	75
TABELA 18 – ANOVA DAS VARIÁVEIS DE RUÍDO PARA A TAXA DE REMOÇÃO MRR	76
TABELA 19 – COMPARAÇÃO ENTRE RESULTADOS OTIMIZADOS E EXECUTADOS	76

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CNC	Comando Numérico Computadorizado
DOE	Design of Experiments
EQM	Erro Quadrático Médio ou Mean Square Error (MSE)
NBR	Norma Brasileira
MSR	Metodologia de Superfície de Resposta
RPD	Projeto de Parâmetro Robusto
T	Alvo para um processo
ANOVA	Análise de Variância
k_r	Ângulo de posição da ferramenta
IMOA	Associação Internacional de Molibdênio (International Molybdenum Association)
f_z	Avanço por dente
R^2	Coeficiente de determinação
$R^2(\text{adj})$	Coeficiente de determinação ajustado
δ_i	Coeficientes de regressão para as interações entre variáveis de controle e ruído
b_i	Coeficientes de regressão para variáveis de controle
γ_i	Coeficientes de regressão para variáveis de ruído
l_{t0}	Comprimento em balanço da ferramenta
v_b	Desgaste do Franco da Ferramenta (mm)
α	Distância do centro do arranjo experimental ao ponto axial (ou raio da região experimental)
d_e	Distância Euclidiana
e	Erro observado na resposta
EQM	Erro Quadrático Médio
GRG	Gradiente Reduzido Generalizado
G.L	Graus de Liberdade

AISI	Instituto Americano de Ferro e Aço (American Iron and Steel Institute)
IEPG	Instituto de Engenharia de Produção e Gestão
NOMATI	Núcleo de Otimização da Manufatura e da Tecnologia da Inovação
UNIFEI	Universidade Federal de Itajubá
®	Marca Registrada
Z	Matriz de variáveis independentes
Φ	Matriz payoff
μ	Média de uma variável de resposta
NBI	Método da Interseção Normal à Fronteira
OLS	Método dos Mínimos Quadrados (OLS - Ordinary Least Squares)
MSR	Metodologia de Superfície de Resposta
TiN	Nitreto de Titânio
TiAlN	Nitreto de Titânio Alumínio
ISO	Organização Internacional de Normalização (International Organization for Standardization)
UNS	Padrão Nacional Unificado (Unified National Standard)
f(x)	Parcela do modelo que envolve as variáveis de controle
a_e	Penetração de trabalho
DOE	Planejamento de Experimentos (Design of Experiments)
a_p	Profundidade de usinagem
CCD	Arranjo Composto Central (CCD- Central Composite Design)
PPR	Projeto de Parâmetros Robusto
Rpm	Rotações por minuto
R_a	Rugosidade média
MRR	Taxa de Remoção de Material (Material Removal Rate)
σ^2	Variância populacional
y	Variáveis de respostas ou de saída
z	Variáveis de ruído
x	Variáveis independente ou de controle
Q	Vazão de Fluido de Corte

v_f	Velocidade de avanço
f	Avanço
v_c	Velocidade de corte
n	Número de rotações por minuto
D_c	Diâmetro da Fresa
L	Passo largo
M	Passo fino
DSS	Duplex Stainless Steel
Cr	Cromo
Mo	Molibidênio
Ni	Níquel
l_m	Comprimento de medição
p_i	Massa inicial do corpo de prova
p_f	Massa final do corpo de prova
CNMG	Código de ferramenta de corte
\mathbf{X}	Vetor das variáveis independentes
ζ	Vetor de erros aleatórios ou de fatores específicos
μ	Vetor de médias em relação às variáveis originais
f^N	Vetor de pontos de Nadir
f^U	Vetor de pontos de Utopia
y	Vetor de respostas
\hat{y}	Vetor de respostas estimadas
β	Vetor dos coeficientes de regressão
$\hat{\beta}$	Vetor dos coeficientes de regressão estimados
e	Vetor dos erros observados
$2k$	Fatorial Completo
$2k-p$	Fatorial Fracionário
$2k$	Pontos Axiais
CCC	Arranjos Circunscritos

CCF	Arranjos de Face Centrada
CCI	Arranjos Inscritos
EXP	Experimentos

SUMÁRIO

1. Introdução.....	1
1.1 Contextualização	1
1.2 Objetivo Geral.....	3
1.3 Objetivos Específicos.....	3
1.4 Justificativa	3
1.5 Delimitação	5
1.6 Estrutura do trabalho	6
2. Fundamentação Teórica.....	7
2.1 Introdução.....	7
2.2 Aços Inoxidáveis Duplex.....	7
2.3 Usinagem por Fresamento	8
2.4 Parâmetros importantes no processo de fresamento	11
2.5 Rugosidade.....	16
2.6 Sistemas de Medição de Rugosidades.....	18
2.7 Fluido de Corte	20
2.8 Taxa de Remoção de Material.....	22
2.9 Planejamento de Experimentos e Otimização	23
2.9.1 Introdução	23
2.9.2 Planejamento de Experimentos – (DOE).....	24
2.9.3 Metodologia de Superfície de Resposta – (MSR).....	27
2.9.4 Projeto de Parâmetro Robusto (PPR)	31
2.9.5 Arranjo Combinado.....	33
2.9.6 Erro Quadrático Médio (EQM)	35
2.9.7 Método da interseção Normal a Fronteira – (NBI)	36
3. Procedimento Experimental.....	39
3.1 Introdução.....	39
3.2 Método de Pesquisa	39
3.3 Material.....	41
3.4 Máquinas e Equipamentos	42

3.5 Procedimento de medição	44
3.6 Variáveis de controle, Variáveis de Ruído e Características de interesse	49
3.7 Planejamento de Experimentos	50
4. Resultados e Discussão	56
4.1 Modelos quadráticos da rugosidade Ra e taxa de remoção MRR	59
4.2 Anova para Rugosidade R_a	59
4.3 Características da Taxa de Remoção de Material (MRR).....	64
4.4 Otimização multiobjetivo pelo método NBI	67
5. Experimentos de Confirmação	74
6. Conclusões.....	77
6.1 Contribuições do trabalho	78
6.2 Sugestões para trabalhos futuros	78
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	79

1. Introdução

1.1 Contextualização

Os aços inoxidáveis duplex apresentam em sua microestrutura ferrita e austenita em proporções iguais. A presença da austenita confere ao material ductilidade, tenacidade, soldabilidade, enquanto a ferrita fornece alta resistência à corrosão sob tensão (MAVI, 2020).

Estes aços têm tido uma utilização crescente, uma vez que apresenta combinação adequada entre resistência mecânica e resistência à corrosão por pite. Isto faz com que estes materiais sejam utilizados em vários ramos da atividade produtiva, como indústrias de segmento de petróleo e gás, indústrias químicas, de celulose, de componentes eletrônicos, metalúrgicos, dentre outros (JEBARAJ *et al.*, 2017).

Para que estes aços possam ser aplicados nestas e em outras aplicações, é necessário que passem por processos de fabricação específicos, destacando-se a usinagem, pois por meio deste processo é possível à obtenção de superfícies com boas qualidades superficiais e livre de pequenas depressões localizadas, o que vem a contribuir ainda mais com a propriedade de resistência a corrosão por pite de equipamentos e/ou componentes constituídos deste aço (GAMARRA, 2017).

Embora os aços inoxidáveis duplex apresentem excelentes propriedades, estudos do processo de usinagem por fresamento destes aços ainda pode ser explorado, pois estes aços possuem diferentes características de usinabilidade, o que torna complexa a escolha dos níveis adequados dos parâmetros de corte para o seu fresamento, tornando essencial o desenvolvimento de pesquisas neste tema (KALIDASS *et al* 2014).

Neste contexto, pesquisadores vem aplicado metodologias estatísticas em processos de usinagem como auxílio na escolha dos níveis adequados dos parâmetros de corte, buscando ainda, compreender a relação das variáveis de entrada com as variáveis de saída. Uma dessas metodologias é o planejamento de experimentos (DOE). Montgomery (2013) define planejamento de experimentos como sendo uma forma sistemática de investigação da relação entre as variáveis de um processo. De acordo com Myers *et al.* (2016), as técnicas de DOE tem o objetivo de promover melhorias nas características de qualidade de produtos e processos, reduzir

o número de experimentos e otimizar a utilização de recursos. Um planejamento de experimentos pode ser realizado com uma ou várias séries de testes, objetivando verificar os impactos das variáveis do processo nas respostas de interesse. As variáveis de entrada podem ser do tipo controláveis e incontroláveis. As variáveis controláveis, podem ser controladas na prática e as incontroláveis são passíveis de controle somente em ambiente experimental.

Outra questão destacada por Myers *et al.* (2016) é com relação a fatores que não são possíveis de serem controlados em determinado processo, conhecido como variáveis incontroláveis ou ruídos e que influenciam para uma variabilidade nos resultados. Tais fatores podem estar associados, por exemplo, a condições ambientais ou limitações do processo e/ou produto. Para contornar esta variabilidade nos resultados, causados pelas variáveis de ruído, utiliza-se o projeto de parâmetro robusto (do inglês, *Robust Parameter Design* - RPD) que pode ser entendido como um tipo de abordagem para a análise e melhoria de processos.

A solução de problemas de otimização robusta pode ser obtida por meio da minimização do erro quadrático médio, construído para as variáveis de um dado processo. Seu desenvolvimento é por meio das equações de média e variância a partir de um arranjo combinado projetado para experimentos. Porém durante o processo de experimentação e modelagem destas equações, pode não ser possível garantir uma padronização na convexidade das funções objetivo. Para solucionar este problema existe uma metodologia proposta por Das e Dennis (1988) como o método de Interseção Normal à Fronteira (do inglês, *Normal Boundary Intersection* - NBI). Este método contribui para a melhoria da qualidade de processos industriais, definindo-se *setups* ótimos que sejam capazes de neutralizar a influência das variáveis de ruído o que, via de regra, aumentará consideravelmente os valores dos coeficientes de capacidade de processo (BRITO, 2015).

A luz dos fatos apresentados, pode-se notar que a otimização robusta em processos de fabricação mecânicos, como os de usinagem, pode ser realizada utilizando os três métodos mencionados: Metodologia de Superfície de Resposta, Projeto de Parâmetros Robustos e o Método da Interseção Normal a Fronteira. Diante deste cenário, este trabalho possui os seguintes objetivos.

1.2 Objetivo Geral

Este trabalho pretende realizar uma otimização robusta biobjetivo no processo de fresamento de topo do aço inoxidável duplex UNS S32205 utilizando fresas de metal duro, visando a melhoria da qualidade e produtividade deste processo. Para alcançar este objetivo foram utilizadas as metodologias de Metodologia de superfície de resposta (*MSR*), Projeto de Parâmetro Robusto (*PPR*), Erro Quadrático Médio (*EQM*) e Interseção Normal a Fronteira (*NBI*). As respostas analisadas serão a rugosidade média (R_a) e a taxa de remoção de material (*MRR*).

1.3 Objetivos Específicos

Este trabalho tem como objetivos específicos:

- Obter modelos matemáticos para as respostas de interesse que contemplem os efeitos de interação das variáveis de controle (v_c , f_z , a_e e a_p) e de ruídos (v_b , Q e t_0), por um arranjo combinado.
- Identificar as variáveis de processo mais influentes nas respostas;
- Obter os modelos matemáticos de média e variância, estabelecendo a função *EQM*;
- Obter os alvos para as características de interesse através da otimização das funções de média utilizando o algoritmo reduzido generalizado (*GRG*);
- Otimizar os parâmetros das variáveis de controle utilizando o *GRG*, conforme os modelos matemáticos desenvolvidos para cada resposta e gerar a curva dos pontos ótimos, de acordo com o método da interseção normal à fronteira;
- Estabelecer o ponto ótimo da fronteira de Pareto para os parâmetros de processo.
- Desenvolver uma estratégia para os ensaios de confirmação baseada em arranjos ortogonais de Taguchi do tipo *L9* a fim de determinar a redução da variância e a melhoria na média no processo de fresamento de topo;
- Analisar e discutir os resultados encontrados do ponto de vista do processo de fresamento.

1.4 Justificativa

O aço inoxidável duplex UNS S32205 é amplamente empregado na indústria petroquímica, química, de gás, de celulose e de manufatura. A obtenção de superfícies com alta qualidade e exatidão por fresamento neste material, pode garantir menores taxas de corrosão quando utilizado em ambientes corrosivos. As aplicações dos aços inoxidáveis duplex estão cada vez maiores, sendo aplicadas em pontes livres

de corrosão, indústrias de celulose onde são feitos tanques de armazenamento, digestores, etc. (FAN, et al., 2017)

Os aços inoxidáveis duplex geralmente apresentam comportamentos diferentes na usinagem, quando comparado a outros aços. Isto ocorre devido a sua baixa condutividade térmica decorrente da sua composição química, de modo que a escolha dos níveis adequados dos parâmetros de corte para o processo de usinagem de fresamento frontal dessa liga é complexa.

Na usinagem de aços inoxidáveis, geralmente, as velocidades de corte são baixas, os desgastes são prematuros, as vidas das ferramentas de corte são baixas, as taxas de remoção de cavacos são pequenas e grandes forças e potências de corte são necessárias. Outro ponto que deve ser também mencionado é que os aços inoxidáveis duplex sofrem um rápido endurecimento durante o processo de usinagem, e o processo de formação do cavaco pode ser estudado.

Entender os efeitos das variáveis controláveis do processo sobre as respostas de interesse é fundamental para viabilizar a correta escolha dos níveis dos parâmetros. A modelagem das funções objetivo possibilita a previsão dos níveis de qualidade e produtividade do processo, garantindo ao engenheiro antecipar as características do processo e da superfície usinada, atendendo às especificações de projeto.

Estudar a robustez do processo de fresamento de topo do aço inoxidável duplex UNS S32205 promovem a obtenção de níveis das variáveis de processo com mínima sensibilidade em relação às variáveis de ruído. A metodologia do arranjo combinado possibilita a redução do número de ensaios, além de estudar as interações entre variáveis de processo e ruído. A modelagem e minimização do *EQM* viabiliza a minimização do viés e da variância da resposta, de forma a garantir atendimento às especificações com mínima probabilidade de não atendimento às tolerâncias.

Com a finalidade de otimizar as respostas rugosidade e taxa de remoção de material simultaneamente, o emprego de técnicas triviais de otimização pode não apresentar resultados satisfatórios para o processo de fresamento de topo do aço inoxidável duplex UNS S32205. Desta forma, a utilização das metodologias do erro quadrático médio e interseção normal à fronteira proporcionou uma melhor exploração entre as características de interesse, permitindo ao engenheiro de processo explorar os mais diversos cenários e selecionar o cenário mais adequado para atender cada situação de planejamento.

Portanto, baseado no contexto delineado, tem-se que pesquisas na área de usinagem de aços inoxidáveis duplex estão ainda em aberto, contudo, se mostram extremamente relevante na indústria metal mecânica, visto suas aplicabilidades, suas complexidades de usinagem, o que motiva o desenvolvimento do presente trabalho de dissertação.

1.5 Delimitação

O presente trabalho é limitado ao estudo do fresamento de topo do aço inoxidável duplex UNS S32205 com fresa de topo e inserto de metal duro intercambiável.

- Os parâmetros analisados no estudo foram à velocidade de corte (v_c), avanço por dente (f_z), profundidade de corte (a_p), largura fresada (a_e). Como variáveis incontroláveis ou de ruído foram escolhidos desgaste de flanco (v_b), vazão de fluido (Q) e comprimento em balanço (l_{to}). Todas variáveis escolhidas considerando a influência direta na qualidade e na produtividade do processo.
- Neste estudo, foi proposto a modelagem e otimização das respostas relativas à qualidade superficial e a produtividade. As respostas estudadas foram rugosidade R_a e taxa de remoção de material MRR .
- Em relação as técnicas de projeto de experimentos e modelagem, foram utilizados a metodologia de superfície de resposta e o projeto de parâmetro robusto por meio do arranjo combinado.
- Para a otimização, esta pesquisa propôs a otimização biobjetivo das respostas por meio da metodologia do Erro quadrático médio e da Interseção normal a fronteira.
- O algoritmo utilizado na otimização das respostas foi o Gradiente Reduzido Generalizado.

Contudo, os resultados obtidos não podem ser extrapolados para outros casos de usinagem com materiais diferentes. No entanto, estas metodologias podem ser aplicadas a outros processos que visem avaliar interações entre variáveis de controle e ruído.

1.6 Estrutura do trabalho

Este trabalho é composto por seis capítulos, apresentados conforme descrição abaixo:

Capítulo 1: Realiza uma contextualização sobre a importância de pesquisas no processo de fresamento de topo em aços inoxidáveis duplex, visto suas altas aplicações em indústrias petrolíferas. Na sequência, são apresentados os objetivos gerais e específicos, as justificativas e as delimitações desta pesquisa.

Capítulo 2: Apresenta uma síntese sobre a revisão da literatura, onde são apresentados os principais conceitos relacionados ao processo de fresamento. Quanto as técnicas de otimização, são abordados o projeto e análise de experimentos DOE, Metodologia de Superfície de Respostas, Projeto de Parâmetro Robusto (*PPR*), Erro Quadrático Médio (*EQM*) e o Método da Interseção normal a Fronteira (*NBI*).

Capítulo 3: Descreve a metodologia, o planejamento de experimentos, o detalhamento dos equipamentos, ferramentas e materiais utilizados para a usinagem e medição dos corpos de prova.

Capítulo 4: Aborda os resultados onde são apresentadas as modelagens das respostas, os ajustes dos modelos, os gráficos dos efeitos principais e das interações, a otimização pelo *EQM* e a construção da fronteira de Pareto com as soluções Pareto-ótimas do processo.

Capítulo 5: Apresenta os resultados dos experimentos de confirmação, comprovando a eficácia das metodologias empregadas nesta pesquisa.

Capítulo 6: Apresenta as conclusões, contribuições e sugestões para trabalhos futuros.

Capítulo 7: Referências bibliográficas.

2. Fundamentação Teórica

2.1 Introdução

Este capítulo tem como objetivo realizar o embasamento teórico a respeito do fresamento de topo de aços inoxidáveis duplex, bem como a escolha da fresa, número de dentes e posicionamento do dente com os tipos de aplicações. Além disso, uma explicação sobre as técnicas de otimização.

2.2 Aços Inoxidáveis Duplex

O surgimento dos aços inoxidáveis duplex (do inglês, Duplex Stainless Steel - DSS) ocorreu na França entre a década de 30 e 40, causado um erro de adição de elementos de liga na fusão de um aço inoxidável austenítico (ASS – Austenitic Stainless Steel) 18% Cr – 9% Ni – 2,5% Mo, ocasionando uma composição química com alta fração volumétrica de ferrita em uma matriz austenítica (MORELO, 2014). Os aços inoxidáveis duplex são ligas que apresentam ferrita e austenita, por isso a denominação duplex, em proporções volumétricas equilibrada de 50% em suas microestruturas (BERGUIGA et al., 2019). A presença da austenita confere ao material ductilidade, tenacidade, soldabilidade, enquanto a ferrita fornece alta resistência à corrosão sob tensão (MAVI, 2020).

A utilização dos limites estreitos na composição química dos DSS se fez importante com o passar do tempo, visto que, estudos demonstraram que as faixas ideais de Cr, Mo e N restringem a formação de fases intermetálicas e aumentam a resistência à corrosão. Portanto, a faixa de composição química ideal destes aços precisa ser mantida entre a metade superior do UNS 31803. Uma composição química de faixa mais estreita foi introduzida com denominação de UNS S32205 (IMOA, 2014).

A composição química padrão do aço inoxidável duplex têm 22% Cr, 5% Ni e 3% Mo com pequena porcentagem de N. Para melhor controle do balanço estrutural e melhorias da qualidade a resistência por pites, são adicionadas porcentagens de Silício, Tungstênio e Cobre (ASM, 2005, IMOA, 2014).

O comportamento bifásico do aço inoxidável duplex está relacionado com a adição de nitrogênio (N) em sua estrutura, onde houve um aumento significativo de austenita para quase 50%, melhorando assim sua tenacidade e conseqüentemente suas propriedades anticorrosivas a cloretos (Philip et al., 2015). Os elevados valores do alongamento da austenita combinado com elevado limite de escoamento da ferrita

faz com que estes aços tornem superiores em determinadas aplicações se comparado aos aços inoxidáveis convencionais (KOYEE, R *et al.*, 2014).

Para serem classificados como aços inoxidáveis duplex, necessitam ter um valor de resistência a corrosão por pites (PRE = Pitting Resistance Equivalent) superior a 20. Imoa (2014) estabelece este índice em cinco tipos de DSS, sendo eles: hiper duplex (PRE = 49-53), super duplex (PRE = 38-43), standard duplex (PRE = 34-38), lean duplex com Mo (PRE = 27-34), lean duplex (PRE = 21-27).

A faixa de tenacidade dos aços inoxidáveis duplex estão entre a dos aços inoxidáveis austenítico e a dos aços inoxidáveis ferríticos, onde podem ser aplicadas seções mais finas de materiais que necessitem de uma maior resistência à corrosão (SILVA *et al.*, 1988). Os DSS são mais resistentes que os aços austenítico e os ferríticos em seu estado recozido, tendo seu limite de escoamento entre 550 e 690 MPa e dependendo da sua necessidade e/ou aplicabilidade é possível ainda aumentar sua resistência mecânica por meio de tratamento térmico. Além disso, é possível também aumentar sua resistência a corrosão galvânica e por pite com a adição de Mo em sua composição química (DAVIS, 1994).

Para que estes aços sejam aplicados a componente de máquinas, estruturas, peças, dentre outros, é necessário que passem por processos de fabricação, como de usinagem. Dentro deste contexto, destaca-se o fresamento de topo, pois este processo de usinagem é um dos mais utilizados na indústria metalmeccânica (PERUCHI *et al.*, 2020).

Segundo Machado (2011), a usinabilidade pode ser entendida como sendo o grau de dificuldade de se usinar um determinado material. Existe uma relação entre os elementos de liga dos aços inox duplex e o grau de dificuldade da usinagem destes aços. Quando maior o teor de elementos de liga maior será a dificuldade em usinar e isto causa um desgaste de forma intensa nas ferramentas, além de reduzir a qualidade do acabamento superficial (RAMOS, 2004; ASM HANDBOOK, 2005).

2.3 Usinagem por Fresamento

Os processos de fabricação evoluíram juntamente com o desenvolvimento e descoberta de novos materiais. Estes processos são divididos em dois tipos básicos: os que são responsáveis pela remoção do cavaco (porção de material retirada da peça), ou seja, os denominados processos de usinagem e os que não atuam diretamente nesta remoção, como por exemplo, processos de laminação, extrusão e

estampagem (MACHADO *et al.*, 2011). A usinagem representa uma parcela significativa, dentre os processos de fabricação, sendo possível afirmar que este processo se faz presente em alguma etapa da fabricação de determinado produto das indústrias do ramo de manufatura (DINIZ *et al.*, 2014).

O fresamento é um dos processos de usinagem mais empregados, visto seus aspectos como alta taxa de remoção de material, produção de formas com boa precisão dimensional e geométrica, sendo utilizado na fabricação de superfícies planas, contornos, ranhuras e cavidades (MARCELINO *et al.*, 2004; DINIZ *et al.*, 2014). Este processo é bastante utilizado nas indústrias metal mecânica, aeroespacial, manufatura de setores automotivos, setores de energia, alimentício.

Ferraresi (1977) diz que o fresamento é um processo mecânico de usinagem que realiza a obtenção de superfícies com o auxílio de ferramentas multicortantes. Segundo Diniz *et al.* (2014), o processo de fresamento é caracterizado pela remoção do material utilizando uma ferramenta denominada fresa. Essa ferramenta possui arestas cortantes localizadas de forma simétrica em torno de sua estrutura, onde seu movimento de corte acontece pela rotação da fresa ao redor do eixo combinado com o movimento de avanço da mesa da máquina-ferramenta. Estes dois movimentos são responsáveis pela formação e expulsão do cavaco na região de corte.

É importante ressaltar que existem diversas operações de fresamento e elas são diferenciadas pela relação do tipo de fresa aplicada e como o processo é realizado para a obtenção das formas requeridas para a peça trabalhada. A Figura 1 apresenta os principais tipos de fresamento que são classificados com relação ao movimento de corte durante o processo de fresamento.

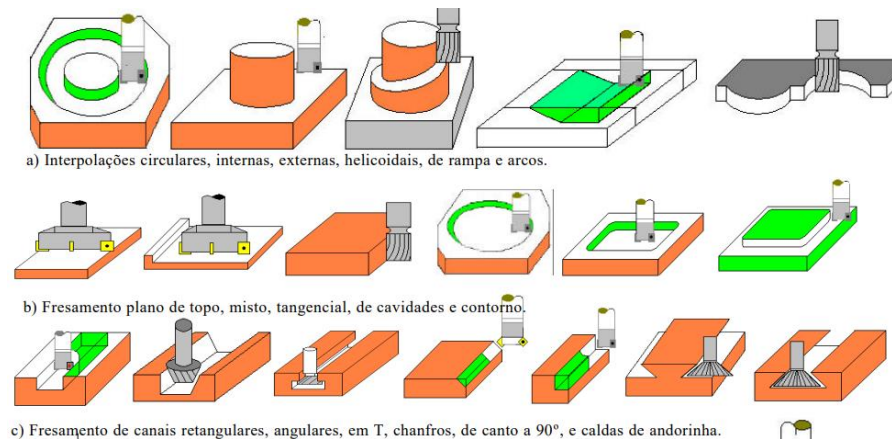


Figura 1 – Operações de Fresamento

Fonte: (MACHADO *et al.*, 2011)

No processo de fresamento existem dois tipos de corte, o concordante e o discordante. O corte discordante (Figura 2a) é o avanço que conduz a peça contra o movimento de giro dos dentes da fresa aumentando a espessura gradualmente do zero até a espessura máxima, causando assim um atrito excessivo entre a peça e a aresta de corte, levando a deformação plástica na região do corte. Já quando o avanço conduz no mesmo sentido do dente da fresa, denomina-se movimento concordante (Figura 2b). No fresamento concordante, as inconveniências geradas pelo corte discordante são corrigidas, já que a força de usinagem tem o mesmo sentido e sempre estará perpendicular ao avanço, fazendo que a peça seja impulsionada contra a mesa da fresadora. O fresamento concordante em geral, proporciona um melhor acabamento superficial (DINIZ et al., 2014).

