

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE MINAS GERAIS
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

Murilo Pereira Lopes

**COMPORTAMENTO DA RUGOSIDADE SUPERFICIAL NOS AÇOS INOXIDÁVEIS
AISI 304 E AISI 2205 SUBMETIDOS AO PROCESSO DE FRESAMENTO EM
ELEVADAS VELOCIDADES DE CORTE**

Belo Horizonte

2020

Murilo Pereira Lopes

**COMPORTAMENTO DA RUGOSIDADE SUPERFICIAL NOS AÇOS INOXIDÁVEIS
AISI 304 E AISI 2205 SUBMETIDOS AO PROCESSO DE FRESAMENTO EM
ELEVADAS VELOCIDADES DE CORTE**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção de título de Doutor em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. José Rubens Gonçalves Carneiro

Área de concentração: Processos de Fabricação.

Belo Horizonte

2020

FICHA CATALOGRÁFICA

Elaborada pela Biblioteca da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais

L864c Lopes, Murilo Pereira
 Comportamento da rugosidade superficial nos aços inoxidáveis AISI 304 e AISI 2204 submetidos ao processo de fresamento em elevadas velocidades de corte / Murilo Pereira Lopes. Belo Horizonte, 2020.
 170 f. : il.

 Orientador: José Rubens Gonçalves Carneiro
 Tese (Doutorado) - Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais.
 Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

 1. Aço inoxidável. 2. Fresagem (Trabalhos em metal). 3. Metais – Corte. 4. Aspereza de superfície. 5. Análise de variância. I. Carneiro, José Rubens Gonçalves. II. Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.

SIB PUC MINAS

CDU: 621.7

Ficha catalográfica elaborada por Renata Diniz Guimarães de Oliveira - CRB 6/2646

Murilo Pereira Lopes

**COMPORTAMENTO DA RUGOSIDADE SUPERFICIAL NOS AÇOS INOXIDÁVEIS
AISI 304 E AISI 2205 SUBMETIDOS AO PROCESSO DE FRESAMENTO EM
ELEVADAS VELOCIDADES DE CORTE**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção de título de Doutor em Engenharia Mecânica.

Prof. Dr. José Rubens Gonçalves Carneiro - PUC Minas - (Orientador)

Prof. Dr. Pedro Paiva Brito - PUC Minas - (Banca Examinadora)

Prof. Dra. Diana Maria Pérez Escobar - CIT- Senai - (Banca Examinadora)

Profa. Dra. Vanessa de Freitas Cunha Lins - UFMG - (Banca Examinadora)

Belo Horizonte, 27 de março de 2020.

*Aos meus familiares por todo apoio, em
especial à minha esposa e aos meus
amados filhos.*

AGRADECIMENTOS

A Deus pelo dom da vida.

Aos meus pais pelo incentivo contínuo.

À minha esposa Adriana Almeida pelo companheirismo ao longo de todos esses anos.

Aos meus filhos, Heitor e Elisa, por todo amor e respeito.

Aos meus irmãos e familiares.

Ao meu Professor Orientador Dr. José Rubens Gonçalves Carneiro, pelo conhecimento e sabedoria em ensinar.

Aos demais professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da PUC Minas, em especial ao Sr. Gilmar Cordeiro da Silva e ao Sr. Pedro Paiva Brito.

Aos colegas Daniel de Castro Maciel e Carlos Eduardo dos Santos pelo apoio ao longo do curso.

À Valéria Gomes, secretária do Programa de Pós-Graduação, pelo acolhimento, pela paciência e motivação.

Aos técnicos de laboratório, Ítalo Bruno dos Santos e Fabiane Lucia Teixeira de Jesus, pela disponibilidade em ajudar sempre.

Aos colegas da Fundação Educacional Montes Claros - FEMC, pelo carinho e reconhecimento.

À PUC Minas, que é considerada uma das melhores universidades privadas do Brasil, pelo suporte, apoio e infraestrutura.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

RESUMO

Este trabalho apresenta uma investigação experimental sobre os efeitos causados pelo processo de usinagem por fresamento na microestrutura superficial do aço inoxidável austenítico AISI 304 e do aço inoxidável duplex AISI 2205. O estudo foi baseado em técnicas de planejamento experimental, análise de variância - ANOVA, ensaios de microestrutura, análise de rugosidade superficial e corrosão. Amostras dos aços AISI 304 e AISI 2205 foram preparadas em formato prismático, com dimensões de 10mm x 10mm x 12mm, e submetidas ao processo de usinagem por fresamento. O ferramental utilizado no experimento foi uma fresa de topo com três insertos intercambiáveis, fabricados em WC na matriz de cobalto Co, revestida de TiAlN. A técnica de planejamento experimental foi a Metodologia de Superfície de Resposta - RSM em um experimento central composto, os parâmetros de entrada da matriz experimental foram: Velocidade de corte V_c variando entre 300 e 750m/min; avanço por dente f_z variando entre 0,01 e 0,18mm/dente; e profundidade de corte a_p fixa em 1,0mm. O parâmetro primário de saída analisado a partir da RSM foi a rugosidade da superfície. A microscopia eletrônica acoplada à espectroscopia de raios-x por dispersão em energia EDS, indicou que a espessura do revestimento presente nos insertos foi de aproximadamente 1 μ m, com presença de Ti, Al e N. Os ensaios de microscopia de varredura eletrônica MEV e a difração de Raios X – DRX realizados nas amostras do aço AISI 304 mostrou a presença de austenita com cristais equiaxiais. A micrografia feita no aço duplex AISI 2205 evidenciou a microestrutura típica de aço inoxidável duplex de matriz ferrítica (α) e ilhas ou porções de austenita (γ), distribuídas aleatoriamente. A ANOVA indicou que o parâmetro f_z foi mais influente na resposta da rugosidade superficial para os dois materiais. As altas velocidades de corte influenciaram o comportamento das curvas de distribuição de probabilidade das respostas da rugosidade. Ensaios eletroquímicos para avaliação do processo de corrosão foram realizados. Amostras do aço AISI 2205 foram submetidas a ensaios de Difração de Elétrons Retro Espalhados – EBSD e Difração de Raios X – DRX, os resultados mostraram transformação na fase austenítica induzida pela deformação provocada pelo processo de fresamento.

Palavras chave: Fresamento. Aço inoxidável. Rugosidade. Análise de Variância. Transformação de fase.

ABSTRACT

This paper presents an experimental investigation about the effects caused by the milling machining process on the surface microstructure of AISI 304 austenitic stainless steel and AISI 2205 duplex stainless steel. The study was based on experimental planning techniques, analysis of variance - ANOVA, microstructure tests, surface roughness and corrosion analysis. Samples of AISI 304 and AISI 2205 steels were prepared in a prismatic format, with dimensions of 10mm x 10mm x 12mm, and subjected to the milling machining process. The tooling used in the experiment was a three-interchangeable insert end mill manufactured in WC in the Cobalt Co matrix, coated with TiAlN. The technique of experimental planning was the Response Surface Methodology - RSM in a central composite experiment, the input parameters of the experimental matrix were: Cutting speed V_c varying between 300 and 750m / min; advance per tooth varied between 0.01 and 0.18 mm / tooth; and depth of cut a_p fixed at 1.0mm. The primary output parameter analyzed from the RSM was the surface roughness. Electron microscopy coupled to x-ray spectroscopy by EDS energy dispersion, indicated that the thickness of the coating present in the inserts was approximately 1 μm , with the presence of Ti, Al and N. The SEM scanning electron microscopy tests and X-ray diffraction - XRD performed on samples of AISI 304 steel showed the presence of austenite with equiaxial crystals. The micrograph done on the AISI 2205 duplex steel showed the typical microstructure of ferritic matrix (α) duplex stainless steel and randomly distributed islands or portions of austenite (γ). ANOVA indicated that the f_z parameter was more influential in the surface roughness response for both materials. The high cutting speeds influenced the behavior of the probability distribution curves of the roughness responses. Electrochemical tests to evaluate the corrosion process were carried out. Samples of AISI 2205 steel were subjected to Retro Scattered Electron Diffraction (EBSD) and X-Ray Diffraction (XRD) tests, the results showed transformation of the austenitic phase induced by the deformation caused by the milling process.

Keywords: Milling. Stainless steel. Roughness. Analysis of Variance. Phase transformation.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - Seção do diagrama de equilíbrio de fases para o sistema Fe-Cr-Ni com teor de Cr constante de 18%.....	44
FIGURA 2 - Remoção do cavaco pela ferramenta no processo de fresamento.....	46
FIGURA 3 - Desgaste de cratera, desgaste do flanco, lascamento e APC.....	50
FIGURA 4 - Superfícies usinadas e superfície dos cavacos.....	51
FIGURA 5 - MEV realizado nas ferramentas de corte.....	52
FIGURA 6 - Superfícies dos cavacos nas diversas velocidades de corte utilizadas no experimento.....	53
FIGURA 7 - Micrografias realizadas nas arestas das ferramentas de acordo com a progressão dos ensaios.....	55
FIGURA 8 - a) Adesão de micropartículas na superfície fresada; b) Formação da Aresta postiça de corte.....	56
FIGURA 9 - Evolução da microdureza Vickers em relação a profundidade de corte e diferentes valores de velocidade de corte.....	57
FIGURA 10 - MET da amostra VC600f016. a) lamela da austenita; b) deformação da região austenítica; c) ruptura das lamelas de austenita; d) linhas sugeridas como martensita (α').....	59
FIGURA 11 - Superfície geométrica e superfície efetiva.....	60
FIGURA 12 - Elementos que compõem o perfil de rugosidade estabelecido na NBR ISO 4287/2002.....	61
FIGURA 13 - Fator de assimetria (skewness) e achatamento (kurtosis) do perfil de rugosidade.....	63
FIGURA 14 - Gráfico de interação entre os fatores de entrada e a resposta da rugosidade Ra.....	67
FIGURA 15 - Gráficos de superfície.....	68
FIGURA 16 - Gráfico de interação entre os fatores de entrada e a resposta da rugosidade Ra.....	69
FIGURA 17 - Gráficos de distribuição de probabilidade e resíduos versus resposta.....	70
FIGURA 18 - Gráficos de superfície de resposta.....	71
FIGURA 19 - Micropartículas aderidas na superfície e (APC) na ferramenta de corte.....	71

FIGURA 20 - Representação gráfica da superfície: fz e ap, Pastilha (B).	72
FIGURA 21 - Evolução da rugosidade superficial em função do avanço da ferramenta de corte ao longo dos experimentos.	73
FIGURA 22 - Microscopia óptica das amostras em diferentes rugosidades após ensaios de corrosão.	76
FIGURA 23 - Diferentes amostras de rugosidade da superfície evidenciando a presença de corrosão por pites: (a) 180, (b) 1000 e (c) polido.....	77
FIGURA 24 - Curvas potenciodinâmicas para os quatro acabamentos de superfície, (a) em NaCl 0,5 M e (b) na chuva urbana, taxa de varredura $v = 1\text{mV/s}$	79
FIGURA 25 - fluxograma do processo de análise da superfície deformada pelo fresamento.	80
FIGURA 26 - Equipamento desenvolvido para o ataque eletrolítico nas amostras dos aços AISI 304 e AISI 2205	82
FIGURA 27 - Rugosímetro TAYLOR HOBSON SURTRONIC: S-128.....	83
FIGURA 28 - Fluxograma do processo de fresamento	84
FIGURA 29 - Esboço do DOE baseado em Metodologia de Superfície de Resposta.	86
FIGURA 30 - Contorno das combinações dos parâmetros de entrada do planejamento de superfície de resposta na etapa 01.....	87
FIGURA 31 - Contorno das combinações dos parâmetros de entrada do planejamento de superfície de resposta dos ensaios complementares.	88
FIGURA 32 - Parte do processo de configuração do experimento no MINITAB®. ...	89
FIGURA 33 - Célula de corrosão eletroquímica tipo Flat Cell desenvolvida para análise.....	90
FIGURA 34 - Microestrutura do aço AISI 304: (a) na condição de laminado a quente; (b) presença de austenita com cristais equiaxiais e maclas de recozimento.	93
FIGURA 35 - (a) microestrutura da seção transversal do aço AISI 2205; (b) microestrutura da seção longitudinal do aço AISI 2205.	94
FIGURA 36 – Microscopia óptica do inserto BDMT-11T308ER-JT PR1535, (a) evidenciando a espessura do revestimento e (b) presença de Ti, Al e N no revestimento.....	95
FIGURA 37 - Relatório do rugosímetro em um ponto de medição da etapa 01 dos testes no aço inoxidável austenítico AISI 304.	96

FIGURA 38 - Relatório do rugosímetro em um ponto de medição da etapa 01 dos testes no aço inoxidável duplex AISI 2205.....	97
FIGURA 39 - Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados na resposta das rugosidades Ra e Rt no fresamento no aço inoxidável AISI 304.....	103
FIGURA 40 - Gráfico de Probabilidade dos efeitos padronizados na resposta da rugosidade Ra na etapa 01 do fresamento no aço inoxidável AISI 304.	105
FIGURA 41 - Resultados do AISI 304: (a) Histograma com curva de distribuição de probabilidade; (b) Gráfico de Probabilidade dos efeitos padronizados.	106
FIGURA 42 - (a) Histograma com curva de distribuição de probabilidade; (b) Gráfico de Probabilidade dos efeitos padronizados.....	107
FIGURA 43 - Gráfico de superfície de resposta: (a) da rugosidade Ra; (b) da rugosidade Rt.	109
FIGURA 44 - Modelagem da otimização numérica da rugosidade Ra	110
FIGURA 45 - Otimização numérica da rugosidade Ra.....	111
FIGURA 46 - Modelagem da otimização numérica da rugosidade Rt.	112
FIGURA 47 - Otimização numérica da rugosidade Rt.....	113
FIGURA 48 - Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados na resposta da rugosidade Ra na etapa 01 do fresamento no aço inoxidável duplex AISI 2205.	115
FIGURA 49 - Gráfico de Probabilidade dos efeitos padronizados na resposta da rugosidade Ra na etapa 01 do fresamento no aço inoxidável duplex AISI 2205. ...	116
FIGURA 50 - Gráfico de superfície de resposta da rugosidade Ra dos dados do fresamento do aço duplex AISI 2205.	117
FIGURA 51 - Microscopia estrutural do aço AISI 304 após fresamento e ensaios de corrosão	119
FIGURA 52 - MEV no duplex AISI 2205 após ensaios de corrosão: (a) ampliação 200x; (b) ampliação 500x e (c) ampliação 1000x	120
FIGURA 53 - EDS na superfície do aço duplex AISI 2205.....	121
FIGURA 54 - Curvas de polarização potenciodinâmica para o aço inoxidável austenítico AISI 304 em solução aquosa de H ₂ SO ₄ 0,5 mol/L, na condição não aerada, obtidas em relação ao eletrodo de calomelano saturado (ECS)	122
FIGURA 55 - Curvas de Tafel obtidas da FIGURA 54 para o aço inoxidável austenítico AISI 304 em solução aquosa de H ₂ SO ₄ 0,5 mol/L, na condição não aerada, obtidas em relação ao eletrodo de calomelano saturado (ECS)	124

FIGURA 56 - Curvas de polarização potenciodinâmica para o aço inoxidável duplex AISI 2205 em solução aquosa de H ₂ SO ₄ 0,5 mol/L, na condição não aerada, obtidas em relação ao eletrodo de calomelano saturado (ECS).....	126
FIGURA 57 - Curvas de Tafel obtidas da FIGURA 56 para o aço inoxidável duplex AISI 2205 em solução aquosa de H ₂ SO ₄ 0,5 mol/L, na condição não aerada, obtidas em relação ao eletrodo de calomelano saturado (ECS)	127
FIGURA 58 – Densidade de corrente crítica e velocidade de corte	128
FIGURA 59 – Densidade de corrente de pite e velocidade de corte	129
FIGURA 60 – Densidade de corrente de corrosão e velocidade de corte	129
FIGURA 61 – Potencial de corrosão e velocidade de corte	130
FIGURA 62 – Taxa de corrosão e velocidade de corte	130
FIGURA 63 - Quantificação da tensão residual por DRX para as amostras do aço AISI 304.....	132
FIGURA 64 - Quantificação da tensão residual por DRX para as amostras do aço AISI 2205.....	132
FIGURA 65 - Análise percentual de fases por EBSD para as amostras do aço AISI 2205 sem usinagem (solubilizada).	133
FIGURA 66 - Análise percentual de fases por EBSD para as amostras do aço AISI 2205 fresadas com V _c =300m/min.....	134
FIGURA 67 - Análise percentual de fases por EBSD para as amostras do aço AISI 2205 em V _c =750m/min.	134

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 - Efeitos principais da velocidade de corte V_c e do avanço por dente f_z na resposta da rugosidade R_a	99
QUADRO 2 - Interação entre a velocidade V_c e o avanço por dente f_z na resposta da rugosidade R_a da superfície do aço AISI 304 e duplex AISI 2205	100
QUADRO 3 - Histogramas com curvas de distribuição de probabilidade que se ajustaram ao resultado do DOE para as rugosidades R_a e R_t	101

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - Composições químicas e exemplos de aplicações de alguns aços inoxidáveis austeníticos mais comuns.	43
TABELA - 2 Composições químicas (% em peso) de alguns aços inoxidáveis duplex.	45
TABELA 3 - Resultados da Análise de Variância ANOVA	74
TABELA 4 - Amostras do aço inoxidável austenítico AISI 304 com diferentes rugosidades superficiais	78
TABELA 5 - Parâmetros de entrada do DOE.	85
TABELA 6 - Condições paramétricas usadas na obtenção da curva de polarização potenciodinâmica	91
TABELA 7 - Parâmetros físico-químicos utilizados	91
TABELA 8 - Condições usadas na obtenção do diagrama de espectroscopia de impedância eletroquímica.	91
TABELA 9 - Composição química dos corpos de prova do aço inoxidável austenítico AISI 304 percentuais em peso.	92
TABELA 10 - Composição química dos corpos de prova do aço inoxidável duplex AISI 2205 percentuais em peso.	92
TABELA 11 - Contribuição percentual dos parâmetros de entrada na resposta das rugosidades Ra e Rt na etapa 01 do fresamento no aço inoxidável AISI 304.....	102
TABELA 12 - Otimização numérica da rugosidade Ra.....	110
TABELA 13 - Otimização numérica da rugosidade Rt.....	112
TABELA 14 - Contribuição percentual dos parâmetros de entrada na resposta das rugosidades Ra e Rt na etapa 01 do fresamento no aço inoxidável AISI 2205.....	114
TABELA 15 - Otimização numérica da rugosidade Ra.....	118
TABELA 16 - Otimização numérica da rugosidade Rt.....	118
TABELA 17 - Parâmetros eletroquímicos obtidos das curvas de polarização potenciodinâmicas para a amostra de aço inoxidável austenítico AISI 304, em solução de H ₂ SO ₄ 0,5 mol/L, na condição não aerada, em função da velocidade de corte, em relação ao eletrodo de calomelano saturado (ECS)	123
TABELA 18 - Parâmetros eletroquímicos obtidos das curvas de polarização potenciodinâmicas para a amostra de aço inoxidável austenítico AISI 304, em	

solução de H₂SO₄ 0,5 mol/L, na condição não aerada, em função da velocidade de corte, em relação ao eletrodo de calomelano saturado (ECS)..... 125

TABELA 19 - Parâmetros eletroquímicos obtidos das curvas de polarização potenciodinâmicas para a amostra de aço inoxidável duplex AISI 2205, em solução de H₂SO₄ 0,5 mol/L, na condição não aerada, em função da velocidade de corte, em relação ao eletrodo de calomelano saturado (ECS)..... 126

TABELA 20 - Parâmetros eletroquímicos obtidos das curvas de polarização potenciodinâmica para a amostra de aço inoxidável duplex AISI 2205, em solução de H₂SO₄ 0,5 mol/L, na condição não aerada, em função da velocidade de corte, em relação ao eletrodo de calomelano saturado (ECS)..... 127

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AFM	Atomic Force Microscope - Microscopia de força atômica
AISI	American Iron and Steel Institute
ANOVA	Análise de variância
ap	Profundidade de corte
APC	Aresta postiça de corte
ASS	Austenitic Stainless Steel
CCC	Cúbica de Corpo Centrado
CFC	Cúbica de face centrada
CNC	Comando numérico computadorizado
DOE	Design of Experiments
DRX	Difração de raios - X
DSS	Duplex Stainless Steel
EBSD	Electron Backscatter Diffraction
ECS	Eletrodo de Calomelano Saturado
E_{corr}	Potencial de corrosão
EDS	Espectroscopia de raios - X por dispersão em energia
f	Avanço
fz	Avanço por dente
GPS	Especificações geométricas do produto
h	Espessura de corte
ISO	International Organization for Standardization
j	Distância de ajustagem fresa-peça
M	Linha média
MET	Microscopia Eletrônica de Transmissão
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MFM	Microscopia de Força Magnética
n	Número de rotações
OPC	Open Circuit Potencial
PL	Polarização linear
PVD	Deposição física de vapor

Ra	Desvio aritmético médio do perfil
Rc	Desvio aritmético médio das amplitudes de todos os picos e vales do perfil.
Rku	Fator de achatamento do perfil avaliado (kurtosis)
Rp	Altura máxima do pico do perfil
RPM	Número de rotações por minuto
Rq	Desvio médio quadrático
Rsk	Fator de assimetria do perfil avaliado (skewness)
RSM	Metodologia de superfície de resposta
Rt	Altura total do perfil
Rz	Altura das irregularidades do perfil
SASS	Super Austenitic Stainless Steel
SCE	Saturated Calomel Electrode
Vc	Velocidade de corte
Vf	Velocidade de avanço
Xr	Ângulo de posição
z	Número de dentes da fresa
Ψ	Ângulo de contato fresa-peça

LISTA DE SÍMBOLOS

Al	Alumínio
C	Carbono
Ca	Cálcio
Cr	Cromo
Co	Cobalto
Cu	Cobre
H ₂ SO ₄	Ácido Sulfúrico
L	Litros
Mn	Manganês
Mo	Molibdênio
N	Nitrogênio
Nb	Nióbio
Ni	Níquel
P	Fósforo
S	Enxofre
Si	Silício
Ti	Titânio
TiAlN	Nitreto de Titânio e Alumínio
WC	Carboneto de Tungstênio

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	37
1.1 Objetivos	40
1.1.1 Objetivo Geral	40
1.1.2 Objetivos Específicos	41
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	42
2.1 Aços inoxidáveis Austeníticos	42
2.2 Aços inoxidáveis Duplex	44
2.2 Usinagem por Fresamento	45
2.2.1 Fresas com pastilhas de metal duro	47
2.2.2 Parâmetros de corte no fresamento	48
2.2.3 Usinabilidade dos aços inoxidáveis	49
2.3 Integridade de superfícies usinadas	56
2.3.1 Rugosidade superficial	59
2.4 Planejamento Experimental, <i>Design Of Experiments</i> - DOE	64
2.4.1 Metodologia de superfície de resposta RSM	65
2.5 Ensaio de corrosão eletroquímica	75
3 METODOLOGIA EXPERIMENTAL	80
3.1 Fluxograma do processo de análise da superfície deformada pelo fresamento	80
3.2 Preparação das amostras	81
3.3 Ferramental e maquinário	83
3.4 Fluxograma do processo de fresamento das amostras	84
3.5 Variáveis de entrada e de saída do DOE	85
3.6 Elaboração do planejamento experimental	86
3.7 Preparação dos ensaios eletroquímicos nas superfícies das amostras fresadas	89

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	92
4.1 Análise química e metalografia das amostras dos aços AISI 304 e AISI 2205	92
4.2 Caracterização da ferramenta de corte	94
4.3 Resultados estatísticos do experimento de superfície de resposta.....	96
4.3.1 ANOVA da resposta da rugosidade superficial Ra e Rt no aço inoxidável austenítico AISI 304.	102
4.3.2 Otimização da resposta da rugosidade superficial Ra e Rt no aço inoxidável austenítico AISI 304.....	108
4.3.3 ANOVA da resposta da rugosidade superficial Ra e Rt no aço inoxidável duplex AISI 2205.....	113
4.3.4 Otimização da resposta da rugosidade superficial Ra e Rt no aço inoxidável duplex AISI 2205.	116
4.4 Resultados do ensaio de corrosão	119
4.4.1 Metalografia após fresamento e após ensaios de corrosão na superfície dos aços AISI 304 e AISI 2205.....	119
4.4.2 Curvas de polarização potenciodinâmica para o aço inoxidável austenítico AISI 304	121
4.4.3 Curvas de polarização potenciodinâmica para o aço inoxidável duplex AISI 2205	125
4.4.4 Comparação dos resultados de corrosão.....	128
4.5 Resultados dos ensaios de tensão residual obtidos por DRX e quantificação percentual de fases por EBSD no aço AISI 2205.....	131
4.5.1 Quantificação da tensão residual por DRX para as amostras dos aços AISI 304 e AISI 2205	131
4.5.2 Análise percentual de fases por EBSD para as amostras do aço AISI 2205	133
5 CONCLUSÃO	135
6 PROPOSTA DE TRABALHOS FUTUROS.....	137
REFERÊNCIAS.....	138

APÊNDICE A - MATRIZ EXPERIMENTAL GERADA NO SOFTWARE MINITAB®	147
APÊNDICE B - MATRIZ EXPERIMENTAL GERADA NO SOFTWARE MINITAB®	148
APÊNDICE C - RELATÓRIOS DOS RESULTADOS DE RUGOSIDADE NO FRESAMENTO DO AÇO INOXIDÁVEL AUSTENÍTICO AISI 304	149
APÊNDICE D - RELATÓRIOS DOS RESULTADOS DE RUGOSIDADE NO FRESAMENTO DO AÇO INOXIDÁVEL DUPLEX AISI 2205	150
APÊNDICE E - RESULTADOS DA ANÁLISE ESTATÍSTICA DO DOE	151
APÊNDICE F - IDENTIFICAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO DE PROBABILIDADE APLICANDO A ESTATÍSTICA DE ANDERSON DARLING PARA (RA)	153
APÊNDICE G - IDENTIFICAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO DE PROBABILIDADE APLICANDO A ESTATÍSTICA DE ANDERSON DARLING PARA (RT)	154
ANEXO A - CERTIFICADO DE QUALIDADE DO AÇO AISI 304	155
ANEXO B - INSERTOS INTERCAMBIÁVEIS DA MARCA KYOCERA UTILIZADOS NO FRESAMENTO	156
ANEXO C - CONDIÇÕES DE USINAGEM SUGERIDAS PELO FABRICANTE	157
ANEXO D - LICENÇA DE UTILIZAÇÃO DO SOFTWARE MINITAB®	158
ANEXO E - ARTIGO APRESENTADO EM CONGRESSO INTERNACIONAL: COBEM 2019, 25TH ABCM INTERNATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING	159

1 INTRODUÇÃO

Nota-se nas últimas décadas um aumento considerável na utilização dos aços inoxidáveis em diversas áreas da engenharia (PHILIP SELVARAJ; CHANDRAMOHAN; MOHANRAJ, 2014). O aço inoxidável destaca-se pela boa tenacidade, baixo coeficiente de dilatação térmica, alta capacidade de absorção de energia e boa soldabilidade; exhibe elevada dureza, resistência mecânica, ductilidade e resistência a corrosão e a oxidação sobre uma ampla gama de temperaturas (ASILTÜRK; NEŞELI, 2012).

Os aços inoxidáveis são ligas Fe-C-Cr com teor de cromo superior a 10%, sendo as ligas austeníticas as mais utilizadas nas indústrias em razão de suas propriedades mecânicas e resistência à corrosão (BERKANI et al., 2015). Aços inoxidáveis Austeníticos (ASS) são considerados difíceis de usar e propensos à transformação de fase durante a usinagem, induzindo vibrações durante o processo e instabilidade na formação dos cavacos (M'SAOUBI et al., 1999). Esses aços são geralmente aplicados na indústria química, da saúde, da produção de alimentos, farmacêutica, têxtil, nuclear, biomédica, etc (ASILTÜRK; NEŞELI, 2012).

Os aços inoxidáveis duplex (DSS) são caracterizados por uma estrutura bifásica, constituindo uma quantidade aproximadamente igual de ferrita e austenita. A fase ferrítica é responsável pelo aumento da resistência, enquanto a fase austenítica garante a tenacidade e melhor resistência à corrosão (PEREIRA MENDONÇA et al., 2018). Esses aços têm sido amplamente utilizados em vários setores da indústria, especialmente em aplicações que exigem maior resistência à corrosão e propriedades mecânicas diferentes das existentes nos aços inoxidáveis convencionais (DOS SANTOS; DA SILVA; JACKSON, 2018). Os aços inoxidáveis duplex são aplicados nas indústrias química, petrolífera, petroquímica, marítima, nuclear e indústrias de papel e celulose (SHASHANKA; CHAIRA, 2015).

Tratando-se de aço inoxidável duplex, o processo de usinagem pode provocar deformações com comportamentos diferentes nas fases ferrítica e austenítica, essa heterogeneidade induz a modificações na superfície usinada e leva à formação de cavacos irregulares e vibrações instáveis (M'SAOUBI et al., 1999). Em função dessas características e aplicações, é fundamental encontrar formas de se aumentar a eficiência nos processos de fabricação por usinagem desses aços (GRUBYI, 2017).

A usinagem é um processo de fabricação mecânica caracterizado pela retirada do cavaco. Geralmente é realizada em uma máquina-ferramenta que, por meio do incremento de movimentos associados ao ataque de uma ferramenta de corte, efetuam o processamento do material (FERRARESI, 2011). Um dos processos de usinagem mais utilizados na fabricação de peças com geometrias diversificadas é o fresamento, que consiste numa operação de usinagem em que o metal é removido por uma ferramenta giratória chamada fresa de múltiplos gumes cortantes.

As interações ferramenta-peça em processos de usinagem modificam as propriedades das camadas superficiais do material, conseqüentemente afetam a vida útil das peças e conjuntos mecânicos. A identificação dessas modificações é importante para a determinação da vida útil de componentes usinados, principalmente aqueles que estão sujeitos à carga cíclica ou à trinca pelo processo de corrosão sob tensão. A natureza e a extensão das modificações das camadas próximas da superfície dependem dos tipos de interações ferramenta-peça (BEN MOUSSA; SIDHOM; BRAHAM, 2012). Operações de usinagem podem provocar transformações de fase na superfície do material, causando aumento da rugosidade, das tensões residuais, e da dureza superficial (KUMAR et al., 2017; LU et al., 2016). De acordo com Pereira Mendonça et al. (2018), a deformação provocada pelo fresamento pode induzir a uma transformação na fase austenítica nos aços inoxidáveis duplex.

O ponto chave para assegurar a qualidade de um produto usinado é a seleção adequada dos parâmetros de corte (DO; HSU, 2016). O estudo e definição prévia de fatores como a velocidade de corte, profundidade de corte e avanço, são fundamentais para o bom desempenho de uma operação de usinagem (PUERTAS ARBIZU; LUIS PÉREZ, 2003).

A rugosidade é um parâmetro importante para avaliação da qualidade da superfície e da usinabilidade do material (MAHER et al., 2014). Atingir a qualidade da superfície desejada é fundamental para o comportamento funcional de um componente, especialmente quanto a sua vida útil em função da fadiga do material em serviço (MAKADIA; NANAVATI, 2013; SARNOBAT; RAVAL, 2019). A precisão dimensional e o desempenho em serviço de produtos usinados são diretamente afetados pela rugosidade da superfície (RAZAVYKIA; FARAHANY; YUSOF, 2015). O avanço e a velocidade de corte da ferramenta de usinagem são fatores que influenciam mais significativamente na rugosidade da superfície do aço AISI 304 em função da sua elevada ductilidade (BERKANI et al., 2015). A rugosidade da superfície

também influencia as características tribológicas, a resistência à fadiga, a resistência à corrosão e a aparência estética das peças usinadas (TANIKIĆ; MARINKOVIĆ, 2012).

Integridade de uma superfície usinada abrange não somente a rugosidade superficial, mas também as tensões residuais, o endurecimento da região deformada durante a interação ferramenta-peça, e as alterações microestruturais (SARNOBAT; RAVAL, 2019). Experimentos realizados por Saini, Ahuja e Sharma (2013), indicaram que o avanço e a profundidade de corte são os principais fatores que influenciam as tensões residuais, enquanto a velocidade de corte e o raio da ponta da ferramenta causam impactos mais moderados. O endurecimento da região deformada durante a interação ferramenta-peça depende das propriedades do material, das condições de usinagem, da geometria da ferramenta e dos parâmetros de corte (WANG et al., 2019). “[...] Todos os fatores que contribuem para o aumento da deformação e do atrito na usinagem, contribuirão também para o aumento do encruamento [...]” (WANG et al., 2019. p.2). A tensão residual na camada superficial do material na usinagem tem efeitos significativos na vida útil das peças, incluindo resistência à fadiga e resistência à corrosão (HUANG; YANG, 2016).

É possível analisar experimentalmente o comportamento dos parâmetros de corte em um processo de usinagem, aplicando técnicas de Design of Experiments - DOE. Os modelos preditivos computacionais experimentais contribuem para a produção de peças com microestruturas que garantam melhor desempenho e maior vida útil dos componentes (JAWAHIR et al., 2011). Modelos estatísticos são desenvolvidos para representar a relação entre parâmetros de usinagem como variáveis independentes, e a rugosidade superficial ou força de corte como variáveis resposta (RAZAVYKIA; FARAHANY; YUSOF, 2015). Os ensaios experimentais são projetados usando o modelo fatorial multinível - DOE, e seus resultados são analisados através da Análise de Variância - ANOVA (RAZAVYKIA; FARAHANY; YUSOF, 2015). Para DAS et al. (2016), as ferramentas estatísticas de ANOVA aplicadas na otimização dos parâmetros de corte do fresamento mostram-se eficientes no estudo das operações de desbaste e acabamento. A Análise de Superfície de Resposta - RSM, é uma técnica de DOE que concentra uma nova e renomada abordagem para a otimização dos modelos de parâmetros de processo de entrada com base em experimentos físicos, experimentos de simulação e descobertas experimentais (DAS et al., 2016).

Nesse contexto, esta pesquisa apresenta uma investigação experimental dos efeitos causados pelo processo de usinagem por fresamento frontal com fresa de topo, na rugosidade superficial do aço inoxidável austenítico AISI 304 e do aço inoxidável duplex AISI 2205 em elevadas velocidades de corte. O estudo foi baseado em técnicas de planejamento experimental, análise de variância - ANOVA, e ensaios na superfície do aço usinado. Os parâmetros de corte ensaiados foram velocidade de corte (V_c), variando entre 300 e 750m/min; o avanço por dente (f_z), na faixa de variação de 0,01 e 0,18mm/dente; e a profundidade de corte (a_p) afixada em 1,0mm. Os parâmetros analisados na pesquisa foram rugosidade R_a (μm) e R_t (μm), por meio da análise de variância - ANOVA. Ao final, amostras dos materiais foram submetidas a ensaios eletroquímicos de estabilização de potencial de circuito aberto, ensaios de espectroscopia de impedância eletroquímica, e ensaios de polarização potenciodinâmica, assim, foi possível verificar a relação existente entre a variação da velocidade de corte nas propriedades de corrosão dos aços.

1.1 Objetivos

A busca por conhecimento sobre os processos de fabricação por remoção de cavaco, relacionando-se variáveis cada vez mais complexas, associadas à aplicação de ferramentas computacionais e tecnológicas para o esclarecimento dos diversos fenômenos que permeiam a produtividade desse segmento, faz com que pesquisadores de todo o mundo se interessem cada vez mais por essa área.

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo desta pesquisa foi a determinação da configuração otimizada entre os parâmetros de entrada do DOE, V_c e f_z , e as menores respostas de rugosidades (R_a) e (R_t) do procedimento experimental, pautando-se pela verificação dos efeitos provocados pelas altas velocidades de corte nas propriedades de corrosão, na tensão residual superficial, e nas fases presentes na microestrutura dos aços inoxidáveis austenítico AISI 304 e duplex AISI 2205, após o fresamento de topo em elevadas velocidades de corte, utilizando-se de ferramenta de WC na matriz de cobalto Co com revestimento de TiNAl.

1.1.2 Objetivos Específicos

- a) Quantificar os efeitos causados pelo processo de usinagem por fresamento frontal na microestrutura e propriedades mecânicas superficiais do aço inoxidável austenítico AISI 304 e aço inoxidável duplex AISI 2205, em elevadas velocidades de corte;
- b) Utilizar técnicas de planejamento experimental e análise de variância - ANOVA, para modelar matematicamente a relação envolvendo a rugosidade superficial e os parâmetros velocidade de corte e avanço para o aço AISI 304 e AISI 2205 na condição de laminado a quente.
- c) Mensurar os efeitos do processo de fresamento na rugosidade da superfície usinada do aço inoxidável austenítico AISI 304 e aço inoxidável duplex AISI 2205.
- d) Avaliar a resistência à corrosão do aço AISI 304 e AISI 2205 após fresamento em altas velocidades de corte no ácido sulfúrico 0,5 mol/L, H₂SO₄ (0,5M).

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo aborda as bases teóricas fundamentais que se relacionam com a pesquisa experimental. Inicia-se com o estudo sobre os aços inoxidáveis austeníticos e aços inoxidáveis duplex, na sequência perpassa pelo processo de fresamento, microestrutura de superfícies usinadas, rugosidade superficial, técnicas de planejamento experimental e análise de variância e encerra-se com o estudo de ensaios de corrosão eletroquímica.

2.1 Aços inoxidáveis Austeníticos

Os aços inoxidáveis ocupam uma posição de destaque no campo industrial devido sua resistência à corrosão, alta ductilidade e tenacidade, e a sua condutividade térmica três vezes menor que a do aço carbono.

Na usinagem, classifica-se como aços de baixa usinabilidade com formação de cavacos longos (SELAIMIA et al., 2017). Exibem excelente ductilidade e tenacidade sobre uma ampla gama de temperaturas e apresentam uma excelente resistência à corrosão e à oxidação (ASILTÜRK; NEŞELI, 2012). Os aços inoxidáveis são amplamente utilizados na indústria química, da saúde, da produção de alimentos, farmacêutica, têxtil, nuclear, biomédica, etc. (SILVERSTEIN; ELIEZER; BOELLINGHAUS, 2018).

A liga AISI 304, que contém 18% Cr e 8% de níquel, é a mais empregada (ASKELAND; WRIGHT, 2014). Elevadas taxas de encruamento dos aços inoxidáveis austeníticos, associadas a deformações plásticas e baixa condutividade térmica, podem refletir em algumas dificuldades em processos de fabricação que envolve a retirada de cavaco (LOPES, 2015). Dentre os aços inoxidáveis, os austeníticos são os que possui melhor soldabilidade e resistência à corrosão.

Silva e Mei (2006) apresentaram algumas composições de aços inoxidáveis austeníticos e suas aplicações, Tabela 1.

Tabela 1 - Composições químicas e exemplos de aplicações de alguns aços inoxidáveis austeníticos mais comuns.

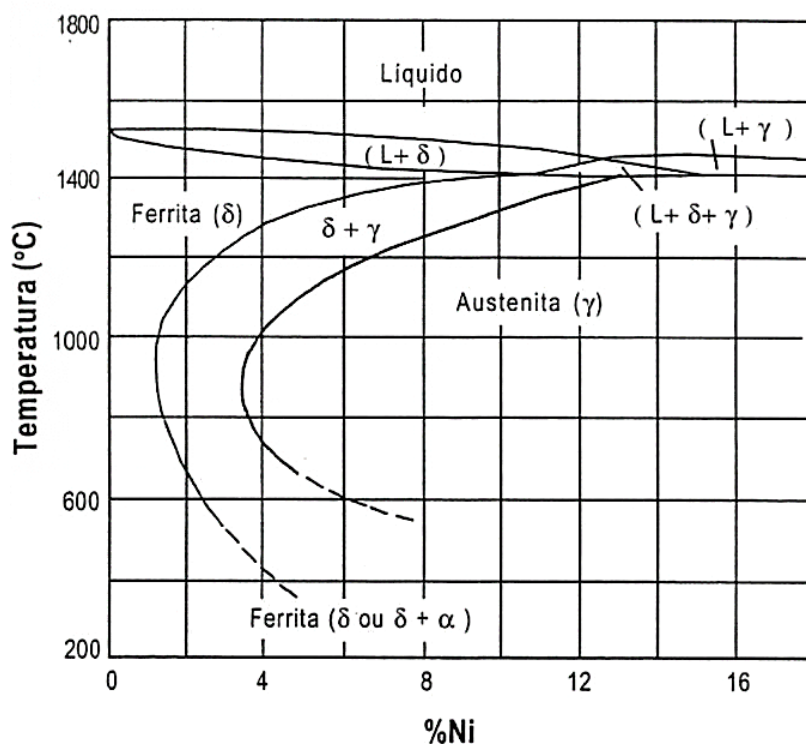
Tipo	Composição química diretriz					Aplicações específicas
	%C	%Cr	%Ni	%Mo	Outros	
AISI 303	0,15 máx.	18,0	9,0	0,60 máx.	S = 0,15 máx.	Peças torneadas para indústrias alimentícia e leiteira. Peças produzidas em tornos automáticos: parafusos, pinos, porcas etc. Peças para indústria automobilística e aeronáutica.
AISI 304	0,08 máx.	19,0	10,0	-	-	Válvulas e peças de tubulações, equipamentos hospitalares, trocadores de calor, equipamentos para indústria química, petroquímica, farmacêutica, metálicas, peças para construção mecânica, parafusos, rebites, tirantes, fio para molas etc.
AISI 304L	0,03 máx.	19,0	10,0	-	-	Mesmas aplicações do AISI 304, para partes soldadas que não podem ser solubilizadas posteriormente. É também aplicado nas indústrias aeronáutica e elétrica.
AISI 316	0,08 máx.	17,0	12,0	2,50	-	Mesmas aplicações do AISI 304, além de peças para construção naval. Possui melhor resistência à corrosão e oxidação que o AISI 304, além de propriedades mecânicas superiores. É amplamente empregado na indústria de papel.
AISI 316L	0,03 máx.	17,0	12,0	2,50	-	Mesmas aplicações do AISI 316, para partes soldadas.

Fonte: SILVA; MEI, apud LOPES, 2015

Deformação plástica em alguns aços inoxidáveis austeníticos podem originar transformação de fase (LU et al., 2016). Peças de aço AISI 304 produzidas por usinagem podem apresentar a formação da martensita na superfície (MARTIN et al., 2011). Aços inoxidáveis austeníticos são não endurecíveis por tratamentos térmicos e são não-magnéticos (ABOU-EL-HOSSEIN; YAHYA, 2005).

A metalurgia dos aços inoxidáveis austeníticos pode ser inicialmente melhor explicada pelo sistema Fe-Cr-Ni (SILVA; MEI, 2006). A Figura 1 mostra a seção vertical do diagrama de equilíbrio de fases para o sistema Fe-Cr-Ni com teor de 18% de cromo.

Figura 1 - Seção do diagrama de equilíbrio de fases para o sistema Fe-Cr-Ni com teor de Cr constante de 18%



Fonte: MODENESI, apud LOPES, 2015

Nota-se que a estrutura austenítica é predominante no diagrama quando os teores de níquel ultrapassam 8%. Em seguida, deve se considerar o efeito dos demais elementos da liga sobre o diagrama de equilíbrio Fe-Cr-Ni (SILVA; MEI, 2006).

2.2 Aços inoxidáveis Duplex

Os aços inoxidáveis duplex, apresentam microestrutura bifásica austenítica (γ) e ferrítica (α), com estrutura cúbica de face centrada (CFC) e cúbica de corpo centrado (CCC), sendo consideradas fases primárias (SANTOS, 2018). A formação de duas fases é determinada pelos elementos de liga que compõem as fases ferrítica e austenítica, principalmente os teores de cromo, níquel e molibdênio (JORGE; REIS; BALANCIN, 2011). As fases de ferrita e austenita estão presentes em frações de volume aproximadamente iguais, geralmente variando de 30 a 70% de ferrita (TUCKER; MILLER; YOUNG, 2015).

Os aços inoxidáveis duplex apresentam uma boa relação custo benefício, e são destinados a várias aplicações no setor industrial. Para processos que envolvem trabalho à quente, como laminação, fundição, forjamento ou extrusão, os aços

inoxidáveis duplex podem apresentar alterações microestruturais, especialmente relacionadas às proporções e morfologia da fase (YANG; YAN, 2013). Nomani (2014) apresentou algumas composições de aços inoxidáveis duplex, Tabela 2. É possível verificar que no aço duplex AISI 2205 o teor de cromo varia entre 22,0% e 23,0%, Níquel entre 4,5% e 6,5% e Molibdênio de 3,0% a 3,5%.

Tabela - 2 Composições químicas (% em massa) de alguns aços inoxidáveis duplex.

Tipo	AISI	UNS/ ASTM	C	Cr	Ni	Mo	N	Mn	Cu
Duplex	2205	S31803	0,03	22,0 - 23,0	4,5 - 6,5	3,0 - 3,5	0,14 - 0,20	2	-
Duplex	2304	S32304	0,03	21,5 - 24,5	3,0 - 5,5	0,05 - 0,6	0,05 - 0,20	2,5	0,05 - 0,6
Duplex	2507	S32750	0,03	24,0 - 26,0	6,0 - 8,0	3,0 - 5,0	0,24 - 0,32	1,2	0,5
Austenítico	316L	S31603	0,03	16,0 - 18,0	10,0 - 14,0	2,0 - 3,0	0,1	2	-
Duplex	329	S32900	0,08	23,0 - 28,0	2,5 - 5,0	1,0 - 2,0	-	1	-

Fonte: NOMANI, 2014

Nomani e outros (2013) analisaram a usinabilidade dos aços duplex AISI 2205, AISI 2507 e austenítico AISI 316L, no processo de usinagem por furação considerando força de corte e a rugosidade da superfície. Ao final concluíram que a usinabilidade do duplex AISI 2507 e AISI 2205 é baixa quando comparado com o austenítico AISI 316. Entre os três materiais as maiores forças de corte e rugosidade da superfície obtidas durante a usinagem foram: duplex AISI 2507, duplex AISI 2205 e finalmente o austenítico AISI 316L (NOMANI et al., 2013). Os aços inoxidáveis duplex tendem a ser difíceis de usar, isso devido ao seu maior teor de austenita e nitrogênio, com o aumento desses teores nas ligas a usinabilidade dos aços inoxidáveis duplex diminui rapidamente (PARO; HÄNNINEN; KAUPPINEN, 2001).

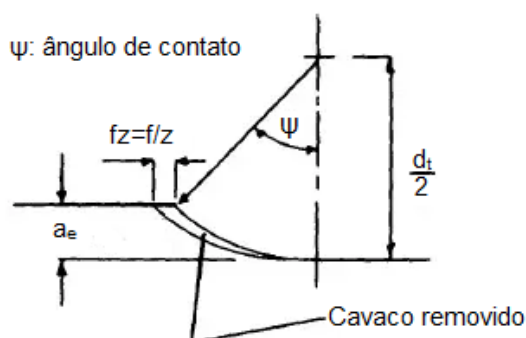
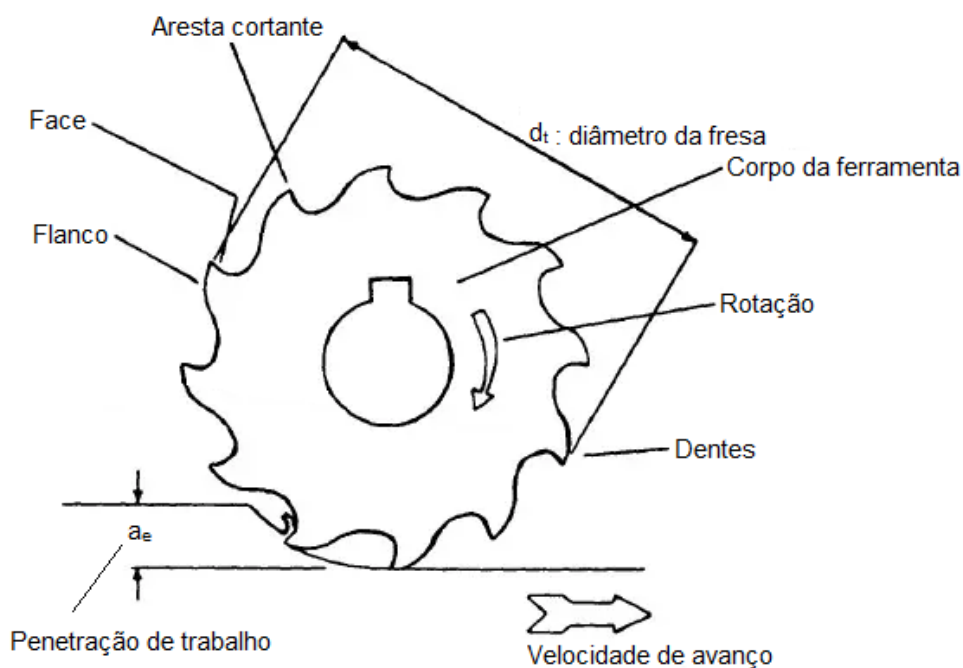
2.2 Usinagem por Fresamento

A usinagem é um processo de fabricação demandado pelas indústrias aeronáutica, naval e automobilística, necessário especialmente em peças que exigem qualidade da superfície (GOUVEIA et al., 2016). Propicia adequação dimensional e

acabamento da superfície da peça (GOUVEIA et al., 2016; MUÑOZ-ESCALONA; MAROPOULOS, 2015).

O fresamento é um processo de usinagem importante para a fabricação de superfícies planas, curvas e perfiladas (PHILIP SEVARAJ; CHANDRAMOHAN; CHANDRASEKAR, 2018). Nesse processo, a espessura do cavaco e a área de contato da pastilha da ferramenta na face de inclinação variam com a rotação da ferramenta. A área e a intensidade da fonte de calor mudam ciclicamente (CUI; ZHAO; PEI, 2012). A Figura 2 ilustra como se dá a remoção do cavaco no fresamento, “[...] a ferramenta ataca a superfície em usinagem com as suas arestas cortantes, e por meio do movimento de avanço o cavaco se desprende de forma irregular no espaço contido pelo chamado ângulo de contato ψ [...]” (LOPES, 2015, p.41).

Figura 2 - Remoção do cavaco pela ferramenta no processo de fresamento



Fonte: BOOTHROYD, apud LOPES, 2015

O fresamento é uma das operações de usinagem mais comuns para aços inoxidáveis, e em altas velocidades de corte aumenta a produtividade, melhora a qualidade do produto e reduz os custos de fabricação (LIU et al., 2013). O processo de fresamento de topo remove material de forma rápida com boa qualidade da superfície, (RAWANGWONG et al., 2014) utilizado na obtenção de superfícies planas de precisão de matrizes, moldes (RAWANGWONG et al., 2014; RYU; CHOI; CHU, 2006). Como um processo típico de corte interrompido, o fresamento frontal é amplamente utilizado para gerar superfícies lisas com alta precisão geométrica (CUI; ZHAO; PEI, 2012).

2.2.1 Fresas com pastilhas de metal duro

O metal duro é um compósito de vários carbonetos metálicos, tais como, tungstênio (W), titânio (Ti) e vanádio (V) ligados com aglutinante (KAZLAUSKAS et al., 2017). A fase WC é dura, e responsável por uma boa resistência ao desgaste e alta abrasividade, e a fase Co, aglutinante, responsável pela resistência do material (HINTZE et al., 2018). As arestas de corte feitas de WC-Co são mais resistentes ao desgaste, em comparação com as ferramentas fabricadas em aço rápido (KAZLAUSKAS et al., 2017).

Pesquisadores têm buscado soluções para melhoria do desempenho de ferramentas de corte para processos de usinagem em altas velocidades. Estudos mostram a utilização de revestimentos avançados com multicamadas, revestimentos com titânio, alumínio e associados a camadas de diamante, produzidos por PVD - Physical Vapour Deposition ou CVD - Chemical Vapor Deposition (SILVA; MARTINHO; BAPTISTA, 2014).

O PVD é um processo de deposição aplicado em camada única ou multicamadas em ferramentas de corte industriais para melhorar a resistência ao desgaste. Os revestimentos TiAlN possuem alta dureza e boa resistência à oxidação, o que proporciona uma boa proteção nas ferramentas de usinagem. Melhoram a vida útil das ferramentas em função das características como alta dureza em camada única ou multicamadas, alta resistência ao desgaste, resistência à corrosão, e resistência à oxidação em alta temperatura. (AHN et al., 2003; BRESSAN; HESSE; SILVA, 2001; CADENA et al., 2013; CHANG; YANG, 2018; DUCROS; BENEVENT; SANCHETTE,

2003; MCINTYRE et al., 2002; SHUGUROV; KAZACHENOK, 2018; SPRUTE et al., 2014)

2.2.2 Parâmetros de corte no fresamento

As tecnologias de fabricação avançadas incluem a usinagem em altas velocidades de corte, garantindo custos reduzidos e melhoria da qualidade da peça (MUÑOZ-ESCALONA; MAROPOULOS, 2015). O fresamento em alta velocidade é uma tecnologia que melhora a qualidade da superfície usinada, porém, outras operações são necessárias para melhoria do acabamento (SOUZA et al., 2014). É importante investigar a otimização dos parâmetros de corte para se obter um acabamento superficial com a rugosidade desejada. A modelagem do processo de corte consiste em definir os parâmetros e assegurar o conhecimento do acabamento superficial (RAWANGWONG et al., 2014). O estudo e definição prévia de fatores como a velocidade, profundidade de corte e avanço são fundamentais para o desempenho de uma operação de usinagem (PUERTAS ARBIZU; LUIS PÉREZ, 2003).

A velocidade de corte é a velocidade tangencial instantânea resultante da rotação da ferramenta em torno da peça (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2014). O avanço por dente “[...] é o percurso de avanço de cada dente, medido na direção do avanço da ferramenta, e corresponde à geração de duas superfícies de corte consecutivos [...]” (FERRARESI, 2011, p. 10). A profundidade de corte a_p é a profundidade ou largura de penetração da ferramenta em relação à peça (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2014).

