

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO PROFISSIONAL EM ENGENHARIA DE
PRODUÇÃO

Carlos Filipe Nascimento

OTIMIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DE USINAGEM DO AÇO INOXIDÁVEL SUPER DUPLEX UNS S32750 UTILIZANDO METODOLOGIA DE SUPERFÍCIE DE RESPOSTA

Dissertação submetida ao Programa de Pós graduação Profissional em Engenharia de Produção como requisito para obtenção do título de *Mestre em Ciências em Engenharia de Produção*.

Área de concentração: Engenharia de Produção

Orientador: Prof. Tarcísio Gonçalves de Brito, Dr.

Coorientador: Prof. Emerson José de Paiva, Dr.

Itabira

Junho de 2021

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO PROFISSIONAL EM ENGENHARIA DE
PRODUÇÃO

Carlos Filipe Nascimento

OTIMIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DE USINAGEM DO AÇO INOXIDÁVEL SUPER DUPLEX UNS S32750 UTILIZANDO METODOLOGIA DE SUPERFÍCIE DE RESPOSTA

Banca examinadora em 22 de Junho de 2021, conferindo ao autor o título de Mestre Profissional em Engenharia de Produção.

Banca Examinadora:

Prof. Tarcísio Gonçalves de Brito, Dr. (Orientador)

Prof. Emerson José de Paiva, Dr. (Coorientador)

Prof. Leonardo Albergaria Oliveira, Dr. (UNIFEI)

Prof. Rogerio Santana Peruchi, Dr. (UFPB)

Itabira

Junho de 2021

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por fazer parte da minha vida, abençoando-me com a força, a sabedoria e a persistência necessárias para o alcance dos meus objetivos. A minha família, pela educação e pelo exemplo de vida e de seres humanos. A minha esposa, amiga e companheira Gabriela S. Mendes Nascimento e a minha filha Emanuelle Vitória M. Nascimento pela tolerância e compreensão.

Aos colegas do curso pelos conhecimentos compartilhados e atividades em equipe.

Ao professor, amigo e orientador Dr. Tarcísio Gonçalves de Brito pela contribuição, dedicação, paciência e amizade.

Ao professor Carlos Henrique de Oliveira pela amizade, incentivo e apoio.

Ao Professor Dr. Emerson José de Paiva pelas contribuições incentivo e apoio.

Ao coordenador Dr. Leonardo Albergaria Oliveira pela amizade incentivo e apoio.

Aos colaboradores da UNIFEI – *Campus* de Itabira, pelas contribuições com a manutenção e o desenvolvimento da universidade.

A todos os professores do Programa de Pós Graduação Profissional em Engenharia de Produção da UNIFEI, pela formação e conhecimento adquirido.

A todos os meus amigos que, diretamente ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

A FAPEMIG, CAPES e CNPq pelo apoio financeiro.

DEDICATÓRIA

À minha esposa Gabriela e à minha filha Emanuelle, que souberam transformar os diversos momentos de ausência em apoio, incentivo, carinho e amor. E principalmente aos meus pais, José Carlos e Maria Aparecida, por toda a dedicação em nossa criação.

EPÍGRAFE

“A verdadeira viagem de descobrimento não consiste em procurar novas paisagens, mas em ter novos olhos”.

Marcel Proust

RESUMO

A melhoria de processos e produtos tem aumentado substancialmente, devido à concorrência estabelecida entre as organizações, ampliando o controle da qualidade e a busca por otimização de processos. Dentre esses processos, na manufatura, destaca-se o torneamento do aço inoxidável super duplex UNS S32750 (SDSS), o qual tem merecido especial atenção, devido às suas excelentes propriedades, resistências mecânicas e à corrosão, permitindo sua empregabilidade em diversificadas tarefas, especialmente nas indústrias petroquímicas e nos processos com incidência de cloretos. A compreensão dos parâmetros controláveis é indispensável para a melhoria da qualidade e representa uma lacuna na literatura e uma oportunidade de pesquisa. Assim, neste trabalho, propõe-se combinar conhecidas ferramentas estatísticas para se obter otimização de múltiplas respostas, de modo a identificar esses parâmetros, buscando condições iniciais ótimas: o Planejamento de Experimentos, utilizando-se um arranjo composto central (CCD); a análise de componentes principais (ACP), para redução de dimensionalidade; e a função Desirability, na determinação de uma solução de compromisso entre as variáveis de resposta. Para processos desse tipo, é comum avaliar-se a qualidade pelo acabamento da superfície resultante das peças usinadas. O estudo foi conduzido a partir de um planejamento experimental envolvendo 3 variáveis de controle (x_i): profundidade de corte (a_p), avanço (f) e velocidade de corte (v_c). Como resultado, foi estabelecido que as condições ótimas para o processo seriam $a_p = 0,63$ mm, $f = 0,08$ mm/rot e $v_c = 178,5$ m/min com rugosidades calculadas iguais a $R_a = 0.235$ μ m, $R_y = 1.084$ μ m e $R_t = 2,379$ μ m. Ao final, um experimento de confirmação foi realizado, a fim de demonstrar a capacidade de se obter peças com aceitáveis níveis de rugosidade, a partir dos parâmetros de processos obtidos pelo procedimento de otimização. Os resultados das rodadas experimentais de confirmação apontam para a boa adequação da proposta.

Palavras chave: *Otimização de múltiplas respostas, torneamento, análise de componentes principais (ACP), aço inoxidável super duplex UNS S32750.*

ABSTRACT

The improvement of processes and products has increased substantially, due to the competition established between organizations, expanding quality control and the search for process optimization. Among these processes, in manufacturing, the turning of super duplex stainless steel UNS S32750 (SDSS) stands out, which has deserved special attention due to its excellent properties, mechanical and corrosion resistance, allowing its employability in diverse tasks, especially in the petrochemical industries and in processes with incidence of chlorides. Understanding controllable parameters is essential for improving quality and represents a gap in the literature and a research opportunity. Thus, in this work, it is proposed to combine known statistical tools to obtain optimization of multiple responses, in order to identify these parameters, seeking optimal initial conditions: o Design of Experiments, using a central composite design (CCD); principal component analysis (PCA) for dimensionality reduction; and the Desirability function, in determining a trade-off between the response variables. For processes of this type, it is common to evaluate the quality by the surface finish resulting from the machined parts. The study was conducted from an experimental design involving 3 control variables (x_i): depth cut, feed rate and speed rate. As result, it was established that the optimal conditions for the process would be $a_p = 0.63$ mm, $f = 0.08$ mm/rev and $v_c = 178.5$ m/min with calculated roughness equal to $R_a = 0.235$ μ m, $R_y = 1.084$ μ m and $R_t = 2.379$ μ m. At the end, a confirmation experiment was carried out, in order to demonstrate the ability to obtain parts with acceptable levels of roughness, from the process parameters obtained by the optimization procedure. The results of the experimental confirmation rounds point to the good adequacy of the proposal.

Keywords: *Optimization multiple responses, turning, Principal component analysis (PCA), Super duplex stainless steel UNS S32750.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Variáveis de controle no processo de torneamento	6
Figura 2.2 - Processo de Torneamento do aço inoxidável super duplex UNS S32750.....	7
Figura 2.3 - Comparação entre parâmetros de usinagem para diferentes aços inoxidáveis duplex	8
Figura 2.4 - Comparação de usinabilidade de diferentes ligas de aços inoxidáveis.....	16
Figura 2.5 - Irregularidades de Superfícies. (A) textura de uma superfície mostrando efeitos de rugosidade; (B) ondulações; (C) erro de forma	22
Figura 2.6 - Desvio médio aritmético R_a	23
Figura 2.7 - Representação do R_y	24
Figura 2.8 - Rugosidade R_t distância entre pico e vale.....	25
Figura 2.9 - Superfície de resposta	27
Figura 2.10 - Arranjos experimentais de superfície de resposta (a) CCD; (b) Box-Behnken..	30
Figura 2.11 - CCD fatorial para a) $k=2$ e b) $k=3$	31
Figura 2.12 - Tipos de CCD	32
Figura 2.13 - Representação esquemática para desirability com objetivo de minimização	39
Figura 2.14 - Representação esquemática para <i>desirability</i> com objetivo de normalização....	39
Figura 2.15 - Representação esquemática para desirability com objetivo de normalização	40
Figura 3.1 - Torno CNC Eurostec	42
Figura 3.2 – Pastilha perfil WNMG 080408	43
Figura 3.3 – Rugosímetro utilizado no experimento.....	44
Figura 3.4 - Sequência de estruturação dos resultados.....	46
Figura 3.5 - Torno CNC CY-K6136/75 e corpo de prova posicionado para experimentação .	48
Figura 4.1 - Gráfico de efeitos principais para R_a	52
Figura 4.2 - Gráfico de contorno para $R_a \times v_c \times f$	52
Figura 4.3 - Gráfico de superfície de resposta $R_a \times f \times v_c$	53
Figura 4.4 - Teste de normalidade para os resíduos de R_a	53
Figura 4.5 – Gráfico de efeitos principais para R_t	55
Figura 4.6 - Gráfico de contorno para $R_t \times v_c \times f$	55
Figura 4.7 - Gráfico de superfície de resposta para $R_t \times v_c \times f$	56
Figura 4.8 - Teste de normalidade para R_t	56
Figura 4.9 - Gráfico de efeitos principais	58
Figura 4.10 - Gráfico de contorno para $R_y \times f \times v_c$	58

Figura 4.11 – Gráfico de superfície de resposta R_y x f x v_c	59
Figura 4.12 – Teste de normalidade para R_y	59
Figura 4.13 - Efeitos principais para CP_1	63
Figura 4.14 - Gráfico de interação entre f x v_c para CP_1	64
Figura 4.15 - Gráficos de superfície de resposta para CP_1	65
Figura 4.16 - Gráficos de contorno para CP_1	65
Figura 4.17 - Teste de normalidade para os resíduos de CP_1	66
Figura 4.18 – Gráfico de otimização para CP_1	67
Figura 4.19 - Aplicação do método de superfície de resposta multivariada utilizando Microsoft office Excel®.....	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Composição química dos aços inoxidáveis duplex e austeníticos	13
Tabela 2.2 - Características fundamentais das principais técnicas do projeto e análise de experimento.	26
Tabela 3.1 - Composição química aço inoxidável super duplex UNS S32750.....	42
Tabela 3.2 - Parâmetros utilizados no processo de torneamento.....	43
Tabela 3.3 - Matriz experimental para o torneamento do UNS S32750	47
Tabela 4.1 - Valores do experimento para as variáveis R_a , R_t , R_y e MRR.....	49
Tabela 4.2 - Análise de variância para R_a	50
Tabela 4.3 - Coeficientes codificados para R_a	51
Tabela 4.4 - Análise de variância para R_t	54
Tabela 4.5 - Coeficientes codificados para R_t	54
Tabela 4.6 - Análise de variância para R_y	57
Tabela 4.7 - Coeficientes codificados para a variável R_y	57
Tabela 4.8 Análise de correlação entre R_a , R_y e R_t	61
Tabela 4.9. Análise de Componentes Principais (ACP).....	61
Tabela 4.10 – Dados padronizados das variáveis R_a , R_t e R_y	61
Tabela 4.11. Escores dos três componentes principais.....	62
Tabela 4.12 - Análise de variância para CP_1	62
Continuação tabela 4.13 - Análise de variância para CP_1	63
Tabela 4.14. Coeficientes codificados.....	63
Tabela 4.15 – Critérios para otimização de CP_1	66
Tabela 4.16 - Experimentos de confirmação.....	69
Tabela 4.17 - Dados do experimento de confirmação.....	70
Tabela 4.18 - Intervalo de confiança para as variáveis de resposta.....	70

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

a_p	Profundidade de Corte
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACP	Análise de Componentes Principais
AG	Algoritmo Genético
AISI	American Iron and Steel Institute
Al_2O_3	Óxido de alumínio
ANOVA	Análise de variância
CCC	Arranjo Composto Circunscrito
CCD	Arranjo Composto Central
CCF	Arranjo de Face Centrada
CCI	Arranjo Composto Inscrito
CFC	Cúbica de Face Centrada
CNC	Comando Numérico Computadorizado
CVD	Deposição Química a Vapor
DOE	Projeto de Experimentos
EQM	Erro quadrático médio
EQMM	Erro quadrático médio multivariado
f	Avanço
F_e	Ferro
Fe-Cr	Ferro Cromo
GRG	Gradiente Reduzido Generalizado
H_0	Hipótese nula
H_a	Hipótese alternativa
HB	Hockwell Brinel
IMOA	International Molybdenum Association
ISO	Organização Internacional de Normalização
LOF	Lack of Fit
M	Metro
m/min	Metros por Minuto
mm	Milímetro
Mn	Manganês
Mo	Molibdênio

Ni	Níquel
OLS	Mínimos Quadrados Ordinários
PACVD	Deposição química a vapor assistida por plasma
PRE	Pitting Resistance Equivalent
PREn	Pitting Resistance Equivalent number
PVD	Deposição Física a Vapor
MRR	Taxa de Remoção de Material
R _a	Rugosidade média aritmética
R _t	Rugosidade Total
R _y	Rugosidade Máxima
Ti	Titânio
v _c	Velocidade de Corte
δ/γ	Estrutura bifásica ferríticas e austenítica
μm	Micrómetro

LISTA DE SÍMBOLOS

α	Nível de significância
β	Regressores do modelo polinomial
$\hat{\beta}$	Vetor de regressores do modelo polinomial
ε	Erro
λ_i	Autovalores
μ	Média
$\hat{\omega}_\sigma$	Desvio padrão
$\hat{\omega}_\mu$	Média
ρ	Espaço experimental
$\mathbf{\rho}$	Matriz de correlação
Ω	Conjunto multivariado
Π	Produtório
Σ	Somatório
d_i	Índice <i>Desirability</i> individual
D	Índice <i>Desirability</i> global
f	Avanço
H_i	Limite de especificação superior da função <i>Desirability</i>
l_e	Comprimento de amostragem
l_m	Comprimento de medição
L_i	Limite de especificação inferior da função <i>Desirability</i>
n	Número de observações realizadas
PC_i	Componente principal
R	Peso de cada função <i>Desirability</i>
R^2	Coefficiente de determinação do modelo de regressão
s^2	Variância
T	Valor alvo ou target
$T(PC_i)$	Valor alvo em termos de componentes principais
V_c	Velocidade de corte
w_i	Graus de importância individuais dos índices <i>Desirability</i>
W	Soma dos graus de importância individuais dos índices <i>Desirability</i>
W	Matriz de ponderação
X_i	Variáveis de controle

X	Vetor de variáveis de controle
X^T	Vetor transposto de variáveis de controle
y_i	Variáveis de resposta
\hat{Y}_i	Valor ajustado da variável de resposta
Y	Vetor de variáveis de resposta
Z_p	Valor alvo padronizado

Sumário	
CAPÍTULO 1	1
INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Justificativa.....	3
1.2 Objetivos.....	3
1.2.1 Objetivo Geral	3
1.2.2 Objetivos específicos.....	4
1.3 Limitações do Trabalho	4
1.4 Estrutura do trabalho	4
CAPÍTULO 2	6
REVISÃO DA LITERATURA	6
2.1 Torneamento.....	6
2.1.1 Material do Inserto.....	9
2.1.2 Revestimento do metal duro	9
2.2 Aços inoxidáveis	10
2.2.1 Usinabilidade do super duplex	14
2.3 Integridade da superfície	21
2.3.1 Sistema de medição de rugosidade.....	22
2.3.2 Parâmetro de Rugosidade (R_a).....	23
2.3.3 Parâmetro de Rugosidade (R_y).....	24
2.3.4. Parâmetro de Rugosidade (R_t)	24
2.4 Projeto e análise de experimentos (DOE)	25
2.4.1 Metodologia de Superfície de Resposta (MSR)	27
2.4.2 Arranjo composto central	30
2.5 Análise de Componentes Principais	32
2.6 Otimização.....	36
2.6.1 Método <i>Desirability</i>	37
2.7 Gradiente Reduzido Generalizado.....	41

CAPÍTULO 3	42
PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	42
3.1 Material.....	42
3.2 Máquina e Ferramentas	42
3.3 Definição dos parâmetros	43
3.4 Instrumentos de medição	44
3.5 Problema de pesquisa	44
3.6 Método experimental.....	45
3.7 Definição da matriz experimental	46
3.8 Execução dos experimentos.....	47
CAPÍTULO 4	49
RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	49
4.2 Otimização.....	60
4.2.1. Análise de Correlação.....	60
4.2.2 Otimização utilizando método <i>Desirability</i>	66
4.3 Otimização	68
4.4 Validação dos experimentos	69
CAPÍTULO 5	71
CONCLUSÕES	71
5.1 Sugestões para trabalhos futuros.....	72
6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	73
7. PUBLICAÇÕES.....	85

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

A usinagem é um processo industrial no qual a matéria prima é transformada pela remoção progressiva de material sob a forma de cavaco. Essa técnica é fundamental para a indústria de fabricação de peças (GOUARIR *et al.*, 2018).

Dentre os diversos processos de usinagem, o torneamento é uma das operações mais importantes e geralmente utilizado na fabricação de peças (DINIZ, *et al.*, 2014; SARIKAYA *et al.*, 2016; PRASATH *et al.*, 2018). Ao longo desta operação podem surgir problemas que influenciam na qualidade do produto usinado. A rugosidade da superfície usinada é um dos principais indicadores qualitativos para diversos tipos de materiais, especialmente para o aço inoxidável super duplex UNS S32750 que apresenta difícil usinabilidade (BENARDOS e VOSNIAKOS, 2003; ARBIZU e PÉREZ, 2003; DINIZ, *et al.*, 2014; KHARE *et al.*, 2018) e fator preponderante para a qualidade desse processo de usinagem.

Com a variedade de materiais utilizados na indústria metal mecânica e constantes mudanças nos conceitos de projeto, estruturação e montagem de sistemas, percebe-se que o mercado tem exigido qualidade e redução de custos. Segundo Sinha (2011) reduzir custos com constantes melhorias da qualidade no processo e produto aumentam a competitividade das empresas, Almeida e Costa (2008) abordam esta questão como um fator de preocupação para os gestores e executivos, que necessitam zelar pela sobrevivência de sua empresa.

A evolução dos materiais utilizados nas organizações, provoca a necessidade de melhoria dos métodos de fabricação para que a usinagem seja realizada de forma econômica e eficaz. Essa necessidade eleva a complexidade dos processos de usinagem e, provavelmente, desencadeia fenômenos que podem reduzir a qualidade das peças oriundas desses processos (SANTOS, 2007).

Dentre estes materiais, o aço inoxidável super duplex UNS S32750 se destaca por constituir uma superliga de difícil usinabilidade, apresentando características como alta ductilidade e baixa condutividade térmica, o que eleva a temperatura da região de corte, podendo provocar a aresta postiça de corte, caracterizada pela adesão de material no inserto, e aumento nas medidas de rugosidade da superfície usinada. Pesquisas já realizadas, indicam dificuldade em se modelar e prever a rugosidade, para tal processo e material, de maneira que encontrar parâmetros ótimos no processo de torneamento, afim estabelecer um melhor

acabamento da superfície para os produtos usinados (NOMANI *et al.*, 2017; GAMARRA e DINIZ, 2018) se constitui de tarefa importante, porém, não trivial.

O processo de usinagem por torneamento envolve diversas variáveis e, segundo Montgomery (2013), uma ferramenta capaz de identificar a magnitude de várias fontes de variação que influenciam esse conjunto de variáveis, é o planejamento de experimentos (DOE, do inglês *Design of Experiments*). Segundo Farooq *et al.* (2015), o projeto de experimentos tem sido empregado nas indústrias nos últimos anos com o objetivo de melhorar o desempenho do processo de fabricação e minimizar a variabilidade dos produtos, além de possibilitar a modelagem das funções objetivo que caracterizam o problema de pesquisa, o que viabiliza a aplicação de métodos de otimização.

A otimização de uma única característica frequentemente é realizada utilizando a metodologia de superfície de resposta (MSR), a partir da qual diversos benefícios foram reportados, na prática, pelas organizações que buscaram a otimização de seus processos e produtos (MONTGOMERY, 2013; FAROOQ *et al.*, 2015).

É importante destacar que, geralmente, os processos de manufatura possuem diversas variáveis de saída, e se forem adotadas como objetivo de otimização, uma grande dificuldade pode ser encontrada. Isto porque diferentes características de qualidade podem ser conflitantes para determinadas variáveis de controle, dificultando o processo de tomada de decisão. É neste contexto que se percebe a necessidade em se aplicar um método quantitativo de fácil acesso, que apoie os gestores no processo de tomada de decisão envolvendo múltiplos critérios.

Diversos métodos de otimização foram propostos pela comunidade acadêmica e muitos deles podem ser considerados como adaptações de métodos de otimização de uma única resposta. Um destes métodos é o *Desirability* proposto por Derringer e Suich (1980).

A maioria destes métodos de otimização assumem que as variáveis de respostas estudadas são independentes e não correlacionadas. Esta consideração é a grande crítica que vem sendo imposta aos atuais métodos de otimização multi-objetivo, uma vez que processos com características de qualidade independentes e não correlacionadas são raros. Segundo Khuri e Conlon (1981) e Bratchell (1989), caso seja negligenciada a estrutura de correlação entre as respostas ou caso seja utilizada um método de otimização que não a considere, ótimos inapropriados podem ser obtidos, invalidando o esforço do processo de otimização.

Assim, para preencher tal lacuna, esta dissertação propõe a otimização dos parâmetros de usinagem no processo de torneamento do aço inoxidável super duplex UNS S32750 utilizando métodos já conhecidos. Serão aplicados, análise de componentes principais (ACP), que permite a obtenção de uma combinação linear das variáveis de resposta, que considera adequadamente

a estrutura de correlação entre elas, e o método *desirability*, que busca valores ideais para os parâmetros iniciais, na otimização do processo de torneamento do aço inoxidável super duplex UNS S32750, utilizando-se três variáveis de controle: velocidade de corte (v_c), profundidade de corte (a_p) e avanço (f), em um arranjo composto central (CCD), considerando-se quatro respostas de interesse, das quais, três respostas de interesse R_a , R_y , R_t foram medidas, e a taxa de remoção de material (MRR) calculada. As respostas de interesse originaram um estudo dos modelos matemáticos, a influência dos parâmetros de entrada, a distribuição dos resíduos e problemas de otimização do tipo quanto menor melhor (STB).

1.1 Justificativa

A principal justificativa para a realização desta pesquisa é a ausência de métodos de otimização empregados ao processo de torneamento do aço inoxidável super duplex UNS S32750 utilizando projeto de experimentos, análise de componentes principais e o método *desirability*.

Como processos de manufatura apresentam diversas variáveis de resposta, e a necessidade de uma rápida tomada de decisão, a análise de componentes principais é empregada para tornar o processo mais ágil, reduzindo a dimensão de análise. O método *desirability* possibilita a melhor decisão levando-se em consideração diversas variáveis com sentidos de otimização diferentes.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Otimizar os parâmetros de usinagem por torneamento do aço inoxidável super duplex UNS S32750 utilizando metodologia de superfície de resposta (MSR), análise de componentes principais (ACP) e função *desirability*.

1.2.2 Objetivos específicos

Desdobrando o objetivo geral enunciado anteriormente, chega-se aos seguintes objetivos específicos:

- Propor a configuração ideal dos parâmetros controláveis para o torneamento do aço inoxidável super duplex UNS S32750;
- Propor modelos com ajuste superior a 80%;
- Desenvolver uma estratégia para os experimentos de confirmação necessários à verificação dos resultados calculados;
- Analisar e discutir os resultados encontrados do ponto de vista do processo de torneamento;
- Comparar os resultados da confirmação aos obtidos na otimização.

1.3 Limitações do Trabalho

Esta pesquisa está limitada pelos seguintes elementos:

O processo de torneamento estudado foi do aço inoxidável super duplex UNS S32750 utilizando inserto de metal duro para análise de R_a , R_y e R_t . Variando-se a profundidade de corte, avanço e velocidade de corte com influência na rugosidade do corpo de prova. Portanto os resultados obtidos não podem ser extrapolados para outros casos de usinagem com materiais diferentes.

1.4 Estrutura do trabalho

Este trabalho está dividido em sete capítulos: introdução, revisão de literatura, materiais e métodos, resultados e discussões, conclusões, referências e publicações.

Capítulo 1 – Apresenta a introdução, a justificativa, os objetivos e as limitações da pesquisa

Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica - Apresenta os principais conceitos relacionados ao processo de torneamento e uma análise das pesquisas anteriores desenvolvidas sobre esse tema. Discussão sobre as características e propriedades do aço inoxidável super duplex. Quanto às

técnicas de experimentação e otimização, discute-se o Projeto e Análise de Experimentos (DOE), Metodologia de Superfícies de Resposta (MSR), análise de componentes principais (ACP), função *desirability*, vetor gradiente, de modo a fornecer subsidio de conhecimento para a discussão dos resultados obtidos.

Capítulo 3 – Procedimento experimental – Descreve o método experimental utilizado detalhando os equipamentos e as etapas seguidas em cada fase do estudo.

Capítulo 4 – Resultados e Discussões – Apresenta a modelagem das respostas, a análise de correlação, análise de componentes principais, o método *desirability* aplicado ao problema de pesquisa.

Capítulo 5 – Conclusões - Apresenta uma síntese das observações e discussões dos resultados e sugestões para trabalhos futuros.

Capítulo 6 – Referências Bibliográficas - Cita as fontes utilizadas para a realização deste trabalho.

CAPÍTULO 2

REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Torneamento

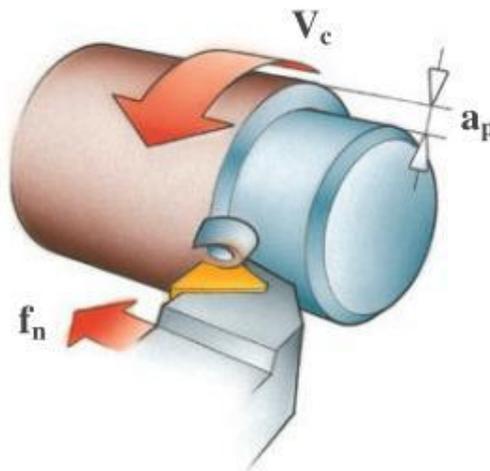
O processo de usinagem por torneamento é o mais utilizado para fabricação de peças, devido a sua versatilidade e qualidade (DINIZ, *et al.*, 2014; PRASATH *et al.*, 2018).

Sendo uma das principais operações de usinagem para produção de peças por revoluções, onde a peça gira e a ferramenta translada (DAVIM *et al.*, 2007). O torneamento consiste em uma ferramenta que se movimenta no sentido longitudinal/transversal removendo material sob a forma de cavaco em uma peça com o objetivo de reduzir o seu comprimento/diâmetro e assegurar as medidas especificadas conforme projeto (GROOVE, 2010). Este processo pode ser utilizado para trabalhos em diversos tipos de materiais como cerâmica, polímeros metais dentre outros (SAINI *et al.*, 2015).

Na usinagem por torneamento vários fatores influenciam a qualidade do produto e de acordo com Diniz *et al.* (2013) os parâmetros de fabricação adotados frequentemente como os mais significativos para o processo de usinagem por torneamento são: velocidade de corte (v_c), avanço (f) e profundidade de corte (a_p). O desgaste da ferramenta está ligado diretamente a qualidade do produto usinado. Demais fatores como material da ferramenta, geometria da ferramenta e dureza do material devem ser levados em consideração para o alcance da melhor performance no processo (AMORIM, 2002; DINIZ *et al.*, 2010; SAINI, *et al.*, 2015).