No fresamento tangencial o corte é realizado por uma ferramenta cujos dentes estão dispostos na sua periferia. No fresamento frontal, a fresa apresenta dentes na sua superfície frontal e cujo eixo é perpendicular à superfície que está sendo gerada. O fresamento de topo pode ser considerado como sendo uma combinação do fresamento frontal e tangencial e é diferenciado mais pelo tipo de aplicação que pela definição (SOUTO, 2007). Um exemplo de fresa de topo pode ser visualizada, conforme Figura 3.

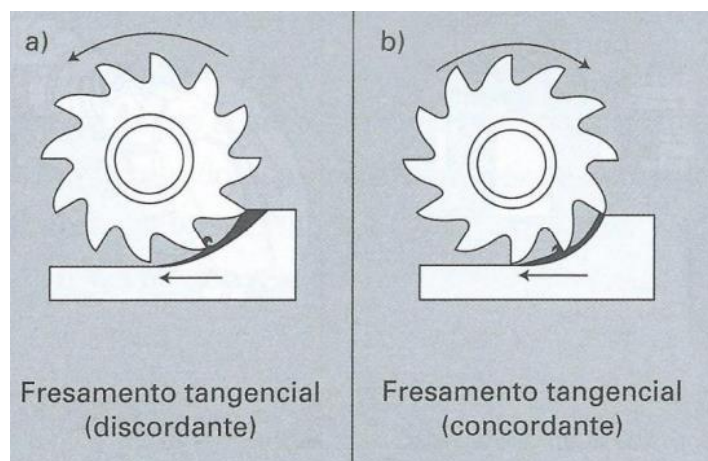


Figura 2 – Fresamento concordante e discordante

Fonte: (SOUTO 2007)

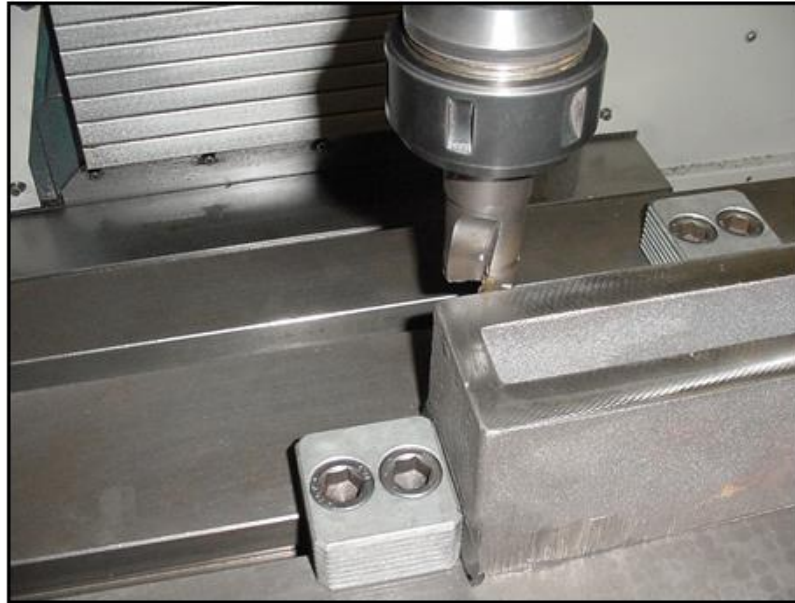


Figura 3 - Representação de um fresamento de topo

Fonte: (SOUTO 2007)

Baseado nesse contexto pode-se afirmar que o processo de fresamento é uma operação versátil sendo aplicado à usinagem de diferentes perfis geométricos e para alcançar esta versatilidade, muitas variáveis são incorporadas no processo, tornando-o um desafio quanto à otimização (LOPEZ, 2012).

2.4 Parâmetros importantes no processo de fresamento

Os avanços da tecnologia das máquinas operatrizes e ferramentas conduzem a processos cada vez mais complexos, uma vez que as velocidades de corte e avanços estão cada vez maiores com o objetivo de aumentar a produtividade. No entanto, desgastes prematuros e/ou quebras acidentais podem ocorrer e interromper o fluxo de produção, acarretando em perdas de tempo e refugo de peças (LONDERO, 2017). Nesse sentido é fundamental ter-se um conhecimento do processo de usinagem bem como de seus corretos parâmetros para se buscar desenvolver técnicas, como as computacionais, que permitam verificar a melhor combinação associada a cada processo de usinagem.

O conhecimento dos parâmetros de corte é essencial para todos os processos de usinagem, pois conforme mencionado, a correta combinação destes parâmetros aumenta o tempo de vida da ferramenta e conduz a um melhor desempenho e aproveitamento do processo. Dentre esses parâmetros, a velocidade de corte (v_c), definida como a velocidade instantânea medida a partir da aresta cortante da ferramenta, segundo a direção e sentido do corte é um dos principais parâmetros de

corde. A Equação 1 descreve matematicamente a velocidade de corte (MACHADO *et al.*, 2011).

$$V_c = \frac{\pi d n}{1000} (m / \text{min}) \quad (1)$$

Sendo: d o diâmetro da peça ou da ferramenta (milímetros) e n o número de rotações por minuto (*rpm*).

Machado *et al.* (2011) afirmam que o desgaste de ferramentas está diretamente relacionado, principalmente, aos parâmetros de usinagem usados, tais como, velocidade de corte, avanço e profundidade de corte, além do material da peça. Dentre estes parâmetros, a velocidade de corte (v_c) é o parâmetro mais influente no desgaste da ferramenta de corte.

A velocidade de avanço (v_f) é definida como sendo a velocidade instantânea medida a partir do ponto de referência a aresta cortante, segundo a direção e sentido do avanço. A velocidade de avanço pode ser obtida por meio da Equação 2.

$$V_f = f * n \text{ (mm/min)} \quad (2)$$

Sendo: f o avanço (milímetro/revolução) e n é o número de rotações por minuto (*rpm*). É importante ressaltar que, o avanço consiste no percurso de avanço em cada volta (revolução), também conhecido como avanço por rotação. No caso de ferramentas que possuem mais de um dente, como a fresa, distingue-se ainda o avanço por dente f_z , que representa o percurso de avanço de cada dente medido na direção do avanço da ferramenta, representada pela Equação 3.

$$f = f_z * z \quad (3)$$

Sendo: f o avanço por rotação (mm/revolução), f_z o avanço por dente (mm/dente) e z o número de dentes. No processo de fresamento é importante mencionar também o avanço da mesa que pode ser entendido como sendo o avanço da mesa é o deslocamento da peça por minuto, dado conforme a Equação (4) (DINIZ *et al* 2014).

$$V_f = f_z * z * n \quad (4)$$

Sendo: f_z o avanço por dente; z o número de dentes e n consiste nas rotações por minuto.

As rotações por minuto podem ser relacionadas com a velocidade de corte e o diâmetro da peça conforme a Equação (5).

$$n = \frac{v_c * 1000}{\pi * d} (\text{rpm}) \quad (5)$$

Sendo: v_c a velocidade de corte e “ d ” o diâmetro da peça ou da ferramenta (milímetros).

Além dos parâmetros de corte mencionados, há também a profundidade de corte (a_p) como sendo a quantidade que a ferramenta penetra na peça, medida perpendicularmente ao plano de trabalho. Tem-se também outro parâmetro de importante conhecimento, a penetração de trabalho (a_e), que consiste na quantidade que a ferramenta penetra na peça, medida no plano de trabalho e perpendicular à direção de avanço (DINIZ *et al.*, 2014). A Figura 4 ilustra estes dois parâmetros.

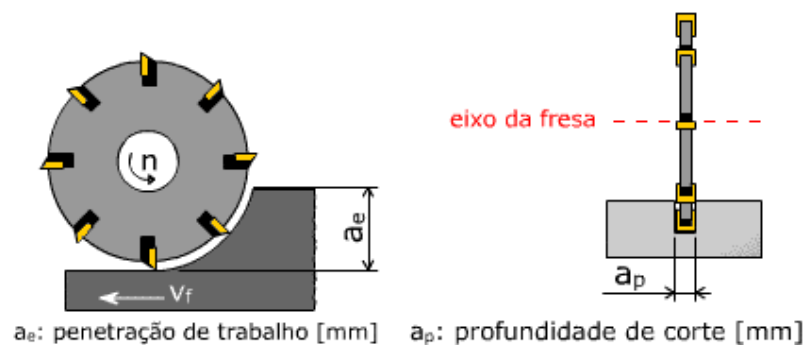


Figura 4 - Representação da penetração de trabalho e da largura de corte

Fonte: (SOUTO 2007)

De um modo geral, dentro do contexto dos processos de usinagem, a escolha correta das ferramentas e de seus parâmetros não apenas se torna uma questão de acompanhamento da tecnologia, mas uma exigência em razão da alta competitividade em relação a atender as necessidades de projeto atribuídas a um produto, bem como em relação à qualidade e preço.

Neste sentido, no processo de fresamento Diniz *et al.*, (2014) diz que para a correta seleção de fresas é necessário levar em consideração duas questões:

1. O diâmetro da Fresa;
2. O numero de dentes da fresa.

A principal influência na escolha do diâmetro da fresa (D_c) é a largura da superfície fresada ou a penetração de trabalho (a_e), Conforme figura (5a). Dependendo se a largura fresada for menor ou igual ao diâmetro da fresa, heverá pequenos valores de espessura de corte (h), isso ocorrerá tanto na entrada quanto na saída do dente, ocorrendo assim maiores pressões de corte, ocasionando assim maiores vibrações no sistema. Contudo, se a fresa possuir diâmetro muito discrepante comparado com a largura fresada, pode ocasionar lascamento e quebra da pastilha

devido ao choque do dente da fresa com a peça, conforme figura (5b) (DINIZ *et al.*, 2014). Assim é possível estabelecer um valor adequado do diâmetro da fresa, através da Equação (6).

$$D_c = 1,3 \times a_e \quad (6)$$



Figura 5 - Posicionamento da aresta de corte
SANDVIK COROMANT (2020)

Outras considerações que se deve realizar acerca da escolha da quantidade do número de dentes é a especificação do material da peça, ou seja, materiais que produzem longos cavacos necessitam de um maior espaço entre os inserts, por exemplo fresa de passo largo (*L*). Já a largura da peça a ser fresada deve manter no mínimo 2 dentes ao mesmo tempo durante a operação de corte com o objetivo de reduzir o efeito da vibração fornecendo maior estabilidade na máquina, na fresa e no dispositivo de fixação-peça, por exemplo Fresa de passo fino tipo (*M*). Por fim para conseguir excelentes acabamentos superficiais, é necessário maior número de inserts e um menor avanço por dentes, por exemplo Fresa de passo extrafino tipo (*H*) (Diniz *et al.*, 2014)

O fresamento de topo de aços inoxidáveis tem grande relevância tanto para as indústrias de petróleo o gás como para indústrias que utilizam estes aços como componentes mecânicos. Trabalhos que abordam o uso do fresamento de topo do aço inoxidável duplex são escassos, contudo, é possível encontrar alguns trabalhos na literatura.

Bouزيد *et al.* (2004) avaliaram a influência da velocidade de corte, do avanço e da profundidade de corte na rugosidade R_a no processo de fresamento de topo ascendente do aço inoxidável duplex. Os autores concluíram que em altas velocidades de corte e baixos avanços ocorre melhora da rugosidade da peça.

Zhang *et al.* (2007) realizaram uma otimização no processo de fresamento de topo do aço inoxidável duplex. O estudo avaliou a influência do avanço por dente, da velocidade de corte, da profundidade de corte, da temperatura da superfície e do desgaste de flanco na rugosidade R_a . Os resultados experimentais indicam que a velocidade de corte e o avanço por dente foram mais influentes na rugosidade do que a profundidade de corte para operação de fresagem. Além disso, um dos fatores de ruído, desgaste da ferramenta, foi estatisticamente significativo, ou seja, com o aumento do desgaste da ferramenta, ocorre o aumento da rugosidade da peça.

Figueiredo *et al.* (2009) avaliaram a influência das variáveis velocidade de corte, avanço por dente, profundidade de corte e vazão na rugosidade do fresamento de topo do aço inoxidável super duplex. Os resultados mostraram que o menor avanço e a utilização de MQL obtiveram as menores rugosidades. A vida da ferramenta também aumentou com a utilização de MQL.

Selvaraj *et al.* (2013) avaliaram a influência das variáveis controláveis do processo nas respostas, rugosidade, força de corte e o desgaste de flanco no fresamento de topo do aço inoxidável duplex. Eles observaram que estas variáveis de controle do processo influenciaram de maneira significativa as respostas, onde a rugosidade e a força de corte foram minimizadas utilizando altas velocidade de corte e baixos avanços, já o desgaste de flanco foi minimizado em baixas velocidades de corte e baixos avanços.

Philip *et al.* (2015) estudaram a influência das variáveis de controle na rugosidade do processo de fresamento de topo do aço inoxidável duplex. Os autores concluíram que a equação de previsão conseguiu mostrar que a o avanço por dente é o fator mais importante na rugosidade da peça seguido profundidade de corte e da velocidade de corte.

Gouveia *et al.* (2016) realizaram um estudo no processo de fresamento de topo do aço inoxidável duplex. O objetivo foi avaliar o desempenho da usinagem utilizando diferentes fresas de topo. Os autores concluíram que fresas de topo com quatro arestas mantiveram uma melhor rugosidade, apresentando os menores resultados de R_a , R_z e R_{max} .

E. Uhlmann *et al.* (2017) analisaram a influência das variáveis do processo no fresamento de topo do aço inoxidável duplex utilizando fresa com insertos intercambiáveis e com refrigeração interna no suporte. Os autores concluíram que houve um aumento da produtividade com o uso de uma unidade refrigerada

internamente. Outro ponto que foi comparado é que com a ferramenta refrigerada houve um aumento na vida útil da ferramenta.

Airao *et al.* (2018) realizaram um estudo no processo de fresamento de topo do aço inoxidável super duplex 2507 para avaliar a influência das variáveis do processo e do fluido de corte na rugosidade R_a . Os autores concluíram que o avanço por dente foi o fato mais influente na rugosidade. Constatou-se também que o acabamento superficial obtido na usinagem com fluido é muito melhor em relação à usinagem a seco.

Policena *et al.* (2018) analisaram uma análise da influência das variáveis controláveis do processo nas rugosidades R_a e R_z do fresamento de topo de acabamento do aço inoxidável duplex UNS S32205. Os autores concluíram que a variável que mais influenciou nas respostas foi o avanço por dente, onde os menores valores de rugosidade foram encontrados em avanços menores, tendo R_a e R_z valores de 0,182 e 1,302 μm , respectivamente.

Policena *et al.* (2019) realizaram um projeto de experimentos Box-Behnken no processo de fresamento de topo do aço inoxidável duplex LDX 2101 para analisar a influência dos parâmetros de corte na rugosidade. Os autores concluíram que dentre os parâmetros selecionados, o avanço por dente (f_z) foi a variável de entrada mais significativa sobre os valores médios de R_a e R_z .

Oliveira *et al.* (2019) analisaram a rugosidade R_a no fresamento de topo do aço inoxidável duplex UNS S32205. Oliveira *et al.* (2019) também avaliaram a influência da quantidade de fluido de corte no fresamento de topo do aço inoxidável duplex UNS S32205. Selvaraj *et al.* (2019) realizaram uma análise experimental na rugosidade do aço inoxidável duplex na operação de fresamento de topo. Garcia (2019) realizaram uma análise comparativa do fresamento frontal de acabamento em aços inoxidáveis duplex dx 2205 e ldx 2101.

2.5 Rugosidade

A rugosidade pode ser caracterizada por diversos parâmetros como R_t , R_z , $R_{máx}$ e R_a . Entre os parâmetros de amplitude, o mais utilizado é o R_a , pois é empregado como parâmetro de controle de processo, uma vez que, suas alterações representam alterações no processo, em especial no desgaste da ferramenta (MACHADO, 2011). De acordo com ABNT NBR 4287/2002 a rugosidade média ou desvio aritmético do perfil (R_a) é definida pela análise da média aritméticas dos valores absolutos das

ordenadas no comprimento de medição (l_m) em relação à linha média do perfil primário, conforme Figura 6.

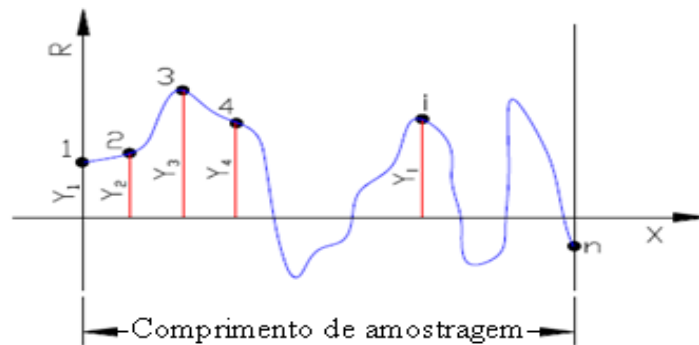


Figura 6 - Rugosidade média (R_a)

Fonte: (GARCIA 2019)

Amorim, (2002) classifica a rugosidade como sendo a magnitude dominante relacionada à usinabilidade do material, à forma da ferramenta, às condições de usinagem, as forças de atrito, ao desgaste e, em geral, à funcionalidade da superfície. Já Chevier *et al.*, (2003) dizem que o principal objetivo de uma análise quantitativa da rugosidade é a garantia de uma identificação de parâmetros suficientes para a caracterização do acabamento superficial.

De acordo com Davim (2010), o parâmetro de rugosidade R_a pode ser correlacionado com algumas propriedades funcionais de uma superfície, sendo estas: rigidez de contato; resistência à fadiga; condutividade térmica e elétrica; atrito e desgaste; lubrificação; vedação mecânica; fadiga por corrosão e tolerâncias de montagem

Existem normas técnicas que tratam deste parâmetro, como a NBR ISO 4287 (2002) que define que a rugosidade desempenha um papel fundamental no comportamento dos componentes mecânicos, pois influi diretamente na qualidade de deslizamento, na resistência oferecida pela superfície ao escoamento de fluidos e/ ou lubrificantes, na resistência e corrosão e a fadigas. As normas ISO 2632 e a DIN 4766, estabelecem valores e critérios para a rugosidade, conforme Tabela 1.

Tabela 1 – Definição de Rugosidade

Grupo principal	Processos de Usinagem	Valores atingíveis médios de R_a em μm							
		0,2	0,4	0,8	1,6	3,2	6,3	12,5	25
Usinagem	Alisamento								
	Furação								
	Mandrillamento								
	Escareamento								
	Alargamento								
	Fresamento tangencial								
	Fresamento de topo								

Fonte: DIN 4766

2.6 Sistemas de Medição de Rugosidades

Nas medições de rugosidade, os valores de *cut-off* são definidos como sendo o comprimento na direção X usado para identificar as irregularidades características do perfil. Já o comprimento de medição é entendido como sendo o comprimento na direção do eixo X , utilizado para estabelecer o perfil sob avaliação e pode conter um ou mais comprimentos de amostragem. Normalmente é recomendado um comprimento de medição cinco vezes o comprimento de amostragem, de forma a obter uma maior confiança dos dados (MACHADO, 2011). As Tabelas 2 e 3 apresentam os comprimentos de amostragem recomendados para os perfis de rugosidade aperiódicos e periódicos, respectivamente.

Tabela 2 - Comprimento da amostragem para perfis aperiódicos

Rugosidade R_a [μm]	Comprimento da Amostragem – l_e [mm]	Comprimento de Medição – l_m [mm]
Até 0,1	0,25	1,25
De 0,1 até 2,0	0,80	4,00
De 2,0 até 10	2,50	12,50
Acima de 10,0	8,00	40,00

Fonte: (ABNT NBR 4287/2002)

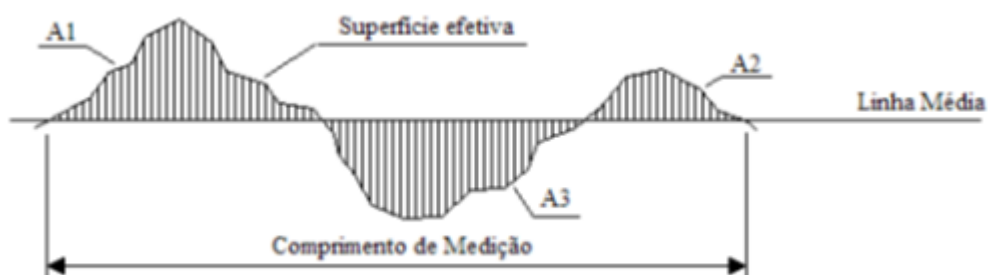
Tabela 3 - Comprimento da amostragem para perfis periódicos

Rugosidade R_a [μm]	Comprimento da Amostragem – l_e [mm]	Percurso de Medição – l_m [mm]
De 0,01 até 0,032	0,08	0,40
De 0,032 até 0,1	0,25	1,25
De 0,1 até 0,32	0,8	4,00
De 0,32 até 1,00	2,50	12,50
De 1,00 até 3,20	8,00	40,00

Fonte: (ABNT NBR 4287/2002)

Para as medições da rugosidade são utilizados dois sistemas básicos de medida. O primeiro é referente ao sistema de medição por linha média e o segundo referente à linha envolvente, onde o mais utilizado é o sistema da linha média. O processo de medição deste sistema é realizado a partir de uma linha média paralelamente à direção do perfil, dentro do percurso de medição, ou seja, de modo que as somas das áreas superiores, compreendida entre ela e o perfil efetivo seja igual a soma das áreas inferiores, conforme Equação 7. A Figura 7 apresenta o esquema da linha média.

$$A1 + A2 = A3 \quad (7)$$

**Figura 7** – Linha Média

Fonte: (MACHADO et al. 2009)

Neste sentido, Quintana *et al.* (2011) analisaram a relação da velocidade de corte, do avanço por dente, da profundidade axial de corte e da profundidade radial de corte sobre a rugosidade no fresamento do aço ABNT H13 (43 HRC). Os resultados mostram que, maiores velocidades de corte proporcionaram os menores valores de rugosidade. Além disso, os autores verificaram que os menores valores de rugosidade

foram obtidos com os menores níveis de avanço por dente e profundidades axial e radial de corte.

Scandiffio et al. (2016) avaliaram a influência da estratégia de corte sobre a rugosidade do aço ABNT D6 (60 HRC) no fresamento de acabamento. Segundo os autores, os menores valores de rugosidade foram obtidos no fresamento em cópia descendente, uma vez que, nesta condição, o centro da ponta da ferramenta estava em contato com a superfície usinada, proporcionando maior rigidez. Já no fresamento em cópia ascendente apresentou maiores valores de rugosidade porque, nesta condição, a ferramenta realiza o corte com o diâmetro efetivo máximo, favorecendo vibrações de baixa frequência que implicaram no aumento da rugosidade.

Kull Neto (2016) avaliou a influência do desgaste de flanco da ferramenta e da estratégia de corte sobre a rugosidade do aço ABNT D6 (62 HRC), no fresamento de acabamento. Segundo o autor, ambas as variáveis apresentaram influência estatisticamente significativa sobre a rugosidade.

Wojciechowski *et al.* (2018b) avaliaram a influência da velocidade de corte e do comprimento em balanço da ferramenta sobre a rugosidade do aço de baixa liga endurecido (50 HRC), no fresamento de acabamento com ferramentas de topo esférico.

Brito *et al.* (2015) avaliou a influência da velocidade de corte, avanço por dente, profundidade corte e penetração de trabalho no fresamento de topo do ABNT 1045 na rugosidade utilizando a fresa de metal duro. Os resultados mostraram que o avanço por dente foi o fator que mais influenciou a rugosidade.

Como visto, diversos trabalhos consideraram a velocidade de corte, o avanço por dente, a profundidade de corte a largura fresada como variáveis importantes para o processo de fresamento.

2.7 Fluido de Corte

Um dos problemas principais quando está usinando uma peça é o calor gerado no processo. Um dos meios para dissipar este calor é a utilização de fluido de corte, sendo um dos meios de se conseguir bons resultados de qualidade superficial aliado ao aumento da vida útil da ferramenta (DINIZ et al., 2014). O fluido de corte ajuda a controlar a temperatura na zona de cisalhamento primária, não permitindo que a ferramenta atinja uma temperatura elevada, e promove ainda, a diminuição do atrito nas interfaces cavaco-ferramenta e ferramenta-peça (MACHADOL, 2011).

Em usinagens de aço inoxidável a utilização do fluido de corte é importante, visto que, envolvem elevadas temperaturas (MACHADO *et al.*, 2014). Sabendo dessa importância e atentos ao mercado consumidor e as legislações ambientais, os fabricantes de fluido de corte têm investido em pesquisas e disponibilizado várias composições de fluidos. É a partir destas composições que o fluido de corte desempenha uma dada função na operação, que pode ser classificada como específica e geral (SANTOS *et al.*, 2007). A específica se baseia na necessidade de refrigeração ou lubrificação na operação. Já a geral se baseia em minimizar impactos ambientais, redução de custos adicionais oriundos do processo e problemas causados à saúde.

Em altas velocidades de corte o benefício do fluido de corte é a refrigeração. Além disso, os fluidos de corte podem ajudar na remoção de cavaco da zona de corte e ainda proteger a máquina-ferramenta e a peça contra oxidação. Quando a velocidade de corte durante o processo é relativamente pequena, pode ocorrer formação da aresta postiça de corte (APC), fenômeno que ocorre quando o cavaco adere na superfície de saída da ferramenta, posteriormente encrua e permanece um tempo aderido. Com isso, o benefício do fluido de corte é de lubrificar o processo (DINIZ *et al.*, 2014).

O fluido de corte em usinagem pode ser aplicado de diferentes formas, conforme a Figura 8. A posição e vazão são parâmetros ajustados conforme necessidade de usinagem, e a direção do fluido posicionada na peça é ajustada de forma a expelir o cavaco gerado, ou diretamente na superfície diminuindo a temperatura de operação (SANTOS *et al.*, 2007).