A velocidade de corte tem influência sobre o desgaste e, conseqüentemente, sobre a vida da ferramenta na usinagem. Quando se aumenta a velocidade de corte, o tempo de usinagem diminui, mas o desgaste da aresta se acelera, por isso, essa ferramenta deve ser substituída com mais frequência (MACHADO et al. apud LOPES, 2015). A velocidade de corte em níveis mais altos provoca aumento da força de corte entre a aresta da ferramenta e a peça, causando lascamentos e trincas de origem mecânica na aresta de corte (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2014). O aumento da velocidade de corte diminuiu a rugosidade das superfícies usinadas e melhora o estado da superfície (CAKIR; ENSARIOGLU; DEMIRAYAK, 2009). (KORKUT et al., 2004).

2.2.3 Usinabilidade dos aços inoxidáveis

Os aços inoxidáveis são materiais típicos de difícil usinagem, mas essa dificuldade pode ser melhorada com a adição de enxofre, fósforo, ou selênio na liga (AKASAWA et al., 2003; FERRARESI, 2011). O encruamento da superfície é um dos fatores responsáveis pela baixa usinabilidade dos aços inoxidáveis austeníticos, “[...] eles se ligam muito fortemente à ferramenta de corte durante o cisalhamento do cavaco, podendo provocar danos à região de corte, especialmente em usinagem com ferramentas de metal duro [...]” (KORKUT et al., 2004, p.303). Os aços inoxidáveis austeníticos podem apresentar formação da aresta postiça de corte (APC) na ponta da ferramenta (ASILTÜRK; NEŞELI, 2012).

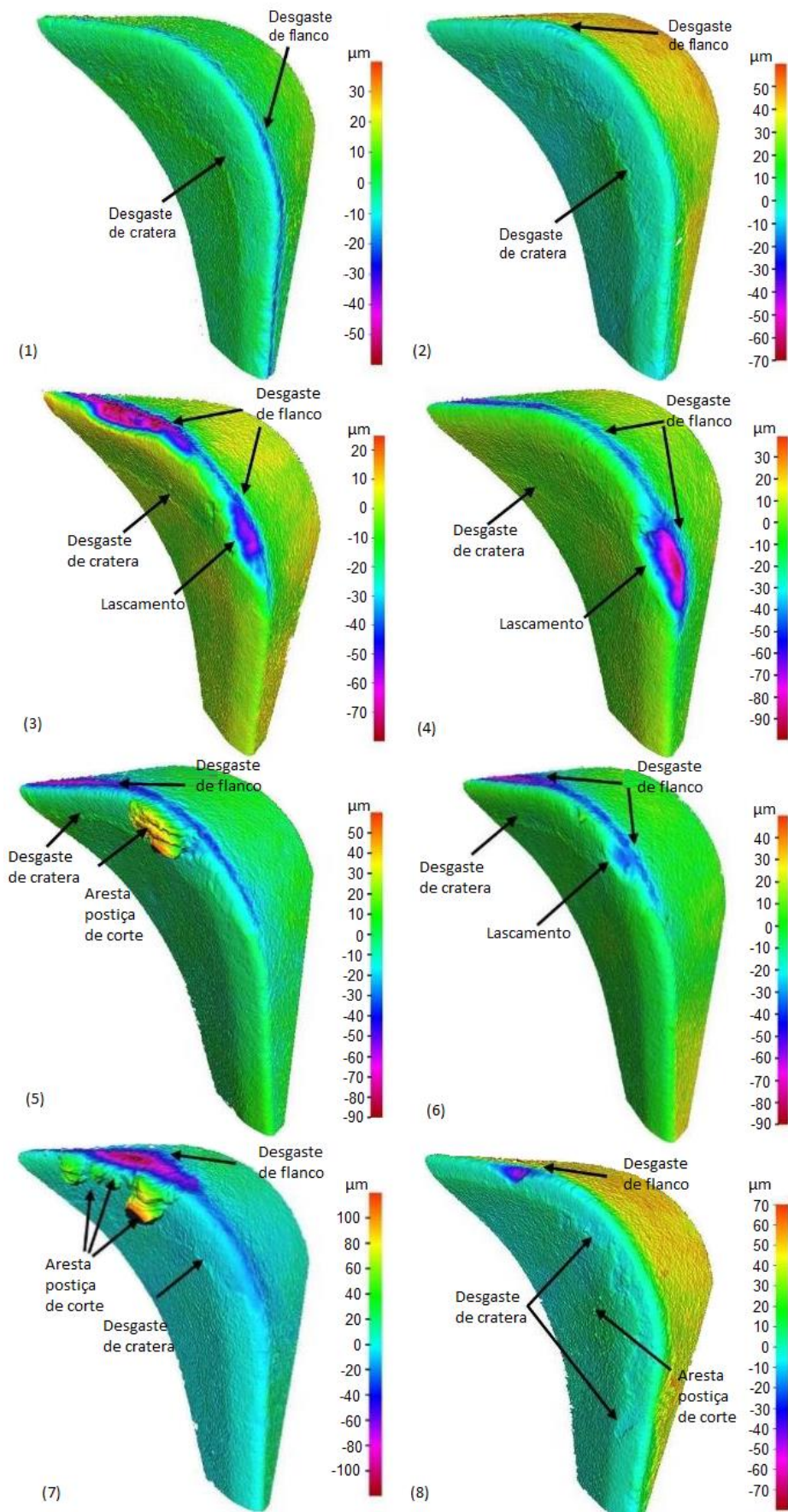
Pesquisadores têm buscado desenvolvimento e melhorias nos processos de usinagem dos aços inoxidáveis a partir de respostas na integridade da superfície do material.

Polishetty, Alabdullah e Littlefair (2017) fizeram testes de usinabilidade com o aço inoxidável superaustenítico (SASS) AL6XN. A variável analisada como resposta foi o desgaste da ferramenta medido em um perfilômetro óptico de superfície digital tridimensional. Os resultados mostraram vários tipos de desgaste na face (cratera) e no flanco da ferramenta de corte. “[...] Quatro tipos de desgaste foram identificados nas bordas da ferramenta de corte [...]” (POLISHETTY; ALABDULLAH; LITTLEFAIR, 2017, p.2). A Figura 3 aponta o desgaste de cratera, o desgaste de flanco, o lascamento e a aresta postiça de corte (APC).

O desgaste de cratera é causado pelo atrito entre ferramenta e o cavaco despreendido no corte, todos os ensaios mostrados na Figura 3 resultaram em desgaste de cratera, porém com valores diferentes, sendo os ensaios (7) e (8) mais significativos. O desgaste de flanco é o resultado da abrasão existente entre a peça e a ferramenta, em todos os ensaios realizados foram identificados esse tipo de desgaste, alterações na profundidade de corte e no avanço causaram aumento do desgaste de flanco, em velocidades de corte elevadas o desgaste diminuiu (POLISHETTY; ALABDULLAH; LITTLEFAIR, 2017).

A aresta postiça de corte foi identificada nas imagens (5), (7) e (8) obtidas no perfilômetro e mostradas na Figura 3. (APC) é um efeito indesejável na usinagem, que contribui para um pior acabamento superficial e pode comprometer a tolerância dimensional, além de acelerar o desgaste da ferramenta (NOMANI et al., 2016).

Figura 3 - Desgaste de cratera, desgaste do flanco, lascamento e APC.



Fonte: POLISHETTY; ALABDULLAH; LITTLEFAIR, 2017

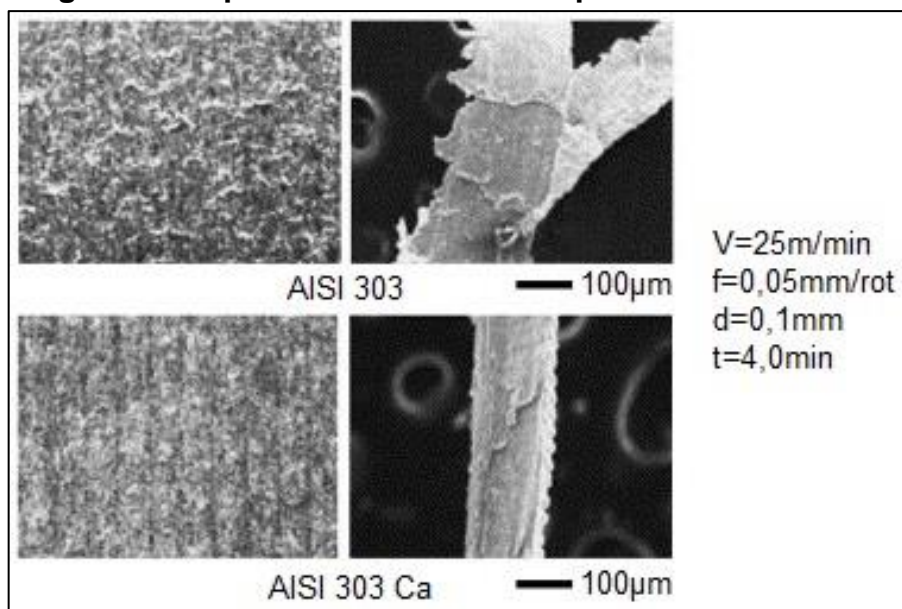
Lascamento é a separação partículas da borda da ferramenta de corte. “[...] Esse tipo de desgaste ocorreu quando o material foi usinado nas condições de corte (3) e (4), conforme mostrado na Figura 3, com avanço da ferramenta elevado e velocidade de corte baixa [...]” (POLISHETTY; ALABDULLAH; LITTLEFAIR, 2017).

Akasawa e outros (2003) conduziram experimentos para determinar os efeitos da adição de elementos de liga tais como S, Cu, Bi e Ca, na usinabilidade dos aços inoxidáveis austeníticos, tendo como referência a integridade da superfície usinada.

Os aços AISI 303, AISI 303Cu, AISI 303Ca, AISI 304 e AISI 316 foram fundidos em fornos de escala comercial e de indução a vácuo, e forjados a quente e a frio. Os testes de usinagem foram realizados a seco e com fluido de corte, aplicando pastilhas intercambiáveis de metal duro com profundidade de corte de 0,1mm, velocidades de corte entre 12,5 até 100m/min, e o avanço entre 0,05 a 0,1mm/rot.

A rugosidade dos aços inoxidáveis austeníticos resulfurados foi superior a dos aços não resulfurados, AISI 304 e AISI 304Bi. Nos aços resulfurados com adição de cobre, o valor da rugosidade diminuiu à medida que a velocidade de corte aumentou. Não houve aumento da rugosidade nos casos da adição de bismuto e cálcio aos aços não resulfurados.

Figura 4 - Superfícies usinadas e superfície dos cavacos.



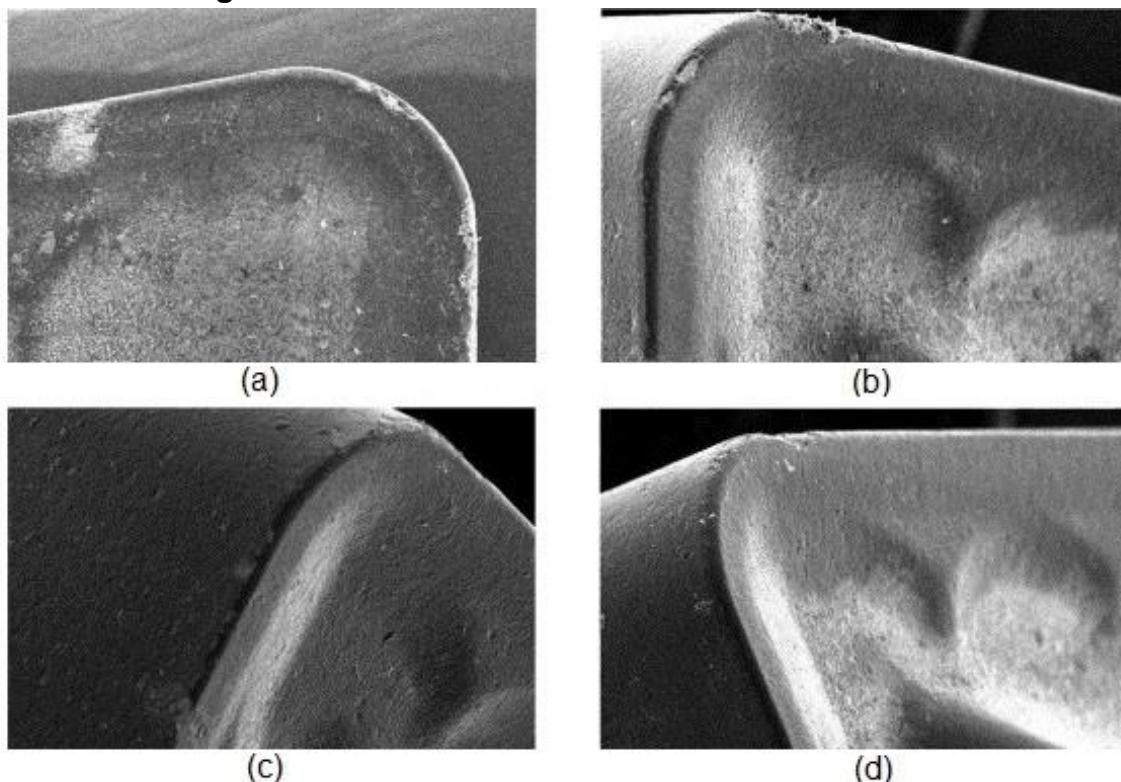
Fonte: AKASAWA et al., 2003

“[...] Ao usinar AISI 304 e AISI 304Bi com avanço de 0,05mm/rot, os cavacos ocasionalmente colidiram com a superfície do material, provocando marcas e arranhões que aumentaram a rugosidade [...]” (AKASAWA et al., 2003, p.67). A Figura 4 mostra o resultado da superfície usinada dos aços AISI 303 e 303Ca, além dos cavacos gerados no corte desses materiais, nota-se vestígios de aresta postiça de corte no cavaco gerado pela usinagem do aço AISI 303.

Ciftci (2006), constatou que a rugosidade superficial diminuiu quando se aumentou a velocidade de corte. Valores mais altos de rugosidade superficial em velocidades de corte mais baixas foram atribuídos à alta taxa de deformação superficial presente no processo.

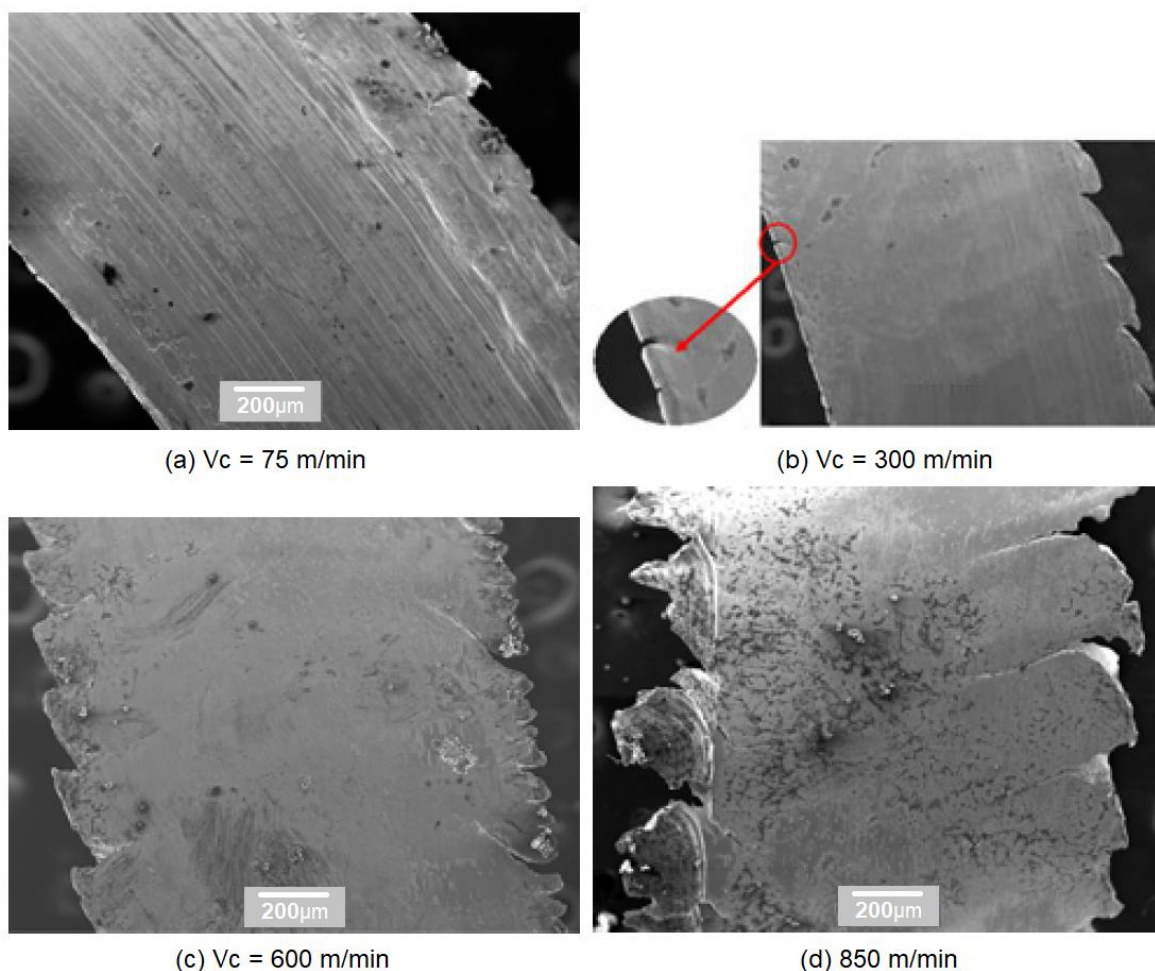
Trincas nas arestas de corte identificadas no exame de microscopia eletrônica de varredura (MEV) também foram responsáveis pelos altos valores de rugosidade superficial. A formação da aresta postiça de corte e o lascamento estiveram associados uns aos outros no caso de usinagem nos aços dúcteis AISI 304 e 316, elevando os valores de rugosidade da superfície (CIFTCI, 2006). A Figura 5 mostra as imagens da microscopia eletrônica de varredura (MEV), realizada nas ferramentas de corte, indicando lascamento.

Figura 5 - MEV realizado nas ferramentas de corte.



Fernández-Abia e outros (2011) realizaram ensaios de torneamento no aço inoxidável austenítico AISI 303, e concluíram pela existência de uma faixa inexplorada de velocidades de corte interessante para a usinagem. Os autores trabalharam em intervalos de velocidades de corte tradicionais inferiores a 350m/min, e, posteriormente compararam os resultados com velocidades de corte de até 870m/min. A Figura 6 mostra as superfícies dos cavacos resultantes das operações de torneamento.

Figura 6 - Superfícies dos cavacos nas diversas velocidades de corte utilizadas no experimento.



Fonte: FERNÁNDEZ-ABIA et al., 2011

Os cavacos produzidos em baixas velocidades de corte (abaixo de 300m/min) são caracterizados por descontinuidades em uma das bordas laterais. “[...] No entanto, em velocidades de corte acima de 300m/min, trincas e descontinuidades aparecem

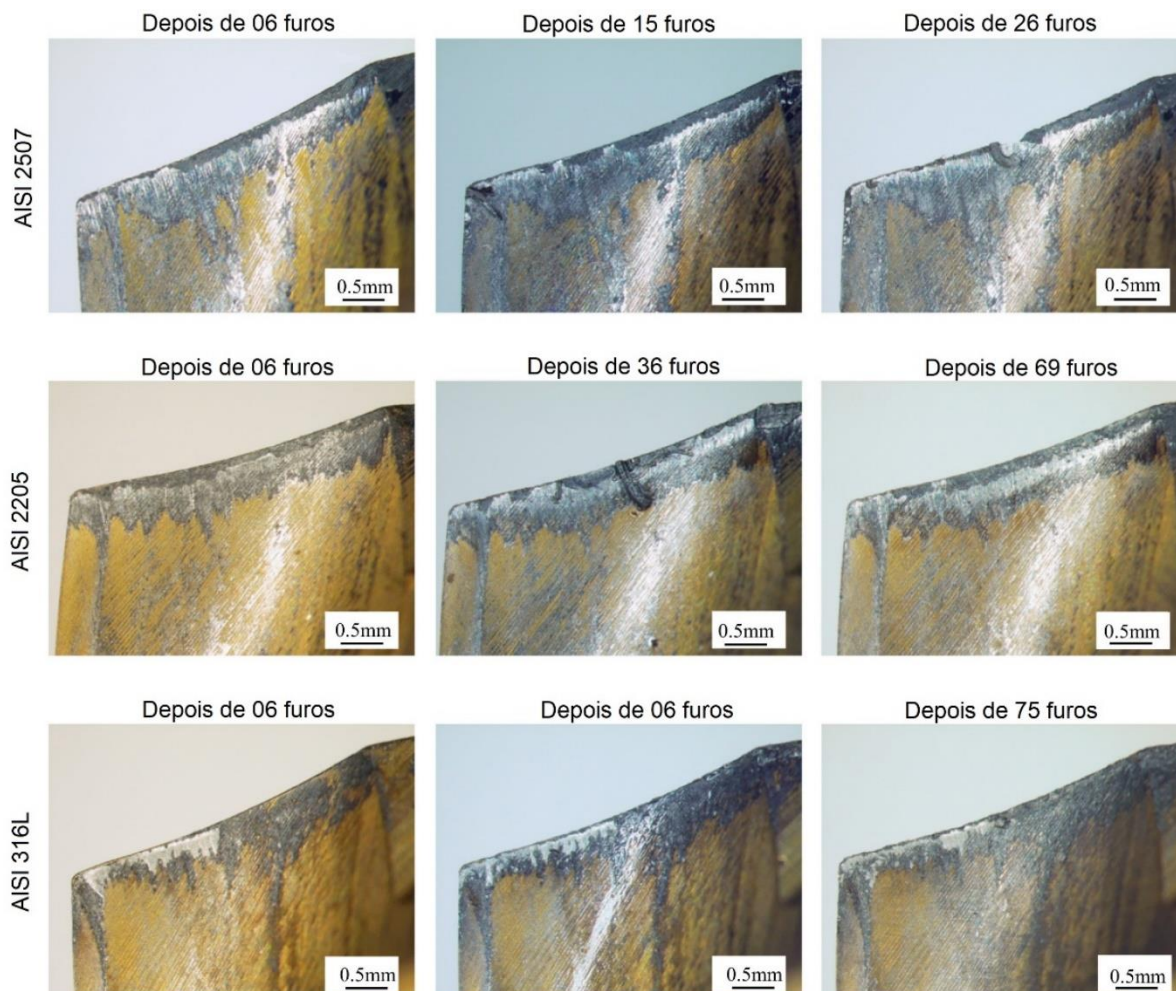
em ambas as bordas laterais devido à deformação severa que ocorre nessas altas velocidades de corte [...]” (FERNÁNDEZ-ABIA et al., 2011, p. 69).

Teja, Naresh e Rajasekhar (2013) executaram estudo experimental para avaliar a usinabilidade do aço inoxidável AISI 304 no processo de fresamento, utilizando a metodologia de planejamento experimental Grey-Taguchi. Os autores concluíram que a velocidade de corte influenciou em 56,90% na resposta do processo, seguido da profundidade de corte a_p em 22,43%. Através da ANOVA, os autores determinaram as condições ideais de usinagem para o experimento em $V_c = 95\text{m/min}$; $f_z = 800\text{mm/min}$ e $a_p = 0,8\text{mm}$.

Os estudos de Nomani e outros (2013) foram conduzidos para avaliação da usinabilidade nas ligas duplex AISI 2205, duplex AISI 2507 e austenítica AISI 316L no processo de usinagem por furação. Os parâmetros de verificação da usinabilidade adotados na pesquisa foram: desgaste da ferramenta, força de corte e acabamento superficial. As ligas de duplex apresentaram os piores índices de usinabilidade. A Figura 7 mostra as imagens das micrografias realizadas nas arestas das ferramentas de acordo com a progressão dos ensaios.

“[...] A abrasão aparece como o mecanismo de desgaste dominante devido ao atrito severo que ocorre entre o cavaco e a face da ferramenta. Isso remove o revestimento e parte da camada de metal duro da ferramenta. A adesão também é evidente devido a presença de fragmentos nas arestas de corte (NOMANI et al., 2013).

Figura 7 - Micrografias realizadas nas arestas das ferramentas de acordo com a progressão dos ensaios.



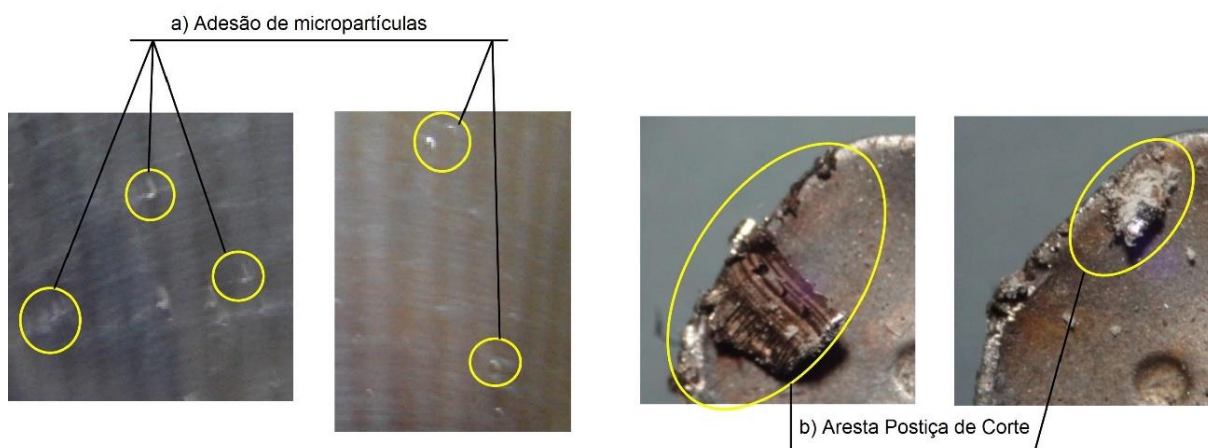
Fonte: NOMANI et al., 2013

Nayak et al. (2014) investigaram a influência dos parâmetros de corte no torneamento do aço inoxidável AISI 304. Os autores avaliaram três características importantes relativas à usinabilidade do material: a força de corte (F_c), a rugosidade R_a e a taxa de remoção do material (mm^3/min). Os parâmetros de corte otimizados pela análise experimental indicaram 88% de melhoria no processo, e foram ajustados em $V_c = 45\text{m}/\text{min}$; $f = 0,1\text{mm}/\text{rot}$ e $a_p = 1,25\text{mm}$.

Selaimia et al.(2017) modelaram as respostas da rugosidade R_a , potência de corte P_c , força de corte F_c , pressão específica de corte K_s e taxa de remoção do material (mm^3/min), em um processo de fresamento do aço inoxidável austenítico X2CrNi18-9 (AISI 304L) utilizando pastilhas de metal duro revestidas. Os autores utilizaram um planejamento fatorial completo e a ANOVA para avaliar a influência dos parâmetros de corte em cada parâmetro de saída proposto. Os resultados mostraram

que a rugosidade R_a e a pressão de corte K_s foram influenciados principalmente pelo avanço por dente f_z . A força de corte F_c e a potência de corte P_c foram consideravelmente influenciadas pela profundidade de corte a_p . A taxa de remoção do material foi afetada pela combinação de f_z e a_p . A Figura 8 ilustra os principais problemas de usinabilidade.

Figura 8 - a) Adesão de micropartículas na superfície fresada; b) Formação da Aresta postíça de corte.



Fonte: SELAIMIA et al., 2017

A baixa usinabilidade do aço inoxidável austenítico foi confirmada pelas micropartículas soldadas na superfície fresada.

2.3 Integridade de superfícies usinadas

Muñoz-Escalona e Maropoulos (2015) descrevem que o controle minucioso das superfícies usinadas se deve a razões estéticas, de segurança, e, principalmente em função das consequências nas propriedades mecânicas da peça. Parte dos problemas de integridade superficial são provenientes dos processos de fabricação dos componentes. “[...] As discontinuidades superficiais geralmente são causadas na elaboração do material, etapas do processo de fabricação em que a superfície foi produzida, e falta ou controle dos parâmetros [...]” (MUÑOZ-ESCALONA; MAROPOULOS, 2015, p. 216).

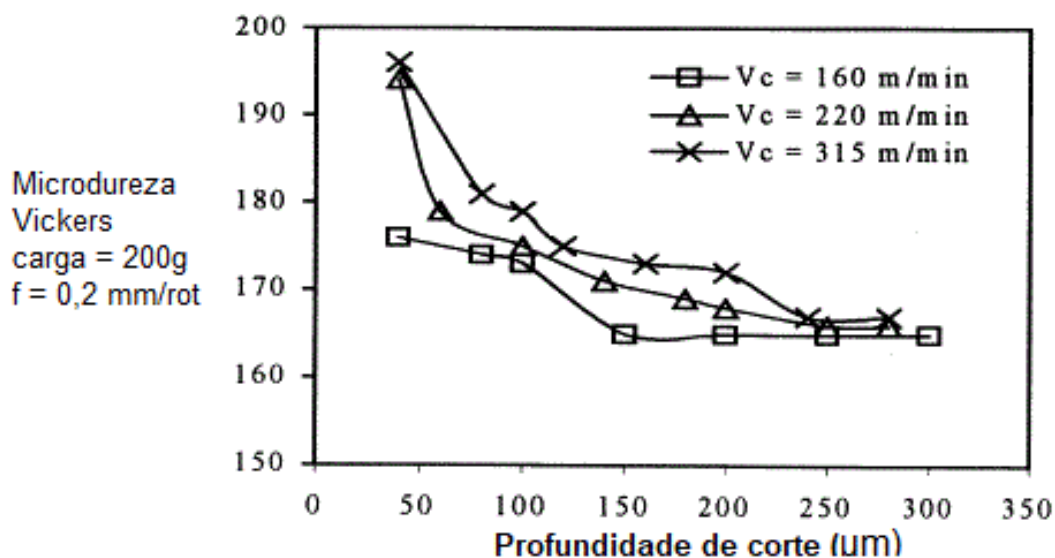
É de interesse para a indústria de usinagem investigar a relação inerente entre a integridade da superfície usinada e o seu desempenho (LI et al., 2014). Apenas os valores da resposta da rugosidade superficial, não são suficientes para representar

todas as características de uma superfície usinada. É necessário a utilização de recursos microscópicos, tais como microscopia de varredura eletrônica (MEV), espectroscopia de raios - X por dispersão em energia (EDS), difração de raios-X (medida de tensão) e parâmetros topográficos tridimensionais para uma avaliação mais aprofundada (RYU; CHOI; CHU, 2006).

O processo de corte e formação do cavaco provoca efeitos térmicos e mecânicos no material, originando tensão residual na camada superficial da peça de trabalho. O estudo de formação de tensão residual na superfície é essencial para garantir a qualidade das peças usinadas (HUANG; YANG, 2016). Estas tensões residuais podem ser monitoradas por técnicas de difração de raios X (SANTOS, 2018).

Bouzid Saï, Ben Salah e Lebrun (2001) investigaram as tensões residuais, microestrutura, rugosidade superficial e microdureza em aços carbono e em aços inoxidáveis duplex no fresamento. Eles concluíram que a alta velocidade de corte com menor taxa de avanço melhorou a qualidade da superfície de usinagem. Os resultados de rugosidade mostraram que as baixas velocidades de cortes provocam uma piora na qualidade de superfície, devido à formação de aresta postiça de corte. A microdureza aumentou com a velocidade de corte, como mostra a Figura 9.

Figura 9 - Evolução da microdureza Vickers em relação a profundidade de corte e diferentes valores de velocidade de corte.



Fonte: BOUZID SAÏ; BEN SALAH e LEBRUN, 2001

“[...] para melhorar a resistência do material ao desgaste e à fadiga, a velocidade de corte deve ser alta [...]” (BOUZID SAÏ; BEN SALAH; LEBRUN, 2001, p.449). Altos valores de velocidade proporcionam uma tensão residual superficial significativa.

Maurotto e outros (2017), aplicaram um planejamento experimental - DOE, para caracterizar os efeitos da usinagem a seco em condições severas de usinagem na integridade da superfície do aço inoxidável austenítico AISI 316L. Rugosidade superficial, dureza, fração de martensita, tensões residuais e defeitos superficiais (cavacos soldados, trincas) foram avaliados em relação aos parâmetros de corte (velocidade, profundidade de corte e avanço) construindo assim um modelo capaz de representar a operação.

A tensão residual foi levantada por meio do ensaio de DRX, a técnica de difração de elétrons retro espalhados (EBSD) foi utilizada para identificação da martensita induzida pela deformação plástica decorrente da usinagem. “[...] A martensita induzida por deformação é uma ocorrência comum em aços inoxidáveis austeníticos usinados em condições severas. A camada superficial deformada provocou elevadas tensões de tração e alta dureza local [...]” (MAUROTTO et al., 2017, p.43). A nanodureza dos cristais foi um parâmetro eficaz para estimar a deformabilidade desses cristais (PHAM; THUILLIER; MANACH, 2016).

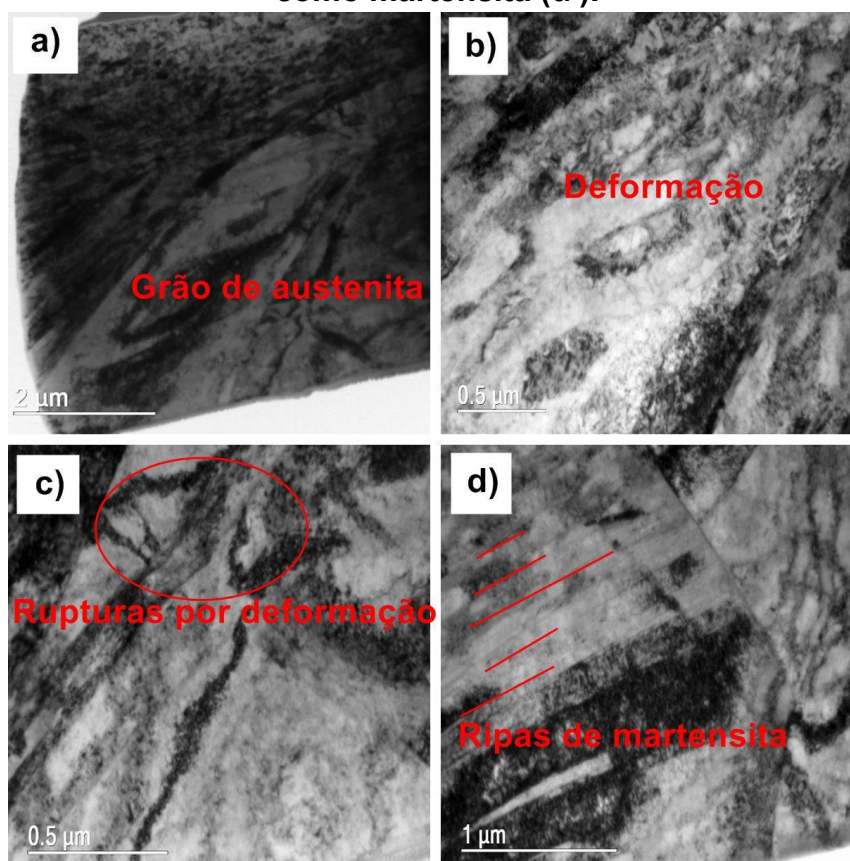
Santos (2018) apresentou um estudo referente a integridade superficial do aço inoxidável duplex 2205 pós-fresamento de topo em altas velocidades de corte no intuito de identificar a transformação volumétrica nas fases ferrita (α) e austenita (γ) do aço através da deformação provocada pela usinagem. O autor utilizou a microscopia de varredura eletrônica (MEV), microscopia de força atômica, difração de raios-X e nanoidentação como técnicas de caracterização das superfícies fresadas. “[...] Utilizando-se o método de raios X, foram encontradas alterações nos picos α (110) em comparação a amostra solubilizada, sugerindo a formação da martensita (α') pela diferença percentual no refinamento Rietveld e aumento de microdureza. Na MET foi possível visualizar linhas de deformação com possibilidade de serem martensitas induzidas por deformação plástica [...]” (SANTOS, 2018, p. 142).

Os resultados apontaram modificação de tensão residual compressiva na ordem de 600 MPa. Nas condições de maiores valores de avanços fz e velocidades Vc, ocorre também acréscimo percentual da fase CCC evidenciada pela diferença do espectro de DRX, com aumento na ordem de até 8%. Na microscopia de força atômica

(AFM) e microscopia de força magnética (MFM) é percebida a fragmentação da austenita quando se eleva a V_c e f_z . Na microscopia eletrônica de transmissão (MET) foi verificada deformações mais acentuadas na fase austenítica. As ripas de martensitas foram identificadas por MET (SANTOS, 2018).

A Figura 10 (a) “[...] ilustra a região de maior deformação e caracterizada como fase CFC, proveniente de uma região austenítica, observa-se na Figura 10 (b) deformações características de um alongamento em função da deformação plástica provocado pelo avanço de corte durante o fresamento, estes alongamentos provocaram microtensões de tração e consequentemente rupturas das lamelas Figura 10 (c), estas deformações evidenciaram as linhas de maclas que podem ser atribuído as ripas de martensitas (α') formadas por deformação plástica (SANTOS, 2018, p.139).

Figura 10 - MET da amostra VC600f016. a) lamela da austenita; b) deformação da região austenítica; c) ruptura das lamelas de austenita; d) linhas sugeridas como martensita (α').



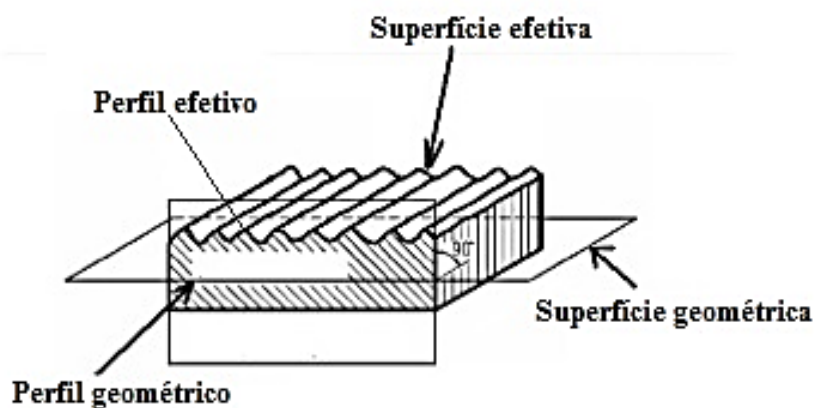
Fonte: SANTOS, 2018

2.3.1 Rugosidade superficial

Lopes (2015) descreve que a rugosidade superficial é a medida da textura de uma superfície, quantificada por desvios verticais de uma superfície real, a partir sua

forma geométrica ideal. No sistema métrico, é expressa em milésimos de milímetros (μm). As medições de rugosidade são efetuadas em um equipamento denominado rugosímetro, e são convertidas em parâmetros de rugosidade. Conforme ilustrado na Figura 11, a superfície real limita o corpo e o separa do meio ambiente, já a superfície efetiva é aquela obtida por instrumentos analisadores de superfície, e aproxima-se da superfície real à medida que se aumenta a precisão desses instrumentos. (AGOSTINHO, 2001; COSTA; SILVA; MACHADO, 2011; JUREVICIUS; SKEIVALAS; URBANAVICIUS, 2014; LOPES, 2015; TEDESCO, 2007).

Figura 11 - Superfície geométrica e superfície efetiva.

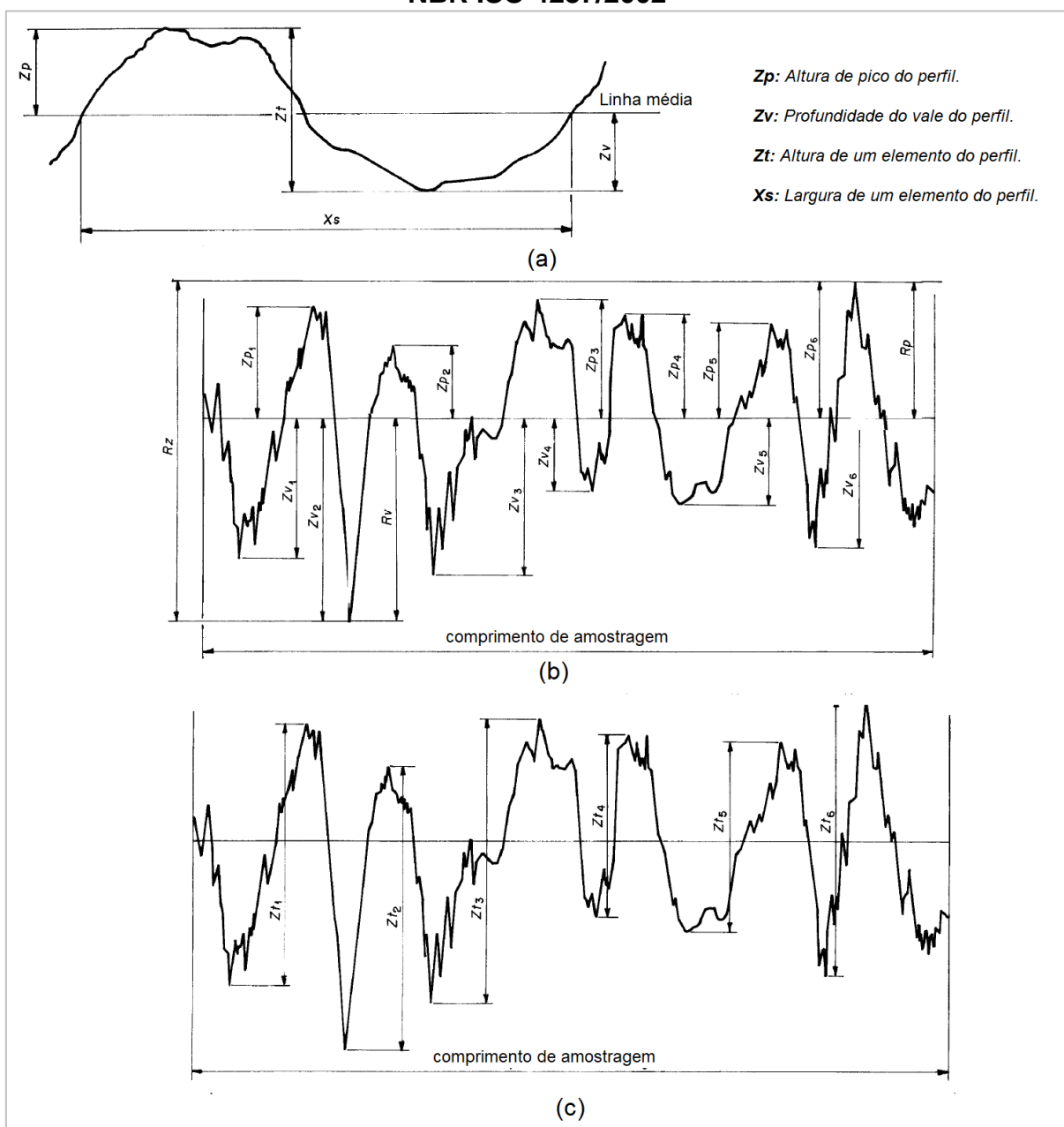


Fonte: AGOSTINHO apud LOPES, 2015

O rugosímetro mede os picos e vales de uma superfície. A medição ocorre por meio do deslocamento de uma agulha fabricada em diamante sobre a superfície do material. A NBR ISO 4287/2002 definiu para as especificações geométricas do produto, (GPS) - Rugosidade: Método do perfil - termos, definições e parâmetros da rugosidade (ABNT, 2005). A Figura 12 representa alguns termos geométricos do perfil de avaliação da rugosidade.

“[...] A porção positiva ou negativa do perfil em avaliação, tanto no trecho inicial como no final do comprimento de amostragem deve sempre ser considerada como um pico de um perfil ou um vale de um perfil. Quando se determinar o número de elementos do perfil em vários comprimentos de amostragem sucessivos, os picos e os vales do perfil em avaliação no início e no final são considerados apenas uma vez no início de cada comprimento de amostragem (ABNT, 2005, p.5).

Figura 12 - Elementos que compõem o perfil de rugosidade estabelecido na NBR ISO 4287/2002



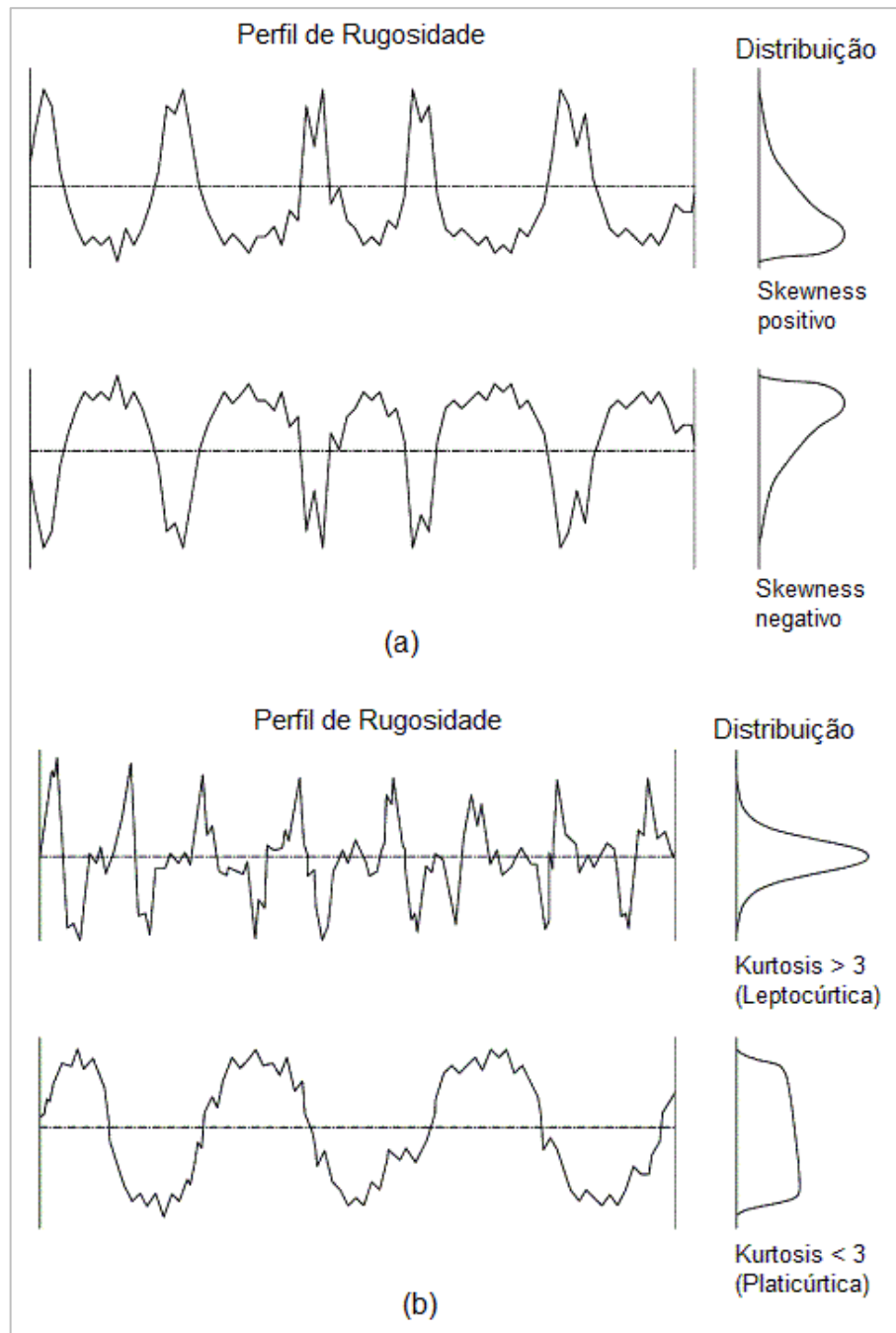
Fonte: ABNT, 2005

A NBR ISO 4287/2002 estabelece a definição de parâmetros de perfil de rugosidade sendo denominados:

- a) R_a - Média aritmética dos valores absolutos das ordenadas $Z(x)$, no comprimento de amostragem. É o parâmetro de rugosidade mais universalmente usado para controle geral de qualidade. É definido como o desvio médio absoluto das irregularidades da rugosidade da linha média ao longo de um comprimento de amostragem (GADELMAWLA et al., 2002).

- b) R_t - Altura total do perfil. Soma das maiores alturas de pico do perfil Z_p e das maiores profundidades dos vales do perfil Z_v no comprimento de avaliação;
- c) R_z - Altura das irregularidades do perfil. Soma da altura máxima dos picos do perfil Z_p e a maior das profundidades dos vales do perfil Z_v , no comprimento de amostragem, Figura 12 (b);
- d) R_c - Desvio aritmético médio das amplitudes de todos os picos e vales do perfil. O valor médio das alturas dos elementos do perfil Z_t no comprimento de amostragem, Figura 12 (c);
- e) R_p - Altura máxima do pico do perfil. Maior altura dos picos do perfil Z_p no comprimento de amostragem, Figura 12 (b);
- f) R_q - Desvio médio quadrático. Raiz quadrada da média dos quadrados das ordenadas, $Z(x)$, no comprimento de amostragem;
- g) R_v - Maior profundidade do vale do perfil no comprimento de amostragem Figura 12 (b);
- h) R_{sk} - Fator de assimetria do perfil avaliado (skewness), Figura 13 (a). É usado para medir a simetria do perfil sobre a linha média. Ele é fortemente influenciado por picos isolados ou vales isolados. Uma distribuição simétrica apresenta $R_{sk}=0$. Perfis que se destacam pelos vales profundos possuem assimetria negativa, e perfis que se destacam pelos picos altos têm assimetria positiva (GADELMAWLA et al., 2002).
- i) R_{ku} - Fator de achatamento do perfil avaliado (kurtosis), Figura 13 (b). $R_{ku} < 3$ indica que a curva de distribuição é achatada platicúrtica, $R_{ku} > 3$ indica que a curva de distribuição é considerada leptocúrtica, e apresenta muitos picos altos e vales profundos (GADELMAWLA et al., 2002).

Figura 13 - Fator de assimetria (skewness) e achatamento (kurtosis) do perfil de rugosidade



Fonte: GADELMAWLA et al., 2002

A rugosidade superficial é um dos requisitos importantes no processo de usinagem, ela se relaciona com as irregularidades da superfície (MAKADIA; NANAVATI, 2013). A rugosidade da superfície desempenha papel importante na resistência ao desgaste, ductilidade, resistência à tração, à corrosão e fadiga em peças usinadas (MUÑOZ-ESCALONA; MAROPOULOS, 2015).

Investigações mostram que falhas catastróficas de custo elevado podem ser atribuídas ao acabamento superficial dos componentes que afeta o coeficiente de atrito, manutenibilidade, lubrificidade, condutividade elétrica e térmica, tolerâncias geométricas, etc. (RAWANGWONG et al., 2014, FREYMAN; ZHAO; CHUNG, 2007).

A rugosidade superficial influencia no desempenho e na aparência da peça usinada e pode indicar propriedades específicas de materiais metálicos (GISARIO; BOSCHETTO; VENIALI, 2011). Nos processos de remoção de material, uma seleção inadequada de condições de corte fará com que se obtenham superfícies com alta rugosidade e erros dimensionais (PUERTAS ARBIZU; LUIS PÉREZ, 2003).

A rugosidade é uma medida da textura de uma superfície, e, no processo de usinagem, é uma consequência dos parâmetros de corte e geometria da ferramenta dentre outros (MUÑOZ-ESCALONA; MAROPOULOS, 2015). Na usinagem, os fatores que influenciam na rugosidade da superfície são os parâmetros de corte, o material da ferramenta e da peça, e as condições de usinagem (MAKADIA; NANAVATI, 2013). Independente do processo de usinagem, os parâmetros velocidade de corte, avanço e profundidade de corte, apresentam influência direta na resposta da rugosidade da superfície (PHILIP; CHANDRAMOHAN; RAJESH, 2015).

Nessa pesquisa os parâmetros de rugosidade R_a e R_t são utilizados como parâmetros de saída do planejamento experimental. A rugosidade R_a é o desvio médio do perfil da linha média ao longo do período de avaliação (DOI, 2012). A rugosidade R_t é definido como “[...] a distância entre duas linhas paralelas à linha média que tangenciam a saliência mais profunda e a reentrância mais profunda, medida no comprimento da amostragem. É o critério preferido pelas normas alemãs que a designam de R_t [...]” (AGOSTINHO, apud LOPES, 2015, p. 64)

2.4 Planejamento Experimental, *Design Of Experiments* - DOE

“[...] Planejamento experimental é um plano formalizado para condução de um experimento, onde o comportamento de variáveis de respostas é avaliado em função da variação planejada dos fatores de entrada [...]” (BARROS NETO; SCARMINIO; BRUNS, apud LOPES, 2015, p.65). Nas investigações de estudos de usinabilidade, o projeto estatístico de experimentos é usado extensivamente. O desenho estatístico dos experimentos, refere-se ao processo de planejamento dos experimentos, isso para que os dados possam ser analisados por métodos estatísticos, resultando em

conclusões válidas e objetivas (MONTGOMERY, 2009). “[...] O planejamento experimental, também denominado delineamento experimental, representa um conjunto de ensaios estabelecido com critérios científicos e estatísticos [...]” (BUTTON, apud LOPES, 2015, p.66).

“[...] são alguns benefícios da utilização das técnicas estatísticas de planejamento experimental: Redução do número de ensaios sem prejuízo da qualidade da informação; Estudo simultâneo de diversas variáveis, separando seus efeitos; Determinação da confiabilidade dos resultados; Realização da pesquisa em etapas, num processo iterativo de acréscimo de novos ensaios; Seleção das variáveis que influenciam num processo com número reduzido de ensaios; Representação do processo estudado através de expressões matemáticas; Elaboração de conclusões a partir de resultados qualitativos (BUTTON apud LOPES, 2015, p. 66)

Neste trabalho foi estabelecido a utilização da Metodologia de Superfície de Resposta (response surface methodology - RSM) para o planejamento experimental, e a análise de variância - ANOVA, para avaliação das respostas.