A velocidade de corte (v_c) é definida como a velocidade tangencial instantânea resultante da rotação da ferramenta em torno da peça e é dada em metros por minuto (m/min). A profundidade de corte (a_p) é a espessura de penetração da ferramenta na peça, medida perpendicularmente ao plano de trabalho e é dada em milímetros (mm). O avanço (f) é a distância percorrida pela ferramenta por rotação da placa e é dada em milímetros por rotação (mm/rot) conforme figura 2.1 (DINIZ *et al.*, 2013).

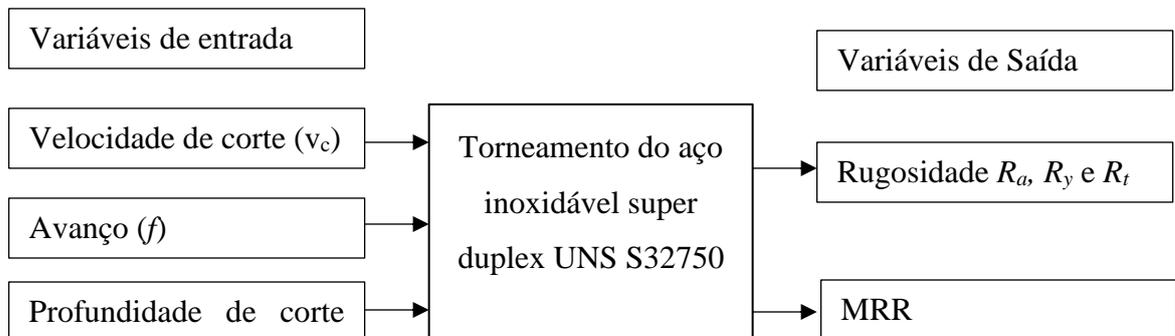
Figura 2.1 - Variáveis de controle no processo de torneamento



Fonte: Oliveira (2013)

Segundo Gomes *et al.* (2011) as respostas vinculadas a esse processo podem ser divididas em 3 grupos distintos: a qualidade que se refere aos parâmetros de rugosidade, a produtividade que está vinculada a taxa de remoção de material e as respostas econômicas que representam os custos de fabricação. Para o torneamento do aço inoxidável super duplex UNS S 32750 as variáveis medidas foram de qualidade e produtividade conforme figura 2.2.

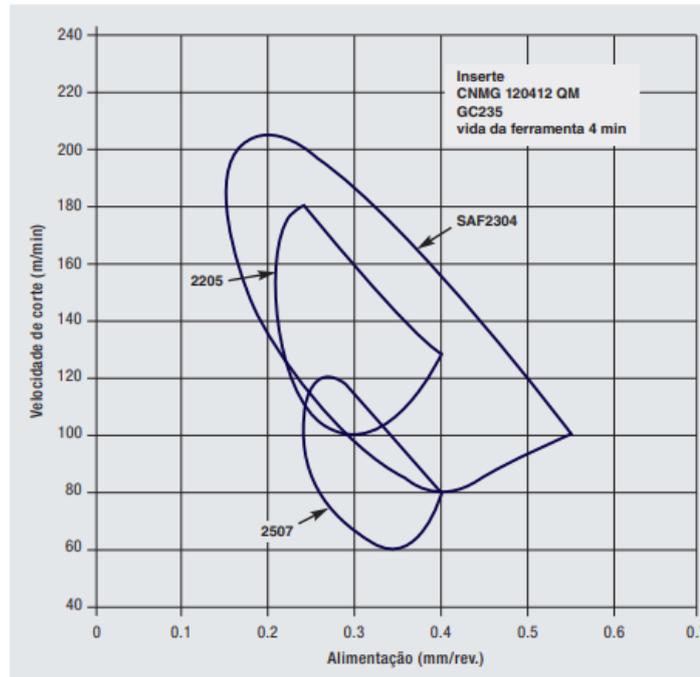
Figura 2.2 - Processo de Torneamento do aço inoxidável super duplex UNS S32750



Segundo Imoa (2014) é possível indicar parâmetros para a usinagem de aços inoxidáveis mantendo-se os valores de rugosidade dentro de limites toleráveis. A aplicação das ferramentas de metal duro auxiliam no aumento das velocidades de corte e melhoria da qualidade da superfície usinada. É possível observar no gráfico velocidades de corte (m/min) x avanço (mm/rot) parâmetros recomendáveis para a usinagem dos aços inoxidáveis SAF2304, SAF2205 e SAF2507 utilizando inserto de metal duro conforme figura 2.3.

O gráfico com as velocidades de corte (m/min) e avanço (mm/rot) recomendáveis para o torneamento dos aços inoxidáveis SAF2304, SAF2205 e SAF2507 conforme figura 2.3.

Figura 2.3 - Comparação entre parâmetros de usinagem para diferentes aços inoxidáveis duplex



Fonte: IMO A (2014)

No processo de usinagem por torneamento, conciliar o critério qualitativo e o processual é um fator crítico para a indústria, e a taxa de remoção de material (*Material Removal Rate*) é um indicador fundamental para medir a eficiência de processo. A Taxa de Remoção de Material (MRR) é a quantidade de material removida por unidade de tempo onde o valor oscila em razão da configuração das variáveis de entrada. Para o processo de torneamento esta taxa pode ser calculada ou medida e quanto maior for o seu valor, maior será a produtividade conforme equação 2.1 (SALGADO, 2010; DINIZ *et al.*, 2014).

$$Q = V_c \cdot f \cdot a_p \text{ (cm}^3\text{/min)} \quad (2.1)$$

Onde:

v_c – Velocidade de corte (m/min);

f – Avanço (mm/rot);

a_p - Profundidade de corte (mm);

2.1.1 Material do Inserto

As ferramentas de corte nos processos de usinagem e principalmente no torneamento tem a função de remover material sob a forma de cavaco. Segundo Ferraresi *et al.* (1972) para realizar esta tarefa a ferramenta necessita ser produzida com material de maior dureza do que a matéria prima a ser usinada. A correta escolha do material e classe da ferramenta de corte é uma etapa fundamental para o alcance de resultados satisfatórios durante a usinagem (DINIZ *et al.*, 2008).

Os materiais para ferramentas da classe ISO H devem ser utilizados para usinagem de materiais endurecidos, da classe ISO K para manufatura de ferros fundidos, da classe ISO P para usinagem de aços, da classe ISO S em corte de ligas resistentes ao calor, da classe ISO N para usinagem de ligas de alumínio da classe ISO M para corte em aços inoxidáveis inclusive o super duplex UNS S32750 (SANDVIK, 2011; DINIZ *et al.*, 2008).

As ferramentas possuem diferentes combinações de resistência ao desgaste, dureza e dividem-se em diversas classes com suas propriedades. Normalmente uma boa ferramenta possui: (SANDVIK, 2011; MACHADO *et al.*, 2009; DINIZ *et al.*, 2008).

- Resistência a alterações térmicas decorrentes do processo;
- Dureza, para suportar o desgaste e as deformações;
- Tenacidade, para resistir as possíveis quebras consequentes de impacto;
- Estabilidade química para resistir a difusão e oxidação.

Segundo Diniz *et al.* (2014) o revestimento para as ferramentas de usinagem tem sido amplamente utilizados, e a principal vantagem é o aumento da resistência ao desgaste da camada da superfície da ferramenta em contato com a peça, com a tenacidade característica do núcleo do inserto de metal duro. Esta condição reduz os esforços de corte e aumentam a vida da ferramenta.

2.1.2 Revestimento do metal duro

A evolução das ferramentas utilizadas nos processos de usinagem aumentou significativamente a qualidade e produtividade das peças usinadas. As ferramentas são revestidas com a finalidade de maximizar sua vida útil e proporciona diversas vantagens como: Redução do atrito na interface ferramenta-peça, proteção contra os desgastes abrasivos e adesivos, possibilidade de usinagem sem fluido de corte o que aumenta a sustentabilidade do

processo. Os revestimentos podem ser do tipo monocamada ou multicamadas, proporcionando alta performance da ferramenta (DINIZ *et al.*, 2014, ALMEIDA 2010).

Um dos revestimentos utilizados atualmente é o CVD (*Chemical Vapor Deposition*) ou deposição química a vapor. Este processo de revestimento consiste em uma reação química entre o elemento a ser depositado e superfície da ferramenta aquecida, formando um filme que envolve a superfície externa da ferramenta por uma reação (COSTA, 2016). O processo de revestimento apresenta três variantes comuns, o CVD a alta temperatura (HTCVD), CVD a médias temperaturas (MTCVD) e a deposição CVD assistida por plasma (PACVD). O processo HTCVD é normalmente realizado a temperaturas acima de 1000°C e geralmente é utilizado para deposição de revestimentos em Al₂O₃ e diferencia-se do MTCVD pela faixa de temperatura operacional (COSTA, 2016).

As principais características a serem observadas para seleção da ferramenta oriunda do processo CVD são a inércia química, dureza e a condutividade térmica que garante uma barreira térmica na superfície da ferramenta (MACHADO *et al.* 2009).

As ferramentas revestidas a temperaturas elevadas HTCVD são comuns em grande parte das ferramentas de metal duro, por possuírem elevada aderência ao substrato. As classes de ferramentas com recobrimento CVD são a primeira escolha em uma diversificada variedade de aplicações onde o desgaste acentuado da ferramenta é um fator crítico para os custos de produção. Esse desgaste influencia a qualidade do produto usinado que possui a rugosidade da superfície como indicador. Esses tipos de revestimentos são indicados para torneamento dos aços inoxidáveis duplex (SANDVIK, 2020).

2.2 Aços inoxidáveis

Os aços inoxidáveis surgiram de estudos realizados em 1912, na Inglaterra e Alemanha. A falta de resistência à corrosão e oxidação em altas temperaturas dos aços carbono convencionais levou ao desenvolvimento de ligas mais resistentes em ambientes agressivos, entre elas os aços inoxidáveis duplex (GAMARRA, 2017).

O desenvolvimento histórico destes aços corresponde ao período no qual metalurgistas da Alemanha, Inglaterra, França e dos Estados Unidos começaram a publicar seus estudos sobre as ligas de ferro com baixo teor carbono e contendo cromo (GAMARRA, 2017).

O aço estudado na Inglaterra era uma liga Fe-Cr, com cerca de 13% de Cr. Na Alemanha se tratou de uma liga que possuía Fe e Cr, e também níquel (Ni). No primeiro caso, era um aço

inoxidável muito próximo ao que hoje é denominado de 420 e no segundo, outro aço inoxidável semelhante denominado 302 (CARBÓ, 2001).

Um ano depois na Alemanha, Eduard Maurer, estudou uma liga Fe-Cr que continha elementos da liga de Brearly, cerca de 8% de Ni. Como resultado, observou que a liga resistiu vários meses a vapores agressivos no laboratório (OLIVEIRA, 2013; TEBECHERANI, 2008).

Na tentativa de conseguir resolver problemas de resistência a corrosão, o inglês Harry Brearly estudava uma liga Fe-Cr (13%), e quando realizava análises metalográficas, observou que a liga fabricada resistia à grande parte dos reagentes que se utilizavam na época em metalografia. Assim, denominou-a de "*stainless steel*" por estar sem manchas. Após um ano, na Alemanha, Eduard Maurer estudou uma liga Fe-Cr que havia cerca de 8% de Níquel, essa liga resistiu vários meses a vapores agressivos no laboratório. Os aços descobertos por ele foram o AISI 420 e AISI 302 (martensítico e austenítico) (OLIVEIRA, 2013; TEBECHERANI, 2008).

O conhecimento em relação ao comportamento das ligas quando submetidas a tratamento térmico era limitado, aquecendo-se as duas ligas a temperaturas, em torno de 1.000 °C, e resfriando-as, obtinham-se duas ligas completamente distintas, o AISI 420 com dureza considerável e o AISI 302 com maior ductilidade. A partir de então os aços inoxidáveis evoluíram principalmente em função da indústria petrolífera, aeronáutica, criogenia e devido à 2ª guerra mundial (OLIVEIRA, 2013).

Segundo Gamarra (2017) os aços inoxidáveis podem ser segmentados em cinco grupos distintos: a) Ferríticos; b) Austeníticos; c) Martensíticos; d) Endurecíveis por precipitação; e) Ferríticos-austeníticos (Duplex).

a) Ferrítico:

Os aços inoxidáveis ferríticos são ligas ferro cromo com matriz ferrítica predominante, seja qual for a temperatura até a fusão. Possui baixo teor de carbono e a porcentagem de cromo varia entre 12% a 30%. Esses aços não podem ser endurecidos por tempera devido à falta de austenitização. Esse aço possui boa resistência a corrosão e oxidação (MODENESI, 2001; PAREDES, 1999).

b) Austenítico:

Os aços inoxidáveis austeníticos são constituídos por uma microestrutura cubica de face centrada (CFC) com fase austenítica predominante. Apresenta maiores limites de resistência a

corrosão, quando comparado aos aços martensíticos ou ferríticos. Composto por ferro, cromo e níquel, este material é eficiente para trabalhos a frio além possuir boa soldabilidade e ótimas propriedades mecânicas. Frequentemente é utilizado como elemento arquitetônico por resistir a oxidação e em indústrias como alimentícia, farmacêutica (HULL, 1967; DELONG 1974; PICKERING, 1976).

c) Martensítico:

Os aços inoxidáveis martensíticos são ligas de ferro cromo com teor de cromo intermitente entre 11 a 18% e carbono acima de 0,1%. Durante a transformação de fase o percentual de carbono permite que a ferrita se torne austenita em altas temperaturas e durante o resfriamento se transforme em martensita que possui característica de maior dureza (SILVA e MEI, 2010).

d) Endurecíveis por precipitação:

Segundo Arisoy *et al.* (2003) estes aços foram desenvolvidos na década de 1940 e têm tomado importância crescente em uma diversidade de aplicações, onde suas propriedades especiais podem ser aplicadas. Em condições apropriadas é possível fabricar compostos intermetálicos que são capazes de causar o endurecimento por precipitação nos aços inoxidáveis. Os precipitados envolvem elementos de liga como molibdênio, níquel, titânio e alumínio. Depois de produzida, é realizado um tratamento térmico de endurecimento por envelhecimento onde estes elementos se precipitam na forma de compostos intermetálicos duros, aumentando consideravelmente a dureza e a resistência mecânica (PECNER e BERNSTEIN, 1977; KOPELIOVICH, 2012; ASM HANDBOOK, 1995).

e) Ferrítico-austenítico (duplex):

Os aços inoxidáveis ferríticos austeníticos (duplex) possuem maior teor cromo e menor teor de níquel quando comparado aos aços austeníticos, conforme tabela 2.1. O molibdênio (Mo) apresenta-se como elemento de liga adicional em alguns casos, desde que a quantidade de níquel (Ni) seja insuficiente para formar uma estrutura totalmente austenítica, a estrutura do duplex será mista: ferrítica – austenítica. Suas propriedades misturam características dos aços ferríticos e austeníticos. Este tipo de aço inoxidável apresenta alta resistência à fadiga e também alta resistência ao ataque por íons de cloretos (KOPELIOVICH, 2012).

Tabela 2.1 - Composição química dos aços inoxidáveis duplex e austeníticos

AISI/UNS	%C máx	% Si	%Mn	%Cr	% Ni	% Mo	%N	%Cu
304 L	0,03	0,5	1,3	18,5	10	-	-	-
316 L	0,03	0,4	1,7	17,5	13	2,6	-	-
S32304	0,03	0,5	1,0	23,0	4,5	-	0,10	-
S31803	0,03	1,0	2,0	22,0	5,5	3,2	0,18	-
S32750	0,03	0,8	1,2	25,0	7	4,0	0,30	-

Fonte: Waldén e Nicholls (1994)

Os aços inoxidáveis duplex e super duplex podem apresentar fases secundárias quando expostos a elevadas variações de temperatura que podem oscilar entre 300°C e 1000°C. Esse comportamento durante o processo de usinagem seria afetado devido a tendência corrosiva após o processo de usinagem do aço inoxidável super duplex UNS S32750 (BORDINASSI, 2006).

Esta classe de aço caracteriza-se por possuir elevada resistência a corrosão com cromo em sua composição. O cromo na superfície em contato com o oxigênio produz uma camada protetora que impermeabiliza e impede a ação de agentes corrosivos comuns. Por definição os aços inoxidáveis possuem cromo em proporções iguais ou acima de 12% (CARBO, 2001).

Os aços inoxidáveis duplex são ligas baixo teor de carbono e são ligados principalmente ao cromo, níquel, molibdênio contendo até 0,30% de átomos de nitrogênio em peso. Apresentam microestrutura mista contendo fase austenítica e ferrítica sendo que em volume a concentração de ferrita representa em torno de 50% + ou – 5%, o que permite a esse material uma combinação interessante de resistência a corrosão e mecânica. Devido ao refino do grão austenítico ele possui resistência mecânica adicional (OLIVEIRA, 2013).

Suas principais características são sua alta resistência a corrosão e corrosão sob tensão. Um tipo de corrosão bem característico que é avaliado para estabelecer a qualidade de um determinado aço é a corrosão por pite. Para que um aço inoxidável seja classificado como duplex, deve apresentar resistência à corrosão por pite, conhecida também pela sigla PRE (*Pitting Resistance Equivalent*) superior a 20. Esses materiais tem sido amplamente utilizados devido a possibilidade de aplicação em locais agressivos com elevadas solicitações mecânicas como indústria de celulose e papel (PEREIRA, 2009).

Outras aplicações importantes são em fundidos para a aplicações com altas solicitações químicas e mecânicas, ou na fabricação de eletrodos para soldagem, onde o controle do teor de

ferrita-delta é fundamental para a prevenção da ocorrência de trincas (COSTA E SILVA e MEI, 1988).

A excelente combinação de resistência mecânica e a corrosão, com considerável custo/benefício, faz dos aços inoxidáveis duplex matérias primas de notável relevância para a indústria, especialmente para os setores de petróleo e gás (RAYMUNDO *et al.*, 2017).

O aço inoxidável super duplex (SDSS) é a segunda geração do aço inoxidável duplex, que possui resistência à corrosão por pite (PRE) com valor variando entre 40 a 50. Segundo Sandvik (2018) o valor mínimo encontrado do PREn para o SDSS é 42, calculado conforme equação 2.2.

$$\text{PRE} = \text{wt.\% Cr} + 3.3 \text{ wt.\% Mo} + 16 \text{ wt.\% N} \quad (2.2)$$

O aço inoxidável super duplex UNS S32750 também conhecido como SAF 2507 possui elevada resistência à corrosão, em virtude da presença de austenita em uma de suas fases, e elevada resistência mecânica, em razão da presença de ferrita (RAYMUNDO *et al.*, 2017; ANGIULI *et al.*, 2019). Este material possui boa soldabilidade, baixa condutividade térmica, ótima resistência à corrosão por fadiga e com ácidos em geral, resistência à corrosão por erosão, resistência à fragilização por corrosão sob tensão (SCC), elevada resistência à microfissuração e à corrosão de fissuras (MARQUES *et al.*, 2011; AHIALE *et al.*, 2018; HONG, 2013).

A aplicação deste material é limitada devido ao seu custo, constituído de vários elementos de liga como molibdênio e níquel, o que eleva o seu valor (ZHOU *et al.*, 2019). É indicado para aplicação em locais de elevadas solicitações mecânicas e quimicamente agressivos como em serviços *offshore*, processamentos químicos e petroquímicos, maquinário, construção, trocadores de calor, aplicações de instrumentação e hidráulica em locais marinhos tropicais.

Este material representa um desafio, pois, sua elevada ductilidade e baixa condutividade térmica reduzem a vida ferramenta e baixam a qualidade do produto usinado. Modelar este comportamento torna-se parte fundamental para melhoria dos processos de manufatura (NOMANI *et al.*, 2017; GAMARRA e DINIZ, 2018).

2.2.1 Usinabilidade do super duplex

Segundo Bordinassi (2006) os aços inoxidáveis super duplex possuem propriedades mais nobre em relação aos aços inoxidáveis duplex, possuindo características dos aços inoxidáveis ferríticos e austeníticos que confere maior resistência mecânica e a corrosão por pite (PRE).

Possui menor condutividade térmica e a quantidade de calor gerada na interface ferramenta peça aumenta, reduzindo a vida útil da ferramenta devido a absorção do calor produzido durante o processo de usinagem por torneamento (NEVES *et al.*, 2003). Outros fatores concorrem para que este material possua baixa usinabilidade como a maior ductilidade e resistência a fratura o que facilita a formação da aresta postiça de corte e piora a qualidade dos produtos usinados.

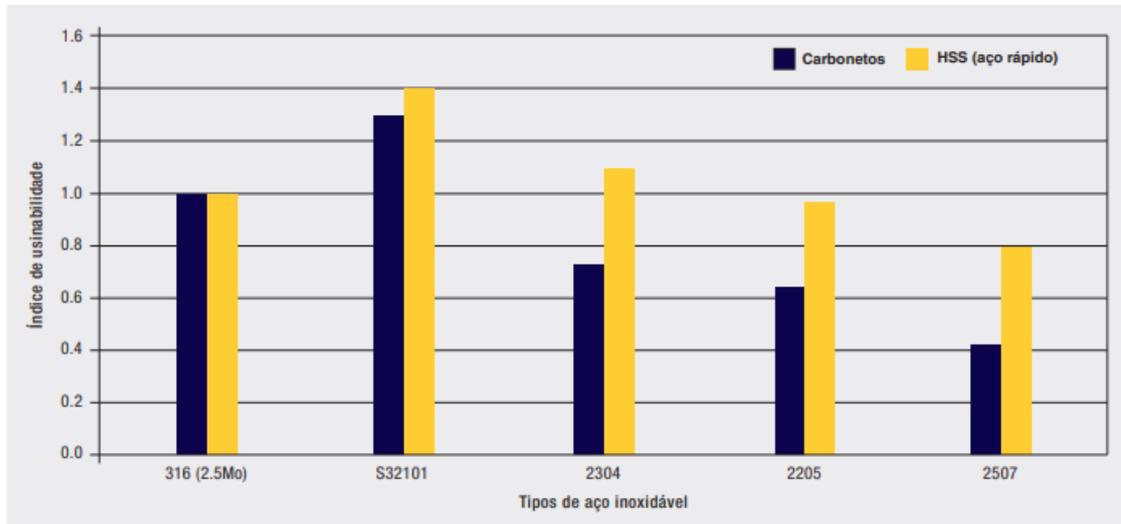
Segundo Diniz *et al.* (2014) para aumentar a qualidade dos produtos usinados com elevadas taxas de encruamento, é necessário que a ferramenta possua aresta de corte e ângulo de saída positivos para minimizar a deformação causada ao cavaco.

Para Diniz *et al.* (2013) a usinabilidade pode ser analisada com base no estado metalúrgico que se encontra o aço, as propriedades mecânicas, composição química, dureza e processos de manufatura aplicados no material. Outros fatores que podem afetar a usinabilidade de um material são: as condições de usinagem, características da ferramenta e refrigeração (BEZERRA, 2008; DINIZ *et al.*, 2013).

A usinabilidade está relacionada com a resistência a corrosão por pite (PRE), ou seja, quanto maior for PREn, menor será a usinabilidade e como os aços inoxidáveis super duplex apresentam valores elevados PREn sua usinabilidade é baixa, outro fator que colabora para este comportamento durante o processo de torneamento, são altos teores de nitrogênio, austenita e demais elementos de liga presentes neste aço (PARO, HANNINEN KAUPPINEN, 2001).

A presença de elementos como enxofre (S) e manganês (Mn) aumentam a usinabilidade do material, facilitando a quebra do cavaco reduzindo o coeficiente de atrito. O aço inoxidável super duplex UNS S32750 possui baixas quantidades de enxofre e manganês, e estas mínimas concentrações destes elementos, aumentam a complexidade no processo de manufatura. Pode ser observado que comparando-se o aço inoxidável super duplex UNS S32750 a outros aços inoxidáveis, o SDSS possui o pior valor de usinabilidade quando se utilizou ferramenta de carboneto metálico, com valor próximo a 0,4 (IMOA, 2014) conforme figura 2.4.

Figura 2.4 - Comparação de usinabilidade de diferentes ligas de aços inoxidáveis



Fonte: IMO A (2014)

Pesquisas foram realizadas com o aço inoxidável super duplex para modelar e prever o seu comportamento e Angiuli *et al.* (2019) estudaram o comportamento térmico e a distribuição de temperatura durante o processo de torneamento sem fluido de corte do aço inoxidável super duplex SAF 2507. Para realização das análises foi utilizado um DOE $L_{18} - 2.3^{7-5}$ sem réplicas. Por meio das análises estatísticas observou-se que o principal fator que contribui para variação abrupta de temperatura foi a profundidade de corte, as demais variáveis, avanço e velocidade de corte também exercem influência em proporções menores.

Gamarra e Diniz (2018) estudaram o desgaste da aresta de corte durante a usinagem do aço inoxidável super duplex SAF 2507 combinando diferentes configurações dos parâmetros de entrada, utilizando tipos de pastilhas intercambiáveis e um jato de alta pressão (70 Bar), com o objetivo de maximizar a vida útil da ferramenta. Percebeu-se que o desgaste do tipo entalhe não foi predominante conforme abordado na literatura.

Ahmed (2017) investigou o desgaste da ferramenta durante a usinagem do aço inoxidável super duplex SAF 2507 no processo de torneamento utilizando fluidos lubri-refrigerantes. Os resultados mostram que as ferramentas com revestimento de AlTiN apresentaram melhor desempenho, os mecanismos de desgaste preponderantes foram de lascamento e adesão em todas as ferramentas analisadas.

Morelo *et al.* (2016) avaliaram a integridade da superfície do aço inoxidável super duplex SAF 2507 no processo de usinagem por mandrilhamento, variando-se as variáveis de entrada: velocidade de corte, taxa de alimentação, raio da ponta da ferramenta e pressão de refrigeração. A integridade superficial foi avaliada pela rugosidade da superfície usinada e os resultados

indicaram que para o processo estudado a variável que apresentou maior influência foi o avanço.

Kadam *et al.* (2017) realizaram a investigação das configurações ideais para os parâmetros de entrada no processo de torneamento do aço inoxidável super duplex com inserto de metal duro revestido pela técnica PVD. Compararam o desempenho dos revestimentos PVD TiAlSiN (3,3 μm), AlTiN (3 μm) e AlTiN (7 μm) em termos da vida útil da ferramenta. Foi possível observar que o estudo forneceu a solução que aumenta a vida da ferramenta durante o processo de usinagem por torneamento sem fluido de corte.

Rajaguru e Arunachalam (2017) analisaram o processo de torneamento sem fluido de corte do aço inoxidável super duplex utilizando 4 ferramentas com revestimentos PVD e/ou CVD. Foram analisados o desgaste da ferramenta, força de corte, temperatura de corte e integridade da superfície. Os resultados determinaram que o revestimento [MT-TiCN] -Al₂O₃ obteve o melhor desempenho. O revestimento TiN- [MT-TiCN] -Al₂O₃ apresentou maior desgaste da ferramenta, acabamento superficial baixo quando se compara as performances das demais ferramentas utilizadas.

Airao *et al.* (2018) estudaram a influência do fluido de corte na rugosidade da superfície usinada do aço inoxidável super duplex SAF 2507, variando-se os fatores de entrada em 3 níveis no processo de fresamento. Nestas condições o fator mais influente foi o avanço por dente e que a usinagem com fluido, obteve melhores acabamentos do que sem fluido de corte.

Foi realizada uma análise dos artigos dos últimos 6 anos para verificar as variáveis de controle utilizadas nas pesquisas para o torneamento do aço inoxidável duplex conforme quadro 2.1.