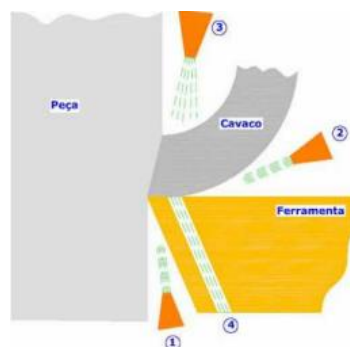


Figura 8 – Direções da aplicação do fluido de corte
ALMEIDA *et al.*, (2007)

2.8 Taxa de Remoção de Material

A taxa de remoção de material (*MRR*) é definida como sendo o volume de material usinado por unidade de tempo. Representa ainda a produtividade do processo de usinagem em termos de volume de material removido em um período específico de tempo (DINIZ *et al.*, 2014). Para a operação de fresamento, o seu cálculo é realizado conforme Equação 8 (ZHOU *et al.*, 2017).

$$\text{MRR} \left[\frac{\text{mm}^3}{\text{s}} \right] = \frac{v_f \times a_p \times a_e}{60} \quad (8)$$

Onde: v_f é a velocidade de avanço (mm/min), a_p é a profundidade de corte (mm), a_e é a largura de corte ou penetração de trabalho (mm).

Ching-kao *et al.*, 2007 propõe uma alternativa para determinar a taxa de remoção de material, conforme Equação 9.

$$\text{MRR} = \frac{(p_i - p_f)}{\rho \times t_c} \quad (9)$$

Onde: p_i é a massa inicial do corpo de prova (g), p_f é a massa final do corpo de prova (g), ρ é a densidade do material (g/cm³). Para o aço inoxidável duplex o seu valor é 7,8 g/cm³ e t_c é o tempo de corte (s).

Portanto, como a taxa de remoção de cavaco é uma variável importante para o processo, vários autores vêm estudando alternativas para realizar a sua maximização, visando o aumento da produtividade. Neste sentido Krishnaprasad *et al.*, (2019) investigaram a relação dos parâmetros de corte no fresamento do aço inoxidável AISI 304. Os autores concluíram que o avanço por dente foi a variável que exerceu maior influência na taxa de remoção, seguida pela profundidade de corte e velocidade de corte.

Zahoor *et al.*, (2020) estudaram a influência dos parâmetros de corte com aplicação de óleo vegetal durante o fresamento do Inconel 718. Os autores observaram que o avanço por dente e profundidade de corte foram as variáveis que mais influenciaram na taxa de material removido.

SHIJIN *et al.*, (2020) investigaram a influência dos parâmetros de corte no fresamento da liga de alumínio AA5083. A profundidade de corte foi a variável de controle que mais influenciou na taxa de remoção de material, seguida pela velocidade de corte e pelo avanço por dente.

Santhakumar *et al.*, (2019) analisaram os efeitos dos parâmetros de corte na operação de fresamento do aço AISI 1005. A profundidade de corte e a taxa de avanço foram as variáveis que mais influenciaram na taxa de remoção de material.

Parkhi *et al.*, (2020) avaliaram os efeitos dos parâmetros de corte no fresamento do aço AISI 202. Foi evidenciado que o avanço por dente causou maior influência na taxa de remoção de material.

Portanto, pode-se notar em alguns trabalhos, que a profundidade de corte, o avanço por dente e a velocidade de corte são as variáveis que influenciam significativamente a taxa de remoção de material.

2.9 Planejamento de Experimentos e Otimização

2.9.1 Introdução

Técnicas de otimização aplicadas a processos de fabricação especificamente em processos de usinagem, estão sendo empregadas com o objetivo de aumentar produtividade, reduzir desperdícios e melhorar continuamente a qualidade dos produtos. As proposições destes métodos voltados a otimizar os processos de fabricação, como os de usinagem, vêm ganhando destaque, pois possibilita o melhor entendimento, previsão e combinação dos valores dos parâmetros envolvidos no processo (BORGES, 2019).

A otimização teve início por meio do desenvolvimento e utilização de métodos clássicos que empregavam cálculo diferencial. Com o desenvolvimento dos computadores digitais estes métodos começaram a evoluir permitindo o uso das técnicas numéricas, as quais foram introduzidas na Segunda Guerra Mundial para a solução de problemas de operações logísticas militares, que fizeram uso da programação linear (ROSAL, 2007).

Problemas de otimização linear podem ser solucionados por algoritmos exatos que visam encontrar o ótimo global do problema. Com o passar dos anos, houve a necessidade de estudar, desenvolver e implementar técnicas aplicadas a problemas de grande extensão, necessitando utilizar modelos matemáticos não-lineares (FERREIRA, 2018).

De acordo com Lobato (2008), os problemas de otimização devem ser interpretados como a busca por valores que resultam na minimização ou maximização de determinadas funções dentro de um determinado domínio, tendo como base as restrições tecnológicas, físicas ou normativas.

Segundo Ferreira (2018), os métodos de otimização podem ser divididos em métodos exatos, conhecidos por técnicas clássicas de otimização ou ainda, métodos determinísticos, que podem envolver tanto a programação linear quanto não linear e os métodos aproximados onde o caráter aleatório de vários processos é simulado.

No que se refere à otimização, existe outra importante consideração. Em muitos problemas, a solução ótima não leva em conta uma única característica que deve ser minimizada ou maximizada (abordagem mono-objetivo), mas várias variáveis de saída ou respostas. Normalmente, estas características devem ser consideradas simultaneamente na busca pela melhor solução. Neste caso, uma abordagem multiobjetivo do problema faz-se necessária (COULOMB *et al.*, 2004). A principal diferença deste tipo de abordagem é a maneira de apresentar os resultados. Como os objetivos são frequentemente conflitantes, ou seja, a melhora de um acarreta na deterioração de outro(s), a resposta de um problema multiobjetivo não corresponde a uma única solução ótima, mas sim a um grupo de soluções que caracteriza o comprometimento entre os diversos objetivos (MOREIRA, 2015).

2.9.2 Planejamento de Experimentos – (DOE)

A busca por melhoria contínua nos diversos processos de manufatura, tem levado diversos pesquisadores e profissionais das indústrias a buscarem técnicas sistemáticas de planejamento de experimentos (RODRIGUES *et al.*, 2014). O planejamento de experimentos (*DOE*) é uma forma sistemática de investigação, onde o objetivo principal é entender o comportamento entre as variáveis presentes no sistema e suas respostas, buscando assim, arranjos eficientes, balanceados e com elevado nível de significância das variáveis nas respostas (MONTGOMERY, 2013).

Um planejamento de experimentos pode ser composto por um ou uma série de experimentos, com o objetivo de verificar quais variáveis de entrada impactam significativamente nas de saída. De acordo com isto, pode-se gerar um modelo satisfatório que considere as variáveis de entrada influentes nas respostas analisadas (MONTGOMERY, 2017). Essas variáveis podem ser classificadas sendo do tipo controláveis e incontroláveis, sendo as primeiras inerentes ao processo e as segundas relacionadas à fatores externos.

Montgomery (2013) ressalta que, dentro do planejamento de experimentos existem três conceitos importantes, sendo eles:

1. Aleatorização;

2. Replicação e;
3. Blocagem.

O conceito de Aleatorização diz respeito a executar os experimentos de forma aleatória, fazendo assim a distribuição dos efeitos desconhecidos dos fenômenos dos fatores, aumentando a validade da investigação, sem criar padrões. O segundo princípio básico está relacionado à realização de um mesmo teste repetidas vezes, com o objetivo de criar uma variação para a variável de resposta de interesse, permitindo a avaliação do erro experimental. Por fim, a blocagem possibilita a eliminação e/ou eliminação da variabilidade quando não é possível garantir a homogeneidade das condições de experimentações (MONTGOMERY, 2017).

Ainda segundo Montgomery (2013), para a realização de um projeto de experimentos, as etapas fundamentais devem ser seguidas conforme os passos:

1. Escolha do projeto ou problemática de estudo;
2. Escolha dos fatores que afetam significativamente o problema e seus respectivos níveis;
3. Seleção das variáveis de resposta;
4. Elaboração dos experimentos;
5. Execução dos experimentos;
6. Análise estatística dos dados;
7. Conclusões.

Em um planejamento existem várias técnicas de projeto de experimentos. A literatura mostra que as mais utilizadas são o Planejamento Fatorial completo, Planejamento Fatorial Fracionário, Arranjos Taguchi, o CDD e o Box-Behnken. Na Tabela 4 é possível apresentar suas particularidades.

Tabela 4 - Características das principais técnicas de DOE

Projeto Experimental	Vantagens	Desvantagens	Aplicações
Fatorial Completo 2^k	Permite a varredura completa da região de estudo, pois utiliza todos os fatores e respectivos níveis	Não identifica variação intermediária, pois trabalha apenas em dois níveis e necessita de um alto número de corridas para problemas com grandes variáveis	Processos onde já se tem um prévio domínio e onde a realização das corridas não demandam maior tempo ou custo.
Fatorial Fracionado $2^{(k-p)}$	Permite uma pré-análise do processo com um número reduzido de corridas	Não promove a varredura completa da região experimental	Processos onde se deseja um pré conhecimento e onde a literatura é limitada ou, ainda, em corridas que demandam maior tempo ou custo.
Taguchi	Permite a análise de um processo com muitas variáveis de entrada com um número extremamente reduzido de experimentos	Fornecer uma ideia dos processos, porém pode apresentar modelos matemáticos não confiáveis	Processos onde há pouco ou quase nenhum conhecimento prévio de comportamento ou em processos com alta dispersão ou, ainda, em processos em que as corridas demandam alto custo ou tempo.

Fonte: Gomes (2010)

Continuação Tabela 4- Características das principais técnicas de DOE

Projeto Experimental	Vantagens	Desvantagens	Aplicações
Metodologia de Superfície de Resposta	Permite a verificação de variações intermediárias do processo	Pode apresentar erros na extrapolação dos pontos estrelas, já que as corridas são realizadas nestes níveis	Otimização de processos, principalmente, quando são bem conhecidos e possuem baixa dispersão
Fonte: Gomes (2010)			

2.9.3 Metodologia de Superfície de Resposta – (MSR)

A MSR é um dos planejamentos de experimentos usados para otimização em engenharia. Segundo Montgomery (2013), a MSR é um conjunto de técnicas estatísticas e matemáticas aplicadas com o objetivo de desenvolver, melhorar e otimizar determinada resposta em que sofre influência por diversas variáveis. Atualmente a RSM é aplicada em diversas áreas onde deseja-se modelar e otimizar uma determinada resposta y em função de k variáveis de controle x_1, x_2, \dots, x_k .

Um processo é composto por entradas, sendo variáveis controláveis e/ou variáveis incontroláveis e saídas sendo as respostas analisadas, onde tudo influenciam no mesmo. Contudo, tem-se que normalmente ao utilizar a MSR, o experimentador desconhece o relacionamento entre as variáveis e as respostas (MONTGOMERY, 2017). Logo, busca-se identificar o relacionamento destas variáveis através da aproximação por funções matemáticas. Esta metodologia permite a geração de modelos de primeira e segunda ordem, onde para processos sem curvatura utiliza-se um polinômio de baixa ordem conforme equação (10) e para processos que apresentam curvaturas, uma função de segunda ordem pode ser empregada, conforme equação (11). Essas equações representam as relações entre as variáveis de controle (x) e as variáveis de respostas (y) a partir de dados experimentais. (MONTGOMERY, 2017).

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{(i=1)}^{(k-1)} \sum_{j=2}^k \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (10)$$

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=2}^k \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^k \sum_{ii} x_i^2 + \varepsilon \quad (11)$$

Sendo: y a resposta experimental; x_i e x_j são as variáveis independentes; k é o número de variáveis independentes; β_0 é o coeficiente de regressão do termo independente; β_i é o coeficiente de regressão do termo linear e β_{ij} ($i = 0, 1, 2, \dots, k; j = 0, 1, 2, \dots, k$) é o coeficiente de regressão das interações das variáveis x_i e x_j , β_{ii} é o coeficiente dos termos quadráticos e ε representa o erro amostral. Na Figura 9 (a) é representada as superfícies de resposta para um modelo de primeira e na Figura 9 (b) para um modelo de segunda ordem.

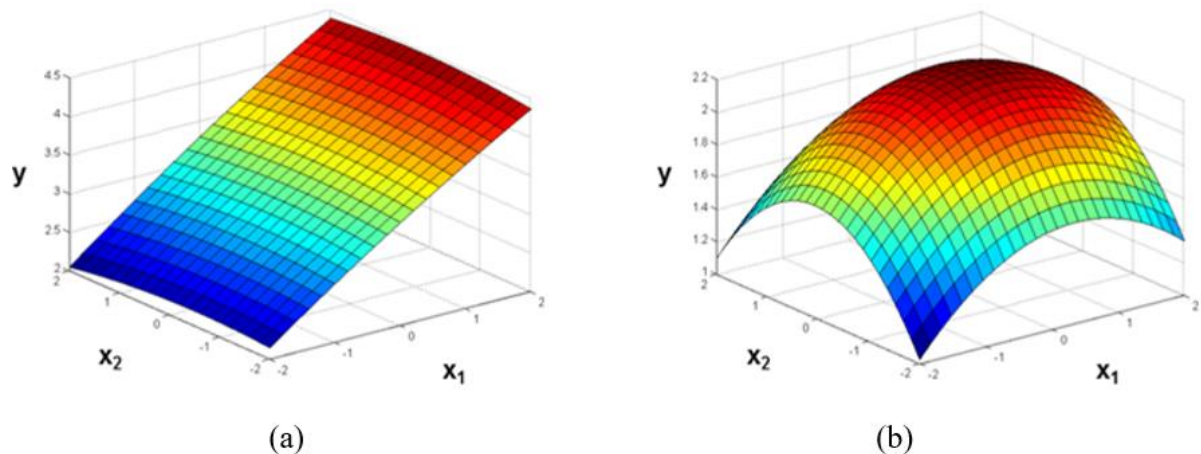


Figura 9 - Superfície de resposta para modelo linear e modelo quadrático

Fonte: (Brito, 2015)

Montgomery (2017) explica que a determinação dos coeficientes de regressão (β 's) é realizada a partir do método dos mínimos quadrados de forma a minimizar a soma dos quadrados dos erros (ε 's). O objetivo é encontrar o vetor estimado dos mínimos quadrados de $\hat{\beta}$ que minimize a função L , expressada na Equação 12 (MYERS; MONTGOMERY; ANDERSON-COOK, 2016).

$$L = \mathbf{y}^T \mathbf{y} - \boldsymbol{\beta}^T \mathbf{X}^T \mathbf{y} - \mathbf{y}^T \mathbf{X} \boldsymbol{\beta} + \boldsymbol{\beta}^T \mathbf{X}^T \mathbf{X} \boldsymbol{\beta} \quad (12)$$

Onde:

$$\mathbf{y} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix}, \mathbf{X} = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1k} \\ 1 & x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2k} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{nk} \end{bmatrix}, \boldsymbol{\beta} = \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_k \end{bmatrix}, \text{ e } \boldsymbol{\varepsilon} = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_n \end{bmatrix}$$

\mathbf{y} é a matriz com o número de observações realizadas com dimensão $(n \times 1)$, \mathbf{X} é a matriz das variáveis independentes com dimensão $(n \times k)$, $\boldsymbol{\beta}$ é a matriz dos

coeficientes de regressão para o modelo com dimensão ($k \times 1$) e $\boldsymbol{\varepsilon}$ é a matriz dos erros aleatórios ($n \times 1$). Sendo, n é a quantidade de experimentos executados e k é o número de variáveis independentes.

Reescrevendo a função L, temos a Equação 13:

$$L = \mathbf{y}^T \mathbf{y} - \boldsymbol{\beta}^T \mathbf{X}^T \mathbf{y} - \mathbf{y}^T \mathbf{X} \boldsymbol{\beta} + \boldsymbol{\beta}^T \mathbf{X}^T \mathbf{X} \boldsymbol{\beta} \quad (13)$$

Como $\boldsymbol{\beta}^T \mathbf{X}^T \mathbf{y}$ é uma matriz (1×1), ou simplesmente um escalar, a sua transposta $(\boldsymbol{\beta}^T \mathbf{X}^T \mathbf{y})^T = \mathbf{y}^T \mathbf{X} \boldsymbol{\beta}$ é o mesmo escalar. Os estimadores de mínimos quadrados devem satisfazer.

$$\left. \frac{\partial L}{\partial \boldsymbol{\beta}} \right|_{\boldsymbol{\beta}} = -2\mathbf{X}^T \mathbf{y} + 2\mathbf{X}^T \mathbf{X} \boldsymbol{\beta} = 0$$

Simplificando o resultado da derivada parcial em relação a $\hat{\boldsymbol{\beta}}$ obtêm-se a Equação 14:

$$\mathbf{X}^T \mathbf{X} \boldsymbol{\beta} = \mathbf{X}^T \mathbf{y} \quad (14)$$

Para estabelecer o estimador de mínimos quadrados de $\boldsymbol{\beta}$, o $\hat{\boldsymbol{\beta}}$, multiplicar-se por $(\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1}$ ambos os membros da Equação (15). Realizando esta operação é possível estabelecer os coeficientes dos modelos de regressão, conforme a Equação 15 (MYERS *et al.*, 2016).

$$\boldsymbol{\beta} = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{y} \quad (15)$$

A MSR emprega arranjos experimentais para criação de modelos regressivos preditivos e que produz um elevado número de informações a partir de uma quantidade pequena de experimentos. Nos processos de fabricação, a abordagem experimental é a mais utilizada, pois por meio de um número limitado de testes é possível obter a relação entre os fatores de entrada e as respostas, promovendo a identificação melhores padrões de processos (SANTHAKUMAR *et al.*, 2019).

Para realizar a modelagem de superfície de resposta, o método utilizado para a coleta de dados é o arranjo composto central (*Central Composite Design – CCD*), considerado um dos arranjos experimentais que permite gerar modelos de segunda ordem, buscando assim identificar a curvatura do processo e que permite ajustar o modelo de superfície de resposta de segunda ordem (PAIVA *et al.*, 2012).

O CCD é formado por três conjuntos de elementos experimentais para k fatores: Um conjunto de pontos fatoriais, obtidos de um fatorial completo (2^k) ou

fracionário (2^{k-p}), um conjunto de pontos centrais (p_c) e um conjunto extra chamado de pontos axiais ($2k$). A realização do somatório de todos os fatores (2^k ou $2^{(k-p)} + p_c + 2k$) resulta na quantidade de experimentos a ser realizados. A distância entre o centro do arranjo (pontos centrais) e um ponto axial é comumente representado por ρ , conhecido como raio experimental. (PAIVA *et al.*, 2014).

Com o posicionamento dos arranjos axiais é possível classificar o CCD em arranjos circunscritos (CCC), Face centrada (CCF) ou inscritos (CCI), conforme Figura 10. Montgomery, (2013) diz que os arranjos CCD apresentam uma propriedade denominada de rotacionalidade, entendida como sendo a constância na variância para a resposta prevista a qualquer ponto presente em uma dada circunferência de raio α . O valor é diretamente proporcional ao número de fatores do experimento, conforme Equação 16.

$$\alpha = \sqrt[4]{2^k} \quad (16)$$

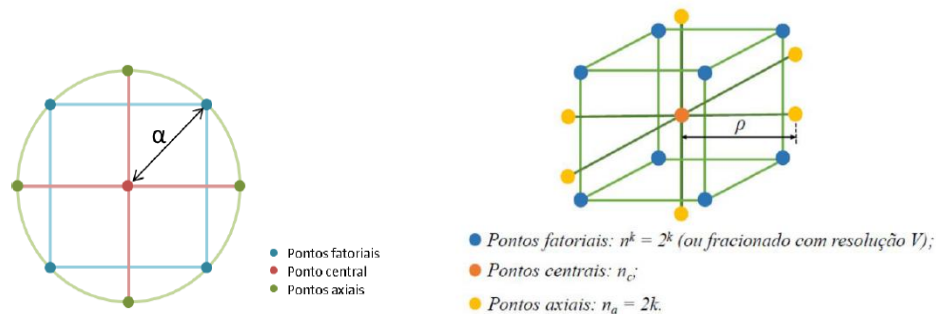


Figura 10 - Arranjo CCD

Fonte: (PEREIRA, 2017)

A literatura mostra alguns autores que estudaram diversos processos utilizando a metodologia MSR. Pode-se citar o trabalho de Makadia *et al.*, (2013) em relação à análise de aços inoxidáveis, os autores aplicaram MSR para investigar a velocidade de corte, o efeito do avanço, raio de ponta da ferramenta e da profundidade de corte na rugosidade gerada pelo torneamento do aço inoxidável AISI 410.

No trabalho de Almeida *et al.* (2017) foi proposto um estudo e análise, por meio da otimização robusta pelo EQM da média (μ) e variância (σ^2) com o objetivo de avaliar a rugosidade R_a medida em um conjunto de experimentos realizados para o processo de torneamento do aço AISI 12L14.

Policena *et al.* (2018), analisaram a influência dos parâmetros de corte: velocidade de corte, avanço e profundidade; utilizados no fresamento frontal de acabamento sobre a rugosidade do aço duplex UNS S2205 por meio do planejamento experimental de “Box-Behnken Design” (*BBD*), baseado na metodologia de superfície de resposta (MSR).

2.9.4 Projeto de Parâmetro Robusto (PPR)

Welch *et al.* (1990) define projeto de parâmetro robusto como sendo a metodologia que tem por interesse definir níveis de parâmetros, de um determinado processo, com o objetivo de conseguir produtos e/ou processos robustos à variação de fatores incontrolláveis, conhecidos como fatores de ruídos. O projeto de parâmetros robusto foi desenvolvido por Taguchi na década de 80, com o objetivo de minimizar os efeitos dos ruídos que causam variação no processo (PEREIRA *et al.*, 2017). Montgomery (2013) ressalta que o objetivo do PPR é garantir que a média da resposta estudada esteja dentro do nível ou alvo desejado e que a variabilidade ao redor deste valor seja a menor possível.

De acordo com Montgomery (2017) os processos são as combinações das variáveis controláveis e das variáveis incontrolláveis (Ruído), capazes de transformar entrada em saída (resposta), sendo x_1, x_2, \dots, x_p representam as variáveis de controle e z_1, z_2, \dots, z_q as de ruído. A representação esquemática de um processo pode ser visualizada, conforme Figura 11.

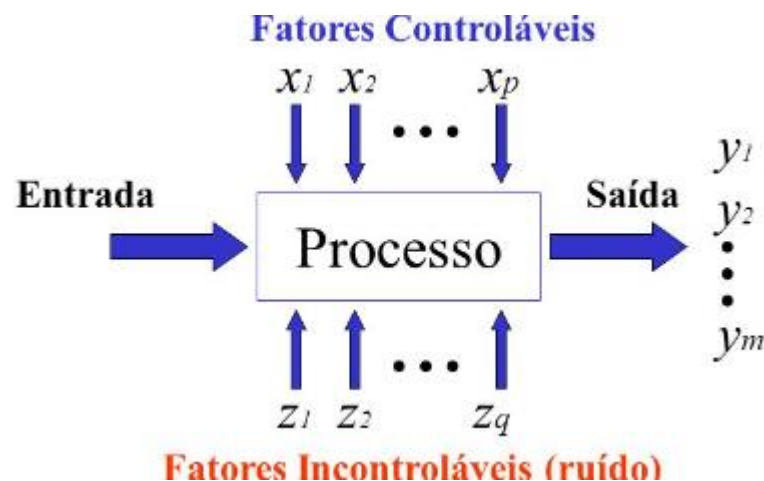


Figura 11 – Representação esquemática de um processo

Fonte: Adaptado (MONTGOMERY 2017)

O projeto de parâmetro robusto, originalmente chamado de arranjo cruzado, é realizado por dois planejamentos experimentais, um arranjo interno e outro arranjo

externo. O arranjo interno é para as variáveis de controle e o arranjo externo são para os ruídos. Posteriormente, estes arranjos são cruzados e fornecem um resumo da média de cada observação do arranjo interno sobre o externo e um estatístico da tentativa de combinação entre média e variância através do método razão sinal/ruído (MYERS *et al.*, 1992). No entanto, essa metodologia tem um alto número de experimentos, o que aumenta o custo e o tempo de análise.

Taguchi incorpora a variabilidade do processo no desempenho da resposta, sendo está uma das contribuições mais importantes da abordagem. Contudo, Box *et al.*; (1988), retratam algumas ineficiências relativas à modelagem da média e da variância, a incapacidade de medir a interação e o excesso em números de ensaios. Com isso, pesquisadores uniram a metodologia inicial proposto por Taguchi com o planejamento de experimentos, modelagem padronizada da média e variância e metodologia de superfície de resposta e desenvolveram o arranjo combinado (VINING *et al.*, 1990).

Welch *et al.*, (1990) diz que existem algumas vantagens no projeto de parâmetro robusto quando se considera a utilização de um arranjo combinado. A primeira consiste no número de ensaios ser consideravelmente menor comparado ao arranjo cruzado, onde é possível estimar os efeitos de primeira e segunda ordem importantes. Outra vantagem significativa do arranjo combinado, é a possibilidade de estudar as interações entre as variáveis de controle e ruído, onde tem papel importante na estimação do erro e no estudo da robustez do processo.

Alguns autores escolhem principalmente para a otimização dual, a combinação de média, variância e alvo em uma única função. Neste sentido, Myers *et al.*, (1992) utilizaram como medidas alternativas o uso da metodologia de superfície de resposta onde consideraram simultaneamente a modelagem de equações de segunda ordem para a média e variância e em seguida foram otimizadas utilizando um alvo com restrição que minimiza a média e a variância conforme equação (17 e 18).

$$\omega_{\mu} = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon_{\mu} \quad (17)$$

$$\omega_{\sigma} = J_0 + \sum_{i=1}^k J_i x_i + \sum_{i=1}^k J_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} J_{ij} x_i x_j + \varepsilon_{\sigma} \quad (18)$$

Welch *et al.* (1990) realizaram um planejamento de experimentos contemplando variáveis de controle e ruído denominado arranjo combinado, onde requer um número menor de experimentos que os arranjos cruzados. Já Shoemaker *et al.* (1991) realizaram um arranjo combinado, destacando a importância do método na estimação de interações entre variáveis de processo e ruído. Shin *et al.* (2011) realizaram uma otimização biobjetiva para duas características de qualidade EQM₁ e EQM₂ utilizando a metodologia de Tchebycheff lexicográfico ponderado. Paiva *et al.* (2014) utilizaram a abordagem do PPR combinada com a metodologia de superfície de resposta e análise de componentes principais (ACP) para um caso bivariado no torneamento do aço AISI 52100.