2.4.1 Metodologia de superfície de resposta RSM

Métodos de projeto experimentos como Metodologia de Superfície de Resposta (RSM) são amplamente utilizados, substituindo a abordagem experimental que utiliza um fator por vez, exorbitantemente demorada e de alto custo (MAKADIA; NANAVATI, 2013).

Metodologia de Superfície de Resposta (RSM) é um método adequado para buscar as condições otimizadas para a eficiência de um processo composto por multivariáveis. Esse método reduz o número de experimentos, melhora as possibilidades de interpretação estatística, e indica a interação entre duas ou mais variáveis (GHEVARIYA; BHATT; DAVE, 2011).

A Metodologia de Superfície de Resposta (RSM) concentra uma abordagem importante para a otimização de parâmetros de entrada com base em experimentos físicos, experimentos de simulação e observações experimentais. Esses modelos aproximados precisam ser avaliados estatisticamente quanto à sua adequação e podem ser utilizados para uma otimização do modelo inicial (ASILTÜRK; NEŞELI, 2012).

A metodologia de superfície de resposta é uma coleção de métodos estatísticos e matemáticos que são úteis para modelar a relação entre os parâmetros do processo

de entrada e a resposta de saída (MONTGOMERY, 2009). A metodologia de superfície de resposta tem sido importante para se estudar os efeitos dos parâmetros de usinagem na resposta da rugosidade superficial, O RSM quantifica a relação entre a resposta medida e os fatores de entrada. (PHILIP; CHANDRAMOHAN; RAJESH, 2015). A metodologia de superfície de resposta utilizando-se do experimento central composto, é útil para um pequeno número de variáveis (até cinco), mas é impraticável para um grande número de variáveis, devido ao elevado número de execuções experimentais necessárias (MOHANA et al., 2008).

Lopes (2015) relata que a superfície de resposta representam funções ou efeitos de aproximação conhecidos como modelo de regressão polinomial, “[...] esses modelos são de 1º ordem, que representa o efeito linear, de modelo de 2º ordem, que representa o efeito de curvatura através de uma combinação do efeito linear, quadrático e de interação [...]” (LOPES, 2015, p. 70).

O modelo estatístico dos efeitos de primeira ordem é dado pela equação 01:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon \quad (1)$$

E o modelo estatístico dos efeitos de segunda ordem é dado pela equação 02:

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

Onde:

$\sum_{i=1}^k \beta_i x_i$ - os termos de efeitos lineares

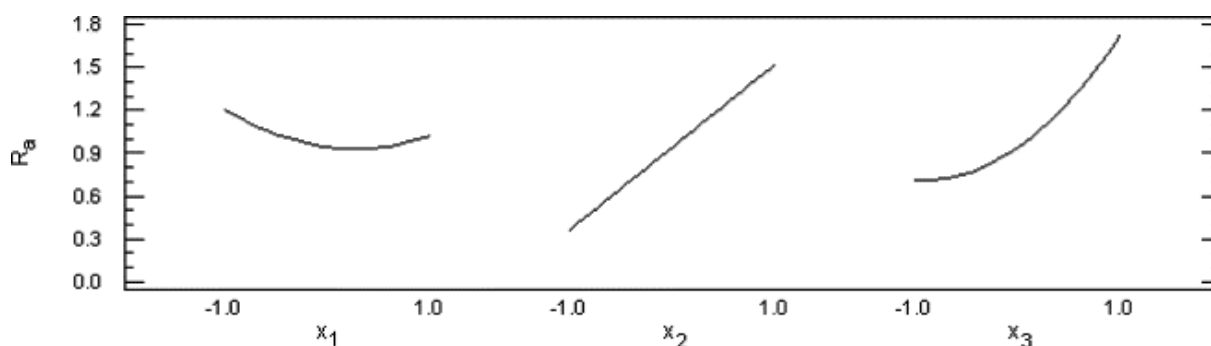
$\sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2$ - os termos quadráticos

$\sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon$ são os termos das interações

Puertas Arbizu e Luis Pérez (2003) aplicaram a metodologia de superfície de resposta para modelar as condições de corte em um processo de torneamento, a pesquisa buscou alcançar a melhoria da qualidade da superfície usinada. Os autores

observaram que as variáveis: avanço e profundidade de corte, influenciam negativamente a média de rugosidade superficial, uma vez que o aumento de qualquer um desses provocou o aumento da rugosidade. Por outro lado, encontraram um valor otimizado para a velocidade de corte que fornece um valor mínimo de rugosidade superficial. A Figura 14 mostra o gráfico de interação entre os parâmetros de corte e a resposta da rugosidade R_a estudada no experimento, onde x_1 , x_2 e x_3 são variáveis: velocidade de corte, avanço e a profundidade de corte respectivamente.

Figura 14 - Gráfico de interação entre os fatores de entrada e a resposta da rugosidade R_a .



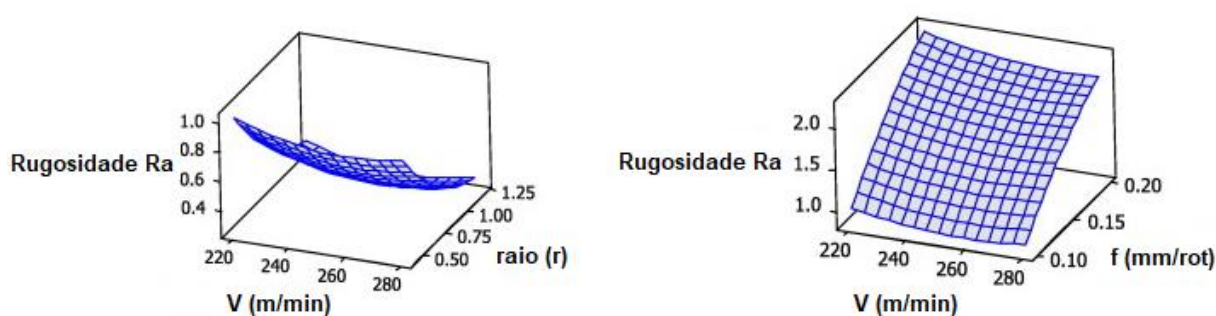
Fonte: PUERTAS ARBIZU; LUIS PÉREZ, 2003

A metodologia de superfície de resposta foi importante para o desenvolvimento do trabalho, “[...] isso foi executado de maneira eficiente e sem a necessidade de realizar um grande número de experimentos [...]” (PUERTAS ARBIZU; LUIS PÉREZ, 2003, p. 395). Modelos matemáticos experimentais para a predição da rugosidade superficial como variável fundamental na integridade superficial de componentes mecânicos permitem diminuir experimentos de tentativa e erro (MUÑOZ-ESCALONA; MAROPOULOS, 2015).

Sidda Reddy, Suresh Kumar e Vijaya Kumar Reddy (2011) estudaram a minimização da rugosidade da superfície através da integração do projeto do método experimental, metodologia de superfície de resposta (RSM) e algoritmo genético. A metodologia de superfície de resposta (RSM) foi utilizada para desenvolver um modelo preditivo de rugosidade superficial R_a . Baseado no modelo encontrado, o algoritmo genético foi utilizado para determinar as condições ótimas de corte, a fim de minimizar a rugosidade da superfície. Com a aplicação da metodologia, os autores relataram que a rugosidade da superfície foi melhorada em cerca de 44,22%.

Os experimentos de Makadia e Nanavati (2013) aplicaram a metodologia de superfície de resposta para otimizar os parâmetros de corte em um processo de torneamento no aço AISI 410. Um modelo matemático de previsão da rugosidade da superfície foi desenvolvido para o avanço por rotação, a velocidade de corte, a profundidade de corte e o raio da ponta da ferramenta. Os contornos da superfície de resposta foram construídos para determinar as condições ótimas para a rugosidade superficial desejada. A equação de predição da resposta da rugosidade também foi desenvolvida. A Figura 15 indica os resultados obtidos na pesquisa através da relação entre os fatores e a resposta em gráficos de superfície.

Figura 15 - Gráficos de superfície.



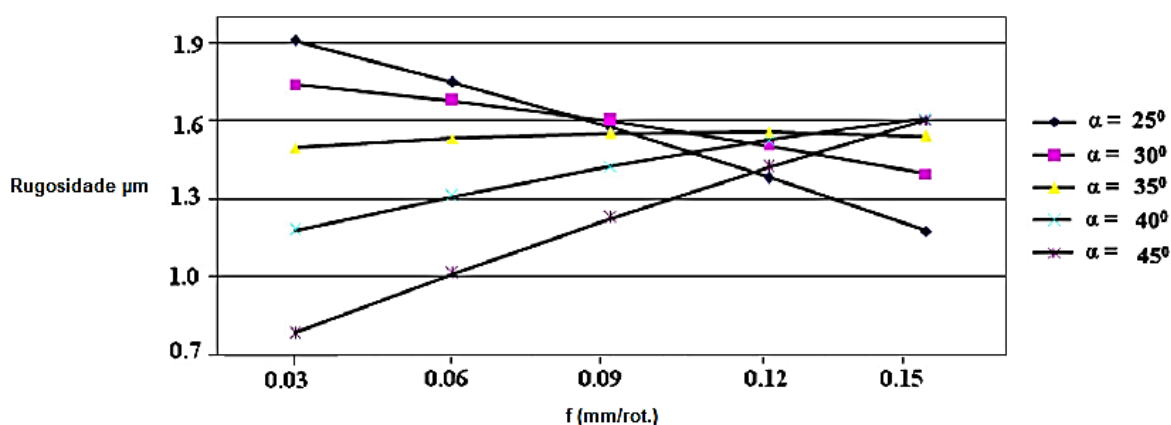
Fonte: MAKADIA; NANAVATI, 2013

Os autores concluíram que o avanço por rotação e o raio da ponta da ferramenta são os parâmetros de maior influência na resposta da rugosidade, e que a metodologia de superfície de resposta foi útil para a determinação da condição ideal da rugosidade.

Kalidass; Palanisamy (2014) investigaram a rugosidade superficial no fresamento de topo do aço inoxidável AISI 304 para propor um modelo de predição. A rugosidade superficial foi tomada como a variável de resposta, enquanto o ângulo da hélice da ferramenta, a velocidade de corte, o avanço e a profundidade de corte são tomados como parâmetros de entrada. A Figura 16 representa o gráfico de interação entre os níveis definidos do ângulo da hélice e os níveis do avanço da ferramenta na resposta da rugosidade.

A técnica de planejamento experimental (DOE) foi desenvolvida para quatro fatores em cinco níveis. “[...] O modelo de planejamento experimental mostrou-se capaz de prever melhor a rugosidade da superfície dentro da faixa pretendida [...]” (KALIDASS; PALANISAMY, 2014, p. 8065).

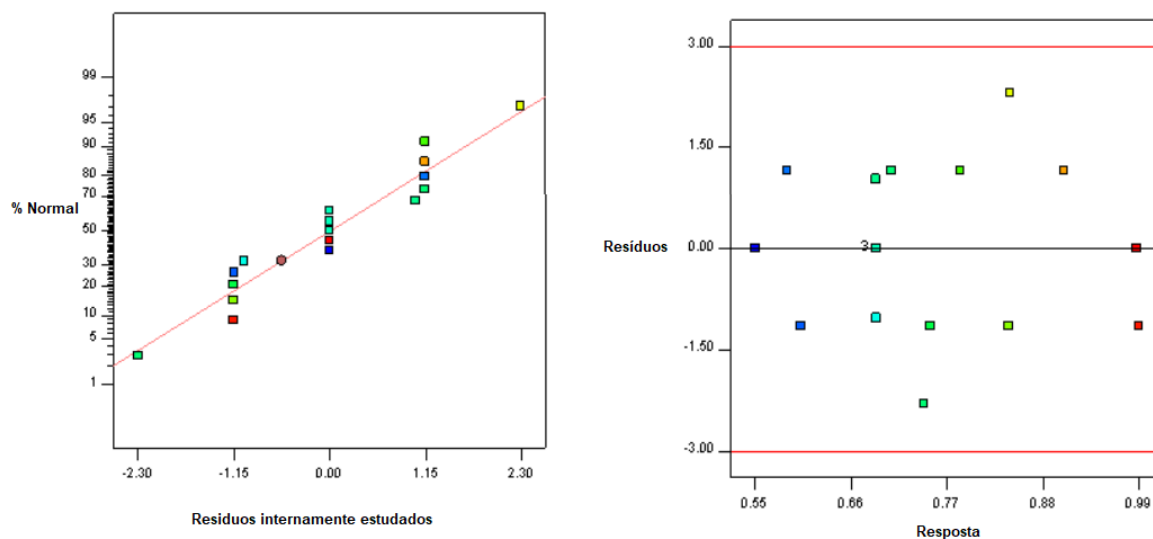
Figura 16 - Gráfico de interação entre os fatores de entrada e a resposta da rugosidade Ra.



Fonte: KALIDASS; PALANISAMY, (2014)

Philip, Chandramohan e Rajesh (2015) desenvolveram um modelo matemático capaz de prever a resposta da rugosidade superficial em função dos parâmetros de corte, utilizando um projeto de metodologia de superfície de resposta, a investigação foi feita no processo de fresamento de topo em uma liga de aço inoxidável duplex, variando-se da velocidade de corte, o avanço e a profundidade de corte. A adequação do modelo foi verificada por meio da análise de variância. Os gráficos de probabilidade normal dos resíduos e os gráficos dos resíduos versus as respostas previstas para os valores de Ra são mostrados na Figura 17. No gráfico de probabilidade, os resíduos geralmente caem em linha reta, implicando que os erros são normalmente distribuídos. O gráfico de Resíduos versus Resposta revelou que os resíduos não apresentaram um padrão óbvio e a sua estrutura é incomum. “[...] Isso implica que o modelo proposto é adequado e não há razão para suspeitar de qualquer violação das premissas de independência ou variância constante [...]” (PHILIP; CHANDRAMOHAN; RAJESH, 2015, p. 347). Os autores concluíram que o avanço foi o fator que mais influenciou na resposta da rugosidade, seguido da profundidade de corte e velocidade de corte respectivamente.

Figura 17 - Gráficos de distribuição de probabilidade e resíduos versus resposta.

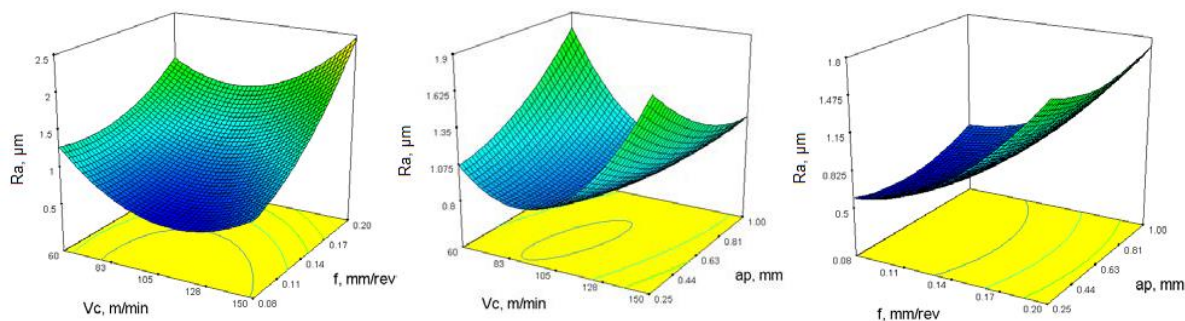


Fonte: PHILIP; CHANDRAMOHAN; RAJESH, 2015

Berkani e outros (2015) através da metodologia de superfície de resposta modelaram as equações que caracterizam a usinabilidade do aço AISI 304 no torneamento. Os autores relacionaram a força de corte, a pressão específica de corte, a potência de corte e a rugosidade superficial aos parâmetros de corte, velocidade de corte, avanço e profundidade de corte.

Por meio da análise de variância os resultados mostraram que o avanço influenciou em 71,04% na resposta da rugosidade e que a profundidade de corte afetou em 60,74% na potência de corte e 67,11% na força de corte, além da velocidade de corte que influenciou em 41,43% na pressão específica de corte. A Figura 18 mostra o gráfico de superfície de resposta gerado na análise do experimento para a rugosidade R_a , em função dos parâmetros de corte V_c e f . “[...] A metodologia de superfície de resposta, associada a técnica de otimização de múltiplas respostas foi utilizada para determinar os parâmetros de usinagem ideais do modelo: $V_c = 104,54\text{m/min}$, $f = 0,08\text{mm/rot}$ e $a_p = 0,295\text{mm}$ [...]” (BERKANI et al., 2015, p.539).

Figura 18 - Gráficos de superfície de resposta.



Fonte: BERKANI et al., 2015

Na Figura 19 é possível verificar alguns resultados por meio de imagens, a face da superfície usinada apresentou a presença de micropartículas do material, aderidas em função do processo de torneamento. A aresta cortante na ponta da ferramenta foi comprometida com o acúmulo de material aderido (APC).

Figura 19 - Micropartículas aderidas na superfície e (APC) na ferramenta de corte.



Micropartículas aderidas à face da superfície usinada.

Presença de aresta postiça de corte (APC).

Fonte: BERKANI et al., 2015

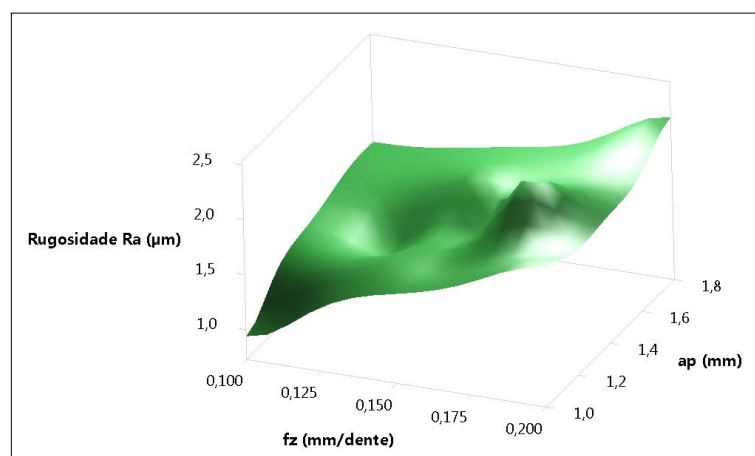
Lopes (2015) apresentou uma análise da evolução da rugosidade superficial no fresamento do aço inoxidável AISI 304. O autor apresentou uma investigação baseada em técnicas de planejamento experimental no fresamento frontal de faceamento a seco, utilizando da variação da velocidade de corte (V_c) entre 100m/min e 400m/min; avanço por dente (f_z) entre 0,04mm/dente e 0,12mm/dente e profundidade de corte (a_p) de até 1,8mm. Os resultados dessa pesquisa mostraram que o parâmetro avanço

por dente (f_z) é o mais influente na resposta da rugosidade R_a . O autor também testou insertos intercambiáveis com quebra-cavacos, positivo e negativo, a geometria de quebra-cavaco negativo resultou em superfícies com menores valores de rugosidade R_a .

“[...] As ferramentas estatísticas de planejamento e análise experimental utilizadas na pesquisa foram fundamentais para a obtenção de resultados concretos e tangíveis sobre os efeitos individuais e coletivos dos parâmetros de corte na evolução da rugosidade da superfície usinada pelo processo de fresagem (LOPES, 2015, p.136).

A Figura 20 retirada da pesquisa, representa a influência dos parâmetros de corte f_z e a_p na resposta da rugosidade R_a utilizando-se pastilha - B, com quebra cavaco positivo, da proposta experimental.

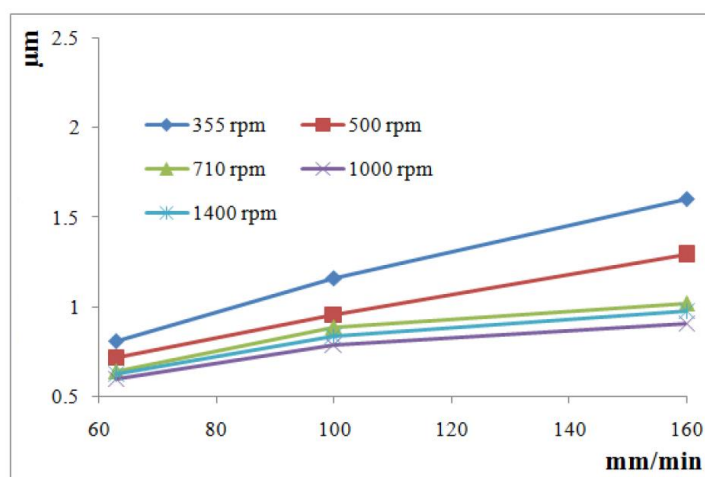
Figura 20 - Representação gráfica da superfície: f_z e a_p , Pastilha (B).



Fonte: LOPES, 2015

Philip Sevaraj, Chandramohan e Chandrasekar (2018) utilizaram o planejamento experimental para investigarem a usinabilidade de aços inoxidáveis no fresamento, variando a rotação do eixo da máquina e o avanço da ferramenta, tendo como referência a rugosidade superficial. Resultados mostraram que com o aumento da velocidade de avanço da ferramenta, a rugosidade superficial aumentou. A Figura 21 ilustra a evolução da rugosidade em função do aumento a velocidade de avanço da ferramenta.

Figura 21 - Evolução da rugosidade superficial em função do avanço da ferramenta de corte ao longo dos experimentos.



Fonte: PHILIP SEVARAJ; CHANDRAMOHAN e CHANDRASEKAR 2018

Kuram e Ozcelik (2016) investigaram o micro fresamento de aço inoxidável AISI 304, os pesquisadores conduziram um estudo experimental para verificarem a influência dos parâmetros de corte no: desgaste da ferramenta, na força de corte e na rugosidade superficial. A ANOVA, mostrou que o avanço da ferramenta foi fator mais significativo para todas as respostas de saída.

A análise é realizada para um nível de significância de 5% , ou seja, para um nível de confiança de 95% (SELAIMIA et al., 2017). Kuram e outros (2010) utilizaram a análise de variância para obterem a otimização dos parâmetros de corte que mais influenciam no desgaste e nas forças que compõem as ferramentas de corte em um processo de fresamento do aço inoxidável AISI 304. Eles testaram também dois tipos de fluidos de corte, que entraram como parâmetros de avaliação. Os experimentos resultaram em configurações ideais para a realização do processo, para menor desgaste a otimização resultante da ANOVA foi: $V_c = 200\text{m/min}$; $f = 0,3\text{mm/rot}$ e $a_p = 0,2\text{mm}$; para as forças de corte em x e em y a ANOVA apontou: : $V_c = 150\text{m/min}$; $f = 0,2\text{mm/rot}$ e $a_p = 0,2\text{mm}$. “[...] O uso da análise de variância - ANOVA foi determinante na otimização dos parâmetros de corte em relação ao desgaste da ferramenta [...]” (KURAM et al., 2010, p. 1296).

Lopes e outros (2019) investigaram a otimização dos parâmetros de fresamento na resposta da rugosidade superficial R_a e R_z na superfície do aço inoxidável austenítico AISI 304, utilizando ferramentas de corte de pastilha de metal duro WC-

Co, com e sem revestimento de TiAlN. Os autores aplicaram a Análise de Variância - ANOVA para obtenção da otimização numérica do planejamento experimental. “[...] A função da otimização numérica (teórica) é fornecer informações úteis para tomada de decisão sobre os parâmetros do processo, testes práticos podem validar ou não o resultado encontrado [...]” (LOPES, 2015, p. 115). “[...] O teste de análise de variância (ANOVA) foi realizado para determinar o nível de significância dos parâmetros de usinagem na resposta da rugosidade [...]” (LOPES et al., 2019, p. 5). Os resultados numéricos da ANOVA realizada são mostrados na Tabela 3. O valor - P mostrado na Tabela 3 é um índice estatístico utilizado na análise de variância, se valor - P $\leq \alpha$ a associação é estatisticamente significativa, se valor - P $> \alpha$ a associação não é estatisticamente significativa. Em geral, se o valor numérico de P na ANOVA for menor que 0,05, o modelo é identificado como estatisticamente significativo com 95% ou mais de nível de confiança (MONTGOMERY; RUNGER, 2007; KHAN; MAITY, 2017 apud LOPES et al., 2019).

Tabela 3 - Resultados da Análise de Variância ANOVA

Parâmetro	Ferramenta WC - Co				Ferramenta PVD TiAlN			
	Ra, (μm)		Rz, (μm)		Ra, (μm)		Rz, (μm)	
	Valor - P	Cont.%	Valor - P	Cont.%	Valor - P	Cont.%	Valor - P	Cont.%
Vc	0.0041	18.99	0.0093	12.99	0.1237	4.68	0.0080	7.67
fz	0.0024	22.58	0.0008	28.47	0.0393	9.30	0.0005	18.22
ap	0.2137	2.44	0.0401	6.99	0.2482	2.49	0.0105	6.93
Vc ²	0.0037	0.31	0.0635	7.36	0.2994	29.67	0.1520	22.47
fz ²	0.0015	30.03	0.0187	8.27	0.0699	2.88	0.2387	0.66
ap ²	0.5872	0.44	0.2716	1.70	0.1039	5.30	0.4208	0.50
Vc*fz	0.2243	2.32	0.0635	4.58	0.0052	20.92	0.0001	35.40
Vc*ap	0.9771	0.00	0.0187	1.14	0.3720	1.45	0.8740	0.02
fz*ap	0.0283	9.07	0.2716	15.90	0.0710	6.76	0.2397	1.10

Fonte: LOPES et al., 2019

Os resultados mostraram que, para ferramentas de corte sem revestimento, o parâmetro fz, quadrático, 30,03% e linear, 28,47%, proporcionaram os maiores efeitos na resposta da rugosidade. Para as ferramentas com revestimento de TiAlN, a interação entre os parâmetros Vc e fz causou maior influência na resposta de rugosidade Ra, 20,92% e Rz 35,40%.

Na investigação os autores aplicaram a estatística de Anderson-Darling (AD) para identificar o comportamento dos dados em relação ao tipo de distribuição de probabilidade. Um gráfico de probabilidade é um método para determinar se os dados da amostra obedecem a uma distribuição hipotética baseada no exame visual

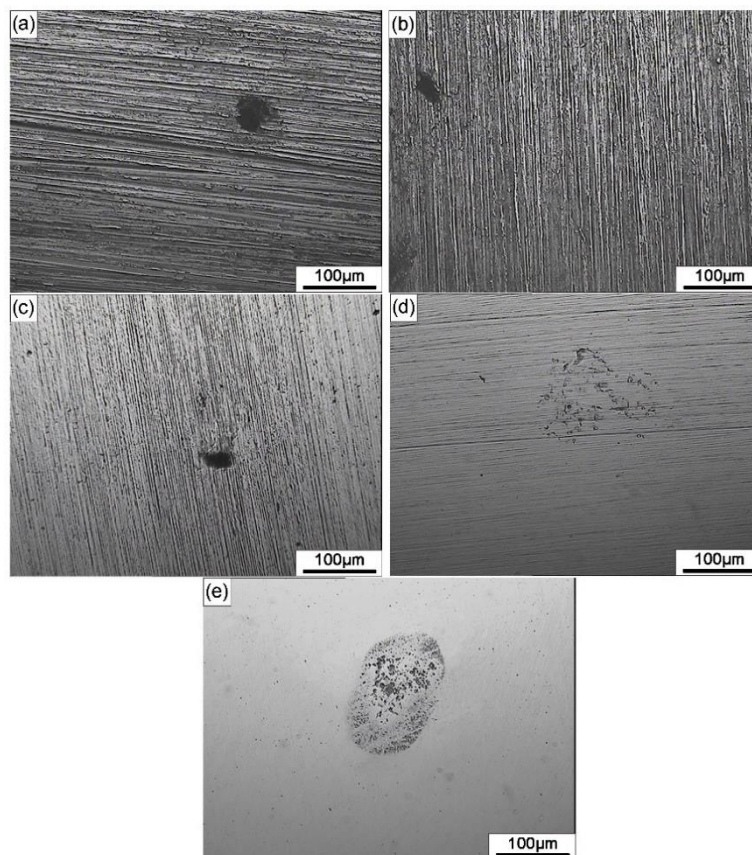
subjetivo dos dados (MONTGOMERY, 2009). A estatística Anderson Darling é usada para calcular o valor de P para o teste de qualidade do ajuste, que ajuda a determinar o que melhor se adapta a distribuição de seus dados (MONTGOMERY; RUNGER, 2007). Em geral, quanto melhor a distribuição se ajusta aos dados, menor o valor da estatística AD (MONTGOMERY, 2009).

2.5 Ensaios de corrosão eletroquímica

TANG et al., (2019) pesquisaram a influência da rugosidade da superfície no comportamento de corrosão por pites do aço inoxidável duplex AISI 2205 usando técnicas de ruído eletroquímico e observação morfológica. Os autores prepararam 05 amostras do aço recozidas a 1050°C por 01 hora e resfriadas em água, na sequência efetuaram o embutimento em resina epóxi expondo uma superfície de 10mm x 10mm para os ensaios. As diferentes rugosidades foram obtidas através do lixamento com diferentes granulações, sendo: 180, 600, 1000 e 2000 mesh, e uma amostra polida em pasta de diamante 2,5µm. “[...] As medições do ruído eletroquímico foram realizadas em um potenciostato/galvanostato multicanal com um galvanômetro integrado de resistência zero. O eletrodo de referência utilizado em todos os testes eletroquímicos foi um eletrodo de calomelano saturado [...]” (TANG et al., 2019, p.3).

Na medição do potencial de circuito aberto, Open Circuit Potential - OPC os autores utilizaram como eletrólito uma solução de 10% de cloreto férrico hexahidratado $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ em temperatura controlada de 50°C. Nas medições potencioestáticas, foi aplicado um eletrodo de platina, e o eletrólito de teste foi uma solução de cloreto de sódio NaCl 1 M. O potencial aplicado e a temperatura experimental foram mantidos em 200 mV_{SCE} e 50°C. A Figura 22 mostra os resultados das imagens de microscopia óptica relacionando-as à rugosidade obtidas pelo lixamento: (a) 180, (b) 600, (c) 1000, (d) 2000 e (e) polido.

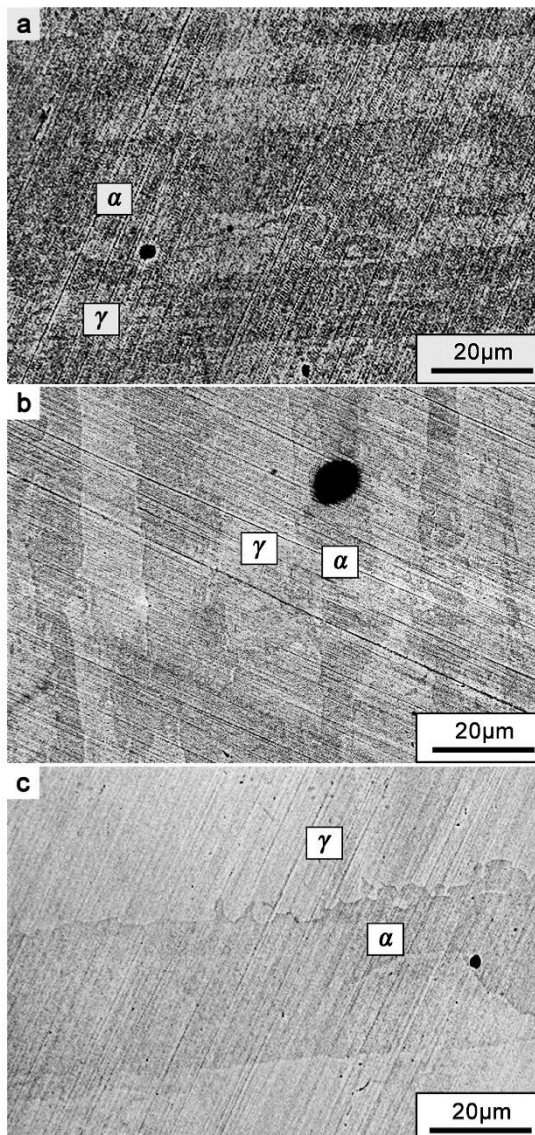
Figura 22 - Microscopia óptica das amostras em diferentes rugosidades após ensaios de corrosão.



Fonte: TANG et al., 2019

A Figura 23 mostra que a corrosão por pite é iniciada principalmente na fase ferrítica, que aparece como a fase mais escura para diferentes amostras de rugosidade da superfície. “[...] Esse resultado é atribuído principalmente à variação da resistência à corrosão das fases de ferrita e austenita no aço inoxidável duplex AISI 2205, que revela a resistência à corrosão por corrosão de ligas em solução contendo cloretos [...]” (TANG et al., 2019, p.17)

Figura 23 - Diferentes amostras de rugosidade da superfície evidenciando a presença de corrosão por pites: (a) 180, (b) 1000 e (c) polido.



Fonte: TANG et al., 2019

TANG et al., (2019) concluíram que as superfícies mais rugosas diminuíram a resistência à corrosão após os ensaios, e ficaram mais vulneráveis à corrosão por pites, porém, a variação da rugosidade não foi determinante para indicar a propagação do processo de corrosão, essa condição foi relacionada principalmente ao conteúdo químico das fases presentes no aço inoxidável duplex AISI 2205.

O comportamento de um material em exposição a um processo de corrosão depende da sua tendência de reação ao meio. Pandey, Singh e Singh (1997) avaliaram o comportamento de amostras do aço inoxidável austenítico AISI 304 tratadas termicamente e submetidas ao processo de corrosão eletroquímica em mistura de ácido inorgânico. Os autores analisaram amostras tratadas termicamente

na faixa de 400C°, 500C° e 600C° em um potenciostato com o meio químico composto por 75% de ácido sulfúrico, H₂SO₄, e 25% de ácido nítrico, HNO₃. Concluiu-se que a taxa de corrosão aumentou com o aumento da temperatura e do tempo do tratamento térmico, atribuiu-se isso a precipitação de carboneto de cromo nos limites dos grãos (PANDEY; SINGH; SINGH, 1997).

Leban et al., (2014) verificaram que a rugosidade superficial desempenha um papel importante no comportamento da corrosão, eles pesquisaram sobre a influência de diferentes tipos de acabamentos superficiais do aço inoxidável austenítico AISI 304 nas propriedades de corrosão. A pesquisa foi baseada em testes eletroquímicos com diferentes acabamentos de superfície em dois ambientes distintos: solução aquosa de NaCl e em chuva urbana simulada. A caracterização eletroquímica foi realizada usando métodos de teste eletroquímico: medições do potencial de corrosão E_{corr} , polarização linear, polarização potenciodinâmica e espectroscopia de impedância eletroquímica. As medições eletroquímicas foram realizadas utilizando um potenciostato de alto desempenho e analisadas por um software (LEBAN et al., 2014). As amostras preparadas apresentaram variação de rugosidade Ra e Rp conforme Tabela 4.

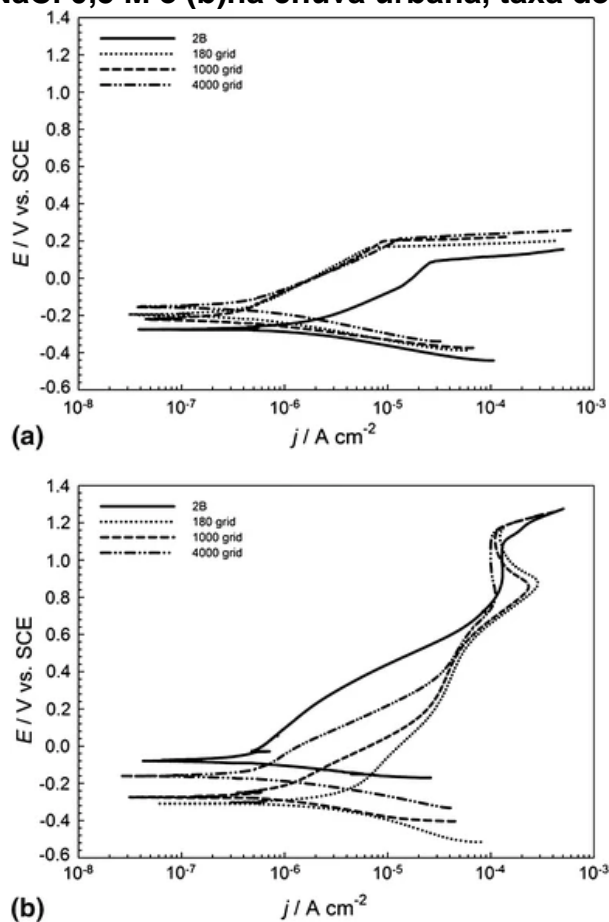
Tabela 4 - Amostras do aço inoxidável austenítico AISI 304 com diferentes rugosidades superficiais

Tipo de acabamento	Rp, μm	Ra, μm
Como recebido 2B	0,37	0,16
Lixado, granulação 180	0,27	0,08
Lixado, granulação 1000	0,12	0,03
Lixado, granulação 4000 + polimento	0,10	0,02

Fonte: LEBAN et al., 2014

O comportamento de passivação dos metais é demonstrado através das curvas potenciodinâmicas, elas são obtidas alterando-se o potencial do eletrodo de trabalho de valores catódicos para anódicos, simultaneamente, a corrente medida é exibida em função do tempo ou do potencial (LEBAN et al., 2014). As curvas potenciodinâmicas dos experimentos são mostradas na Figura 24.

Figura 24 - Curvas potenciodinâmicas para os quatro acabamentos de superfície, (a) em NaCl 0,5 M e (b) na chuva urbana, taxa de varredura $v = 1\text{mV/s}$



Fonte: LEBAN et al., 2014

O potencial de corrosão das amostras em solução de NaCl foi maior para o acabamento superficial lixado com granulação de 4000 + polimento, em seguida, diminuiu sucessivamente no caso dos acabamentos de superfície de 1000 e 180 grãos. As densidades de corrente no potencial de ruptura foram menores nos corpos de prova expostos à simulação de chuva urbana (LEBAN et al., 2014). Os resultados da investigação mostraram que a rugosidade da superfície afeta significativamente o crescimento da camada passiva na chuva urbana e que o crescimento desse filme é retardado no caso da solução aquosa de NaCl. “[...] Nas chuvas urbanas simuladas, os potenciais de ruptura medidos foram muito maiores do que no caso da solução de NaCl e foram aproximadamente os mesmos, independentemente do acabamento da superfície [...]” (LEBAN et al., 2014, p.1701).

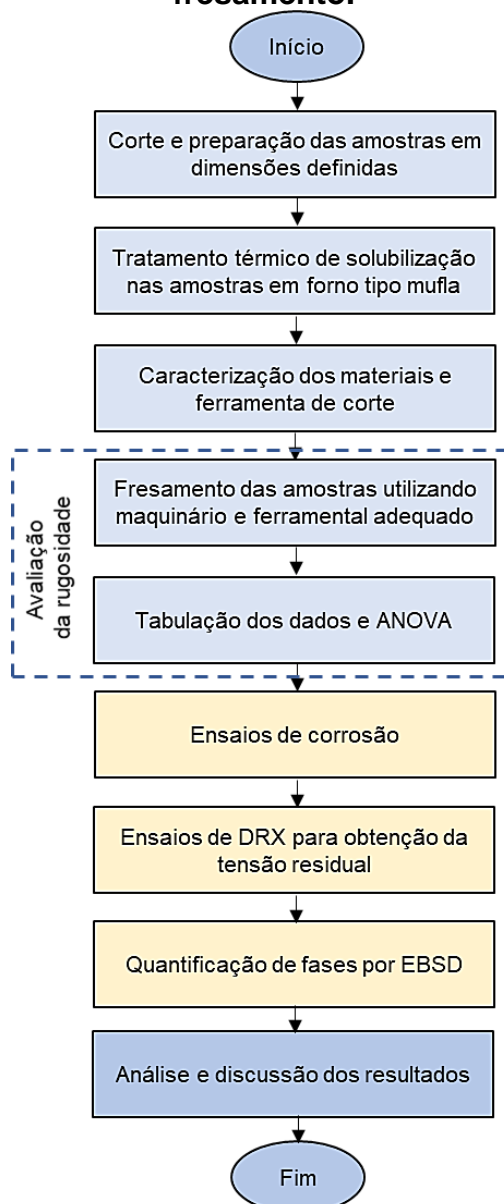
3 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Neste capítulo é apresentado o método experimental aplicado no desenvolvimento da pesquisa.

3.1 Fluxograma do processo de análise da superfície deformada pelo fresamento

Na Figura 25 tem-se o fluxograma do processo de análise da superfície deformada pelo fresamento.

Figura 25 - fluxograma do processo de análise da superfície deformada pelo fresamento.



Fonte: Elaborado pelo autor

A investigação iniciou-se com o corte e preparação das amostras, seguido do tratamento térmico de solubilização, realizado no laboratório da PUC Minas. Após o tratamento térmico, os aços inoxidáveis austenítico AISI 304 e duplex AISI 2205 foram caracterizados através de análise microscópica juntamente com as ferramentas de corte utilizadas na pesquisa. Depois de fresadas, as amostras seguiram para avaliação dos efeitos da usinagem na resposta da rugosidade superficial Ra e Rt, e, posteriormente, fez-se os ensaios de corrosão para ilustrar a relação da superfície obtida pelo fresamento nas propriedades de corrosão dos aços. As amostras do aço inoxidável duplex AISI 2205 seguiram de um trabalho investigativo realizado anteriormente por Santos (2018).

A Metodologia de Superfície de Resposta foi adotada para o fresamento, os parâmetros de entrada foram definidos em 05 níveis elevados de velocidades de corte, 05 níveis de avanço por dente fz (mm/dente), e profundidade de corte ap (mm) fixa em 1,0mm. Os parâmetros de saída do DOE foram a rugosidade Ra (μm) e a rugosidade Rt (μm).

3.2 Preparação das amostras

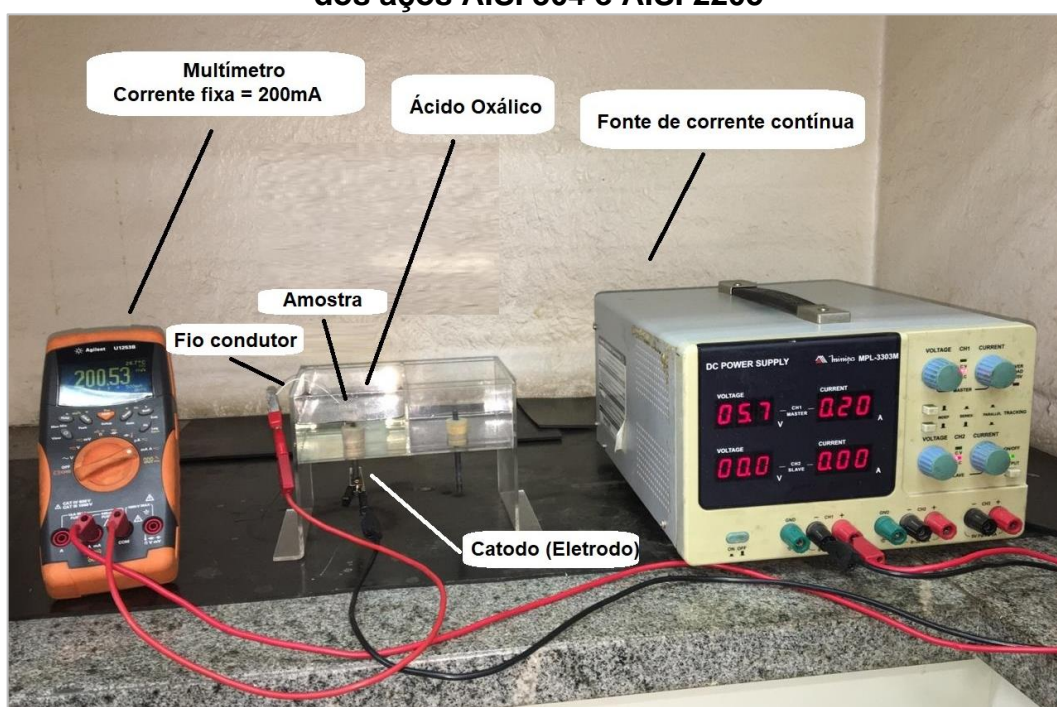
O material foi cortado em serra de fita, marca Franho, em peças com dimensões de 10 x 10 x 12mm de comprimento. As amostras do aço inoxidável austenítico AISI 304 passaram por um tratamento térmico de Solubilização em um forno, tipo Mufla, dotado de microcontrolador e disponível no laboratório de da PUC - MG. A temperatura de aquecimento foi de 900, 950, 1000 e 1050°C com tempo de permanência no forno de 1 hora, e, em seguida, resfriamento em água até a temperatura ambiente.

De acordo com Santos (2018) as amostras do aço inoxidável duplex AISI 2205 foram solubilizadas em um forno mufla disponível no laboratório de tratamento térmico do CEFET-MG. A temperatura utilizada foi entre 1050°C a 1100°C, ficando durante 01 hora no forno e após resfriado em água com temperatura de 20°C.

Para os ensaios metalográficos do aço AISI 304 e do aço AISI 2205 as amostras, como recebidas, foram cortadas em serra de fita nas dimensões de 10mm por 5,0mm, e soldadas a um fio condutor para medição de corrente para posterior ataque em solução eletroquímica, nesse procedimento utilizou-se um equipamento de soldagem capacitiva. Em seguida, amostra e fio condutor foram embutidos em resina

polimérica acrílica à frio. As amostras passaram por polimento de desbaste em lixas nº 100, 120, 180, 320, 600, 1000 e 2000 mesh. Na sequência foi feito polimento de acabamento em feltro impregnado com pasta de diamante nas dimensões de $3\mu\text{m}$ e $1\mu\text{m}$. Para o ataque eletrolítico foi desenvolvido um equipamento baseado na medição de tensão em função do tempo para uma corrente constante, Figura 26. O ataque foi feito em 10g de ácido oxálico diluído em 1L de água destilada. Os valores foram obtidos em uma fonte de corrente contínua, ajustada com corrente fixa 200mA e tensões entre 5,0 e 6,0V em intervalos de tempo de 1,0 até 60 segundos nas amostras do aço inoxidável duplex AISI 2205 e de 1,0 até 120 nas amostras do aço inoxidável austenítico AISI 304. Após o ataque químico as amostras foram observadas em microscópio óptico para avaliação de tamanho de grão. Foi utilizado o método de Hilliard (intercepto linear médio) para se obter o diâmetro dos cristais.

Figura 26 - Equipamento desenvolvido para o ataque eletrolítico nas amostras dos aços AISI 304 e AISI 2205



Fonte: Foto retirada pelo autor

As ferramentas utilizadas nos experimentos de usinagem foram seccionadas através de impacto e observadas em microscópio eletrônico de varredura, marca Oxford, dotado de EDS. Foi observado o substrato e, também, medido a espessura do revestimento.

3.3 Ferramental e maquinário

O modelo de fresa de topo R390 foi especificado para a operação. A ferramenta possui 25mm de diâmetro com capacidade para 03 insertos intercambiáveis. Esses insertos foram definidos em função, principalmente, da compatibilidade com o ferramental e material de usinagem. O **Anexo B** apresenta a especificação dos insertos aplicados, e o **Anexo C** indica as condições numéricas de corte sugeridas pela empresa fabricante dos insertos.

O centro de usinagem CNC ROMI BRIDGEPORT - DISCOVERY 560, disponível no Laboratório de Usinagem da PUC Minas, foi utilizado nos ensaios de fresamento.

Um rugosímetro da marca TAYLOR HOBSON modelo SURTRONIC S-128, Figura 27, foi utilizado para leitura dos parâmetros de rugosidade Ra e Rt. Para cada ensaio foi utilizado uma aresta de corte nova da ferramenta, para não haver variações nos parâmetros de saída em função do desgaste. Em todas as condições de corte foi utilizado fluido de corte sintético por jorro na concentração média de 8%, com o objetivo de reduzir a temperatura na interface e garantir a lubrificação da ferramenta, e para evitar o desgaste e a formação de aresta postiça de corte.

Figura 27 - Rugosímetro TAYLOR HOBSON SURTRONIC: S-128.



Fonte: Foto retirada pelo autor

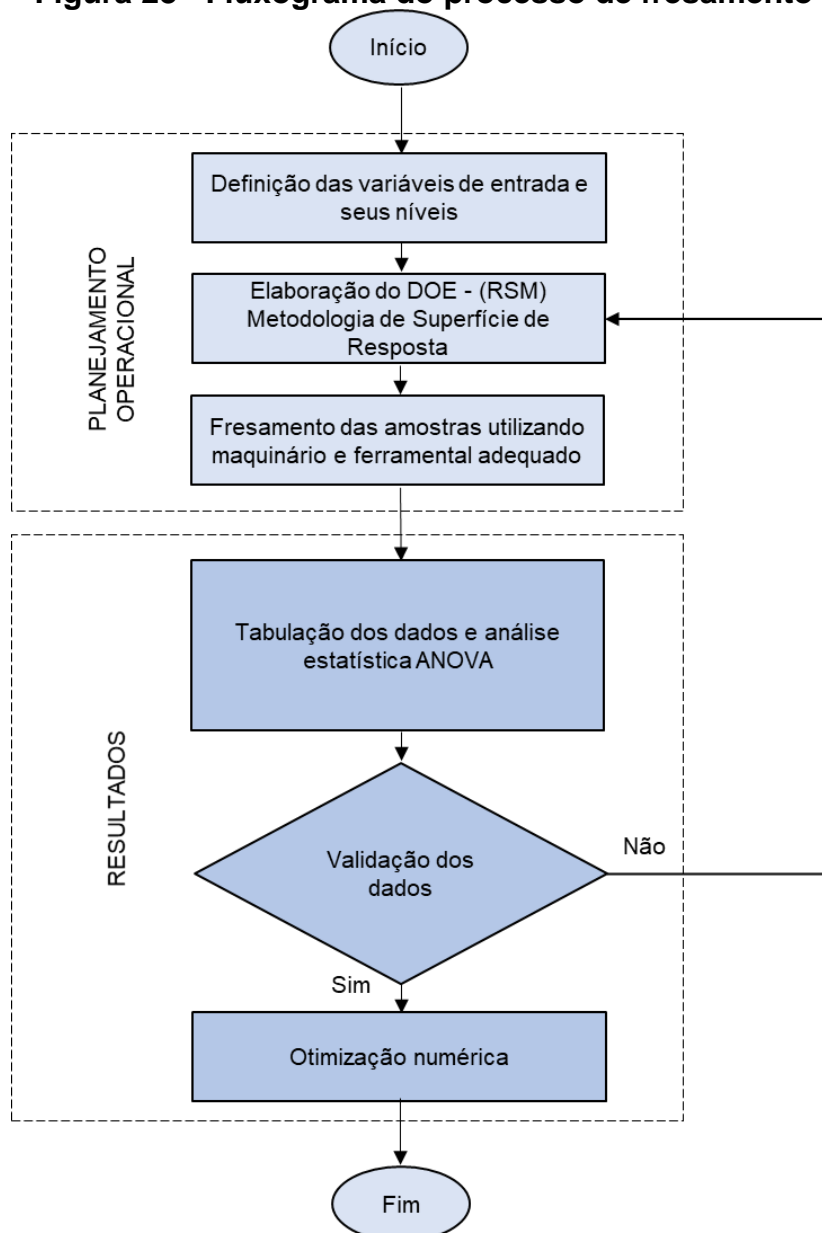
O rugosímetro SURTRONIC S-128 é um equipamento portátil que possui leitura digital eletrônica dos parâmetros estabelecidos pela norma NBR ISO 4287 de 2002 da ABNT. Ele apresenta as seguintes características técnicas: deslocamento máximo

do apalpador: 0,25 - 25,5mm; Cut-off de 0,25; 0,80; e 2,5mm; Filtros: 2CR ou gaussiano (selecionável); Campo de medição: 10, 100 ou 400 Mícrons; Resolução: 5, 10 ou 50 nm.

3.4 Fluxograma do processo de fresamento das amostras

A Figura 28 mostra o fluxograma do processo de fresamento, detalhando cada etapa. Quatro fases distintas foram estabelecidas para a realização dos ensaios, cada etapa apresenta influência direta na qualidade dos resultados esperados.

Figura 28 - Fluxograma do processo de fresamento



Fonte: Elaborado pelo autor

O início do fluxograma se deu por meio da definição das variáveis de entrada e delimitação dos seus níveis, isso é necessário e fundamentado pelo estudo feito na fase de revisão bibliográfica e pelos objetivos da pesquisa. A partir da definição dos parâmetros de entrada e saída, foi elaborado um planejamento experimental DOE baseado em Metodologia de Superfície de Resposta - RSM. Na sequência, de posse do planejamento dos experimentos, foi realizado o fresamento das amostras e a tabulação dos dados de rugosidade, essa tabulação proporcionou a imediata validação numérica do DOE. Posteriormente foram feitas as análises estatísticas dos resultados, a análise de variância - ANOVA e otimização numérica para as respostas do planejamento experimental DOE.

3.5 Variáveis de entrada e de saída do DOE

O objetivo desta pesquisa foi a determinação da configuração otimizada entre os parâmetros de entrada do DOE, V_c e f_z , e as menores respostas de rugosidades (R_a) e (R_t) do procedimento experimental, pautando-se pela verificação dos efeitos provocados pelas altas velocidades de corte nas propriedades de corrosão dos aços inoxidáveis austenítico AISI 304 e duplex AISI 2205. Com base nessa premissa, e em fatores como capacidade de operação da fresa CNC disponibilizada para os ensaios; compatibilidade das grandezas físicas do processo de fresamento com o tipo de ferramental selecionado, especialmente diâmetro da fresa e material das pastilhas de metal duro revestidas em TiNAl; condições técnicas do processo de fresamento frontal com utilização de fresa de topo e regime de operação da máquina foram definidos os parâmetros de entrada e seus níveis e os parâmetros de saída desse estudo.

Tabela 5 - Parâmetros de entrada do DOE.