Quadro 2.1 - Análise das variáveis de entrada e saída utilizada nas pesquisas sobre o torneamento do aço inoxidável super duplex UNS S32750

Nº	Autor	Título	Variáveis de entrada	Variáveis de saída	Ano
1	Krolczyk <i>et al.</i>	<i>Determination of tool life and research wear during duplex stainless steel turning</i>	Velocidade de corte (v_c), avanço (f) e profundidade de corte (a_p)	Vida da ferramenta	2015
2	Krolczyk <i>et al.</i>	<i>Investigation of Selected Surface Integrity Features of Duplex Stainless Steel (Dss) After Turning</i>	Velocidade de corte (v_c), [avanço (f) e profundidade de corte (a_p) fixo]	Vida da ferramenta, Rugosidade R_t	2015

Continuação Quadro 2.1 - Análise das variáveis de entrada e saída utilizada nas pesquisas sobre o torneamento do aço inoxidável super duplex UNS S32750

Nº	Autor	Título	Variáveis de entrada	Variáveis de saída	Ano
3	Krolczyk <i>et al.</i>	<i>Investigation of The Physical Parameters of Duplex Stainless Steel (Dss) Surface Integrity After Turning</i>	Velocidade de corte (v_c), [avanço (f) e profundidade de corte (a_p) fixo]	Microdureza	2015
4	Koyee <i>et al.</i>	<i>Numerical modeling and optimization of machining duplex stainless steels</i>	Velocidade de corte (v_c) e avanço (f)	Forças de corte, temperatura de corte, geometria do cavaco.	2015
5	Ramadhan H. Gardi , Kareem A. Abdullah And Hawro K. Shahr	<i>Surface roughness of super duplex stainless steel SAF 2507 during turning.</i>	Velocidade de corte (v_c) e avanço (f)	Rugosidade antes e depois do tratamento térmico, morfologia do cavaco.	2015
6	Selvaraj	<i>Taguchi Design of Experiment in the Optimization of Tool Life in Turning Process of Duplex Stainless Steel DSS.</i>	Velocidade de corte (v_c) e avanço (f)	Rugosidade, forças de corte e vida da ferramenta.	2015
7	Metelski <i>et al.</i>	<i>Taguchi Design of Experiment versus Dynamic Programming Approach in the Optimization of Turning Process.</i>	Velocidade de corte (v_c) e avanço (f)	Vida da ferramenta.	2015
8	Metelski <i>et al.</i>	<i>Dynamic programming approach in the optimization of tool life in turning process of duplex stainless steel DSS.</i>	Velocidade de corte (v_c) e avanço (f)	Vida da ferramenta.	2016
9	Rohit Khake <i>et al.</i>	<i>Experimental Investigations on Surface Roughness, Cutting Forces and Tool Wear in the Turning of Super Duplex Stainless Steel with PVD Coated Carbide Inserts.</i>	Velocidade de corte (v_c), avanço (f) e profundidade de corte (a_p)	Rugosidade, forças de corte e vida da ferramenta	2016
10	Nomani <i>et al.</i>	<i>Investigation on the Behavior of Austenite and Ferrite Phases at Stagnation Region in the Turning of Duplex Stainless Steel Alloys.</i>	Velocidade de corte (v_c) e avanço (f)	Microestrutura	2016
11	Dhananchezian <i>et al.</i>	<i>Study of machinability characteristics for turning austenitic (316L) and super duplex (2505) stainless steel using PVD-TiAlN nano-multilayer inserts.</i>	Velocidade de corte (v_c)	Rugosidade, força de corte e temperatura de usinagem	2016
12	Krolczyk <i>et al.</i>	<i>Surface morphology analysis of Duplex Stainless Steel (DSS) in Clean Production using the Power Spectral Density.</i>	Velocidade de corte (v_c), avanço (f), fluido de corte	Morfologia da superfície	2016
13	Rajaguru e Arunachalam	<i>Coated tool Performance in Dry Turning of Super Duplex Stainless Steel</i>	Velocidade de corte (v_c), avanço (f) e profundidade de corte (a_p) fixo	Forças de corte, temperatura de corte, vida da ferramenta e integridade da superfície	2017

Continuação Quadro 2.1 - Análise das variáveis de entrada e saída utilizada nas pesquisas sobre o torneamento do aço inoxidável super duplex UNS S32750

Nº	Autor	Título	Variáveis de entrada	Variáveis de saída	Ano
14	Masahiro Hagino , Akihiro Takemura , Tsuyoshi Fujit2 , Hiroshi Usuki and Akihiko Ikuta	<i>Cutting Characteristics of Duplex Stainless Cast Steel X2CrNiMoN25-7-3</i>	Velocidade de corte (v_c), avanço (f) e profundidade de corte (a_p)	Forças de corte, Desgaste de flanco	2017
15	Veic <i>et al.</i>	<i>Development and optimization of surface roughness predictive models in turning super duplex stainless steel by using artificial intelligence methods</i>	Velocidade de corte (v_c), avanço (f) e profundidade de corte (a_p)	Rugosidade	2017
16	Krolczyk <i>et al.</i>	<i>Dry cutting effect in turning of a duplex stainless steel as a key factor in clean production</i>	Velocidade de corte (v_c), avanço (f) e profundidade de corte (a_p)	Vida da ferramenta, forças de corte e rugosidade R_t	2017
17	Liew <i>et al.</i>	<i>Effect of chilled air coolant on surface roughness and tool wear when machining 2205 duplex stainless steel</i>	Velocidade de corte (v_c), avanço (f) e profundidade de corte (a_p)	Rugosidade e desgaste de flanco	2017
18	Kadam <i>et al.</i>	<i>Experimental Investigations on Surface Roughness, Cutting Forces and Tool Wear in Turning of Super Duplex Stainless Steel with Coated Carbide Inserts</i>	Ferramentas corte, Velocidade de corte (v_c), avanço (f) e profundidade de corte (a_p)	Forças de corte, Rugosidade, desgaste de flanco	2017
19	Paiva Jr <i>et al.</i>	<i>Frictional and wear performance of hard coatings during machining of superduplex stainless steel</i>	Velocidade de corte (v_c), avanço (f) e profundidade de corte (a_p), ferramenta	Desgaste de flanco, cavaco e forças de corte resultante	2017
20	Ahmed <i>et al.</i>	<i>Investigation of Coated Cutting Tool Performance during Machining of Super Duplex Stainless Steels through 3D Wear Evaluations</i>	Velocidade de corte (v_c), avanço (f) e profundidade de corte (a_p), ferramenta	Desgaste de flanco, cavaco	2017
21	Gaurav D. Sonawane; Vikas G. Sargade	<i>Machinability studies of Duplex Stainless Steel 2205 using coated tools</i>	Velocidade de corte (v_c), avanço (f) e profundidade de corte (a_p) Fixa	Rugosidade	2017
22	Nomani <i>et al.</i>	<i>Stagnation zone during the turning of Duplex SAF 2205 stainless steels alloy</i>	Velocidade de corte (v_c), avanço (f) e profundidade de corte (a_p) Fixa	Cavaco	2017
23	Yassmin Seid Ahmed and Stephen C. Veldhuis	<i>The study of wear performance and chip formation of coated carbide tools during machining super duplex stainless steels</i>	Velocidade de corte (v_c), avanço (f) e profundidade de corte (a_p)	Desgaste de flanco, cavaco	2017
24	Schultheiss <i>et al.</i>	<i>Analysis of the minimum chip thickness during turning of duplex stainless steel</i>	Velocidade de corte (v_c), avanço (f) e profundidade de corte (a_p) e raio da ferramenta	Cavaco, temperatura, forças de corte	2018
25	Ghatge <i>et al.</i>	<i>Improvement of Machinability Using Eco- Friendly Cutting Oil in Turning Duplex Stainless Steel</i>	Velocidade de corte (v_c), avanço (f) e profundidade de corte (a_p), tipos de fluido de corte	Rugosidade, temperatura e desgaste de flanco	2018

Continuação Quadro 2.1 - Análise das variáveis de entrada e saída utilizada nas pesquisas sobre o torneamento do aço inoxidável super duplex UNS S32750

Nº	Autor	Título	Variáveis de entrada	Variáveis de saída	Ano
26	Rajaguru e Arunachalam	<i>Investigation on machining induced surface and subsurface modifications on the stress corrosion crack growth behaviour of super duplex stainless steel</i>	Velocidade de corte (v_c) e profundidade de corte (a_p), variando-se o avanço (f)	Forças de corte, Rugosidade, tensão residual	2018
27	Selvaraj	<i>Optimization of surface roughness of duplex stainless steel in dry turning operation using taguchi technique</i>	Velocidade de corte (v_c), avanço (f) e profundidade de corte (a_p)	Rugosidade R_a	2018
28	Krolczyk <i>et al.</i>	<i>Parametric and nonparametric description of the surface topography in the dry and MQCL cutting conditions</i>	Velocidade de corte (v_c), avanço (f), profundidade de corte (a_p), diversas condições de lubri-refrigeração	Rugosidade	2018
29	Dhananchezian <i>et al.</i>	<i>Study The Effect Of Cryogenic Cooling On Machinability Characteristics During Turning Duplex Stainless Steel 2205</i>	condições de lubri-refrigeração, Velocidade de corte (v_c), avanço (f) e profundidade de corte (a_p)	Rugosidade, forças de corte, cavaco e temperatura	2018
30	Čapek <i>et al.</i>	<i>Surface Integrity after Turning a Duplex Stainless Steel with Respect to Tool Geometry</i>	Velocidade de corte (v_c), avanço (f) e profundidade de corte (a_p)	Tensão residual, Gradiente de tensão residual	2018
31	Veić <i>et al.</i>	<i>Surface roughness modelling in super duplex stainless steel turning</i>	Velocidade de corte (v_c), avanço (f) e profundidade de corte (a_p)	Rugosidade	2018
32	Gamarra e Diniz	<i>Taper turning of super duplex stainless steel: tool life, tool wear and workpiece surface roughness</i>	Ferramentas e estratégia de usinagem, [Velocidade de corte (v_c), avanço (f) e profundidade de corte (a_p)] fixos	Rugosidade, tempo de corte e desgaste de flanco	2018
33	Tomasz Cyryl Dyl	<i>The influence of the geometry of the cutting edge and machining parameters of duplex cast steel after turning</i>	Raio e ângulo do inserto, Velocidade de corte (v_c), avanço (f) e profundidade de corte (a_p)	Rugosidade	2018
34	Nascimento <i>et al.</i>	Análise da Rugosidade R_a no torneamento do aço inoxidável super duplex UNS S32750 utilizando Planejamento de Experimentos	Velocidade de corte (v_c), avanço (f) e profundidade de corte (a_p)	Rugosidade R_a	2019
35	R. Angiuli, M. Giannuzzi, and G. Papadia	<i>Experimental thermographic investigation for dry finish turning of SAF 2507 steel</i>	Velocidade de corte (v_c), avanço (f), profundidade de corte (a_p)	Aporte térmico,	2020
36	Pranay Kumar Parsi; R. Sreeram Kotha; Thomas Routhu; Shashank Pandey e Maheshwar Dwivedy.	<i>Machinability evaluation of coated carbide inserts in turning of super-duplex stainless steel</i>	Velocidade de corte (v_c), avanço (f), profundidade de corte (a_p)	Rugosidade, Desgaste de flanco, cavaco	2020
37	S.T. Prashantha Kumar; H.P. Thirtha Prasada	<i>Investigate the effect of nano cutting fluid and cutting parameters under minimum quantity lubrication (MQL) on surface roughness in turning of DSS-2205</i>	Velocidade de corte (v_c), avanço (f), profundidade de corte (a_p) e a Concentração de fluido de corte	Rugosidade	2020

2.3 Integridade da superfície

A integridade da superfície é um dos fatores que vem sendo estudado e aceito na engenharia de fabricação, é necessário a compreensão da influência dos processos de manufatura sobre as superfícies (PAULO, 2008)

Segundo Jesus (2013) a integridade da superfície é uma das características mais relevantes a serem controladas durante a usinagem de peças, devido os efeitos mecânicos e térmicos que podem alterar de forma significativa as características da superfície. Essas alterações envolvem diversificados detalhes do processo, como: Danos térmicos, alteração química, tensão residual e acabamento (HIOKI, 2006; WHITEHOUSE, 2000).

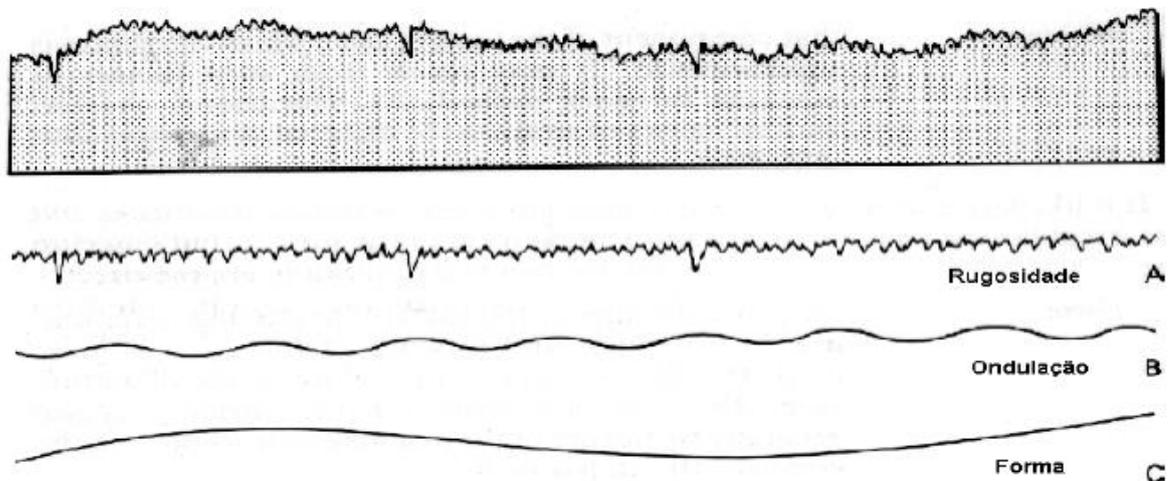
De acordo com Oliveira (2006) as superfícies possuem duas características importantes que devem ser determinados e controlados. Um deles se refere as transformações metalúrgicas, camada subsuperficial e a outra sobre as irregularidades geométricas na superfície topográfica.

Segundo a NBR ISO 4287 (2002), a rugosidade é caracterizada como o conjunto de irregularidades observadas na superfície das peças, pela a interação da ferramenta com a peça e medida com aparelho denominado rugosímetro. A rugosidade é um indicador qualitativo previsto em projeto, e pode afetar o desempenho dos conjuntos após montagem, como:

- Aderência a camadas protetoras;
- Deslizamento;
- Resistencia ao escoamento;
- Resistencia a corrosão e a fadiga;
- Vedação;
- Estética da peça.

De acordo com Oliveira (2004) nas superfícies há irregularidades superficiais, ondulações, espaçamento e formas. Ao analisar uma superfície real, observa-se que o padrão dos picos e vales que podem ser irregulares ou repetitivos conforme figura 2.5.

Figura 2.5 - Irregularidades de Superfícies. (A) textura de uma superfície mostrando efeitos de rugosidade; (B) ondulações; (C) erro de forma



Fonte: Oliveira (2004)

A norma ANSI B46. 1. (1995) estabelece que o acabamento de uma superfície é composto por quatro elementos: rugosidade, ondulações, marcas de avanço e falhas (AGOSTINHO *et al.*, 2004; REIS, 2000).

Ondulações: são irregularidades originadas nas peças superficialmente, sendo maiores que o comprimento da amostra (*cut-off*).

Rugosidades da superfície da peça são finas irregularidades resultantes de ação inerente do processo de corte, ou seja, marcas da ferramenta devido o avanço. A altura ou profundidade média dessas irregularidades são medidas em pequeno comprimento denominado *cut-off* (comprimento da amostra).

Marcas de Avanço na peça: originadas pelo movimento relativo entre a ferramenta e a peça;

Falhas: São inesperadas e indesejáveis, consideradas interrupções do processo de corte.

2.3.1 Sistema de medição de rugosidade

Basicamente são utilizados dois sistemas de medida, o da linha envolvente “E” e linha média “M” o mais utilizado. Alguns países utilizam os dois sistemas.

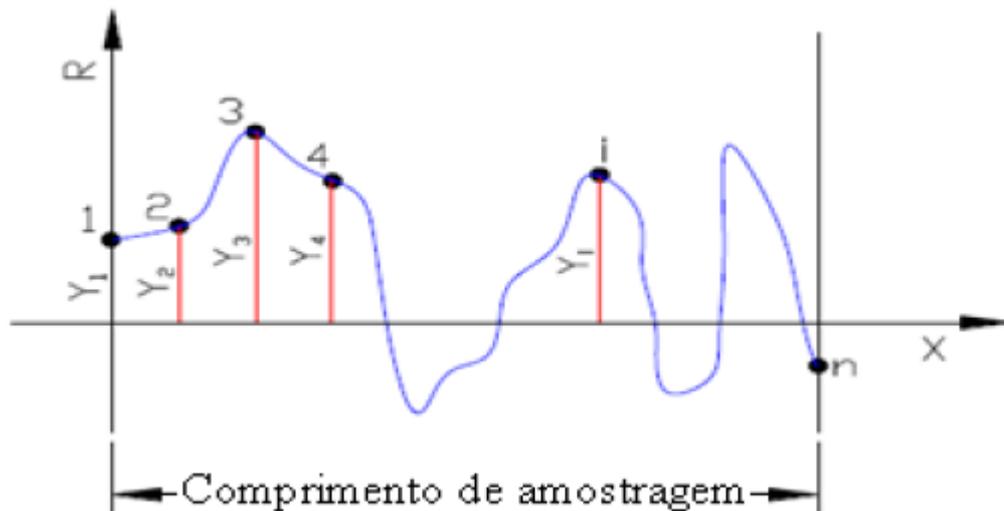
Os princípios de rugosidade da superfície no Brasil são estabelecidos pela norma ABNT NBR 6405/1985. O sistema brasileiro adota a medição da linha média M. A medição de todas as grandezas são definidas por uma referência denominada linha média. A linha média é

caracterizada como uma linha disposta paralela à direção geral do perfil, no trajeto medido, de tal modo que a soma das áreas superiores, compreendida entre ela e o perfil efetivo, seja igual à soma das áreas inferiores.

2.3.2 Parâmetro de Rugosidade (R_a)

A rugosidade R_a caracteriza-se pela média aritmética dos valores absolutos das ordenadas do perfil efetivo em relação à linha média em um comprimento de amostragem (AGOSTINHO *et al.*, 2004; MACHADO *et al.*, 2009) conforme figura 2.6.

Figura 2.6 - Desvio médio aritmético R_a



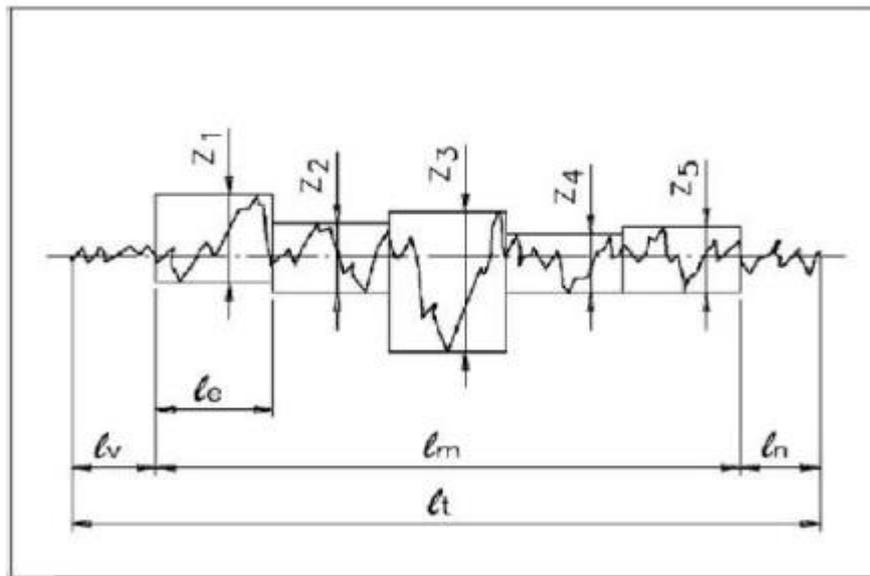
Fonte: Agostinho *et al.* (2004)

A rugosidade R_a é um dos parâmetros mais comuns para a indústria de fabricação mecânica aplicado em situações genéricas onde os valores de projeto para a rugosidade possuem intervalo condizente com os processos de usinagem convencionais (SANTOS e SALES, 2007). Em alguns casos o parâmetro R_a não é indicado, por se tratar de uma média de profundidades de picos e vales de uma superfície. Neste contexto o valor da rugosidade pode alcançar os valores previstos em projeto, pode apresentar desvios superiores ao aceitável em uma parte do perfil, o que inviabiliza a utilização do produto usinado (MACHADO e SILVA, 2011).

2.3.3 Parâmetro de Rugosidade (R_y)

Segundo Espanhol (2008) o parâmetro de rugosidade R_y é caracterizado como o maior valor parcial (Z_i) em um intervalo de medição (l_m). Este intervalo possui cinco rugosidades parciais conforme figura 2.7.

Figura 2.7 - Representação do R_y



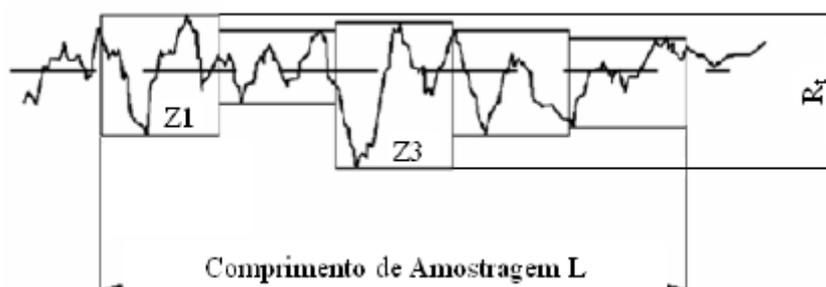
Fonte: Espanhol (2008)

A combinação de profundidade de corte e avanço detém grande influência no acabamento da superfície da peça. A amplitude dos picos e vales ocasionadas pelas marcas de avanço tendem a aumentar com maiores valores de avanço (ESPANHOL, 2008).

2.3.4. Parâmetro de Rugosidade (R_t)

A rugosidade R_t corresponde à distância vertical entre o pico mais alto e o vale mais profundo no comprimento de avaliação (L), independentemente dos valores de rugosidade parcial (Z_i) (AGOSTINHO *et al.*, 2004; MACHADO *et al.*, 2009) conforme figura 2.8.

Figura 2.8 - Rugosidade R_t distância entre pico e vale



Fonte: Agostinho *et al.* (2004)

2.4 Projeto e análise de experimentos (DOE)

O planejamento de experimentos (*Design of Experiments*) é uma técnica estatística que abrange diversos setores empresariais. Tem objetivo estruturar uma estratégia experimental que irá reduzir custo, tempo e aumentar confiabilidade do processo em estudo (MONTGOMERY, 2013).

Segundo Montgomery (2009) o projeto experimental é uma técnica que possibilita dados apropriados para que as conclusões acerca do processo sejam validadas por análises estáticas. Permite a análise da variabilidade sistêmica dos fatores de entrada em relação as variáveis de saída, permitindo construir modelos de previsão para as respostas de interesse, combinando níveis para cada saída. Segundo Jacyna *et al.* (2019) e Montgomery (2013) a condução de um experimento segue as seguintes etapas:

1. Definição do problema;
2. Escolha dos parâmetros e níveis de trabalho;
3. Seleção das respostas;
4. Seleção do projeto experimental;
5. Execução dos experimentos;
6. Análise dos dados.

Segundo Nilo (2003) os projetos experimentais mais utilizados são: planejamento fatorial completo, fatorial fracionário, arranjos de Taguchi e a metodologia de superfície de resposta conforme tabela 2.2 com suas respectivas vantagens e desvantagens.

Tabela 2.2 - Características fundamentais das principais técnicas do projeto e análise de experimento.

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 só trabalha em dois níveis. Necessita de um alto número de corridas para problemas com grande número de variáveis.	Processos em que já se tenha um prévio domínio e nos quais as realizações das corridas não demandem maior tempo ou custo.
FATORIAL FRACIONÁRIO 2^{K-P}	Permite uma pré-análise do processo com um número reduzido de corridas.	Não promove a varredura completa da região experimental.	Processos em que se deseje um pré-conhecimento e nos quais a literatura seja limitada Corridas que demandem 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 do processo, porém pode apresentar modelos matemáticos não confiáveis.	Processos em que haja pouco ou quase nenhum conhecimento prévio de comportamento. Processos com alta dispersão ou em que as corridas demandem alto custo ou tempo
METODOLOGIA DE SUPERFÍCIE DE RESPOSTA	Permite a verificação de variações intermediárias do processo	Pode apresentar erros na extrapolação dos pontos estrela, já que são realizadas poucas corridas nesses níveis.	Otimização de processos, principalmente bem conhecidos e com baixa dispersão.

Fonte: Adaptado de Gomes *et al.* (2012)

Segundo Box e Draper (2007) as técnicas de modelagem possibilitam a inter-relação entre as variáveis de entrada (*inputs*) e saída (*outputs*) de qualquer processo, e um modelo é estabelecido. A aplicação de métodos de otimização em conjunto com a metodologia de superfície de resposta facilita a compreensão do comportamento característico de um processo, e um modelo adequado para realizar análises paramétricas e determinar a configuração ideal dos parâmetros de entrada que resulte nos melhores valores para as variáveis de saída. De acordo com Paiva *et al.* (2007) a melhoria de um processo auxilia as empresas em sua competitividade, assegurando produtos conforme as exigências do mercado e com menor custo.

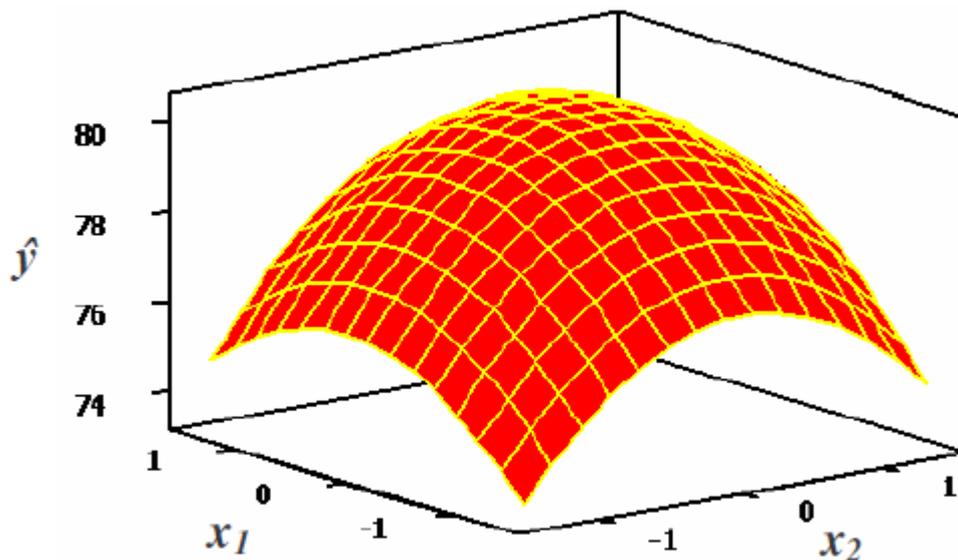
2.4.1 Metodologia de Superfície de Resposta (MSR)

A metodologia de superfície de resposta (*Response Surface Methodology* – RSM) foi desenvolvida para solucionar problemas de otimização. Este método funciona muito bem quando assume a homogeneidade da variância dos dados. Entretanto, tal consideração pode não ser válida para todos os casos de aplicações reais (MONTGOMERY, 2013; BOX e WILSON, 1951; DING *et al.*, 2004).