Brito *et al.*, (2015) utilizou um arranjo combinado para definir as equações de EQM em um processo de fresamento do aço SAE 1045. Os resultados mostraram que o processo foi sensível as variáveis de ruído. Portanto, com a aplicação do PPR é possível identificar parâmetros das variáveis de controle que minimizem as variáveis de ruído, tornando o processo mais robusto.

Almeida *et al.* (2017) modelaram as equações de média e variância da rugosidade R_a , durante o torneamento do aço 12L14, utilizando abordagem PPR. A velocidade de corte, avanço e profundidade de corte foram as variáveis controláveis do processo, enquanto as ferramentas novas e desgastadas (com $VB_{\text{máx}} = 0,25$ mm) foram as de ruído.

2.9.5 Arranjo Combinado

A metodologia do arranjo combinado foi desenvolvida para suprir as dificuldades do arranjo cruzado, onde nela a modelagem é feita somente na resposta e não na perda. Com isso, é necessário realizar somente um planejamento, considerando ambas as variáveis, a de controle e ruído, o que reduz a quantidade de experimentos (WELCH *et al.* 1990).

Uma equação de regressão nomeada modelo de resposta é gerada a partir da realização dos experimentos que inclui os fatores controláveis e os incontroláveis baseados em estimativas onde é possível avaliar os efeitos principais destes separados e suas interações, como citado no trabalho de Shoemaker *et al.* (1991) e Welch *et al.* (1990).

Montgomery (2013) em seu livro diz que, a chave para um problema de projeto robusto é a interação entre as variáveis de controle e as de ruído. A utilização de um modelo para a resposta, que incluem ambas as variáveis como também suas

interações, se torna importante e de interesse para este tipo de planejamento experimental, a Equação 19 mostra este modelo (MONTGOMERY, 2013).

$$y=f(\mathbf{x},\mathbf{z}) \quad (19)$$

Onde:

y é o conjunto de características de qualidades ou performances associada a um produto, \mathbf{x} é o conjunto dos fatores controláveis e \mathbf{z} é o conjunto dos fatores incontroláveis.

Para um modelo de segunda ordem, a expressão poder ser definida conforme Equação 20.

$$y(\mathbf{x},\mathbf{z})=\beta_0+\sum_{i=1}^k\beta_i x_i+\sum_{i=1}^k\beta_{ii} x_i^2+\sum_{i<j}^k\sum\beta_{ij} x_i x_j+\sum_{i=1}^s\gamma_i z_i+\sum_{i=1}^s\gamma_{ii} z_i^2+\sum_{i<j}^s\sum\gamma_{ij} z_i z_j+\sum_{i=1}^k\sum_{j=1}^s\delta_{ij} x_i z_j+\varepsilon \quad (20)$$

Onde:

- y é a resposta de interesse.
- x_1, x_2, \dots, x_k são os k fatores controláveis.
- z_1, z_2, \dots, z_s são os s fatores incontroláveis.
- $\beta_0, \beta_i, \beta_{ii}, \beta_{ij}, \gamma_i, \gamma_{ij}$ e δ_{ij} são os coeficientes estimados via OLS.
- ε é o erro experimental.

Na experimentação, os ruídos são considerados controláveis e que são normalmente distribuídos, com média e variância zero. É possível estimar a média e a variância do processo conforme apresentado nas Equações 21 e 22. Para conhecimento, $\sigma_{z_i}^2$ pode ser considerado igual a um e σ^2 pode ser estimado pelo erro residual gerado na ANOVA.

$$E_z[y(\mathbf{x},\mathbf{z})]=f(\mathbf{x}) \quad (21)$$

$$V_z[y(\mathbf{x},\mathbf{z})]=\sum_{i=1}^r\left[\frac{\partial y(\mathbf{x},\mathbf{z})}{\partial z_i}\right]^2\sigma_{z_i}^2+\sigma^2 \quad (22)$$

Montgomery (2013) ressalta-se que:

1. O modelo de média e variância envolvem apenas as variáveis controláveis. Essas médias podem potencialmente alterar as variáveis controláveis para resultar um valor objetivo de média e minimizar a variabilidade transmitida para o ruído;
2. O modelo de variância envolve apenas as variáveis controláveis, também envolve os coeficientes de regressão de interação entre controle e variáveis de ruído;
3. modelo de variância é uma função quadrática das variáveis de controle;
4. O modelo de variância (σ^2) é apenas o quadrado da inclinação de ajuste do modelo de resposta na direção da variável de ruído.

2.9.6 Erro Quadrático Médio (EQM)

Com o desenvolvimento das equações de média e variância, a otimização de determinado processo pode ser conduzida empregando-se as diversas técnicas de otimização de múltiplos objetivos disponíveis na literatura, como por exemplo, o Erro Quadrático Médio (EQM). Mood (1974) diz que Erro Quadrático Médio é utilizado para medir a esperança dos desvios quadráticos de um estimador, que se baseia em uma medida de aproximação ou ajuste há um valor alvo (T), da média e da variância. Brito *et al.*, (2015) relata que no contexto de otimização robusta, o erro quadrático médio (EQM) é uma análise que combina funções objetivo que relaciona a média $\hat{y}(x)$ e a variância $\hat{\sigma}^2(x)$ e uma única resposta, além do alvo desejado. Segundo Paiva *et al.*, (2014), a minimização da função EQM promove a otimização conjunta da média e da variância, promovendo assim a melhora de um processo e a maximização da qualidade de um produto.

A minimização do erro quadrático médio assegura que o valor médio da resposta se estabeleça o mais próximo possível do seu alvo, apresentando ao mesmo tempo o mínimo de variabilidade. A otimização é realizada conforme a formulação expressa na Equação 23:

$$\begin{aligned} \text{Minimizar } EQM(y) &= [\mu(y) - T_y]^2 + \sigma^2(y) \\ \text{Sujeito a: } X^T X &< \alpha^2 \end{aligned} \tag{23}$$

Sendo: $EQM(y)$ o erro quadrático médio da resposta y , $\mu(y)$ modelo para a média da resposta y , T_y é o alvo da resposta y , $\sigma^2(y)$ modelo para a variância da resposta y e $x^T x < \alpha^2$ é a restrição de esfericidade para o espaço experimental.

2.9.7 Método da interseção Normal a Fronteira – (NBI)

O método da interseção normal à fronteira é uma metodologia de otimização desenvolvido para encontrar conjuntos de soluções Pareto-ótimas uniformemente distribuídas e igualmente espaçadas para problemas multiobjetivos não lineares.

Proposto por Das e Dennis (1998) a fronteira de Pareto é definida como alternativa para superar as desvantagens na construção de fronteiras apresentadas pelos operadores de aglutinação. Um exemplo de operadores de aglutinação são as somas ponderadas, elas são utilizadas para gerar soluções de compromisso em problemas com vários objetivos e formam, via de regra, um conjunto de soluções viáveis e não dominadas conhecidas como “Fronteira de Pareto”. Contudo, se o conjunto de soluções de Pareto for não convexo, a fronteira passa a ser não convexa e descontínua, formando clusters de soluções Pareto-ótimas em regiões de grande curvatura, porém, descontínuas no espaço de solução (Figura 12). Outro inconveniente é que as somas ponderadas dificilmente detectarão soluções nas regiões não convexas da Fronteira ou em fronteiras não-convexas (descontínuas) que, eventualmente, possam existir (VAHIDINASAB *et al.*, 2010).

Portanto, o método NBI permite construir fronteiras uniformemente distribuídas e contínuas independentemente da distribuição de pesos entre as funções, sendo possível identificar todos os pontos ótimos plotados na curva da fronteira de Pareto, fazendo com que o NBI seja uma alternativa viável na resolução de problemas não convexos (GANESAN *et al.*, 2013).

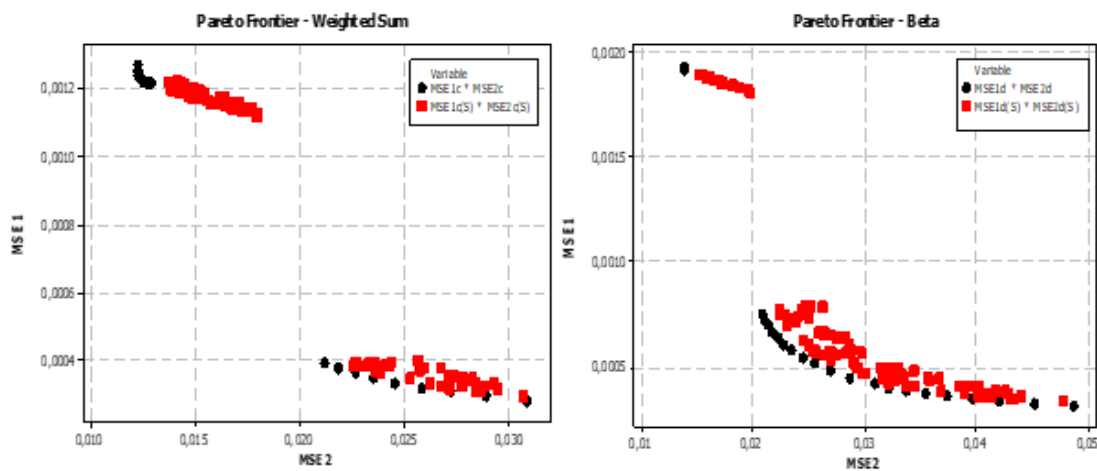


Figura 12 - Desvantagens do Método de somas ponderadas

Fonte: (PAIVA *et al.*, 2014)

Para a execução do método NBI são necessários alguns passos. Primeiramente é necessário realizar a otimização individual de cada função objetivo formando assim a matriz *Payoff* Φ . Ela representa os valores das múltiplas funções objetivos, minimizados de forma individual. O vetor de solução que minimiza a i -ésima função objetivo $f_i(x)$ é representado por x_i^* , portanto o valor mínimo de o valor mínimo de $f_i(x)$ neste ponto seja $f_i^*(x_i^*)$. Quando o ponto x_i^* é substituído nas demais funções, tem-se $f_i(x_i^*)$ que não é um valor ótimo para estas funções. Repetindo esse método para as demais funções, a matriz Φ pode ser representada conforme a Equação 24.

$$\Phi = \begin{pmatrix} f_1^*(x_1^*) & \cdots & f_1(x_i^*) & \cdots & f_1(x_m^*) \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ f_i(x_1^*) & \cdots & f_i^*(x_i^*) & \cdots & f_i(x_m^*) \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ f_m(x_1^*) & \cdots & f_m(x_i^*) & \cdots & f_m^*(x_m^*) \end{pmatrix} \quad (24)$$

Cada linha da matriz *Payoff* representa uma função objetivo e cada coluna é correspondente a uma solução ótima. Os elementos restantes dizem respeito aos valores obtidos quando são submetidos a soluções dos outros objetivos. O nome dado ao conjunto dos mínimos individuais é ponto de Utopia e é representado por $f^U = [f_1^*(x_1^*), \dots, f_i^*(x_i^*), \dots, f_m^*(x_m^*)]^T$. Esses pontos podem ser localizados na diagonal principal e seus extremos são conhecidos como pontos de ancoragem (UTYUZHNIKOV *et al.*, 2009). Na matriz Φ também existe o ponto de Nadir que representa os pontos não ótimos de cada função objetivo tendo este vetor a função $f^N = [f_1^N \dots, f_i^N \dots, f_m^N]^T$.

O terceiro passo do método NBI é chamado de normalização. Como as funções objetivo são provenientes de funções de grandezas e significados físicos diferentes, é necessário transformar as funções para que as mesmas possam ser analisadas em um mesmo espaço normalizado (ARONÉS, 2009). Utilizando os pontos extremos (Nadir e Utopia) é possível então construir a função de normalização das funções conforme equação 25.

$$\bar{f}(\chi) = \frac{f_i(\chi) - f_i^U}{f_i^N - f_i^U} \quad (25)$$

A função NBI para casos bi-objetiva pode ser formulada conforme a Equação 26, onde \bar{f}_1 representa as funções escalonadas, w refere-se ao peso aplicado à função

principal e g_i as restrições do problema. A Figura 13 mostra a fronteira de Pareto equidistantes e equiespaçadas, visto a resolução de maneira iterativa para os valores de w .

$$\begin{aligned} & \text{Max}_{(x,\gamma)} \quad \gamma \\ & \text{sujeito a: } \bar{\Phi}\omega + \gamma n = \bar{f}(\chi) \\ & \quad \quad \quad x \in \hat{\Omega} \end{aligned} \tag{26}$$

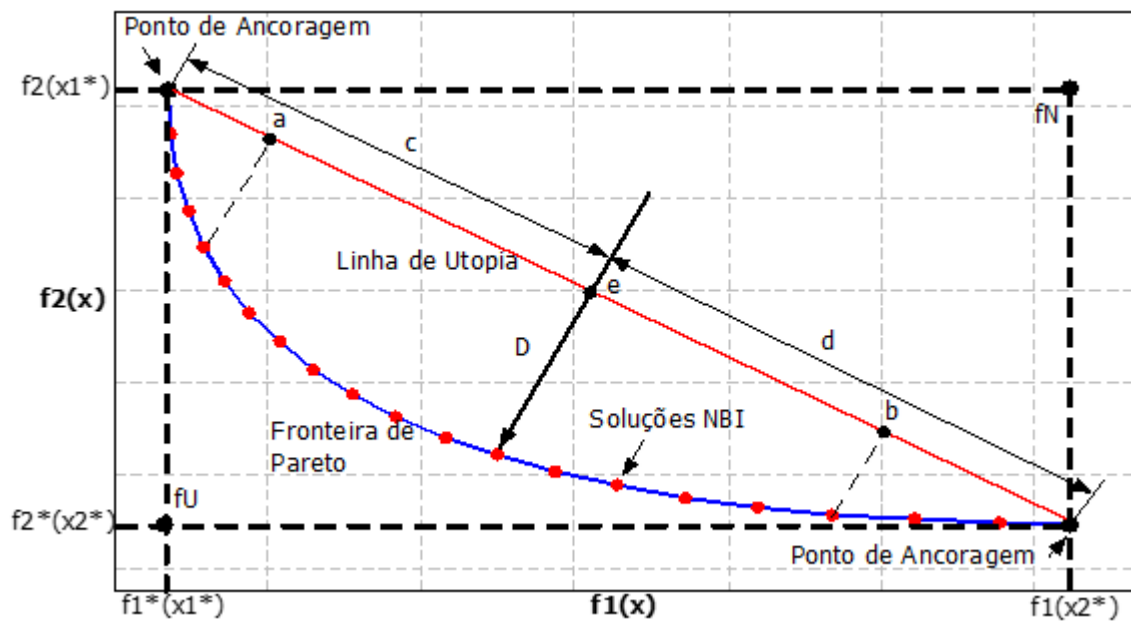


Figura 13 - Fronteira de Pareto

Fonte: (BRITO *et al.*, 2014)

Brito, (2015), demonstrou analiticamente a expressão para o caso biobjetivo, capaz de gerar uma fronteira igualmente espaçada, ao utilizar o MINF, conforme Equação 27.

$$\begin{aligned} & \text{Min } \bar{f}_1(\chi) \\ & \text{s.t.: } \bar{f}_1(\chi) - \bar{f}_2(\chi) + 2w - 1 = 0 \\ & \quad \quad \quad g_j(\chi) \leq 0 \\ & \quad \quad \quad 0 \leq w \leq 1 \end{aligned} \tag{27}$$

3. Procedimento Experimental

3.1 Introdução

Neste capítulo são apresentados os equipamentos, o corpo de prova, as ferramentas de corte, as variáveis de controle/ruído, e as metodologias utilizadas na execução dos experimentos deste trabalho. Os ensaios experimentais, as medições da rugosidade e da taxa de remoção de material, além do monitoramento do desgaste do flanco das ferramentas foram realizadas no Laboratório de Manufatura e Automação (LMAUT) do Núcleo de Otimização da Manufatura e da Tecnologia da Inovação (NOMATI) do Instituto de Engenharia de Produção e Gestão (IEPG) da UNIFEI.

3.2 Método de Pesquisa

Este trabalho tem por objetivo estudar e otimizar o processo de fresamento de topo do aço inoxidável duplex UNS S32205. Os resultados obtidos por meio da metodologia aplicada nesta pesquisa, poderá ser aplicado a outros trabalhos com características similares. A pesquisa é de natureza aplicada, de objetivo exploratório, com abordagem quantitativa e fará uso do método experimental (BRYMAN, 1989). A Figura 14 ilustra o fluxograma da metodologia aplicada para realizar a otimização biobjetivo no processo de fresamento de topo do aço inoxidável duplex UNS S32205.

O método foi dividido em 3 etapas, a primeira está relacionada à definição do processo de fresamento, à seleção das variáveis de controle e ruído do processo, à elaboração do planejamento de experimentos e à execução do mesmo.

A segunda etapa consiste na modelagem das respostas escolhidas, sendo elas a rugosidade R_a e a Taxa de remoção de material (MRR). Obtenção dos modelos de média e variância e alvos (T_i), onde os alvos são estabelecidos pela minimização ou maximização, dependendo do sentido de otimização da variável de resposta em questão e posteriormente são obtidas as equações do erro quadrático médio EQM para R_a e MRR .

A terceira etapa da metodologia refere-se à otimização biobjetivo, utilizando o método **NBI**, proposto por Das e Denis (1998). Nesta etapa é desenvolvida a matriz *Payoff*, que contém os pontos de Utopia e Nadir. Em seguida, é realizada a normalização das funções EQM . Posteriormente é definido os pesos, variando de 0 a 1 com incrementos de 0,05, onde o objetivo é fornecer graus de importância para EQM_{R_a} e EQM_{MRR} . O

próximo passo refere-se à otimização biobjetivo aplicando os métodos *EQM-PPR-NBI* no Solver® presente no *Microsoft Excel®*. Em seguida é realizada a plotagem da fronteira de Pareto. Por fim realiza-se os experimentos de confirmação, com a finalidade de verificar a eficácia do método proposto quanto à robustez do processo.

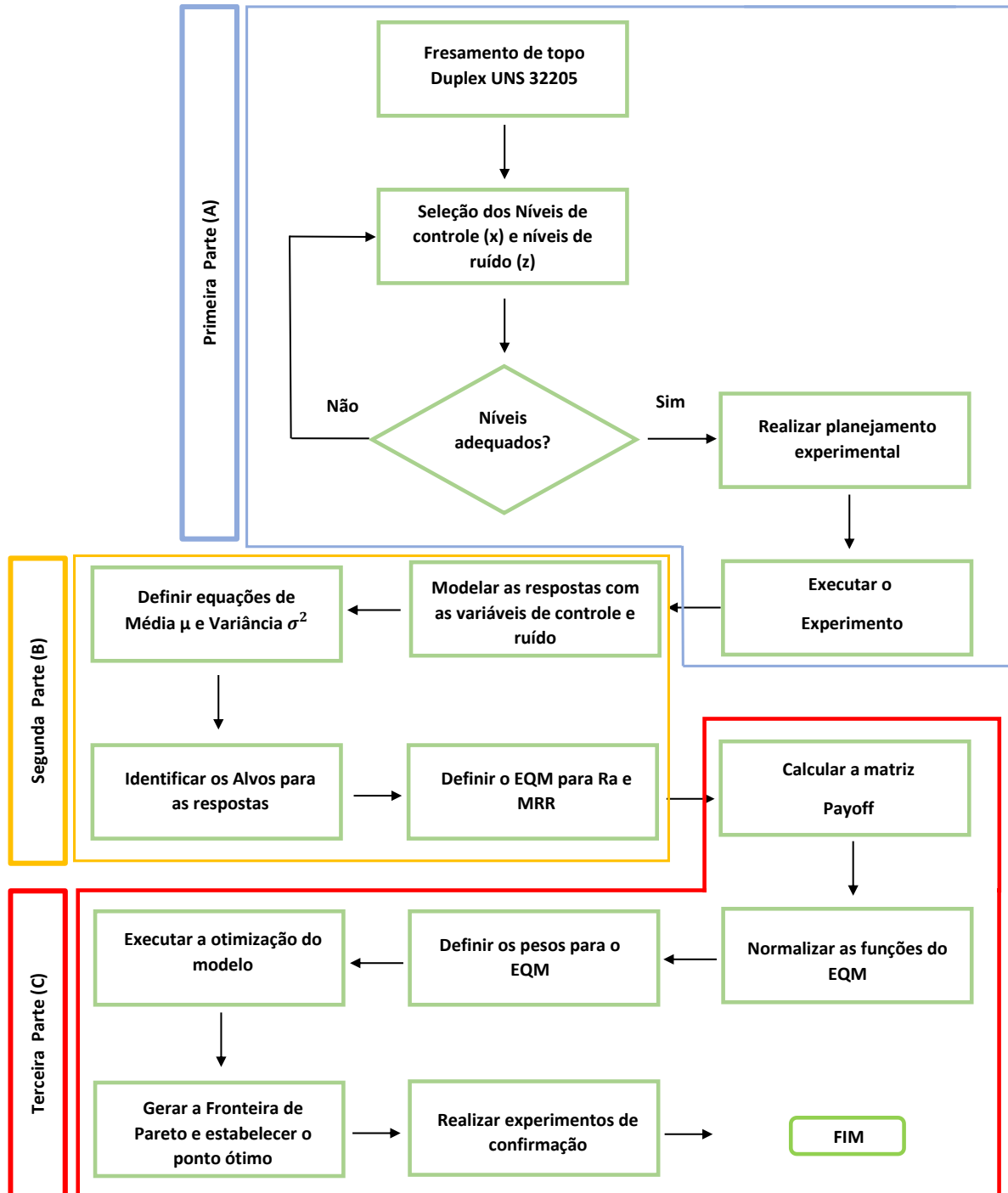


Figura 14 – Fluxograma metodologia PRP-EQM-NBI

Fonte: Autoria Própria

3.3 Material

O corpo de prova utilizado nos experimentos é de aço inoxidável duplex UNS S32205 com dureza de 250 HB na forma de seção retangular de dimensões 106 x 100 x 120 mm, conforme Figura 15. A Figura 16 apresenta um detalhamento do corpo de prova. A Tabela 5 apresenta a composição química do aço inoxidável duplex UNS S32205. Este aço contém em sua composição química o carbono, o silício, o manganês, o cromo, molibdênio e o níquel. São ligas que apresentam ferrita e austenita em proporções volumétricas equilibrada (BERGUIGA *et al.*, 2019). A presença da austenita confere ao material ductilidade, tenacidade, soldabilidade, enquanto a ferrita fornece alta resistência à corrosão sob tensão (MAVI, 2020).



Figura 15 - Corpo de prova

Fonte: Aatoria Própria

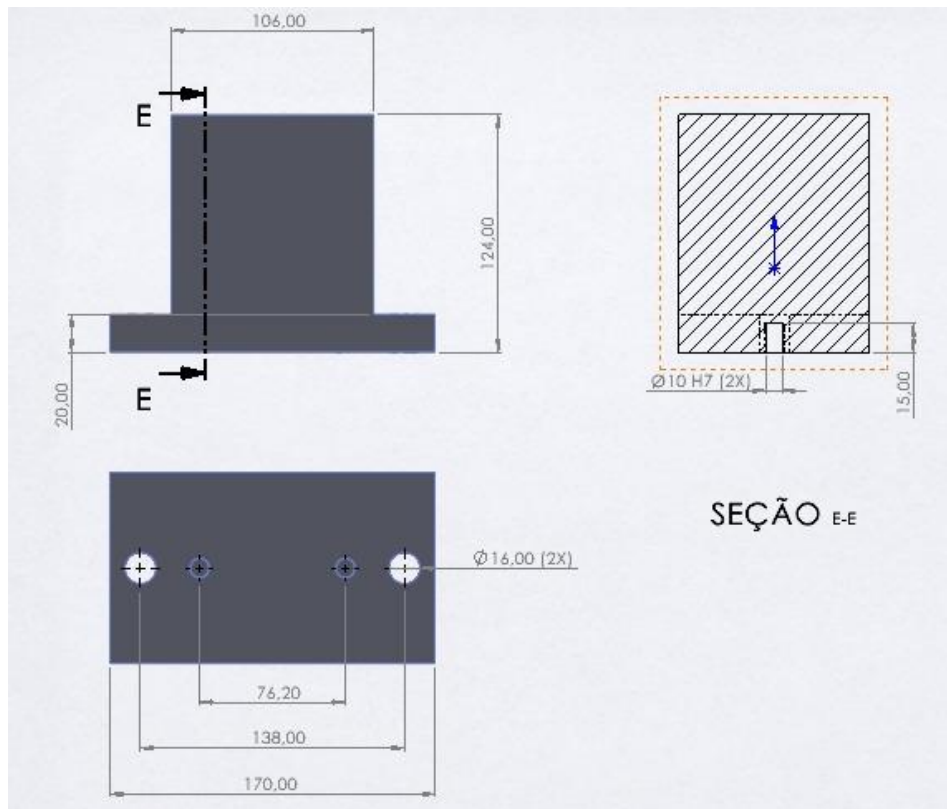


Figura 16 – Detalhamento do Corpo de Prova

Fonte: Autoria Própria

Tabela 5 - Composição química do aço inoxidável duplex UNS S32205
(% em peso)

C	Si	Mn	P	S	N	Al	Cr	Mo	Ni	Cu	W	Co
0,01	0,4	1,2	0,01	0,01	0,1	0,00	22,2	3,1	5,6	0,1	0,0	0,0

Fonte: IMO A (2014)

3.4 Máquinas e Equipamentos

Para a execução dos experimentos de fresamento de topo no aço inoxidável duplex UNS S32205, foi utilizado um centro de usinagem vertical *ROMI® D 600*, que possui curso longitudinal da mesa (eixo X) de 600 mm, latitudinal (eixo Y) de 530 mm e 580 mm no curso do cabeçote (eixo Z). Este centro de usinagem possui um cabeçote vertical com cone do eixo-árvore ISO 40, avanço rápido de 30 m/min nos três eixos de programação (X, Y e Z), potência máxima no eixo-árvore de 15 kW, rotação máxima de 10.000 rpm e comando numérico *GE® FANUC 0i-MD*, como ilustra a Figura 17.