Parâmetro de entrada	Valor inicial	Valor final
Velocidade de corte (V_c)	300m/min	750m/min
Avanço por dente (f_z)	0,01mm/dente	0,18mm/dente
Profundidade de corte (a_p)	1,0mm	

Fonte: Elaborado pelo autor

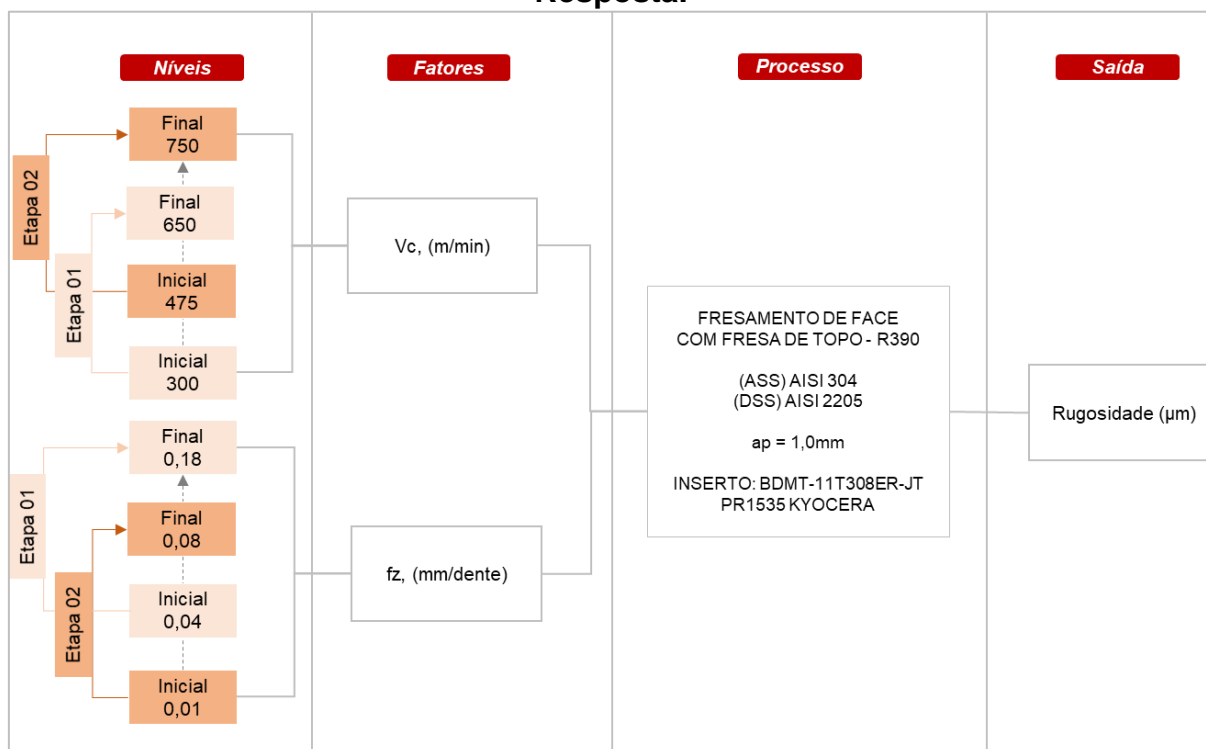
A Tabela 5 indica os parâmetros de entrada do DOE e seus intervalos. Cinco níveis foram estabelecidos para velocidade de corte e para o avanço por dente dentro

dos seus respectivos intervalos. Os parâmetros de saída do planejamento experimental foram as respostas das rugosidades R_a e R_t , (quantitativo contínuo).

3.6 Elaboração do planejamento experimental

A Figura 29 representa o esboço do DOE preparado para o experimento. Cada parâmetro de entrada é representado, e seus níveis são definidos para cada etapa de ensaios. A profundidade de corte é fixa, $a_p = 1,0\text{mm}$, e a pastilha intercambiável da classe M, especificada pelo fabricante como: BDMT-11T308ER-JT PR1535.

Figura 29 - Esboço do DOE baseado em Metodologia de Superfície de Resposta.



Fonte: Elaborado pelo autor

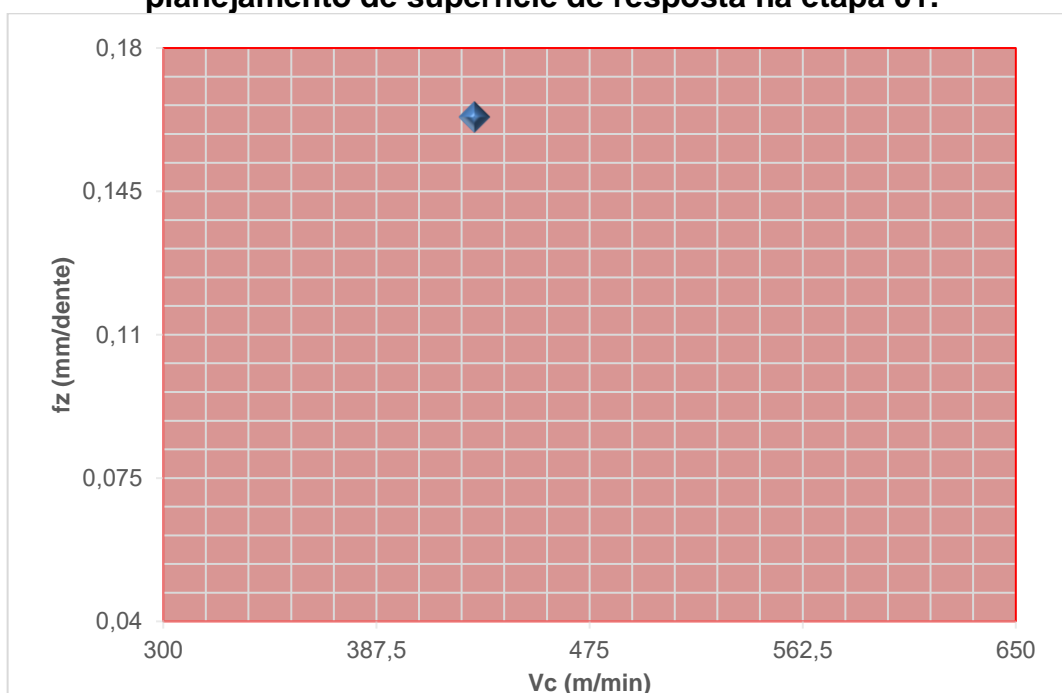
A aplicação de elevadas velocidades de corte para análise da resposta da rugosidade é considerada um dos diferenciais desse estudo, dessa maneira, optou-se por ensaios sequenciais nas amostras dos aços AISI 304 e AISI 2205 em duas etapas:

- Etapa 01: Variou-se a velocidade de corte (V_c) entre 300m/min e 650m/min ;

- b) Ensaios complementares, etapa 02: Optou-se pela execução dos ensaios com velocidade de corte (V_c) variando entre 475m/min e 750m/min, chegando-se ao limite de velocidade do maquinário em função do tipo de ferramental e processo selecionado.

Na Figura 30 é possível compreender as combinações dos parâmetros de corte trabalhados na 1ª etapa de experimentação. A velocidade de corte (V_c) de 300m/min combinou-se com o avanço por dente (f_z) em 0,04 mm/dente e 0,18 mm/dente no cubo; depois $V_c=387,5$ m/min e $f_z=0,11$ mm/dente em uma combinação axial; no ponto central (V_c)=475m/min e (f_z)=0,11mm/dente; além dos pontos axiais com (V_c)=475m/min, (f_z)=0,075mm/dente e (V_c)=475m/min e (f_z)=0,145mm/dente; a próxima combinação axial foi (V_c)=562,5m/min e (f_z)=0,11mm/dente por fim (V_c)=650m/min, (f_z)=0,04mm/dente e (V_c)=650m/min e (f_z)=0,18mm/dente.

Figura 30 - Contorno das combinações dos parâmetros de entrada do planeamento de superfície de resposta na etapa 01.

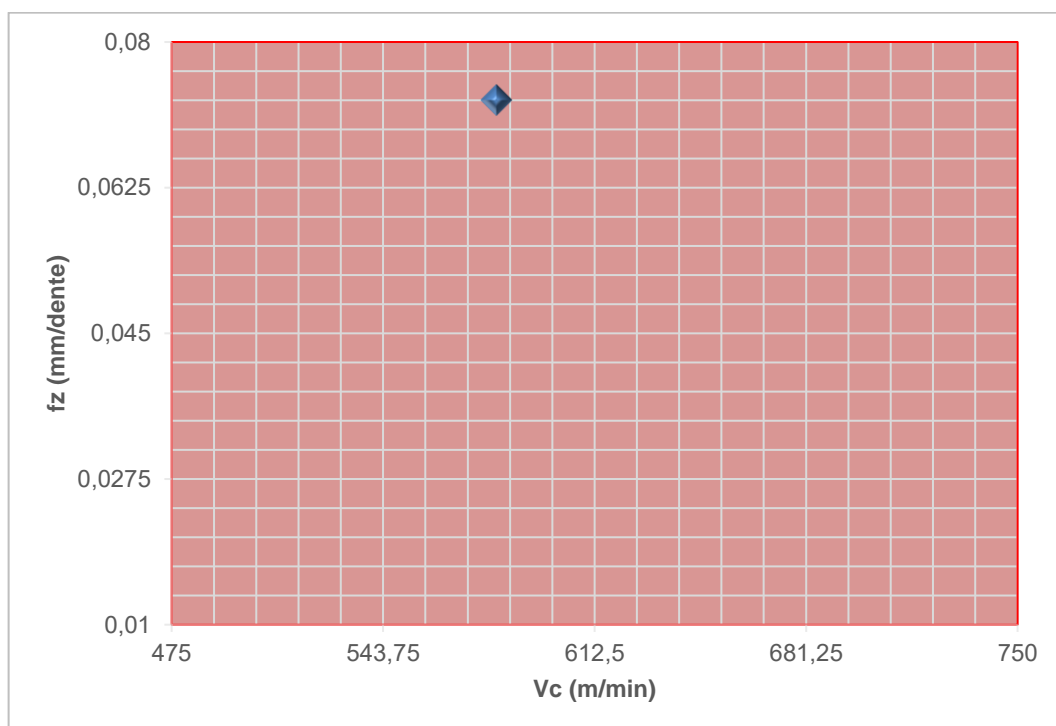


Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 31 representa o contorno das combinações dos parâmetros de entrada do planeamento experimental dos ensaios complementares, nota-se que os valores da velocidade de corte são ainda mais elevados. Nos pontos cúbicos tem-se (V_c)=475m/min com (f_z)=0,01mm/dente e (f_z)=0,08mm/dente, além de (V_c)=750m/min com (f_z)=0,01mm/dente e (f_z)=0,08mm/dente; no ponto central

(V_c)=612,5m/min com (f_z)=0,045mm/dente; e pontos axiais (V_c)=543,75m/min com (f_z)=0,045mm/dente; (V_c)=681,25m/min com (f_z)=0,045mm/dente; (V_c)=612,5m/min com (f_z)=0,0275mm/dente e (f_z)=0,0625mm/dente.

Figura 31 - Contorno das combinações dos parâmetros de entrada do planejamento de superfície de resposta dos ensaios complementares.



Fonte: Elaborado pelo autor

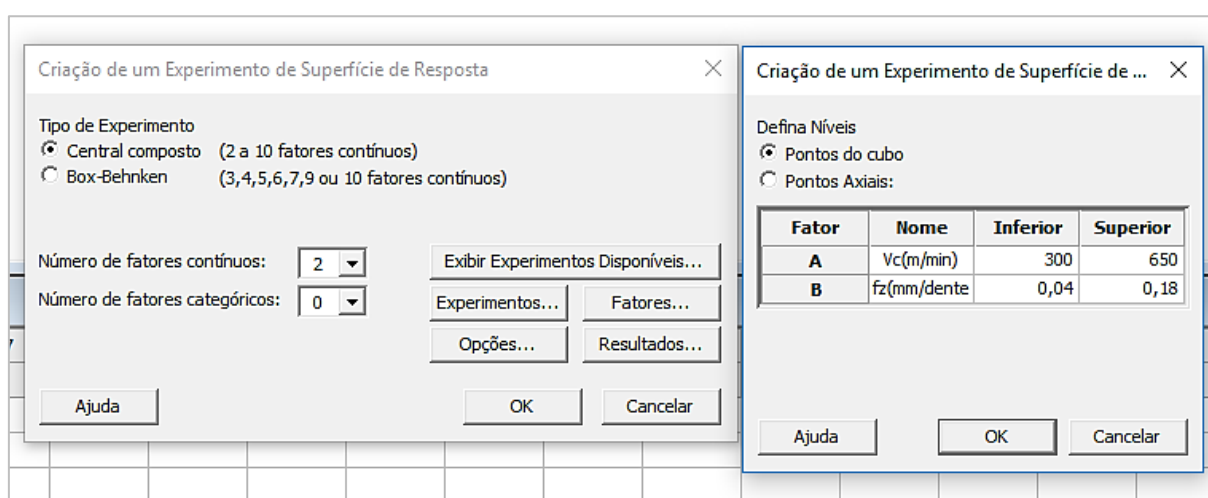
Como ferramenta computacional de apoio para formulação do DOE, foi utilizado o software MINITAB® versão 18.1, devidamente licenciado e registrado pelo autor, **Anexo D**. As matrizes experimentais das etapas 01 e 02 são parcialmente mostradas no **Apêndice A e Apêndice B** respectivamente, nota-se a presença de 13 colunas, sendo:

- a) Coluna 01: Ordem padrão correspondente a tabela de contrastes do experimento (RSM) elaborado;
- b) Coluna 02: Ordem de realização dos experimentos;
- c) Coluna 03: determina o nível central da matriz;
- d) Coluna 04: Blocos experimentais, nesse caso apenas 01;
- e) Colunas 05 e 06: Fatores de entrada e seus diferentes níveis;

- f) Colunas 07 a 13: As variáveis de resposta a analisadas (Ra, Rt, Rz, Rc, Rq, Rp e Rv).

A Figura 32 ilustra parte da configuração experimental realizada com a utilização do software, foi preparado o experimento de superfície de resposta central composto com 02 fatores de entrada, 04 réplicas da sequência base, 13 ensaios base e 52 ensaios totais. Para configuração do ponto alfa (α), definiu-se para o experimento o deslocamento sobre os eixos centrais de $\alpha = \pm 0,5$.

Figura 32 - Parte do processo de configuração do experimento no MINITAB®.



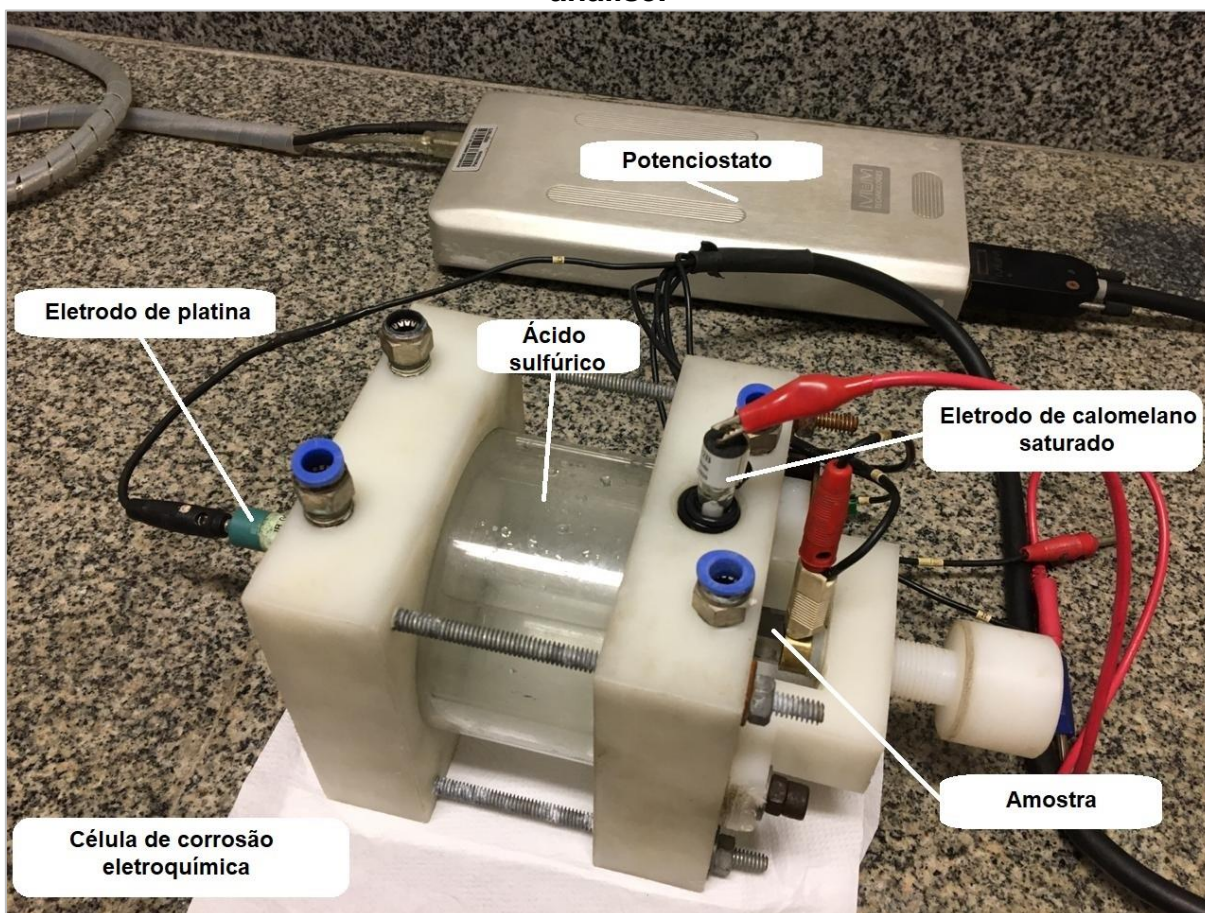
Fonte: Elaborado pelo autor

3.7 Preparação dos ensaios eletroquímicos nas superfícies das amostras fresadas

A fim de verificar consequências da deformação por fresamento em altas velocidades de corte nos aços analisados nessa pesquisa, foram realizados ensaios eletroquímicos de estabilização de potencial de circuito aberto, Open Circuit Potencial - OPC, ou potencial de corrosão E_{corr} vs. Tempo; ensaios de espectroscopia de impedância eletroquímica, e ensaios de polarização potenciodinâmica nas amostras dos dois materiais.

Os ensaios de corrosão foram executados nas amostras com velocidades de corte de: 300m/min; 475m/min; 613m/min e 750m/min. Em função das dimensões dos corpos de prova, foi necessário o desenvolvimento de uma célula de corrosão eletroquímica tipo Flat Cell, Figura 33.

Figura 33 - Célula de corrosão eletroquímica tipo Flat Cell desenvolvida para análise.



Fonte: Elaborado pelo autor

O orifício circular para contato entre a solução eletrolítica e as amostras foi dimensionado com área de 10mm^2 , compatível com a superfície útil disponível. A célula foi composta pelo eletrodo de platina auxiliar, capaz de medir a corrente elétrica, pelo eletrodo de referência e aplicação de potencial de calomelano saturado - ECS, Hg_2Cl_2 , e pelo eletrodo de trabalho, que foram as amostras. A solução eletrolítica utilizada foi ácido sulfúrico $0,5\text{ mol/L}$, H_2SO_4 ($0,5\text{M}$), na condição não aerada. Para o preparo da solução, diluiu-se $27,7\text{ mL}$ de H_2SO_4 , grau PA, em água destilada q. s. p. 1000 mL . Um potenciostato modelo Ivium Technologies B. V. acoplado à célula eletrolítica e ao software IviumSoft, versão 2,509(3) geraram os resultados dos ensaios.

Todos os ensaios foram conduzidos à temperatura ambiente do laboratório. Durante um tempo não superior a 1 hora (3600 segundos) foram feitos levantamentos das curvas de potencial de circuito aberto (OCP – Open Circuit Potential) registrando-se a variação de E_{corr} (potencial de corrosão) com o tempo até a sua estabilização;

em seguida, foi realizado o levantamento dos diagramas de espectroscopia de impedância eletroquímica e das curvas de polarização potenciodinâmicas.

As condições paramétricas utilizadas para a obtenção das curvas de polarização potenciodinâmicas tiveram como base o procedimento da norma ASTM G 5 (2013) estão listadas na Tabela 6.

Tabela 6 - Condições paramétricas usadas na obtenção da curva de polarização potenciodinâmica

Condições Utilizadas	Valor
Potencial inicial de varredura	- 250 mV (- 0,250 V) abaixo do potencial de circuito aberto
Potencial final de varredura anódica:	2000 mV (2,0 V)
Velocidade de varredura	0,2 mV/s – 0,002 V/s

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os parâmetros físico-químicos para os materiais metálicos são dados na Tabela 7.

Tabela 7 - Parâmetros físico-químicos utilizados

Parâmetros	AISI 304	AISI 2205
Eq. wt. (g)	26,09	25,64
Densidade, ρ (g/cm ³)	7,82	7,80

Fonte: Elaborado pelo autor.

As condições usadas na obtenção dos diagramas de espectroscopia de impedância eletroquímica são listadas na Tabela 8.

Tabela 8 - Condições usadas na obtenção do diagrama de espectroscopia de impedância eletroquímica.

CONDIÇÕES USADAS	VALOR
Faixa de frequência	15 mHz – 10 kHz
Amplitude de voltagem (rms)	5 mV rms
Frequência de leitura	5 pontos/década

Fonte: Elaborado pelo autor.

A interpretação dos resultados e análise dos diagramas de espectroscopia de impedância eletroquímica seguiu os procedimentos recomendados pela literatura específica (ASTM G 106, 2010; ORAZEM; TRIBOLLET, 2008; WOLYNEC, 2003; MATTOS, 1987).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

São apresentados nesse capítulo os resultados dessa pesquisa, que são: análise química e metalografia nas amostras; caracterização da ferramenta de corte; resultados estatísticos do experimento de superfície de resposta; análise de variância - ANOVA da resposta da rugosidade Ra e Rt; e ensaios de corrosão na superfície dos aços AISI 304 e AISI 2205 após fresamento em altas velocidades de corte.

4.1 Análise química e metalografia das amostras dos aços AISI 304 e AISI 2205

As Tabelas 9 e 10 indicam a composição química dos corpos de prova do aço inoxidável austenítico AISI 304 e duplex AISI 2205 respectivamente. Na tabela 9 observa-se a presença de enxofre na composição química do AISI 304 para melhorar a usinabilidade e os elementos gamagênios: Ni, C e N.

Tabela 9 - Composição química dos corpos de prova do aço inoxidável austenítico AISI 304 percentuais em peso.

C	Mn	Si	P	S	Al	N(ppm)	Cr	Ni	Mo	Nb	Co
0,045	1,27	0,50	0,030	0,10	0,03	437	17,5	8,13	0,08	0,09	0,17

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Tabela 10 tem-se os percentuais em peso da composição química do aço inoxidável duplex AISI 2205 mensurados através do ensaio de espectrometria de emissão óptica.

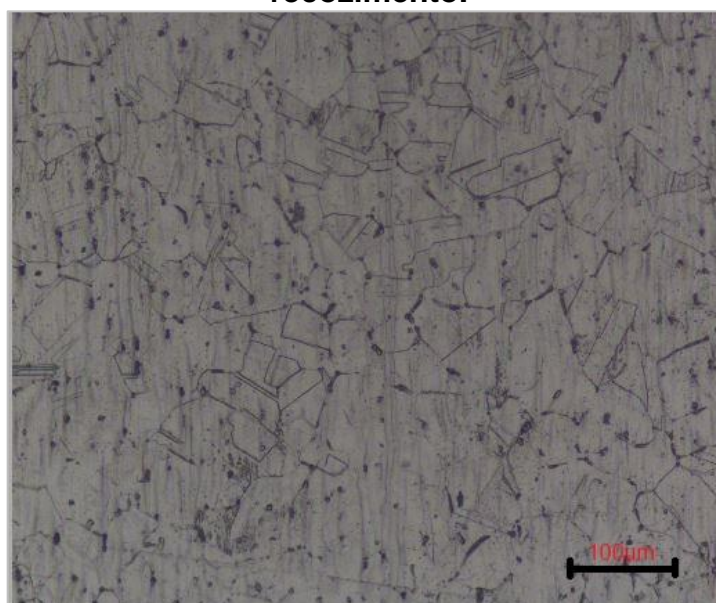
Tabela 10 - Composição química dos corpos de prova do aço inoxidável duplex AISI 2205 percentuais em peso.

C	Mn	Si	P	S	N	Cr	Ni	Mo	Cu
0,03	0,794	0,534	0,03	0,01	0,15	22,9	6,02	3,29	0,15

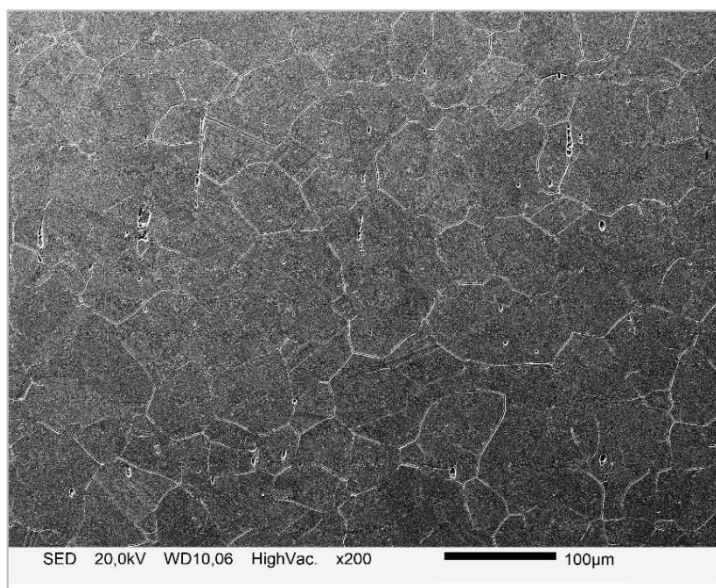
Fonte: Elaborado pelo autor.

A microestrutura do aço AISI 304 é apresentada na Figura 34 (a) e (b). Na condição de laminado a quente evidenciou a presença de maclas de deformação consequentes da laminação, além de inclusões e precipitados, Figura 34 (a). Já na condição de solubilizado a 950°C evidenciou a presença de austenita com cristais equiaxiais e presença de maclas de recozimento, Figura 34 (b).

Figura 34 - Microestrutura do aço AISI 304: (a) na condição de laminado a quente; (b) presença de austenita com cristais equiaxiais e maclas de recozimento.



(a)



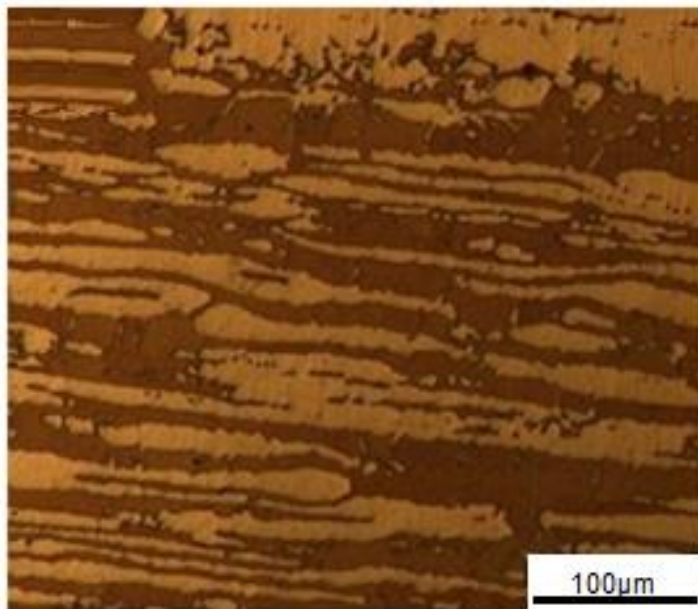
(b)

Fonte: Elaborado pelo autor

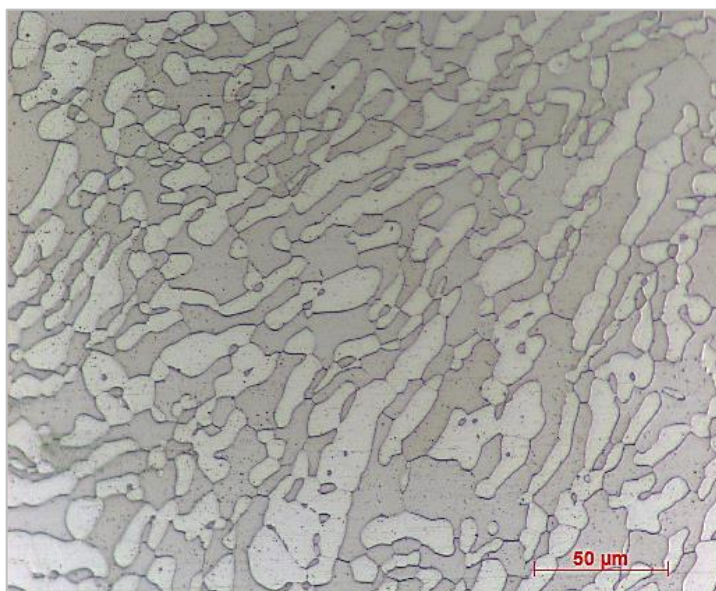
A microestrutura do aço inoxidável duplex AISI 2205 é mostrada na Figura 35 (a) e (b). Na Figura 35 (a) tem-se a microestrutura da seção longitudinal, típica de aço inoxidável duplex de matriz ferrítica (α) e ilhas ou porções de austenita (γ) distribuídas de forma aleatória, observa-se que a morfologia da austenita é mais alongada nesta seção, provavelmente em função da deformação causada pelo processamento de produção do material (SANTOS, 2018). A micrografia da seção transversal, Figura 35

(b) mostra ilhas de austenita e ferrita, optou-se por fresar essa face que possui maior homogeneidade na distribuição das fases (α) e (γ).

Figura 35 - (a) microestrutura da seção transversal do aço AISI 2205; (b) microestrutura da seção longitudinal do aço AISI 2205.



(a)



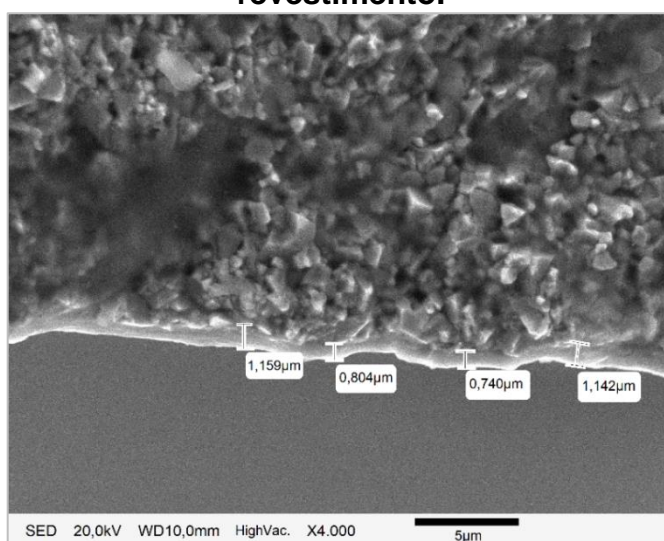
(b)

Fonte: Elaborado pelo autor

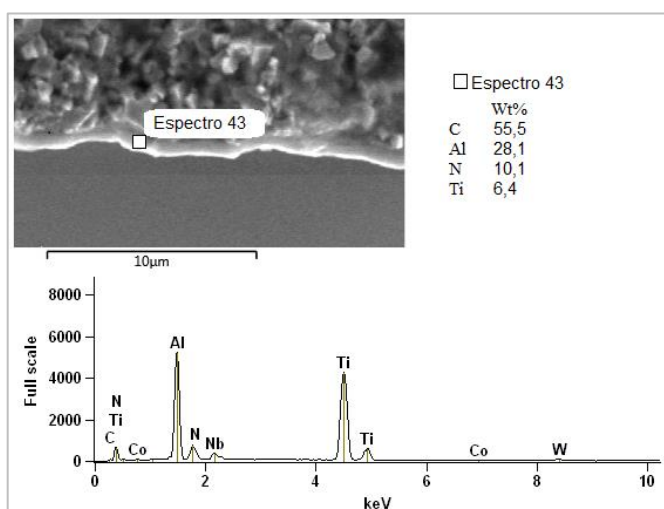
4.2 Caracterização da ferramenta de corte

A Figura 36 (a) mostra a microestrutura da pastilha de metal duro, especificada por BDMT-11T308ER-JT PR1535, fabricada em WC na matriz de cobalto Co com revestimento PVD de TiAlN. A espessura do revestimento foi verificada em 04 pontos da amostra, sendo: 1,159 μm ; 0,804 μm ; 0,740 μm e 1,142 μm , a média das medições foi de aproximadamente 0,961 μm . A Figura 36 (b) mostra que a análise do revestimento feita através da espectroscopia de raios - X por dispersão em energia (EDS), revelou a presença do cerâmico TiAlN, com percentuais em peso de 28,1% Alumínio, 10,1% Nitrogênio e 6,4% de Titânio.

Figura 36 – Microscopia óptica do inserto BDMT-11T308ER-JT PR1535, (a) evidenciando a espessura do revestimento e (b) presença de Ti, Al e N no revestimento.



(a)



(b)

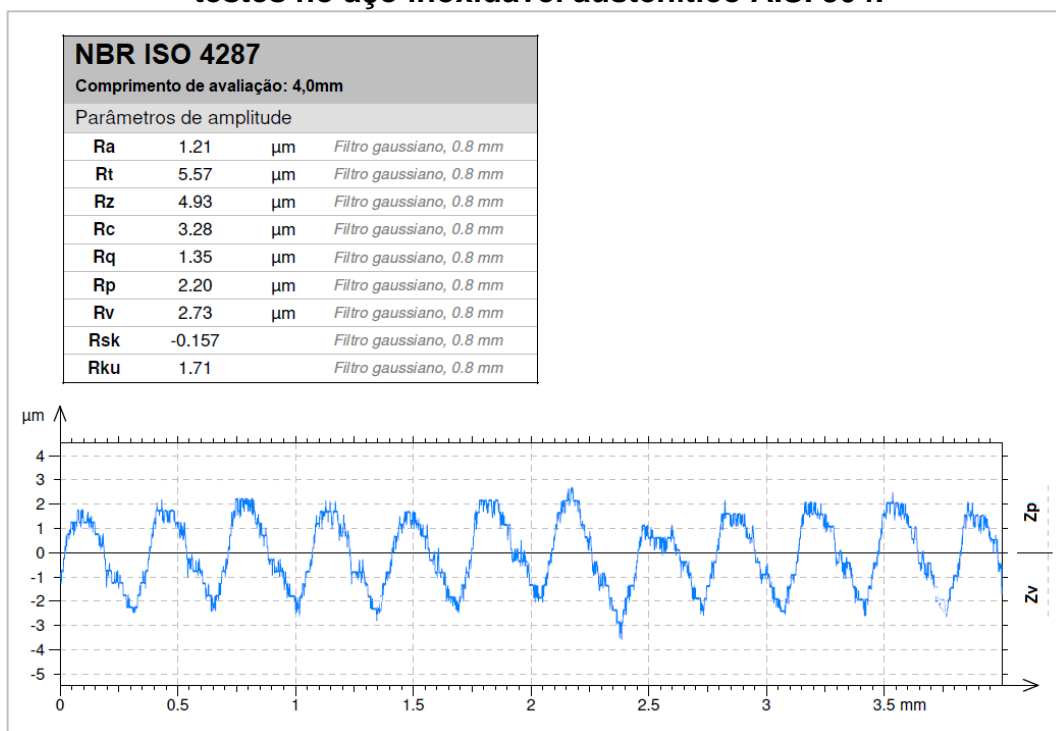
Fonte: Elaborado pelo autor

4.3 Resultados estatísticos do experimento de superfície de resposta

Os resultados estatísticos dos experimentos de superfície de resposta são mostrados nessa subseção. Na etapa 01 a velocidade de corte (V_c) variou entre 300m/min e 650m/min, nos ensaios complementares os valores de velocidade de corte foram de 450m/min até 750m/min.

O parâmetro de resposta do DOE foi a rugosidade superficial, o rugosímetro utilizado para obtenção das respostas forneceu resultados de: R_a , R_t , R_z , R_c , R_q , R_p e R_v , além dos fatores de assimetria e achatamento R_{sk} e R_{ku} do perfil avaliado. Nos resultados apresentados os parâmetros de rugosidade R_a e R_t foram enfatizados, resultados dos demais parâmetros serão apresentados nos apêndices dessa pesquisa.

Figura 37 - Relatório do rugosímetro em um ponto de medição da etapa 01 dos testes no aço inoxidável austenítico AISI 304.



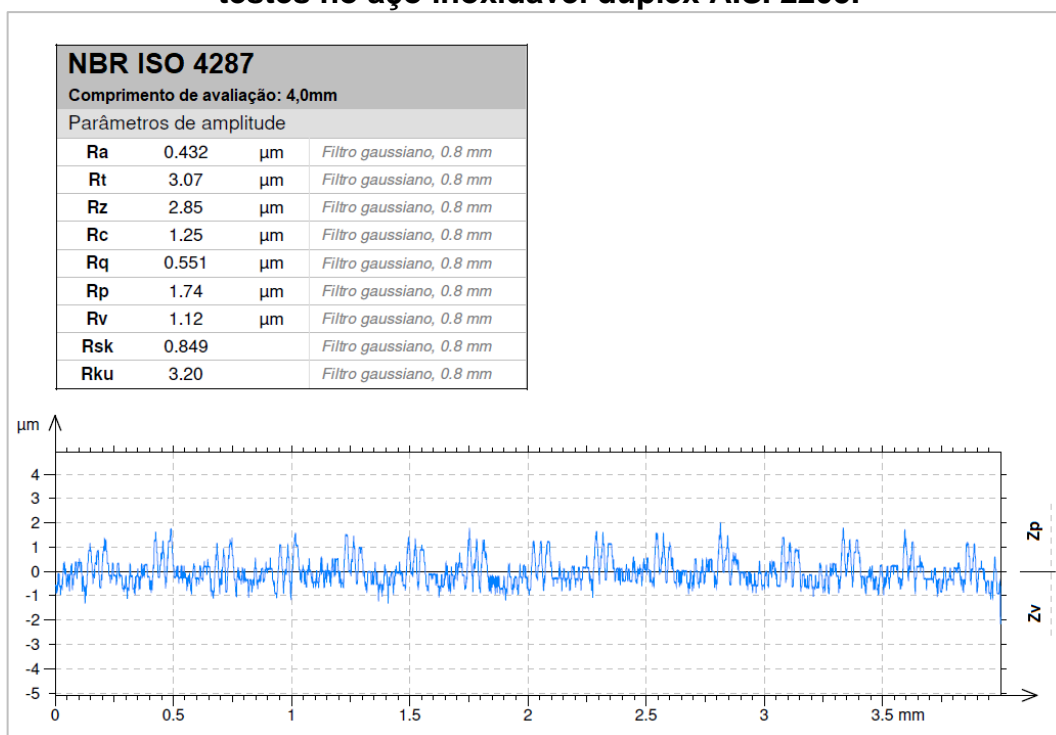
Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 37 reproduz o relatório de um dos ensaios executados em um ponto central do DOE, com parâmetros de corte $V_c = 475\text{m/min}$ e $f_z = 0,11\text{mm/dente}$ com profundidade de corte fixa em 1,0mm, na superfície do aço inoxidável austenítico AISI 304. Nota-se nessa avaliação que a resposta da rugosidade R_a foi de 1,21 μm , e $R_t =$

5,57 μm , o fator de assimetria do perfil foi negativo, $R_{sk} = -0,157$, ou seja, nessa medição a profundidade dos vales Z_v foi maior que a altura dos picos do perfil Z_p . O fator de achatamento do perfil, $R_{ku} = 1,71 < 3$, indicando curva de distribuição achatada ou platicúrtica.

A Figura 38 é apresentado o relatório de um ensaio no ponto central do DOE na superfície do aço inoxidável duplex AISI 2205. A resposta da rugosidade $R_a = 0,432\mu\text{m}$, e $R_t = 3,07\mu\text{m}$, o fator de assimetria do perfil foi positivo, $R_{sk} = 0,849$, ou seja, Skewness positiva. O fator de achatamento do perfil, $R_{ku} = 3,20$ indicando curva de distribuição leptocúrtica, com calda mais pesada, kurtosis > 3 . Apesar disso, nos ensaios do duplex AISI 2205 houve, 3 na maioria dos ensaios, kurtosis < 3 , resultando numa superfície mais resistente ao desgaste por deslizamento.

Figura 38 - Relatório do rugosímetro em um ponto de medição da etapa 01 dos testes no aço inoxidável duplex AISI 2205.



Fonte: Elaborado pelo autor

O fator de assimetria R_{sk} apontou para um perfil de superfície com picos levemente mais elevados que a profundidade dos os vales nos resultados coletados no aço austenítico AISI 304, e vales levemente mais profundos que a altura dos picos na análise dos resultados do duplex AISI 2205.

Outros relatórios da resposta da rugosidade nos ensaios executados na superfície do aço inoxidável austenítico AISI 304 e duplex AISI 2205 estão dispostos no Apêndice C e Apêndice D respectivamente. São mostrados os resultados de uma amostra do ensaio em cada ponto que compõe o contorno do DOE, seguindo a seguinte configuração dos parâmetros de entrada: $V_c=475\text{m/min}$, $f_z=0,01\text{mm/dente}$; $V_c=475\text{m/min}$, $f_z=0,08\text{mm/dente}$; $V_c=543,75\text{m/min}$, $f_z=0,045\text{mm/dente}$; $V_c=612,5\text{m/min}$, $f_z=0,0275\text{mm/dente}$; $V_c=612,5\text{m/min}$, $f_z=0,045\text{mm/dente}$; $V_c=612,5\text{m/min}$; $f_z=0,0625\text{mm/dente}$; $V_c=681,25\text{m/min}$, $f_z=0,045\text{mm/dente}$; $V_c=750\text{m/min}$, $f_z=0,01\text{mm/dente}$; $V_c=750\text{m/min}$; $f_z=0,08\text{mm/dente}$.

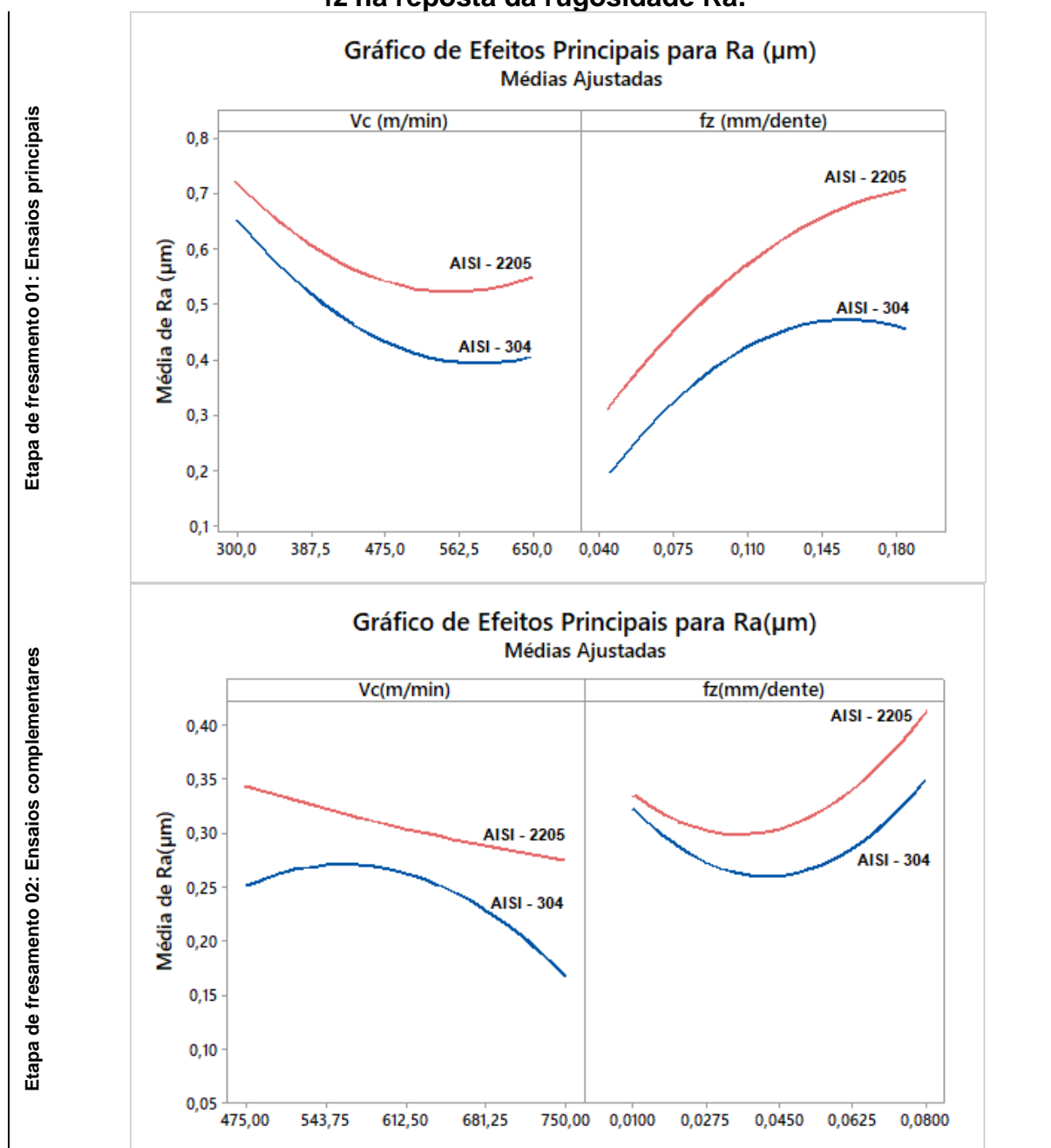
O Quadro 01 mostra graficamente os efeitos principais da velocidade de corte V_c e do avanço por dente f_z na resposta das rugosidades R_a após o fresamento. Nota-se que, de uma forma geral, tanto na etapa 01 de fresamento quanto na etapa dos ensaios complementares do DOE, as altas velocidades de corte aplicadas resultaram em uma diminuição nos valores de R_a . As respostas da rugosidade R_a na superfície do aço duplex AISI 2205 alcançaram valores mais elevados que os encontrados na superfície do aço inoxidável austenítico AISI 304. A presença da fase ferrítica (α) na composição do aço duplex AISI 2205 pode ser associada a esse resultado, uma vez que o aço AISI 304 possui apenas a fase austenítica (γ). Nota-se que nos ensaios complementares a curva da resposta ajustada da rugosidade R_a para o aço austenítico AISI 304 oscilou entre $0,27\mu\text{m}$ e $0,15\mu\text{m}$ aproximadamente, no intervalo de 475m/min e 750m/min .

Percebe-se que na etapa 01 do fresamento ocorreu um expressivo aumento da rugosidade R_a na superfície dos dois materiais testados quando se aumentou o avanço f_z . Já na etapa 02 do fresamento, onde os valores de f_z foram menos agressivos, formou-se uma curva crescente com ponto mínimo de abscissa próximo ao ponto central $f_z=0,045\mu\text{m}$ no gráfico dos resultados do aço AISI 304, e próximo a $f_z=0,0275\mu\text{m}$ no aço duplex AISI 2205. Analisando-se as duas etapas de fresamento, há evidências de que aumentando-se o valor de f_z , os valores da resposta da rugosidade R_a também aumentam nas superfícies dos dois materiais. Em termos de escala de rugosidade, é possível verificar que para o aço duplex os valores foram mais elevados indicando que o parâmetro f_z produz efeitos significativos na resposta de R_a .

O Quadro 02 reúne a interação entre os parâmetros de entrada V_c e f_z na resposta da rugosidade R_a , aplicou-se nessa análise uma compilação dos dados

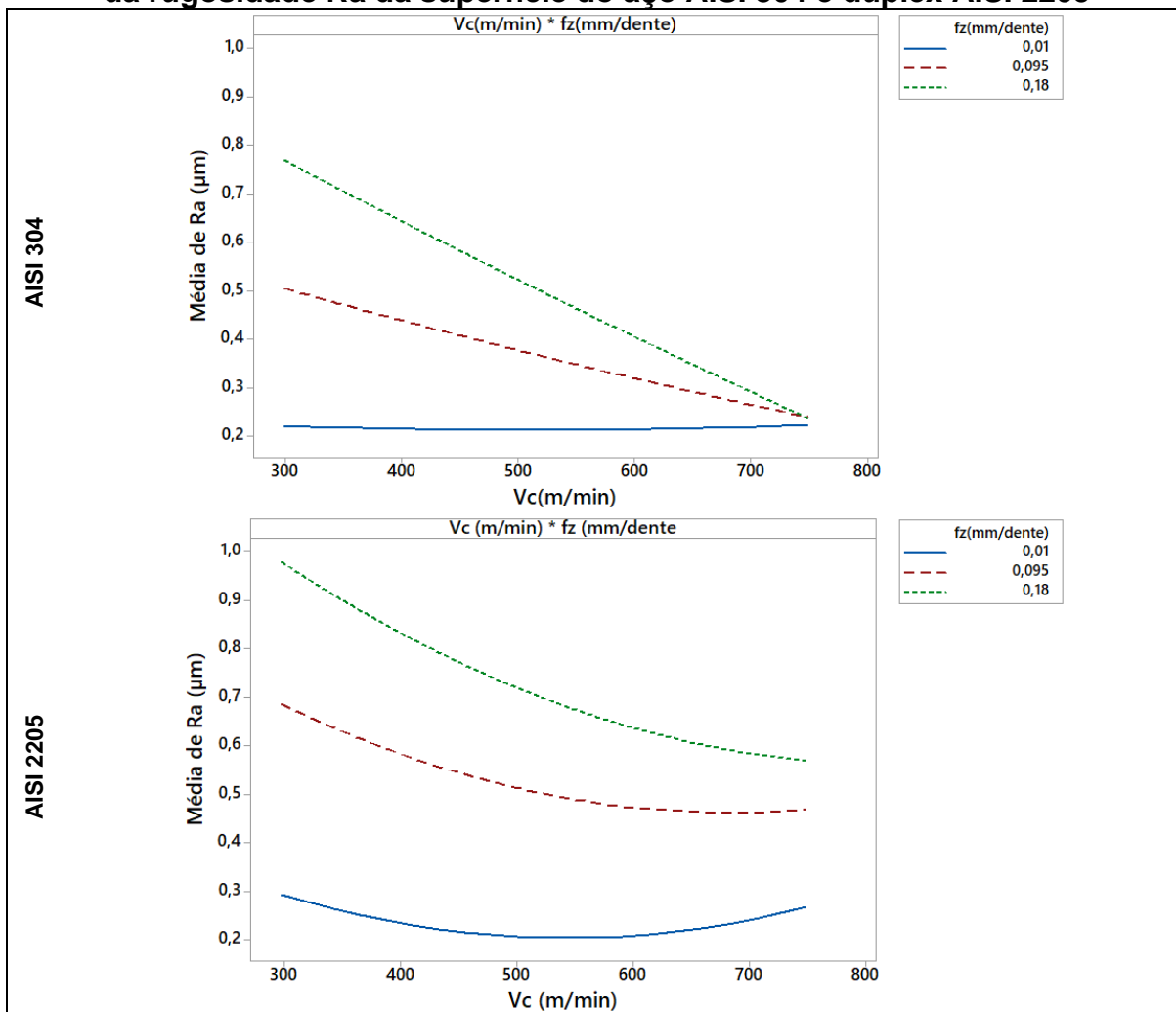
reunindo todos os ensaios realizados. Nota-se que o aumento da velocidade de corte associado aos menores valores de f_z resultaram nas menores respostas de rugosidade R_a . No aço inoxidável austenítico AISI 304 as altas velocidades de corte contribuíram para a diminuição da rugosidade R_a mesmo em avanços f_z mais elevados. O aço duplex, além de atingir os maiores valores de R_a do experimento, também apresentou o menor decréscimo da rugosidade R_a mesmo em menores velocidades de corte.

Quadro 1 - Efeitos principais da velocidade de corte V_c e do avanço por dente f_z na reposta da rugosidade R_a .