O conjunto de técnicas estatísticas e matemáticas utilizadas com o propósito de desenvolver, aprimorar e otimizar determinada resposta que é influenciada por diversificadas variáveis é o RSM, onde geralmente o relacionamento entre as variáveis dependentes e independentes é desconhecido (MYERS *et al.*, 2016; MONTGOMERY, 2017). Segundo Anderson-Cook *et al.* (2009) RSM foi desenvolvido para associar uma função desconhecida complexa com polinômios de primeira ou segunda ordem.

Segundo Montgomery (2001) o uso da metodologia de superfície de resposta (MSR) é recomendável quando se tem conhecimento acerca do processo a ser otimizado, é indicada para um número reduzido de fatores (aproximadamente 2 ou 3). É necessário utilizar um projeto de experimentos apropriado a coleta de dados para as respostas de interesse, conforme figura 2.9 e equação 2.3.

Figura 2.9 - Superfície de resposta



Fonte: Montgomery (2001)

$$\hat{y} = f(x_1, x_2) + \varepsilon \quad (2.3)$$

Onde:

\hat{y} : Resposta de interesse

x_1, x_2 : Parâmetros controláveis

ε : Erro experimental

A primeira etapa do método é encontrar uma razoável aproximação do relacionamento real entre as respostas (y_i) e o conjunto de variáveis independentes (x_i). Usualmente, um polinômio de baixa ordem para qualquer região de interesse é empregado, supondo que a resposta esperada $E(y)$ seja função de K variáveis x_1, x_2, \dots, x_k . A relação entre a saída y e os fatores de entrada pode ser representado segundo uma expansão da série de Taylor, conforme equação 2.4 (PAIVA, 2006; BOX e DRAPER, 1987; MONTGOMERY, 2001).

$$E(y) = \eta = \eta_0 + \sum_{i=1}^k r \left[\frac{\partial \eta}{\partial x_i} \right] x_i + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^k k \sum_{j=1}^k k \left[\frac{\partial^2 \eta}{\partial x_i \partial x_j} \right] + \varepsilon \quad (2.4)$$

Se a resposta for bem explicada por uma função linear das variáveis independentes, então a função de aproximação será o modelo de primeira ordem, originário da remoção dos termos de elevada ordem da equação 2.4. Nestas condições é possível reescrever a equação dando origem a equação 2.5.

$$\hat{y} = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon \quad (2.5)$$

Onde:

\hat{y} : Resposta de interesse;

x_i : Variáveis independentes;

β_i : Coeficientes a serem estimados;

k : Número de variáveis independentes;

ε : Erro experimental.

Se o modelo de primeira ordem não for capaz de explicar a variabilidade do processo então mantem-se os termos de segundo ordem e a equação 2.5 poderá ser reescrita conforme a equação 2.6.

$$\hat{y} = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (2.6)$$

Segundo Box e Draper (1987) esses dois modelos, de primeira ordem, para sistemas lineares (sem curvatura), e de segunda ordem, para sistemas com curvatura, representam quase todos os problemas relacionados à superfície de respostas.

A Análise de variância (ANOVA) pode ser utilizada para investigar o ajuste dos modelos de superfície de resposta, o algoritmo dos mínimos quadrados ordinários (*Ordinary Least Squares - OLS*) pode ser utilizado para estimar os coeficientes β representados conforme equação 2.7 em forma matricial.

$$\hat{\beta} = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{Y} \quad (2.7)$$

Onde:

X: Matriz de fatores codificados;

y: Resposta.

O ajuste do modelo é avaliado pelo R^2 ajustado, o coeficiente de determinação representa o percentual de variação na explicação da resposta e vinculado a ele o R^2 ajustado apresenta-se como termômetro para R^2 , pois avalia a tendência que o coeficiente demonstra em superestimar a variação contabilizada para a população. O *OLS* minimiza a soma dos quadrados dos resíduos resultando na melhor aproximação do modelo. A definição de resíduos é representada conforme equação 2.8 (MONTGOMERY, 2017).

$$e_i = y_i - \hat{y}_i \quad (2.8)$$

Onde:

e_i : Resíduo;

y_i : Resposta observada;

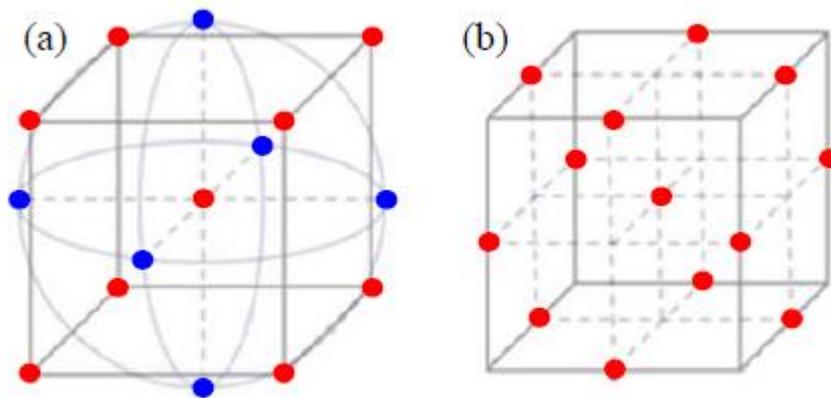
\hat{y}_i : Resposta estimada.

Segundo Myers *et al.* (2016) há vários arranjos de planejamento de superfície de resposta, e o mesmo dependerá de como o modelo de previsão da superfície de resposta irá se comportar. Normalmente, as análises são realizadas de acordo com os critérios de otimalidade do arranjo, variância dos arranjos utilizados e representação gráfica. O objetivo principal da MSR é estabelecer as configurações operacionais ótimas para o sistema ou demonstrar uma região do espaço fatorial, em que os indicadores operacionais sejam atendidas. A validação da presença de curvatura no modelo é baseada na avaliação dos pontos centrais para os fatores codificados.

2.4.2 Arranjo composto central

O arranjo composto central (CCD) é o arranjo experimental mais utilizado para modelagem das funções de superfície de resposta, quando comparado a outros arranjos como Box-Behnken, conforme figura 2.10 (BRITO, 2015; JACYNA *et al.*, 2019).

Figura 2.10 - Arranjos experimentais de superfície de resposta (a) CCD; (b) Box-Behnken



Fonte: Adaptado de Jacyna *et al.* (2019).

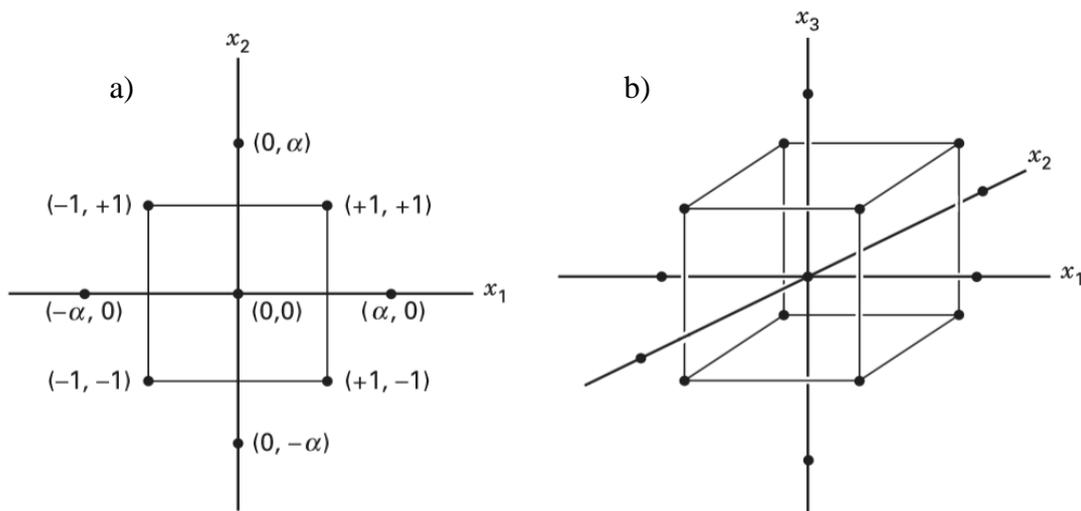
O Arranjo Composto Central (*Box-Wilson Central Composite Design - CCD*) é o modelo 2^k fatorial com implementação de $2k$ pontos axiais e no mínimo um ponto central para melhorar precisão nos resultados previstos. Os CCD's são utilizados extensivamente na criação de modelos de superfície de resposta de segunda ordem com um mínimo de experimentos requeridos (MONTGOMERY, 2013).

Segundo Montgomery (2001) os arranjos composto central e Box-Behnken, são utilizados para a aplicação de superfície de resposta. O arranjo composto central (CCD) é um

arranjo amplamente utilizado para ajustar um modelo de superfície de resposta de segunda ordem devido à sua relativa eficiência com respeito ao número de experimentos necessários (PAIVA, 2012).

Conforme figura 2.11, a letra “a” do CCD fatorial para $k = 2$ e “b” $k=3$ respectivamente para um modelo de segunda ordem. O arranjo é composto de 3 elementos sendo eles um fatorial completo, conjunto de pontos centrais e um grupo de pontos axiais e os valores de α variam o comportamento dos tipos de arranjo.

Figura 2.11 - CCD fatorial para a) $k=2$ e b) $k=3$



Fonte: Montgomery (2013)

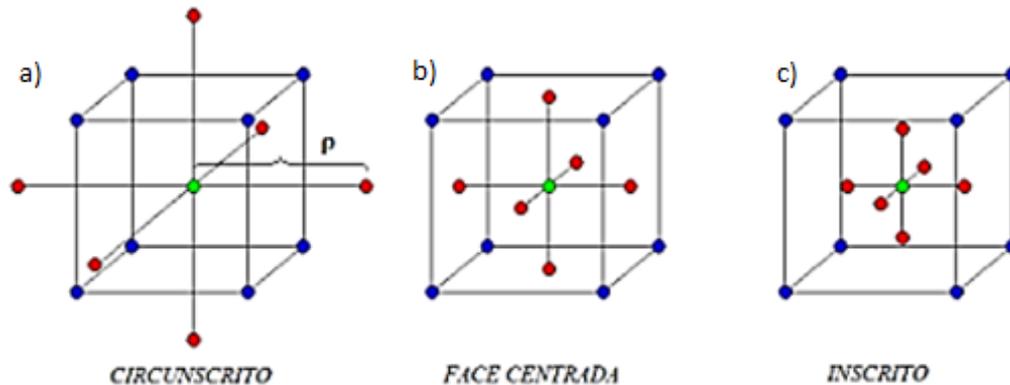
Segundo Montgomery (2005) o α representa a propriedade de rotacionalidade, é definido pela capacidade que os arranjos de superfície de resposta possuem em apresentar variância igual para as saídas (*outputs*) $\{Var[y(x)]\}$ em toda a região experimental de raio ρ . A variância em qualquer ponto x pode ser expressa conforme a equação 2.9.

$$V[\hat{y}(x)] = \sigma^2 x^T (X^T X)^{-1} x \quad (2.9)$$

Quanto mais afastado do centro do arranjo um ponto estiver, maior será o erro de previsão do modelo associado a ele. A distância α do centro distingue três tipos de CCD conforme figura 2.12. Quando α é menor que um, está inscrito conforme figura 2.12-a (CCI) e é aplicado quando os pontos fatoriais não podem ser extrapolados. Se os pontos axiais forem exibidos na face do cubo fatorial, o design é uma face centrada (CCF) com α igual a um conforme figura 2.12-b , o

último caso é o circunscrito (CCC) conforme figura 2.12-c, com α maior que um estabelecendo um maior espaço fatorial. Apesar do CCC e do CCI, o design centrado na face não é rotativo (PAIVA, 2012).

Figura 2.12 - Tipos de CCD



Fonte: Oliveira (2013)

2.5 Análise de Componentes Principais

A Análise de componentes principais (ACP) foi primeiro introduzido por Pearson em 1901 e desenvolvida de forma independentemente por Hotelling em 1933.

Segundo Silva *et al.* (2001) o método ACP é uma técnica estatística capaz de representar dados multivariados em subespaço de dimensão reduzida, de modo que a distância entre os pontos, que representam as amostras nesse subespaço, corresponda o tanto quanto possível às dissimilaridades entre os pontos no espaço de dimensão original.

A partir de combinações entre o Projeto de Experimentos (DOE), Metodologia de Superfície de Resposta (MSR) e outros procedimentos como a Análise de Componentes Principais (ACP), chega-se a uma superfície de resposta ajustada para os escores dos componentes principais (PAIVA, 2008) sobre os quais é possível aplicar diferentes técnicas de otimização.

Pelo uso de combinações algébricas e lineares das variáveis originais que explicam a estrutura variância-covariância, os principais objetivos da ACP são: Redução da dimensionalidade e a interpretação de dados (JOHNSON e WICHERN, 2002; RENCHER, 2002).

A ACP baseia-se na transformação de um conjunto de variáveis originais em outro conjunto de variáveis com a mesma dimensão denominada componentes principais. A ideia

geral é que k componentes principais podem substituir, sem perda considerável de informação, as p variáveis de resposta originais. Os componentes principais apresentam propriedades importantes, cada componente principal representa uma combinação de todas as variáveis originais que são independentes entre si e estimados com o propósito de reter, em ordem de estimação, o máximo de informação, em termos da variação total contida nos dados (VARELLA, 2008).

Segundo Johnson e Wichern (2002) para definir o número de componentes principais a serem utilizados o critério mais empregado é o de Kaiser. Este critério baseia-se no autovalor do componente principal que por sua deverá ser maior do que 1 para representar o conjunto original. A variância acumulada explicada pelos componentes principais deve ser maior que 80%. Estes parâmetros são adequados quando se utiliza matriz de correlação.

Os componentes principais dependem da matriz de correlação ρ ou matriz variância-covariância Σ das variáveis X_1, X_2, \dots, X_p e seu desenvolvimento não requer o pressuposto de normalidade multivariada. Por outro lado, os componentes principais derivados de uma população normal multivariada conduzem a interpretações úteis em termos de elipsóides de densidade constante. Adicionalmente, inferências podem ser feitas a partir de componentes amostrais quando a população é multivariada normal.

Seja o vetor aleatório $\mathbf{X}^T = [X_1, X_2, \dots, X_p]$, cuja matriz de variância-covariância Σ possua autovalores $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_p \geq 0$. Considerando as seguintes combinações lineares, conforme equação 2.10.

$$\begin{aligned} Y_1 &= l_1^T X = l_{11}X_1 + l_{21}X_2 + \dots + l_{p1}X_p \\ Y_2 &= l_2^T X = l_{12}X_1 + l_{22}X_2 + \dots + l_{p2}X_p \\ &\vdots \\ Y_p &= l_p^T X = l_{1p}X_1 + l_{2p}X_2 + \dots + l_{pp}X_p \end{aligned} \quad (2.10)$$

Os componentes principais serão, todas as combinações lineares não correlacionadas Y_1, Y_2, \dots, Y_p , cujas variâncias sejam grandes quanto possível. De acordo com a definição de Johnson e Wichern (2002), o primeiro componente principal (CP_1), é a combinação linear que possui a máxima variância, ou seja, a combinação que maximiza a variância. Genericamente, o i -ésimo componente principal será a combinação linear $l_i^T X$ conforme equação 2.11.

$$\begin{aligned} &\text{Maximizar } \text{Var}(l_i^T X) \\ &\text{Sujeito a: } l_i^T X l_i = 1 \\ &\quad \text{Cov}(l_i^T X, l_k^T X) = 0 \text{ para } k < i \end{aligned} \quad (2.11)$$

Os parâmetros populacionais de variância - covariância Σ e correlação ρ são desconhecidos. Neste contexto, a matriz variância - covariância amostral S no lugar de Σ conforme equação 2.12.

$$S = \begin{bmatrix} \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (x_{1j} - \bar{x}_1)^2 & \dots & \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (x_{1j} - \bar{x}_1)(x_{pj} - \bar{x}_p) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (x_{1j} - \bar{x}_1)(x_{pj} - \bar{x}_p) & \dots & \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (x_{pj} - \bar{x}_p)^2 \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

Desta forma, os componentes principais amostrais são escritos em termos de S e R conforme equações (2.13 e 2.14).

$$\sum_{i=1}^p s_{ii} = \hat{\lambda}_1 + \hat{\lambda}_2 + \dots + \hat{\lambda}_p \quad (2.13)$$

$$r_{(\hat{y}_i, x_k)} = \frac{\text{Cov}(x_k, \hat{y}_i)}{\sqrt{\text{Var}(\hat{y}_i) \cdot \text{Var}(x_k)}} = \frac{\hat{e}_{ki} \sqrt{\hat{\lambda}_i}}{\sqrt{s_{kk}}}, \quad i, k = 1, 2, \dots, p \quad (2.14)$$

Pode-se escrever as combinações lineares na forma de escores dos componentes principais, em muitas aplicações, a matriz de variáveis padronizadas está representada pelas p colunas das características estudadas, em cada uma das suas n observações. Comumente empregada a matriz transposta de Z .

Para encontrar uma expressão adequada que represente a mesma informação que $Y_i = e_i^T Z$, $i = 1, 2, \dots, p$ utiliza-se a entidade estatística denominada de escore de componentes principais (CP_k) calculada conforme equação 2.15.

$$CP_k = Z^T e = \begin{bmatrix} \left(\frac{x_{11} - \bar{x}_1}{\sqrt{s_{11}}} \right) & \left(\frac{x_{21} - \bar{x}_2}{\sqrt{s_{22}}} \right) & \dots & \left(\frac{x_{p1} - \bar{x}_p}{\sqrt{s_{pp}}} \right) \\ \left(\frac{x_{12} - \bar{x}_1}{\sqrt{s_{11}}} \right) & \left(\frac{x_{22} - \bar{x}_2}{\sqrt{s_{22}}} \right) & \dots & \left(\frac{x_{p2} - \bar{x}_p}{\sqrt{s_{pp}}} \right) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \left(\frac{x_{1n} - \bar{x}_1}{\sqrt{s_{11}}} \right) & \left(\frac{x_{2n} - \bar{x}_2}{\sqrt{s_{22}}} \right) & \dots & \left(\frac{x_{pn} - \bar{x}_p}{\sqrt{s_{pp}}} \right) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} e_{11} & e_{12} & \dots & e_{1p} \\ e_{21} & e_{22} & \dots & e_{2p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ e_{1p} & e_{2p} & \dots & e_{pp} \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

A análise de componentes principais é uma combinação algébrica e linear de variáveis aleatórias. Assim, esta combinação geométrica configura um novo sistema de coordenados construídos de um sistema original (JOHNSON e WICHERN, 2002).

A estrutura de correlação entre diversas características capaz de alterar o valor e a precisão dos coeficientes dos seus termos independentes, em alguns métodos é desprezada, que pode comprometer a qualidade das soluções encontradas (HUANG e LIN, 2008; PAIVA *et al.*, 2009). Segundo Box *et al.* (1973) a presença de correlação influi na otimização dos resultados, pode desestabilizar os modelos matemáticos e produzir erros nos coeficientes de regressão. As funções objetivo podem não ser representadas adequadamente se a variância-covariância (ou correlação) for ignorada (CHIAO e HAMADA, 2001; KHURI e CONLON, 1981).

Segundo Montgomery e Runger (2003) a determinação da correlação entre as variáveis é realizada pelo cálculo do coeficiente de Pearson que mede a intensidade entre duas variáveis, conforme equação 2.16.

$$r = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x \sigma_y} \quad (2.16)$$

Onde:

σ_{xy} - Covariância entre as variáveis x e y .

σ_x - Desvio Padrão da variável x

σ_y - Desvio Padrão da variável y

O coeficiente de Pearson possui intervalo $[-1 ; 1]$, onde o seu valor próximo de -1 caracteriza correlação negativa, ao contrário, se o seu valor estiver próximo de 1 , a correlação é positiva.

A covariância está diretamente associada a correlação e pode ser caracterizada com a média do grau de inter-relação numérica, ou seja, é uma média da força de relação linear entre duas variáveis (MILONE, 2009), conforme equação 2.17.

$$Covar_{xy} = S_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{n-1} \quad (2.17)$$

O número adequado de componentes principais é definido possivelmente nesta etapa, selecionados para representar o conjunto de dados originais, de acordo com o critério adotado. Fazendo-se uso dos escores calculados dos CP's, aplica-se metodologia de superfície de resposta para determinar o modelo (quadrático) que melhor representa cada componente. Esse modelo é possível estabelecer o valor de (PC_i) para um conjunto de variáveis de controle (PAIVA, 2008).

Quando se aplica os mínimos quadrados ordinários (*OLS*), as combinações do *CCD*, tendo-se os escores como respostas, são geradas funções objetivo independentes. Para forçar uma solução que não extrapole limites da região experimental, um modelo de programação não linear é criado em termos de componentes principais (BRATCHELL, 1989), conforme equação 2.18.

$$\begin{aligned} \text{Minimizar } PC_1 &= \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j & (2.18) \\ \text{Sujeito a: } & X^T X \leq \rho^2 \end{aligned}$$

A etapa seguinte caracteriza-se pela padronização dos alvos em termos de componentes principais, partindo-se dos alvos originais das respostas. Calcula-se a média e desvio padrão para cada variável de resposta do sistema, coletados durante a experimentação. Após definir o alvo para cada variável resposta, é possível calcular o alvo padronizado (Z_p) aplicando-se a equação 2.19.

$$T(PC_i) = \sum e_{ij} x Z_{pj} \quad (2.19)$$

2.6 Otimização

Segundo Harry e Schoeder (2000) dois objetivos devem ser analisados em processos de manufatura quando busca-se melhoria: a redução de sua variância e a distância entre o valor real e o valor pretendido para uma dada característica da qualidade. Destes objetivos o fundamento básico da Metodologia Seis Sigma, salienta que um bom processo é aquele que está “no alvo, com a mínima variação”.

Vining e Myers (1990) afirmaram que atingir a otimização das médias e das variâncias simultaneamente podem ser realizadas utilizando metodologia de superfície de resposta dual. Supondo que a variável de resposta sendo y_i e as variáveis experimentais controladas como sendo x_1, x_2, \dots, x_k . Primeiramente, propuseram o ajuste do modelo polinomial de segunda ordem para média (ω_μ) e para desvio padrão (ω_σ), conforme equações 2.20 e 2.21.

$$\omega_\mu = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum \sum_{i < j}^k \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon_\mu \quad (2.20)$$

$$\omega_\sigma = \gamma_0 + \sum_{i=1}^k \gamma_i x_i + \sum_{i=1}^k \gamma_{ii} x_i^2 + \sum \sum_{i < j}^k \gamma_{ij} x_i x_j + \varepsilon_\sigma \quad (2.21)$$

Um sistema é selecionado de acordo com o objetivo pretendido, onde T é o alvo para a característica abordada, podendo-se minimizar, normalizar ou maximizar o objetivo.

Minimização (Smaller the better - *STB*) – Minimizar a média (ω_μ), mantendo o desvio padrão (ω_σ) em valor pretendido, conforme equação 2.22.

$$\text{Minimizar } \hat{\omega}_\mu \quad (2.22)$$

$$\text{Sujeito a: } \hat{\omega}_\sigma = T$$

Normalização (*Nominal the best - NTB*) – Minimizar o desvio padrão (ω_σ), mantendo a média (ω_μ) em um valor específico, conforme equação 2.23.

$$\text{Minimizar } \hat{\omega}_\sigma \quad (2.23)$$

$$\text{Sujeito a: } \hat{\omega}_\mu = T$$

Maximização (Larger the better - *LTB*) – Maximizar a média (ω_μ), mantendo o desvio padrão (ω_σ) em um valor pretendido, conforme equação 2.24.

$$\text{Maximizar } \hat{\omega}_\mu \quad (2.24)$$

$$\text{Sujeito a: } \hat{\omega}_\sigma = T$$

Kim e Rhee (2003), Köksoy e Yalcinoz (2006) e Li e Tu (1995), propuseram otimização da função erro quadrático médio (EQM) utilizando um modelo matemático, conforme equação 2.25.

$$\begin{aligned} \text{Minimizar } EQM &= (\hat{\omega}_\mu - T)^2 + \hat{\omega}_\sigma^2 \\ \text{Sujeito a: } \mathbf{X}^T \mathbf{X} &\leq \rho^2 \end{aligned} \quad (2.25)$$

2.6.1 Método *Desirability*

Um dos primeiros algoritmos propostos para a otimização de múltiplas respostas foi desenvolvido por Harrington (1965) e aprimorado por Derringer e Suich (1980) com o nome *Desirability*. A função de conveniência exemplificada por Harrington é uma derivação especial da função *Desirability* apresentada por Derringer e Suich (MURPHY *et al.*, 2005).

Segundo Van Gyseghem *et al.* (2004), este é um método multicritério, eficiente para avaliar várias respostas ao mesmo tempo e, apontar as condições ideais de operação que resultam na solução de compromisso para as variáveis de saída.

Segundo Derringer (1994), a principal vantagem na utilização deste método é que a importância das funções objetivo no processo ou produto final são balanceadas dentro de uma mesma escala variando-se entre 0 e 1, permitindo a ponderação simultânea e adimensional.

Porém sua desvantagem é que o método ignora a existência de variância-covariância entre as respostas favorecendo soluções inadequadas (WU 2005; KO *et al.*, 2005).

O método *desirability* reduz um problema multicritério em monocritério utilizando a relação entre as variáveis independentes e as respostas, o qual pode ser executado aplicando a metodologia de superfície de resposta e *OLS* ou *WLS* (PAIVA, 2006). Posteriormente o algoritmo aprimorado por Derringer e Suich (1980) deve ser executado para converter cada uma das respostas em uma única função d_i pertencente ao intervalo $0 \leq d_i \leq 1$, onde $d_i = 0$ representa uma resposta fora da região viável, enquanto $d_i = 1$ é o objetivo (*target*), que se procura atingir para as variáveis de resposta (MYERS *et al.*, 2009).