Figura 17 - Centro de usinagem ROMI® D 600

Fonte: Autoria Própria

A ferramenta utilizada foi a fresa CoroMill® R390-025A25-11M (Sandvik-Coromant), diâmetro 25mm, ângulo de posição $\chi_r = 90^\circ$ graus, haste cilíndrica, passo médio com 3 insertos e fixação mecânica por pinça. A fresa utilizada durante os experimentos pode ser visualizado conforme Figura 18.



Figura 18 - Fresa de topo R390-025A25-11M

Fonte: Autoria Própria

Os insertos utilizados na fresa foi o CoroMill®R390-11T308M-MM GC 2030 (Sandvik-Coromant) com dupla camada de nitreto de titânio (TiN) e nitreto de titânio alumínio (TiAlN), cuja largura (W_1) é de 6,8 mm, comprimento efetivo da aresta de corte (LE) de 10 mm, o raio do canto de 0,8 mm (RE), o comprimento da aresta alisadora (BS) de 1,2 mm, a espessura de 3,59 mm (S) e o número de aresta de corte

igual a 2. Os insertos de metal duro utilizados durante os experimentos podem ser observados conforme Figura 19.



Figura 19 - Inserto de metal duro R390-11T308M-MM 2030

Fonte: Autoria Própria

Como fluido de corte foi utilizado o *METCUT SS®*. Este óleo foi escolhido por se tratar de um fluido solúvel semi-sintético, por apresentar boa resistência microbiológica, alta detergência e proteção corrosiva com baixa formação de espuma, causando assim, menos impactos ao meio ambiente (ARTCHEM, 2010). É um óleo com característica de refrigeração e lubricidade adequado para operações usuais de usinagem em metais ferrosos como o aço carbono e a maioria dos aços inoxidáveis (ARTCHEM, 2010). Sua diluição acontece com facilidade na água, com capacidade de resistir à degradação bacteriana e óleos contaminantes, além de ser econômico e biestável. Sua diluição ainda é realizada em uma razão de 1/10, ou seja, a cada 10 litros de água é necessário um litro de óleo. Todo o experimento foi com o fluido de corte na concentração de 10%.

3.5 Procedimento de medição

Antes de dar início à coleta de dados foi necessário controlar os fatores de ruído, como o balanço da ferramenta, o desgaste do flanco e a vazão de fluido para atender cada linha dos experimentos planejados.

Para controlar o desgaste de flanco v_b foi utilizado o analisador de imagem (*Global Image Analyzer*), o software *Global Lab Image* e o microscópio estereoscópico modelo SZ 61 com ampliação de 45 vezes, acoplado a uma câmera de vídeo em um computador compatível, conforme Figura 20.



Figura 20 - Microscópio Óptico SZ 61® Olympus

Fonte: Autoria Própria

Para a vazão de fluido (Q) foram utilizadas duas válvulas reguladoras fixadas na máquina-ferramenta. Nos experimentos onde a condição de usinagem foi a seco, as duas válvulas permaneceram fechadas. Na condição de mínima vazão uma pequena abertura foi feita na válvula 1 e para a máxima vazão as duas válvulas foram completamente abertas. A quantidade de fluido foi mensurada utilizando um Becker graduado. O controle da quantidade de fluido pode ser observado, conforme Figura 21.

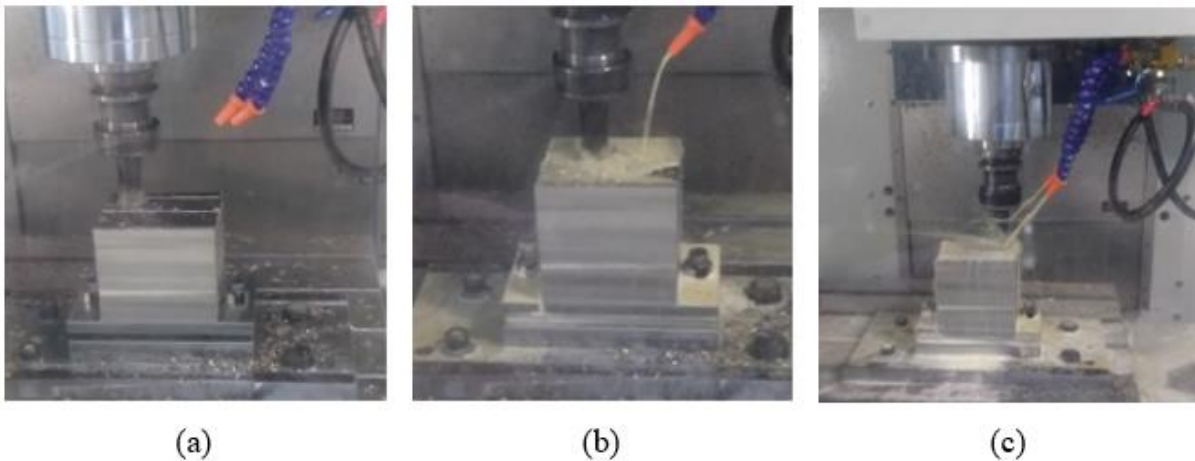


Figura 21 - Condições de usinagem: (a) sem fluido; (b) mínima vazão; (c) máxima vazão

Fonte: Autoria Própria

Por fim, para o controle do balanço da ferramenta (l_{t0}) foi utilizado um conjunto de ferramentas sendo pinça, porta pinça e um cone ISO 40, conforme Figura 22.



Figura 22 – Conjunto de ferramentas

Fonte: Autoria Própria

Todos os experimentos foram executados no sentido concordante devido a largura fresada (a_e) ultrapassar o valor de 60% do diâmetro da fresa. Para a coleta de dados referente a resposta R_a foi utilizado o rugosímetro portátil *Mitutoyo SurfTest 201*, aferido e calibrado antes do início das medições. O parâmetro de *cut-off* foi ajustado para 0,8 mm em todas as medidas. As medições foram realizadas nos pontos extremos e no centro do corpo de prova. Os valores encontrados para rugosidades estão dentro da norma DIN 4766. A Figura 23 mostra o procedimento de medição.



Figura 23 – Procedimento de medição da rugosidade

Fonte: Autoria Própria

A taxa de remoção de material foi calculada utilizando a formulação analítica, conforme Equação 9. Para estabelecer o peso inicial e peso final do corpo de prova, foi utilizado uma balança digital da marca Digimed®, conforme Figura 24. O corpo de prova foi pesado antes da usinagem e logo após a usinagem. Os tempos foram mensurados por um cronometro digital. Para estabelecer os tempos de corte o cronômetro foi acionado quando a ferramenta de corte entrou em contato com a peça e pausado quando se afastou da peça. Os valores das massas e dos tempos de corte foram anotados em uma planilha Excel e posteriormente efetuou-se o cálculo da taxa de remoção de material.



Figura 24 – Balança

Fonte: Autoria Própria

Como forma de reduzir o tempo de setup entre um experimento e outro, foi desenvolvido um dispositivo de troca rápida composto por uma base, 2 parafusos M10, 2 pinos guia com diâmetro de 8 mm e arruelas facetadas. A Figura 25 apresenta a base que foi desenvolvida. A Figura 26 apresenta o detalhamento do parafuso, do pino-guia e da arruela facetada. A Figura 27 apresenta o dispositivo de troca rápida montado. Para a montagem do dispositivo é necessário:

1. Fixar a base na mesa da máquina através de 4 parafusos M8;
2. Colocar os 2 pinos guia na base;
3. Colocar os 2 parafusos M10 na base;
4. Colocar o corpo de prova em cima da base. Os pinos-guia são responsáveis para garantir que o corpo de prova não exerça movimentos em x e y;
5. E por fim colocar as arruelas facetadas e realizar o aperto dos parafusos M10.

Para soltar o corpo de prova após a usinagem do experimento, basta realizar um breve desaperto nos parafusos M10, retirar as duas arruelas facetadas e retirar o corpo de prova.

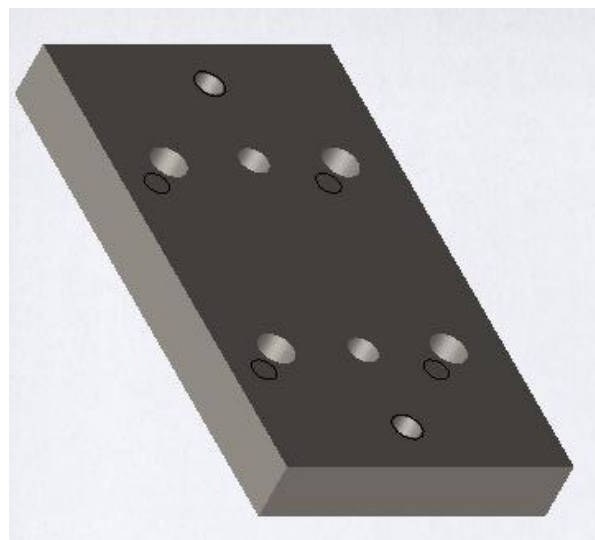
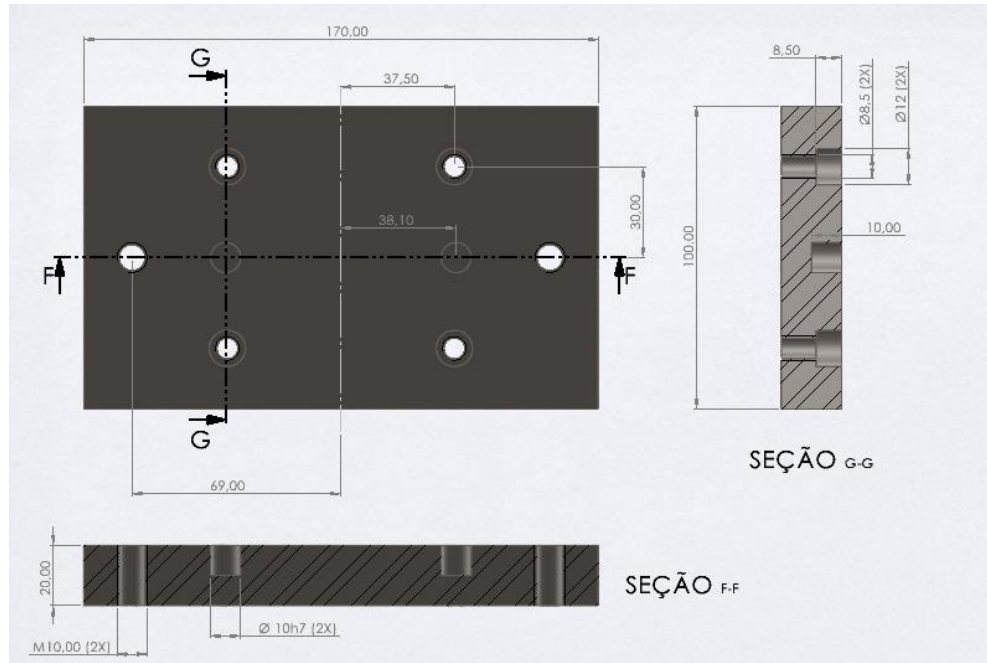


Figura 25 – Base troca rápida

Fonte: Autoria Própria

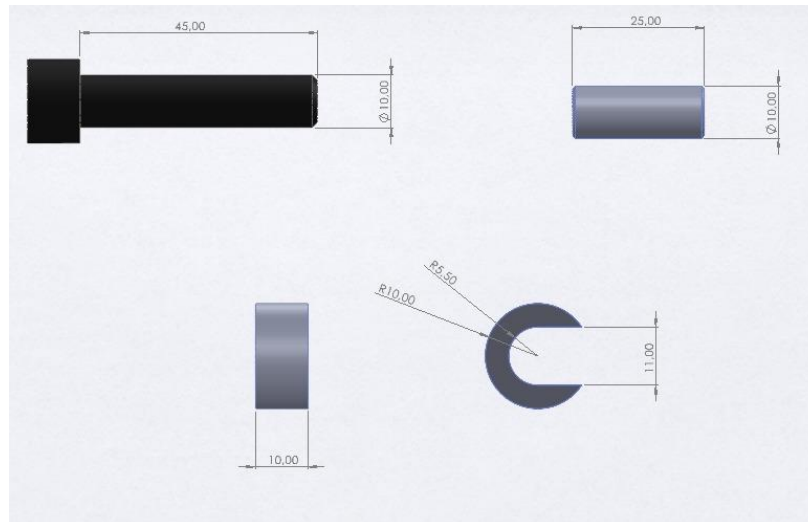


Figura 26 – Parafuso, Pino guia e Arruela Facetada

Fonte: Autoria Própria

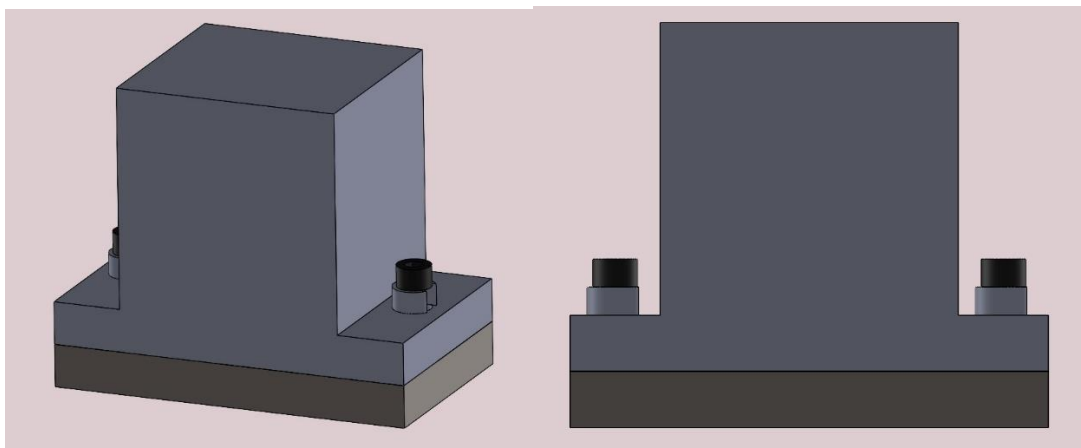


Figura 27 – Dispositivo montado

Fonte: Autoria Própria

3.6 Variáveis de controle, Variáveis de Ruído e Características de interesse

As variáveis de controle (x) escolhidas para o estudo deste trabalho foram a velocidade de corte (v_c), avanço por dente (f_z), profundidade de corte (a_p) e penetração de trabalho (a_e). Estes parâmetros são os mais importantes no processo de fresamento. Os níveis adotados para as variáveis de controle foram definidos considerando dados da literatura e os ensaios preliminares de acordo com Oliveira *et al.* (2019). Os valores para os fatores controlados do processo podem ser visualizados, conforme Tabela 6.

Tabela 6 – Níveis para as variáveis de controle

Parâmetros de corte	Níveis do processo				
	-2,83	-1,00	0,00	+ 1,00	+ 2,83
v_c - Velocidade de corte [m/min]	32,50	60,00	75,00	90,00	117,40
f_z - Avanço por dente [mm/dente]	0,04	0,10	0,13	0,16	0,21
a_p - Profundidade de corte [mm]	0,43	0,80	1,00	1,20	1,57
a_e - Penetração de trabalho [mm]	12,26	15,00	16,50	18,00	20,74

Fonte: Autoria Própria

As variáveis de ruído (**Z**) selecionadas foram o desgaste do flanco da ferramenta (v_b), a vazão de fluido (Q) e o comprimento em balanço (l_{t0}). A tabela 7 apresenta os níveis adotados para as variáveis de ruído. Os níveis adotados para as variáveis de ruído foram definidos considerando dados da literatura e observações realizadas durante os ensaios preliminares. As respostas consideradas nesta pesquisa foram a rugosidade R_a (μm) e taxa de remoção de material (mm^3/s).

Tabela 7 – Níveis para as variáveis de ruído

Variáveis de ruído	Níveis do processo		
	-1	0	1
v_b - Desgaste do flanco da ferramenta[mm]	0	0,15	0,30
Q - Vazão de fluido [l/min]	0	0,20	20
l_{t0} - Comprimento em balanço [mm]	30	40	50

Fonte: Autoria Própria

3.7 Planejamento de Experimentos

A obtenção dos dados referentes às características de interesse de um processo é uma atividade muito importante na execução da pesquisa. É extremamente importante o planejamento detalhado dos experimentos, bem como sua adequada execução e registro, pois um banco de dados mal elaborado pode conduzir a resultados errôneos.

Portanto, nesta pesquisa, um arranjo CCD combinado é utilizado contendo sete variáveis, sendo quatro de controle e três de ruído. Os pontos axiais do ruído foram retirados da análise, visto que, experimentalmente esses valores não são possíveis de serem executados. Um projeto fatorial de meia fração foi utilizado, logo foram gerados 64 pontos fatoriais, 8 pontos axiais e 10 pontos centrais, totalizando 82 experimentos. A distância axial ou raio de região experimental α é de 2,83.

O arranjo CCD combinado apresenta em sua parte superior $n_f = 2^{k+r}$ pontos fatoriais com o objetivo de garantir a estimativa dos efeitos lineares das variáveis de controle e ruído, da interação entre as variáveis de controle e também a interação entre as variáveis de ruído, sendo esta última essencial para o estudo da robustez do processo. O arranjo é composto por $n_a = 2k$ pontos axiais, refere-se apenas as variáveis de processo. E por último o arranjo contém n_c pontos centrais. Estes pontos centrais são utilizados para estimar o erro experimental de forma independente e auxilia na estimativa dos efeitos de curvatura para as variáveis de processo (PEREIRA *et al.*, 2017). A Figura 28 representa um arranjo CCD combinado e a Tabela 8 apresenta o planejamento de experimentos utilizado nessa pesquisa.

ordem padrão	x_1	x_2	...	x_k	z_1	z_2	...	z_k
1	-1	-1	...	-1	-1	-1	...	-1
⋮	1	-1	...	-1	-1	-1	...	-1
⋮	-1	1	...	-1	-1	-1	...	-1
⋮	1	1	...	-1	-1	-1	...	-1
⋮	⋮	⋮	...	⋮	⋮	⋮	...	⋮
$n_f = 2^{k+r}$	1	1	...	1	1	1	...	1
1	$-\rho$	0	...	0	0	0	...	0
⋮	ρ	0	...	0	0	0	...	0
⋮	0	$-\rho$...	0	0	0	...	0
⋮	0	ρ	...	0	0	0	...	0
⋮	⋮	⋮	...	⋮	0	0	...	0
⋮	0	0	...	$-\rho$
$n_a = 2k$	0	0	...	ρ	0	0	...	0
1	0	0	...	0	0	0	0	0
⋮	⋮	⋮	...	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
n_c	0	0	...	0	0	0	0	0

Figura 28 - Arranjo CCD combinado

Fonte: Pereira, (2017)

Tabela 8 – Planejamento de Experimentos

Exp.	Variáveis de controle				Variáveis de ruído		
	v_c [m/min]	f_z [mm/dente]	a_p [mm]	a_e [mm]	v_b [mm]	Q [l/min]	l_{t0} [mm]
1	60	0,1	0,80	15,00	0	0	50
2	90	0,1	0,80	15,00	0	0	30
3	60	0,16	0,80	15,00	0	0	30
4	90	0,16	0,80	15,00	0	0	50
5	60	0,10	0,80	18,00	0	0	30
6	90	0,10	0,80	18,00	0	0	50
7	60	0,16	0,80	18,00	0	0	50
8	90	0,16	0,80	18,00	0	0	30
9	60	0,10	1,20	15,00	0	0	30
10	90	0,10	1,20	15,00	0	0	50
11	60	0,16	1,20	15,00	0	0	50
12	90	0,16	1,20	15,00	0	0	30
13	60	0,10	1,20	18,00	0	0	50
14	90	0,10	1,20	18,00	0	0	30
15	60	0,16	1,20	18,00	0	0	30
16	90	0,16	1,20	18,00	0	0	50
17	60	0,10	0,80	15,00	0,30	0	30
18	90	0,10	0,80	15,00	0,30	0	50
19	60	0,16	0,80	15,00	0,30	0	50
20	90	0,16	0,80	15,00	0,30	0	30
21	60	0,10	0,80	18,00	0,30	0	50
22	90	0,10	0,80	18,00	0,30	0	30
23	60	0,16	0,80	18,00	0,30	0	30
24	90	0,16	0,80	18,00	0,30	0	50
25	60	0,10	1,20	15,00	0,30	0	50
26	90	0,10	1,20	15,00	0,30	0	30
27	60	0,16	1,20	15,00	0,30	0	30
28	90	0,16	1,20	15,00	0,30	0	50
29	60	0,10	1,20	18,00	0,30	0	30

Continuação da Tabela 8 - Planejamento Experimental

Exp.	Variáveis de controle				Variáveis de ruído		
	v_c [m/min]	f_z [mm/dente]	a_p [mm]	a_e [mm]	v_b [mm]	Q [l/min]	l_{t0} [mm]
30	90	0,10	1,2	18	0,30	0	50
31	60	0,16	1,20	18,00	0,30	0	50
32	90	0,16	1,20	18,00	0,30	0	30
33	60	0,10	0,80	15,00	0	20	30
34	90	0,10	0,80	15,00	0	20	50
35	60	0,16	0,80	15,00	0	20	50
36	90	0,16	0,80	15,00	0	20	30
37	60	0,10	0,80	18,00	0	20	50
38	90	0,10	0,80	18,00	0	20	30
39	60	0,16	0,80	18,00	0	20	30
40	90	0,16	0,80	18,00	0	20	50
41	60	0,10	1,20	15,00	0	20	50
42	90	0,10	1,20	15,00	0	20	30
43	60	0,16	1,2	15,00	0	20	30
44	90	0,16	1,20	15,00	0	20	50
45	60	0,10	1,20	18,00	0	20	30
46	90	0,10	1,20	18,00	0	20	50
47	60	0,16	1,20	18,00	0	20	50
48	90	0,16	1,20	18,00	0	20	30
49	60	0,1	0,80	15,00	0,30	20	50
50	90	0,1	0,80	15,00	0,30	20	30
51	60	0,16	0,80	15,00	0,30	20	30
52	90	0,16	0,80	15,00	0,30	20	50
53	60	0,1	0,80	18,00	0,30	20	30
54	90	0,1	0,80	18,00	0,30	20	50
55	60	0,16	0,80	18,00	0,30	20	50
56	90	0,16	0,80	18,00	0,30	20	30
57	60	0,1	1,20	15,00	0,30	20	30

Continuação da Tabela 8 - Planejamento Experimental

Exp.	Variáveis de controle				Variáveis de ruído		
	v_c [m/min]	f_z [mm/dente]	a_p [mm]	a_e [mm]	v_b [mm]	Q [l/min]	h_0 [mm]
58	90	0,1	1,20	15,00	0,30	20	50
59	60	0,16	1,20	15,00	0,30	20	50
60	90	0,16	1,20	15,00	0,30	20	30
61	60	0,1	1,20	18,00	0,30	20	50
62	90	0,1	1,20	18,00	0,30	20	30
63	60	0,16	1,20	18,00	0,30	20	30
64	90	0,16	1,20	18,00	0,30	20	50
65	32,50	0,13	1,00	16,50	0,15	0,20	40
66	117,40	0,13	1,00	16,50	0,15	0,20	40
67	75	0,05	1,00	16,50	0,15	0,20	40
68	75	0,21	1,00	16,50	0,15	0,20	40
69	75	0,13	1,00	12,26	0,15	0,20	40
70	75	0,13	1,00	20,74	0,15	0,20	40
71	75	0,13	0,43	16,50	0,15	0,20	40
72	75	0,13	1,57	16,50	0,15	0,20	40
73	75	0,13	1,00	16,50	0,15	0,20	40
74	75	0,13	1,00	16,50	0,15	0,20	40
75	75	0,13	1,00	16,50	0,15	0,20	40
76	75	0,13	1,00	16,50	0,15	0,20	40
77	75	0,13	1,00	16,50	0,15	0,20	40
78	75	0,13	1,00	16,50	0,15	0,20	40
79	75	0,13	1,00	16,50	0,15	0,20	40
80	75	0,13	1,00	16,50	0,15	0,20	40
81	75	0,13	1,00	16,50	0,15	0,20	40
82	75	0,13	1,00	16,50	0,15	0,20	40

Fonte: Autoria Própria

Os coeficientes dos modelos de regressão para R_a e MRR foram estabelecidos aplicando o método dos mínimos quadrados ordinários. A significância dos efeitos de cada variável de controle e de ruído separadamente, as interações entre as variáveis

de controle, bem como as interações entre variáveis de controle e variáveis de ruído foram realizadas utilizando a análise de variância (ANOVA).

Tomando as derivadas parciais das variáveis latentes (\mathbf{x}, \mathbf{z}), as equações de média e variância foram determinadas, conforme Equações 21 e 22 respectivamente. Em seguida os modelos para as funções EQM_{Ra} e EQM_{MRR} foram estabelecidos, e pôr fim a minimização entre o viés média $[\mu]$, alvo $[T]$ e variância (σ^2) , de cada variável de resposta, foi realizada utilizando o método de otimização da interseção normal à fronteira (NBI).

Para modelar e otimizar os erros quadráticos foram utilizados os softwares Minitab® e o solver presente MS-excel®. O algoritmo de programação não-linear utilizado foi o gradiente reduzido generalizado (GRG). Todos os experimentos foram realizados em ordem aleatória. As análises foram realizadas com nível de significância (α) igual a 5%.

4. Resultados e Discussão

Os resultados dos experimentos do fresamento de topo do aço inoxidável duplex UNS S32205 são apresentados, conforme Tabela 9. Os experimentos foram executados utilizando um planejamento composto central (CCD) onde foram combinadas as variáveis de controle com as variáveis de ruído, para cada linha do experimento e foram medidas as respostas da rugosidade R_a e taxa de remoção de material (MRR).