Fonte: Elaborado pelo autor

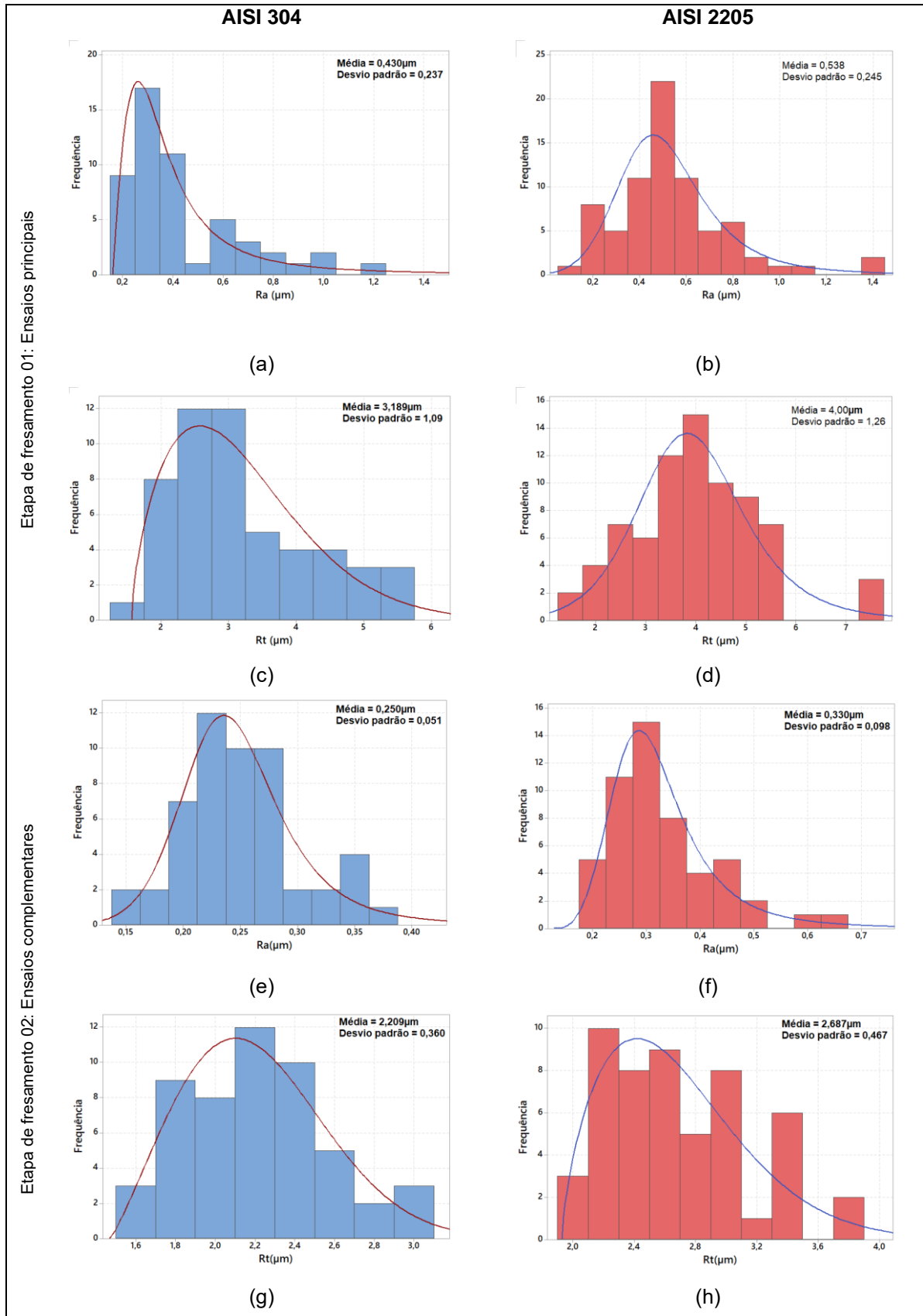
Quadro 2 - Interação entre a velocidade V_c e o avanço por dente f_z na resposta da rugosidade R_a da superfície do aço AISI 304 e duplex AISI 2205



Fonte: Elaborado pelo autor

O Quadro 03 ilustra os histogramas com as curvas de aproximação de distribuição de probabilidade das etapas 01 e 02 dos fresamentos relacionados às respostas das rugosidades R_a e R_t dos aços AISI 304 e AISI 2205. Nota-se que média dos valores de rugosidade são relativamente menores para o austenítico AISI 304 quando comparadas com as do duplex AISI 2205. O desvio padrão aponta maior dispersão ocorrida nas respostas da rugosidade R_a e R_t do aço duplex AISI 2205, a presença de alguns valores distantes da média, vistos nas extremidades direita dos histogramas contribuíram para esse comportamento.

Quadro 3 - Histogramas com curvas de distribuição de probabilidade que se ajustaram ao resultado do DOE para as rugosidades Ra e Rt.



Fonte: Elaborado pelo autor

As curvas características da distribuição de probabilidade apresentaram assimetria à direita, especialmente na avaliação do comportamento das respostas de rugosidade da fase do fresamento do aço austenítico AISI 304, e na fase de ensaios complementares do fresamento do aço duplex AISI 2205.

4.3.1 ANOVA da resposta da rugosidade superficial Ra e Rt no aço inoxidável austenítico AISI 304.

A Tabela 11 e a Figuras 39 (a) e (b), apresentam os resultados da análise de variância para rugosidade superficial Ra e Rt baseados nos ensaios executados de acordo com o planejamento experimental da etapa principal de fresamento no aço inoxidável AISI 304. A Tabela 11 mostra os resultados do valor - P, o teste de análise de variância (ANOVA) foi realizado para determinar o nível de significância dos parâmetros de usinagem na resposta da rugosidade. Tem-se também o índice de contribuição de cada fator, de forma linear, quadrática e de interação. A relação entre essas respostas contribuiu para a interpretação dos resultados na análise de variância.

Tabela 11 - Contribuição percentual dos parâmetros de entrada na resposta das rugosidades Ra e Rt na etapa 01 do fresamento no aço inoxidável AISI 304.

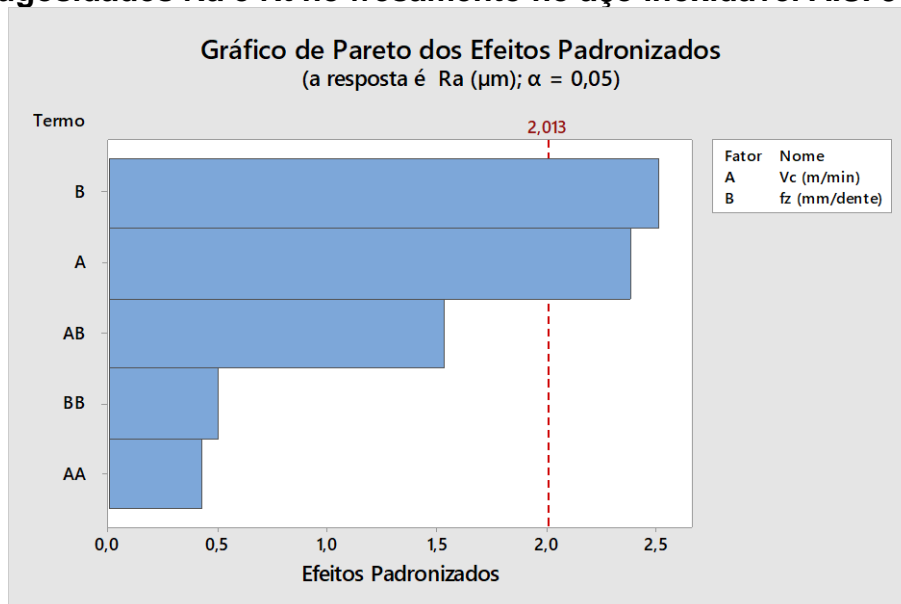
Variáveis de entrada	Variáveis de saída			
	Rugosidade Ra (μm)		Rugosidade Rt (μm)	
	Valor-P	Contribuição %	Valor-P	Contribuição %
Vc	0,021	38,89	0,005	40,15
fz	0,016	43,02	0,002	48,17
Vc ²	0,673	-	0,169	-
fz ²	0,618	-	0,224	-
Vc*fz	0,131	-	0,486	-

Fonte: Elaborado pelo autor

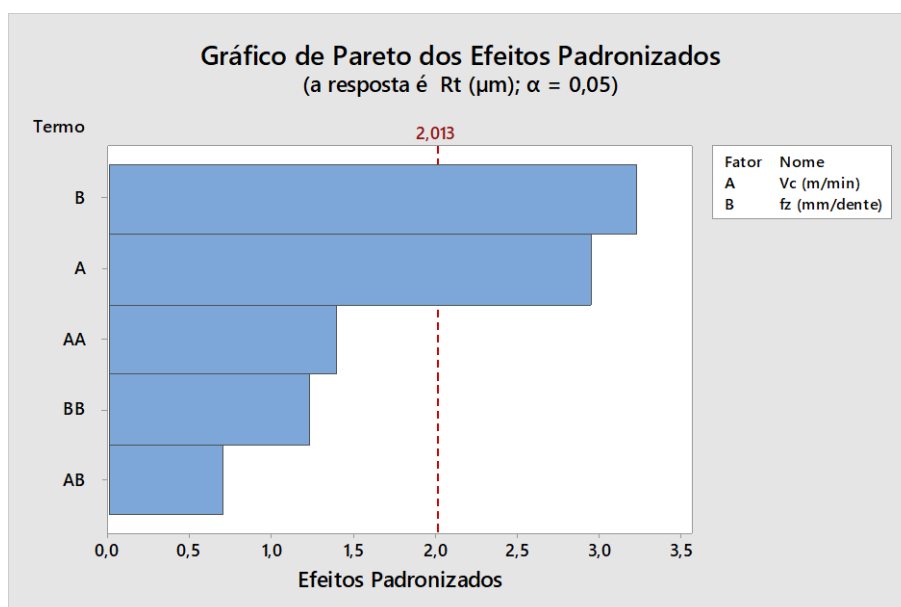
No caso da rugosidade Ra a variável de entrada que mais se relacionou com a resposta foi o avanço por dente fz com 43,02% e valor - P igual a 0,016, inferior ao índice de significância de 0,05, esse resultado pode ser comprovado comparando-se com o gráfico de Pareto dos efeitos padronizados no experimento, Figura 39 (a), onde a barra B, que representa o parâmetro de entrada fz apresentou maior magnitude. No

caso do parâmetro de resposta R_t , o avanço por dente apresentou índice de contribuição ainda maior, de 48,17%, e valor = P de 0,002, inferior ao nível de significância, comprovando a forte relação entre eles. A Figura 39 (b) atesta os resultados indicados na Tabela 11 para o parâmetro de saída R_t .

Figura 39 - Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados na resposta das rugosidades R_a e R_t no fresamento no aço inoxidável AISI 304.



(a)



(b)

Fonte: Elaborado pelo autor

A relação inferencial existente entre os parâmetros de corte, V_c (m/min), f_z (mm/dente), e as variáveis de resposta investigadas, rugosidade R_a e R_t , foram expressas com base na adequação dos modelos através do coeficiente de determinação R^2 , correspondente à quantidade de variabilidade considerada pelo modelo de regressão.

No caso dos experimentos realizados, o valor de R^2 foi de 24,16% na avaliação da rugosidade R_a , e 32,10% na avaliação da rugosidade R_t . Os valores percentuais de R^2 do experimento são considerados relativamente baixos, isso sugere a influência das altas velocidades de corte adotados no experimento, uma vez que 04 réplicas foram aplicadas no DOE.

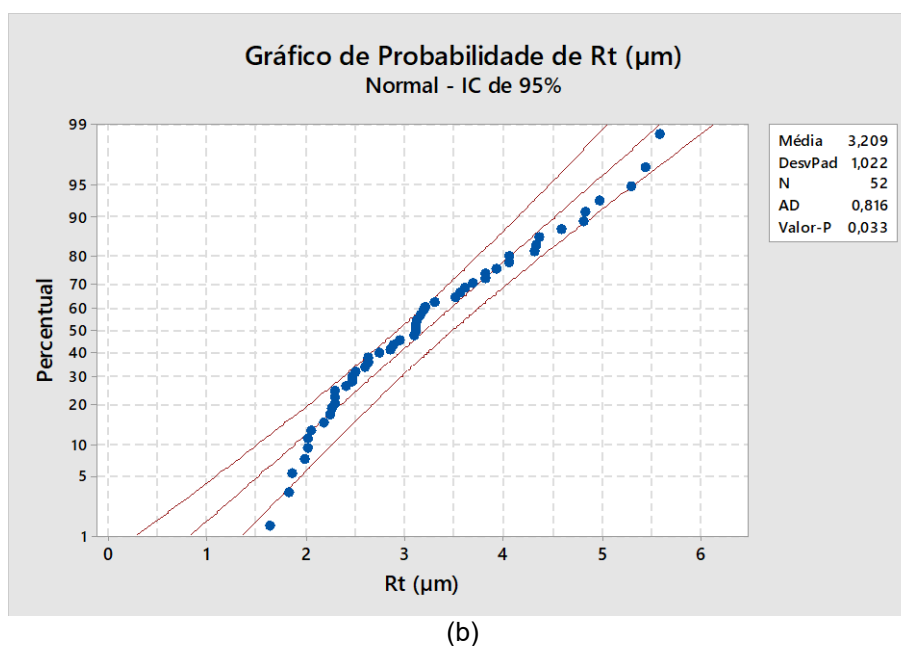
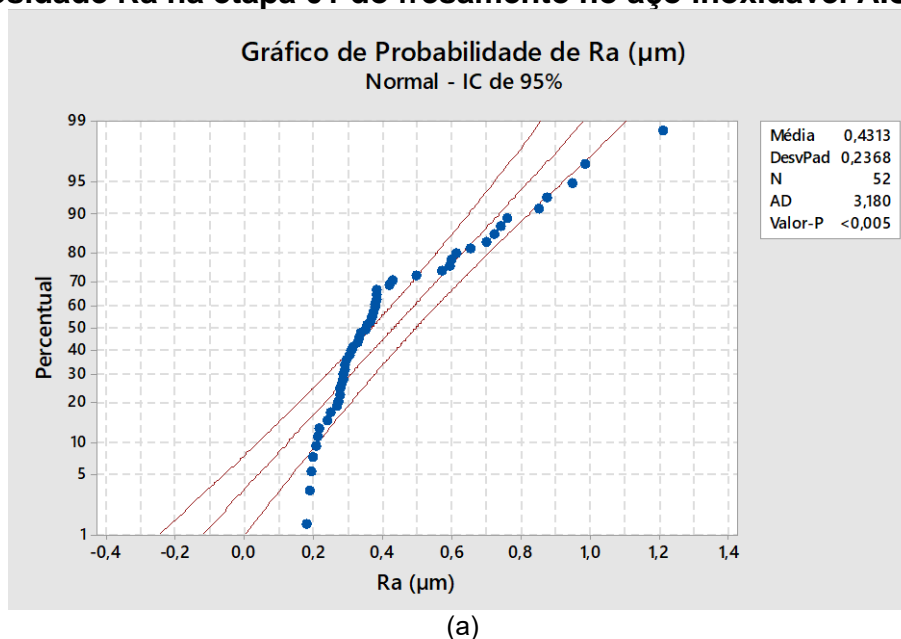
As equações de 3 e 4, representam as regressões fatoriais do comportamento da resposta das rugosidades R_a e R_t com base nos resultados experimentais.

$$R_a (\mu m) = 0,63 - 0,00285V_c + 10,0f_z + 0,000003V_c * V_c - 22,6f_z * f_z - 0,00682V_c * f_z \quad (3)$$

$$R_t (\mu m) = 9,61 - 0,0410V_c + 65,4f_z + 0,000041V_c * V_c - 226f_z * f_z - 0,0127V_c * f_z \quad (4)$$

Os gráficos de distribuição de probabilidade da resposta da rugosidade superficial R_a e R_t são representados na Figura 40 (a) e (b). Verifica-se que o valor do valor - P, foi menor que o valor do nível de significância $\alpha = 0,05$, dessa maneira rejeita-se a hipótese nula, ou seja, o resultado dos experimentos para a resposta das rugosidades R_a e R_t , não seguem uma distribuição de probabilidade normal. Assim, faz-se necessário uma investigação para se determinar modelo de distribuição de probabilidade em que as respostas mais se ajustam. Por meio do software de apoio utilizado nesta pesquisa, foi possível identificar o tipo de distribuição de probabilidade que mais se adequa ao modelo, através do comando (Distribution_ID Plot), identificação de distribuição de probabilidade para os dados da Rugosidade.

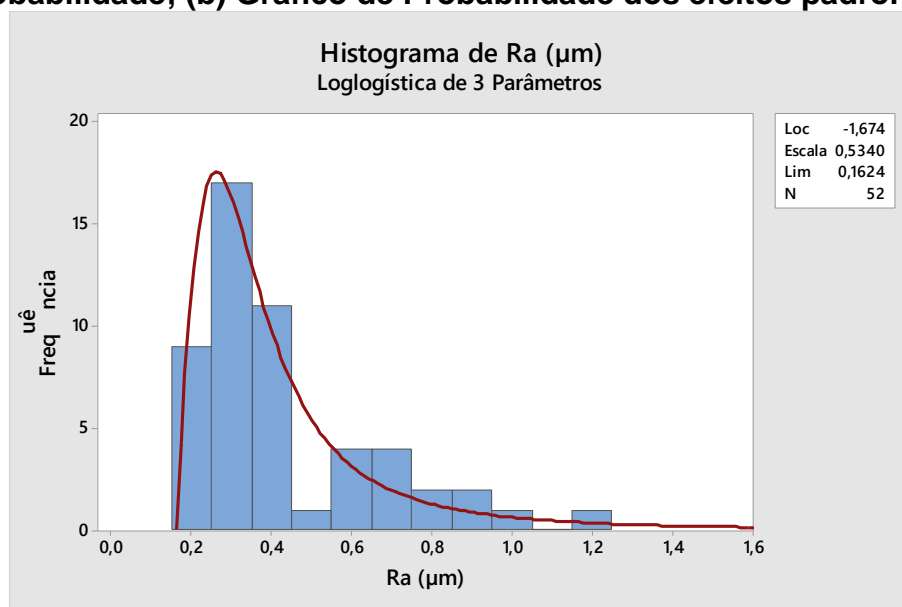
Figura 40 - Gráfico de Probabilidade dos efeitos padronizados na resposta da rugosidade Ra na etapa 01 do fresamento no aço inoxidável AISI 304.



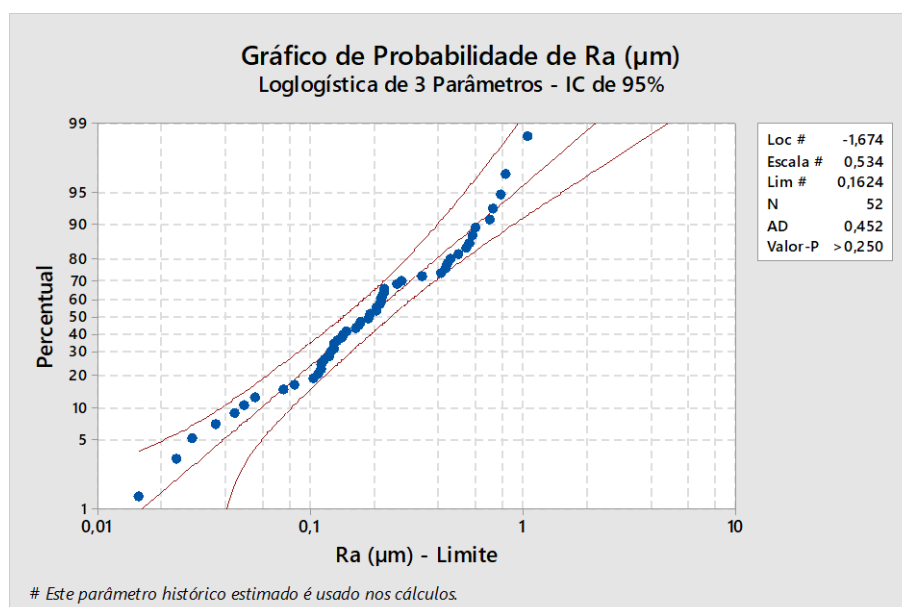
De acordo com a Estatística de Anderson Darling, (Ver Apêndice F) a distribuição de probabilidade que mais se ajustou aos resultados da rugosidade Ra, foi a Loglogística de 03 parâmetros $AD = 0,646$. Para verificação desse resultado, foi gerado um histograma com a curva da distribuição de probabilidade, Figura 41 (a), e o gráfico de distribuição de probabilidade Loglogística de 03 parâmetros na Figura 41 (b). Os indicadores numéricos mostraram que o valor - P ficou maior que 0,250 na distribuição de probabilidade Loglogística de 03 parâmetros, ou seja, maior que o valor

do nível de significância, aceitando-se assim que os resultados dos experimentos para a resposta da rugosidade Ra seguem a distribuição de probabilidade indicada.

Figura 41 - Resultados do AISI 304: (a) Histograma com curva de distribuição de probabilidade; (b) Gráfico de Probabilidade dos efeitos padronizados.



(a)



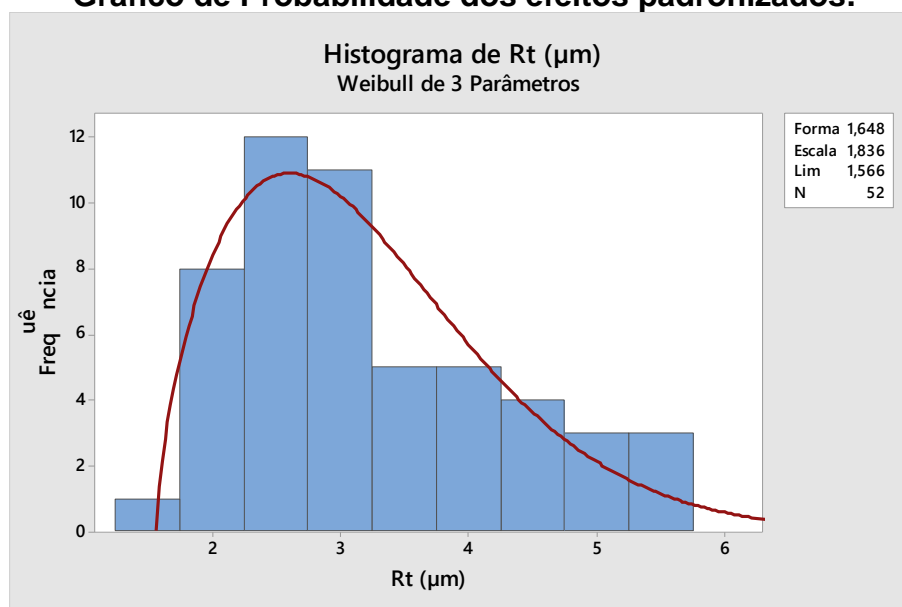
(b)

Fonte: Elaborado pelo autor

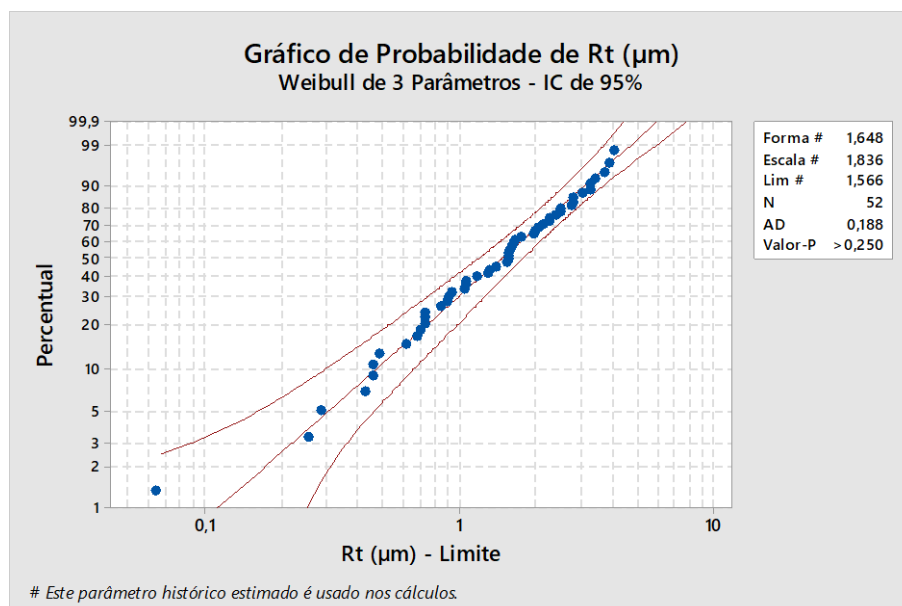
Os resultados da investigação para identificação do tipo de distribuição de probabilidade dos dados amostrais da resposta da rugosidade Rt do DOE são apresentados no Apêndice G. As distribuições que melhor se ajustaram aos pontos percentuais foram: Lognormal de 03 parâmetros e Lognormal. O relatório numérico

existente da estatística de Anderson-Darling apontou que o melhor ajuste de distribuição foi Weibull de 03 parâmetros. O histograma com curva de distribuição de probabilidade que se adequou ao DOE, rugosidade R_t é mostrado na Figura 42 (a).

Figura 42 - (a) Histograma com curva de distribuição de probabilidade; (b) Gráfico de Probabilidade dos efeitos padronizados.



(a)



(b)

Fonte: Elaborado pelo autor

Os indicadores numéricos mostraram que o resultado do valor - P foi $> 0,250$ na distribuição de probabilidade Weibull de 03 parâmetros, maior que o valor do nível de significância, aceitando-se assim que o resultado dos experimentos para a

resposta da rugosidade R_t segue a distribuição de probabilidade Weibull de 03 parâmetros. Na Figura 42 (b) é apresentado o gráfico de probabilidade dos efeitos padronizados ajustados ao DOE para a rugosidade R_t no fresamento do aço inoxidável AISI 304.

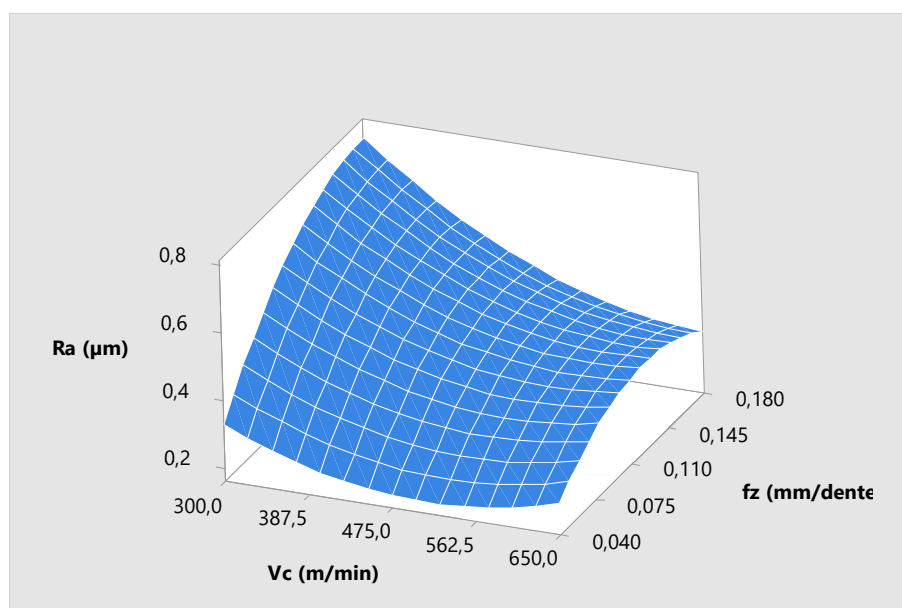
4.3.2 Otimização da resposta da rugosidade superficial R_a e R_t no aço inoxidável austenítico AISI 304.

Para melhor compreensão comportamental das respostas das rugosidades R_a e R_t , gráficos de superfície foram plotados, e uma otimização numérica para a determinação da melhor combinação dos parâmetros de corte na minimização da rugosidade foi executada.

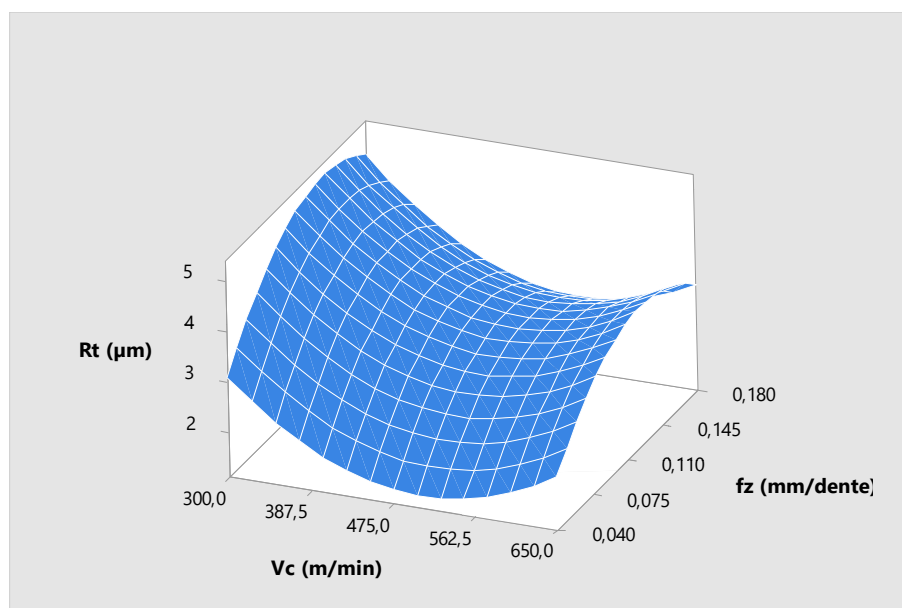
A Figura 43 (a) e (b) ilustram os gráficos de superfície das respostas das rugosidades R_a e R_t , com base na interação entre os fatores de entrada, V_c e f_z , com profundidade de corte $a_p = 1,0\text{mm}$. É observado que a superfície do gráfico da Figura 43 (a) possui geometria mais atenuada, comparado ao da Figura 43 (b), provavelmente em função do diferente comportamento probabilístico apresentado pelas duas respostas do DOE em questão.

É possível notar que os pontos mínimos das respostas de rugosidade, estão tendendo às adjacências do menor valor de f_z testado, combinados a uma velocidade de corte pouco superior a 475m/min . Já os pontos de maiores magnitudes de rugosidade, estão localizados na região do maior nível de f_z , $0,18\text{mm/dente}$ combinados ao menor nível de velocidade de corte, 300m/min . Os planos espaciais são indicados por: eixo x (velocidade de corte); eixo z (avanço por dente); e eixo y (resposta da rugosidade R_a e R_t respectivamente).

Figura 43 - Gráfico de superfície de resposta: (a) da rugosidade Ra; (b) da rugosidade Rt.



(a)



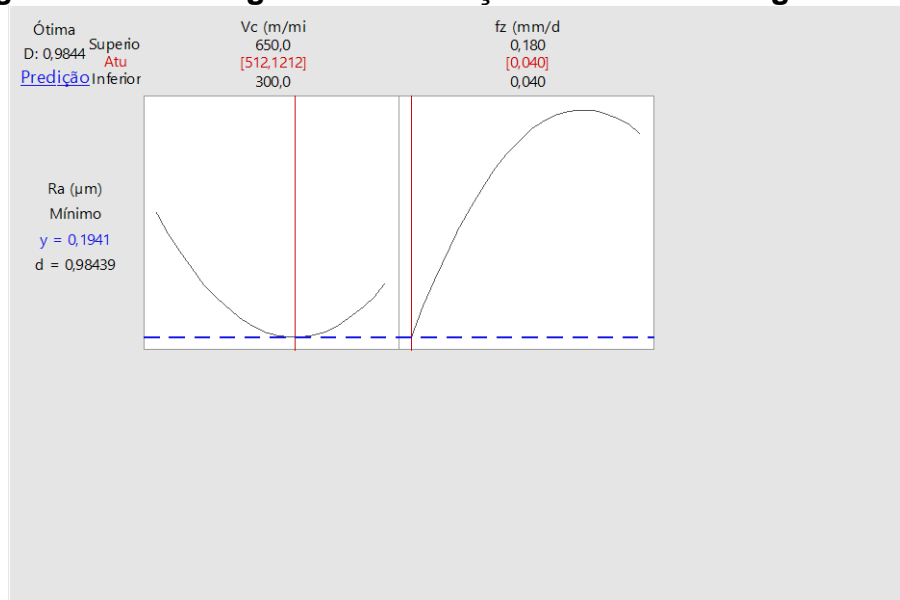
(b)

Fonte: Elaborado pelo autor

A modelagem da otimização numérica para se obter as menores respostas da rugosidade Ra e Rt foi realizada. A Figura 44 apresenta a resposta numérica otimizada para a rugosidade Ra, as curvas mostradas são baseadas nos efeitos principais provocados pelos parâmetros de entrada, na resposta do DOE. A solução ótima proposta para o modelo é a combinação de $V_c = 512,1212\text{m/min}$ e $f_z = 0,040\text{m/min}$ com resposta no eixo y = $0,1941\mu\text{m}$, e índice de predição de 0,9844, ou seja, 98,44%.

A Tabela 12 apresenta mais duas possíveis soluções com índices de predição propostos pela da manipulação estatística.

Figura 44 - Modelagem da otimização numérica da rugosidade Ra



Fonte: Elaborado pelo autor

As três soluções de otimização numérica são representados na Tabela 12, além da solução 1 descrita anteriormente, as outras combinações são, ($V_c = 496\text{m/min}$; $f_z = 0,04\text{mm/dente}$; índice de predição de 98,3%), e ($V_c = 543\text{m/min}$; $f_z = 0,05\text{mm/dente}$; índice de predição de 93,9%).

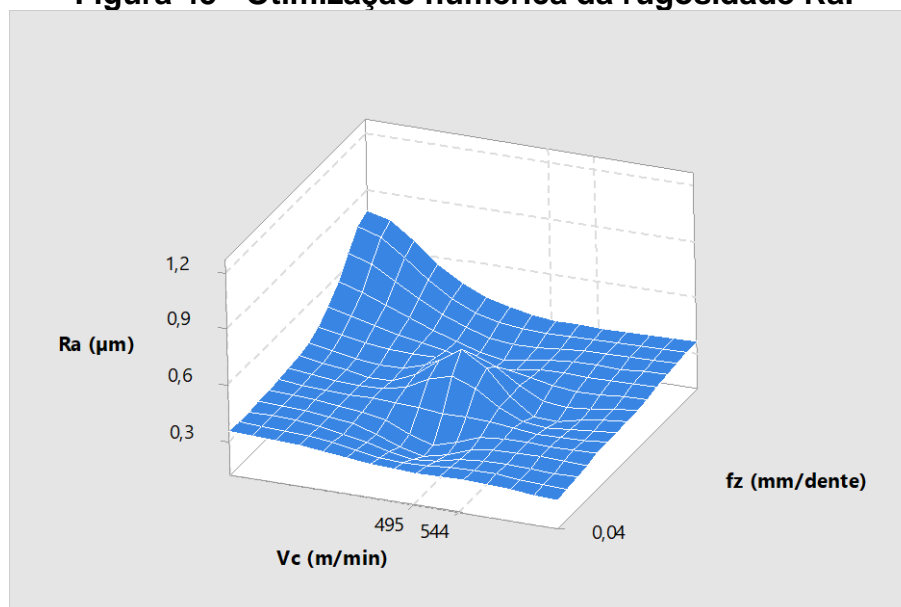
Tabela 12 - Otimização numérica da rugosidade Ra.

Soluções propostas	Vc (m/min)	fz (mm/dente)	Menor valor (µm)	Maior valor (µm)	Alvo da predição (µm)	Resposta prevista (µm)	Índice composto
1	512	0,04				0,194	0,984
2	496	0,04	0,178	1,21	0,178	0,195	0,983
3	543	0,05				0,241	0,939

Fonte: Elaborado pelo autor

A partir do levantamento da otimização numérica da rugosidade Ra, um gráfico de superfície de resposta foi elaborado, Figura 45, nele está destacado a região de investigação para obtenção da menor resposta prevista.

Figura 45 - Otimização numérica da rugosidade Ra.



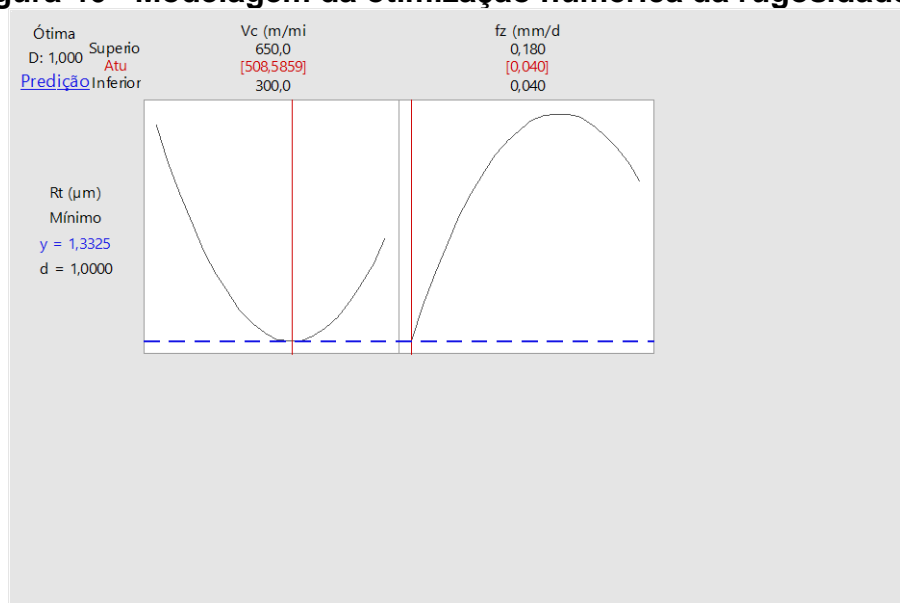
Fonte: Elaborado pelo autor

Testes práticos comprobatórios foram realizados em laboratório, a média dos resultados obtidos foram:

- a) Solução 01: Ra média 0,322µm com desvio padrão de 0,05;
- b) Solução 02: Ra média 0,241µm com desvio padrão de 0,001;
- c) Solução 03: Ra média 0,253µm com desvio padrão de 0,05;

Dentre as soluções testadas, em nível estatístico, a interação que mais aproximou-se da previsão foi: $V_c = 543\text{m/min}$ $f_z = 0,05\text{mm/dente}$ (solução 3 da Tabela 12), uma variação 5% superior em relação a solução numérica. Apesar disso, vale ressaltar que, as respostas obtidas pelos testes com a hipótese de solução nº02 apresentaram menor variação, com desvio padrão de 0,001.

O mesmo procedimento foi realizado para a resposta da rugosidade R_t , as curvas mostradas na Figura 46 foram geradas a partir dos efeitos principais provocados pelos parâmetros de entrada, na resposta do DOE. A solução otimizada para o modelo foi: $V_c = 508,5859\text{m/min}$ e $f_z = 0,040\text{mm/dente}$ com resposta no eixo $y = 1,3325\mu\text{m}$, com índice de predição de 1,000. A Tabela 13 apresenta mais duas possíveis soluções com os seus índices de predição propostos pela manipulação estatística.

Figura 46 - Modelagem da otimização numérica da rugosidade Rt.

Fonte: Elaborado pelo autor

As três melhores soluções de otimização numérica são representados na tabela 13, além da solução 1 descrita anteriormente, as outras combinações são, ($V_c = 475$ m/min; $f_z = 0,05$ mm/dente; índice de predição de 98,2%), e ($V_c = 562$ m/min; $f_z = 0,04$ mm/dente; índice de predição de 98,2%).

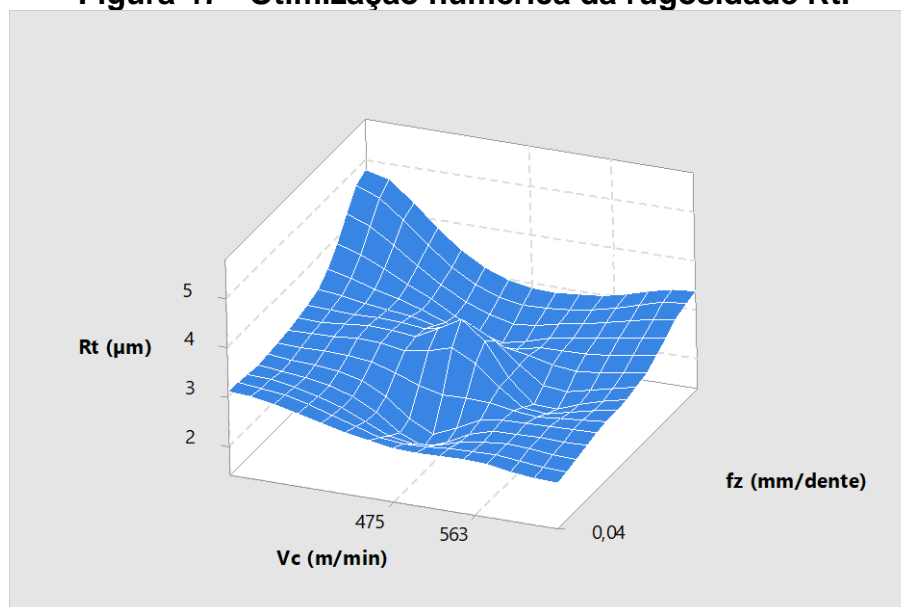
Tabela 13 - Otimização numérica da rugosidade Rt.

Soluções propostas	Vc (m/min)	fz (mm/dente)	Menor valor (µm)	Maior valor (µm)	Alvo da predição (µm)	Resposta prevista (µm)	Índice composto
1	508	0,04				1,332	1,000
2	475	0,05	1,63	5,57	1,63	1,699	0,982
3	562	0,04				1,700	0,982

Fonte: Elaborado pelo autor

O gráfico de superfície de resposta para otimização numérica de Rt foi elaborado, Figura 47, nele está destacado a região de investigação para obtenção da menor resposta prevista.

Figura 47 - Otimização numérica da rugosidade Rt.



Fonte: Elaborado pelo autor

Os testes práticos comprobatórios realizados retornaram os seguintes resultados:

- d) Solução 01: Rt média 3,135 μ m com desvio padrão de 0,18;
- e) Solução 02: Rt média 1,985 μ m com desvio padrão de 0,08;
- f) Solução 03: Rt média 2,620 μ m com desvio padrão de 0,35;

A interação que mais aproximou-se da previsão foi: $V_c = 475\text{m/min}$ $f_z = 0,05\text{mm/dente}$ (solução 2 da Tabela 13). Nota-se que o desvio padrão apresentado nos testes da solução 02 também foi menor em relação aos outros testes, indicando menor variação dos dados em torno do valor médio.

4.3.3 ANOVA da resposta da rugosidade superficial Ra e Rt no aço inoxidável duplex AISI 2205.

A ANOVA realizada para os dados coletados nos ensaios do aço inoxidável duplex AISI 2205 mostrou uma forte influência do avanço por dente f_z na resposta da rugosidade Ra, a Tabela 14 e a Figura 48 (a) e (b), mostram os resultados. A Tabela 14 indica que variável de entrada que mais se relacionou com a resposta da rugosidade Ra foi o avanço por dente f_z com 58,53% e valor-P igual a 0,001. O gráfico

de Pareto dos efeitos padronizados no experimento é mostrado na Figura 48 (a), onde a barra B, que representa o parâmetro de entrada f_z apresentou maior magnitude.

Tabela 14 - Contribuição percentual dos parâmetros de entrada na resposta das rugosidades Ra e Rt na etapa 01 do fresamento no aço inoxidável AISI 2205.

Variáveis de entrada	Variáveis de saída			
	Rugosidade Ra (μm)		Rugosidade Rt (μm)	
	Valor-P	Contribuição %	Valor-P	Contribuição %
Vc	0,019	4,02	0,131	-
f_z	0,001	58,53	0,001	31,05
V_c^2	0,097	-	0,038	3,94
f_z^2	0,051	2,78	0,001	34,39
$V_c \cdot f_z$	0,528	-	0,538	-

Fonte: Elaborado pelo autor

No caso do parâmetro de resposta Rt, o avanço por dente quadrático f_z^2 e f_z linear apresentaram os maiores índices de contribuição, com 34,39% e 31,05% respectivamente, e valor = P de 0,001. A Figura 48 (b) ilustra o gráfico de Pareto para o parâmetro de saída Rt.

A relação inferencial existente entre os parâmetros de corte, Vc (m/min), f_z (mm/dente), e as variáveis de resposta investigadas, rugosidade Ra e Rt, foram expressas com base na adequação dos modelos através do coeficiente de determinação R^2 , correspondente à quantidade de variabilidade considerada pelo modelo de regressão.

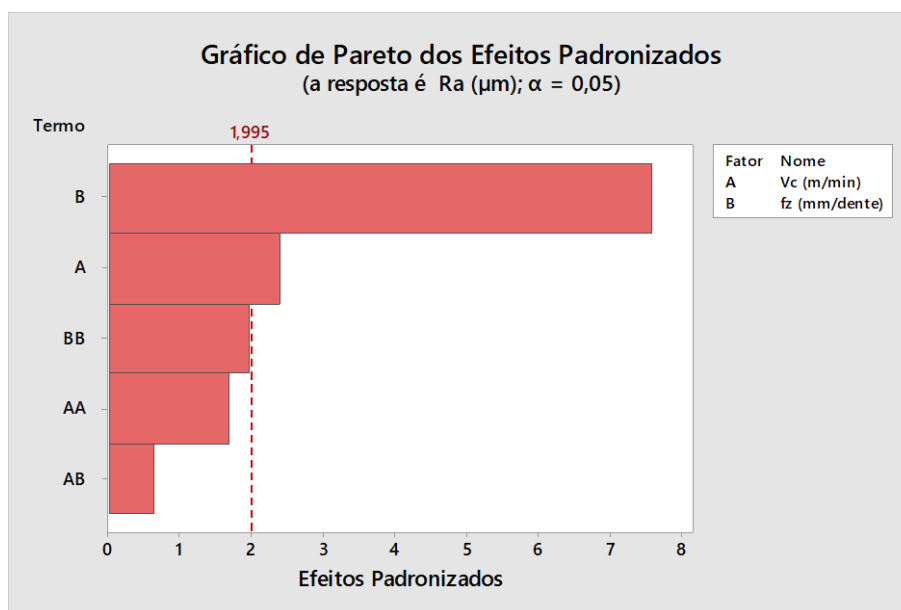
No caso dos experimentos realizados, o valor de R^2 foi de 47,48% na avaliação da rugosidade Ra, e 31,99% na avaliação da rugosidade Rt. Como houve maior variabilidade no desvio padrão nos dados coletados nos experimentos realizados com o aço duplex AISI 2205, o valor do R^2 foi maior para o duplex comparado ao austenítico AISI 304 apresentado em seção anterior.

As equações de 5 e 6, representam as regressões fatoriais do comportamento da resposta das rugosidades Ra e Rt com base nos resultados experimentais.

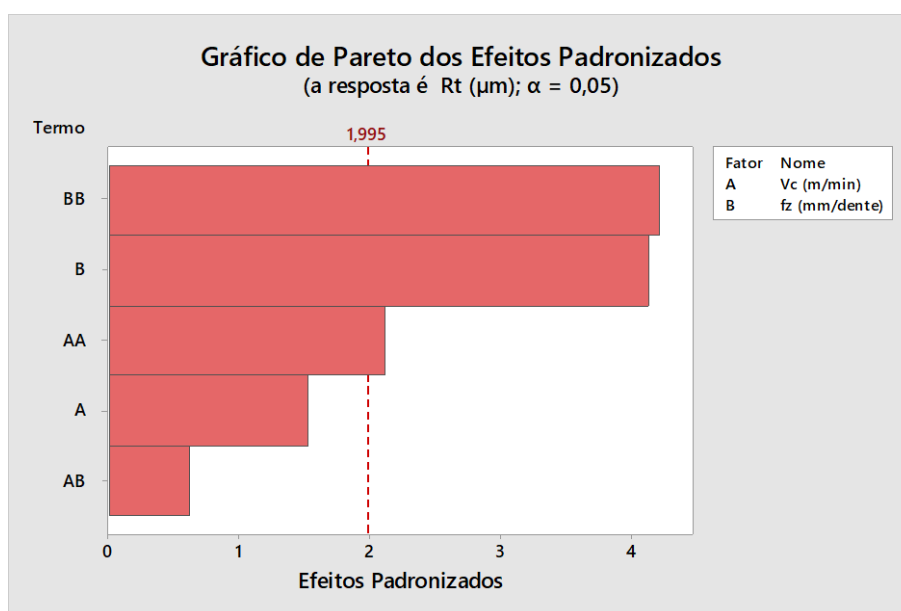
$$Ra (\mu\text{m}) = 0.832 - 0.00305V_c + 7.77f_z + 0.000003V_c^2 - 15.40f_z^2 - 0.00306V_c f_z \quad (5)$$

$$Rt (\mu\text{m}) = -3,31 + 0,0212V_c + 57,5f_z + 0,000022V_c^2 - 193,4f_z^2 - 0,0176V_c f_z \quad (6)$$

Figura 48 - Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados na resposta da rugosidade Ra na etapa 01 do fresamento no aço inoxidável duplex AISI 2205.



(a)



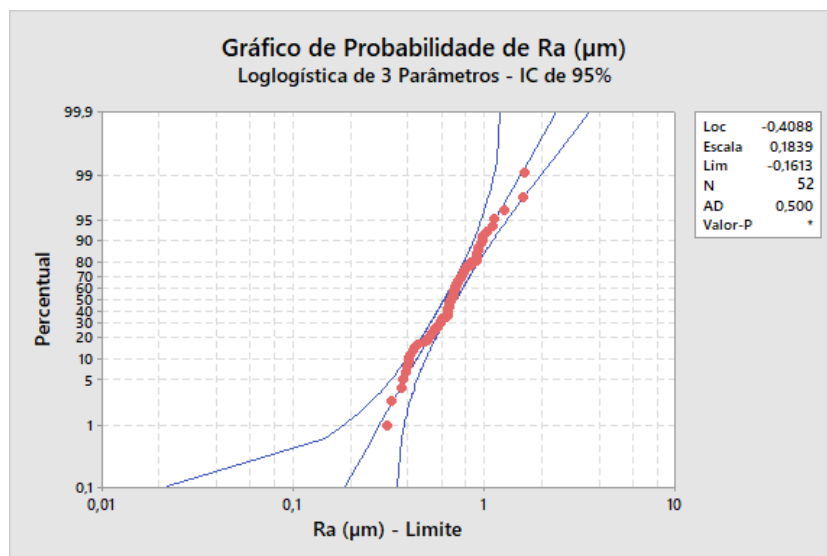
(b)

Fonte: Elaborado pelo autor

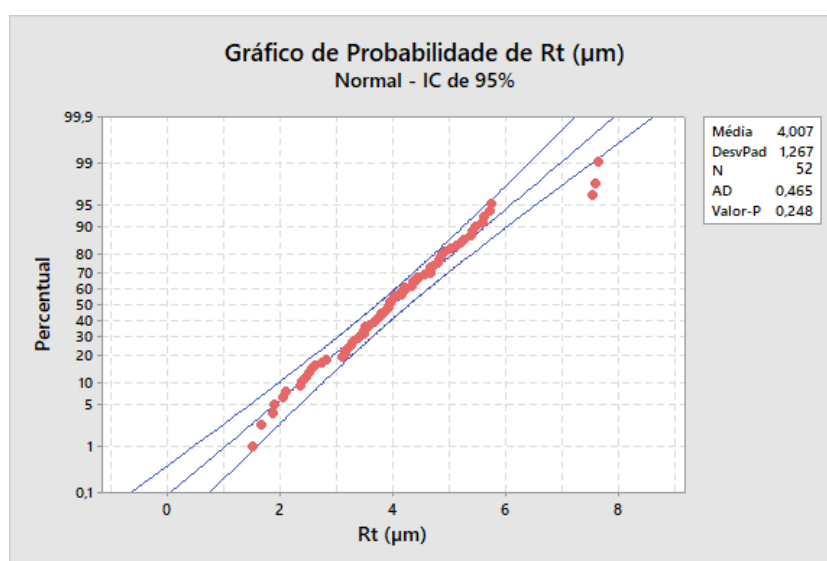
O teste de Anderson Darling foi aplicado para a identificação da melhor distribuição de probabilidade dos dados coletados a partir das respostas da rugosidade Ra e Rt nos ensaios do aço duplex AISI 2205. A distribuição de probabilidade Loglogística de 3 parâmetros foi identificada para as respostas da

rugosidade Ra e a distribuição Normal foi identificada para os dados de Rt. A figura 49 (a) e (b) representa os gráficos de probabilidades ajustados.

Figura 49 - Gráfico de Probabilidade dos efeitos padronizados na resposta da rugosidade Ra na etapa 01 do fresamento no aço inoxidável duplex AISI 2205.



(a)



(b)

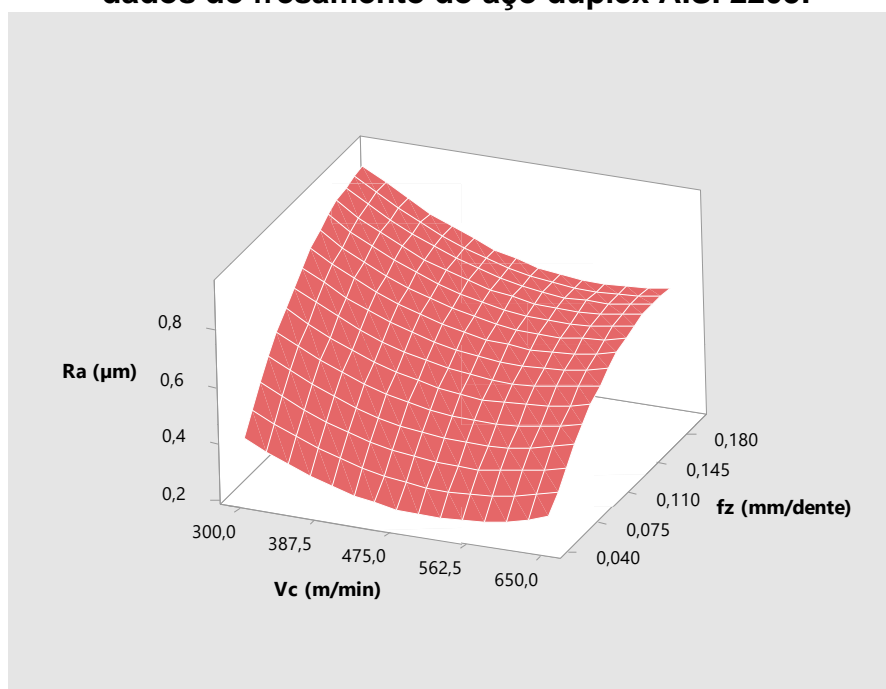
Fonte: Elaborado pelo autor

4.3.4 Otimização da resposta da rugosidade superficial Ra e Rt no aço inoxidável duplex AISI 2205.

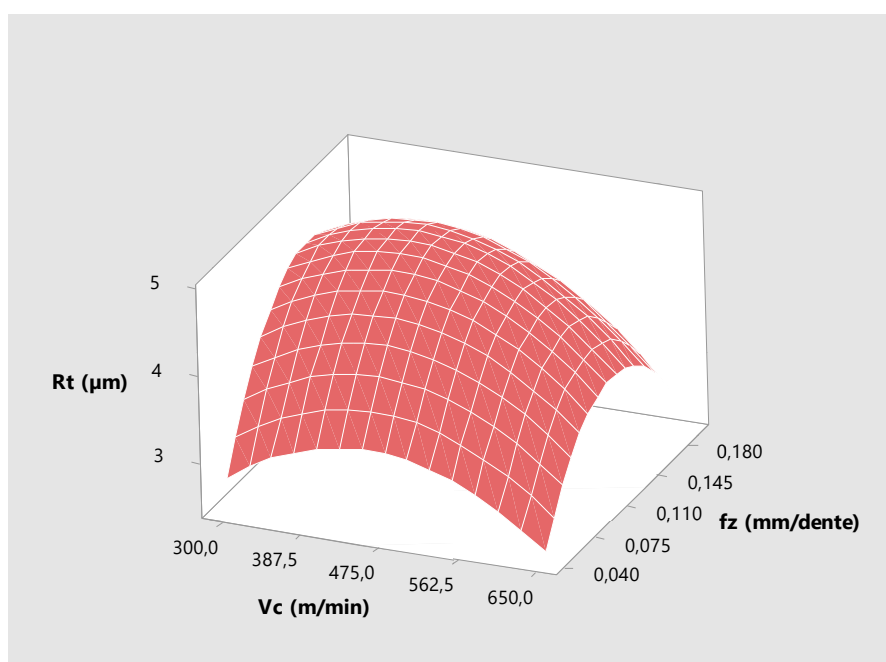
Os gráficos de superfície das respostas das rugosidades Ra e Rt são representados na Figura 50 (a) e (b). Os pontos mínimos das respostas da rugosidade

Ra estão tendendo aos valores mínimos de fz e a uma região logo após o ponto central de Vc, pouco maior que 475m/min. Já no caso da rugosidade Rt, as menores respostas foram localizadas nas extremidades de Vc associadas aos mínimos valores de fz.