Uma melhor exemplificação deste intervalo conforme Derringer e Suich (1980) a seguir:

- $d_i = 1$ – Valor desejável;
- $d_i = 0,80 \leq d_i \leq 1$ – Valor excelente;
- $d_i = 0,63 \leq d_i \leq 0,80$ – Valor adequado;
- $d_i = 0,40 \leq d_i \leq 0,63$ – Valor aceitável, porém pobre;
- $d_i = 0,30 \leq d_i \leq 0,40$ – Valor no limite de aceitação;
- $d_i = 0 \leq d_i \leq 0,30$ – Valor fora da faixa adequada;

Neste contexto, as variáveis ótimas são selecionadas com a finalidade de maximizar o *Desirability* global (D), representado pela média geométrica de cada uma das funções individuais (d) das respostas que se deseja otimizar, conforme equação 2.26.

$$D = (d_1(Y_1)d_2(Y_2)... d_m(Y_m))^{1/m} \quad (2.26)$$

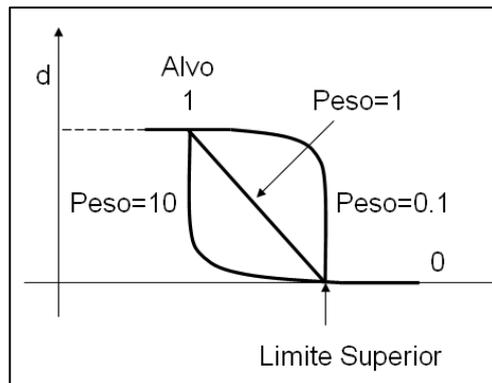
Para os casos em que a importância das respostas possua valores diferentes, deve-se utilizar a equação 2.27, onde g_i representa o grau de importância individual de cada função e G a soma deles.

$$D = \left[\prod_{i=1}^n d_i^{g_i}(\hat{Y}_i) \right]^{\frac{1}{G}} \quad (2.27)$$

Segundo Paiva (2006) para a solução de um problema, enquanto o valor original tende ao mínimo a função *desirability* aumenta, conforme equação 2.28 e figura 2.13.

$$d_i = \begin{cases} 0 & \hat{Y}_i > H_i \\ \left[\frac{H_i - \hat{Y}_i}{H_i - T_i} \right]^R & T_i \leq \hat{Y}_i \leq H_i \\ 1 & \hat{Y}_i < T_i \end{cases} \quad (2.28)$$

Figura 2.13 - Representação esquemática para *desirability* com objetivo de minimização

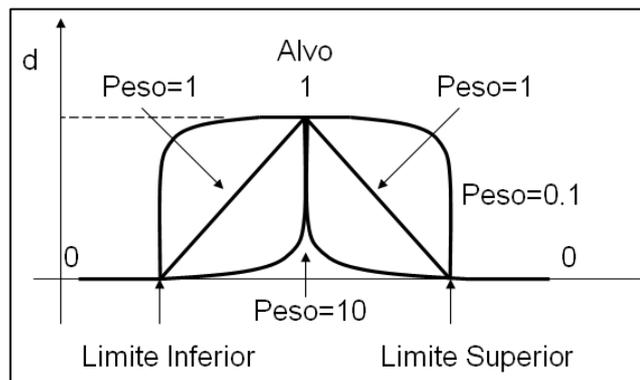


Fonte: Derringer e Suich (1980)

Quando a resposta se move em direção ao alvo (normalização), o valor da função *desirability* aumenta. Acima ou abaixo dos limites, $d=0$; no alvo $d=1$, conforme equação 2.29 e figura 2.14.

$$d_i = \begin{cases} \left[\frac{\hat{Y}_i - L_i}{T_i - L_i} \right]^R & L_i \leq \hat{Y}_i \leq T_i \\ \left[\frac{\hat{Y}_i - H_i}{T_i - H_i} \right]^R & T_i \leq \hat{Y}_i \leq H_i \\ 0 & \hat{Y}_i < L_i \text{ e } \hat{Y}_i > H_i \end{cases} \quad (2.29)$$

Figura 2.14 - Representação esquemática para *desirability* com objetivo de normalização

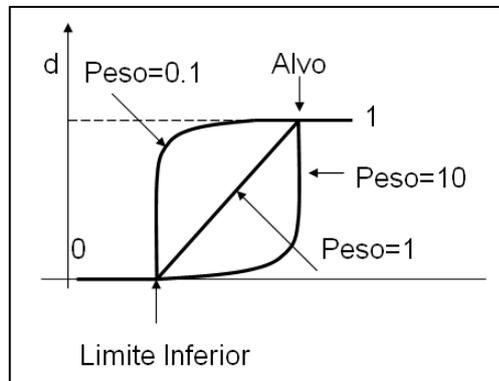


Fonte: Derringer e Suich (1980)

A maximização ocorre quando o valor da função *desirability* aumenta quando o valor da resposta aumenta. Abaixo do limite inferior, $d=0$; acima do alvo, $d=1$ conforme equação 2.30 e figura 2.15.

$$d_i = \begin{cases} 0 & \hat{Y}_i < L_i \\ \left[\frac{\hat{Y}_i - L_i}{T_i - L_i} \right]^R & L_i \leq \hat{Y}_i \leq T_i \\ 1 & \hat{Y}_i > T_i \end{cases} \quad (2.30)$$

Figura 2.15 - Representação esquemática para *desirability* com objetivo de normalização



Fonte: Derringer e Suich (1980)

Onde L_i é o limite inferior de especificação, H_i é o limite superior de especificação, T_i é o alvo e \hat{Y}_i , valor ajustado da resposta e R o seu peso.

O índice global D está dentro do intervalo $[0 ; 1]$ e quando as todas as variáveis respostas se aproximarem o máximo possível de suas especificações, será maximizado (PAIVA, 2006) conforme equação 2.31.

O problema de otimização pode ser escrito da seguinte forma:

Maximizar D (2.31)

Sujeito a: $x^T x \leq \rho^2$

O método dependerá dos limites de especificação para os valores desejados, do grau de importância de cada resposta (g_i), peso (R) dado a cada resposta e o tipo de otimização pretendida (maximização, normalização ou minimização).

2.7 Gradiente Reduzido Generalizado

A ideia fundamental do GRG é a partir do problema modelado e as restrições atribuídas ao problema original, permitem a análise de um problema irrestrito em um espaço de menor dimensão. Segundo Lasdon *et al.* (1978) o método *GRG* é fundamentado na transformação das limitações de um dado problema para uma forma irrestrita, utilizando substituição direta. O vetor da variável de processo pode ser dividido em dois subvetores conforme equação 2.32.

$$\mathbf{X} = (\mathbf{X}^B, \mathbf{X}^N)^T \quad (2.32)$$

Onde:

\mathbf{X} = variável de processo

\mathbf{X}^B = vetor das variáveis dependentes

\mathbf{X}^N = vetor das variáveis independentes

A maneira reduzida de acordo com Lasdon *et al.* (1978) pode ser escrita conforme equação 2.33:

$$\begin{aligned} \text{Minimizar } F(\mathbf{x}) &= f(\mathbf{X}^B(\mathbf{X}^N), \mathbf{X}^N) \\ \text{Sujeito a: } \mathbf{l}_N &\leq \mathbf{X}^N \leq \mathbf{u}_N \end{aligned} \quad (2.33)$$

O *GRG* procura uma direção para otimizar a função objetivo. Iniciando-se com um ponto viável x^k , o *GRG* tenta encontrar uma direção para otimizar a função objetivo. A direção do movimento pode ser obtida pelo gradiente reduzido generalizado conforme equação 2.34.

$$r^k = \begin{bmatrix} \frac{\partial f^k}{\partial X_N^k} \end{bmatrix}^T - \begin{bmatrix} \frac{\partial f^k}{\partial X_B^k} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \frac{\partial g^k}{\partial X_B^k} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \frac{\partial g^k}{\partial X_N^k} \end{bmatrix}^T \quad (2.34)$$

CAPÍTULO 3

PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.1 MATERIAL

Para cumprir com os objetivos desta pesquisa para o torneamento do aço inoxidável super duplex UNS S32750, com dureza média de 280HB na forma de tarugo com diâmetro de 53 mm e comprimento 100 mm, com composição química conforme tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Composição química aço inoxidável super duplex UNS S32750

Elementos	C	Cr	Cu	Fe	Mo	Mn	N	Ni	P	S	Si	W
	0,015	25,20	0,55	Restante	3,59	0,55	0,247	6,88	0,024	0,0010	0,38	0,66

Fonte: Villares Metals® (2017)

3.2 MÁQUINA E FERRAMENTAS

A execução dos ensaios foram realizados no laboratório de usinagem da Universidade Federal de Itajubá campus de Itabira. Todos os corpos de prova foram usinados no torno CNC de marca EUROSTEC, modelo CYK6136/75 com potência máxima de 15 kW e rotação máxima de 10.000 RPM conforme figura 3.1.

Figura 3.1 - Torno CNC Eurostec



Durante os ensaios utilizou-se o porta-ferramentas ISO MWLNR-2525M08 e o inserto de metal duro foi o ISO WNMG 080408 conforme figura 3.2, revestido pela técnica de deposição de vapor químico (CVD) com revestimento de TiCN+Al₂O₃+TiN sem fluido de corte (SANDVIK, 2018).

Figura 3. 2 - Pastilha perfil WNMG 080408



Fonte: Sandvik (2017)

3.3 DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS

Os níveis de operação foram definidos de acordo com as especificações do fabricante da ferramenta onde os pontos fatoriais (-1; +1) constituem dados estratificados do catálogo. Já o valor central é a média aritmética dos pontos fatoriais conforme tabela 3.2. Os pontos axiais, são valores que extrapolam os dados fornecidos pelo fabricante e estabelecidos conforme equação 3.1.

Tabela 3.2 - Parâmetros utilizados no processo de torneamento

Fatores	Nível -1,68	Nível -1	Nível 0	Nível +1	Nível +1,68
Velocidade de corte (v_c)[m/min]	153,18	160	170	180	186,81
Profundidade de corte (a_p)[mm]	0,16	0,40	0,75	1,10	1,34
Avanço (f)[mm/rot]	0,07	0,10	0,15	0,20	0,23

Fonte: Sandvik (2018)

$$\alpha = \sqrt[4]{2^k} \quad (3.1)$$

3.4 INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO

As medições de rugosidade do corpo de prova foram realizadas com o rugosímetro portátil Mitutoyo *Surftest* 201, aferido e calibrado antes do início das medições conforme figura 3.3. O comprimento de amostragem (*cut-off*) foi ajustado para 0,8 mm em todas as medidas.

Os valores obtidos para as variáveis de resposta R_a , R_y e R_t foram medidos simultaneamente, durante cada passe, em três pontos do corpo de prova equidistantes 120° , a fim de considerar o valor médio das leituras e posteriormente registrados em planilha do Microsoft office Excel®.

Figura 3.3 – Rugosímetro utilizado no experimento.



3.5 PROBLEMA DE PESQUISA

Durante a otimização do processo de torneamento do aço inoxidável super duplex UNS S32750 utilizando inserto de metal duro, investigou-se os modelos que descrevem o comportamento da rugosidade da superfície e a condição operacional que viabilize a melhoria da qualidade com uma breve análise da eficiência de processo.

O objeto de estudo apresenta-se como a melhoria dos parâmetros de usinagem que viabilize o torneamento do aço inoxidável SDSS considerando que este material apresenta diversas propriedades que dificultam sua usinagem e qualquer variação mínima pode causar a redução da qualidade da superfície. Portanto, uma análise científica é importante para que os fatores de trabalho sejam parametrizados corretamente, permitindo que os resultados alcançados sejam coerentes e significativos.

As variáveis de controle adotadas para esse procedimento foram profundidade de corte (ap), avanço (f) e velocidade de corte (vc). Essas variáveis são reconhecidas como as mais

importantes, visto que influencia consideravelmente o processo de torneamento, principalmente o acabamento da superfície da peça (DINIZ *et al.*, 2014).

3.6 MÉTODO EXPERIMENTAL

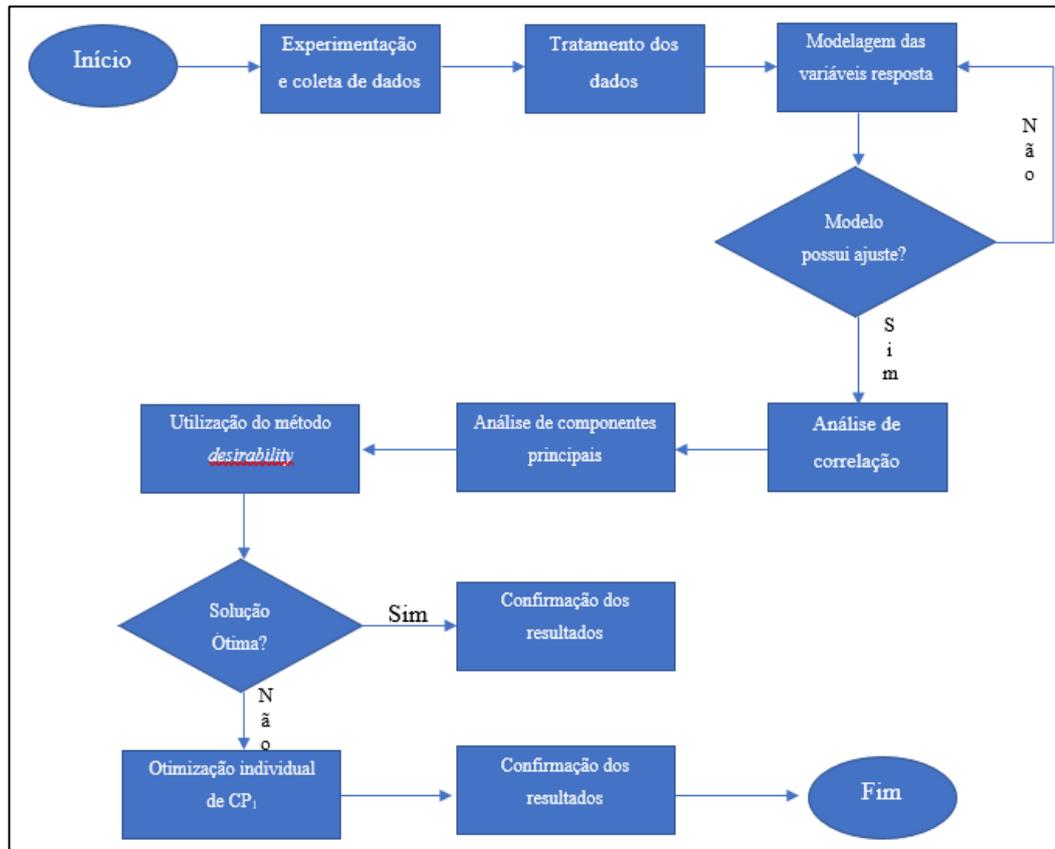
Para a otimização do processo de torneamento do aço inoxidável super duplex UNS S32750, o presente trabalho utilizou como método de pesquisa a experimentação. Dentre as técnicas de experimentação foi utilizado o projeto e análise de experimentos (DOE), para que os dados apropriados fossem coletados e depois analisados por métodos estatísticos, o que resulta em conclusões válidas (MONTGOMERY, 2013). Considerando-se os planejamentos experimentais, foi utilizado o arranjo composto central. O levantamento de informações é uma atividade importante na execução do trabalho, um banco de dados mal elaborado pode conduzir a resultados insatisfatórios. O trabalho foi dividido em etapas conforme as fases a seguir.

1ª Fase - Metodologia de Superfície de Resposta (MSR): utilizada para o planejamento dos experimentos, coleta dos dados, modelagem matemática das respostas e análise das influências dos parâmetros na rugosidade R_a , R_y e R_t .

2ª Fase - Otimização utilizando método *desirability*: utilizadas para obter a configuração ótima dos parâmetros de usinagem que permitam a maximização qualidade do processo. Para aplicação do método *desirability* será realizada a análise de correlação e detecção do(s) componente(s) que representem o processo. Posteriormente, aplicação do *OLS* e análise do(s) componente(s), e validação do modelo de superfície de resposta. Após validação do modelo para o componente principal, foi executado o método *desirability* para encontrar a solução de compromisso. Para a otimização individual de CP_1 , o componente principal e demais modelos serão disposto no Microsoft Office Excel® e com o GRG presente no suplemento Solver, determinar a solução que atenda as restrições do problema.

A sequência adotada para coleta, tratamento, modelagem e otimização pode ser observada conforme figura 3.4.

Figura 3.4 - Sequência de estruturação da coleta e análise do banco de dados



3.7 DEFINIÇÃO DA MATRIZ EXPERIMENTAL

Segundo Montgomery (2013) o arranjo composto central é um arranjo da metodologia de superfície de resposta que integra aos experimentos fatoriais um conjunto de pontos e centrais e um conjunto de níveis adicionais, denominado pontos axiais. Nesta pesquisa foi utilizado o CCD, com arranjo fatorial de 2^3 com 3 pontos centrais e 6 pontos axiais totalizando 17 experimentos para as variáveis de controle com α igual a 1,68 conforme tabela 3.3.

O procedimento para modelar as respostas, como uma função dos fatores do experimento, é um método de análise estatística discutido e proposto por vários autores. Airão *et al.* (2018), Mougo *et al.* (2018) e He Han (2015) discutiram este procedimento. Obtiveram informações sobre a influência dos fatores sobre o modelo.

Foi utilizado o software estatístico MINITAB® 18, para a construção do arranjo composto central que gerou um conjunto sequencial de corridas experimentais, sob influência de três fatores de controle. As variáveis de controle analisadas foram a profundidade de corte (x1), avanço, (x2) e velocidade de corte (x3).

Tabela 3.3 - Matriz experimental para o torneamento do UNS S32750

Número de experimentos	Variáveis de controle codificadas		
	a_p	f	v_c
	[mm]	[mm/rot]	[m/min]
1	0	0	0
2	-1	-1	-1
3	-1	1	-1
4	1	-1	1
5	1	1	-1
6	-1,68	0	0
7	1	1	1
8	-1	1	1
9	0	0	0
10	0	0	1,68
11	0	0	-1,68
12	0	-1,68	0
13	0	1,68	0
14	1,68	0	0
15	-1	-1	1
16	1	-1	-1
17	0	0	0

3.8 EXECUÇÃO DOS EXPERIMENTOS

Todos os experimentos foram realizados no laboratório de usinagem da universidade federal de Itajubá *campus* de Itabira, seguindo-se a sequência experimental no torno CNC Eurostec de marca CY-K6136/75 utilizando inserto de metal duro sem o uso de fluido de corte conforme figura 3.5.

Após a usinagem da superfície com os parâmetros configurados conforme matriz experimental, as rugosidades foram medidas e a taxa de remoção de material (MRR) calculada.

Segundo Agostinho *et al.* (2004) a rugosidade da superfície é um critério importante para as exigências de projeto. Os componentes mecânicos necessitam de superfícies adequadas a sua aplicação e a rugosidade influencia neste aspecto, principalmente nos ajustes que são definidos de acordo com o atrito necessário para o trabalho desenvolvido pelo componente.

Figura 3.5 - Torno CNC CY-K6136/75 e corpo de prova posicionado para experimentação



Diversas variáveis de usinagem podem afetar o acabamento da superfície usinada. Dentre os fatores externos que podem influenciar a rugosidade destacam-se: o material da peça, as condições de corte e a rigidez da máquina ferramenta.

A condição experimental do arranjo foi conduzida para os 17 experimentos. O objetivo principal do arranjo é descobrir a configuração ideal dos parâmetros controláveis capaz de alcançar menores valores de rugosidade, com a menor dispersão e taxa de remoção de material maior do que zero. A cada experimento a rugosidade foi medida em 3 pontos do corpo de prova considerando-se o valor médio entre as leituras e MRR foi calculada para construção do banco de dados.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após execução dos experimentos, um banco de dados foi gerado para as variáveis de resposta selecionadas nesta pesquisa, o processo de obtenção dos modelos matemáticos com ajuste superior a 80%, com resíduos normais para as variáveis R_a , R_y e R_t .

4.1 Modelagem de R_a , R_y e R_t

Conforme o planejamento, os experimentos foram compilados e armazenados em um banco de dados para o desenvolvimento da pesquisa. A primeira etapa consiste na construção dos modelos matemáticos a partir dos dados medidos.

A tabela 4.1 resume os valores calculados para as médias de R_a , R_t , R_y e a taxa de remoção de material (MRR), calculada conforme a equação 4.1, para cada experimento. Foi possível observar que a taxa de remoção de material aumenta com maximização dos valores dos parâmetros, favorecendo o aumento de produtividade e foi calculado para cada linha de experimento realizado.

$$\text{MRR} = a_p \cdot f \cdot v_c \quad (4.1)$$

Tabela 4.1 - Valores do experimento para as variáveis R_a , R_t , R_y e MRR

Ordem de experimentação	Variáveis codificadas			Respostas			
	Profundidade de corte	Avanço	Velocidade de corte	R_a	R_t	R_y	MRR
	[mm]	[mm/rot]	[m/min]	[μm]	[μm]	[μm]	[cm^3/min]
1	0,75	0,15	170,00	1,27	6,08	5,67	19,12
2	0,40	0,10	160,00	0,88	4,31	3,88	6,40
3	0,40	0,20	160,00	1,26	6,52	6,14	12,80
4	1,10	0,10	180,00	0,51	4,38	3,06	19,80
5	1,10	0,20	160,00	2,01	8,61	7,63	35,20
6	0,16	0,15	170,00	0,76	4,11	3,70	4,08

Continuação Tabela 4.1- Valores do experimento para as variáveis R_a , R_t , R_y e MRR

Ordem de experimentação	Variáveis codificadas			Respostas			
	Profundidade de corte	Avanço	Velocidade de corte	R_a	R_t	R_y	MRR
	[mm]	[mm/rot]	[m/min]	[μm]	[μm]	[μm]	[cm^3/min]
7	1,10	0,20	180,00	1,56	8,87	8,39	39,60
8	0,40	0,20	180,00	1,88	7,97	8,36	14,40
9	0,75	0,15	170,00	1,03	5,20	4,83	19,12
10	0,75	0,15	186,81	0,82	4,79	4,33	21,01
11	0,75	0,15	153,18	1,05	5,08	4,79	17,23
12	0,75	0,07	170,00	0,31	2,95	2,02	8,92
13	0,75	0,23	170,00	2,39	9,82	9,24	29,32
14	1,34	0,15	170,00	1,00	6,27	5,68	34,17
15	0,40	0,10	180,00	0,31	2,06	1,74	7,20
16	1,10	0,10	160,00	0,71	4,09	3,81	17,60
17	0,75	0,15	170,00	1,27	6,68	6,30	19,12

A partir dos resultados experimentais foi possível estabelecer relações entre as respostas analisadas e os parâmetros do processo. O modelo de superfície de resposta de segunda ordem foi utilizado para representar a relação aproximada entre as respostas de interesse R_a , R_t e R_y e os parâmetros controláveis. Dessa forma, considerando o processo de torneamento do aço inoxidável super duplex UNS S32750, em que são estudados os efeitos de três parâmetros de entrada, pode-se avaliar a influência dos fatores de entrada sobre a rugosidade R_a conforme tabelas 4.2 e 4.3.

Os resultados da ANOVA indicaram que o modelo desenvolvido demonstrou um bom ajuste, já que $R^2(Adj)$ alcançou valor superior a 80%. Os termos em negrito apresentam-se como significantes para o modelo com valor-P inferior a 5%. A falta de ajuste para os modelos desenvolvidos não foi significativa demonstrando a adequação

Tabela 4.2 - Análise de variância para R_a

Fonte	DF	Seq SS	Adj MS	F	P
Modelo	4	456.908	114.227	17.16	0.000
Linear	2	415.970	207.985	31.24	0.000
<i>f</i>	1	402.198	402.198	60.42	0.000
v_c	1	0.13773	0.13773	2.07	0.176

Continuação Tabela 4.2 - Análise de variância para R_a

<i>Fonte</i>	<i>DF</i>	<i>Seq SS</i>	<i>Adj MS</i>	<i>F</i>	<i>P</i>
Square	1	0.18470	0.18470	2.77	0.122
f^2	1	0.18470	0.18470	2.77	0.122
Interação com dois fatores	1	0.22467	0.22467	3.37	0.091
$f.v_c$	1	0.22467	0.22467	3.37	0.091
Erro	12	0.79884	0.06657		
Falta de ajuste	10	0.76205	0.07621	4.14	0.210
Erro Puro	2	0.03679	0.01839		
Total	16	536.792			

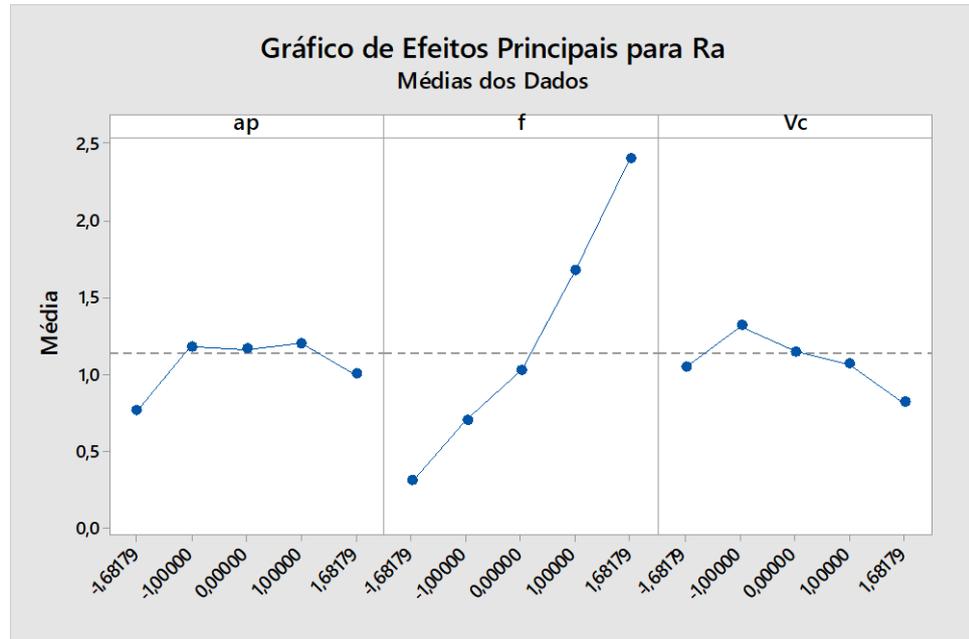
O ajuste alcançado pelo modelo estabelecido para a variável R_a foi satisfatório com valor igual a 80,16%.

Tabela 4.3 - Coeficientes codificados para R_a

Termo	Efeito	Coef	SE Coef	T	P
Constante		10.502	0.0849	12.36	0.000
f	10.854	0.5427	0.0698	7.77	0.000
v_c	-0.2008	-0.1004	0.0698	-1.44	0.176
$f.f$	0.2381	0.1191	0.0715	1.67	0.122
$f.v_c$	0.3352	0.1676	0.0912	1.84	0.091

S = 0,258012 R² = 85,12% R²(adj) = 80,16% R²(Pre) = 67,69%

Foi observado na análise de efeitos principais que o fator de maior influência é o avanço (f) e a minimização da rugosidade R_a é alcançada quando esta variável é configurada em seus menores valores. A velocidade de corte (v_c) e a profundidade de corte (a_p) exercem pouca influência sobre os valores da rugosidade R_a , no processo de torneamento do aço inoxidável super duplex UNS S32750 conforme figura 4.1

Figura 4.1 - Gráfico de efeitos principais para R_a 

O gráfico de contorno e de superfície de resposta para a rugosidade R_a em função dos fatores controláveis codificados indicaram que menores valores de avanço (f) e maiores valores de velocidade de corte (v_c) resultam na minimização da rugosidade R_a conforme figuras 4.2 e 4.3.