Tabela 9 - Planejamento experimental com respostas

EXP	Variáveis de controle				Variáveis de Ruído			Respostas	
	v_c	f_z	a_e	a_p	V_B	Q	l_{t0}	R_a	MRR
	[m/min]	[mm/dente]	[mm]	[mm]	[mm]	[l/min]	[mm]	[μ m]	[mm ³ /s]
1	60,00	0,10	15,0	0,80	0,00	0,00	50,0	0,520	44,64
2	90,00	0,10	15,0	0,80	0,00	0,00	30,0	0,347	68,29
3	60,00	0,16	15,0	0,80	0,00	0,00	30,0	0,630	64,55
4	90,00	0,16	15,0	0,80	0,00	0,00	50,0	0,717	105,26
5	60,00	0,10	18,0	0,80	0,00	0,00	30,0	0,503	40,39
6	90,00	0,10	18,0	0,80	0,00	0,00	50,0	0,360	84,54
7	60,00	0,16	18,0	0,80	0,00	0,00	50,0	0,657	108,16
8	90,00	0,16	18,0	0,80	0,00	0,00	30,0	0,747	137,22
9	60,00	0,10	15,0	1,20	0,00	0,00	30,0	0,503	74,06
10	90,00	0,10	15,0	1,20	0,00	0,00	50,0	0,303	102,28
11	60,00	0,16	15,0	1,20	0,00	0,00	50,0	0,653	111,09
12	90,00	0,16	15,0	1,20	0,00	0,00	30,0	0,700	140,06
13	60,00	0,10	18,0	1,20	0,00	0,00	50,0	0,487	73,02
14	90,00	0,10	18,0	1,20	0,00	0,00	30,0	0,317	102,38
15	60,00	0,16	18,0	1,20	0,00	0,00	30,0	0,653	101,90
16	90,00	0,16	18,0	1,20	0,00	0,00	50,0	0,737	184,17
17	60,00	0,10	15,0	0,80	0,30	0,00	30,0	0,837	44,02
18	90,00	0,10	15,0	0,80	0,30	0,00	50,0	0,867	61,08
19	60,00	0,16	15,0	0,80	0,30	0,00	50,0	0,637	51,83
20	90,00	0,16	15,0	0,80	0,30	0,00	30,0	0,960	96,61
21	60,00	0,10	18,0	0,80	0,30	0,00	50,0	0,930	51,91
22	90,00	0,10	18,0	0,80	0,30	0,00	30,0	0,813	84,58
23	60,00	0,16	18,0	0,80	0,30	0,00	30,0	0,667	85,08
24	90,00	0,16	18,0	0,80	0,30	0,00	50,0	1,003	135,26
25	60,00	0,10	15,0	1,20	0,30	0,00	50,0	0,958	70,66
26	90,00	0,10	15,0	1,20	0,30	0,00	30,0	0,858	89,70
27	60,00	0,16	15,0	1,20	0,30	0,00	30,0	0,683	79,84

Continuação tabela 9 - Planejamento experimental com respostas

EXP	Variáveis de controle				Variáveis de Ruído			Respostas	
	V_c	f_z	a_e	a_p	V_B	Q	It_0	R_a	MRR
	[m/min]	[mm/dente]	[mm]	[mm]	[mm]	[l/min]	[mm]	[μ m]	[mm ³ /s]
28	90,00	0,16	15,0	1,20	0,30	0,00	50,0	1,033	141,72
29	60,00	0,10	18,0	1,20	0,30	0,00	30,0	0,971	49,21
30	90,00	0,10	18,0	1,20	0,30	0,00	50,0	0,719	104,99
31	60,00	0,16	18,0	1,20	0,30	0,00	50,0	0,670	127,76
32	90,00	0,16	18,0	1,20	0,30	0,00	30,0	1,097	187,52
33	60,00	0,10	15,0	0,80	0,00	20,0	30,0	0,453	49,98
34	90,00	0,10	15,0	0,80	0,00	20,0	50,0	0,277	68,63
35	60,00	0,16	15,0	0,80	0,00	20,0	50,0	0,570	73,07
36	90,00	0,16	15,0	0,80	0,00	20,0	30,0	0,630	73,47
37	60,00	0,10	18,0	0,80	0,00	20,0	50,0	0,403	68,21
38	90,00	0,10	18,0	0,80	0,00	20,0	30,0	0,270	73,26
39	60,00	0,16	18,0	0,80	0,00	20,0	30,0	0,487	88,94
40	90,00	0,16	18,0	0,80	0,00	20,0	50,0	0,657	93,50
41	60,00	0,10	15,0	1,20	0,00	20,0	50,0	0,440	83,43
42	90,00	0,10	15,0	1,20	0,00	20,0	30,0	0,287	103,44
43	60,00	0,16	15,0	1,20	0,00	20,0	30,0	0,523	102,61
44	90,00	0,16	15,0	1,20	0,00	20,0	50,0	0,693	133,25
45	60,00	0,10	18,0	1,20	0,00	20,0	30,0	0,430	74,01
46	90,00	0,10	18,0	1,20	0,00	20,0	50,0	0,243	102,47
47	60,00	0,16	18,0	1,20	0,00	20,0	50,0	0,540	119,62
48	90,00	0,16	18,0	1,20	0,00	20,0	30,0	0,667	141,60
49	60,00	0,10	15,0	0,80	0,30	20,0	50,0	0,716	44,84
50	90,00	0,10	15,0	0,80	0,30	20,0	30,0	0,707	71,99
51	60,00	0,16	15,0	0,80	0,30	20,0	30,0	0,447	63,72
52	90,00	0,16	15,0	0,80	0,30	20,0	50,0	0,840	71,49
53	60,00	0,10	18,0	0,80	0,30	20,00	30,0	0,820	57,62
54	90,00	0,10	18,0	0,80	0,30	20,0	50,0	0,773	63,36
55	60,00	0,16	18,0	0,80	0,30	20,0	50,0	0,510	71,01
56	90,00	0,16	18,0	0,80	0,30	20,0	30,0	0,800	129,10
57	60,00	0,10	15,0	1,20	0,30	20,0	30,0	0,823	57,60
58	90,00	0,10	15,0	1,20	0,30	20,0	50,0	0,723	95,55
59	60,00	0,16	15,0	1,20	0,30	20,0	50,0	0,593	110,17
60	90,00	0,16	15,0	1,20	0,30	20,0	30,0	0,830	135,58
61	60,00	0,10	18,0	1,20	0,30	20,0	50,0	0,873	73,87
62	90,00	0,10	18,0	1,20	0,30	20,0	30,0	0,603	100,25
63	60,00	0,16	18,0	1,20	0,30	20,0	30,0	0,620	88,68
64	90,00	0,16	18,0	1,20	0,30	20,0	50,0	0,870	171,70

Variáveis de controle

Continuação tabela 9 - Planejamento experimental com respostas

EXP	Variáveis de controle				Variáveis de Ruído			Respostas	
	V_c	f_z	a_e	a_p	V_B	Q	l_{t0}	R_a	MRR
	[m/min]	[mm/dente]	[mm]	[mm]	[mm]	[l/min]	[mm]	[μ m]	[mm ³ /s]
65	32,50	0,13	16,5	1,00	0,15	0,20	40,00	0,754	53,93
66	117,40	0,13	16,50	1,00	0,15	0,20	40,00	0,767	154,71
67	75,00	0,05	16,50	1,00	0,15	0,20	40,00	0,692	29,11
68	75,00	0,21	16,50	1,00	0,15	0,20	40,00	1,071	145,22
69	75,00	0,13	12,26	1,00	0,15	0,20	40,00	0,933	72,03
70	75,00	0,13	20,74	1,00	0,15	0,20	40,00	0,940	123,71
71	75,00	0,13	16,50	0,43	0,15	0,20	40,00	0,743	44,40
72	75,00	0,13	16,50	1,57	0,15	0,20	40,00	0,784	119,19
73	75,00	0,13	16,50	1,00	0,15	0,20	40,00	0,530	85,29
74	75,00	0,13	16,50	1,00	0,15	0,20	40,00	0,393	107,22
75	75,00	0,13	16,50	1,00	0,15	0,20	40,00	0,413	97,58
76	75,00	0,13	16,50	1,00	0,15	0,20	40,00	0,393	97,47
77	75,00	0,13	16,50	1,00	0,15	0,20	40,00	0,387	108,52
78	75,00	0,13	16,50	1,00	0,15	0,20	40,00	0,393	103,17
79	75,00	0,13	16,50	1,00	0,15	0,20	40,00	0,413	105,16
80	75,00	0,13	16,50	1,00	0,15	0,20	40,00	0,380	102,32
81	75,00	0,13	16,50	1,00	0,15	0,20	40,00	0,340	90,58
82	75,00	0,13	16,50	1,00	0,15	0,20	40,00	0,397	90,18

Fonte: Autoria Própria

Com relação aos valores de rugosidade R_a encontrados, nota-se que os valores variaram de 0,243 até 1,071 μ m. Os valores encontrados neste trabalho são considerados ótimos, visto que, se aproximam a rugosidades encontradas em processos de retificação. Com esses valores de rugosidades R_a encontradas, as aplicações possíveis são em mancais, cones de tubos sincronizados de caixas de câmbios, guias de mesas de máquinas ferramentas, rotores de turbinas e superfícies de medição de calibre. Pode-se verificar em alguns trabalhos como o de Brito, (2015) que encontrou rugosidades R_a variando entre 0,100 a 3,25 μ m. Garcia *et al.* (2021) que encontraram rugosidades R_a variando entre 0,280 a 0,640 μ m. Oliveira *et al.*

(2020) obtiveram valores de rugosidades entre 0,326 a 0,700 μm . Portanto é possível concluir que os valores encontrados nesta dissertação, estão em conformidade com a literatura.

Para avaliar a produtividade do processo de acabamento no fresamento de topo do aço inoxidável duplex UNS S32205, utilizou-se a taxa de remoção de material conforme Equação 9. Nota-se que os valores variaram entre 29,11 a 187,52 mm^3/s .

4.1 Modelos quadráticos da rugosidade R_a e taxa de remoção MRR

As modelagens das funções para a rugosidade R_a e taxa de remoção MRR foram determinadas a partir dos resultados obtidos durante os experimentos do fresamento de topo do aço inoxidável duplex UNS S32205. A metodologia de superfície de resposta foi utilizada para estabelecer a relação matemática entre as variáveis de respostas e os fatores de controle e ruído. A ANOVA foi realizada para verificar os termos, do modelo, mais significantes para R_a e MRR . Os modelos polinomiais de segunda ordem estão descritos pelas Equações (28 e 29).

$$\begin{aligned}
 Ra(x, z) = & 0,425 + 0,015v_c + 0,055f_z + 0,001a_e + 0,008a_p + \\
 & 0,138v_b - 0,053Q + 0,004lt_0 + 0,045vc^2 + 0,060f_z^2 + 0,067a_e^2 \\
 & + 0,045a_p^2 + 0,088v_c f_z - 0,005v_c a_e - 0,011v_c a_p + 0,035v_c v_b \\
 & + 0,000v_c Q + 0,001v_c lt_0 + 0,005f_z a_e + 0,010f_z a_p - 0,075f_z v_b \\
 & - 0,008f_z Q + 0,002f_z lt_0 - 0,005a_e a_p + 0,004a_e v_b - 0,001a_e Q \\
 & + 0,005a_e lt_0 + 0,010a_p v_b + 0,003a_p Q - 0,005a_p lt_0
 \end{aligned} \tag{28}$$

$$\begin{aligned}
 MRR(x, z) = & 95,82 + 16,67v_c + 19,00f_z + 7,96a_e + 15,25a_p \\
 & - 1,93v_b - 2,31Q + 2,27lt_0 + 0,605v_c^2 - 1,54f_z^2 - 0,202a_e^2 \\
 & - 2,211a_p^2 + 3,28v_c f_z + 2,88v_c a_e + 3,59v_c a_p + 2,76v_c v_b \\
 & - 3,85v_c Q - 2,76v_c lt_0 + 5,36f_c a_e + 3,90f_z a_p + 0,94f_z v_b \\
 & - 3,65f_z Q + 0,62f_z lt_0 - 2,29a_e a_p + 1,57a_e v_b - 2,09a_e Q \\
 & + 0,60a_e lt_0 - 0,09a_p v_b + 0,85a_p Q + 3,27a_p lt_0
 \end{aligned} \tag{29}$$

4.2 Anova para Rugosidade R_a

A Tabela 10 apresenta os resultados obtidos através da análise de variância (ANOVA) para a rugosidade R_a , considerando um nível de significância 5%. Os termos em negritos são estatisticamente significativos, pois apresentaram valor $P < 5\%$. Analisando os efeitos das variáveis lineares, a velocidade de corte (v_c), o avanço por dente (f_z), o desgaste de flanco (v_b) e a vazão do fluido (Q) apresentaram influência

estatisticamente significativa. Percebe-se ao analisar o valor da estatística F , que a variável de ruído desgaste de flanco (v_b) apresentou maior influência sobre a rugosidade superficial R_a , seguido do avanço por dente (f_z). Observa-se também que todos os termos quadráticos são significativos. As interações foram significativas apenas em $v_c * f_z$, $v_c * v_b$ e $f_z * v_b$.

Considerando valor-P >5% para o *Lack of Fit*, o teste de falta de ajuste mostra que o modelo se adequa bem aos dados coletados no processo. Os coeficientes de ajustes R^2_{adj} foram superiores a 93%, ou seja, o modelo estimado para R_a apresenta boa capacidade de realizar previsões, além de apresentar alta explicação de variabilidade dos dados, podendo ser comparado a valores encontrados em simulações computacionais.

Tabela 10 - ANOVA para a rugosidade R_a

Termos	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	F	P- Value
Modelo	29	3,5665	0,123	44,05	0,000
Linear	7	1,6816	0,2402	86,04	0,000
v_c	1	0,0204	0,0204	7,31	0,009
f_z	1	0,2485	0,2485	89,01	0,000
a_e	1	0,0003	0,0003	0,11	0,738
a_p	1	0,0055	0,0055	1,96	0,168
v_b	1	1,223	1,223	438,00	0,000
Q	1	0,1827	0,1827	65,42	0,000
l_{t0}	1	0,0013	0,0013	0,47	0,497
Quadrático	4	0,9034	0,2258	80,88	0,000
v_c^2	1	0,2192	0,2192	78,51	0,000
f_z^2	1	0,3903	0,3903	139,77	0,000
a_e^2	1	0,4842	0,4842	173,41	0,000
a_p^2	1	0,2229	0,2229	79,82	0,000
Interações	18	0,9815	0,0545	19,53	0,000
$v_c * f_z$	1	0,4972	0,4972	178,07	0,000
$v_c * a_e$	1	0,0017	0,0017	0,61	0,437
$v_c * a_p$	1	0,0081	0,0081	2,91	0,094
$v_c * v_b$	1	0,0785	0,0785	28,1	0,000
$v_c * Q$	1	0	0	0	0,994
$v_c * l_{t0}$	1	9E-05	9E-05	0,03	0,860
$f_z * a_e$	1	0,0019	0,0019	0,67	0,415

Continuação Tabela 10 - ANOVA para a rugosidade R_a

Termos	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	F	P- Value
$f_z * a_p$	1	0,0068	0,0068	2,45	0,124
$f_z * v_b$	1	0,3674	0,3674	131,58	0,000
$f_z * Q$	1	0,0041	0,0041	1,48	0,229
$F_z * l_{t0}$	1	0,0006	0,0006	0,2	0,657
$a_e * a_p$	1	0,0019	0,0019	0,69	0,410
$a_e * v_b$	1	0,0016	0,0016	0,56	0,460
$a_e * Q$	1	0,0002	0,0002	0,07	0,794
$a_e * l_{t0}$	1	0,002	0,002	0,71	0,405
$a_p * Q$	1	0,0066	0,0066	2,36	0,131
$a_p * v_b$	1	0,001	0,001	0,35	0,555
$a_p * l_{t0}$	1	0,0019	0,0019	0,68	0,413

Análise de Variância R_a					
Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	F	P- Value
Erro	52	0,1452	0,0028		
Falta de ajuste	43	0,1238	0,0029	1,21	0,404
Erro puro	9	0,0214	0,0024		
Total	81	3,7117			

Ajuste do Modelo R_a		
S	R ²	R ² (aj)
0,0528	96,09%	93,91%

Fonte: Autoria Própria

A Figura 29 ilustra os efeitos principais dos parâmetros do processo sobre a rugosidade R_a . Os efeitos quadráticos estão relacionados as variáveis de controle e os efeitos lineares as variáveis de ruído. Observa-se que a mudança do menor para o maior nível de (v_b) provoca um aumento na rugosidade R_a . Isso pode ser explicado, devido ao desgaste estar associado a elevadas temperaturas geradas na interface cavaco-ferramenta, principalmente, na usinagem de materiais com baixa condutividade térmica e com alto grau de endurecimento, causando possíveis aumentos dos esforços de corte, vibrações no conjunto peça-ferramenta e produzindo superfícies mal-acabadas (DINIZ *et al*, 2014). Em relação à quantidade de fluido, o aumento de vazão na máquina-ferramenta provoca um decréscimo em R_a . Todavia, o aumento da quantidade de fluido pode provocar uma redução de temperatura na região de corte, onde também é capaz de retirar o cavaco produzido durante o

processo, além de diminuir o atrito entre o próprio cavaco e ferramenta, melhorando o acabamento da superfície da peça usinada (MACHADO *et al.*, 2011).

Com relação aos efeitos quadráticos das variáveis controláveis, a mudança do menor para o maior nível de (f_z) provoca um aumento na rugosidade R_a . A influência do avanço por dente (f_z) quando os níveis são aumentados tendem a causar rugosidades maiores, contudo, avanços muito baixos podem provocar o efeito de riscamento na superfície fresada, resultando em superfícies mal acabadas (TOLEDO, 2018). Sob baixas velocidades de corte pode ocorrer a formação de arestas postiças de corte onde ocorre o aumento da rugosidade R_a (KOYEE, R *et al.*, 2014). Porém, com o aumento da velocidade de corte, ocorre a elevação da rotação da ferramenta, ocasionando vibrações no processo e superfícies mal acabadas. Portanto, os mínimos valores de rugosidade R_a são encontrados quando a velocidade de corte e o avanço por dente estão no nível médio, o desgaste de flanco no nível -1 e vazão no nível +1. A Figura 30 ilustra os efeitos das interações entre as variáveis controle e variáveis de ruído sobre a rugosidade R_a .

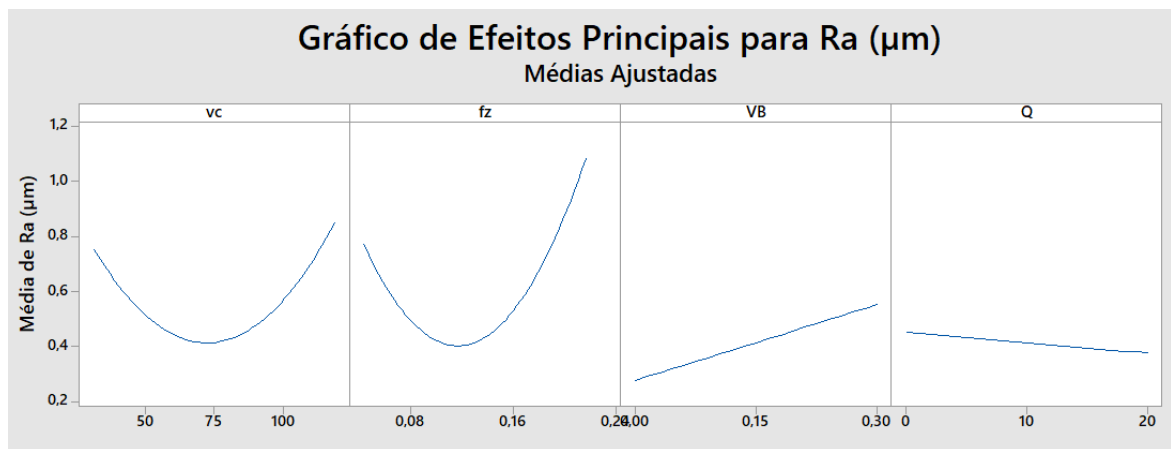
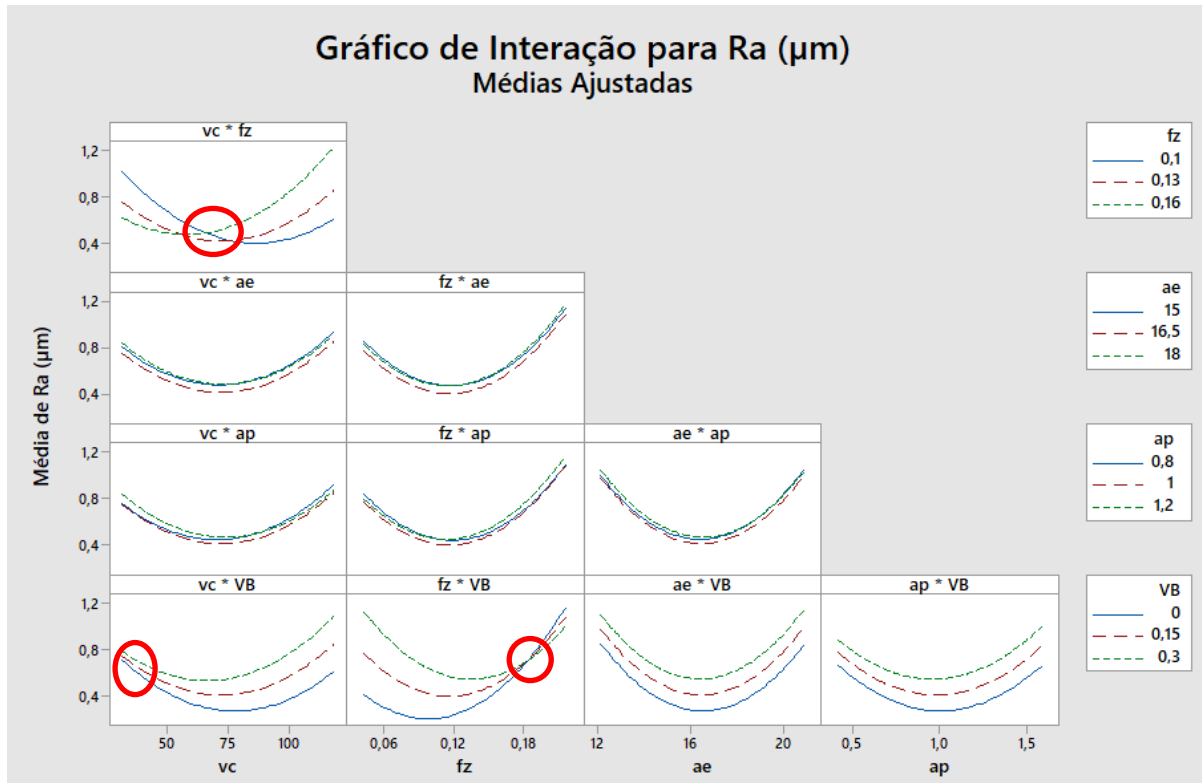


Figura 29 – Efeitos principais sobre a rugosidade R_a

Fonte: Autoria Própria



Analisando as interações, verifica-se que a velocidade de corte (v_c) apresentou interação positiva com o avanço por dente (f_n), onde o aumento dos dois fatores contribui para o aumento da rugosidade R_a . A rugosidade é mínima quando os dois fatores se encontram em seu ponto médio. Análise semelhante pode ser feita com a interação entre velocidade de corte (v_c) e desgaste de flanco (v_b), essas também apresentaram interação positiva e a rugosidade R_a é mínima quando a velocidade de corte está em seu nível médio e o desgaste de flanco é zero, no caso de ferramenta nova. E por fim, a interação entre avanço por dente (f_z) e desgaste de flanco (v_b) também foram positivas. Pode-se observar que altos avanços mitigam o efeito do desgaste da fresa na rugosidade da peça. A rugosidade R_a é mínima quando o avanço por dente está em seu nível médio e o desgaste de flanco é mínimo. Os pontos vermelhos destacados representam onde o processo de fresamento de topo do aço inoxidável duplex UNS 32205 apresenta robustez. Portanto, é possível concluir que o aumento dos níveis das variáveis e suas interações amplificam os valores da rugosidade R_a .

4.3 Características da Taxa de Remoção de Material (MRR)

A tabela 11 apresenta os resultados obtidos através da análise de variância (ANOVA) para a taxa de remoção de material (*MRR*), considerando um nível de significância 5%. Os termos em negritos são estatisticamente significativos, pois apresentam valor $P < 5\%$. Analisando os efeitos das variáveis controláveis, a velocidade de corte (v_c), o avanço por dente (f_z), a largura fresada (a_e), a profundidade de corte (a_p), influenciaram significativamente. Analisando os efeitos das variáveis incontroláveis a vazão do fluido (Q) e o balanço da ferramenta (lt_0), apresentaram influência estatisticamente significativa. Contudo, é possível perceber que seus valores de P-value ficaram muito próximos de 5%. Percebe-se ao analisar o valor da estatística F , que a variável avanço por dente (f_z) apresentou maior influência sobre a taxa de remoção de material (*MRR*). Os termos quadráticos, somente a profundidade de corte (a_p) foi significativa. As interações foram significativas com as seguintes variáveis: $v_c * f_z$, $v_c * a_e$, $v_c * a_p$, $v_c * v_b$, $v_c * Q$, $v_c * lt_0$, $f_z * a_e$, $f_z * a_p$, $f_z * Q$, $a_e * a_p$, $a_p * lt_0$.