Figura 50 - Gráfico de superfície de resposta da rugosidade Ra dos dados do fresamento do aço duplex AISI 2205.



(a)



(b)

Fonte: Elaborado pelo autor

A modelagem da otimização numérica para se obter as menores respostas da rugosidade Ra e Rt foi realizada. A Tabela 15 mostra os resultados da otimização numérica para a minimização da rugosidade Ra conforme os dados dos experimentos realizados na superfície do aço duplex AISI 2205.

Tabela 15 - Otimização numérica da rugosidade Ra.

Soluções propostas	Vc (m/min)	fz (mm/dente)	Menor valor (μm)	Maior valor (μm)	Alvo da predição (μm)	Resposta prevista (μm)	Índice composto
1	516	0,04				0,233	0,992
2	519	0,04	0,224	1,44	0,224	0,233	0,992
3	529	0,05				0,294	0,941

Fonte: Elaborado pelo autor

Para validar a otimização numérica, ensaios práticos configurados nas soluções apresentadas foram executados, tendo-se como resultado:

- a) Solução 01: Ra média 0,421 μm com desvio padrão de 0,09;
- b) Solução 02: Ra média 0,382 μm com desvio padrão de 0,12;
- c) Solução 03: Ra média 0,446 μm com desvio padrão de 0,11.

Dentre as soluções testadas, em nível estatístico, a interação que mais aproximou-se da previsão foi: Vc = 519m/min fz = 0,04mm/dente (solução 2 da tabela 15).

O mesmo procedimento foi realizado para a resposta da rugosidade Rt. A melhor solução numérica otimizada para o modelo foi: Vc = 650m/min e fz = 0,040mm/dente com resposta no eixo y = 1,782 μm , com índice de predição de 98,6%. A tabela 16 apresenta mais duas possíveis soluções com os seus índices de predição propostos pela manipulação estatística.

Tabela 16 - Otimização numérica da rugosidade Rt.

Soluções propostas	Vc (m/min)	fz (mm/dente)	Menor valor (μm)	Maior valor (μm)	Alvo da predição (μm)	Resposta prevista (μm)	Índice composto
1	650	0,04				1,782	0,986
2	300	0,04	1,67	7,64	1,67	1,832	0,978
3	650	0,18				1,998	0,972

Fonte: Elaborado pelo autor

Os testes práticos comprobatórios realizados retornaram os seguintes resultados:

- a) Solução 01: Rt média 1,845 μ m com desvio padrão de 0,36;
- b) Solução 02: Rt média 2,051 μ m com desvio padrão de 0,61;
- c) Solução 03: Rt média 2,424 μ m com desvio padrão de 0,38;

A interação que mais aproximou-se da previsão foi: $V_c = 650\text{m/min}$ $f_z = 0,04\text{mm/dente}$ (solução 1 da Tabela 16).

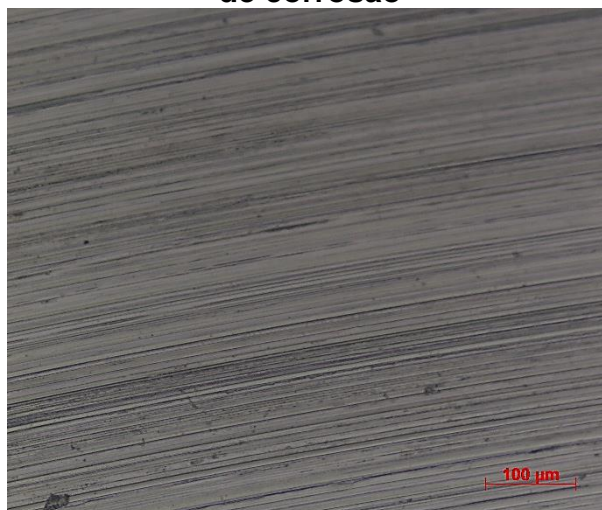
4.4 Resultados do ensaio de corrosão

Nessa subseção serão apresentadas as metalografias realizadas nos materiais após os ensaios de corrosão, e os resultados experimentais para a determinação do potencial de corrosão (através do diagrama de estabilização de circuito aberto), e as curvas de polarização potenciodinâmica.

4.4.1 Metalografia após fresamento e após ensaios de corrosão na superfície dos aços AISI 304 e AISI 2205

A superfície do aço AISI 304 após fresamento e ensaio destrutivo de corrosão é mostrada na figura 51, é possível visualizar as marcas provocadas pelo fresamento, e pontos de corrosão localizada, principalmente na direção das linhas de acabamento.

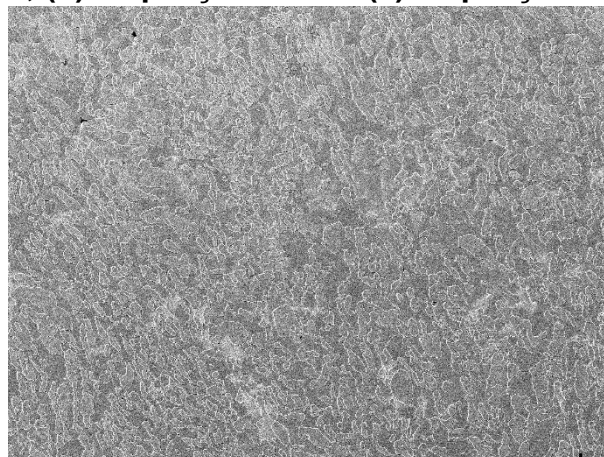
Figura 51 - Microscopia estrutural do aço AISI 304 após fresamento e ensaios de corrosão



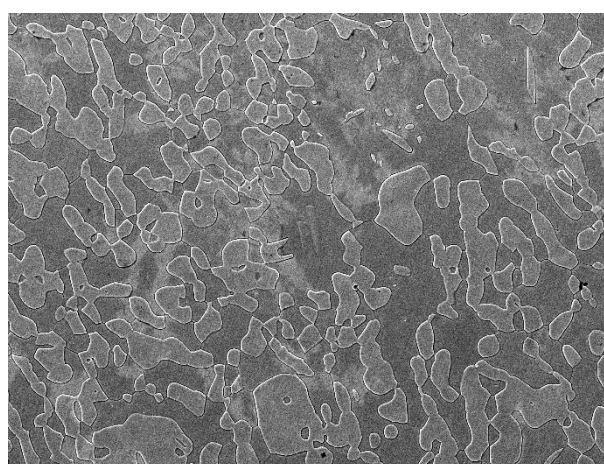
Fonte: Elaborado pelo autor

Amostras do aço AISI 2205 foram submetidas à ensaios de MEV.

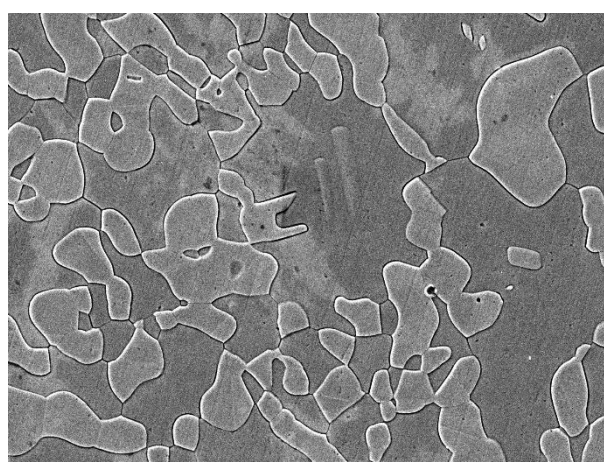
Figura 52 - MEV no duplex AISI 2205 após ensaios de corrosão: (a) ampliação 200x; (b) ampliação 500x e (c) ampliação 1000x



(a)



(b)



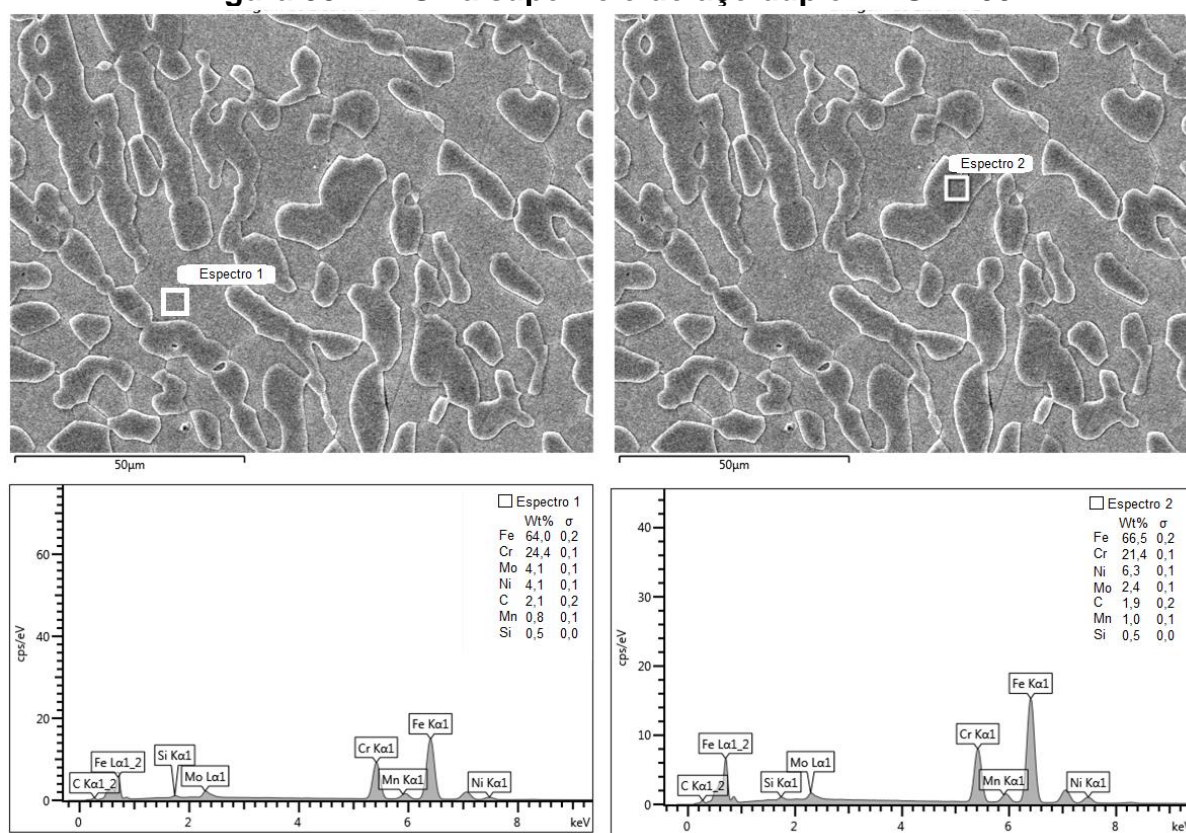
(c)

Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 52 (a), (b) e (c), mostram a microestrutura ampliada em 200, 500 e 1000 vezes respectivamente. Nota-se marcas deixadas na superfície pela ferramenta de usinagem e presença de pontos de corrosão localizada.

Ensaio de EDS na superfície do aço duplex AISI 2205, Figura 53. Observa-se a presença dos elementos alfa-gênicos como o cromo, o molibdênio e silício na fase ferrítica e os elementos gama-gênicos estabilizadores de austenita como carbono e Manganês presentes na fase austenítica.

Figura 53 - EDS na superfície do aço duplex AISI 2205

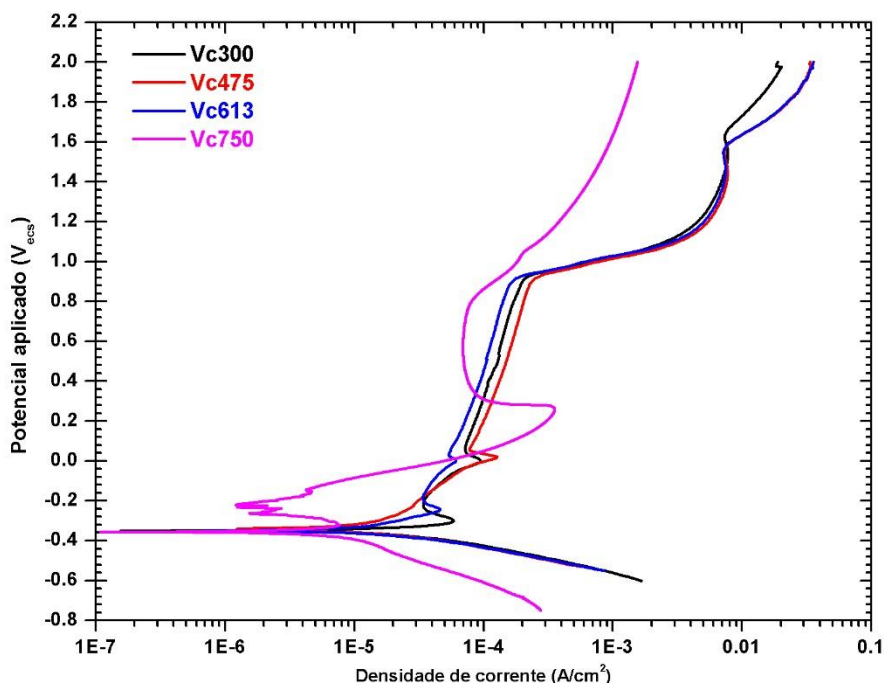


Fonte: Elaborado pelo autor

4.4.2 Curvas de polarização potenciodinâmica para o aço inoxidável austenítico AISI 304

A Figura 54 apresenta a comparação das curvas de polarização potenciodinâmica para o aço inoxidável AISI 304 em função da velocidade de corte.

Figura 54 - Curvas de polarização potenciodinâmica para o aço inoxidável austenítico AISI 304 em solução aquosa de H_2SO_4 0,5 mol/L, na condição não aerada, obtidas em relação ao eletrodo de calomelano saturado (ECS)



Fonte: Elaborado pelo autor

Nota-se que a velocidade de corte altera a região de passivação do aço inoxidável austenítico AISI 304, reduzindo-a com o aumento da velocidade de corte. A região de passivação termina no potencial de pite, em $E_{\text{pite}} = 1 \text{ V} = 1000 \text{ mV}$ ($V_c = 300, 435$ e 613 m/min), a partir do qual ocorre o aumento da densidade de corrente. Na velocidade de corte de 750 m/min ocorreu uma redução na densidade de corrente, onde o potencial de pite indicou $E_{\text{pite}} = 0,8 \text{ V} = 800 \text{ mV}$, comportamento que facilita o ataque à corrosão por pite. Pode-se observar que a densidade de corrente crítica (maior densidade de corrente suportada pela amostra antes de sofrer passivação) aumenta com o aumento da velocidade de corte, dificultando assim a passivação da superfície metálica.

A Tabela 17 apresenta os parâmetros eletroquímicos extraídos das curvas de polarização potenciodinâmica apresentadas na Figura 54, de acordo com as condições estabelecidas em laboratório, onde se tem:

- a) E_{PP} = potencial de passivação primária;
- b) i_c = densidade de corrente de crítica;
- c) E_P = potencial de passivação completa.

- d) E_{pite} = potencial de pite;
 e) i_{pite} = densidade de corrente de pite;
 f) Faixa de passivação: $\Delta E_{\text{pass}} = E_{\text{pite}} - E_P$.

Tabela 17 - Parâmetros eletroquímicos obtidos das curvas de polarização potenciodinâmicas para a amostra de aço inoxidável austenítico AISI 304, em solução de H_2SO_4 0,5 mol/L, na condição não aerada, em função da velocidade de corte, em relação ao eletrodo de calomelano saturado (ECS)

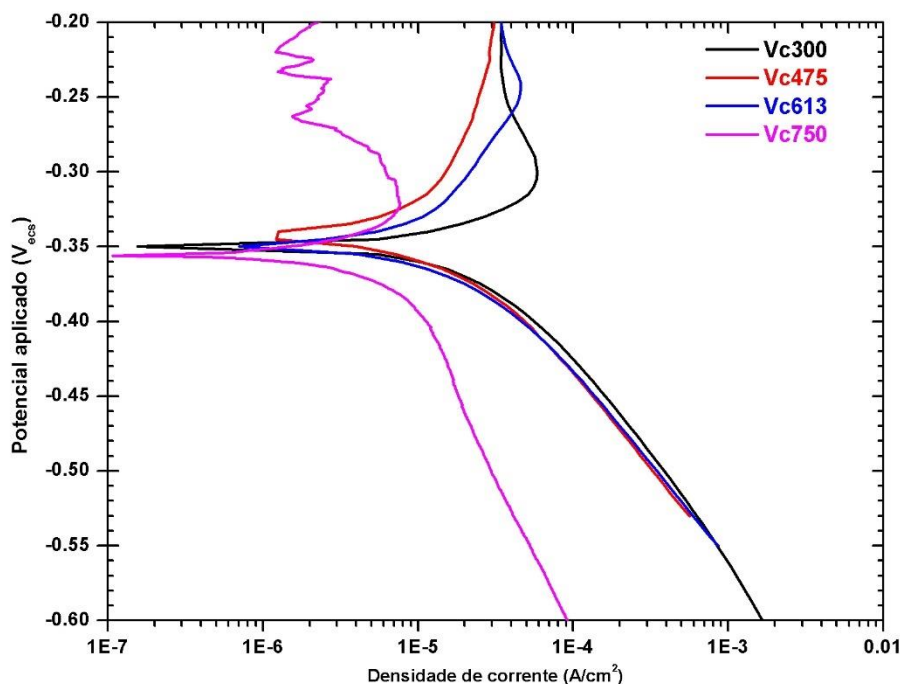
Vc (m/min)	E_{PP} (V _{ECS})	i_c (A/cm ²)	E_P (V _{ECS})	E_{pite} (V _{ECS})	i_{pite} (A/cm ²)	ΔE_{pass} (V _{ECS})
300	0	$9,52 \times 10^{-5}$	0,500	1,000	$12,9 \times 10^{-5}$	0,500
475	0	$10,3 \times 10^{-5}$	0,500	1,000	$15,0 \times 10^{-5}$	0,500
613	0	$6,11 \times 10^{-5}$	0,500	1,000	$10,5 \times 10^{-5}$	0,500
750	0,255	$35,4 \times 10^{-5}$	0,500	0,800	$7,02 \times 10^{-5}$	0,300

Fonte: Elaborado pelo autor

A Tabela 17 mostra que os parâmetros E_{PP} , E_P , E_{pite} e ΔE_{Pass} , para Vc = 300, 475 e 613 m/min não são influenciados pela velocidade de corte. Contudo, o aumento da velocidade de corte, reduz a densidade de corrente de crítica, favorecendo a passivação do material, e reduz a densidade de corrente de pite, que diminui a vida útil do material frente à corrosão por pite.

De forma distinta, na velocidade de corte de 750 m/min, os parâmetros eletroquímicos são desfavorecidos, indicando que esta velocidade de corte não é adequada a resistência à corrosão do aço inoxidável austenítico AISI 304 em solução de H_2SO_4 0,5 mol/L. A Figura 55 apresenta a comparação das curvas de Tafel, extraídas da Figura 54, em função da velocidade de corte.

Figura 55 - Curvas de Tafel obtidas da Figura 54 para o aço inoxidável austenítico AISI 304 em solução aquosa de H_2SO_4 0,5 mol/L, na condição não aerada, obtidas em relação ao eletrodo de calomelano saturado (ECS)



Fonte: Elaborado pelo autor

De acordo com a análise da Figura 55, o potencial de corrosão em função de V_c , oscila na faixa de $-0,34$ a $-0,36 V_{ECS}$. Observa-se que a região catódica das amostras com $V_c = 300, 475$ e 613 m/min é constante, evidenciando que o processo catódico (onde não ocorre corrosão), na região de Tafel, não sofre influência da velocidade de corte. Para $V_c = 750$ m/min as densidades de corrente são inferiores, indicando que nesta velocidade a resistência à corrosão é maior. Já as regiões anódicas são distintas, indicando que a velocidade de corte influencia diretamente no processo de corrosão da amostra.

A Tabela 18 apresenta os parâmetros eletroquímicos extraídos das curvas de polarização potenciodinâmica apresentadas na Figura 54, de acordo com as condições estabelecidas em laboratório, onde se tem:

- E_{corr} = potencial de corrosão, em volts;
- i_{corr} = densidade de corrente de corrosão;
- b_a = inclinação anódica da reta de Tafel;
- b_c = inclinação catódica da reta de Tafel;
- R_{corr} (mpy) = taxa de corrosão, em milésimo de polegada por ano;

f) R_{corr} (mma) = taxa de corrosão, em milímetro por ano.

Tabela 18 - Parâmetros eletroquímicos obtidos das curvas de polarização potenciodinâmicas para a amostra de aço inoxidável austenítico AISI 304, em solução de H_2SO_4 0,5 mol/L, na condição não aerada, em função da velocidade de corte, em relação ao eletrodo de calomelano saturado (ECS)

Vc (m/min)	E_{corr} (V _{ECS})	I_{corr} (A/cm ²)	b_a (V/década)	b_c (V/década)	R_{corr} (mpy)	R_{corr} (mma)
300	- 0,350	$2,729 \times 10^{-6}$	0,015	0,018	1,1728	0,02979
475	- 0,343	$1,788 \times 10^{-6}$	0,026	0,020	0,7685	0,01952
613	- 0,348	$1,641 \times 10^{-6}$	0,015	0,018	0,7055	0,01792
750	- 0,356	$0,218 \times 10^{-6}$	0,004	0,004	0,09378	0,002382

Fonte: Elaborado pelo autor

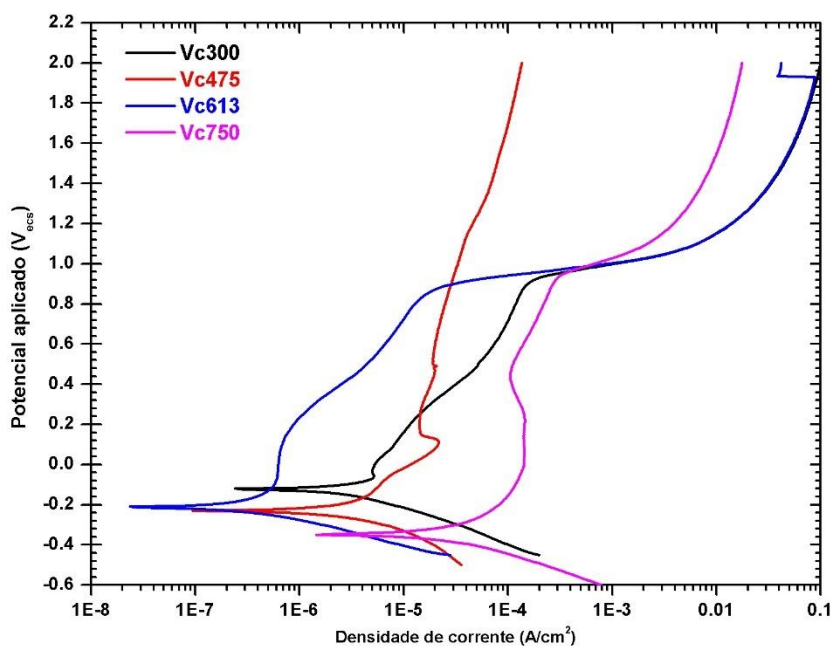
Como se observa na Tabela 18, à medida que se aumenta a velocidade de corte, reduz-se a densidade de corrente de corrosão e, conseqüentemente, a taxa de corrosão. Ainda, observa-se que o potencial de corrosão se torna praticamente constante.

4.4.3 Curvas de polarização potenciodinâmica para o aço inoxidável duplex AISI 2205

A Figura 56 apresenta as curvas de polarização potenciodinâmica para o aço inoxidável duplex AISI 2205 em função da velocidade de corte. Nota-se que as amostras apresentam comportamento corrosivo diferentes. Mas, de modo geral, apresentam região de passivação.

A Tabela 19 apresenta os parâmetros eletroquímicos extraídos das curvas de polarização potenciodinâmica apresentadas na Figura 56, de acordo com as condições estabelecidas em laboratório.

Figura 56 - Curvas de polarização potenciodinâmica para o aço inoxidável duplex AISI 2205 em solução aquosa de H₂SO₄ 0,5 mol/L, na condição não aerada, obtidas em relação ao eletrodo de calomelano saturado (ECS)



Fonte: Elaborado pelo autor

Como se mostra na Tabela 19, o aumento da velocidade de corte aumenta a densidade de corrente de crítica e a densidade de corrente de pite, já a faixa de passivação pode ser considerada constante.

Tabela 19 - Parâmetros eletroquímicos obtidos das curvas de polarização potenciodinâmicas para a amostra de aço inoxidável duplex AISI 2205, em solução de H₂SO₄ 0,5 mol/L, na condição não aerada, em função da velocidade de corte, em relação ao eletrodo de calomelano saturado (ECS)

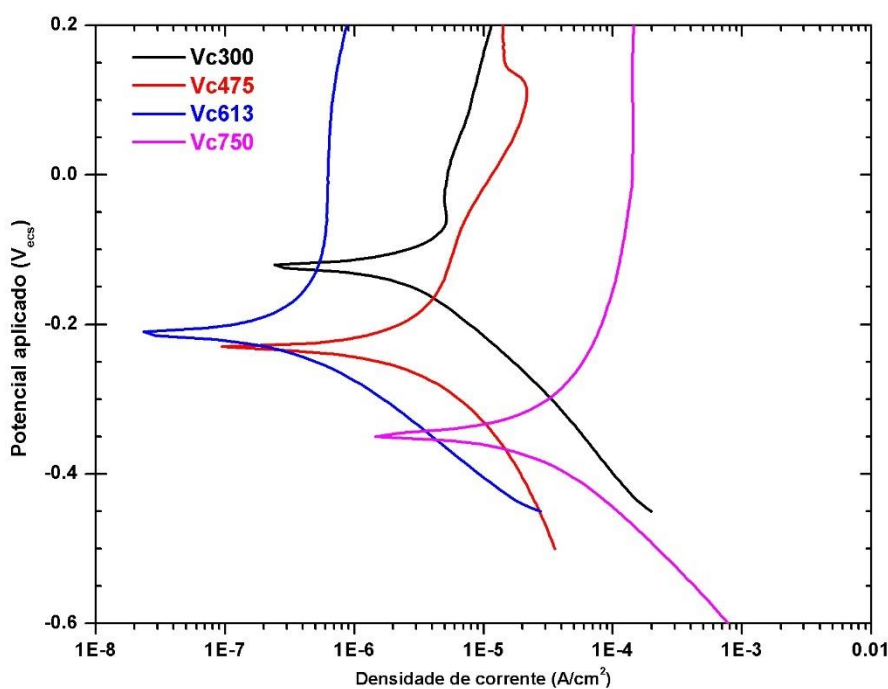
Vc (m/min)	E _{PP} (V _{ECS})	i _c (A/cm ²)	E _P (V _{ECS})	E _{pite} (V _{ECS})	i _{pite} (A/cm ²)	ΔE _{pass} (V _{ECS})
300	-0,075	4,73×10 ⁻⁶	0,425	0,900	1,545×10 ⁻⁴	0,475
475	0,100	2,14×10 ⁻⁵	0,625	1,200	4,56×10 ⁻⁵	0,575
613	-0,075	6,11×10 ⁻⁷	0,388	0,850	1,73×10 ⁻⁵	0,462
750	0,000	1,42×10 ⁻⁴	0,450	0,950	3,64×10 ⁻⁴	0,500

Fonte: Elaborado pelo autor

Mostra-se na Figura 57 que o potencial de corrosão em função da velocidade de corte, oscila na faixa de -0,36 V_{ECS} a -0,10 V_{ECS}. Já as regiões anódicas são

distintas, indicando que a velocidade de corte influencia diretamente no processo de corrosão das amostras.

Figura 57 - Curvas de Tafel obtidas da Figura 56 para o aço inoxidável duplex AISI 2205 em solução aquosa de H₂SO₄ 0,5 mol/L, na condição não aerada, obtidas em relação ao eletrodo de calomelano saturado (ECS)



Fonte: Elaborado pelo autor

A Tabela 20 apresenta os parâmetros eletroquímicos extraídos das curvas de polarização potenciodinâmica apresentadas na Figura 56, de acordo com as condições estabelecidas em laboratório.

Tabela 20 - Parâmetros eletroquímicos obtidos das curvas de polarização potenciodinâmica para a amostra de aço inoxidável duplex AISI 2205, em solução de H₂SO₄ 0,5 mol/L, na condição não aerada, em função da velocidade de corte, em relação ao eletrodo de calomelano saturado (ECS)

Vc (m/min)	E _{corr} (V _{ECS})	I _{corr} (A/cm ²)	b _a (V/década)	b _c (V/década)	R _{corr} (mpy)	R _{corr} (mma)
300	-0,122	3,95×10 ⁻⁷	0,022	0,024	0,1671	0,004244
475	-0,231	3,85×10 ⁻⁷	0,032	0,030	0,1628	0,004137
613	-0,212	3,67×10 ⁻⁸	0,024	0,022	0,0155	0,0003948
750	-0,348	2,66×10 ⁻⁶	0,025	0,022	1,1283	0,02866

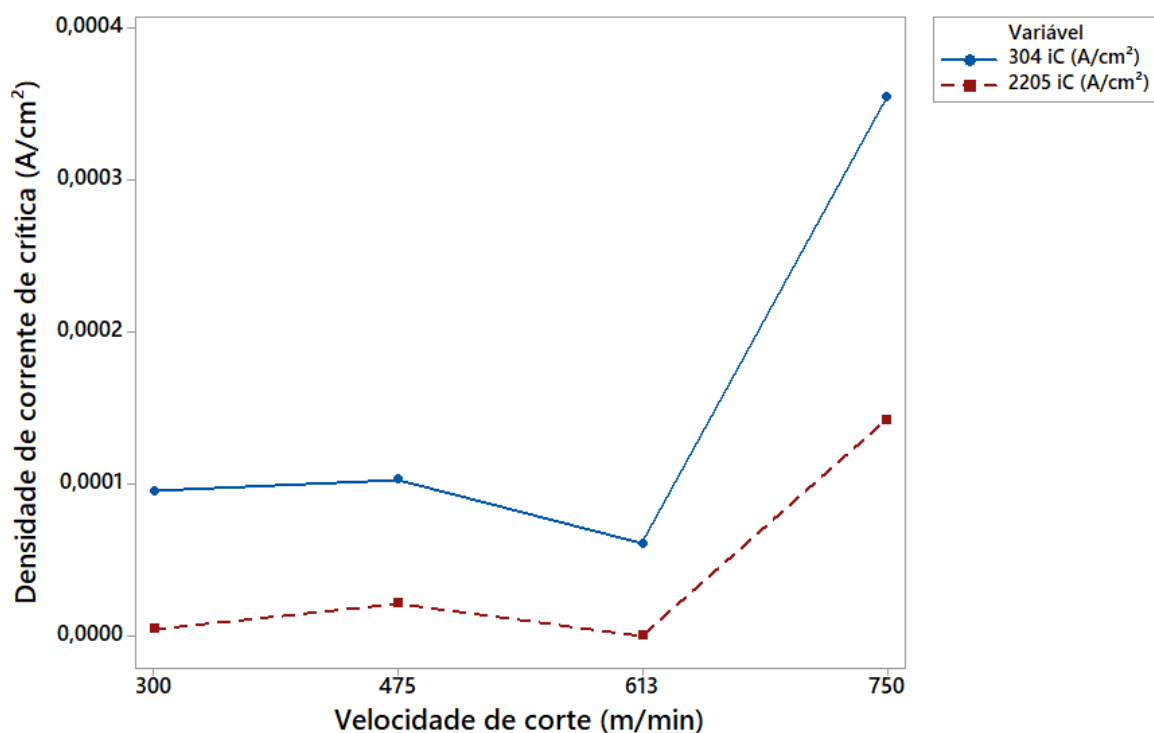
Fonte: Elaborado pelo autor

Como se observa na Tabela 20, à medida que se aumenta a velocidade de corte, se reduz a densidade de corrente de corrosão e conseqüentemente a taxa de corrosão; contudo, aumenta-se significativamente para a velocidade de corte de 750 m/min. Ainda, observa-se que o potencial de corrosão reduz-se com o aumento da velocidade de corte, tornando-se mais negativo, favorecendo à corrosão do metal.

4.4.4 Comparação dos resultados de corrosão

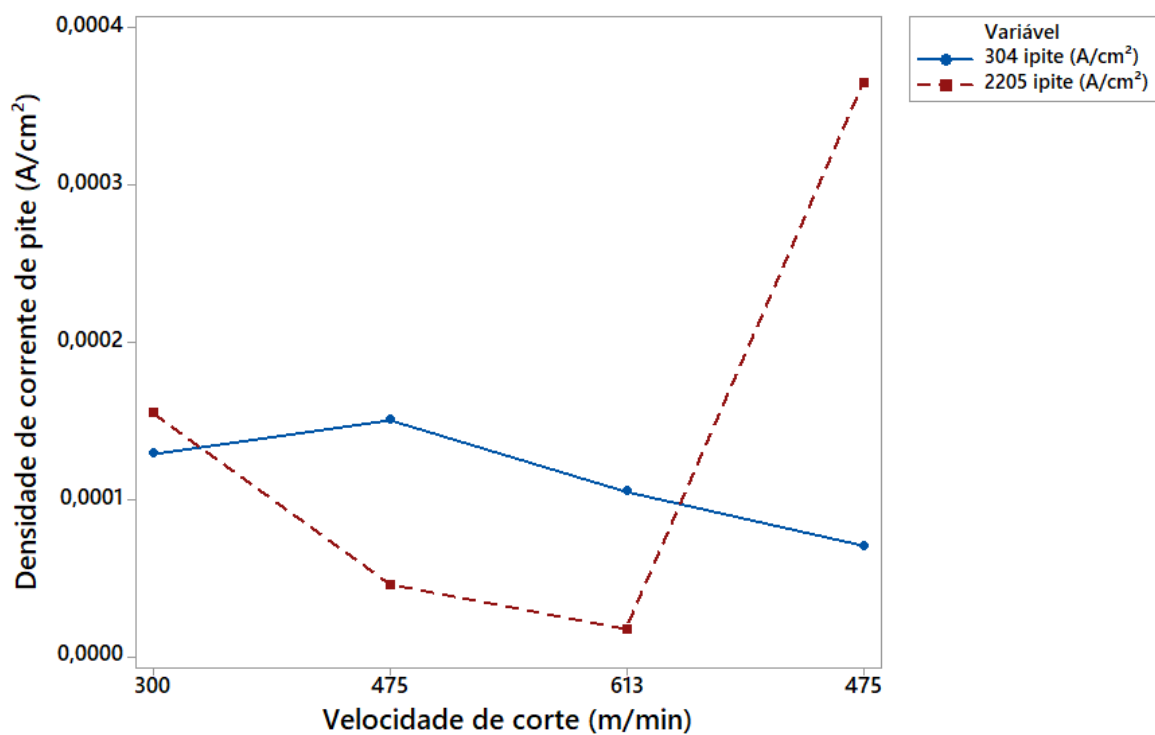
As Figuras 58 a 62 mostram por meio de gráficos uma comparação entre os ensaios de corrosão realizados nas amostras dos aços: inoxidável austenítico AISI 304 e duplex AISI 2205.

Figura 58 – Densidade de corrente crítica e velocidade de corte



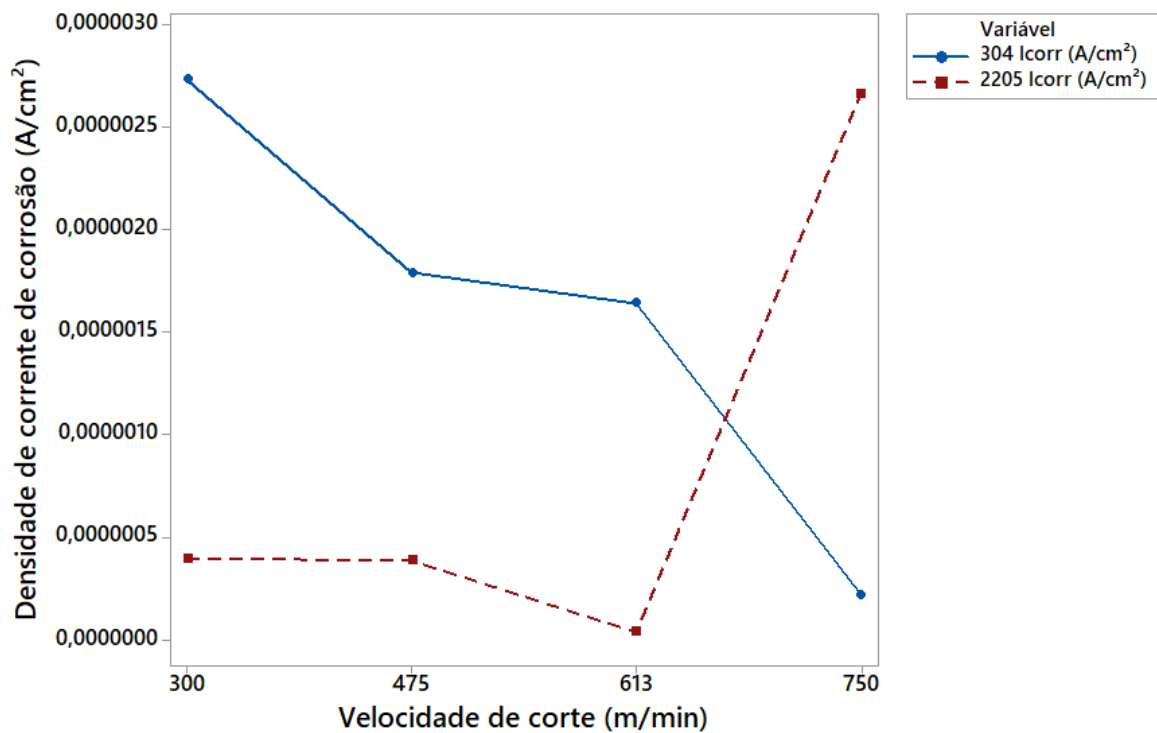
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 59 – Densidade de corrente de pite e velocidade de corte



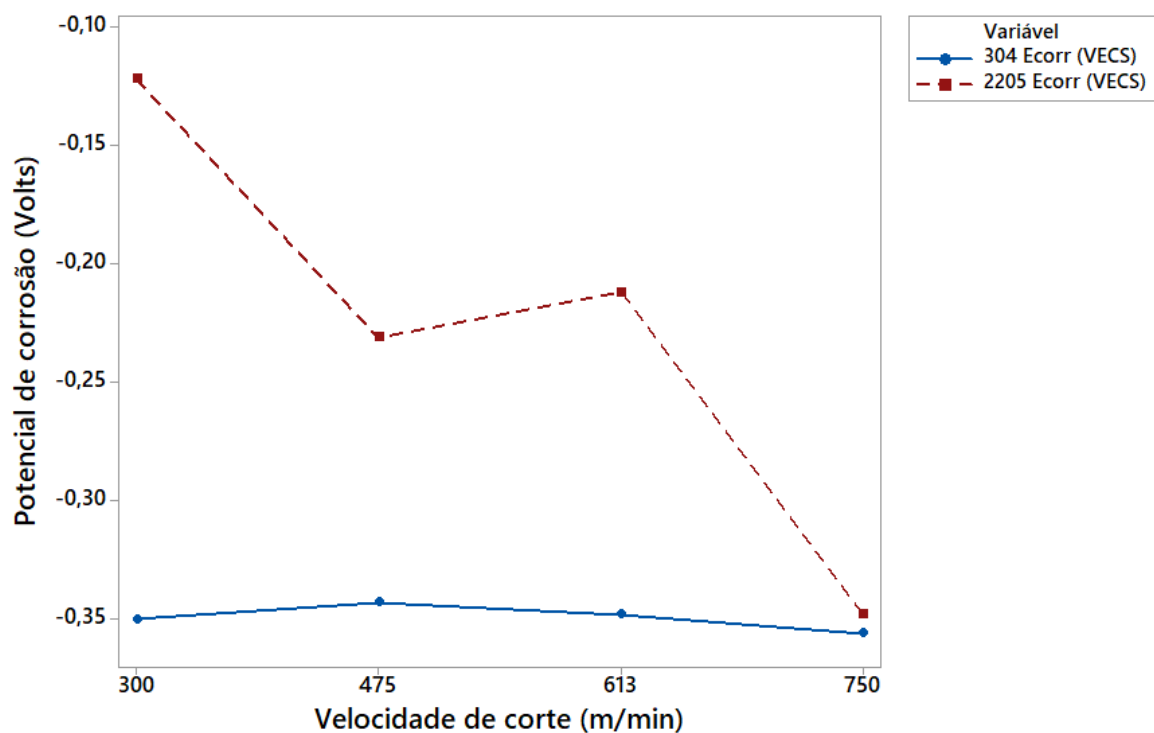
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 60 – Densidade de corrente de corrosão e velocidade de corte



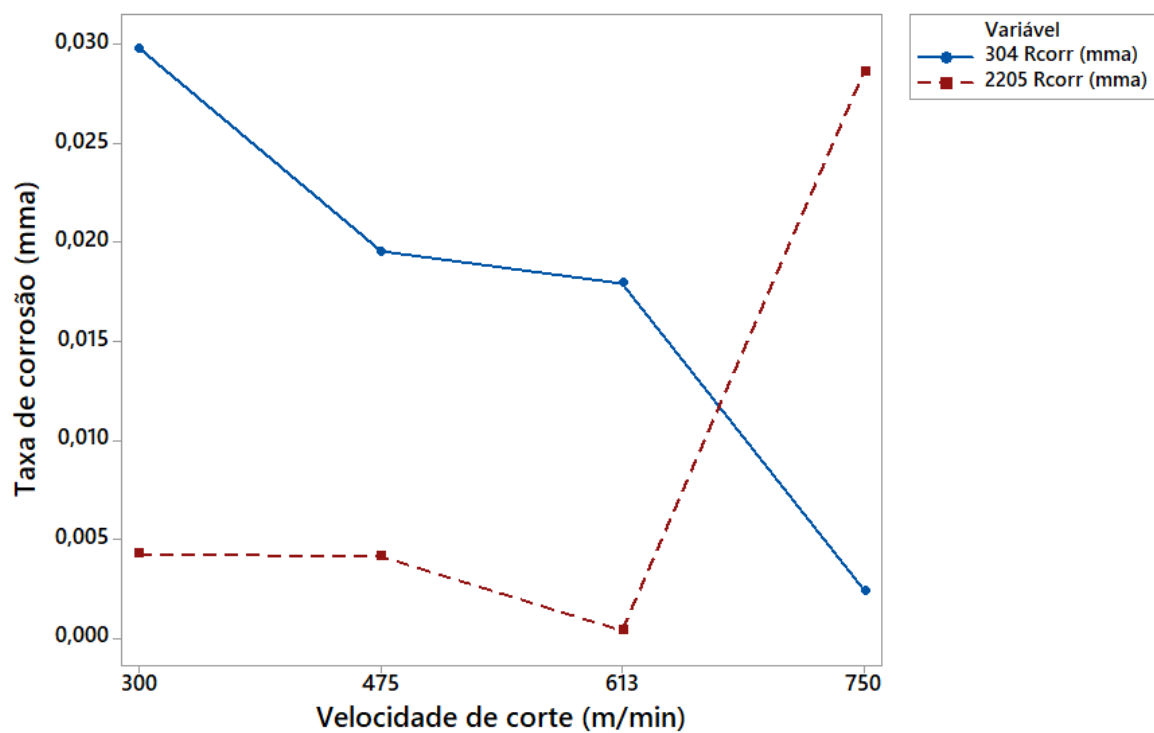
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 61 – Potencial de corrosão e velocidade de corte



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 62 – Taxa de corrosão e velocidade de corte



Fonte: Elaborado pelo autor

Na figura 58 tem-se o gráfico de densidade de corrente crítica, destacando-se o comportamento à velocidade de corte de 750m/min, onde a densidade aumenta significativamente.

No caso do aço inoxidável austenítico AISI 304, à medida que se aumenta a velocidade de corte, reduz-se a densidade de corrente de pite, Figura 59, a densidade de corrente de corrosão, Figura 60, e a taxa de corrosão, Figura 62. Observa-se ainda que o potencial de corrosão, Figura 61, se torna praticamente constante.

Para o aço inoxidável duplex AISI 2205 o aumento da velocidade, até 613m/min, a densidade de corrente por pite, Figura 59, a densidade de corrente de corrosão, Figura 60, o potencial de corrosão, Figura 61, e a taxa de corrosão, Figura 62, diminuíram. Contudo, a 750m/min é observado um aumento significativo na taxa de corrosão e nas densidades de corrente de corrosão e corrente de pite.

4.5 Resultados dos ensaios de tensão residual obtidos por DRX e quantificação percentual de fases por EBSD no aço AISI 2205

Os resultados da quantificação da tensão residual por DRX e de EBSD para análise percentual de fases são apresentados a seguir. Para o DRX, foram selecionadas 04 amostras usinadas em velocidades de corte de $V_c = 300\text{m/min}$, 475m/min , 613m/min e 750m/min . No EBSD, foram avaliadas amostras com $V_c=300\text{m/min}$, 750m/min e 01 amostra solubilizada sem passar pela usinagem.

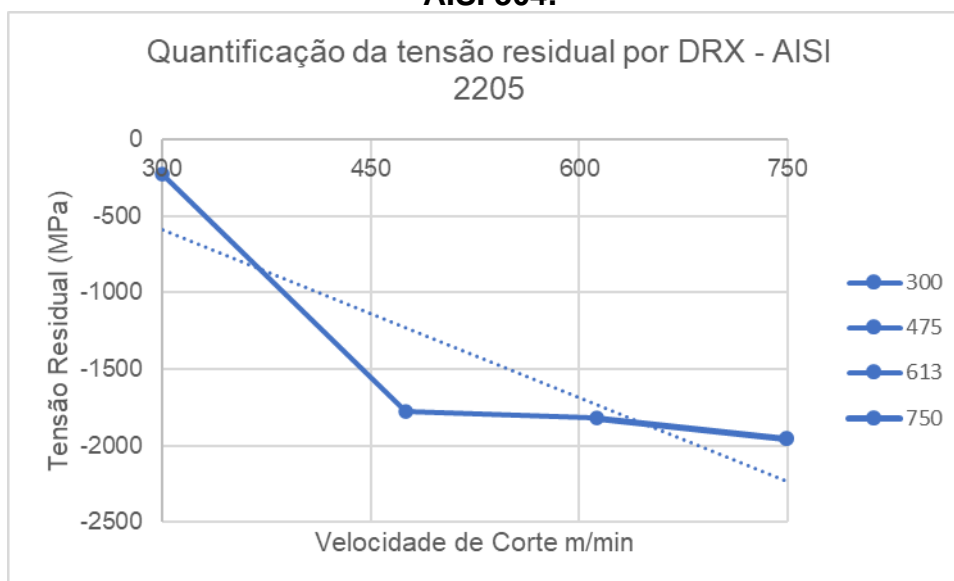
4.5.1 Quantificação da tensão residual por DRX para as amostras dos aços AISI 304 e AISI 2205

A Figura 63 mostra o gráfico com os resultados da quantificação por DRX da tensão residual nas amostras do aço inoxidável austenítico AISI 304. Nota-se que a curva de tendência indica que as tensões foram compressivas, sendo:

- a) (-)225Mpa para $V_c = 300\text{m/min}$;
- b) (-)1718Mpa para 475m/min ;
- c) (-)1820Mpa para 613m/min ;
- d) (-)1984Mpa para 750m/min .

As tensões compressivas encontradas nos resultados indicam a inexistência de transformação da fase (Y).

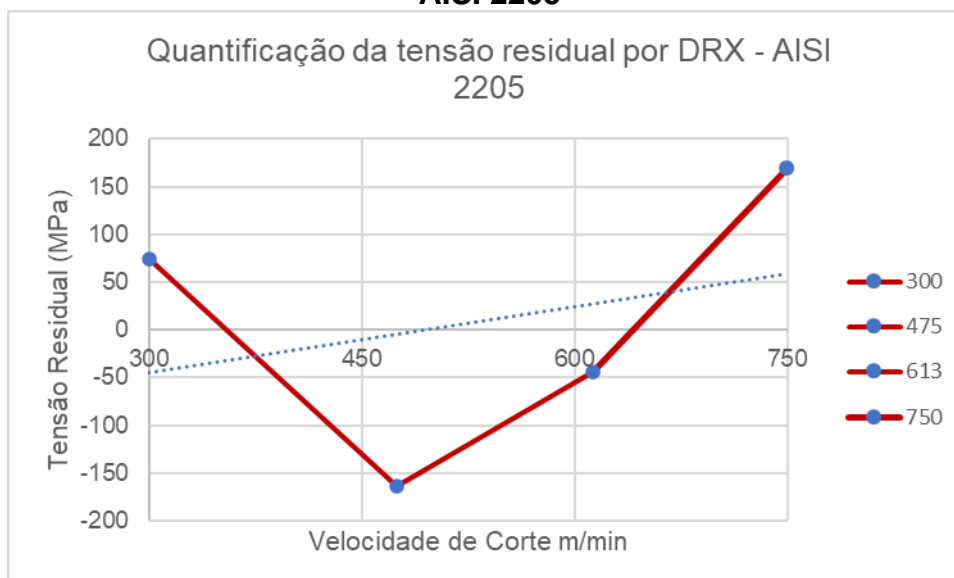
Figura 63 - Quantificação da tensão residual por DRX para as amostras do aço AISI 304.



Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 64 mostra os resultados da quantificação por DRX da tensão residual nas amostras do aço AISI 2205. Nota-se que a curva de tendência indica que as tensões foram trativas, em $V_c = 300\text{m/min}$ e 750m/min , e compressivas para $V_c = 475\text{m/min}$ e 613m/min .

Figura 64 - Quantificação da tensão residual por DRX para as amostras do aço AISI 2205



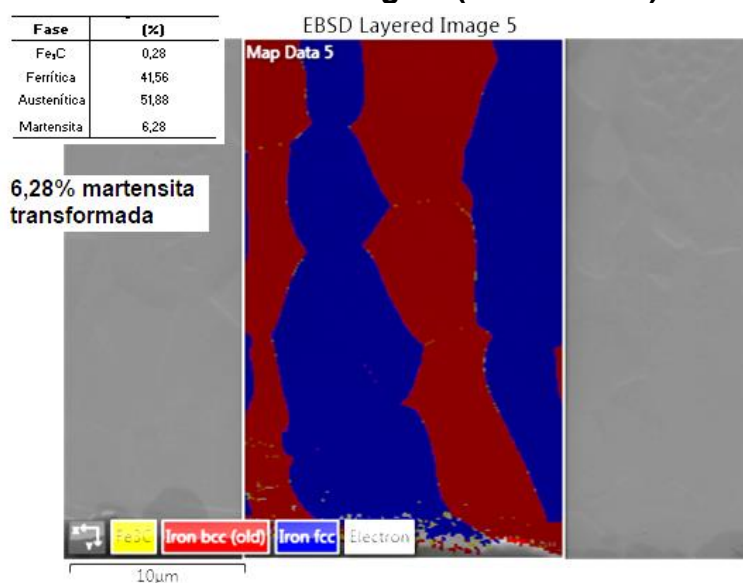
Fonte: Elaborado pelo autor

4.5.2 Análise percentual de fases por EBSD para as amostras do aço AISI 2205

Os resultados dos ensaios de EBSD foram realizados nas amostras do aço AISI 2205 sem usinagem (solubilizada), e com usinagem a velocidades de corte de 300m/min e 750m/min. As Figuras 65 e 66 e 67 indicam os resultados obtidos em cada amostra.

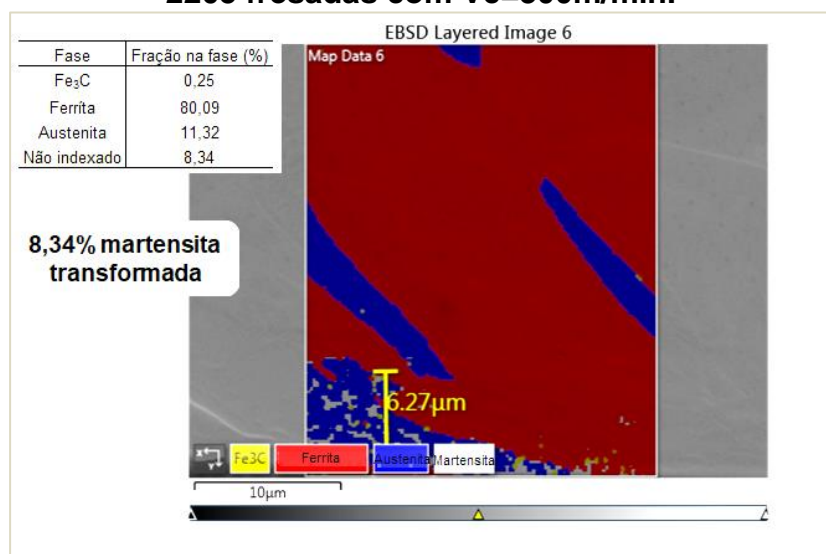
Evidenciou-se um aumento percentual na transformação da fase austenítica em martensítica induzida pelo fresamento, essa elevação foi proporcional ao aumento da velocidade de corte. Na Figura 65, onde a amostra foi apenas solubilizada e não usinada, observou-se a presença de 6,28% de martensita, certamente provinda de uma anterior laminação resultante do processo de fabricação do aço. Na Figura 66, amostra fresada a 300m/min, o percentual de martensita aumentou, chegando a 8,34%, admitindo-se que a deformação provocada pela usinagem contribuiu para esse aumento. Verificou-se também um aumento na profundidade de fase transformada chegando a 6,27 μ m. Na amostra fresada a uma velocidade de corte de 750 m/min, a transformação de fase foi mais intensa, chegando a 16,15% de martensita transformada a uma profundidade de transformação de 12,1 μ m.