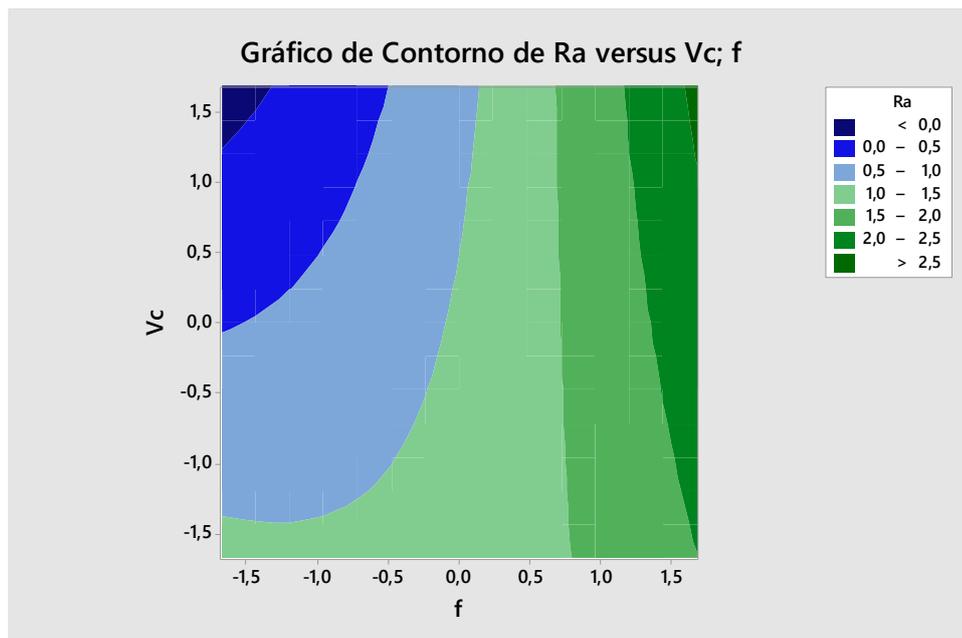
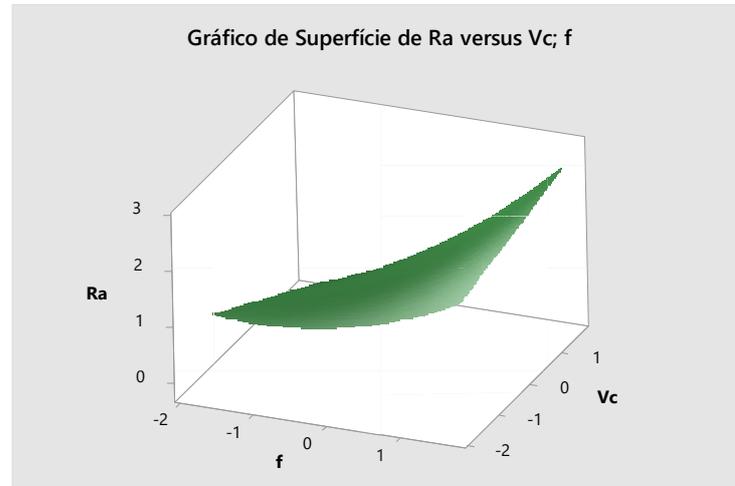
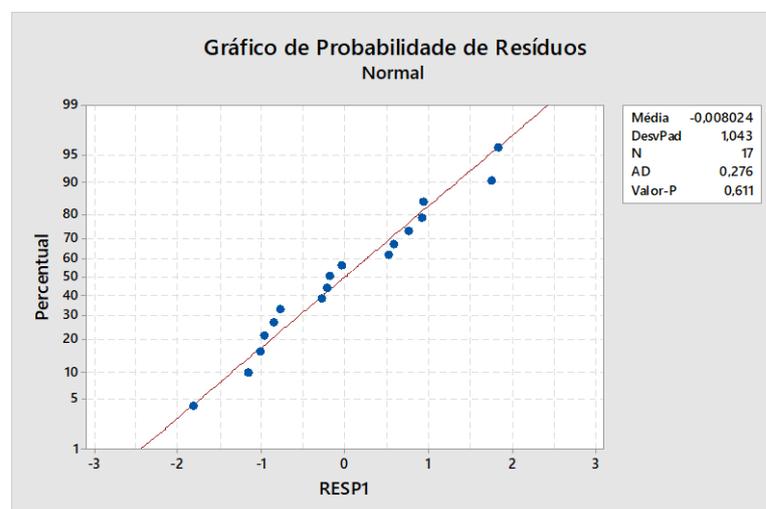
Figura 4.2 - Gráfico de contorno para $R_a \times v_c \times f$ 

Figura 4.3 - Gráfico de superfície de resposta R_a x f x v_c 

A fim de verificar se os resíduos seguem uma distribuição normal, foi realizado o teste de normalidade de Anderson Darling, conforme figura 4.4. O valor-P foi 61,1%, portanto, maior que o nível de significância de 5%, o que permite dizer que os resíduos são normalmente distribuídos. Isto mostra que o modelo está bem ajustado, e explica a variabilidade dos parâmetros de usinagem no processo de torneamento do aço inoxidável super duplex UNS S32750.

O ajuste alcançado foi satisfatório com valor superior a 80%, demonstrando que a proporção da variabilidade da rugosidade R_a foi bem explicada pelas variáveis de controle utilizadas no processo de torneamento do aço inoxidável super duplex UNS S32750. O valor para a falta de ajuste está acima do nível de significância demonstrando a adequação do modelo. O parâmetro profundidade de corte (a_p) para a situação foi removido do modelo de R_a pela a mínima influência exercida.

Figura 4.4 - Teste de normalidade para os resíduos de R_a 

Para a modelagem da variável R_t foi realizada a análise de variância (ANOVA), e os resultados indicaram que o modelo desenvolvido demonstrou um bom ajuste, já que o valor de $R^2(adj)$ também ficou acima de 80%. Os termos em negrito apresentam-se como significantes para o modelo com valor-P inferior a 5%. A falta de ajuste para o modelo desenvolvido não foi significativa demonstrando sua adequação.

O ajuste alcançado pelo modelo de R_t foi satisfatório, com valor de $R^2(adj)$ igual a 90,59%. O valor para a falta de ajuste está acima do nível de significância indicando que o modelo é adequado, conforme tabelas 4.4 e 4.5.

Tabela 4.4 - Análise de variância para R_t

<i>Fonte</i>	<i>DF</i>	<i>Seq SS</i>	<i>Adj MS</i>	<i>F</i>	<i>P</i>
Modelo	5	689.689	137.938	31.82	0.000
Linear	3	658.270	219.423	50.62	0.000
<i>a_p</i>	1	55.736	55.736	12.86	0.004
<i>f</i>	1	602.123	602.123	138.91	0.000
<i>v_c</i>	1	0.0411	0.0411	0.09	0.764
Quadrado	1	14.665	14.665	3.38	0.093
<i>f.f</i>	1	14.665	14.665	3.38	0.093
Interação com dois fatores	1	16.754	16.754	3.87	0.075
<i>f.v_c</i>	1	16.754	16.754	3.87	0.075
Erro	11	47.681	0.4335		
Falta de ajuste	9	36.524	0.4058	0.73	0.699
Erro Puro	2	11.157	0.5578		
Total	16	737.369			

Os parâmetros com o valor-P em negrito são significantes para a variável R_t conforme tabela 4.5.

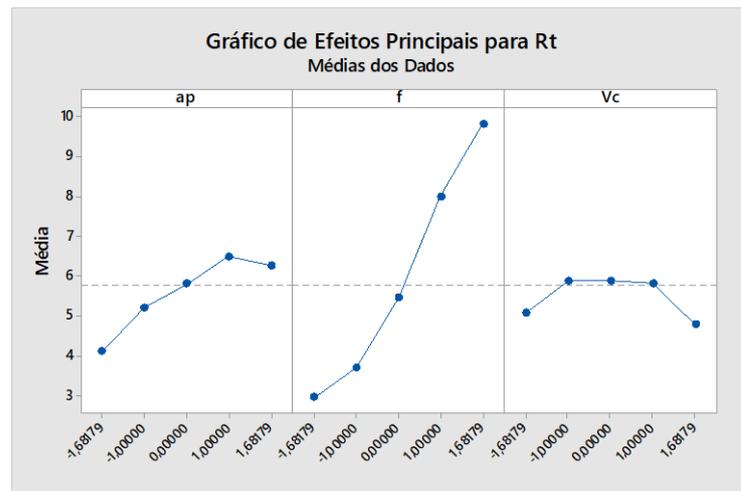
Tabela 4.5 - Coeficientes codificados para R_t

Termo	Efeito	Coef	SE Coef	T	P
Constante		5.487	0.217	25.32	0.000
<i>a_p</i>	1.278	0.639	0.178	3.59	0.004
<i>f</i>	4.199	2.100	0.178	11.79	0.000
<i>v_c</i>	-0.110	-0.055	0.178	-0.31	0.764
<i>f.f</i>	0.671	0.335	0.182	1.84	0.093
<i>f.v_c</i>	0.915	0.458	0.233	1.97	0.075

$S = 0,658378$ $R^2 = 93,53\%$ $R^2(adj) = 90,59\%$ $R^2(Pre) = 86,33\%$

Observando os efeitos principais que os fatores de entrada provocaram individualmente na média de R_t , o avanço (f) tem maior influência, seguido pela profundidade de corte (a_p) e finalmente pela velocidade de corte (v_c). Foi possível identificar que menores valores para o avanço e profundidade de corte tendem para a minimização da rugosidade R_t conforme figura 4.5.

Figura 4.5 – Gráfico de efeitos principais para R_t



Nas figuras 4.6 e 4.7, são mostrados os gráficos de contorno e superfície de resposta para a média de R_t . Pode ser observado nestas figuras que a interação entre v_c x f sugere redução dos valores de avanço (f) e aumento dos valores de velocidade de corte (v_c).

Isso significa que o efeito simultâneo desses parâmetros afeta a rugosidade R_t .

Figura 4.6 - Gráfico de contorno para R_t x v_c x f

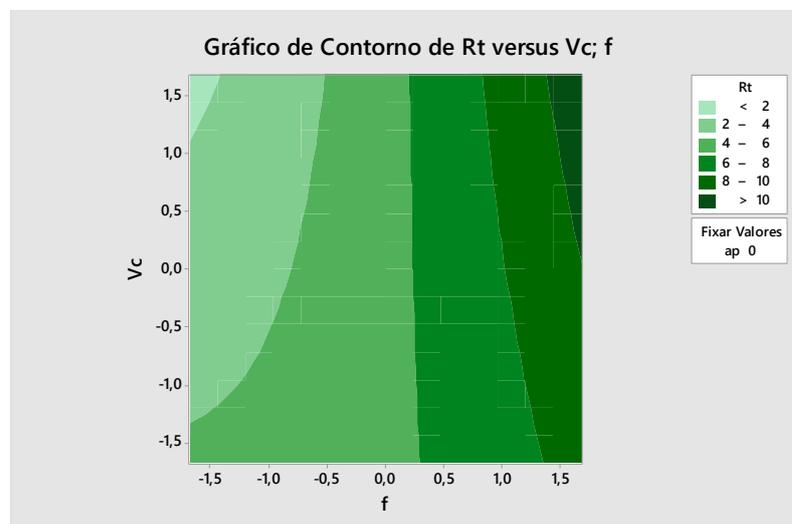
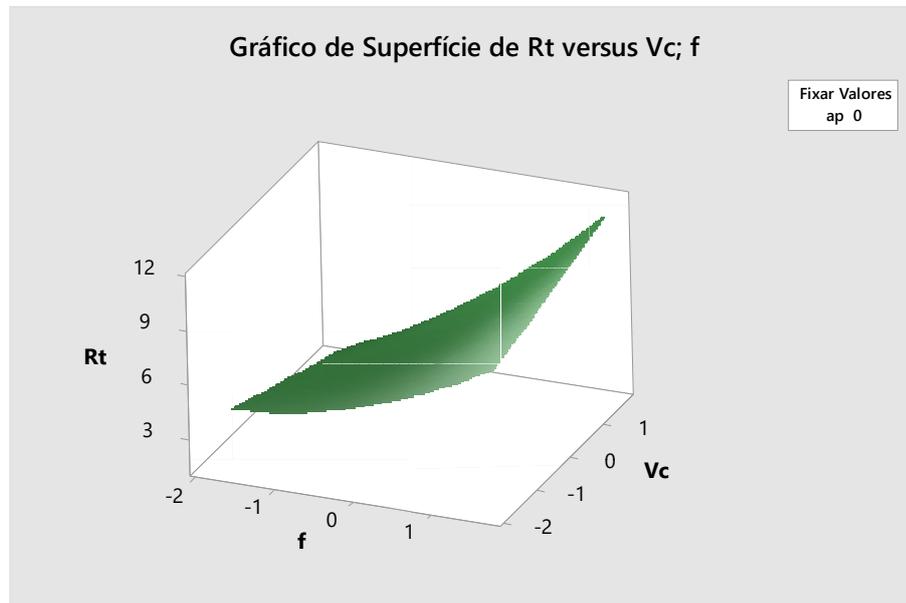
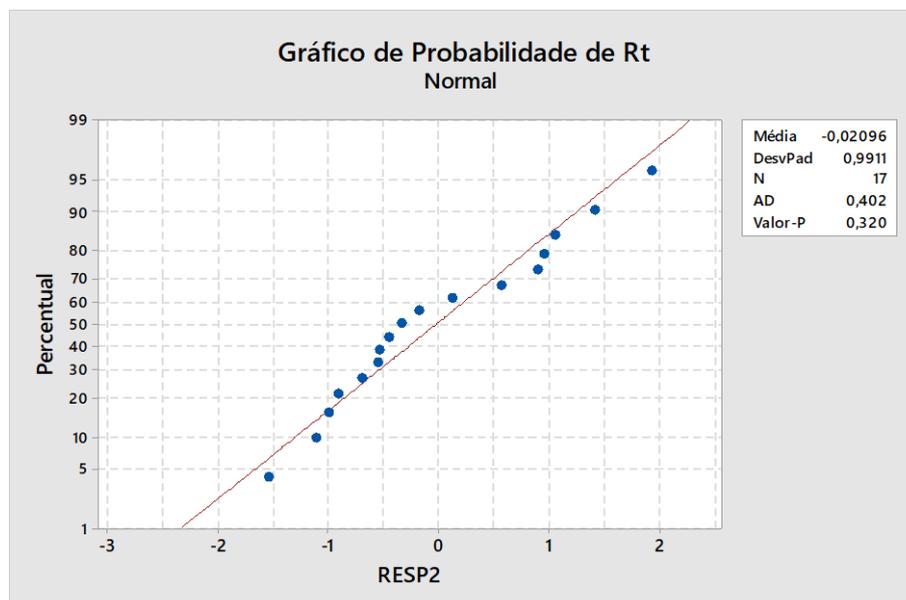


Figura 4.7 - Gráfico de superfície de resposta para R_t x v_c x f 

A normalidade dos resíduos para a rugosidade R_t também foi avaliada pelo teste de Anderson Darling, conforme figura 4.8. Foi observado que valor-P igual a 32,0% indica que os resíduos são normalmente distribuídos, demonstrando o ótimo ajuste do modelo

Figura 4.8 - Teste de normalidade para R_t 

Para a modelagem da variável R_y , foi possível observar que o ajuste alcançado pelo modelo foi satisfatório, pois o valor de $R^2(adj)$ foi igual a 91,92% conforme tabelas 4.6 e 4.7.

Tabela 4.6 - Análise de variância para R_y

<i>Fonte</i>	<i>DF</i>	<i>Seq SS</i>	<i>Adj MS</i>	<i>F</i>	<i>P</i>
Modelo	4	737.492	184.373	46.52	0.000
Linear	3	694.636	231.545	58.43	0.000
<i>a_p</i>	1	27.406	27.406	6.92	0.022
<i>f</i>	1	666.895	666.895	168.28	0.000
<i>v_c</i>	1	0.0335	0.0335	0.08	0.776
Interação com dois fatores	1	42.856	42.856	10.81	0.006
<i>f.v_c</i>	1	42.856	42.856	10.81	0.006
Erro	12	47.557	0.3963		
Falta de ajuste	10	36.768	0.3677	0.68	0.724
Erro puro	2	10.789	0.5395		
Total	16	785.049			

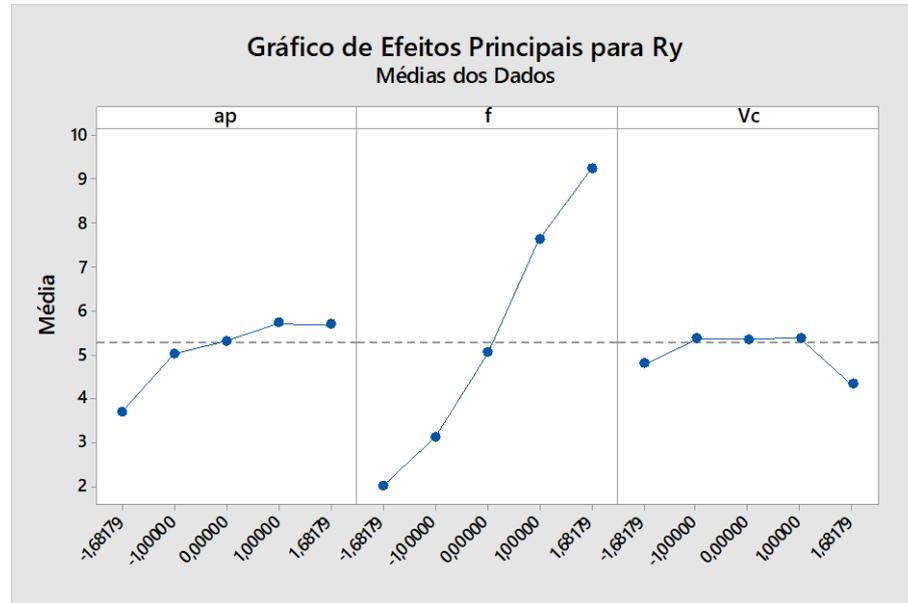
Para os coeficientes foi possível observar que os termos com valor-P em negrito são significantes para a variável R_t .

Tabela 4.7 - Coeficientes codificados para a variável R_y

Termo	Efeito	Coef	SE Coef	T	P
Constante		5.274	0.153	34.54	0.000
<i>a_p</i>	0.896	0.448	0.170	2.63	0.022
<i>f</i>	4.420	2.210	0.170	12.97	0.000
<i>v_c</i>	-0.099	-0.049	0.170	-0.29	0.776
<i>f.v_c</i>	1.464	0.732	0.223	3.29	0.006
S = 0,629531 R ² = 93,94% R ² (adj) R ² (Pre) = 88,55%					

Analisando os efeitos principais que os fatores de entrada provocaram individualmente para a média de R_y , foi possível observar que o fator com maior influência foi o avanço (f) e menores valores para esta variável resultam em menores valores de rugosidade R_y . A profundidade de corte (a_p) exerce menor influência, e menores valores para a_p resultam no alcance de menores valores para rugosidade R_y conforme figura 4.9.

Figura 4.9 - Gráfico de efeitos principais



Os gráficos de contorno e de superfície de resposta para R_y em função da velocidade de corte (v_c) e o avanço (f) indicam que para redução da rugosidade R_y , menores valores de avanço (f) e maiores valores de velocidade de corte (v_c) resultam na minimização da rugosidade conforme figuras 4.10 e 4.11.

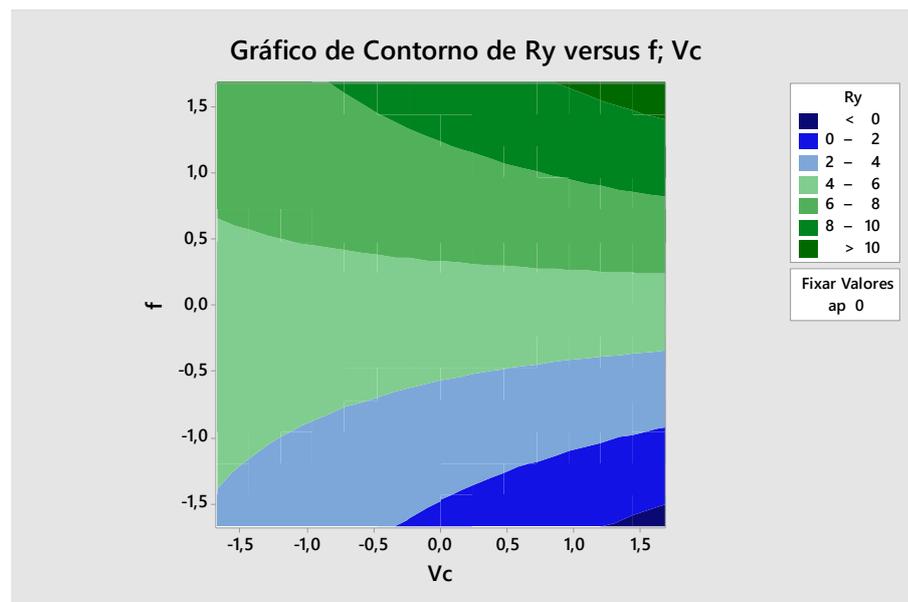
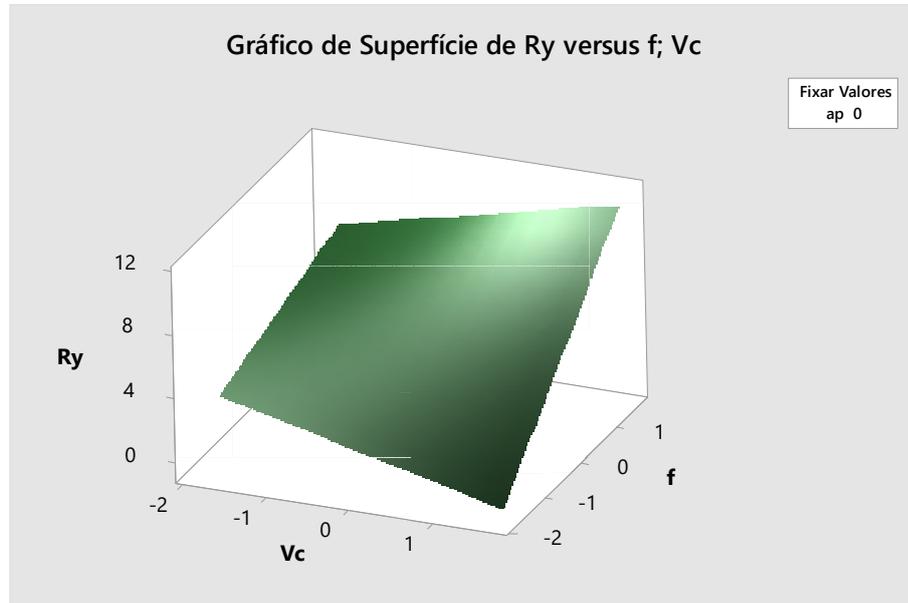
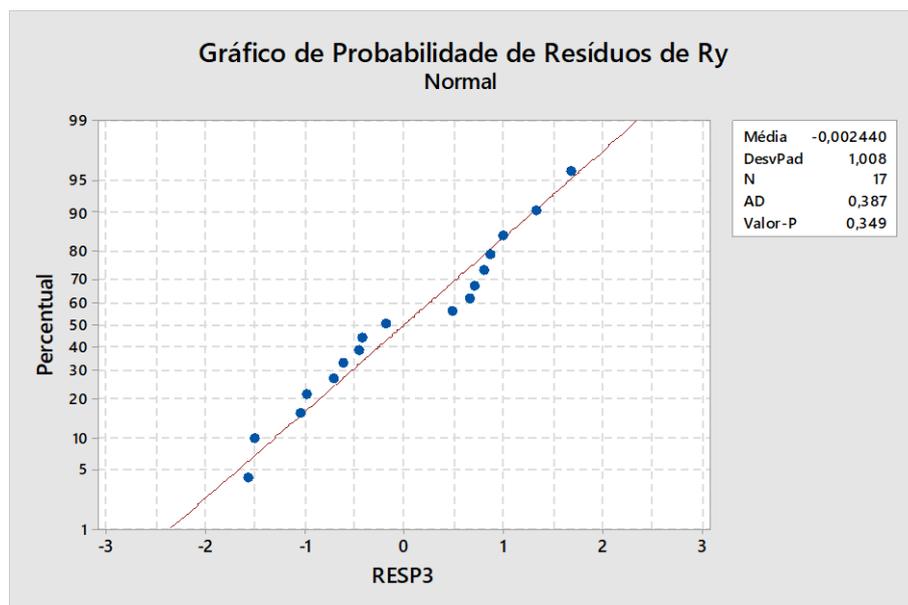
Figura 4.10 - Gráfico de contorno para R_y x f x v_c 

Figura 4.11 – Gráfico de superfície de resposta R_y x f x v_c 

A normalidade dos resíduos de R_y foi realizado utilizando o teste de Anderson Darling, conforme figura 4.12. Foi possível observar que a distribuição dos resíduos é normal, pois, valor-P igual a 34,9%, portanto, maior que o nível de significância de 5%, o que permite dizer que os resíduos são normalmente distribuídos. Isto mostra que o modelo está bem ajustado, explicando a variabilidade dos parâmetros de usinagem no torneamento do aço inoxidável super duplex UNS S32750.

Figura 4.12 – Teste de normalidade para R_y 

4.2 Otimização

Após a definição dos modelos matemáticos que representam as variáveis de resposta do processo de torneamento do aço inoxidável super duplex UNS S32750, iniciou-se a etapa de otimização. Esta etapa tem como objetivo determinar quais são os valores que as variáveis de controle devem assumir para minimizar os valores de rugosidade com um valor mínimo de MRR.

Qualidade e produtividade são características desejadas em todo processo de manufatura. Neste trabalho foram consideradas três variáveis de resposta que representam estas características do processo torneamento aço inoxidável super duplex UNS S32750, R_a , R_y e R_t . Obter baixa rugosidade e alta taxa de remoção de material em um processo de usinagem seria o ideal, principalmente durante o torneamento aço inoxidável super duplex UNS S32750, que apresenta difícil usinabilidade. Sabe-se que estas características são conflitantes e o ideal é encontrar uma solução de compromisso para esta relação.

Foi aplicado o método *desirability* pela sua facilidade de replicação no meio industrial. Os cálculos foram realizados com software MINITAB®18 e o GRG disponível no suplemento solver Microsoft Excel®. O algoritmo de otimização mais indicado para problema com múltiplas variáveis de resposta não-lineares, a decisão pela utilização do GRG neste trabalho está relacionada com a sua acessibilidade.

4.2.1. Análise de Correlação

A estrutura de correlação entre as variáveis de resposta obteve um aspecto muito importante para o desenvolvimento deste trabalho e não pode ser negligenciada. Com a utilização do software Minitab® 18 foi possível observar que existe forte correlação positiva entre as variáveis de resposta que compõem o conjunto de dados. Todos os valores estão próximos de um (1) e apresentam $P\text{-value} \leq 0,05$. Box *et al.* (1973) observam que quando ocorrem estes tipos de dependências, a análise multivariada pode ser uma escolha viável. Os dados superiores (a) representam o coeficiente de Pearson e os inferiores (b), valor-P conforme tabela 4.8.

Os resultados da análise de correlação indicam que o primeiro componente principal (CP_1), por si só, representa 96,9% da variabilidade acumulada, explicação suficiente da variância-covariância, constituindo-se em excelente opção de representação da função multiobjetiva. Os autovetores indicam uma forte correlação positiva entre CP_1 e R_a , R_y e R_t .

Tabela 4.8 - Análise de correlação entre R_a , R_y e R_t

	R_a	R_t
R_t	0.932 ^a 0.000 ^b	
R_y	0.941 0.000	0.987 0.000

Assim, a ACP foi realizada, a partir das três respostas de interesse conforme tabela 4.9.

Tabela 4.9 - Análise de Componentes Principais (ACP)

Variáveis	CP ₁	CP ₂	CP ₃
Autovalores	2.9068	0.0804	0.0128
Proporção	0.969	0.027	0.004
Acumulado	0.969	0.996	1.000
	Autovetores		
R_a	0.570	-0.819	-0.062
R_y	0.580	0.455	-0.676
R_t	0.582	0.349	0.735

Segundo Rencher (2002) CP₁ representa a combinação linear com a máxima variância.

Os dados padronizados foram calculados para cada resposta de interesse conforme tabela 4.10.

Tabela 4.10 - Dados padronizados das variáveis R_a , R_t e R_y

$Z(R_a)$	$Z(R_t)$	$Z(R_y)$
0,266262	0,15257	0,182033
-0,40511	-0,67302	-0,62893
0,238167	0,359083	0,394065
-1,04093	-0,63963	-0,99505
1,529307	1,331247	1,066578
-0,61437	-0,76587	-0,70823
0,757604	1,452361	1,407725
1,316028	1,031105	1,394633
-0,14367	-0,25735	-0,19704
-0,51863	-0,44911	-0,42261
-0,12303	-0,31232	-0,21735
-1,3964	-1,30389	-1,46863
2,18921	1,893802	1,793115
-0,20731	0,239988	0,187751
-1,39697	-1,71956	-1,59368
-0,70439	-0,77394	-0,65812
0,254222	0,434545	0,463739

Os escores dos componentes principais CP₁, CP₂ e CP₃ foram calculados a partir do produto dos autovetores e dados padronizados, devido a quantidade de saídas selecionadas para desenvolvimento do trabalho (R_a , R_y e R_i) conforme tabela 4.11.