Tabela 11 - ANOVA para a taxa de remoção de material

Termos	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	P- Value
Modelo	29	85759	2957,2	36,93	0,000
Linear	7	75697	10814	135,06	0,000
v_c	1	22241	22241	277,78	0,000
f_z	1	28868	28868	360,55	0,000
a_e	1	5072	5072	63,35	0,000
a_p	1	18608	18608	232,4	0,000
v_b	1	237,3	237,3	2,96	0,091
Q	1	341,1	341,1	4,26	0,044
lt_0	1	329,6	329,6	4,12	0,048
Quadrático	4	823,8	205,9	2,57	0,048
v_c^2	1	39,2	39,2	0,49	0,488
f_z^2	1	253,9	253,9	3,17	0,081
a_e^2	1	4,4	4,4	0,05	0,817
a_p^2	1	523,3	523,3	6,54	0,014
Interações	18	9238,3	513,2	6,41	0,000
$v_c * f_z$	1	690,2	690,2	8,62	0,005
$v_c * a_e$	1	530,4	530,4	6,62	0,013
$v_c * a_p$	1	822,7	822,7	10,27	0,002

Continuação – Tabela 11 - ANOVA para a taxa de remoção de material

Termos	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	P- Value
$v_c * v_b$	1	487	487	6,08	0,017
$v_c * Q$	1	948	948	11,84	0,001
$v_c * l_{t0}$	1	488,9	488,9	6,11	0,017
$f_z * a_e$	1	1838,6	1838,6	22,96	0,000
$f_z * a_p$	1	972,2	972,2	12,14	0,001
$f_z * a_b$	1	56,9	56,9	0,71	0,403
$f_z * Q$	1	850,3	850,3	10,62	0,002
$f_z * l_{t0}$	1	24,8	24,8	0,31	0,580
$a_e * a_p$	1	335,6	335,6	4,19	0,046
$a_e * v_b$	1	156,9	156,9	1,96	0,167
$a_e * Q$	1	280,7	280,7	3,51	0,067
$a_e * l_{t0}$	1	23	23	0,29	0,594
$a_p * Q$	1	0,6	0,6	0,01	0,934
$a_p * v_b$	1	46,8	46,8	0,58	0,448
$a_p * l_{t0}$	1	684,8	684,8	8,55	0,005
Erro	52	4163,5	80,1		
Falta de ajuste	43	3598,8	83,7	1,33	0,338
Erro puro	9	564,7	62,7		
Total	81	89923			

Ajuste do Modelo MRR		
S	R ²	R ² (aj)
8,9480	95,37%	92,79%

Fonte: Autoria Própria

A Figura 31 ilustra os efeitos principais dos parâmetros do modelo para a resposta *MRR*. Os efeitos quadráticos estão relacionados às variáveis de controle e os efeitos lineares às variáveis de ruído. Nota-se que todas as variáveis de controle (v_c , f_z , a_e e a_p) apresentaram efeitos positivos sobre a taxa de remoção de material, corroborando assim com o que traz a literatura, ou seja, a taxa de remoção é diretamente proporcional com as variáveis controladas do processo de fresamento de topo. Portanto, quando o avanço por dente, a velocidade de corte, a profundidade de corte e a profundidade radial são aumentados ocorre um aumento na taxa de remoção de material. Com relação aos efeitos lineares dos ruídos, tanto a vazão (Q) como a altura em balanço (l_{t0}) da fresa apresentaram influência estatisticamente significativa,

contudo, como seus valores de P-value ficaram muito próximos do nível de significância, sua influência é muito pequena, não causando efeito na resposta.

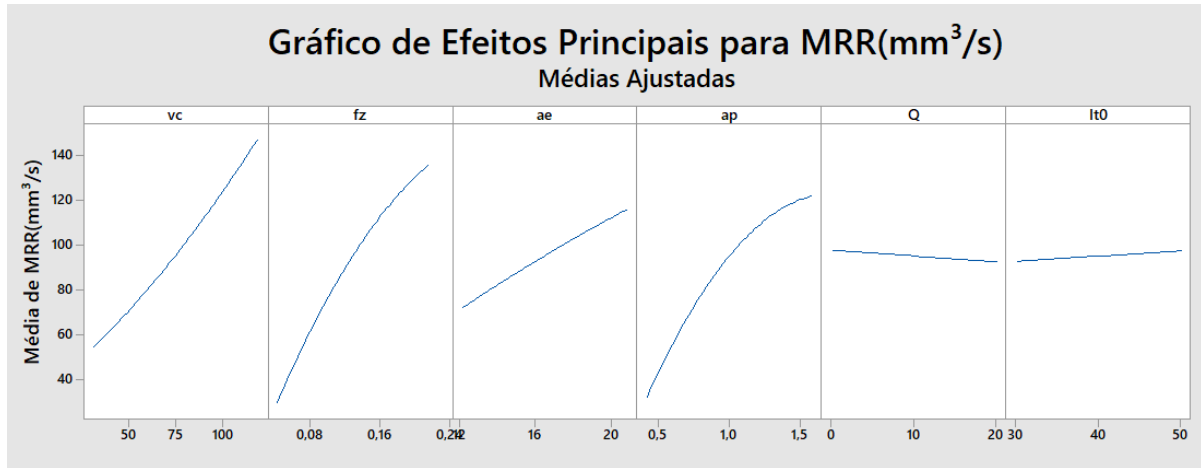
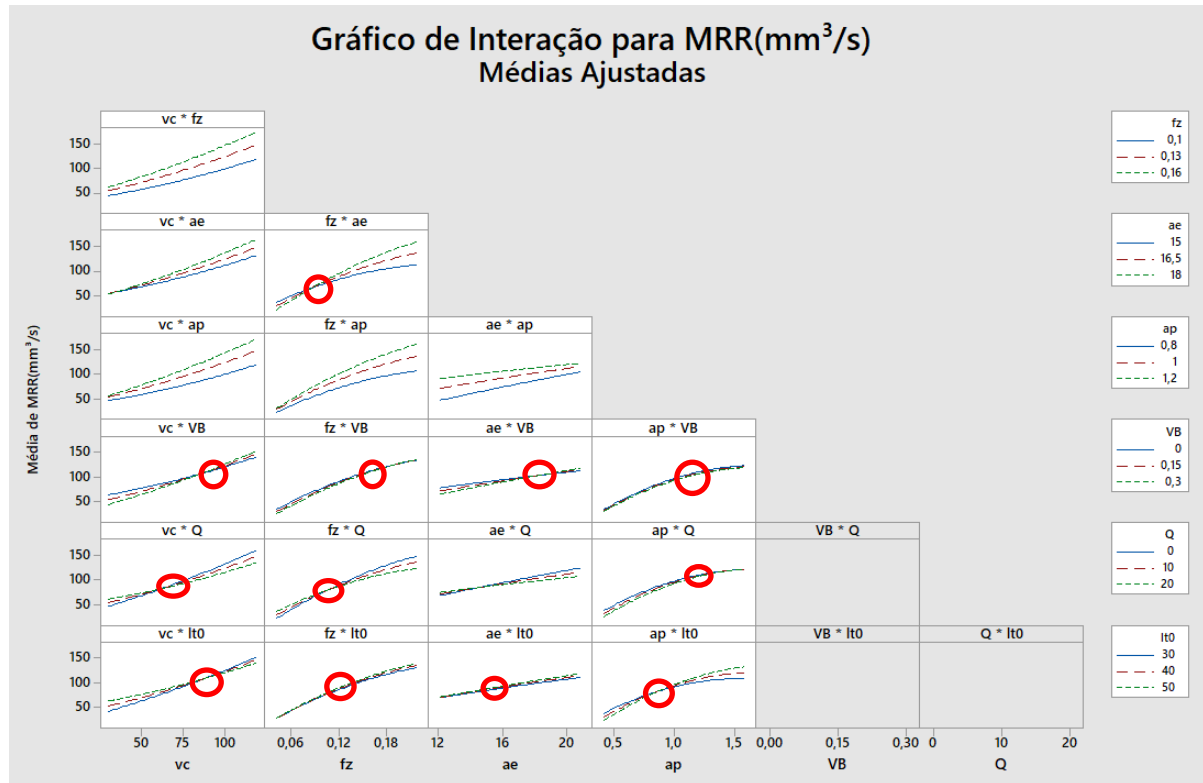


Figura 31 – Efeitos principais sobre a taxa de remoção de material

Fonte: Própria

A Figura 32 ilustra os efeitos das interações entre as variáveis de controle e entre as variáveis de controle e de ruído. O aumento da taxa de remoção de material foi mais acentuado nas interações entre velocidade de corte (v_c) e profundidade de corte (a_p), avanço por dente (f_z) e largura fresada (a_e) e por fim entre avanço por dente (v_c) e profundidade de corte (a_p). Nota-se que o aumento dos níveis implicou no aumento da taxa de remoção de material. Os pontos vermelhos destacados representam onde o processo de fresamento de topo do aço inoxidável duplex UNS 32205 apresenta robustez. Portanto, a taxa de remoção de material é maximizada quando todas as interações estão em seus níveis maiores.



4.4 Otimização multiobjetivo pelo método NBI

Até o presente momento, os resultados obtidos apresentaram grande relevância para o estudo em questão, visto que, muitas informações importantes passam a ser conhecidas a partir da modelagem matemática realizada. Dentre essas informações, pode-se destacar a influência dos parâmetros de corte sobre as características de interesse, definição das variáveis significativas do processo, onde as mesmas são fatores decisivos para uma boa gestão de manufatura no processo de fresamento de topo. Ademais, tendo-se em mãos modelos estatísticos confiáveis, é possível realizar boas otimizações e chegar a bons resultados. Portanto, neste contexto, desenvolve-se nesta fase a otimização biobjetivo do processo de fresamento de topo do aço inoxidável duplex UNS S32205, empregando a metodologia do Erro Quadrático Médio (EQM) e da Interseção Normal a Fronteira (NBI).

Este trabalho foi desenvolvido utilizando os conceitos do Projeto de Parâmetro Robusto por meio do arranjo combinado. A otimização das respostas envolve duas funções, sendo necessária a aplicação de um método dual. Neste estudo, utilizou-se os conceitos do erro quadrático médio (EQM), que objetiva minimizar de forma

conjunta o viés e a variância dos fatores. Portanto, o primeiro passo da otimização envolve a definição das equações de média e de variância para cada uma das respostas, a partir dos modelos de regressão definidas nas Equações 28 e 29. Os modelos de média para rugosidade R_a e MRR em função das variáveis de controle são apresentados nas Equações 30 e 31, respectivamente.

$$\begin{aligned}\mu_{R_a} = & 0,426 + 0,016v_c + 0,056f_z + 0,002a_e + 0,008a_p + 0,045v_c^2 + 0,060f_z^2 \\ & + 0,067a_e^2 + 0,046a_p^2 + 0,088v_c f_z - 0,005v_c a_e - 0,011v_c a_p + 0,005f_z a_e \\ & + 0,010f_z a_p - 0,005a_e a_p\end{aligned}\quad (30)$$

$$\begin{aligned}\mu_{MRR} = & 95,820 + 16,670v_c + 19,000f_z + 7,960a_e + 15,250a_p + 0,605v_c^2 \\ & - 1,540f_z^2 - 0,202a_e^2 - 2,211a_p^2 + 3,280v_c f_z + 2,880v_c a_e + 3,590v_c a_p \\ & + 5,360f_z a_e + 3,900f_z a_p - 2,290a_e a_p\end{aligned}\quad (31)$$

Os modelos de variância para rugosidade R_a e MRR em função das variáveis de controle são apresentados nas Equações 32 e 33, respectivamente.

$$\begin{aligned}Var[R_a] = & 0,025 + 0,010v_c - 0,020f_z + 0,002a_e + 0,002a_p + 0,001v_c^2 \\ & + 0,006f_z^2 + 0,0001a_e^2 + 0,0001a_p^2 - 0,005v_c f_z + 0,0003v_c a_e \\ & + 0,001v_c a_p - 0,001f_z a_e - 0,002f_z a_p + 0,0001a_e a_p\end{aligned}\quad (32)$$

$$\begin{aligned}Var[MRR] = & 94,314 - 5,397v_c + 16,049f_z + 6,320a_e + 11,266a_p + 30,058v_c^2 \\ & + 14,591f_z^2 + 7,193a_e^2 + 11,424a_p^2 + 29,871v_c f_z + 21,447v_c a_e \\ & - 25,092v_c a_p + 18,953f_z a_e - 2,319f_z a_p + 0,088a_e a_p\end{aligned}\quad (33)$$

Os modelos de média e de variância das respostas R_a e MRR , são escritas apenas em função das variáveis controláveis, embora as de ruído tenham sido consideradas durante a experimentação. No entanto, dado que a equação de variância é definida por meio das derivadas parciais do modelo de regressão envolvendo as variáveis de controle e ruído, o ajuste das variáveis de controle leva à minimização da variabilidade da rugosidade R_a e da taxa de remoção de material (MRR), garantindo assim a robustez do processo.

O próximo passo da otimização é definir os alvos (T) para as respostas. Os alvos (T) são estabelecidos por meio da otimização da função da média de cada resposta levando em consideração seus sentidos de otimização e a restrição do espaço experimental. O espaço experimental foi definido conforme Equação 23. Os alvos para a rugosidade R_a e taxa de remoção de material MRR são apresentadas nas Figuras 33 e 34, respectivamente.

Média	R _a		Variável decodificada	Níveis do processo	
Cte	0,426	1		-1	1
v _c	0,016	1,119	91,79	60	90
f _z	0,056	-1,300	0,09	0,1	0,16
a _e	0,002	0,089	17	15	18
a _p	0,008	0,200	1,04	0,8	1,2
v _c ²	0,045	1,253			
f _z ²	0,060	1,689			
a _e ²	0,067	0,008			
a _p ²	0,046	0,040			
v _c f _z	0,088	-1,455			
v _c a _e	-0,005	0,099			
v _c a _p	-0,011	0,224			
f _z a _e	0,005	-0,115			
f _z a _p	0,010	-0,260			
a _e a _p	-0,005	0,018			
T(Ra)	0,399				
ρ		2,000			
X ^T X	2,99	4,00			

Figura 33 – Alvo (*T*) para Rugosidade R_a

Fonte: Autoria Própria

Média	MRR		Variável decodificada	Níveis do processo	
Cte	95,820	1		-1	1
v _c	16,670	1,202	93,03	60	90
f _z	19,000	1,172	0,17	0,1	0,16
a _e	7,960	0,691	18	15	18
a _p	15,250	0,840	1,17	0,8	1,2
v _c ²	0,605	1,444			
f _z ²	-1,540	1,374			
a _e ²	-0,202	0,477			
a _p ²	-2,211	0,705			
v _c f _z	3,280	1,409			
v _c a _e	2,880	0,830			
v _c a _p	3,590	1,009			
f _z a _e	5,360	0,810			
f _z a _p	3,900	0,984			
a _e a _p	-2,290	0,580			
T(MRR)	171,01				
ρ		2,000			
X ^T X	4,00	4,00			

Figura 34 – Alvo (*T*) para Taxa de Remoção de Material (MRR)

Fonte: Autoria Própria

Definidos os valores de (T) para R_a e MRR , estabeleceu-se as equações do erro quadrático médio (EQM) conforme Equações 34 e 35. Essas equações serão funções no problema de otimização biobjetivo solucionado pelo método NBI.

$$EQM_{R_a} = (\mu_{R_a} - 0,399)^2 + \sigma_{R_a}^2 \quad (34)$$

$$EQM_{MRR} = (\mu_{MRR} - 171,01)^2 + \sigma_{MRR}^2 \quad (35)$$

Após a definição das funções do EQM para as respostas, é construída a matriz *Payoff*. Cada coluna da matriz *Pay-off* (Φ) corresponde a uma solução ótima, assim, seus elementos representam a avaliação de cada função objetivo na solução ótima das outras funções objetivo. Por outro lado, cada linha da matriz *Pay-off* (Φ) representa uma função objetivo. Assim, cada linha da matriz *Pay-off* (Φ) contém os valores limites (máximos e mínimos) de cada função objetivo (VAHIDINASAB & JADID, 2010). Para a obtenção dos pontos de utopia e os pontos de Nadir, primeiramente foram realizadas as otimizações individuais do EQM_{R_a} e EQM_{MRR} . A Tabela 12 apresenta a matriz *Payoff* obtida.

Tabela 12 – Matriz *Payoff* EQM_{R_a} X EQM_{MRR}

Matriz Payoff	
0,012	0,187
8230,6	216,809

Fonte: Autoria Própria

Posteriormente realizou-se a normalização das funções objetivo, e para o caso dual, o problema *PPR* associado ao método *NBI* foi solucionado conforme Equação 36:

$$\begin{aligned} \text{Min } \bar{f}_1(\mathbf{x}) &= \left(\frac{EQM_1(\mathbf{x}) - EQM_1^l(\mathbf{x})}{EQM_1^{\max}(\mathbf{x}) - EQM_1^l(\mathbf{x})} \right) \\ \text{s.t. } \bar{g}_1(\mathbf{x}) &= \left(\frac{EQM_1(\mathbf{x}) - EQM_1^l(\mathbf{x})}{EQM_1^{\max}(\mathbf{x}) - EQM_1^l(\mathbf{x})} \right) - \left(\frac{EQM_2(\mathbf{x}) - EQM_2^l(\mathbf{x})}{EQM_2^{\max}(\mathbf{x}) - EQM_2^l(\mathbf{x})} \right) + 2w - 1 = 0 \quad (36) \end{aligned}$$

$$g_2(\mathbf{x}) = \mathbf{X}^T \mathbf{X} \leq \rho^2$$

$$0 \leq w \leq 1$$

Para a otimização e determinação dos pontos ótimos, utilizou-se o algoritmo GRG, utilizando o solver[®] do Excel. O peso (w) foi modificado de acordo com o incremento realizado de 0,05 e após a solução do problema de otimização do NBI, estabeleceu-se a fronteira de Pareto com 21 pontos. Os resultados da otimização entre $EQM_{Ra}(\mathbf{x})$ e $EQM_{MRR}(\mathbf{x})$ foram resumidos conforme a Tabela 13. A fronteira de Pareto contendo todas as soluções ótimas pode ser observada, conforme Figura 35.

Tabela 13 - Resultados da otimização para o EQM_{Ra} e EQM_{MRR}

Nº	Peso	Decodificadas				Funções				Respostas	
		v_c m/min	f_z mm/dente	a_e mm	a_p mm	EQM_{Ra}	EQM_{MRR}	$f_1(x)$	$f_2(x)$	R_a (μm)	MRR (mm^3/s)
1	0	92,58	0,16	17,06	1,24	0,19	216,81	1,00	0,00	0,808	167,87
2	0,05	93,19	0,16	17,21	1,25	0,17	220,40	0,90	0,00	0,782	166,82
3	0,1	94,06	0,15	17,31	1,26	0,15	235,87	0,80	0,00	0,753	164,80
4	0,15	95,01	0,15	17,34	1,26	0,14	274,14	0,71	0,01	0,721	161,79
5	0,2	94,12	0,14	17,34	1,24	0,12	346,57	0,62	0,02	0,696	158,17
6	0,25	92,39	0,14	17,32	1,23	0,10	453,56	0,53	0,03	0,672	154,30
7	0,3	90,52	0,15	17,29	1,21	0,09	600,83	0,45	0,05	0,648	150,17
8	0,35	88,44	0,15	17,24	1,20	0,08	794,92	0,37	0,07	0,625	145,78
9	0,4	86,16	0,15	17,19	1,18	0,06	1042,38	0,30	0,10	0,602	141,14
10	0,45	83,71	0,15	17,14	1,16	0,05	1349,15	0,24	0,14	0,579	136,28
11	0,5	81,10	0,15	17,07	1,14	0,01	8230,61	0,19	0,19	0,558	131,22
12	0,55	78,38	0,15	17,01	1,13	0,04	2155,58	0,14	0,24	0,539	126,02
13	0,6	75,60	0,15	16,94	1,11	0,03	2655,82	0,10	0,30	0,521	120,72
14	0,65	72,83	0,15	16,86	1,09	0,02	3216,02	0,07	0,37	0,506	115,40
15	0,7	70,13	0,15	16,79	1,07	0,02	3829,52	0,05	0,45	0,493	110,12
16	0,75	67,55	0,15	16,71	1,04	0,02	4488,54	0,03	0,53	0,482	104,92
17	0,8	65,13	0,15	16,63	1,02	0,02	5185,26	0,02	0,62	0,473	99,84
18	0,85	62,89	0,15	16,55	1,00	0,01	5912,65	0,01	0,71	0,467	94,91
19	0,9	60,85	0,15	16,47	0,98	0,01	6665,05	0,00	0,80	0,463	90,12
20	0,95	59,02	0,15	16,38	0,95	0,01	7438,42	0,00	0,90	0,461	85,48
21	1	57,40	0,15	16,30	0,93	0,01	8230,61	0,00	1,00	0,462	80,98

Fonte: Autoria Própria

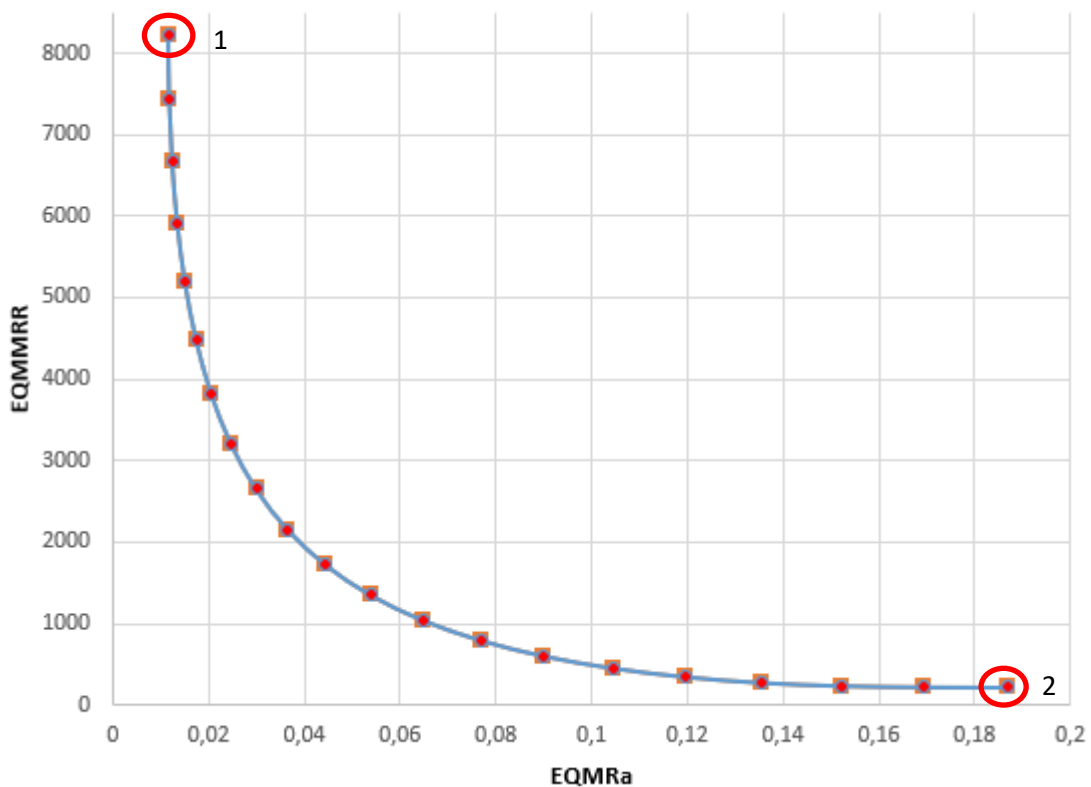


Figura 35 – Fronteira de Pareto EQM_{Ra} e EQM_{MRR}
Fonte: Autoria Própria

Observa-se na Figura 35 que os espaços das soluções sobre a fronteira de Pareto ficaram equidistantes e equiespaçadas, confirmando a proposta postulada por Das e Denis (1989). Em um cenário de chão de fábrica, estas soluções possibilitam à engenharia de manufatura explorar diferentes cenários robustos às variáveis de ruído, no qual se deseja um aumento de produtividade. Neste caso, o engenheiro de processo pode escolher o ponto 1 da fronteira, onde os níveis das variáveis de controle são: [$v_c=92,5$ m/min; $f_z=0,16$ mm/dente; $a_e=17,06$ mm; $a_p=1,24$ mm]. Estes valores favorecem à produtividade do processo e nesta condição o valor de MRR foi de $187,52$ mm³/s. Caso o engenheiro deseje obter uma melhor qualidade do processo, o ponto 21 pode ser selecionado, e neste caso os níveis ótimos do processo são: [$v_c=57,4$ m/min; $f_z=0,15$; $a_e=16,30$ mm; $a_p=0,93$ mm], onde a rugosidade R_a foi de $0,462$ μ m.

Ressalta-se que todas as soluções Pareto-ótimas obtidas são robustas em relação às variáveis de ruído para o processo de fresamento de topo do aço inoxidável duplex em questão. Os níveis robustos para a velocidade de corte estão no intervalo de [57,4 - 92,6] m/min, para o avanço por dente F_z estão no intervalo de [0,15 - 0,16] mm/dente, para a largura fresada a_e estão no intervalo de [16,30 - 17,03] mm e para a profundidade de corte a_p estão no intervalo de [0,93 - 1,24] mm. Estes níveis

garantem a robustez da rugosidade R_a e da taxa de remoção de material MRR em relação as variáveis de ruído consideradas neste estudo.

Todavia, quando se aborda a otimização biobjetivo, após a obtenção e filtragem das soluções Pareto-ótimas, pode ser necessário classificá-las em função da proximidade de cada solução com o alvo desejado (ponto de Utopia). Desta forma, um critério matemático pode ser útil ao engenheiro de processo na definição da melhor solução Pareto-ótima. A distância Euclidiana d_{j+} , de cada solução Pareto-ótima, \bar{f}_j^* , ao ponto de Utopia \bar{f}^U , para $j=1,2,\dots,n$ no espaço normalizado, é calculada conforme a Equação 37. A melhor solução é aquela cuja a distância Euclidiana é a menor, ou seja, $\min_{(j \in sub)} d_{j+}$ (SAYYAADI & MEHRABIPOUR, 2012).

$$d_{j+} = \sqrt{\sum_{i=1}^m (f_{ij} - f_i^*)^2} \quad (37)$$

Para a avaliação experimental de uma das soluções Pareto-ótimas e confirmar a capacidade dos modelos de resposta obtidos neste estudo, a solução Pareto-ótima N°11 foi a que apresentou menor distancia euclidiana $d_{j+}=1,15$. Portanto a mesma foi selecionada para os experimentos de confirmação.

5. Experimentos de Confirmação

Os experimentos de confirmação foram realizados com o objetivo de avaliar a robustez do processo de fresamento de topo do aço inoxidável duplex UNS S32205 em relação às variáveis de ruído. A Tabela 14 apresenta os parâmetros ótimos das variáveis de controle que serão fixadas no comando CNC da máquina.