Figura 65 - Análise percentual de fases por EBSD para as amostras do aço AISI 2205 sem usinagem (solubilizada).



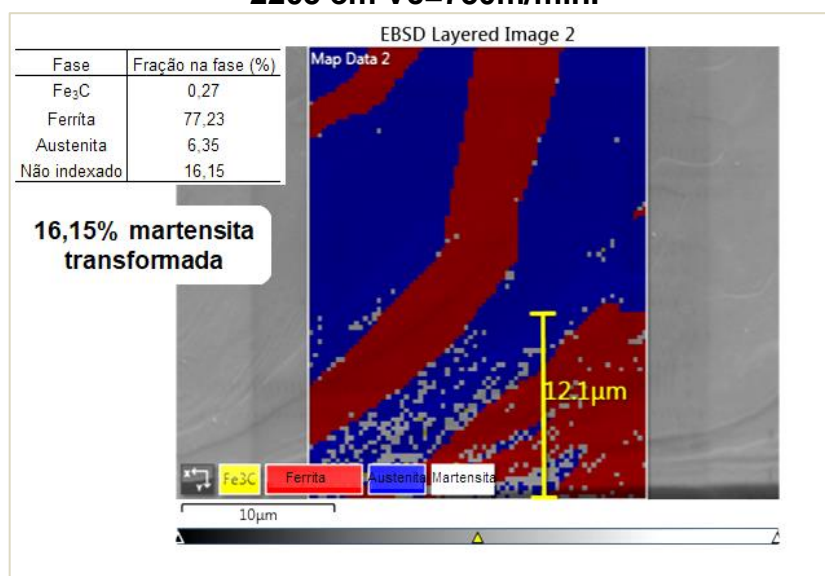
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 66 - Análise percentual de fases por EBSD para as amostras do aço AISI 2205 fresadas com $V_c=300\text{m/min}$.



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 67 - Análise percentual de fases por EBSD para as amostras do aço AISI 2205 em $V_c=750\text{m/min}$.



Fonte: Elaborado pelo autor

As amostras do aço inoxidável duplex AISI 2205 fresadas em velocidades de corte mais elevadas apresentaram em sua superfície um percentual significativo de martensita transformada e presença de tensão residual trativa elevada.

5 CONCLUSÃO

Os ensaios de microscopia de varredura eletrônica MEV realizados nas amostras do aço AISI 304 na condição de laminado a quente evidenciou a presença de maclas de deformação consequentes da laminação, além de inclusões e precipitados. Na condição de solubilizado a 950°C evidenciou a presença de austenita com cristais equiaxiais e presença de maclas do tratamento térmico.

A micrografia feita no aço duplex AISI 2205 evidenciou a microestrutura típica de aço inoxidável duplex de matriz ferrítica (α) e ilhas ou porções de austenita (γ), distribuídas aleatoriamente.

A espectroscopia de raios-x por dispersão em energia EDS indicou que a espessura do revestimento presente nas pastilhas de metal duro utilizadas no fresamento foi de aproximadamente 1 μ m, com presença de Ti, Al e N.

Na deformação pelo fresamento em altas velocidades de corte, o valor médio das respostas da rugosidade Ra e Rt do aço austenítico AISI 304 foram inferiores aos valores médios das respostas da rugosidade no aço duplex AISI 2205, essa relação foi atribuída à presença das fases ferrita (α) e austenita (γ) no aço duplex, sugerindo-se possível indução de martensita (α') transformada pela deformação no processo.

A ANOVA executada a partir dos resultados da rugosidade Ra e Rt da matriz experimental gerada pelo DOE, indicou que o parâmetro fz foi o fator mais influente na deformação pelo fresamento em altas velocidades de corte na superfície do aço inoxidável austenítico AISI 304, com 43,2% (Ra) e 48,17% (Rt), seguido de Vc com 38,89% (Ra) e 40,15% (Rt). Nessa avaliação, os dois parâmetros de entrada foram relevantes e indicaram fortes interferências nos resultados.

Para o aço inoxidável duplex a ANOVA mostrou predominância da interferência do parâmetro fz nas respostas da rugosidade, com influência de 58,53% (Ra) e 31,05% (Rt), na avaliação da rugosidade Rt houve ainda forte influência do parâmetro fz quadrático 34,39%. Conclui-se que na superfície do aço duplex AISI 2205 os efeitos das altas velocidades na rugosidade da superfície são afetados diretamente pelo aumento do avanço por dente da ferramenta de corte.

A otimização numérica mostrou que Vc = 543m/min e fz = 0,05mm/dente foi a melhor configuração da menor resposta da rugosidade Ra para o aço inoxidável austenítico AISI 304. Já para a resposta da rugosidade Rt, os testes apontaram para Vc = 475m/min e fz = 0,05mm/dente. Houve comprovação experimental dos pontos

de otimização, comprovando a eficiência da Metodologia de Superfície de Resposta adotada na pesquisa.

No aço inoxidável duplex AISI 2205 houve comprovação dos pontos de otimização numérica para as respostas da rugosidade em: $V_c = 519\text{m/min}$ e $f_z = 0,04\text{mm/dente}$ para rugosidade R_a , e $V_c = 650\text{m/min}$ com $f_z = 0,04\text{mm/dente}$ para rugosidade R_t .

As altas velocidades de corte influenciaram o comportamento das curvas de distribuição de probabilidade das respostas da rugosidade.

Os ensaios de corrosão mostraram que a variação da velocidade de corte influenciou na resposta dos parâmetros eletroquímicos dos aços ensaiados.

As amostras do aço inoxidável austenítico AISI 304 apresentaram comportamento de estabilização de potencial de oxidação de valores mais positivos para valores mais negativos com o aumento da velocidade de corte. A taxa de corrosão diminuiu com o aumento da velocidade de corte.

Para as amostras do aço inoxidável duplex AISI 2205 com velocidades de corte de 300m/min , 475m/min e 613m/min , indicaram uma redução da densidade de corrente de corrosão e da taxa de corrosão respectivamente.

No aço inoxidável duplex AISI 2205, o processo de deformação por fresamento em velocidade de corte mais intensa 750 m/min apresentou dissolução mais intensa no processo de corrosão uniforme, e maior profundidade na deformação superficial, observada pelo ensaio de EBSD.

Foi comprovado pelo ensaio de EBSD a transformação percentual da fase austenítica em martensita, induzida pela deformação provocada pelo fresamento nas amostras usinadas a 300m/min e 750m/min .

O DRX comprovou uma tensão residual trativa elevada nas amostras ensaiadas do aço AISI 2205, especialmente a 750m/min .

6 PROPOSTA DE TRABALHOS FUTUROS

As discussões apresentadas nesta pesquisa abrem caminhos para o estudo e aprofundamento de outros temas correlacionados ao assunto. As consequências das deformações provocadas pelo fresamento em altas velocidades de corte na superfície do aço inoxidável austenítico AISI 304 e do aço inoxidável duplex AISI 2205, foram investigadas no âmbito da rugosidade superficial e das propriedades de corrosão. A continuidade do estudo nessa linha de pesquisa aponta para:

- a) Avaliação do comportamento das tensões residuais provocadas pela deformação por fresamento em altas velocidades de corte na superfície do aço inoxidável duplex AISI 2205.
- b) Influência da temperatura da região de corte na microestrutura resultante do fresamento em altas velocidades de corte na superfície dos aços inoxidáveis duplex AISI 2205 e austenítico AISI 304.
- c) Comportamento das fases ferrítica (α) e austenítica (γ) no fresamento em elevadas velocidades de corte na família dos aços inoxidáveis duplex AISI 2205, AISI 2304 e AISI 2507.
- d) Análise da deformação provocada pelo fresamento em elevadas velocidades de corte nas fases ferrítica (α) e austenítica (γ) do aço inoxidável duplex AISI 2205, com vistas ao entendimento da formação da martensita induzida (α').
- e) Viabilidade produtiva da aplicação de altas velocidades de corte na fabricação por fresamento de produtos a partir do aço inoxidável AISI 304, utilizando-se para isso os parâmetros de desgaste de ferramenta e maquinário.
- f) Estudo da influência da variação da profundidade de corte a_p no processo de fresamento frontal com fresa de topo na microestrutura superficial dos aços inoxidáveis duplex AISI 2205 e austenítico AISI 304.

REFERÊNCIAS

- ABOU-EL-HOSSEIN, K. A.; YAHYA, Z. High-speed end-milling of AISI 304 stainless steels using new geometrically developed carbide inserts. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 162–163, n. SPEC. ISS., p. 596–602, 2005.
- AGOSTINHO, O. L. **Tolerâncias, ajustes, desvios e análise de dimensões**. USP: Edgard Blucher, 2001.
- AHN, S. H. et al. Corrosion behavior of PVD-grown WC-(Ti_{1-x}Al_x)N films in a 3.5% NaCl solution. **Surface and Coatings Technology**, v. 162, n. 2–3, p. 212–221, 2003.
- AKASAWA, T. et al. Effects of free-cutting additives on the machinability of austenitic stainless steels. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 143–144, n. 1, p. 66–71, 2003.
- ANNUAL BOOK OF ASTM STANDARDS; AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAL; ASTM G 106. **Standard practice for verification of algorithm and equipment for electrochemical impedance measurements**. Philadelphia: [s.n.].
- ASILTÜRK, I.; NEŞELI, S. Multi response optimisation of CNC turning parameters via Taguchi method-based response surface analysis. **Measurement: Journal of the International Measurement Confederation**, v. 45, n. 4, p. 785–794, 2012.
- ASKELAND, D.; WRIGHT, W. J. **Ciência e engenharia dos materiais**. 3. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 4287: Especificações Geométricas do Produto (GPS) - Rugosidade: Método do Perfil - Termos, Definições e Parâmetros da Rugosidade**. Rio de Janeiro, 2005.
- BARROS NETO, B.; SCARMINIO, I. S.; BRUNS, R. E. **Como Fazer Experimentos - Aplicações na Ciência e na Indústria**. Porto Alegre: Bookman, 2011.
- BEN MOUSSA, N.; SIDHOM, H.; BRAHAM, C. Numerical and experimental analysis of residual stress and plastic strain distributions in machined stainless steel. **International Journal of Mechanical Sciences**, v. 64, n. 1, p. 82–93, 2012.
- BERKANI, S. et al. Statistical analysis of AISI304 austenitic stainless steel machining using Ti(C, N)/Al₂O₃/TiN CVD coated carbide tool. **International Journal of Industrial Engineering Computations**, v. 6, n. 4, p. 539–552, 2015.
- BOOTHROYD, G. **Fundamentals of Metal machining and machine tools**. New York: McGraw-Hill, 2006.
- BOUZID SAÏ, W.; BEN SALAH, N.; LEBRUN, J. L. Influence of machining by finishing milling on surface characteristics. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 41, n. 3, p. 443–450, 2001.

BRESSAN, J. D.; HESSE, R.; SILVA, E. M. Abrasive wear behavior of high speed steel and hard metal coated with TiAlN and TiCN. **Wear**, v. 250–251, n. 1–12, p. 561–568, 2001.

BUTTON, S. T. **Metodologia para Planejamento Experimental e Análise de Resultados**. São Paulo: Universidade Estadual de Campinas, 2005.

CADENA, N. et al. Study of PVD AlCrN Coating for Reducing Carbide Cutting Tool Deterioration in the Machining of Titanium Alloys. **Materials**, v. 6, n. 6, p. 2143–2154, 2013.

CAKIR, M. C.; ENSARIOGLU, C.; DEMIRAYAK, I. Mathematical modeling of surface roughness for evaluating the effects of cutting parameters and coating material. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 209, n. 1, p. 102–109, 2009.

CHANG, C. L.; YANG, F. C. Effect of target composition on the microstructural, mechanical, and corrosion properties of TiAlN thin films deposited by high-power impulse magnetron sputtering. **Surface and Coatings Technology**, v. 352, n. October 2017, p. 330–337, 2018.

CIFTCI, I. Machining of austenitic stainless steels using CVD multi-layer coated cemented carbide tools. **Tribology International**, v. 39, n. 6, p. 565–569, 2006.

COSTA, É. S.; SILVA, R. B.; MACHADO, A. R. Comparação Do Erro De Cilindricidade E Rugosidade Na Usinagem De Furos Cegos E Passantes Em Função De Diferentes Sistemas Lubri-Refrigerantes. n. 1, p. 1–10, 2011.

CUI, X.; ZHAO, J.; PEI, Z. Analysis of transient average tool temperatures in face milling. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, v. 39, n. 6, p. 786–791, 2012.

DAS, B. et al. Application of grey fuzzy logic for the optimization of CNC milling parameters for Al–4.5%Cu–TiC MMCs with multi-performance characteristics. **Engineering Science and Technology, an International Journal**, v. 19, n. 2, p. 857–865, 2016.

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**. 9. ed. São Paulo: Artliber, 2014.

DO, T.-V.; HSU, Q.-C. Optimization of Minimum Quantity Lubricant Conditions and Cutting Parameters in Hard Milling of AISI H13 Steel. **Applied Sciences**, v. 6, n. 3, p. 83, 2016.

DOI, T. Promising Future Processing Technology. In: **Advances in CMP Polishing Technologies**. 1. ed. [s.l.] Elsevier, 2012. p. Cap. 5. 229-295.

DOS SANTOS, A. G.; DA SILVA, M. B.; JACKSON, M. J. Tungsten carbide micro-tool wear when micro milling UNS S32205 duplex stainless steel. **Wear**, v. 414–415, n. July, p. 109–117, 2018.

DUCROS, C.; BENEVENT, V.; SANCHETTE, F. Deposition, characterization and machining performance of multilayer PVD coatings on cemented carbide cutting tools. **Surface and Coatings Technology**, v. 163–164, p. 681–688, 2003.

FERNÁNDEZ-ABIA, A. I. et al. Effect of very high cutting speeds on shearing, cutting forces and roughness in dry turning of austenitic stainless steels. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 57, n. 1–4, p. 61–71, 2011.

FERRARESI, D. **Usinagem dos Metais: fundamentos da usinagem dos metais**. 14. ed. São Paulo: Edgar Blucher Ltda, 2011.

FREYMAN, C.; ZHAO, B.; CHUNG, Y. W. **Suppression of moisture sensitivity of friction in carbon-based coatings**. [s.l.] Elsevier B.V., 2007.

GADELMAWLA, E. S. et al. Roughness parameters. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 123, n. 1, p. 133–145, abr. 2002.

GHEVARIYA, C. M.; BHATT, J. K.; DAVE, B. P. Enhanced chrysenes degradation by halotolerant *Achromobacter xylosoxidans* using Response Surface Methodology. **Bioresource Technology**, v. 102, n. 20, p. 9668–9674, 2011.

GISARIO, A.; BOSCHETTO, A.; VENIALI, F. Surface transformation of AISI 304 stainless steel by high power diode laser. **Optics and Lasers in Engineering**, v. 49, n. 1, p. 41–51, 2011.

GOUVEIA, R. et al. Machining Duplex Stainless Steel: Comparative Study Regarding End Mill Coated Tools. **Coatings**, v. 6, n. 4, p. 51, 2016.

GRUBYI, S. V. Cutting characteristics in the end milling of stainless steel. **Russian Engineering Research**, v. 37, n. 2, p. 125–133, 2017.

HINTZE, W. et al. HPC-milling of WC-Co cemented carbides with PCD. **International Journal of Refractory Metals and Hard Materials**, v. 72, n. October 2017, p. 126–134, 2018.

HUANG, K.; YANG, W. Analytical modeling of residual stress formation in workpiece material due to cutting. **International Journal of Mechanical Sciences**, v. 114, p. 21–34, 2016.

JAWAHIR, I. S. et al. Surface integrity in material removal processes: Recent advances. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 60, n. 2, p. 603–626, 2011.

JORGE, A. M.; REIS, G. S.; BALANCIN, O. Influence of the microstructure on the plastic behaviour of duplex stainless steels. **Materials Science and Engineering A**, v. 528, n. 6, p. 2259–2264, 2011.

JUREVICIUS, M.; SKEIVALAS, J.; URBANAVICIUS, R. Analysis of surface roughness parameters digital image identification. **Measurement: Journal of the**

International Measurement Confederation, v. 56, p. 81–87, 2014.

KALIDASS, S.; PALANISAMY, P. Prediction of Surface Roughness for AISI 304 Steel with Solid Carbide Tools in End Milling Process Using Regression and ANN Models. **Arabian Journal for Science and Engineering**, v. 39, n. 11, p. 8065–8075, 2014.

KAZLAUSKAS, D. et al. Wear of cemented tungsten carbide (WC) router cutters during oak wood milling. **Mechanika**, v. 23, n. 3, p. 469–472, 2017.

KHAN, A.; MAITY, K. Application of MCDM-based TOPSIS method for the selection of optimal process parameter in turning of pure titanium. **Benchmarking**, v. 24, n. 7, p. 2009–2021, 2017.

KORKUT, I. et al. Determination of optimum cutting parameters during machining of AISI 304 austenitic stainless steel. **Materials and Design**, v. 25, n. 4, p. 303–305, 2004.

KUMAR, P. S. et al. Distinguishing effect of buffing vs. grinding, milling and turning operations on the chloride induced SCC susceptibility of 304L austenitic stainless steel. **Materials Science and Engineering A**, v. 687, n. December 2016, p. 193–199, 2017.

KURAM, E. et al. Fluids and Parameters Using Taguchi and ANOVA in Milling. **Proceedings of the World Congress on Engineering 2010**, v. Vol II WCE, p. 1292–1296, 2010.

KURAM, E.; OZCELIK, B. Micro-milling performance of AISI 304 stainless steel using Taguchi method and fuzzy logic modelling. **Journal of Intelligent Manufacturing**, v. 27, n. 4, p. 817–830, 2016.

LEBAN, M. B. et al. The effect of surface roughness on the corrosion properties of type AISI 304 stainless steel in diluted NaCl and urban rain solution. **Journal of Materials Engineering and Performance**, v. 23, n. 5, p. 1695–1702, 2014.

LI, W. et al. Effect tool wear during end milling on the surface integrity and fatigue life of inconel 718. **Procedia CIRP**, v. 14, p. 546–551, 2014.

LIU, G. et al. Multidisciplinary design optimization of a milling cutter for high-speed milling of stainless steel. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 68, n. 9–12, p. 2431–2438, 2013.

LOPES, M. P. **USINAGEM DO AÇO INOXIDÁVEL AISI 304: Uma análise da evolução da rugosidade superficial por meio da variação dos parâmetros de corte no processo de fresagem.** [s.l.] PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE MINAS GERAIS, 2015.

LOPES, M. P. et al. **Optimization of cutting parameters considering surface roughness when milling AISI 304 Steel Using Coated Wc-Co and TiAlN/ Wc-Co coated.** Uberlândia: 25th ABCM International Congress of Mechanical Engineering - Cobem, 2019

LU, J. et al. Stacking fault energies in austenitic stainless steels. **Acta Materialia**, v. 111, p. 39–46, 2016.

M'SAOUBI, R. et al. Residual stress analysis in orthogonal machining of standard and resulfurized AISI 316L steels. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 96, n. 1–3, p. 225–233, 1999.

MACHADO, A. R. et al. **Teoria da Usinagem dos Materiais**. 2. ed. São Paulo: LTDA, Edgard Blucher, 2011.

MAHER, I. et al. Investigation of the effect of machining parameters on the surface quality of machined brass (60/40) in CNC end milling - ANFIS modeling. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 74, n. 1–4, p. 531–537, 2014.

MAKADIA, A. J.; NANAVATI, J. I. Optimisation of machining parameters for turning operations based on response surface methodology. **Measurement: Journal of the International Measurement Confederation**, v. 46, n. 4, p. 1521–1529, 2013.

MARTIN, M. et al. Influence of machining-induced martensite on hydrogen-assisted fracture of AISI type 304 austenitic stainless steel. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 36, n. 17, p. 11195–11206, 2011.

MATTOS, O. R. Acompanhamento do processo de deterioração de revestimentos com o auxílio da técnica de impedância eletroquímica. **Rev. Ibero. Corros. y Prot.**, v. XVIII, n. n1, p. 43–48, 1987.

MAUROTTO, A. et al. Effects of machining abuse on the surface properties of AISI 316L stainless steel. **International Journal of Pressure Vessels and Piping**, v. 151, p. 35–44, 2017.

MCINTYRE, D. et al. Oxidation of metastable single-phase polycrystalline Ti 0.5 Al 0.5 N films: Kinetics and mechanisms. **Journal of Applied Physics**, v. 67, n. 3, p. 1542–1553, 2002.

MODENESI, P. J. **Soldabilidade dos Aços Inoxidáveis**. 1. ed. São Paulo: Escola SENAI Nadir dias Figueiredo, 2001.

MOHANA, S. et al. Response surface methodology for optimization of medium for decolorization of textile dye Direct Black 22 by a novel bacterial consortium. **Bioresource Technology**, v. 99, n. 3, p. 562–569, 2008.

MONTGOMERY, D. C. **Design and Analysis of experiments**. New York: Wiley and Sons, 2009.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Applied statistics and probability for engineers**. New York: Hoboken, 2007.

MUÑOZ-ESCALONA, P.; MAROPOULOS, P. G. A geometrical model for surface roughness prediction when face milling Al 7075-T7351 with square insert tools. **Journal of Manufacturing Systems**, v. 36, p. 216–223, 2015.

NAYAK, S. K. et al. Multi-objective Optimization of Machining Parameters During Dry Turning of AISI 304 Austenitic Stainless Steel Using Grey Relational Analysis. **Procedia Materials Science**, v. 6, n. Icmopc, p. 701–708, 2014.

NOMANI, J. et al. Machinability study of first generation duplex (2205), second generation duplex (2507) and austenite stainless steel during drilling process. **Wear**, v. 304, n. 1–2, p. 20–28, 2013.

NOMANI, J. **Built-up Edge Mechanisms in the Machining of Duplex Stainless Steels**. [s.l: s.n.].

NOMANI, J. et al. Investigation on the Behavior of Austenite and Ferrite Phases at Stagnation Region in the Turning of Duplex Stainless Steel Alloys. **Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science**, v. 47, n. 6, p. 3165–3177, 2016.

ORAZEM, M. E.; TRIBOLLET, B. **Electrochemical Impedance Spectroscopy**. New Jersey: John Wiley & Sons: Hoboken, 2008.

PANDEY, J. L.; SINGH, I.; SINGH, M. N. Electrochemical corrosion behaviour of heat-treated AISI 304 austenitic stainless steel in inorganic acid mixture. **Anti-Corrosion Methods and Materials**, v. 44, n. 1, p. 6–9, 1997.

PARO, J.; HÄNNINEN, H.; KAUPPINEN, V. Tool wear and machinability of HIPed P/M and conventional cast duplex stainless steels. **Wear**, v. 249, n. 3–4, p. 279–284, 2001.

PEREIRA MENDONÇA, C. DE S. et al. Structural and magnetic properties of duplex stainless steel (UNS S31803) powders obtained by high energy milling of chips with additions of NbC. **Materials Research**, v. 21, n. 1, p. 1–6, 2018.

PHAM, C. H.; THUILLIER, S.; MANACH, P. Y. Prediction of flow stress and surface roughness of stainless steel sheets considering an inhomogeneous microstructure. **Materials Science and Engineering A**, v. 678, n. September, p. 377–388, 2016.

PHILIP, S. D.; CHANDRAMOHAN, P.; RAJESH, P. K. Prediction of surface roughness in end milling operation of duplex stainless steel using response surface methodology. **Journal of Engineering Science and Technology**, v. 10, n. 3, p. 340–352, 2015.

PHILIP SELVARAJ, D.; CHANDRAMOHAN, P.; MOHANRAJ, M. Optimization of surface roughness, cutting force and tool wear of nitrogen alloyed duplex stainless steel in a dry turning process using Taguchi method. **Measurement: Journal of the International Measurement Confederation**, v. 49, n. 1, p. 205–215, 2014.

PHILIP SEVARAJ, D.; CHANDRAMOHAN, P.; CHANDRASEKAR, P. Experimental investigations of nitrogen alloyed duplex stainless steel in dry milling process. **Journal of Engineering Science and Technology**, v. 13, n. 2, p. 321–331, 2018.

POLISHETTY, A.; ALABDULLAH, M.; LITTLEFAIR, G. Tool Wear Analysis due to Machining In Super Austenitic Stainless Steel. **MATEC Web of Conferences**, v. 95, p. 05006, 2017.

PUERTAS ARBIZU, I.; LUIS PÉREZ, C. J. Surface roughness prediction by factorial design of experiments in turning processes. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 143–144, n. 1, p. 390–396, 2003.

RAWANGWONG, S. et al. Influence of cutting parameters in face milling semi-solid AA 7075 using carbide tool affected the surface roughness and tool wear. **Energy Procedia**, v. 56, n. C, p. 448–457, 2014.

RAZAVYKIA, A.; FARAHANY, S.; YUSOF, N. M. Evaluation of cutting force and surface roughness in the dry turning of Al-Mg₂Si in-situ metal matrix composite inoculated with bismuth using DOE approach. **Measurement: Journal of the International Measurement Confederation**, v. 76, p. 170–182, 2015.

RYU, S. H.; CHOI, D. K.; CHU, C. N. Roughness and texture generation on end milled surfaces. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 46, n. 3–4, p. 404–412, 2006.

SAINI, S.; AHUJA, I. S.; SHARMA, V. S. Modelling the effects of cutting parameters on residual stresses in hard turning of aisi h11 tool steel. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 65, n. 5–8, p. 667–678, 2013.

SANTOS, C. E. DOS. **MICROESTRUTURA SUPERFICIAL PÓS-FRESAMENTO EM ALTA VELOCIDADE DE CORTE NO AÇO INOXIDÁVEL DUPLEX 2205**. [s.l.] PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE MINAS GERAIS, 2018.

SARNOBAT, S. S.; RAVAL, H. K. Experimental investigation and analysis of the influence of tool edge geometry and work piece hardness on surface residual stresses, surface roughness and work-hardening in hard turning of AISI D2 steel. **Measurement: Journal of the International Measurement Confederation**, v. 131, p. 235–260, 2019.

SELAIMIA, A. A. et al. Modeling and optimization in dry face milling of X2CrNi18-9 austenitic stainless steel using RMS and desirability approach. **Measurement: Journal of the International Measurement Confederation**, v. 107, p. 53–67, 2017.

SHASHANKA, R.; CHAIRA, D. Optimization of milling parameters for the synthesis of nano-structured duplex and ferritic stainless steel powders by high energy planetary milling. **Powder Technology**, v. 278, p. 35–45, 2015.

SHUGUROV, A. R.; KAZACHENOK, M. S. Mechanical properties and tribological behavior of magnetron sputtered TiAlN/TiAl multilayer coatings. **Surface and Coatings Technology**, v. 353, n. September, p. 254–262, 2018.

SIDDA REDDY, B.; SURESH KUMAR, J.; VIJAYA KUMAR REDDY, K. Optimization of surface roughness in CNC end milling using response surface methodology and genetic algorithm. **International Journal of Engineering, Science and Technology**, v. 3, n. 8, p. 102–109, 2011.

SILVA, A. L. V. DA C. E.; MEI, P. R. **Aços e Ligas Especiais**. 2. ed. São Paulo: Edgar Bluncher, 2006.

SILVA, F. J. G.; MARTINHO, R. P.; BAPTISTA, A. P. M. Characterization of laboratory and industrial CrN/CrCN/diamond-like carbon coatings. **Thin Solid Films**, v. 550, p. 278–284, 2014.

SILVERSTEIN, R.; ELIEZER, D.; BOELLINGHAUS, T. Hydrogen-trapping mechanisms of TIG-welded 316L austenitic stainless steels. **Journal of Materials Science**, v. 53, n. 14, p. 10457–10468, 2018.

SOUZA, A. F. DE et al. Evaluating the roughness according to the tool path strategy when milling free form surfaces for mold application. **Procedia CIRP**, v. 14, p. 188–193, 2014.

SPRUTE, T. et al. Influence of substrate pre-treatments on residual stresses and tribo-mechanical properties of TiAlN-based PVD coatings. **Surface and Coatings Technology**, v. 260, p. 369–379, 2014.

TANG, Y. et al. Effect of surface roughness on pitting corrosion of 2205 duplex stainless steel investigated by electrochemical noise measurements. **Materials**, v. 12, n. 5, 2019.

TANIKIĆ, D.; MARINKOVIĆ, V. Modelling and optimization of the surface roughness in the dry turning of the cold rolled alloyed steel using regression analysis. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 34, n. 1, 2012.

TEDESCO, M. E. **Variação Dimensional e Microestrutural do Aço AISI 4140 em Peças Usinadas por Torneamento**. [s.l.: s.n.].

TEJA, B. V. K.; NARESH, N.; RAJASEKHAR, K. Multi-Response Optimization of Milling Parameters on AISI 304 Stainless Steel using Grey-Taguchi Method. v. 2, n. 8, p. 2335–2341, 2013.

TUCKER, J. D.; MILLER, M. K.; YOUNG, G. A. Assessment of thermal embrittlement in duplex stainless steels 2003 and 2205 for nuclear power applications. **Acta Materialia**, v. 87, p. 15–24, 2015.

WANG, G. et al. Influence of cutting parameters on surface roughness and strain hardening during milling NiTi shape memory alloy. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 2019.

WOLYNEC, S. **Técnicas Eletroquímicas em Corrosão**. São Paulo: EDUSP: Editora da Universidade de São Paulo, 2003.

YANG, Y.; YAN, B. The microstructure and flow behavior of 2205 duplex stainless steels during high temperature compression deformation. **Materials Science and Engineering A**, v. 579, p. 194–201, 2013.

APÊNDICE A - Matriz experimental gerada no software Minitab®

Minitab - Etapa_01_AISI304.MPJ - [Worksheet 1 ***]

Arquivo Editor Dados Calc Estat Gráfico Editor Ferramentas Janela Ajuda Assistente

↓	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15	C16	C17	C18	C19	C20
OrdemPad	OrdemEns	TipoPt	Blocos	Vc (m/min)	fz (mm/dente)	Ra (µm)	Rt (µm)	Rz (µm)	Rc (µm)	Rq (µm)	Rp (µm)	Rv (µm)								
1	29	1	1	300,0	0,984	5,28	4,70	1,440	1,140	2,070	2,630									
2	16	2	1	300,0	0,740	4,80	4,16	1,140	0,927	1,940	2,230									
3	9	3	0	475,0	0,110	0,495	2,81	2,44	1,040	0,576	1,080	1,370								
4	2	4	1	650,0	0,040	0,286	2,26	1,96	0,845	0,355	0,994	0,964								
5	15	5	1	650,0	0,040	0,270	2,62	1,82	0,860	0,334	0,899	0,924								
6	46	6	-1	475,0	0,075	0,186	1,99	1,45	0,559	0,228	0,713	0,739								
7	45	7	-1	562,5	0,110	0,198	2,18	1,71	0,620	0,249	0,742	0,965								
8	4	8	1	650,0	0,180	0,428	3,82	2,82	0,992	0,529	1,710	1,110								
9	23	9	0	475,0	0,110	0,364	3,50	2,79	0,825	0,475	1,270	1,520								
10	32	10	-1	562,5	0,110	0,285	2,29	1,79	0,693	0,349	0,904	0,891								
11	28	11	1	650,0	0,040	0,206	2,05	1,76	0,684	0,277	0,920	0,843								
12	18	12	-1	387,5	0,110	0,290	3,11	2,52	0,793	0,376	1,490	1,030								
13	48	13	0	475,0	0,110	0,237	2,29	1,83	0,685	0,298	0,841	0,994								
14	24	14	0	475,0	0,110	0,266	2,47	2,12	0,766	0,347	1,030	1,090								
15	12	15	0	475,0	0,110	0,275	2,62	2,16	0,687	0,355	0,835	1,320								
16	5	16	-1	387,5	0,110	0,305	2,73	2,21	0,841	0,396	1,250	0,964								
17	49	17	0	475,0	0,110	0,418	3,11	2,84	1,010	0,542	1,500	1,340								
18	34	18	-1	475,0	0,145	0,246	2,02	1,86	0,669	0,300	0,840	1,020								
19	20	19	-1	475,0	0,075	0,211	1,82	1,57	0,625	0,259	0,864	0,709								
20	35	20	0	475,0	0,110	0,593	3,60	3,40	1,130	0,720	1,760	1,640								
21	42	21	1	300,0	0,180	0,758	4,82	4,15	1,450	0,919	1,550	2,600								
22	27	22	1	300,0	0,040	0,351	3,19	2,45	0,935	0,439	1,130	1,330								
23	21	23	-1	475,0	0,145	0,278	2,46	1,91	0,648	0,345	0,799	1,120								
24	1	24	1	300,0	0,040	0,310	3,16	2,55	0,896	0,401	1,380	1,170								
25	26	25	0	475,0	0,110	0,982	4,58	3,98	3,590	1,060	2,000	1,980								

Worksheet-Atual: Worksheet 1

APÊNDICE B - Matriz experimental gerada no software Minitab®

Minitab - Etapa_02_AIS12205.MPJ - [Worksheet 1 ***]

Arquivo Editar Dados Calc Estat Grafico Editor Ferramentas Janela Ajuda Assistente

+	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15	C16	C17	C18	C19	C20	C21	C22
StdOrder	RunOrder	PtType	Blocks	Vc(m/min)	fz(mm/tooth)	Ra(µm)	Rt(µm)	Rz(µm)	Rc(µm)	Rq(µm)	Rp(µm)	Rv(µm)										
1	12	1	0	612,50	0,0450	0,331	2,95	2,42	1,010	0,425	1,320	1,110										
2	47	2	-1	612,50	0,0625	0,315	2,43	2,13	0,777	0,387	1,190	0,939										
3	28	3	1	750,00	0,0100	0,522	3,27	2,83	1,420	0,619	1,350	1,480										
4	36	4	0	612,50	0,0450	0,351	2,65	2,41	1,080	0,445	1,410	0,997										
5	27	5	1	475,00	0,0100	0,413	3,49	2,67	1,430	0,509	1,210	1,460										
6	4	6	1	750,00	0,0800	0,485	3,44	3,08	1,150	0,603	1,500	1,580										
7	45	7	-1	681,25	0,0450	0,298	2,79	2,35	0,852	0,371	1,280	1,070										
8	20	8	-1	612,50	0,0275	0,255	2,18	1,98	0,806	0,322	1,110	0,868										
9	51	9	0	612,50	0,0450	0,272	2,15	1,93	0,754	0,336	0,901	1,030										
10	16	10	1	475,00	0,0800	0,432	3,07	2,85	1,250	0,551	1,740	1,120										
11	1	11	1	475,00	0,0100	0,284	2,53	2,09	0,911	0,356	0,875	1,220										
12	17	12	1	750,00	0,0800	0,298	2,71	2,31	0,806	0,392	1,080	1,230										
13	40	13	1	475,00	0,0100	0,436	3,44	2,72	1,030	0,538	1,310	1,420										
14	41	14	1	750,00	0,0100	0,274	2,56	2,02	0,788	0,345	1,010	1,010										
15	26	15	0	612,50	0,0450	0,431	2,58	2,80	1,170	0,538	1,430	1,380										
16	37	16	0	612,50	0,0450	0,270	2,24	2,02	0,841	0,336	0,986	1,040										
17	32	17	-1	681,25	0,0450	0,288	2,40	2,03	0,766	0,354	0,964	1,070										
18	35	18	0	612,50	0,0450	0,307	2,83	2,41	0,829	0,390	1,300	1,110										
19	13	19	0	612,50	0,0450	0,335	2,56	2,30	0,957	0,422	0,874	1,430										
20	46	20	-1	612,50	0,0275	0,324	2,83	2,33	1,020	0,404	1,360	0,978										
21	8	21	-1	612,50	0,0625	0,387	3,86	2,72	0,888	0,490	1,560	1,170										
22	23	22	0	612,50	0,0450	0,408	3,06	2,65	1,260	0,495	1,540	1,110										
23	42	23	1	475,00	0,0800	0,673	3,32	3,15	1,460	0,761	1,630	1,520										
24	31	24	-1	543,75	0,0450	0,282	2,52	2,13	0,872	0,355	1,020	1,110										
25	30	25	1	750,00	0,0800	0,238	2,17	1,81	0,719	0,308	0,834	0,973										

Worksheet Atual: Worksheet 1

APÊNDICE C - Relatórios dos resultados de rugosidade no fresamento do aço inoxidável austenítico AISI 304

ISO 4287	
Parâmetros de amplitude - Perfil de aspereza	
Ra	0.240 <i>µm</i> Filtro gaussiano, 0.8 mm
Rt	2.35 <i>µm</i> Filtro gaussiano, 0.8 mm
Rz	1.90 <i>µm</i> Filtro gaussiano, 0.8 mm
Rc	0.689 <i>µm</i> Filtro gaussiano, 0.8 mm
Rq	0.303 <i>µm</i> Filtro gaussiano, 0.8 mm
Rp	0.962 <i>µm</i> Filtro gaussiano, 0.8 mm
Rv	0.938 <i>µm</i> Filtro gaussiano, 0.8 mm
Rsk	0.345 Filtro gaussiano, 0.8 mm
Rku	3.26 Filtro gaussiano, 0.8 mm

c) $V_c=543,75\text{m/min}$; $f_z=0,045\text{mm/dente}$.

ISO 4287	
Parâmetros de amplitude - Perfil de aspereza	
Ra	0.220 <i>µm</i> Filtro gaussiano, 0.8 mm
Rt	2.29 <i>µm</i> Filtro gaussiano, 0.8 mm
Rz	2.05 <i>µm</i> Filtro gaussiano, 0.8 mm
Rc	0.658 <i>µm</i> Filtro gaussiano, 0.8 mm
Rq	0.295 <i>µm</i> Filtro gaussiano, 0.8 mm
Rp	1.04 <i>µm</i> Filtro gaussiano, 0.8 mm
Rv	1.02 <i>µm</i> Filtro gaussiano, 0.8 mm
Rsk	0.0135 Filtro gaussiano, 0.8 mm
Rku	3.46 Filtro gaussiano, 0.8 mm

b) $V_c=475\text{m/min}$; $f_z=0,08\text{mm/dente}$.

ISO 4287	
Parâmetros de amplitude - Perfil de aspereza	
Ra	0.199 <i>µm</i> Filtro gaussiano, 0.8 mm
Rt	2.09 <i>µm</i> Filtro gaussiano, 0.8 mm
Rz	1.76 <i>µm</i> Filtro gaussiano, 0.8 mm
Rc	0.608 <i>µm</i> Filtro gaussiano, 0.8 mm
Rq	0.249 <i>µm</i> Filtro gaussiano, 0.8 mm
Rp	0.967 <i>µm</i> Filtro gaussiano, 0.8 mm
Rv	0.793 <i>µm</i> Filtro gaussiano, 0.8 mm
Rsk	0.318 Filtro gaussiano, 0.8 mm
Rku	4.17 Filtro gaussiano, 0.8 mm

a) $V_c=475\text{m/min}$; $f_z=0,01\text{mm/dente}$.

ISO 4287	
Parâmetros de amplitude - Perfil de aspereza	
Ra	0.300 <i>µm</i> Filtro gaussiano, 0.8 mm
Rt	2.92 <i>µm</i> Filtro gaussiano, 0.8 mm
Rz	2.43 <i>µm</i> Filtro gaussiano, 0.8 mm
Rc	0.690 <i>µm</i> Filtro gaussiano, 0.8 mm
Rq	0.396 <i>µm</i> Filtro gaussiano, 0.8 mm
Rp	0.987 <i>µm</i> Filtro gaussiano, 0.8 mm
Rv	1.44 <i>µm</i> Filtro gaussiano, 0.8 mm
Rsk	-0.0338 Filtro gaussiano, 0.8 mm
Rku	3.64 Filtro gaussiano, 0.8 mm

f) $V_c=612,5\text{m/min}$; $f_z=0,0625\text{mm/dente}$.

ISO 4287	
Parâmetros de amplitude - Perfil de aspereza	
Ra	0.234 <i>µm</i> Filtro gaussiano, 0.8 mm
Rt	2.26 <i>µm</i> Filtro gaussiano, 0.8 mm
Rz	1.84 <i>µm</i> Filtro gaussiano, 0.8 mm
Rc	0.688 <i>µm</i> Filtro gaussiano, 0.8 mm
Rq	0.300 <i>µm</i> Filtro gaussiano, 0.8 mm
Rp	0.857 <i>µm</i> Filtro gaussiano, 0.8 mm
Rv	0.980 <i>µm</i> Filtro gaussiano, 0.8 mm
Rsk	-0.114 Filtro gaussiano, 0.8 mm
Rku	2.96 Filtro gaussiano, 0.8 mm

e) $V_c=612,5\text{m/min}$; $f_z=0,045\text{mm/dente}$.

ISO 4287	
Parâmetros de amplitude - Perfil de aspereza	
Ra	0.247 <i>µm</i> Filtro gaussiano, 0.8 mm
Rt	2.34 <i>µm</i> Filtro gaussiano, 0.8 mm
Rz	1.95 <i>µm</i> Filtro gaussiano, 0.8 mm
Rc	0.728 <i>µm</i> Filtro gaussiano, 0.8 mm
Rq	0.321 <i>µm</i> Filtro gaussiano, 0.8 mm
Rp	1.03 <i>µm</i> Filtro gaussiano, 0.8 mm
Rv	0.925 <i>µm</i> Filtro gaussiano, 0.8 mm
Rsk	0.316 Filtro gaussiano, 0.8 mm
Rku	3.35 Filtro gaussiano, 0.8 mm

d) $V_c=612,5\text{m/min}$; $f_z=0,0275\text{mm/dente}$.

ISO 4287	
Parâmetros de amplitude - Perfil de aspereza	
Ra	0.252 <i>µm</i> Filtro gaussiano, 0.8 mm
Rt	2.61 <i>µm</i> Filtro gaussiano, 0.8 mm
Rz	2.20 <i>µm</i> Filtro gaussiano, 0.8 mm
Rc	0.777 <i>µm</i> Filtro gaussiano, 0.8 mm
Rq	0.331 <i>µm</i> Filtro gaussiano, 0.8 mm
Rp	1.30 <i>µm</i> Filtro gaussiano, 0.8 mm
Rv	0.897 <i>µm</i> Filtro gaussiano, 0.8 mm
Rsk	0.597 Filtro gaussiano, 0.8 mm
Rku	4.24 Filtro gaussiano, 0.8 mm

i) $V_c=750\text{m/min}$; $f_z=0,08\text{mm/dente}$.

ISO 4287	
Parâmetros de amplitude - Perfil de aspereza	
Ra	0.155 <i>µm</i> Filtro gaussiano, 0.8 mm
Rt	1.58 <i>µm</i> Filtro gaussiano, 0.8 mm
Rz	1.40 <i>µm</i> Filtro gaussiano, 0.8 mm
Rc	0.564 <i>µm</i> Filtro gaussiano, 0.8 mm
Rq	0.206 <i>µm</i> Filtro gaussiano, 0.8 mm
Rp	0.665 <i>µm</i> Filtro gaussiano, 0.8 mm
Rv	0.738 <i>µm</i> Filtro gaussiano, 0.8 mm
Rsk	-0.327 Filtro gaussiano, 0.8 mm
Rku	3.90 Filtro gaussiano, 0.8 mm

h) $V_c=750\text{m/min}$; $f_z=0,01\text{mm/dente}$.

ISO 4287	
Parâmetros de amplitude - Perfil de aspereza	
Ra	0.275 <i>µm</i> Filtro gaussiano, 0.8 mm
Rt	2.15 <i>µm</i> Filtro gaussiano, 0.8 mm
Rz	1.78 <i>µm</i> Filtro gaussiano, 0.8 mm
Rc	0.734 <i>µm</i> Filtro gaussiano, 0.8 mm
Rq	0.338 <i>µm</i> Filtro gaussiano, 0.8 mm
Rp	0.906 <i>µm</i> Filtro gaussiano, 0.8 mm
Rv	0.876 <i>µm</i> Filtro gaussiano, 0.8 mm
Rsk	-0.00793 Filtro gaussiano, 0.8 mm
Rku	2.68 Filtro gaussiano, 0.8 mm

g) $V_c=681,25\text{m/min}$; $f_z=0,045\text{mm/dente}$.

APÊNDICE D - Relatórios dos resultados de rugosidade no fresamento do aço inoxidável duplex AISI 2205

ISO 4287	
Parâmetros de amplitude - Perfil de aspereza	
Ra	0.282 <i>Filtro gaussiano, 0,8 mm</i>
Rt	2.52 <i>Filtro gaussiano, 0,8 mm</i>
Rz	2.13 <i>Filtro gaussiano, 0,8 mm</i>
Rc	0.872 <i>Filtro gaussiano, 0,8 mm</i>
Rq	0.355 <i>Filtro gaussiano, 0,8 mm</i>
Rp	1.02 <i>Filtro gaussiano, 0,8 mm</i>
Rv	1.11 <i>Filtro gaussiano, 0,8 mm</i>
Rsk	-0.0345 <i>Filtro gaussiano, 0,8 mm</i>
Rku	2.98 <i>Filtro gaussiano, 0,8 mm</i>

c) $V_c=543,75\text{m/min}$; $f_z=0,045\text{mm/dente}$.

ISO 4287	
Parâmetros de amplitude - Perfil de aspereza	
Ra	0.586 <i>Filtro gaussiano, 0,8 mm</i>
Rt	3.40 <i>Filtro gaussiano, 0,8 mm</i>
Rz	3.02 <i>Filtro gaussiano, 0,8 mm</i>
Rc	1.37 <i>Filtro gaussiano, 0,8 mm</i>
Rq	0.674 <i>Filtro gaussiano, 0,8 mm</i>
Rp	1.38 <i>Filtro gaussiano, 0,8 mm</i>
Rv	1.64 <i>Filtro gaussiano, 0,8 mm</i>
Rsk	-0.0225 <i>Filtro gaussiano, 0,8 mm</i>
Rku	1.93 <i>Filtro gaussiano, 0,8 mm</i>

b) $V_c=475\text{m/min}$; $f_z=0,08\text{mm/dente}$.

ISO 4287	
Parâmetros de amplitude - Perfil de aspereza	
Ra	0.413 <i>Filtro gaussiano, 0,8 mm</i>
Rt	3.49 <i>Filtro gaussiano, 0,8 mm</i>
Rz	2.67 <i>Filtro gaussiano, 0,8 mm</i>
Rc	1.509 <i>Filtro gaussiano, 0,8 mm</i>
Rq	0.509 <i>Filtro gaussiano, 0,8 mm</i>
Rp	1.21 <i>Filtro gaussiano, 0,8 mm</i>
Rv	1.46 <i>Filtro gaussiano, 0,8 mm</i>
Rsk	-0.145 <i>Filtro gaussiano, 0,8 mm</i>
Rku	3.10 <i>Filtro gaussiano, 0,8 mm</i>

a) $V_c=475\text{m/min}$; $f_z=0,01\text{mm/dente}$.

ISO 4287	
Parâmetros de amplitude - Perfil de aspereza	
Ra	0.387 <i>Filtro gaussiano, 0,8 mm</i>
Rt	3.86 <i>Filtro gaussiano, 0,8 mm</i>
Rz	2.72 <i>Filtro gaussiano, 0,8 mm</i>
Rc	0.888 <i>Filtro gaussiano, 0,8 mm</i>
Rq	0.490 <i>Filtro gaussiano, 0,8 mm</i>
Rp	1.56 <i>Filtro gaussiano, 0,8 mm</i>
Rv	1.17 <i>Filtro gaussiano, 0,8 mm</i>
Rsk	0.306 <i>Filtro gaussiano, 0,8 mm</i>
Rku	3.45 <i>Filtro gaussiano, 0,8 mm</i>

f) $V_c=612,5\text{m/min}$; $f_z=0,0625\text{mm/dente}$.

ISO 4287	
Parâmetros de amplitude - Perfil de aspereza	
Ra	0.335 <i>Filtro gaussiano, 0,8 mm</i>
Rt	2.56 <i>Filtro gaussiano, 0,8 mm</i>
Rz	2.30 <i>Filtro gaussiano, 0,8 mm</i>
Rc	0.957 <i>Filtro gaussiano, 0,8 mm</i>
Rq	0.422 <i>Filtro gaussiano, 0,8 mm</i>
Rp	0.874 <i>Filtro gaussiano, 0,8 mm</i>
Rv	1.43 <i>Filtro gaussiano, 0,8 mm</i>
Rsk	-0.721 <i>Filtro gaussiano, 0,8 mm</i>
Rku	3.28 <i>Filtro gaussiano, 0,8 mm</i>

e) $V_c=612,5\text{m/min}$; $f_z=0,045\text{mm/dente}$.

ISO 4287	
Parâmetros de amplitude - Perfil de aspereza	
Ra	0.255 <i>Filtro gaussiano, 0,8 mm</i>
Rt	2.18 <i>Filtro gaussiano, 0,8 mm</i>
Rz	1.98 <i>Filtro gaussiano, 0,8 mm</i>
Rc	0.806 <i>Filtro gaussiano, 0,8 mm</i>
Rq	0.322 <i>Filtro gaussiano, 0,8 mm</i>
Rp	1.11 <i>Filtro gaussiano, 0,8 mm</i>
Rv	0.868 <i>Filtro gaussiano, 0,8 mm</i>
Rsk	0.594 <i>Filtro gaussiano, 0,8 mm</i>
Rku	3.61 <i>Filtro gaussiano, 0,8 mm</i>

d) $V_c=612,5\text{m/min}$; $f_z=0,0275\text{mm/dente}$.

ISO 4287	
Parâmetros de amplitude - Perfil de aspereza	
Ra	0.237 <i>Filtro gaussiano, 0,8 mm</i>
Rt	2.25 <i>Filtro gaussiano, 0,8 mm</i>
Rz	1.90 <i>Filtro gaussiano, 0,8 mm</i>
Rc	0.696 <i>Filtro gaussiano, 0,8 mm</i>
Rq	0.301 <i>Filtro gaussiano, 0,8 mm</i>
Rp	0.859 <i>Filtro gaussiano, 0,8 mm</i>
Rv	1.05 <i>Filtro gaussiano, 0,8 mm</i>
Rsk	-0.152 <i>Filtro gaussiano, 0,8 mm</i>
Rku	3.20 <i>Filtro gaussiano, 0,8 mm</i>

i) $V_c=750\text{m/min}$; $f_z=0,08\text{mm/dente}$.

ISO 4287	
Parâmetros de amplitude - Perfil de aspereza	
Ra	0.522 <i>Filtro gaussiano, 0,8 mm</i>
Rt	3.27 <i>Filtro gaussiano, 0,8 mm</i>
Rz	2.83 <i>Filtro gaussiano, 0,8 mm</i>
Rc	1.42 <i>Filtro gaussiano, 0,8 mm</i>
Rq	0.619 <i>Filtro gaussiano, 0,8 mm</i>
Rp	1.35 <i>Filtro gaussiano, 0,8 mm</i>
Rv	1.48 <i>Filtro gaussiano, 0,8 mm</i>
Rsk	-0.00461 <i>Filtro gaussiano, 0,8 mm</i>
Rku	2.18 <i>Filtro gaussiano, 0,8 mm</i>

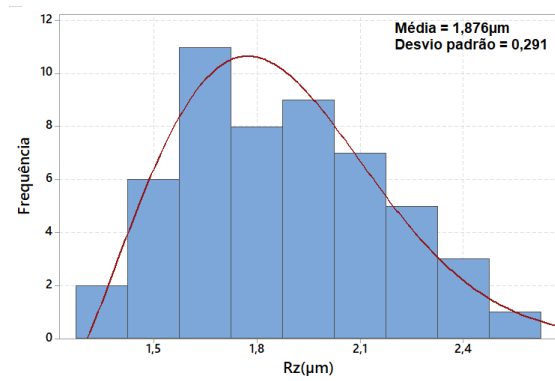
h) $V_c=750\text{m/min}$; $f_z=0,01\text{mm/dente}$.

ISO 4287	
Parâmetros de amplitude - Perfil de aspereza	
Ra	0.288 <i>Filtro gaussiano, 0,8 mm</i>
Rt	2.40 <i>Filtro gaussiano, 0,8 mm</i>
Rz	2.03 <i>Filtro gaussiano, 0,8 mm</i>
Rc	0.766 <i>Filtro gaussiano, 0,8 mm</i>
Rq	0.354 <i>Filtro gaussiano, 0,8 mm</i>
Rp	0.964 <i>Filtro gaussiano, 0,8 mm</i>
Rv	1.07 <i>Filtro gaussiano, 0,8 mm</i>
Rsk	0.0145 <i>Filtro gaussiano, 0,8 mm</i>
Rku	2.70 <i>Filtro gaussiano, 0,8 mm</i>

g) $V_c=681,25\text{m/min}$; $f_z=0,045\text{mm/dente}$.