Tabela 4.11 - Escores dos três componentes principais

a_p	f	v_c	CP ₁	CP ₂	CP ₃
-1	-1	-1	-0,626212	-0,712536	-0,021521
1	-1	-1	-1,257543	0,0292119	0,0858562
-1	1	-1	0,5511894	0,1378308	0,0344935
1	1	-1	2,2454299	-0,245966	-0,208892
-1	-1	1	-2,746624	-0,15882	0,0806653
1	-1	1	-1,568337	0,2493142	-0,231385
-1	1	1	2,1400481	-0,092704	0,2482095
1	1	1	2,0721747	0,5627083	0,0081171
-1,681793	0	0	-1,230462	-0,05861	0,0379641
1,6817928	0	0	0,1070385	0,377731	-0,008785
0	-1,681793	0	-2,432522	0,0736463	-0,108321
0	1,6817928	0	3,3720938	-0,278494	-0,096427
0	0	-1,681793	-0,400591	-0,084528	0,0614753
0	0	1,6817928	-0,825831	0,1066782	0,0278133
0	0	0	0,3242011	-0,053356	0,0164883
0	0	0	-0,368719	-0,035438	0,0405544
0	0	0	0,6446655	0,1833319	0,0336946

Devido a explicação que o primeiro componente principal detém acerca dos modelos, este será o único CP a ser modelado.

O modelo desenvolvido para o primeiro componente principal CP₁ foi satisfatório, uma vez que o valor de ajuste é igual a 89,20%, isto significa que a proporção da variabilidade de CP₁ é bem explicada pelas variáveis de controle utilizadas no processo de torneamento do aço inoxidável super duplex UNS S32750. O valor para a falta de ajuste foi igual 53,20 demonstrando sua adequação conforme tabelas 4.12 e 4.13. Os termos em negrito apresentam-se como significantes para o modelo.

Tabela 4.12 - Análise de variância para CP₁

<i>Fonte</i>	<i>DF</i>	<i>Seq SS</i>	<i>Adj MS</i>	<i>F</i>	<i>P</i>
Modelo	5	430.575	86.115	27.44	0.000
Linear	3	402.848	134.283	42.79	0.000
<i>a_p</i>	1	14.323	14.323	4.56	0.056

Continuação tabela 4.12 - Análise de variância para CP₁

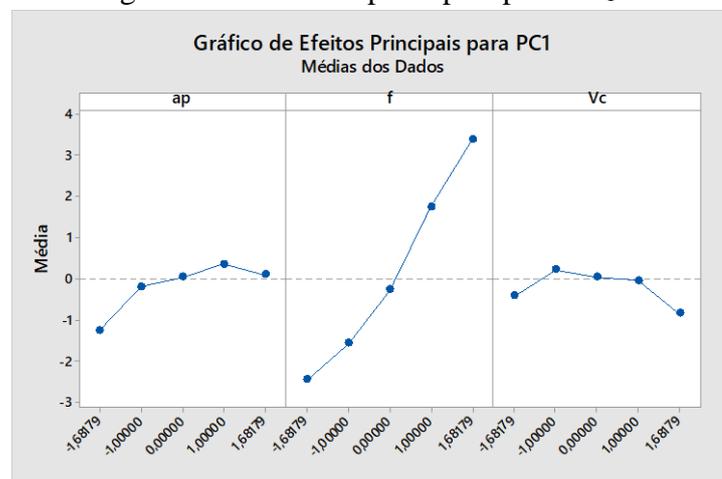
<i>Fonte</i>	<i>DF</i>	<i>Seq SS</i>	<i>Adj MS</i>	<i>F</i>	<i>P</i>
<i>F</i>	1	386.332	386.332	123.11	0.000
<i>v_c</i>	1	0.2193	0.2193	0.70	0.421
Quadrado	1	0.9229	0.9229	2.94	0.114
<i>f²</i>	1	0.9229	0.9229	2.94	0.114
Interação com 2 fatores	1	18.497	18.497	5.89	0.034
<i>f.v_c</i>	1	18.497	18.497	5.89	0.034
Erro	11	34.520	0.3138		
Falta de ajuste	9	29.154	0.3239	1.21	0.532
Erro puro	2	0.5366	0.2683		
Total	16	465.095			

Tabela 4.13. Coeficientes codificados

Termo	Efeito	Coef	SE Coef	T	P
Constante		-0.214	0.184	-1.16	0.271
<i>a_p</i>	0.648	0.324	0.152	2.14	0.056
<i>f</i>	3.364	1.682	0.152	11.10	0.000
<i>v_c</i>	-0.253	-0.127	0.152	-0.84	0.421
<i>f²</i>	0.532	0.266	0.155	1.71	0.114
<i>f.v_c</i>	0.962	0.481	0.198	2.43	0.034

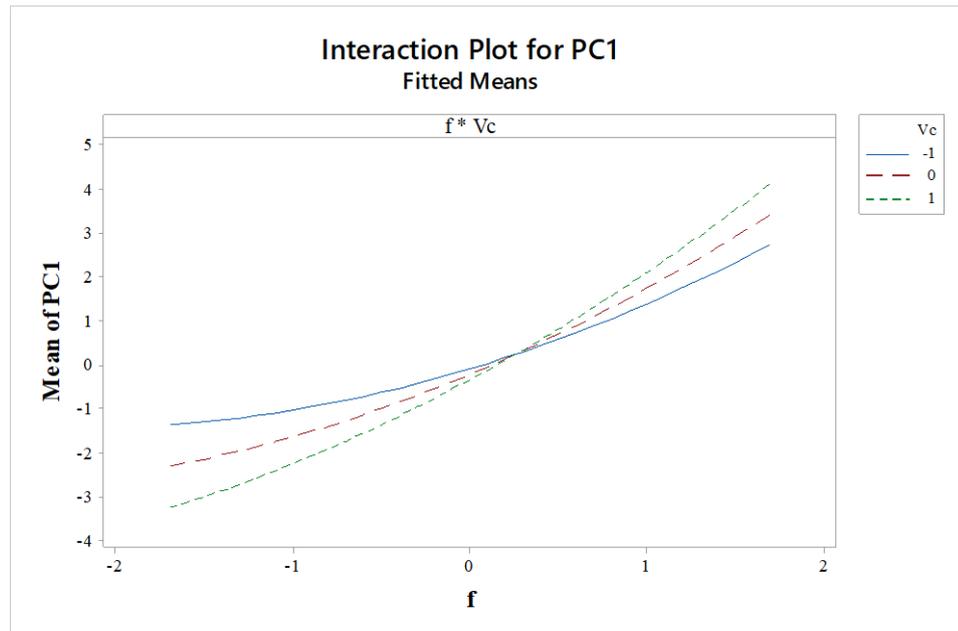
S = 0,560192 R² = 92,58% R²(*adj*) = 89,20% R²(Pre) = 83,27%

Analisando-se os efeitos principais sobre CP₁, foi possível observar que para minimizar esta variável resposta, a profundidade de corte (*a_p*) deverá ser configurada em seu nível -1,68, o avanço (*f*) no nível -1,68 e a velocidade de corte (*v_c*) no nível 1,68 conforme figura 4.13.

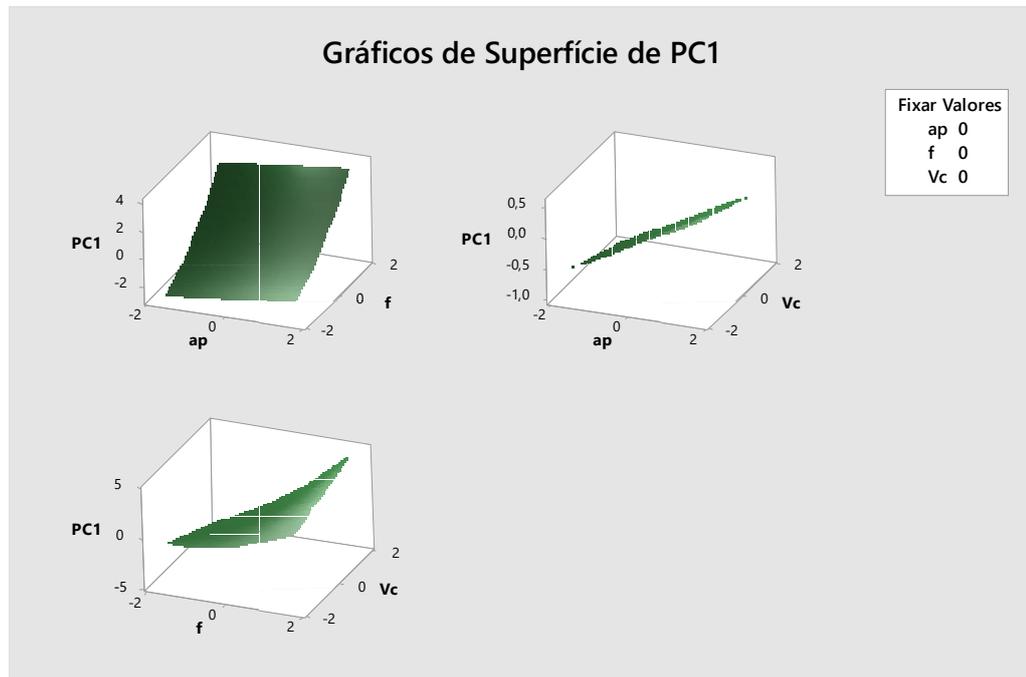
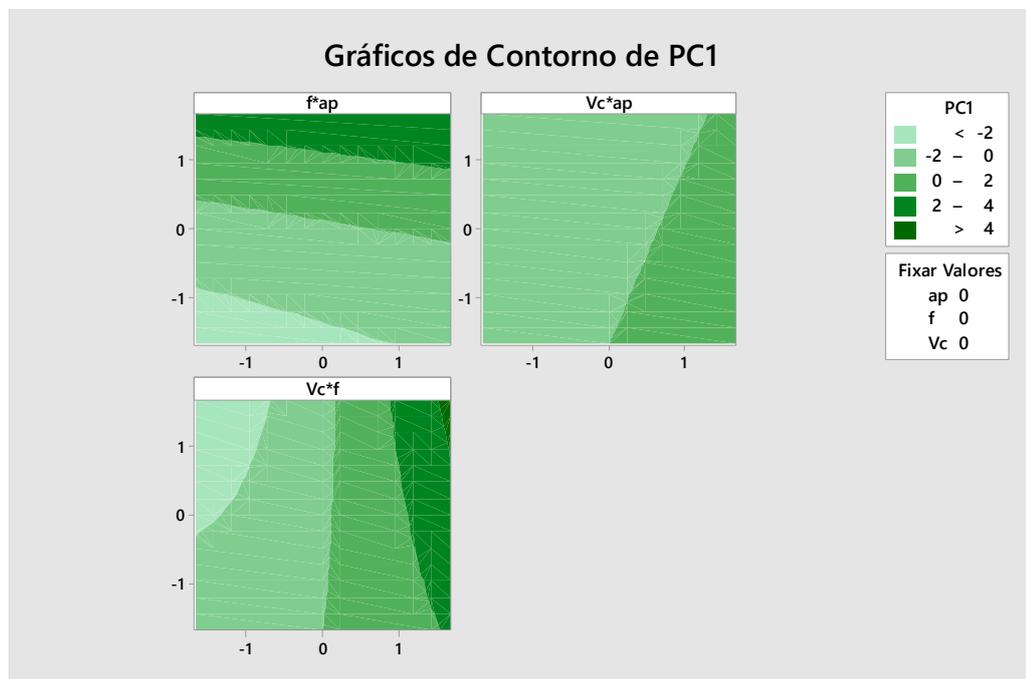
Figura 4.13 - Efeitos principais para CP₁

Analisando-se a figura 4.14, observou-se que os fatores controláveis, avanço (f) e velocidade de corte (v_c) possuem interação entre si, ou seja, a alteração mutua dessas variáveis provoca mudanças consideráveis na média de CP_1 . Isto porque estas variáveis afetam os modelos que são representados pelo primeiro componente principal.

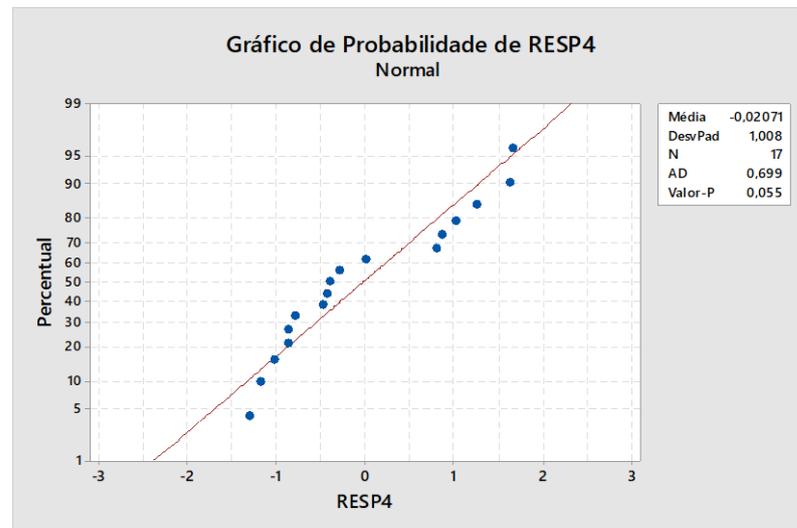
Figura 4.14 - Gráfico de interação entre f x v_c para CP_1



Minimizar CP_1 significa aumentar a qualidade do produto usinado, e as variáveis que possuem interação são velocidade de corte (v_c) e avanço (f). Foi observado no gráfico de superfície de resposta com variáveis codificadas que a minimização da profundidade de corte (a_p) e avanço (f) resultam em menores valores para CP_1 . Também foi observado que minimizando-se o avanço (f) e aumentando os valores de velocidade de corte (v_c) resultam em menores valores para CP_1 conforme figuras 4.15 e 4.16.

Figura 4.15 - Gráficos de superfície de resposta para CP₁Figura 4.16 - Gráficos de contorno para CP₁

Para verificar a distribuição dos resíduos, realizou-se o teste de normalidade, conforme figura 4.17. O *P-value* foi 5,5%, portanto, maior que o nível de significância de 5%, o que permite afirmar que os resíduos são normalmente distribuídos. Isto demonstra que o modelo está bem ajustado, explicando a variabilidade dos parâmetros de corte para a CP₁.

Figura 4.17 - Teste de normalidade para os resíduos de CP₁

4.2.2 Otimização utilizando método *Desirability*

O método *desirability* está baseado no cálculo do índice global D. O objetivo da otimização deste grupo é minimizar todas as variáveis de resposta, os cálculos de d_i e D foram realizados conforme equação 4.2. Foi adotado o mesmo peso e grau de importância (R e $w = 1$) para todas as variáveis de resposta decodificas, conforme tabela 4.15. O alvo foi determinado como o menor valor dos dados de CP₁ e o limite superior o maior valor.

$$D = [d_1(Y_1)]^1 \quad (4.2)$$

Tabela 4.14 – Critérios para otimização de CP₁

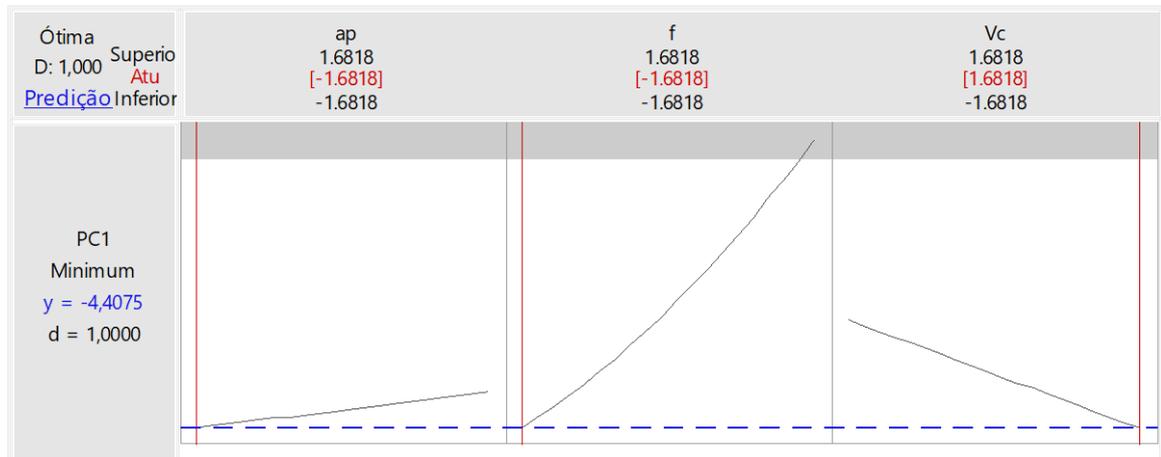
Resposta	Objetivo	Limite inferior	Alvo	Limite Superior	Peso	Importância
PC ₁	Minimizar		-2,74662	3,327209	1	1

A otimização de CP₁ foi realizada utilizando o método *desirability* e estruturada conforme sistema de equações 4.3.

$$\begin{aligned} &\text{Maximizar } D && (4.3) \\ &\text{Sujeito a: } T_i \leq \hat{Y}_i \leq H_i \\ & && x^T x \leq 2,82 \quad \text{sendo } i = \{1\} \end{aligned}$$

Foi aplicado o método desirability em CP_1 e o valor de conveniencia atingiu o maior valor possível, 1, desejavel. Para esta solução $CP_1 = -4,407$ e os parâmetros controláveis codificados assumiram os seguintes valores: profundidade de corte (a_p) igual -1,68, avanço (f) igual a -1,68 e velocidade de corte (v_c) igual a 1,68, conforme figura 4.18.

Figura 4.18 – Gráfico de otimização para CP_1



A variável resposta CP_1 , representa o grupo de variáveis de saída e para determinar a solução ótima para cada modelo, os valores encontrados para as variáveis de controle serão substituídos nos modelos de R_a , R_y e R_t .

Após aplicação do método desirability foi estabelecido por meio de PC_1 a configuração ótima dos parametros de entrada codificados, e para profundidade de corte (a_p) igual a 0,16 [mm], avanço (f) igual a 0,07 [mm/rot] e velocidade de corte (v_c) igual a 183,81 [m/min]

As variáveis de saída R_a , R_y e R_t foram calculadas pela substituição dos valores ótimos encontrados para as variáveis de controle nos respectivos modelos estabelecidos na etapa de modelagem, conforme equações 4.4, 4.5 e 4.6. Para esta configuração dos parâmetros de entrada MRR possui valor igual a 2,09 cm^3/min .

$$R_a = 1.0502 + 0.5427 f - 0.1004 v_c + 0.1191 f^2 + 0.1676 f.v_c \quad (4.4)$$

$$R_y = 5.274 + 0.448 a_p + 2.210 f - 0.049 v_c + 0.732 f.v_c \quad (4.5)$$

$$R_t = 5.487 + 0.639 a_p + 2.100 f - 0.055 v_c + 0.335 f^2 + 0.458 f.v_c \quad (4.6)$$

Os valores alcançados para as variáveis resposta para a otimização pelo método *desirability* constituem-se como não ótimas, pois, os valores encontrados para R_a e R_y são negativos e R_t possui valor que não representa a rugosidade total.

Foi observado que CP_1 representa todas as variáveis de resposta, exceto MRR, e a otimização de CP_1 implica na otimização de todas as variáveis por ele representado, neste contexto foi realizada a otimização individual de CP_1 .

4.3 Otimização

A otimização individual de CP_1 representou a melhor solução para os modelos por ele representados.

Os modelos de superfície de resposta consolidados durante a etapa de modelagem foram inseridos no Microsoft office Excel®. Para a convergência da condição ótima, foram utilizadas as variáveis de entrada a_p , f e v_c , como elementos decisores para que as funções objetivo alcançassem a melhor configuração de trabalho. A restrição utilizada foi com base no universo de análise de um CCD, toda a região experimental com valor $\rho^2 = 2,82$ conforme figura 4.19.

As células G5, G6 e G7 são as células utilizadas como decisão realizada pelo GRG, as restrições do modelo foram direcionadas para as células G17 e I17. As células C3 a F13 apresentam-se os coeficientes dos modelos matemáticos desenvolvidos. As células H5, H6 e H7 são as variáveis de controle decodificadas. As células C15, D15, E15 e F15 são os valores ótimos alcançados pelas funções objetivo.

A otimização individual de CP_1 alcançou valor igual a -2,851 e os demais modelos alcançaram valores para otimização das funções objetivo iguais a $R_a = 0,235 \mu\text{m}$, $R_t = 2,379 \mu\text{m}$ e $R_y = 1,084 \mu\text{m}$.

Para o alcance dos valores ótimos calculados, as variáveis de controle devem assumir a seguinte configuração: profundidade de corte (a_p) = 0,63 mm, avanço (f) = 0,08 mm/rot e velocidade de corte (v_c) = 178,5 m/min. Estes parâmetros serão utilizados na etapa de validação dos experimentos.

Figura 4.19 - Aplicação do método de superfície de resposta multivariada utilizando Microsoft office Excel®

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1											
2											
3											
4	cte	b0	1,050	5,487	5,274	-0,21381	1,000		-1	1	
5	ap	b1	-	0,639	0,448	0,323846	- 0,341	0,63	0,4	1,1	
6	f	b2	0,543	2,100	2,210	1,681919	- 1,411	0,08	0,1	0,2	
7	Vc	b3	- 0,100	- 0,055	- 0,049	-0,12673	0,849	178,5	160	180	
8	ap^2	b11	-	-	-	-	0,116				
9	f^2	b22	0,119	0,335	-	0,266151	1,991				
10	Vc^2	b33	-	-	-	-	0,721				
11	ap * f	b12	-	-	-	-	0,482				
12	ap * Vc	b13	-	-	-	-	- 0,290				
13	f * Vc	b23	0,168	0,458	0,732	0,480851	- 1,198				
14											
15		FO	0,235	2,379	1,084	- 2,851					
16											
17								Restrições	2,828428	<=	2,828427

4.4 Validação dos experimentos

Na etapa de validação dos resultados, foram realizados 3 experimentos e as variáveis R_a , R_y e R_t medidas após cada passe. Os experimentos de confirmação mostraram que os resultados ótimos reais se aproximam dos resultados otimizados, e a maior diferença encontrada foi de 14,47%, verificada para a rugosidade R_a , 14,08% para R_t e 17,34% para R_y . A taxa de remoção de material calculada igual a 8,99 cm³/min. Portanto, os valores reais se mostraram concordantes com os valores ótimos calculados, neste contexto, ficam validados os resultados obtidos para a otimização do processo de torneamento do aço inoxidável super duplex UNS S32750. Estende-se esta validação para os modelos matemáticos desenvolvidos, considerando-se que os mesmos apresentam baixos erros quanto à precisão dos parâmetros de rugosidade utilizados como resposta conforme tabelas 4.16 e 4.17.

Tabela 4.15 - Experimentos de confirmação

Pontos de medição	R_{a1}	R_{a2}	R_{a3}	R_{y1}	R_{y2}	R_{y3}	R_{t1}	R_{t2}	R_{t3}
1	0,267	0,273	0,265	1,352	1,272	1,188	2,464	2,884	2,602
2	0,268	0,289	0,255	1,315	1,248	1,272	2,841	2,719	2,675
3	0,262	0,282	0,264	1,336	1,255	1,210	2,807	2,730	2,707
μ		0,269			1,272			2,714	

Os dados otimizados aproximam-se dos valores medidos o que valida método de análise e otimização utilizado neste trabalho conforme tabela 4.17.

Tabela 4.16 - Dados do experimento de confirmação

	R_a	R_y	R_t
	μm	μm	μm
Média	0,269	1,272	2,714
Otimizado	0,235	1,084	2,379
Desvio (%)	14,46	17,34	14,08

Foi possível observar que a média dos dados medidos ao longo da validação dos resultados encontra-se dentro do intervalo de confiança conforme tabela 4.18.

Tabela 4.17 - Intervalo de confiança para as variáveis de resposta

Variável	Limite inferior	Média	Limite superior
R_a	-0,179	0,235	0,650
R_y	0,168	1,084	1,99
R_t	1,301	2,379	3,457

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES

Baseado nos resultados obtidos neste trabalho, algumas conclusões podem ser obtidas para o torneamento do aço inoxidável super duplex UNS S32750 utilizando inserto de metal duro revestido pela técnica CVD com TiCN+Al₂O₃+TiN.

A metodologia de superfície de resposta foi eficaz na modelagem das funções objetivo.

Os modelos matemáticos desenvolvidos para as respostas de interesse são de elevada confiabilidade apresentando ajustes superiores 80% para R_a , R_y , R_t e CP_1 , isto significa que a proporção da variabilidade das rugosidades e componente principal são explicadas pelas variáveis de controle utilizadas no processo de torneamento do inoxidável super duplex UNS S32750.

Os resíduos de R_a , R_y , R_t e CP_1 apresentaram distribuição normal, apontando a adequação dos modelos

Em todos os modelos matemáticos observou-se que o avanço (f) foi o fator que exerceu maior influência, seguido pela velocidade de corte (v_c) e finalmente pela profundidade de corte (a_p).

R_a , R_y , R_t possuem uma forte correlação positiva e o método ACP foi eficaz para reduzir a dimensionalidade do problema onde os modelos são do tipo não lineares no processo de torneamento do aço inoxidável super duplex UNS S32750.

A otimização de CP_1 alcançou resultados ótimos para o torneamento do aço inoxidável super duplex UNS S32750, assim os parâmetros controláveis assumiram a seguinte configuração: profundidade de corte (a_p) = 0,63 mm, avanço (f) = 0,08 mm/rot e velocidade de corte (v_c) = 178,5 m/min, com valores de rugosidade iguais a : $R_a = 0,235 \mu\text{m}$, $R_y = 1,084 \mu\text{m}$, $R_t = 2,379 \mu\text{m}$ e MRR = 8,99cm³/min.

Os experimentos de confirmação mostraram que a maior diferença entre as respostas reais e as respostas teóricas calculadas resultaram em: $R_a = 14,47\%$, $R_y = 17,34\%$ para e $R_t = 14,08\%$. Obteve-se a validação dos modelos desenvolvidos para as respostas, portanto, tais resultados fazem desses modelos expressões úteis para um adequado controle do processo, na medida em que apresentam baixos erros quanto à previsão das respostas.

Os resultados alcançados pela otimização CP₁ apontaram uma configuração dos parâmetros que possivelmente poderá ser replicada com valores próximos no meio industrial com MRR menor para melhoria da qualidade e valores próximos para as rugosidades analisadas para torneamento do aço do aço inoxidável super duplex UNS S32750.

Em relação ao processo de torneamento do aço inoxidável super duplex UNS S32750 pode-se afirmar que:

- As velocidades de corte (v_c) obtidas próximas do nível alto do DOE (+1,68) permitem uma redução da força de corte, portanto traz menor tendência de vibração ao sistema máquina-ferramenta-peça com consequente redução da rugosidade.
- O avanço ($f = 0,08$ mm/rot) minimiza as rugosidades R_a , R_y e R_t devido ao efeito geométrico da aresta de corte da ferramenta sobre o alisamento dos picos de irregularidades da superfície da peça.
- A profundidade de corte (a_p) obtida com valor igual a 0,63 mm, permite que o inserto trabalhe com o raio da ferramenta, propiciando maior qualidade durante o torneamento do aço inoxidável super duplex UNS S32750

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

A pesquisa teve o foco estabelecido apenas para a melhoria dos parâmetros de usinagem para o processo de torneamento do aço inoxidável super duplex UNS S32750 utilizando a metodologia de superfície de resposta. Pesquisas futuras podem abordar outros processos de usinagem como fresamento, eletroerosão, retificação e furação, utilizando o aço inoxidável super duplex UNS S32750.