Tabela 14 – Níveis das variáveis de controle

Variáveis codificadas				Variáveis decodificadas				Variáveis de respostas	
v_c	f_z	a_e	a_p	v_c	f_z	a_e	a_p	μ_{Ra}	μ_{MRR}
(m/min)	(mm/dente)	(mm)	(mm)	(m/min)	(mm/dente)	(mm)	(mm)	(μm)	(mm^3/s)
0,406	0,609	0,383	0,723	81,097	0,148	17,074	1,145	0,558	131,223

Fonte: Autoria Própria

Nos experimentos de confirmação as variáveis de controle permaneceram fixas, enquanto as variáveis de ruído se alternaram conforme seus respectivos níveis. O principal objetivo da otimização robusta é encontrar uma configuração de fatores controláveis que não seja influenciada pelas variáveis de ruídos. Para testar esta afirmação, um projeto L9 de Taguchi foi utilizado e o planejamento experimental pode ser observado, conforme Tabela 15. Para cada experimento a taxa de remoção de material MRR e a rugosidade R_a foram medidas, sendo que os valores de R_a foram coletados nas extremidades e no centro do corpo de prova. Os ensaios confirmatórios foram replicados 3 vezes e os resultados podem ser observados conforme Tabela 16.

Tabela 15 – Planejamento de Experimentos L9 de Taguchi

Nº Exp	v_b [mm]	Q [l/min]	l_{to} [mm]
1	0,00	0,0	30
2	0,00	0,2	40
3	0,00	20,0	50
4	0,15	0,0	40
5	0,15	0,2	50
6	0,15	20,0	30
7	0,30	0,0	50
8	0,30	0,2	30
9	0,30	20,0	40

Fonte: Autoria Própria

Tabela 16 – Resultados dos experimentos de confirmação

Exp	v_b [mm]	Q [l/min]	l_{t0} [mm]	Ra (μm)	MRR (mm^3/s)
1	0,00	0,00	30,00	0,503	129,221
2	0,00	0,20	40,00	0,662	154,003
3	0,00	20,00	50,00	0,509	129,690
4	0,15	0,00	40,00	0,602	145,872
5	0,15	0,20	50,00	0,669	154,273
6	0,15	20,00	30,00	0,626	146,466
7	0,30	0,00	50,00	0,668	154,932
8	0,30	0,20	30,00	0,602	142,241
9	0,30	20,00	40,00	0,504	146,987

Fonte: Autoria Própria

Para avaliar a significância dos efeitos das variáveis de ruído sobre as respostas, uma análise de variância (ANOVA) foi realizada considerando um nível de significância de 0,05. A Tabela 17 apresenta os valores-P obtidos para a rugosidade R_a e a Tabela 18 para a taxa de remoção de material MRR em função das variáveis de ruído v_b , Q e l_{t0} . Observa-se que todas as variáveis de ruído não apresentaram influência significativa sobre as respostas, pois os valor-P foram maiores que o nível de significância de 5%. Portanto, é possível concluir por meio dos experimentos de confirmação que a robustez do processo de fresamento de topo do aço inoxidável duplex UNS S32205 foi alcançada. A Tabela 19 mostra uma comparação entre os valores otimizados e os valores executados. Nota-se que a resposta de rugosidade executado foi muito próximo ao otimizado, exceto pela taxa de remoção, que foi 10% maior. No entanto, esse valor é pequeno e aceitável.

Tabela 17 – ANOVA das variáveis de ruído para a Rugosidade R_a

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
V_b	2	0,008318	0,004159	0,540	0,650
Q	2	0,014444	0,007222	0,940	0,516
L_{t0}	2	0,002298	0,001149	0,150	0,870
Erro	2	0,015424	0,007712		
Total	8	0,040483			

Fonte: Autoria Própria

Tabela 18 – ANOVA das variáveis de ruído para a taxa de remoção MRR

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
V _b	2	235,3	117,66	0,960	0,509
Q	2	135,2	67,59	0,550	0,643
L _{to}	2	148,9	74,46	0,610	0,621
Erro	2	243,9	121,96		
Total	8	763,3			

Fonte: Autoria Própria

Tabela 19– Comparação entre resultados otimizados e executados

Resposta	Condição inicial	Exp. Executados	Diferença (%)
Ra	0,588	0,594	1%
MRR	131,21	144,84	10%

Fonte: Autoria Própria

Vale salientar que a robustez deste processo é alcançada, mitigando a influência da vazão do fluido de corte, da presença do desgaste do inserto e do comprimento de balanço da fresa no fresamento do aço inoxidável duplex. O processo de usinagem a seco representa uma boa alternativa para a usinagem, visto que, o custo do fluido de corte ser aproximadamente de 17% do custo total de fabricação (YAZID *et al.*, 2020).

6. Conclusões

O presente trabalho buscou analisar, modelar e otimizar o processo de fresamento de topo do aço inoxidável duplex UNS S32205 utilizando ferramentas intercambiáveis de metal duro. As respostas avaliadas em relação as variáveis de controle e ruído foram R_a e a taxa de remoção de material MRR . Assim, pode-se concluir que:

As rugosidades R_a obtidas ficaram na faixa entre 0,243 a 1,097 μm , que são valores muito bons considerando a baixa usinabilidade do material usinado, podendo ser comparado à valores obtidos em processo de retificação. A taxa de remoção de material alternou entre 40,39 a 187,52 mm^3/s , que para um processo de acabamento, são valores considerados altos.

Atendendo aos objetivos específicos, foi possível estabelecer modelos matemáticos para as características de interesse. Em relação à rugosidade R_a o modelo de resposta apresentou uma alta explicação da variabilidade dos dados onde o R^2_{adj} foi de 93,91%. Em relação à taxa de remoção de material MRR , a equação de regressão também apresentou altas explicações da variabilidade dos dados, sendo seu R^2_{adj} de 92,79%.

As análises de variância das respostas mostraram que o desgaste de flanco (v_b) foi a variável que mais influenciou na rugosidade R_a seguido do avanço por dente (f_z). Observou-se também que todos os termos quadráticos foram significativos. As interações significativas para a rugosidade foram $v_c * f_z$, $v_c * v_b$ e $f_z * v_b$. Já a taxa de remoção de material todas as variáveis do processo foram significativas. Percebeu-se que a variável avanço por dente (f_z) apresentou maior influência sobre a taxa de remoção de material (MRR). Os termos quadráticos, somente a profundidade de corte (a_p) foi significativa. As interações significativas foram $v_c * f_z$, $v_c * a_e$, $v_c * a_p$, $v_c * v_b$, $v_c * Q$, $v_c * l_{t0}$, $f_z * a_e$, $f_z * a_p$, $f_z * Q$, $a_e * a_p$, $a_p * l_{t0}$.

A partir das interações entre as variáveis de controle e de ruído, foi possível avaliar a robustez das características de interesse em relação às variáveis de ruído. Foi possível estabelecer as equações de média e variância como as equações do EQM para as características de interesse.

Após a otimização do *EQM*, aplicou-se a metodologia da interseção normal à fronteira (*NBI*) e a otimização robusta biobjetivo foi realizada. Assim, 21 soluções Pareto-ótimas foram obtidas. Estas soluções possibilitaram explorar diferentes cenários robustos às variáveis de ruído consideradas neste trabalho, obtendo resultados satisfatórios em relação à qualidade superficial e à produtividade.

Os experimentos de confirmação com os níveis ótimos das variáveis de controle: são: $v_c = 81,10$ m/min, $f_z = 0,15$ mm/dente, $a_p = 1,14$ mm e $a_e = 17,07$ mm, alcançaram as respostas de $R_a = 0,588$ μ m e $MRR = 131,21$ mm³/s. Onde observou-se que todas as variáveis de ruído não apresentaram influência significativa sobre as respostas. Assim, constatou-se a robustez do processo de fresamento de topo do aço inoxidável duplex UNS S32205. Ou seja, mitigou-se a influência da vazão do fluido de corte no processo, a influência do desgaste e do comprimento de balanço da fresa na rugosidade da peça e na taxa de remoção.

6.1 Contribuições do trabalho

A principal contribuição desta pesquisa consiste na otimização robusta biobjetivo no processo de fresamento de topo do aço inoxidável duplex UNS S32205, possibilitando obter melhores valores de rugosidade superficial R_a e maiores taxas de remoção de material MRR .

6.2 Sugestões para trabalhos futuros

Como sugestões para estudos futuros, ficam as seguintes considerações:

- a) Comparar os resultados dos tipos de fresamento, concordante com o discordante deste mesmo aço, usando as mesmas combinações;
- b) Emprego do erro quadrático médio (*EQM*) neste mesmo aço, considerando outros ruídos como vibração e temperatura, visando testar a aplicabilidade do método.
- c) Realizar uma comparação de ferramentas inteiriças de metal duro com ferramentas de insertos intercambiáveis nas respostas R_a e MRR ;

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT NBR 4287:2002. Especificações geométricas do produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil - Termos, definições e parâmetros da rugosidade. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, Brasil, 2002. 18.

ALMEIDA, D. Influência da direção de aplicação do fluido de corte na temperatura da interface cavaco-ferramenta. Grupo de integração da Manufatura.2007. Disponível em: <http://www.grima.ufsc.br/cobef4/files/toc.html> Acesso em: 5 de janeiro de 2021.

ALMEIDA et al. Robust parameter project applied to the optimization of the steel turning process AISI 12L14. Proceedings of the 7th International Conference on Mechanics and Materials in Design, Albufeira/Portugal 11-15 June 2017. Editors J.F. Silva Gomes and S.A. Meguid. Publ. INEGI/FEUP (2017)

AMORIM, H. J. Estudo da relação entre velocidade de corte, desgaste de ferramenta, rugosidade e forças de usinagem no torneamento com ferramenta de metal duro. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, p. 114. 2002.

Airao, J., Chaudhary, B., Bajpai, V., & Khanna, N. (2018). Estudo Experimental da Variação da Rugosidade Superficial no Fresamento de Topo de Aço Inoxidável Super Duplex 2507. *Materials Today: Proceedings*, 5(2), 3682–3689. doi: 10.1016/j.matpr.2017.11.619

ASM Handbook - Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys. vol. 1, 10^a Ed., 2005

ARTCHEM. Característica do fluido de corte Metcut SS. Disponível em: <<http://www.itwchem.com.br/linha-de-produto/metcut-ss-2/>>. Acesso em: 23 set. 2020.

BEREZKIN, V. E. e LOTOV, A. V. Comparison of Two Pareto Frontier Approximations. *Computational Mathematics and Mathematical Physics*, v. 54, nº. 9, p. 1455–1464, 2014. <https://doi.org/10.1134/S0965542514090048>.

BERGUIGA, T.; BOUMERZOUG, Z. Effect of sigma phase precipitation on mechanical behavior and pitting corrosion of duplex stainless steel. *Acta Metallurgica Slovaca*, v. 25, n. 1, p. 4–17, 2019.

BORGES, D. S. Otimização e gerenciamento dos parâmetros de corte em usinagem. 2019.

BOX, G.; BISGAARD, S.; FUNG, C. An explanation and critique of Taguchi's contributions to quality engineering. *Quality and Reliability Engineering International*, v. 4, n. 2, p. 123–131, abr. 1988.

Bouزيد, A. W Zghal & L. Saï (2004) Taguchi Method For Design Optimisation of Milled Surface Roughness, *Materials Technology*, 19:3, 159-162, DOI: 10.1080/10667857.2004.11753079

BRYMAN, A. *Research methods and organization studies*. London: Unwin Hyman, London, p. 283, 1989.

BRITO, T. G.; PAIVA, A. P.; PAULA, T. I.; DALOSTO, D. N.; FERREIRA, J. R.; BALESTRASSI, P. P. Optimization of AISI 1045 end milling using robust parameter design. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 84, n. 5-8, 2015. 1185-1199.

CHEVIER, P., TIDU, A., BOLLE, B., CEZARD, P., TINNES, J. P. Investigation of surface integrity in high-speed end milling of a low alloyed steel. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, v. 43, pp. 1135-1142 2003

CHING-KAO, C.; LU, H. S. The optimal cutting-parameter selection of heavy cutting process in side milling for SUS304 stainless steel. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 34, n. 5-6, p. 440-447, 22 ago. 2007.

COULOMB, J. L.; LEBENSZTAJN, L. TEAM Workshop Problem 25: A multiobjective analysis", *IEEE - Transactions on Magnetics*, v.40, n. 2, p. 1402-1405, 2004.

DAVIS, J.R. *Stainless Steel*. USA: American Society for Metals, 345p. (p.6), 1994.

DAS, I., e DENNIS, J.E. Normal-Boundary Intersection: A New Method for Generating the Pareto Surface in Nonlinear Multicriteria Optimization Problems. *SIAM Journal on Optimization*, v. 8, n. 3, p. 631-657, 1998.

DINIZ, A. E., MARCONDES, F. C., COPPINI, N. L. (2008). *Tecnologia da usinagem dos materiais*. 6ª ed. São Paulo: Artliber Editora, 262 p.

DINIZ, A. E., MARCONDES, F. C., COPPINI, N. L. *Tecnologia da usinagem de materiais*. 9ª Edição, 2014.

E. Uhlmann, H. Riemer, D. Schröter, F. Sammler, S. Richarz, Substitution of Coolant by Using a Closed Internally Cooled Milling Tool, *Procedia CIRP*, Volume 61, 2017, Pages 553-557, ISSN 2212-8271, <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.11.267>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827116314421>)

FAN, Y; ZHANG, L. VOLSKI, V; VANDENBOSCH, G.A.E; BLANPAIN, B; GUO, M. Utilization of Stainless-steel Furnace Dust as an Admixture for Synthesis of Cementbased Electromagnetic Interference Shielding Composites. *Scientific Reports*, v. 7, n. 1, p. 15368, 2017.

FERRARESI, D. *Fundamentos da Usinagem dos Metais*. São Paulo: Blücher, 1977.

FERREIRA, F. G. D. C. Estudo Comparativo entre Modelos e Técnicas de Otimização de Portifólios com Restrição de Cardinalidade. Dissertação (Mestrado em Modelagem Matemática e Computacional) - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, 2018.

Figueiredo, G, X, A. Bordinassi, É. C Estudo da rugosidade e vida de ferramenta do aço inoxidável superduplex astm a-890 após fresamento em diferentes condições de lubrificação Iniciação científica da escola de engenharia de Mauá (2009)

GARCIA, F. R. et al. Análise da rugosidade obtida no fresamento frontal de acabamento do Aço Inoxidável duplex forta DX 2205, 2019

GAMARRA, J. R. Estratégias de usinagem no torneamento de aço inoxidável super duplex (UNS S32750). Dissertação de Mestrado, Faculdade em Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, SP, Brasil, 2017.

GANESAN, T; VASANT, P., ELAMVAZUTHI, I. Normal Boundary Intersection based parametric multi-objective optimization of green sand moul system. Journal of Manufacturing Systems, v. 32(1), p. 197-205, 2013.

GOMES, José Henrique de Freitas. Análise e otimização da soldagem de revestimento de chapas de aço ABNT 1020 com utilização de arame tubular inoxidável austenítico, 2010. 136 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal de Itajubá

GOUVEIA, R. M, SILVA, F. J. G, REIS, P E BAPTISTA A. P. M. Machining Duplex Stainless Steel: Comparative Study Regarding End Mill Coated Tools. Coatings, vol. 6, p 6-30, 2016.

IMOA. Practical Guidelines for the Fabrication of Duplex Stainless Steels. 3 ed., International Molybdenum Association. Pittsburgh: TMR Stainless, 2014.

JEBARAJ, A. V. et al. Weldability, machinability and surfacing of commercial duplex stainless steel AISI2205 for marine applications – A recent review. Journal Advanced Research. vol. 8, p 183-199. 2017.

KALIDASS, S.; PALANISAMY, P. Experimental Investigation on the Effect of Tool Geometry and Cutting Conditions Using Tool Wear Prediction. Journal of Advanced Manufacturing Systems, v. 13, n. 1, p. 41–54, 2014.

KRISHNAPRASAD, K.; SUMESH, C. S.; RAMESH, A. Numerical modeling and multi objective optimization of face milling of AISI 304 steel. Journal of Applied and Computational Mechanics, v. 5, n. 4, p. 749–762, 2019.

KOYEE, R; HEISEL, U; SCHMAUDER, S; EISSELER, R; - Experimental Investigation and Multiobjective Optimization of Turning Duplex Stainless Steels – International Journal of Manufacturing Engineering - Volume 2014, p.13, 2014.

KULL NETO, H. Estudo das estratégias de usinagem visando a minimização da vibração no fresamento de superfícies convexas. Tese de Doutorado. Universidade Estadual de Campinas. Campinas, p. 156. 2016.

LONDERO, F. O. Avaliação de desgastes em ferramentas de metal duro revestido no torneamento do aço SAE 5160 esferoidizado. Trabalho de Conclusão de Curso (TCC). 2017.

LOPEZ, R. A. G. Desenvolvimento de um método para a geração de trajetórias para o fresamento de cavidades em peças prismáticas com múltiplas ferramentas. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Florianópolis, 2012.

MACHADO, Á. R. et al. Teoria da Usinagem dos Materiais. São Paulo: [s.n.], 2009.

MACHADO, A. R.; ABRÃO, A. M.; COELHO, R. T.; SILVA, M. B. Teoria da Usinagem dos Materiais. São Paulo: Blucher, 2011.

MARCELINO, A. P., DOMINGOS, D. C., CAMPOS, D. V. V., SCHROETER, R. B. Medição e Simulação dos Esforços de Usinagem no Fresamento de Topo Reto de Ligas de Alumínio Tratável Termicamente 6061. IX CREEM, Rio de Janeiro, Paper CRE04-PF25, 2004.

MAKADIA, A. J E NANAVATI, J.I. Optimisation of machining parameters for turning operations based on response surface methodology. Measurement, vol. 46, p. 1521-1529. 2013.

MAVI, A. 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). Tehnicki vjesnik - Technical Gazette, v. 27, n. 1, p. 270–275, fev. 2020.

MOOD, A. M. Introduction to the Theory of Statistics. McGraw-Hill, 1974.

MONTGOMERY, D. C. Design and Analysis of Experiments. 8th ed. United States of America: John Wiley & Sons, 2013.

MONTGOMERY, D. C. Design and Analysis of Experiments. 8 ed. New York: John Wiley & Sons, 2017, 735 p

MOREIRA, F. R. Otimização robusta multiobjetivo para o projeto de sistemas em Engenharia. Tese (Doutorado em Engenharias) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2015.

MORELO, F. Análise da influência do mandrilamento na integridade superficial do aço inoxidável super duplex. Dissertação de Mestrado, PPG em Engenharia Mecânica e Materiais, UTFP, Curitiba, PR, Brasil, 2014.

MYERS, R. H.; KHURI, A. I.; VINING, G. Response Surface Alternatives to the Taguchi Robust Parameter Design Approach. *The American Statistician*, v. 46, n. 2, p. 131–139, maio 1992.

MYERS, R. H.; MONTGOMERY, D. C.; ANDERSON-COOK, C. M. *Response surface methodology: Process and product optimization using designed experiments*. 4 ed. New Jersey: Wiley, New Jersey, 2016, 699

Oliveira, C. H. et al. Análise da rugosidade Ra no fresamento de topo do aço inoxidável duplex UNS S32205 utilizando planejamento de experimentos. 10º Congresso Brasileiro de Engenharia de Produção. Janeiro, 2019.

Oliveira, C. H. et al. INFLUÊNCIA DA QUANTIDADE DE FLUIDO DE CORTE NO FRESAMENTO DE TOPO DO AÇO INOXIDÁVEL DUPLEX UNS S32205. 10º Congresso Brasileiro de Engenharia de Produção. Janeiro, 2019.

S, V.; PARKHI, S. Optimization of Multiple process parameter of Milling (multi-objective) on AISI 202 stainless steel using Taguchi based grey relational analysis. *International Journal of Engineering Trends and Technology*, v. 68, n. 10, p. 81–86, 25 out. 2020.

PAIVA, A. P. et al. A multivariate robust parameter design approach for optimization of AISI 52100 hardened steel turning with wiper mixed ceramic tool. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, v. 30, n. 1, p. 152-163, 2012.

PAIVA, A. P.; GOMES, J. H. F.; PERUCHI, R. S.; LEME, R. C.; BALESTRASSI, P. P. A multivariate robust parameter optimization approach based on Principal Component Analysis with combined arrays. *Computers & Industrial Engineering*, v. 74, n. 1, p. 186–198, ago. 2014.

PEREIRA, R. B. D. Otimização robusta multi-objetivo do fresamento helicoidal do aço AISI H13 endurecido pelo método da restrição normal. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Itajubá. Itajubá, p. 284. 2017.

PERUCHI, R. S. et al. A Metodologia de Superfície de Resposta como ferramenta de modelagem e otimização do processo de fresagem de topo de aços: uma revisão. X Congresso Brasileiro de Engenharia de Produção. 2020.

PHILIP, S, D. CHANDRAMOHAN, P. et al Prediction of surface roughness in end milling operation of duplex stainless steel using response surface methodology. *Journal of Engineering Science and Technology* (2015).

POLICENA, M.R. et al. Surface Roughness Analysis in Finishing End-Milling of Duplex Stainless Steel UNS S32205. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 98, p. 1617-1625, 2018.

Policena, Mauricio & Garcia, Rafael & Souza, André. (2019). Análise da rugosidade obtida no fresamento frontal de acabamento do aço inoxidável duplex Idx 2101. 10.26678/ABCM.COBEP2019.COF2019-0284.

QUINTANA, G.; GARCIA_ROMEU, R. L.; CIURANA, J. Surface roughness monitoring application based on artificial neural networks for ball-end milling operations. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 22, n. 4, 2011. 607-617.

RAMOS, C. A. D. Usinabilidade de Aços Inoxidáveis para Matrizes ABNT 420 e VP 80 no Fresamento de Topo Usando Superfícies de Resposta. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Uberlândia. 2004

RODRIGUES, M.I.; IEMMA, A.F. Planejamento de Experimentos e Otimização de Processos. 4º ed., São Paulo, SP: Cárita, 2014.

ROSAL, C. F. Programação não-linear aplicada à otimização de redes pressurizadas de distribuição de água. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2007.

SANTOS, S. C. SALES, W. F. (2007). Aspectos Tribológicos da Usinagem dos Metais. 1ª ed. São Paulo, Artliber.

SCANDIFFIO, I.; DINIZ, A. E.; SOUZA, A. F. Evaluating surface roughness, tool life, and machining force when milling free-form shapes on hardened AISI D6 steel. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 82, n. 9-12, 2016. 2075-2086.

SANDVIK COROMANT. Manual Técnico de Usinagem. Disponível em: <<https://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/downloads/pages/default.aspx>>. Acesso em: 23 set. 2020a.

SAYYAADI, H.; MEHRABIPOUR, R. Efficiency enhancement of a gas turbine cycle using an optimized tubular recuperative heat exchanger. *Energy*, 38, n. 1, 2012. 362-375

SANTHAKUMAR, J.; IQBAL, U. M. Parametric optimization of trochoidal step on surface roughness and dish angle in end milling of AISI D3 steel using precise measurements. *Materials*, v. 12, n. 8, 2019.

Selvaraj, D, P. Chandramohan, et al. Experimental investigations on surface roughness, cutting force and tool wear of duplex stainless steel in end milling using Taguchi method. *International Review of Mechanical Engineering* 137-145 (2013)

SELVARAJ, D.P. Optimization of cutting force of duplex stainless steel in dry milling operation”, *Materials Today: Proceedings*, v. 4 , n. 10, p. 601-611, 2017.

SHIN, S.; SAMANLIOGLU, F.; CHO, B. R.; WIECEK, M. M. Computing trade-offs in robust design: Perspectives of the mean squared error. *Computers & Industrial Engineering*, v. 60, n. 2, p. 248–255, mar. 2011.

SHIJIN, M.; NAZAR, K. P. A. Multi Objective Parameter Optimization of End Milling Operation on AA5083. 2020 International Conference on Power Electronics and

Renewable Energy Applications (PEREA). Anais...IEEE, 27 nov. 2020Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9339802/>

SHOEMAKER, A. C.; TSUI, K.-L.; WU, C. F. J. Economical Experimentation Methods for Robust Design. *Technometrics*, v. 33, n. 4, p. 415–427, nov. 1991.

SILVA, A. L. C.; MEI, P. R. Aços e Ligas Especiais. Sumaré: ELETROMETAL S.A, p.305-307, 2ª Ed, 1988.

SOUTO, U. B. Monitoramento do desgaste de ferramenta no processo de fresamento via emissão acústica. 2007. 168 f. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2007.

TOLEDO, J. V. R.; Arruda, E. M.; JÚNIOR, S. S. C. ; DINIZ, A. E. ; FERREIRA, J. R. . Performance of wiper geometry carbide tools in face milling of AISI 1045 steel. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, v. 40, p. 478, 2018.

VAHIDINASAD, V.; JADID, S. Normal boundary intersection method for suppliers' strategic bidding in electricity markets: An environmental/economic approach. *Energy Conversion and Management* v. 51, p. 1111-1119, 2010.

VINING, G. G., & MYERS, R. H. Combining Taguchi and response surface philosophies: A dual response approach. *Journal of Quality Technology*, v. 22, p. 38–45, 1990.

WELCH, W. J.; YU, T-K.; KANG, S. M.; SACKS, J. Computer Experiments for Quality Control by Parameter Design. *Journal of Quality Technology*, v. 22, n. 1, p. 15–22, 21 jan. 1990.

WOJCIECHOWSKI, S.; WIACKIEWICZ, M.; KROLCZYK, G. M. Study on metrological relations between instant tool displacements and surface. *Measurement*, 129, 2018b. 686-694.

Yazid, M. Z. A. e Zainol, A., 2020. "Tool life and surface roughness in dry high-speed milling of aluminum alloy 7075- T6 using bull nose carbide insert". *Journal of Engineering Science and Technology*, Vol. 15, No. 1, p. 128-138.

Zhang, JZ, Chen, JC e Kirby, ED (2007). Otimização da rugosidade superficial em uma operação de fresamento de topo usando o método de projeto Taguchi. *Journal of Materials Processing Technology*, 184(1-3), 233–239. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2006.11.029

ZAHOOR, S.; AMEEN, F.; ABDUL-KADER, W.; STAGNER, J. Environmentally conscious machining of Inconel 718: surface roughness, tool wear, and material removal rate assessment. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 106, n. 1–2, p. 303–313, 21 jan. 2020.

ZHOU, L.; LI, J.; LI, F.; XU, X.; WANG, L.; WANG, G.; KONG, L. An improved cutting power model of machine tools in milling process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 91, n. 5–8, p. 2383–2400, 4 jul. 2017.