Além dos processos, materiais utilizados, ferramentas e equipamentos também caracterizariam um novo âmbito de pesquisa;

6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGOSTINHO, O. L., RODRIGUES. A. C. S., LIRANI, J. (2004). Tolerâncias, Ajustes, Desvios e Análise de Dimensões. Editora Edgard Blucher. S Paulo.

Ahiale G.K., D.H. Kim, W.J. Yang, et al., Change of precipitation behavior and impact toughness with depths in quenched thick SAF 2507 super duplex stainless steel, *Met. Mater. Int.* 24 (2018) 738–745.

Ahmed S., Y.; Paiva, J.M.; Covelli, D.; Veldhuis, S.C. Investigation of Coated Cutting Tool Performance during Machining of Super Duplex Stainless Steels through 3D Wear Evaluations. *Coatings* 2017, 7, 127.

Airao, J., Chaudhary, B., Bajpai, V., & Khanna, N. (2018). An Experimental Study of Surface Roughness Variation in End Milling of Super Duplex 2507 Stainless Steel. *Materials Today: Proceedings*, 5(2), 3682–3689. doi:10.1016/j.matpr.2017.11.619

ALMEIDA, A. T.; COSTA, A. P. C. S. Sistemas de Informação e Gestão do Conhecimento. In: BATALHA, M. O. (Org.). *Introdução à Engenharia de Produção*. 1 ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2008. p. 227-228.

ALMEIDA, C. M. D. Avaliação do desgaste da ferramenta de metal duro revestida com TiN no fresamento do aço ABNT4140 laminado a quente e temperado/revenido. Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Belo Horizonte, 2010.

Amorim, H. J. D. 2002. “Estudo da relação entre velocidade de corte, desgaste de ferramenta, rugosidade e forças de usinagem em torneamento com ferramenta de metal duro.” PhD diss., Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

ANDERSON-COOK, C. M.; BORROR, C. M.; MONTGOMERY, D. C. Response surface design evaluation and comparison. *Journal of Statistical Planning and Inference*, v. 139, n. 2, p. 629-641, 2009.

Angiuli, R., Giannuzzi, M., & Papadia, G. (2019). Experimental thermographic investigation for dry finish turning of SAF 2507 steel. PROCEEDINGS OF THE 22ND INTERNATIONAL ESAFORM CONFERENCE ON MATERIAL FORMING: ESAFORM 2019. doi:10.1063/1.5112612

Arbizu, P.I. e Pérez, C.J.L., 2003. "Surface Roughness Prediction by Factorial Design of Experiments in Turning Processes.". *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 143-144 (1), p. 390–396.

Arisoy, F. C.; Başman, G.; Şeşen, M. K.; 2003. Failure of a 17-4 PH stainless steel sailboat propeller shaft. *Engineering Failure Analysis*, v. 10, p. 711-717.

ASM Handbook, 1997. Machining. Vol. 16, p. 681-707.

Benardos, P.G. e Vosniakos, G.C., 2003. "Predicting Surface Roughness in Machining: A Review." *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 43 (8), p. 833-844.

BEZERRA, D. C. Avaliação da Usinabilidade em torneamento de aço ABNT 1045, para diferentes velocidades de corte e ferramentas. Campinas: [s.n.], 2008.

BRATCHELL, N. *Multivariate Response Surface Modelling by Principal Components Analysis*. *Journal of Chemometrics*, v 3, pp. 579-588, 1989.

BORDINASSI, E. C. Contribuição ao estudo da integridade superficial de um aço inoxidável superduplex após torneamento, São Paulo, 2006. 201.

BOX, G. E. P.; DRAPER, N. R., Response surfaces, mixtures, and ridge analyses. 2 ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2007.

Box, G. E. P., and K. B. Wilson. 1951. "On the Experimental Attainment of Optimum Conditions." *Journal of the Royal Statistical Society* 13 (1): 1-45. <http://www.jstor.org/stable/2983966>.

BOX, G. E. P., HUNTER, W. G., MacGREGOR, J. F., ERJAVEC, J. *Some Problems Associated with the Analysis of Multiresponse Data*. *Technometrics*, v 15, n 1, pp.33-51, 1973.

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. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 84, n. 5, p. 1185-1199, 2015.

CARBÓ, H. M. (2001) – Aço inoxidável: Aplicações e Especificações - São Paulo-SP. Núcleo de Desenvolvimento Técnico Mercadológico do Aço Inoxidável, 50 p.

Carter, M. A., Telecurso 2000 – Metrologia – Profissionalizante – Aula 19, Disponível em: <www.grima.ufsc.br/capp/rugosidade/aula_19_ParametrosDeRugosidade.pdf> acesso em: 19/01/2021.

CHIAO, C. H., HAMADA, M. Analyzing experiments with correlated multiple responses. *Journal of Quality Technology*, v. 33, n. 4, pp. 451-465, 2001.

CHO, B. R., PARK, C. Robust design modeling and optimization with unbalanced data. *Computers & Industrial Engineering*, v. 48, pp. 173-180, 2005.

COSTA E SILVA, L. D.; MEI, P. R. *Aços e Ligas Especiais*. 2ª. ed. São Paulo: Edgard Blucher Ltda, 1988.

COSTA, A. F. D. *Análise Comparativa de Ferramentas Revestidas por PVD e CVD no Torneamento do Aço ABNT 8620*. UNESP, Guaratinguetá - SP, 2016.

Costa, D. M., Brito, T. G., de Paiva, A. P., Leme, R. C., & Balestrassi, P. P. (2016). A normal boundary intersection with multivariate mean square error approach for dry end milling process optimization of the AISI 1045 steel. *Journal of Cleaner Production*, 135, 1658–1672.

Costa, D. M. D., Paula, T. I., Silva, P. A. P., & Paiva, A. P. (2016). Normal boundary intersection method based on principal components and Taguchi's signal-to-noise ratio applied to the multiobjective optimization of 12L14 free machining steel turning process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 87(1-4), 825–834.

Davim, J. P., V. N. Gaitonde, and S. R. Karnik. 2007. "Investigations Into the Effect of Cutting Conditions on Surface Roughness in Turning of Free Machining Steel by ANN Models." *Journal of Materials Processing Technology* 205: 16-23. doi:10.1016/j.jmatprotec.2007.11.082.

DELONG, W.T. Adams Lecture – "Ferrite in Austenitic Stainless Steel Weld Metal". *Welding Journal, Welding Research Supplement*, p. 273-286, 1974.

DERRINGER, G. C. A Balancing Act: Optimizing a Product's Properties. *Quality Progress*, v. 27, n. 6, p. 51–58, 1994.

Derringer, G., R. Suich. 1980. "Simultaneous optimization of several response variables." *Journal of Quality Technology* 12: 214-219.

DINIZ, A. E; MARCONDES, F. C; COPPINI, N. L. *Tecnologia da Usinagem dos Materiais*. 8ª Ed, Artliber, 2013.

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. *Tecnologia da usinagem dos materiais*. 9ª. ed. [S.l.]: Artliber, 2014.

ESPANHOL. V. (2008). *Análises dos Esforços de Corte e acabamento superficial no Torneamento de Aço com ferramenta de superfície lisa e com quebra cavaco*. Porto Alegre, 68 f. Dissertação – Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2008

FAROOQ, M. A. et al. An innovative approach for planning and execution of preexperimental runs for Design of Experiments. *Investigaciones Europeas de Dirección y Economía de la Empresa*, 2015.

GAMARRA, J. R. Estratégias de Usinagem no Torneamento de Aço Inoxidável Super Duplex (UNS S32750). Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2017.

Gamarra, J. R., & Diniz, A. E. (2018). Taper turning of super duplex stainless steel: tool life, tool wear and workpiece surface roughness. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 40(1)

GOMES, J. H. F., CAMPOS, P. H. S., LOPES, L. G. D., COSTA, S. C., PAIVA, A. P. (2012). Otimização Robusta da Diluição e da Largura do Cordão na Soldagem com Arame Tubular para Aplicações de Revestimento do aço carbono ABNT 1020 com aço inoxidável ABNT 316L, Anais do VII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica (CONEM), São Luís (MA), Brasil.

Gouarir, A., Martínez-Arellano, G., Terrazas, G., Benardos, P., e Ratchev, S., 2018. "In-Process Tool Wear Prediction System Based on Machine Learning Techniques and Force Analysis", *Procedia CIRP (Hpc)*, Vol. 77, p. 501-504.

Groover, Mikell P. *Fundamentals of Modern Manufacturing*. 2010. Bethlehem: John Wiley & Sons.

HARRINGTON, E. C. JR., "The Desirability Function," *Industrial Quality Control*, Vol. 21, No. 10, 1965, pp. 494-498.

HARRY, M., SCHROEDER, R. *Six Sigma: the breakthrough management strategy revolutionizing the World's Top Corporations*. 2nd ed., Random House, New York, 2000.

HIOKI, D. (2006). Influência dos parâmetros de corte do fresamento HSM sobre o desempenho tribológico do aço AISI H13 endurecido. São Paulo, SP. Tese de Doutorado. USP, 233 p.

Hong J.F., D. Han, H. Tan, et al., Evaluation of aged duplex stainless steel UNS S32750 susceptibility to intergranular corrosion by optimized double loop electrochemical potentiokinetic reactivation method, *Corros. Sci.* 68 (1) (2013) 249–255.

HOTELLING, H. Analysis of a complex of statistical variables into principal components. *Journal of Educational Psychology*, v. 24, pp. 417-441, 1933.

HUANG, M.S; LIN, T.Y. Simulation of a regression-model and PCA based searching method developed for setting the robust injection molding parameters of multi-quality characteristics. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 51, p. 5828–5837, 2008.

HULL F. C. "Effect of delta ferrite on hot cracking of stainless steel". *Welding Journal, Welding Research Supplement*, p. 399-409, 1967

IMOA. Orientações práticas para processamento dos aços inoxidáveis Duplex. *International Molybdenum Association, Londres, UK*, n. 2ª, 2012. ISSN ISBN 978-1-907470-07-3.

IMOA; *Practical Guidelines for the Fabrication of Duplex Stainless Steels*; p.4-5, 2014.

JACYNA J.; KORDALEWSKA M.; MARKUSZEWSKI M. J. Design of Experiments in metabolomics-related studies: An overview, *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, v. 164, p. 598-606, 2019.

JESUS, R. E. C., 2013. Avaliação dos esforços, temperature e integridade superficial em torneamento do aço inoxidável Super Duplex UNS S32760 quando alterado o ângulo de posição da ferramenta e os parametros de corte. São João Del-Rei, 88 f. Dissertação (Mestrado) – Univerdade Federal de São João Del-Rei, 2013

Jia, S., Tang, R., Lv, J., Zhang, Z., & Yuan, Q. (2015). Energy modeling for variable material removal rate machining process: an end face turning case. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 85(9-12), 2805–2818. doi:10.1007/s00170-015-8133-8

JOHNSON, R. A., WICHERN, D. W. *Applied multivariate statistical analysis*, New Jersey:Prentice-Hall Inc., 5 ed., p. 797, 2002.

Kadam, S., Khake, R., & Mudigonda, S. (2017). Experimental Investigations on Surface Roughness, Cutting Forces and Tool Wear in Turning of Super Duplex Stainless Steel With Coated Carbide Inserts. *Volume 2: Additive Manufacturing; Materials*. doi:10.1115/msec2017-3008

KIM, D., RHEE, S. Optimization of GMA welding process using the dual response approach. *International Journal of Production Research*, v. 41, n. 18, pp. 4505-4515, 2003.

Khare, S.K., Agarwal, S. e Srivastava, S., 2018. "Analysis of Surface Roughness during Turning Operation by Taguchi Method". *Materials Today: Proceedings*, Vol. 5(4), p. 28089-28097.

KHURI, A. I., CONLON, M. Simultaneous optimization of multiple responses represented by polynomial regression functions. *Technometrics*, v 23, n 4, pp. 363-375, 1981.

KO, Y. H., KIM, K. J., JUN, C. H. *A new loss function-based method for multiresponse optimization*, *Journal of Quality Technology*, v 37, n 1, pp. 50-59, 2005.

KOPELIOVICH, D. *Stainless Steels*. *Substances & Technology*, 2012.

LASDON, L. S., WAREN, A. D., JAIN, A., RATNER, M. Design and testing of a Generalized Reduced Gradient code for nonlinear programming. *ACM Transactions on Mathematical Software*, v. 4, p.34 - 50, 1978.

LIN, D. K. J., TU, W. Dual response surface optimization. *Journal of Quality Technology* n. 27, pp. 34-39, 1995.

MACHADO, Á. R. et al. *Teoria da Usinagem dos Materiais*. 1^a. ed. São Paulo: Edgard Blucher Ltda, 2009.

Marques F., W.M.D. Silva, J.M. Pardal, et al., Influence of heat treatments on the microabrasion wear resistance of a superduplex stainless steel, *Wear* 271 (9) (2011) 1288–1294.

MICARONI, R.: Otimização dos parâmetros de usinagem visando a viabilização do torneamento a seco de aço ABNT 1045 em operações de acabamento. Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade de Campinas, 119p., Dissertação (Mestrado). 2001.

MILONE, G. *Estatística geral e aplicada*. São Paulo: Centage Learning, 2009.

Montgomery, Douglas C. 2001. *Design and Analysis of Experiments*. New York: John Wiley & Sons.

MONTGOMERY, D. C. *Design and Analysis of Experiments*. 7th. ed. New York: John Wiley & Sons, 2009.

MONTGOMERY, D. C., RUNGER, G. C. *Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros*. LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2 ed., p. 570, 2003.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. *Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros*. LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 4 ed., p. 266, 2009.

MONTGOMERY, D. C. . *Design and Analysis of Experiments*. Hoboken: John Wiley & Sons., 2013.

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

Mougo L., A., de Oliveira Campos, F., & Araujo, A. C. (2018). Mechanistic study on micromilling of the super duplex stainless steel UNS S32750. *Journal of Manufacturing Processes*, 34, 31–39. doi:10.1016/j.jmapro.2018.05.017

MURPHY, T. E., TSUI, K. L., ALLEN, J. K. A review of robust design methods for multiple responses. *Research in Engineering Design*, v 15, pp. 201-215, 2005.

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 p.

MYERS, R. H.; MONTGOMERY, D. C.; ANDERSON-COOK, C. M. *Response Surface Methodology*. 3º ed. John Wiley & Sons, Inc., 2009.

NEVES, D. et al. Evolution of the machining stainless steel ABNT 304 and stainless steel Villares 304 UF with hss tin coated twisted drills. Proceedings of International Congress of Mechanical Engineering, COBEM, 2003.

NEWBOLD, P. CARLSON, W. L., THORNE, B. Statistics for business and economics, 5th Edition, Prentice Hall, 2002.

NILO JÚNIOR, L. P. Otimização de um processo de solda MIG/MAG para aplicação na indústria automobilística através da utilização da técnica do projeto e análise de experimentos. 2003. 111 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Instituto de Engenharia de Produção e Gestão, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2003.

Nomani, J., Pramanik, A., Hilditch, T. e Littlefair, G., 2017. “Stagnation Zone during the Turning of Duplex SAF 2205 Stainless Steels Alloy”, *Materials and Manufacturing Processes*, Vol. 32 (13), p. 1486-1489.

OLIVEIRA, C. A. Usinagem e resistência à corrosão dos Aços Inoxidáveis Super Duplex. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, São Paulo, 2013.

PAIVA, A. P. Metodologia de Superfície de Resposta e Análise de Componentes Principais em otimização de processos de manufatura com múltiplas respostas correlacionadas. Tese de Doutorado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, UNIFEI, Itajubá, 2006.

PAIVA, A. P.; FERREIRA, J.R.; BALESTRASSI, P. P. A multivariate hybrid approach applied to AISI 52100 hardened steel turning optimization. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 189, p. 26-35, 2007.

Paiva, E.J., 2008. Otimização de Processos de Manufatura com Múltiplas Respostas Baseadas em Índices de Capacidade. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá.

PAIVA, A. P., PAIVA, E. J., FERREIRA, J. R., BALESTRASSI, P. P., COSTA, S. C. A multivariate mean square error optimization of AISI 52100 hardened steel turning. *International Journal Adv. Manuf. Technol*, DOI 10.1007/s00170-008-1745-5, 2009.

PAIVA, A. P; CAMPOS, P. H; FERREIRA, J. R; LOPES. L. G. D; PAIVA. E. J; BALESTRASSI. P. P. A multivariate robust parameter design approach for optimization of ABNT 52100 hardened steel turning with wiper mixed ceramic tool. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, v.30, p.152-163, 2012.

PARO, J.; HANNIKEN, H.; KAUPPINEN, V. Tool wear and machinability of HIPed P/M and conventional cast duplex stainless steels. *Wear*, v. 249, p. 279-284, 2001.

PAULO, R. G. R., 2008. Avaliação da integridade superficial e usinabilidade de engrenagens forjadas utilizando fresamento com alta velocidade de corte. São Paulo, 154 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia Ilha Silteira, 2008.

PECNER, D.; BERNSTEIN, I.N. *Hand Book of Stainless Steel*. Nova York: Mc-Graw Hill, 1997.

PEREIRA, P. A. D. S. Efeito da energia de soldagem na microestrutura de um aço inoxidável duplex e super duplex. **EUNF**, Rio de Janeiro, Julho 2009.

PICKERING F.B. “Physical metallurgy of stainless steel developments”. *International Metal Reviews*. V.211, p.227-268, 1976

Prasath, K.M., Pradheep, T. e Suresh, S., 2018. “Application of Taguchi and Response Surface Methodology (RSM) in Steel Turning Process to Improve Surface Roughness and Material Removal Rate.” *Materials Today: Proceedings*, Vol. 5(11), p. 24622–24631.

Rajaguru, J., & Arunachalam, N. (2017). Coated tool Performance in Dry Turning of Super Duplex Stainless Steel. *Procedia Manufacturing*, 10, 601–611. doi:10.1016/j.promfg.2017.07.061

RAYMUNDO, E. A. et al. Análises dos Cavacos Gerados no Processo de Fresamento do Aço Inoxidável Duplex UNS S31803 (SAF 2205). *Revista de Gestão & Tecnologia UNISAL*, Lorena/SP, 2017. ISSN ISSN 2358-3126.

RENCHER, A.C. *Methods of Multivariate Analysis*. John Wiley and Sons, 2 ed., 740p., 2002.

Saini, Monika, Ravindra Nath Yadav, and Sunil Kumar. 2015. “An Overview on Turning Process.” *ELK Asia Pacific Journals - Special Issue*.

SALGADO JÚNIOR, A. R. Otimização de múltiplos duais correlacionados no processo de torneamento do aço de corte fácil ABNT 12L14. p. 126, 2010.

SANDVIK COROMANT. *Technical Guide and Products Catalogues*. AB SandvikCoromant, 2017.

Sandvik Coromant, 2018. “Sandvik Coromant”. Disponível em: <<https://www.sandvik.coromant.com>>Acesso em 03 de abril de 2021

SANDVIK COROMANT. *Technical Guide and Products Catalogues*. AB SandvikCoromant, 2020.

Sandvik Coromant, 2018. “Sandvik Coromant”. Disponível em: <<https://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/general-turning/pages/external-turning.aspx>>.Acesso em 03 de maio de 2021

SANTOS, S. C. *Aspectos tribológicos da usinagem dos materiais*. São Paulo, Brasil: Artliber, 2007.

Sarıkaya, M., Yılmaz, V. e Güllü, A., 2016. “Analysis of Cutting Parameters and Cooling/Lubrication Methods for Sustainable Machining in Turning of Haynes 25 Superalloy.”. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 173, p. 172–181.

SILVA, A.P.D., 2001. *Efficient Variable Screening for Multivariate Analysis*. *Journal of Multivariate Analysis*, v. 76, pp. 35-62.

SILVA, A.L.V.C.; MEI, P.R. *Aços e liga especiais*. 3 ed. São Paulo. Editora Blucher, 2010. 646p.

SINHA, P. A search method for process optimization with designed experiments and some observations. *International Journal of Quality & Reliability Management*, v. 28, n. 5, p. 503–518, 2011.

VAN GYSEGHEM, E., JIMIDAR, M., SNEYERS, R., REDLICH, D., VERHOEVEN, E., MASSART, D. L., VANDER HEYDEN, Y. Selection of Reversed-Phase Liquid Chromatographic Columns with Diverse Selectivity Towards the Potential Separation of Impurities in Drugs. *Journal of Chromatography A*, n 1042, pp. 69-80, 2004.

VARELLA, C. A. A. *Análise Multivariada Aplicada as Ciências Agrárias–Análise de Componentes Principais*. Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), 2008.

VINING, G. G., MYERS, R. H. Combining Taguchi and response surface philosophies: a dual response approach. *Journal of Quality Technology* 22:38-45, 1990.

WALDÉN, B., NICHOLLS, J.M. The Sandvik duplex family of stainless steel. Summary of data. **Publicação S-51-53 da AB Sandvik Steel**, Suécia. Abril 1994.

WHITEHOUSE, D. J. (2000). *Surfaces and their Measurement*. London, Hermes Penton Science, 395 p.

WU, F. C. Optimization of correlated multiple quality characteristics using desirability function. *Quality Engineering*, v. 17, n. 1, pp. 119-126, 2005.

Zhou, T., Xiong, Y., Yue, Y., Lu, Y., Chen, Y., He, T., ... Cao, W. (2019). Controlled cold rolling effect on microstructure and mechanical properties of Ce-modified SAF 2507 super duplex stainless steel. *Materials Science and Engineering: A*, 766, 138352. doi:10.1016/j.msea.2019.138352

7 PUBLICAÇÕES

1. 10º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO



10º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação
05 a 07 de agosto de 2019, São Carlos, SP, Brasil

ANÁLISE DA RUGOSIDADE R_a NO TORNEAMENTO DO AÇO INOXIDÁVEL SUPER DUPLEX UNS S32750 UTILIZANDO PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS

Carlos Filipe Nascimento
Carlos Henrique de Oliveira
Fabiana Ferreira Silva Vieira
Patrícia Frederico
Tarcísio Gonçalves de Brito
Emerson José de Paiva

IEI-UNIFEI-Universidade Federal de Itajubá. Campus Avançado de Itabira. Rua Irmã Ivone Drummond, nº 200. CEP:35903-087. Itabira-MG
e-mails: carlosfelipen8@gmail.com; carlos.henrique@unifei.edu.br; fabnany@yahoo.com.br; patriciafrederico@hotmail.com; tgbrito@unifei.edu.br; emersonpaiva@unifei.edu.br.

Resumo. O avanço tecnológico na indústria metal mecânica faz com que as empresas priorizem a qualidade de seus produtos em diferentes processos de fabricação e o torneamento, devido à sua versatilidade, destacou-se entre as

2. IV Congresso de Pesquisa, Extensão e Ensino – UNIFEI Itabira

21 A 25
DE OUTUBRO
DE 2019
ITABIRA - MG

IV CONGRESSO DE PESQUISA,
EXTENSÃO E ENSINO
UNIFEI-ITABIRA

OTIMIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DE USINAGEM NO TORNEAMENTO DO AÇO INOXIDÁVEL SUPER DUPLEX UNS S32750 UTILIZANDO PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS E FUNÇÃO DE DESIRABILITY

Carlos Filipe Nascimento¹ (PG), Tarcísio Gonçalves de Brito (PQ)¹, Rubén Miranda Carrillo (PQ)¹
¹Instituto de Engenharias Integradas, Universidade Federal de Itajubá, campus Itabira, Minas Gerais, Brasil

Palavras-chave: Otimização. Planejamento de experimentos. Torneamento. *Desirability*.

Introdução

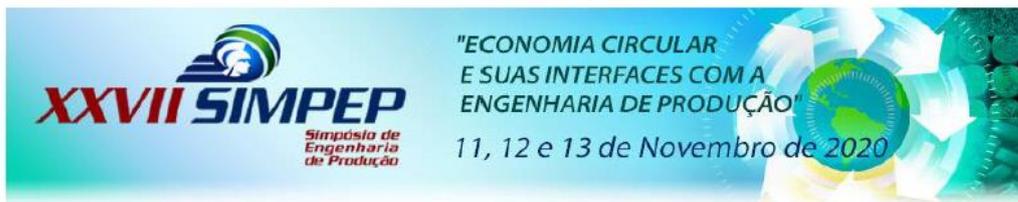
As empresas no cenário contemporâneo buscam instintivamente por técnicas, produtos e ferramentas que aumentem a sua competitividade.

Devido a sua alta performance o aço inoxidável duplex possui uma elevada aplicabilidade nos setores de petróleo, gás dentro outros segmentos onde os cloretos estão presentes. A excelente combinação de propriedades mecânicas a elevados limites de resistência a corrosão permite que os resultados obtidos utilizando este material sejam os melhores possíveis (Gamarra & Diniz, 2018).

Neste contexto, para adequar este material a realidade de trabalho específica de cada empresa os processos de usinagem destacam-se pela versatilidade produtiva, qualidade e velocidade.

Segundo Diniz et al. (2014) dentre os processos de usinagem, o torneamento é uma das mais importantes operações

3. XXVII SIMPOSIO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO



OTIMIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DE USINAGEM NO TORNEAMENTO DO AÇO INOXIDÁVEL SUPER DUPLEX UNS S32750

CARLOS FILIPE NASCIMENTO - carlosfilipe@unifei.edu.br
UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ – UNIFEI

ANDRÉ DALLORA DOS REIS - andredalloradosreis@unifei.edu.br
UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ – UNIFEI

DEISE SANTOS MADEIRA – deise.madeira@gmail.com
UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ – UNIFEI

TARCÍSIO GONÇALVES DE BRITO - tgbrito@unifei.edu.br
UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ – UNIFEI

4. Capítulo 15 do livro: Engenharia 4.0: a era da produção inteligente – Vol. 05



OTIMIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DE USINAGEM NO TORNEAMENTO DO AÇO INOXIDÁVEL SUPER DUPLEX UNS S32750

OPTIMIZATION CUTTING PARAMETERS IN TURNING SUPER DUPLEX
STAINLESS STEEL UNS S32750

Carlos Filipe Nascimento
André Dallora dos Reis
Deise Santos Madeira
Tarcísio Gonçalves de Brito
Emerson José de Paiva

5.11º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO



11º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação
24 a 26 de maio de 2021, Curitiba, PR, Brasil

OTIMIZAÇÃO DOS PARAMETROS DE USINAGEM NO TORNEAMENTO DO AÇO INOXIDÁVEL SUPER DUPLEX UNS S32750 UTILIZANDO METODOLOGIA DE SUPERFÍCIE DE RESPOSTA E FUNÇÃO *DESIRABILITY*

Carlos Filipe Nascimento

Tarcísio Gonçalves de Brito

Carlos Henrique de Oliveira

Emerson José de Paiva

IEI-UNIFEI-Universidade Federal de Itajubá. *Campus* Avançado de Itabira. Rua Irmã Ivone Drummond, nº 200. CEP:35903-087.
Itabira-MG

e-mails: carlosfelipen8@gmail.com; tgbrito@unifei.edu.br; carlos.henrique@unifei.edu.br; emersonpaiva@unifei.edu.br.