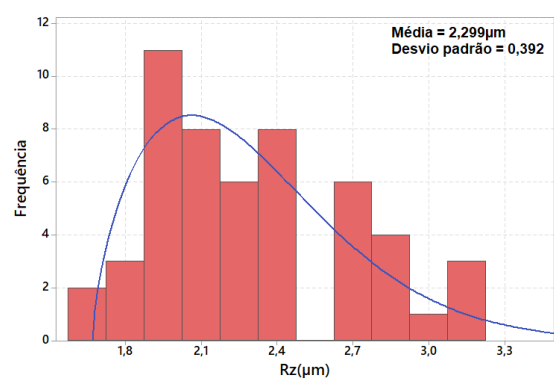
APÊNDICE E - Resultados da análise estatística do DOE

AISI 304

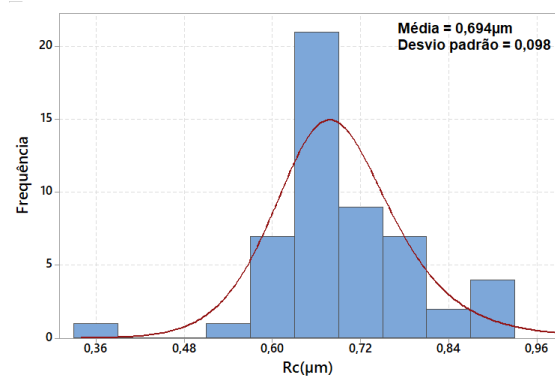


(a)

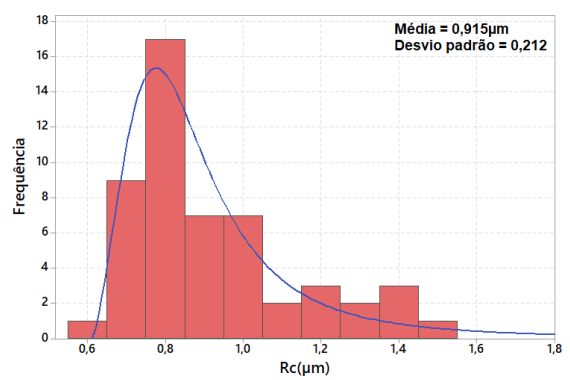
AISI 2205



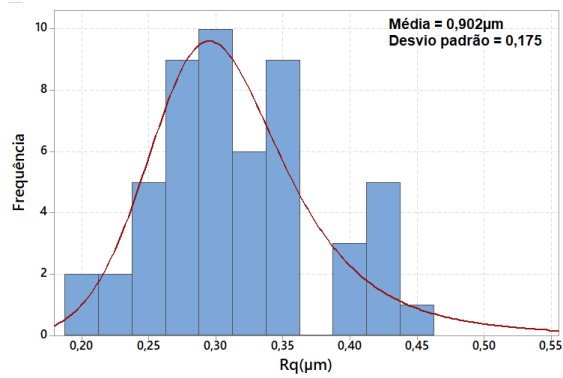
(b)



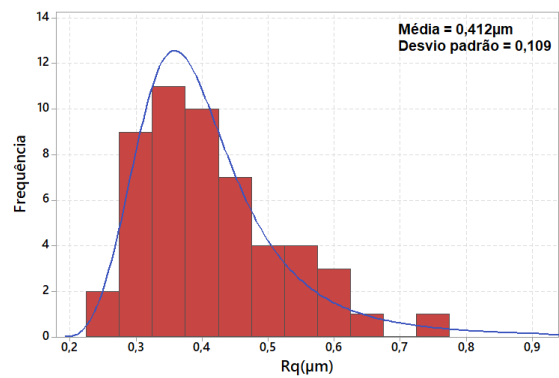
(c)



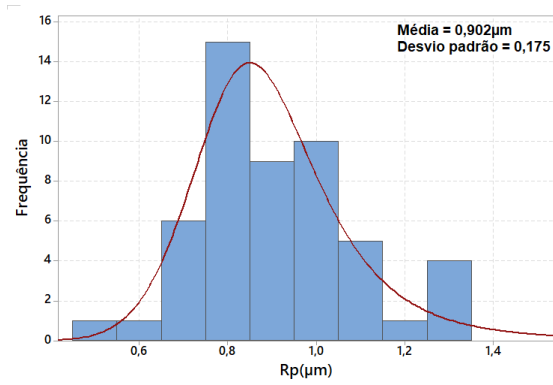
(d)



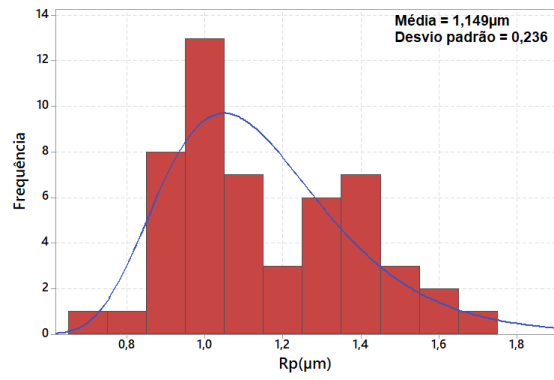
(e)



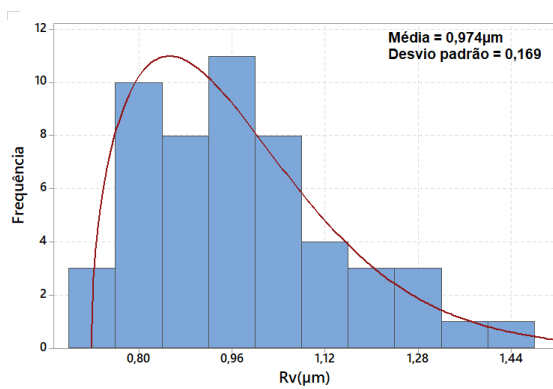
(f)

**AISI 304**

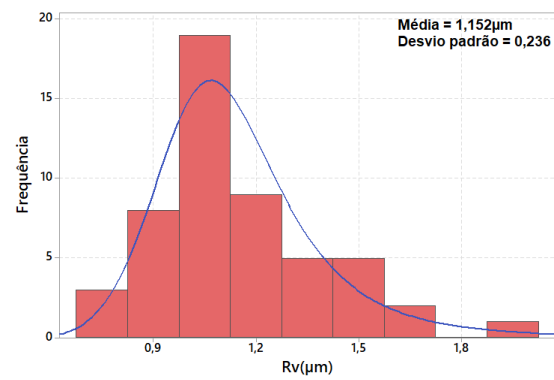
(g)

**AISI 2205**

(h)



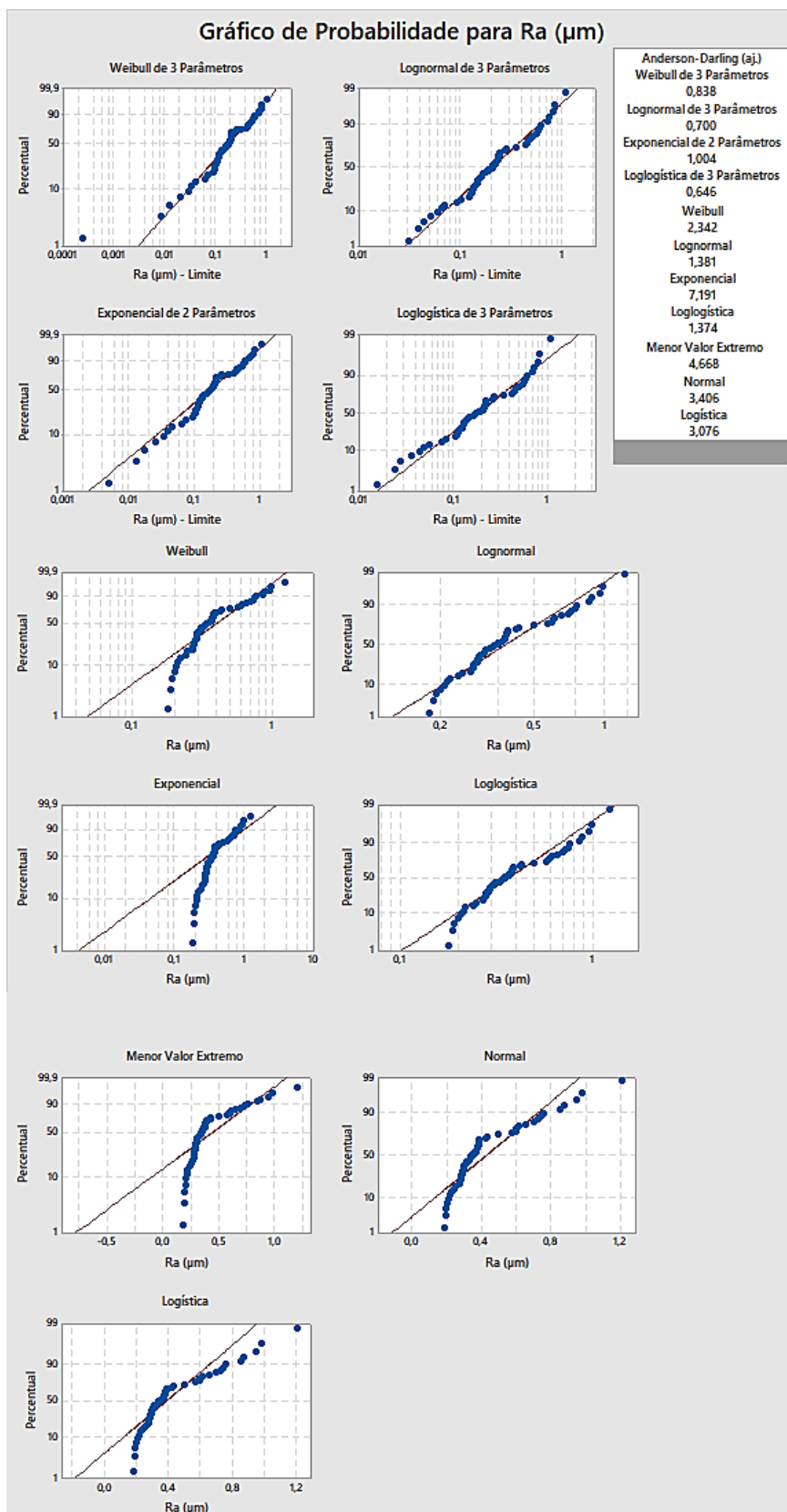
(i)



(j)

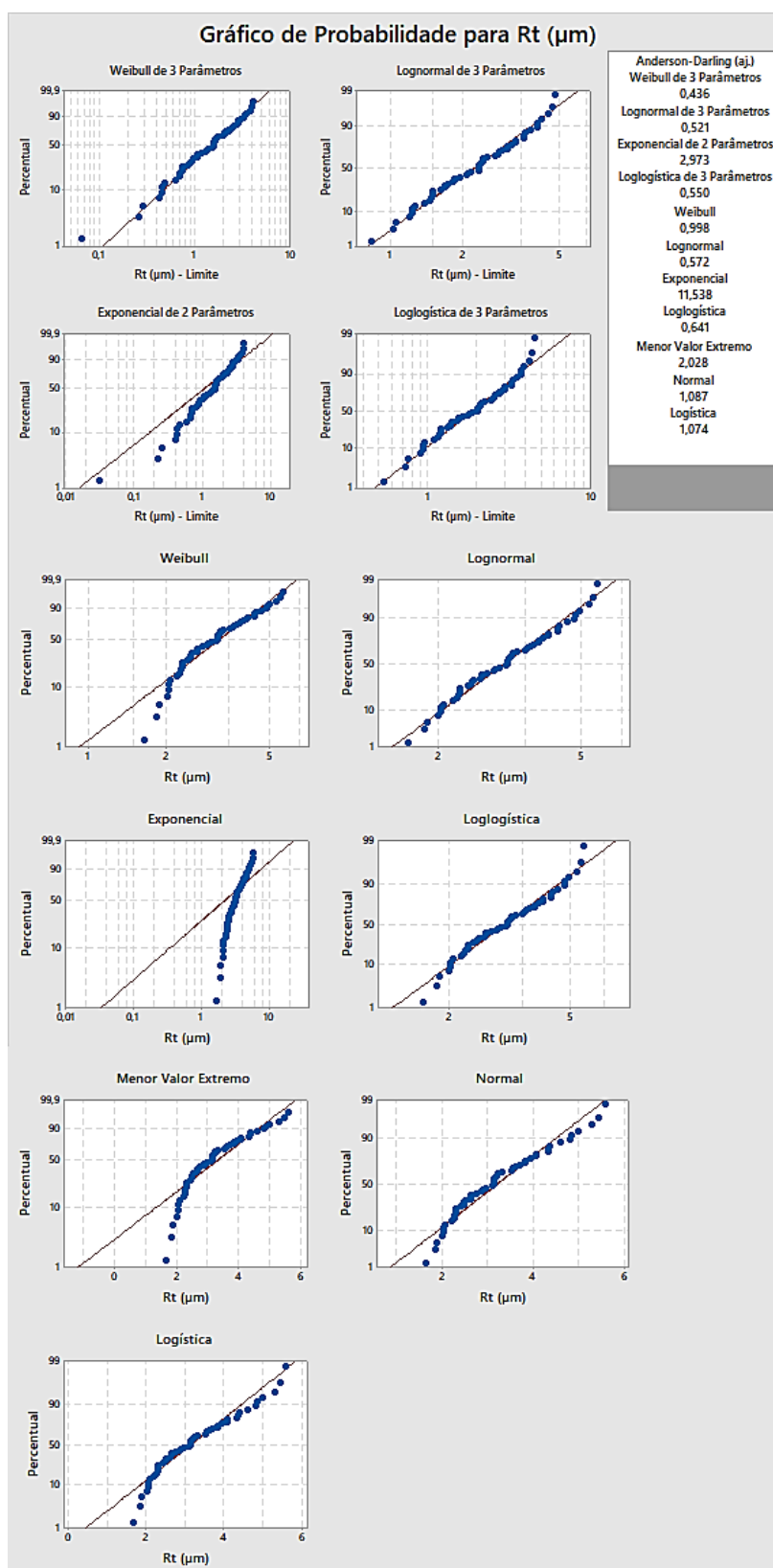
Fonte: Elaborado pelo autor

APÊNDICE F - Identificação de distribuição de probabilidade aplicando a estatística de Anderson Darling para (Ra)



Fonte: Elaborado pelo autor

APÊNDICE G - Identificação de distribuição de probabilidade aplicando a estatística de Anderson Darling para (Rt)



Fonte: Elaborado pelo autor

ANEXO A - Certificado de qualidade do aço AISI 304

CERTIFICADO DE QUALIDADE Page 1 of 1

Pág. 1/1

Aperam Inox América do Sul S.A. **aperam**

Sede: Av. Carandá, nº 1115, 2ª Andar - Centro - Belo Horizonte - MG - 30130-915 - Brasil
 Usina: Praça 1ª de Maio, nº 9 - Centro - Timóteo - MG - 35190-018 - Brasil
 Filial: Av. Mercedes Brand, nº 1.420 - Distrito Industrial - Campinas - SP - 13054-750 - Brasil
 Rodovia RSC 453, Km 2,2 - S/N - Distrito Industrial - Caxias do Sul - RS - 95110-090 - Brasil

CERTIFICADO DE QUALIDADE

Número: 1678900
 Pedido APERAM: 75337811
 Data: 23/08/2014
 Nota Fiscal: 434318

Cliente:
 INOXPLASMA COMERCIO DE METAIS LTDA
 AV HENRY FORD 90
 03109000 - SAO PAULO - SP
 BRASIL
 Ordem: PC 00358/14

Aço: AISI 304 Acabamento: NR1 Produto: CHAPA
 Dimensões: 31,75 mm x 1540 mm x 6000 mm
 Marcação:

Composição Química

Número Corrida	C %	Mn %	Si %	P %	S %	Cr %	Ni %	Mo %	Al %	Cu %	N PPM				
405114J	0,045	1,22	0,480	0,026	0,0032	17,66	8,00	0,049	0,0038	0,0898	531				

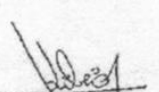
Resultados

Ensaio/Variável	U.M.	405114J032											
		Origem: 405114J03		Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final
Lim Resistência	MPA		690,00										
Lim. Escoamento 0,2%	MPA		274,00										
Alongamento	%		52,00										
Tam Grão Austenítico			06/06										
Dureza RB	HRB	78,76	78,76										
Oxalico		APROV	0										
Peso Líquido	Kg		2.350										
Peso Bruto	Kg		2.450										

Identificação de unidade metálica (U.M.): OK
 Qualidade superficial / dimensional: OK
 Tratamento Térmico: Temp. mínima de solubilização 1040 C

Normas: ASTM A240/A240M 14 ASME SA240/SA240M 13 ASTM A262 13
ASTM A480/A480M 14A

Observações:
 a) Material sem contaminação por Mercúrio.
 b) Material sem contaminação por radioatividade. (Garantia enquanto estocado sob responsabilidade da Aperam Inox América do Sul S.A.).
 c) Certificamos que os resultados descritos acima estão corretos e de acordo com a especificação ou concessão autorizada.
 d) Sistema de Gestão da Qualidade certificado conforme norma ISO 9001 - Certificado ABS QE N° 30071.
 e) Sistema de Gestão da Qualidade certificado conforme norma ISO/TS 16949 - Certificado ABS QE N° 38324.
 f) Sistema de Gestão Ambiental certificado conforme norma ISO 14001 - Certificado ABS QE N° 65989.
 g) Corrida(s) produzida(s) no Brasil.


 Paulo Sérgio Ribeiro
 Inspetor de Qualidade
 Aperam Inox América do Sul S.A.

file://\\Ace124\cq\001678900-1.html NF 98431 03/09/2014
 DATA 08/10/14
 INOXPLASMA.COM.MEZ LTDA

ANEXO C - Condições de usinagem sugeridas pelo fabricante

Catálogo de Fresas de Topo e Faceamento de Alta Eficiência - Série MEC Kyocera, 2017

Quebra-Cavaco JT

Material da Peça	fz (mm/t)		Classes de Inserto Recomendadas (Vc m/min)					
	Porta-Ferramenta		Cermet	MEGACOAT NANO	MEGACOAT		Metal Duro com Revestimento PVD	Metal Duro com Revestimento CVD
	MEC10~MEC19	MEC20~MEC40 MEC032R~MEC160R	TN100M	PR1535	PR1225	PR1210	PR830	CA6535
Aço Carbono	0.06 - 0.1 - 0.15	0.08 - 0.15 - 0.25	☆ 120 - 160 - 200	☆ 120 - 180 - 250	★ 120 - 180 - 250	—	☆ 120 - 160 - 200	—
Liga de Aço	0.06 - 0.1 - 0.12	0.08 - 0.15 - 0.2	☆ 100 - 140 - 180	☆ 100 - 160 - 220	★ 100 - 160 - 220	—	☆ 100 - 140 - 180	—
Aço Molde	0.06 - 0.08 - 0.1	0.08 - 0.12 - 0.2	☆ 80 - 120 - 150	☆ 80 - 140 - 180	★ 80 - 140 - 180	—	☆ 80 - 120 - 150	—
Aço Inoxidável Austenítico	0.06 - 0.08 - 0.1	0.08 - 0.12 - 0.15	—	☆ 100 - 160 - 200	☆ 100 - 160 - 200	—	☆ 100 - 140 - 180	—
Aço Inoxidável Martensítico	0.06 - 0.08 - 0.1	0.08 - 0.12 - 0.2	—	☆ 150 - 200 - 250	—	—	—	★ 180 - 240 - 300
Aço Inoxidável Endurecível por Precipitação	0.06 - 0.08 - 0.1	0.08 - 0.12 - 0.2	—	★ 90 - 120 - 150	—	—	—	—
Ferro Fundido Cinzento	0.06 - 0.1 - 0.15	0.08 - 0.18 - 0.25	—	—	—	★ 120 - 180 - 250	—	—
Ferro Fundido Nodular	0.06 - 0.08 - 0.1	0.08 - 0.15 - 0.2	—	—	—	★ 100 - 150 - 200	—	—
Liga Resistente ao Calor à base de Ni	0.06 - 0.08 - 0.1	0.08 - 0.12 - 0.15	—	★ 20 - 30 - 50	—	—	—	☆ 20 - 30 - 50
Liga de Titânio	0.06 - 0.08 - 0.1	0.08 - 0.15 - 0.2	—	☆ 40 - 60 - 80	—	☆ 30 - 50 - 70	—	—

Para Ligas Resistentes ao Calor à Base de Ni e Ligas de Titânio é recomendado o uso de fluido refrigerante

ANEXO D - Licença de utilização do Software Minitab®

**ANEXO E - Artigo Apresentado em congresso internacional: COBEM 2019, 25th
ABCm International Congress Of Mechanical Engineering**





COBEM
UBERLÂNDIA
 25TH INTERNATIONAL CONGRESS
 OF MECHANICAL ENGINEERING - 2019

CERTIFICATE
 OF PRESENTATION

WE CERTIFY THAT

Murilo Pereira Lopes

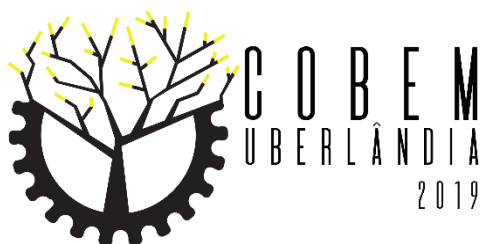
PRESENTED THE PAPER ENTITLED

Optimization of Cutting Parameters Considering Surface Roughness When Milling AISI 304 Steel Using Coated Wc-Co and TiAln / Wc-Co Coated

IN 25TH INTERNATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING - COBEM 2019, FROM OCTOBER 20TH TO 25TH 2019, IN UBERLÂNDIA, MG - BRAZIL.

Prof. Dr. Entio Pedone Bandarra Filho
Chairman of the Cobem 2019





25th ABCM International Congress of Mechanical Engineering
October 20-25, 2019, Uberlândia, MG, Brazil

COBEM-2019-0588

OPTIMIZATION OF CUTTING PARAMETERS CONSIDERING SURFACE ROUGHNESS WHEN MILLING AISI 304 STEEL USING COATED WC-CO AND TiAlN / WC-CO COATED

Lopes, Murilo Pereira

Carneiro, José Rubens Gonçalves

Mechanical Engineering Department, Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais - PUC Minas, Belo Horizonte, MG, Brazil. Avenue Dom José Gaspar, 500 - Campus COREU - Coração Eucarístico - zip code. 30545-901 - Graduate program in mechanical engineering - Tel +55 31 33194179.
murilo.start360@gmail.com; joserub@pucminas.br.

Silva, Gilmar Cordeiro da

Mechanical Engineering Department, Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais - PUC Minas, Belo Horizonte, MG, Brazil. Avenue Dom José Gaspar, 500 - Campus COREU - Coração Eucarístico - zip code. 30545-901 - Graduate program in mechanical engineering - Tel +55 31 33194179.
gilmarcord@gmail.com.

Santos, Carlos Eduardo dos

Materials Engineering Department, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFETMG, Belo Horizonte, MG, Brazil. 5253 Amazonas Ave. - Nova Suíça -- zip code. 30421-169. Tel +55 31 988632774.
carloveduardo@cefetmg.br.

Santos, Ítalo Bruno dos

Mechanical Engineering Department, Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais - PUC Minas, Belo Horizonte, MG, Brazil. Avenue Dom José Gaspar, 500 - Campus COREU - Coração Eucarístico - zip code. 30545-901 - Graduate program in mechanical engineering - Tel +55 31 33194179.
italobsantos@gmail.com.

Abstract. This paper presents an investigation on the behavior of the roughness response R_a and R_z on the surface of AISI 304 steel submitted to the process of top milling by dry milling, using different cutting tools and varying the cutting parameters. The study was based on experimental planning techniques through RSM response surface methodology. The parameters used in the experiments were cutting speed V_c , m/min, feed per tooth f_z , mm/tooth and depth of cut a_p , mm. To compare the results, WC-Co cemented carbide cutting tools with and without TiAlN coating were used. The results showed that, for uncoated cutting tools, the parameter f_z , quadratic, 30.03% and linear, 28.47%, caused the greatest effects on the roughness response R_a and R_z respectively. For the tools with TiAlN coating, the interaction between the parameters V_c and f_z , caused a greater influence on the roughness response R_a , 20.92% and R_z 35.40%. The second-order polynomial regression model and ANOVA were efficient for the investigation. The use of TiAlN coated tools, compared to the uncoated specification used in the experiment, pointed to low roughness indexes. A mathematical model capable of describing the roughness behavior as a function of the investigated cutting parameters was developed.

Keywords: Milling, Stainless steel, Roughness, Optimization, Analysis of variance.

1. INTRODUCTION

Stainless steels are Fe-C-Cr alloys with a chromium content greater than 10%. In this family, austenitic alloys are the most used in industries because of their mechanical properties and resistance to corrosion (Berkani et al., 2015a). The AISI 304 alloy generally contains 18% Cr and 8% nickel by weight and is known as 18-8 stainless

steel, the most commonly used in general use (Askeland and Wright, 2014). These steels are widely used in the chemical industry, health, food production, pharmaceuticals, textiles, nuclear, biomedical, etc. They exhibit high hardness and resistance to deformation, as well as excellent ductility and toughness over a wide range of temperatures and have excellent corrosion and oxidation resistance (Asilturk and Neseli, 2012).

Machining is a mechanical manufacturing process characterized by the removal of the splinter. It is usually performed in a machine tool that, through the increment of movements associated with the attack of a cutting tool, processes the material (Ferraresi, 2011). In machining processes, the key point to ensure the quality of the manufactured product is the appropriate selection of cutting parameters (Do and Hsu, 2016). The study and previous definition of factors such as cutting speed, cutting depth and feed are fundamental for the good performance of a machining operation (Arbizu and Pérez, 2003). The integrity of the surface of ductile materials can be compromised when subjected to certain machining conditions (Rodrigues et al., 2010). The feed rate and cutting speed of the machining tool are factors that influence more significantly the surface roughness of the AISI 304 steel as a function of its high ductility (Berkani et al., 2015b).

It is possible to analyze the behavior of cutting parameters in a machining process, applying the Design of Experiments (DOE) techniques. The experimental assays are designed using the multilevel factorial model - DOE, and their results are analyzed through Analysis of Variance - ANOVA (Razavykia et al., 2015a). The statistical ANOVA tools applied in the optimization of cutting parameters in milling are efficient in the study of roughing and finishing operations (Das et al., 2016a). Statistical models are developed to represent the relationship between machining parameters as independent variables, and surface roughness or cutting force as response variables (Razavykia et al., 2015b). Response Surface Analysis - RSM is a DOE technique that focuses on a new and renowned approach for the optimization of input process parameter models based on physical experiments, simulation experiments and experimental discoveries (Das et al., 2016b).

The tool-material interactions under machining conditions significantly modify the properties of the layers near the metal surface and consequently their behavior and durability. The nature and extent of modifications depend on the types of tool-part interactions (Moussa et al., 2012). Achieving the desired surface quality is fundamental to the functional performance of a component (Makadia and Nanavatiof, 2013), especially as to its useful life due to the fatigue of the material in service (Sarnobat and Raval, 2019). The dimensional accuracy and in-service performance of machined products are directly affected by surface roughness (Razavykia et al., 2015c). The roughness of the surface also influences the tribological characteristics, the fatigue resistance, the corrosion resistance and the aesthetic appearance of the machined parts (Tanikić and Marinković, 2012).

The cemented carbide cutting tools are widely used in the machining industry, the cemented carbide is the alloy of various metal carbides - tungsten (W), titanium (Ti) vanadium (V) bonded with an elastic binder (Kazlauskas et al., 2017a). Tungsten carbide is a composite material that consists mainly of two phases. The hard WC phase is responsible for good wear resistance and high abrasiveness, the Co phase, binder, is responsible for the strength of the material (Hintze et al., 2018). The cutting edges made of WC-Co are more wear-resistant compared to tools made of high-speed steel (Kazlauskas et al., 2017b).

In this context, this research presents an experimental analysis of the surface roughness behavior Ra and Rz along a series of frontal milling tests performed on the surface of AISI 304 austenitic stainless-steel using WC-Co tool and WC-Co coated with TiAlN.

2. MATERIALS AND METHODS

The milling experiments were performed on stainless steel AISI 304 specimens, whose initial dimensions were 35mm in height, 50mm in width and 100mm in length. Samples of the same material with 35x50x50mm were analyzed in an ARL 4460 optical emission spectrometer from Thermo Scientific. For the metallographic test the sample was cut in the direction perpendicular to the lamination, then milled and later prepared in sandpaper with 180, 220, 320, 400, 500, 600, 1000 and 1200 mesh granulometry. Afterward, a felt finishing polish impregnated with a diamond paste of 9, 3 and 1 mm size was made. For analysis of the microstructure of the AISI 304 steel was attacked with regal water (1 portion of concentrated nitric acid for 3 parts of concentrated hydrochloric acid), and then analyzed under a Zeiss optical microscope, with an image analyzer.

The machines used in the milling were a ROMI BRIDGEPORT - DISCOVERY 560 CNC machining center. Two different cutting inserts were used in the tooling during the experiments, the first of Tungsten and Cobalt Carbide, WC-Co of the KYOCERA brand with specification: 050405ER-SH PR1225, and the second of Tungsten Carbide and Cobalt, WC-Co with TiAlN PVD coating, specification: 050405ER-SH PR1025 from the same manufacturer. To guarantee reliability in the comparison of the results, samples of the inserts were fractured and observed in a scanning electron microscope. The top section was preferred to describe the morphology, while the thickness measurement was made in the cross-section. The dispersive energy spectrometer coupled to SEM was used for the qualitative evaluation of the chemical composition. To measure the roughness Ra and Rz, a rugosimeter of the brand TAYLOR HOBSON model SURTRONIC S-128 was used.

Table 1. Cutting parameters and their levels for milling.

Symbol	Control factor	Unit	Level 1	Level 2	Level 3	Level 4	Level 5
Vc	Cutting speed	m/min	120	140	160	180	200
fz	Feed per tooth	mm/tooth	0.10	0.125	0.15	0.175	0.20
ap	Depth of cut	mm	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8

The process started with the definition of input variables and their respective levels, as shown in Tab. 1. For the cutting speed Vc, the five levels used in the DOE were: 120 m/min, 140 m/min, 160 m/min, 180 m/min and 200 m/min. The levels of the input variable fz, feed per tooth, were: 0.10 mm/tooth, 0.125 mm/tooth, 0.15 mm/tooth, 0.175 mm/tooth, and 0.20 mm/tooth; and the depth of cut ap, varied in the levels: 1.0 mm, 1.2 mm, 1.4 mm, 1.6 mm and 1.8 mm.

After the elaboration of the experimental design through the response surface methodology, the milling experiments were done in the laboratory, according to Tab. 2.

Table 2. Design of response surface experiment.

N° Test	Process parameter settings			Experimental procedure of milling for each machining tool			
				Tool WC - Co		Tool PVD TiAlN	
	Vc (m/min)	fz (mm/tooth)	ap (mm)	Ra (μm)	Rz (μm)	Ra (μm)	Rz (μm)
1	200	0.100	1.0	1.69	7.61	1.13	4.82
2	160	0.150	1.6	1.58	10.10	1.55	8.85
3	160	0.125	1.4	2.42	10.80	1.97	9.03
4	200	0.100	1.8	1.72	7.90	0.86	5.07
5	180	0.150	1.4	1.80	11.30	1.42	8.58
6	160	0.150	1.4	1.58	10.80	2.09	9.36
7	120	0.200	1.0	2.23	11.70	0.97	4.89
8	120	0.200	1.8	1.40	6.79	1.08	6.41
9	120	0.100	1.0	1.10	5.91	1.25	5.90
10	160	0.150	1.4	1.66	9.60	1.60	8.74
11	160	0.150	1.4	1.82	8.58	1.89	9.55
12	160	0.150	1.2	2.20	9.91	1.57	9.58
13	160	0.175	1.4	2.72	15.70	2.25	11.40
14	200	0.200	1.0	2.77	17.50	1.49	9.90
15	120	0.100	1.8	1.63	7.82	1.26	8.15
16	160	0.150	1.4	1.87	11.50	1.56	9.83
17	160	0.150	1.4	2.03	12.30	1.77	9.21
18	140	0.150	1.4	1.09	7.20	1.90	9.17
19	160	0.150	1.4	1.74	12.50	1.960	10.20
20	200	0.200	1.8	2.42	10.40	2.540	13.80

After data tabulation, the results were analyzed by means of statistical ANOVA techniques, the second order polynomial regression equations that described the roughness behavior Ra and Rz for each situation were developed. The significance index adopted in the study was $\alpha=0.05$.

The response surface methodology was used for modeling and analysis of the machining parameters during the milling process, the observed response was to the surface roughness in its Ra and Rz parameters. The RSM

method is a sequential and exploratory approach that seeks to establish the relationship between more than one variable and a given response (Ghevariya et al., 2011). The response surface can present approximation functions or effects called the polynomial regression model, these models are of 1st order, which represents the linear effect of the 2nd order model, which represents the curvature effect through a combination of the linear effect, quadratic and interaction.

In addition, the statistical model of second-order effects is given by Eq. (1):

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

Where:

$\sum_{i=1}^k \beta_i x_i$: are the terms of linear effects.

$\sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2$: are the quadratic terms.

$\sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon$: are the terms of the interactions.

The RSM project adopted in this research was the Central Composite Design (CCD), recommended when the plan requires sequential experiments. The central composite experiment is used to obtain data for the creation of a second-order model surface, which includes factorial or cubic points, axial or star points and central points. The second-order polynomial regression model represents the curvature effect through a combination of linear, quadratic and interaction effects (Montgomery and Runger, 2007a).

3. RESULTS AND DISCUSSION

The chemical composition of the steel in percentage by weight occurred, as shown in Tab. 3.

Table 3. Chemical composition of AISI 304 steel in percentage by weight.

C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	Others
0.05	1.22	0.48	17.66	8.00	0.05	72.49

The microstructure of the AISI 304 steel evidenced the presence of austenite with equiaxial crystals and the presence of annealing twinning Fig. 1.



Figure 1. Microstructure of the AISI 304 steel showing crystals of austenite and annealing twinning.

Figure 2 (a) shows the microstructures of the cemented carbide insert, specified by 050405ER-SH PR1225, made of tungsten carbide in the Cobalt matrix, WC-Co and the coated insert Fig. 2 (b) specification indicated by the manufacturer is 050405ER- SH PR1025.

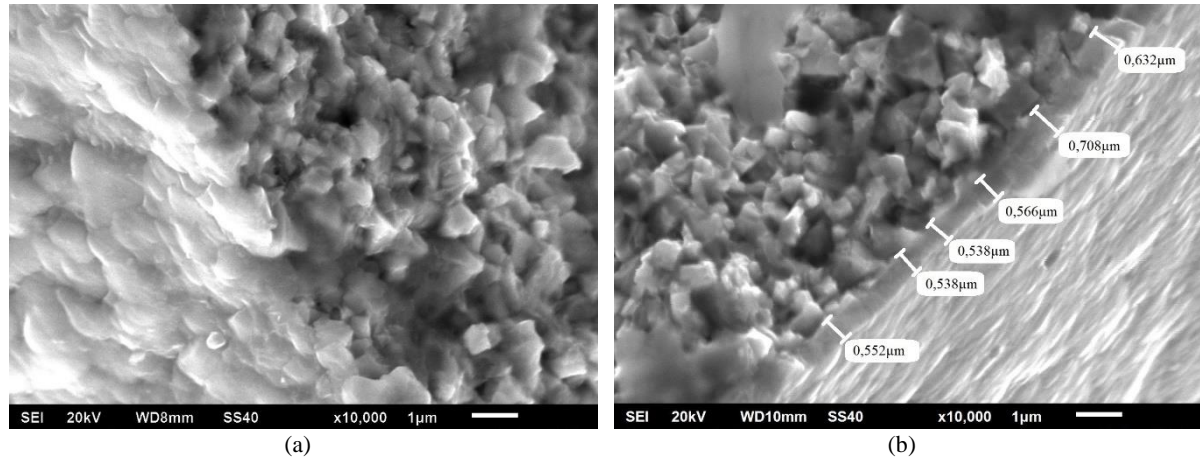


Figure 2. SEM micrograph of fractured cross-sections: (a) WC - Co compound matrix; (b) coating thickness.

It is observed that the thickness of the coating was close to 1µm with the presence of Ti, Al and N (TiAlN) obtained by EDS.

3.1 Analyze of variance

The inferential relationship between the cutting parameters, V_c , f_z , a_p , and the investigated response variable, roughness R_a and R_z , were expressed based on the adequacy of the models through the coefficient of determination R^2 , corresponding to the amount of variability considered by the regression model. The higher the R^2 value, the better the model fits the data (Montgomery and Runger, 2007b).

In the case of the experiments performed, the value of R^2 was 86.17% in the R_a roughness evaluation using the WC - Co cemented carbide tool, and 87.42% in the R_z roughness evaluation, for the cemented carbide tool with PVD TiAlN coverage the values of R^2 were 83.44% in the R_a roughness and 92.62% R_z .

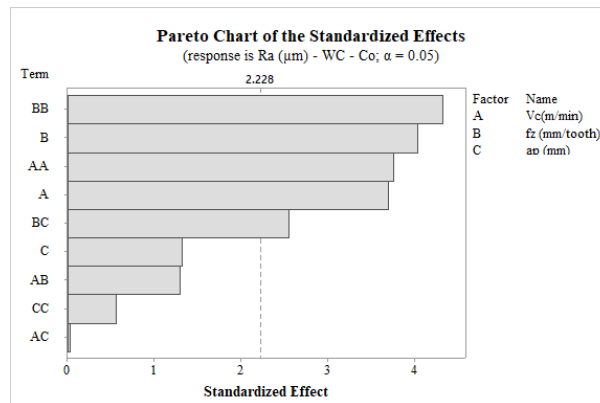
Table 4 and Figure 3 (a-d) provide results of the analysis of variance for surface roughness R_a and R_z based on the tests performed with the two specifications of the cutting tools. The table indicates the results of the P-Value, which is a statistical index used in the analysis of variance, if $P\text{-value} \leq \alpha$ the association is statistically significant, if $P\text{-value} > \alpha$ the association is not statistically significant (Montgomery and Runger, 2007c). The table also shows the index of contribution of each factor, in a linear, quadratic and interaction form. It is important to relate these responses in ANOVA to understand better the results.

Table 4. Results of ANOVA.

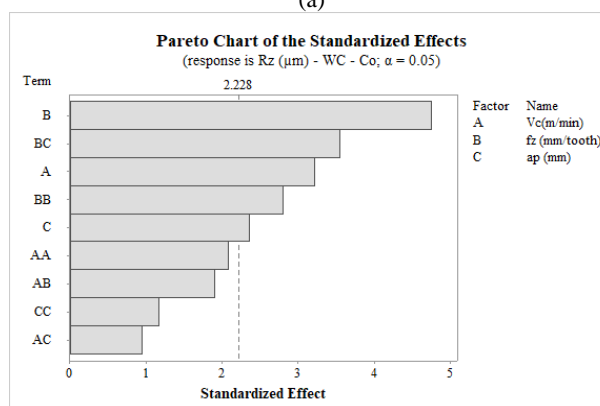
Source	Tool WC - Co				Tool PVD TiAlN			
	R_a , (µm)		R_z , (µm)		R_a , (µm)		R_z , (µm)	
	P-Value	Cont.%	P-Value	Cont.%	P-Value	Cont.%	P-Value	Cont.%
V_c	0.0041	18.99	0.0093	12.99	0.1237	4.68	0.0080	7.67
f_z	0.0024	22.58	0.0008	28.47	0.0393	9.30	0.0005	18.22
a_p	0.2137	2.44	0.0401	6.99	0.2482	2.49	0.0105	6.93
V_c^2	0.0037	0.31	0.0635	7.36	0.2994	29.67	0.1520	22.47
f_z^2	0.0015	30.03	0.0187	8.27	0.0699	2.88	0.2387	0.66
a_p^2	0.5872	0.44	0.2716	1.70	0.1039	5.30	0.4208	0.50
V_c*f_z	0.2243	2.32	0.0635	4.58	0.0052	20.92	0.0001	35.40
V_c*a_p	0.9771	0.00	0.0187	1.14	0.3720	1.45	0.8740	0.02
f_z*a_p	0.0283	9.07	0.2716	15.90	0.0710	6.76	0.2397	1.10

It was verified that for the WC-Co tool the factor that most affected the roughness response R_a was the feed per tooth f_z , both linearly, 22.58%, and quadratic, 30.03%. It is noted that in both results the P-Value was lower than the significance level of $\alpha = 0.05$, so as the quadratic interaction was more significant, the relationship between the factor and the response will indicate a curve. In Fig. 3(a), through the Pareto graph, it is possible to compare

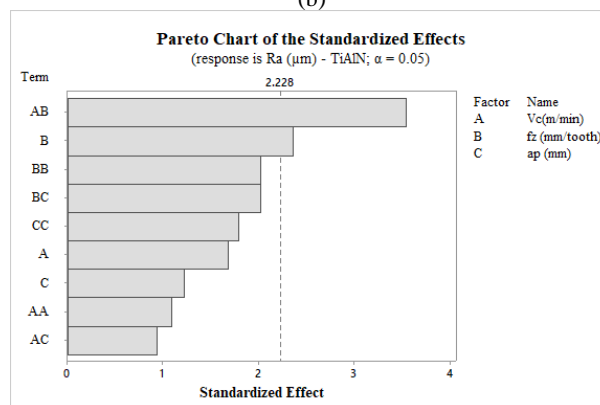
the relative magnitude and the statistical significance of the input parameters in the roughness response Ra for the WC-Co tool.



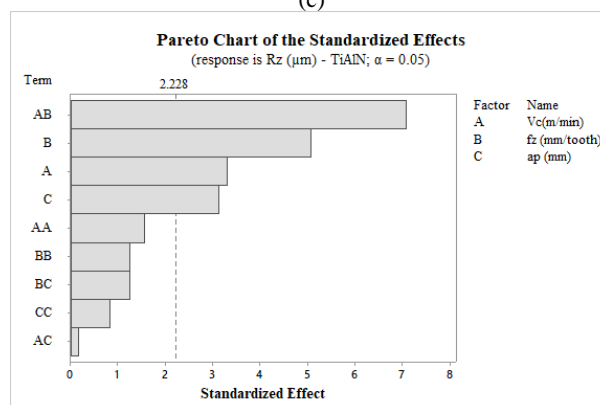
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure 3. (a) Pareto WC - Co graph for roughness Ra. (b) Pareto Chart WC - Co for roughness Rz. (c) Pareto graph PVD TiAlN for roughness Ra. (d) Pareto graph PVD TiAlN for roughness Rz.

The graph of Fig. 3(b) shows the proportions of the influencing parameters in the 2nd order polynomial regression performed for Rz roughness using WC-Co tool. Relating the data of Tab. 4 to the graph shows a significant linear contribution of the parameter fz in the response, 28.47%, with P-Value = 0.0008.

In the case of TiAlN PVD-coated cutting tools, ANOVA presented slightly different results, the factor that contributed most to the roughness response Ra was Vc^2 , but with P-Value = 0.2994, higher than the significance index $\alpha = 0.05$, Tab 4. Thus, by analyzing the Pareto graph of Fig. 3 (c), it is understood that the interaction $Vc*fz$ was shown to have a higher magnitude as a function of P-Value = 0.0052, lower than the index of significance. The interaction term $Vc*fz$ was more significant, so strong interdependence between them was found.

Figure 3 (d) shows the behavior trend of the roughness response for the cutting tool coated of TiAlN PVD, the Rz response was strongly influenced by the interaction of the factors $Vc*fz$, even a phenomenon occurred in the Ra roughness response. In this case, the contribution index of $Vc*fz$ was 35.40% and the P-Value = 0.0001, Tab. 4. The figure also represents the magnitude of the other linear, quadratic and interaction factors.

The Equations (2-5) represents the factorial regressions of the behavior of the roughness response Ra and Rz for the two cutting tools used in the experiment.

$$Ra (\mu m)_{WC-Co} = -16.58 + 0.418Vc - 275.9 fz + 6.84ap - 0.001307Vc * Vc + 963 fz * fz - 1.95ap * ap + 0.0550Vc * fz - 0.00016Vc * ap - 10.88 fz * ap \quad (2)$$

$$Rz (\mu m)_{WC-Co} = -85.4 + 1.374Vc - 1007 fz + 81.8ap - 0.00427Vc * Vc + 3669 fz * fz - 23.8ap * ap + 0.477Vc * fz - 0.0298Vc * ap - 88.8 fz * ap \quad (3)$$

$$Ra (\mu m)_{TiAlN} = -5.16 + 0.099Vc - 173.7 fz + 16.1ap - 0.000394Vc * Vc + 468 fz * fz - 6.44ap * ap + 0.1564Vc * fz + 0.00514Vc * ap + 8.89 fz * ap \quad (4)$$

$$Rz (\mu m)_{TiAlN} = -17.8 + 0.457Vc - 450 fz + 27.1ap - 0.00185Vc * Vc + 958 fz * fz - 10.0ap * ap + 1.035Vc * fz + 0.0030Vc * ap + 18.2 fz * ap \quad (5)$$

3.2 Multiple responses optimization

To minimize the roughness response Ra and Rz with the use of each tool tested in the experiment, the numerical optimization of the response surface model was applied. The optimal parameters for each RSM condition are described in Tab. 5 and shown in Fig. 4 (a-d). Response surface optimization is an ideal technique for determining the combination of cutting parameters (Berkani et al., 2015b).

Table 5. Optimization of cutting parameters to minimize roughness.

Tool	Parameters	Goal	Optimum condition			Lower	Upper	Pred. Resp.	Desirability
			Vc, (m/min)	fz, (mm/tooth)	ap, (mm)				
WC - Co	Ra, (μm)	Min.	120	0.10	1.00	1.09	2.77	1.09	0.99
	Rz, (μm)	Min.	200	0.16	1.00	5.91	17.5	5.91	1.00
PVD	Ra, (μm)	Min.	200	0.10	1.80	0.86	2.54	0.86	0.99
TiAlN	Rz, (μm)	Min.	200	0.12	1.00	4.82	13.8	3.94	1.00

For the WC - Co cemented carbide tool the input factors were set at: $Vc = 120$ m/min, $fz = 0.10$ mm/tooth and $ap = 1.00$ mm for an expected response of $Ra = 1.09 \mu m$; for Rz, the numerical optimization showed: $Vc = 200$ m/min, $fz = 0.16$ mm/tooth, $ap = 1.00$ mm and $Rz = 5.91 \mu m$. In the analysis of the data collected with the tool with WC - Co substrate and TiAlN coating the results were: $Vc = 200$ m/min, $fz = 0.10$ mm/tooth, $ap = 1.80$ mm with roughness prediction $Ra = 0.86 \mu m$; and roughness Rz with the optimal parameters of $Vc = 200$ m/min, $fz = 0.12$ mm/tooth, $ap = 1.00$ mm for the prediction of $Rz = 3.94 \mu m$.

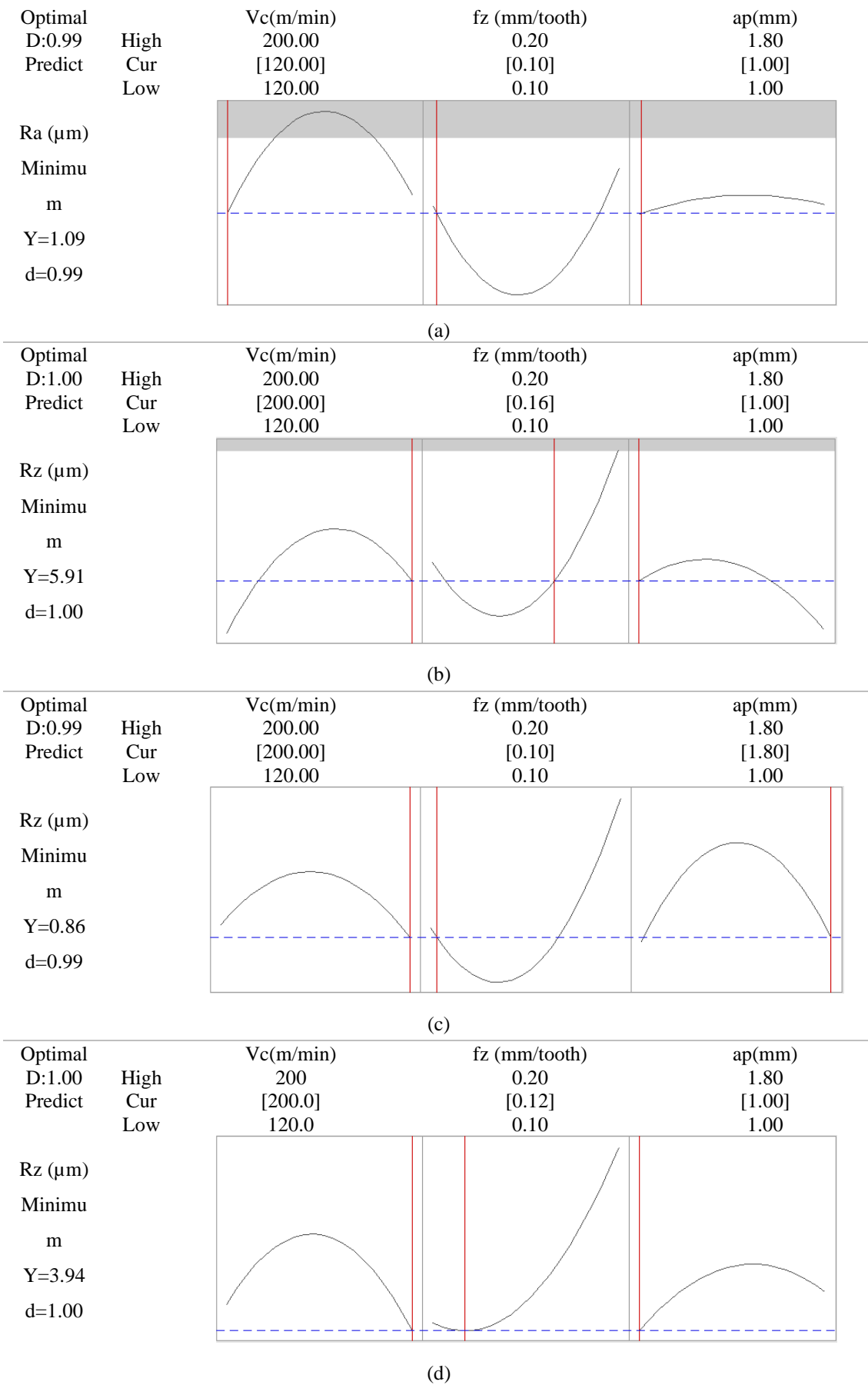


Figure 4. Graph of optimization of cutting parameters to minimize roughness.

To verify the numerical solution, a sequence of three experimental milling tests was performed for each analyzed response using the two cutting tools. The tests followed the guidelines of analytical optimization. Table 6 shows the comparison between the roughness responses predicted and the experimental results obtained, indicating the percentage error in each test.

Table 6. Confirmation tests.

Tool	Parameters	Predicted response (μm)	Experimental (μm)	Error %
WC - Co	Ra	1.09	1.16	6.42
			1.12	2.75
			1.11	1.83
	Rz	5.91	6.18	4.56
			5.78	2.19
			6.08	2.87
PVD TiAlN	Ra	0.86	0.87	1.16
			0.85	1.16
			0.88	2.32
	Rz	3.94	3.91	0.76
			4.02	2.03
			3.92	0.51

In the milling with the WC - Co tool, the answers found in the confirmation tests of the optimization of the minimum roughness presented a variation in Ra from 1.83% to 6.42%, between the predicted response and the value measured in the rugosimeter. In Rz, this percentage error ranged from 2.19% to 4.56%. For the tool coated with TiAlN PVD, the percent errors were 1.16% to 2.32% in Ra and 0.76% to 2.03% in Rz. The values found indicated that the adopted optimization model was acceptable, and correctly describes the machining process developed.

4. CONCLUSION

Statistical planning tools, Design of Experiments (DOE) and analysis of variance, ANOVA, were fundamental to obtain concrete and tangible results on the linear, quadratic and interaction effects of the cutting parameters on the roughness evolution Ra e Rz of the milled surface.

For the uncoated cutting tools, the parameter fz^2 (quadratic, 30.03%) was the most influent in the roughness response Ra, and the parameter fz (linear, 28.47%) was the most significant for roughness Rz. For the tools with TiAlN coating, the interaction between the parameters Vc and fz, caused a greater influence on the roughness response Ra, 20.92% and Rz, 35.40%. The ap cutting depth variation moderately influenced the roughness responses during all the tests.

The use of TiAlN coated tools, compared to the uncoated specification used in the experiment, caused the lowest roughness indexes.

The mathematical model able to describe the behavior of the roughness according to the investigated parameters was developed. Numerical optimization has been proven through verification tests.

The study of roughness behavior in milling processes, applying the appropriate methodology, can contribute immensely to the increase of productivity in the companies and the quality of the products.

5. ACKNOWLEDGEMENTS

Carneiro, J.R.G., and the authors would like to thank the financial support of grant n° 2016/308964-0, Brazil Conselho Nacional de Pesquisa CNPq and CAPES.

6. REFERENCES

- Arbizu, I. P., Pérez, C. J. L., 2003. "Surface roughness prediction by factorial design of experiments in turning processes". *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 143-144, pp. 390-396.
- Asilturk, I., Neseli, S., 2012. "Multi response optimization of CNC turning parameters via Taguchi method-based response surface analysis". *Measurement*, Vol. 45, pp. 785-794.
- Askeland, D., Wright, W. J., 2014. *Ciência e engenharia dos materiais*. Cengage Learning, São Paulo.
- Berkani, S., Yallese, M. A., Boulanouar, L., Mabrouki, T., 2015. "Statistical analysis of AISI 304 austenitic stainless steel machining using Ti(C, N)/Al₂O₃/TiN CVD coated carbide tool". *International Journal of Industrial Engineering Computations*, Vol. 6, pp. 539-552.
- Das, B., Roy, S., Rai, R. N., Saha, S. C., 2016. "Application of grey fuzzy logic for the optimization of CNC milling parameters for Al-4.5%Cu-TiC MMCs with multi-performance characteristics". *Engineering Science and Technology, an International Journal*, Vol. 19, No. 2, pp. 857-865.
- Do, T. V., Hsu, Q. C., 2016. "Optimization of Minimum Quantity Lubricant Conditions and Cutting Parameters in Hard Milling of AISI H13 Steel". *Applied Sciences*. Vol 6, 83.
- Ferraresi, D., 2011. *Usinagem dos Metais: fundamentos da usinagem dos metais*. Edgar Blucher, São Paulo.
- Ghevariya, C.M., Bhatt J. K., Dave B.P., 2011 "Enhanced chrysenone degradation by halotolerant *Achromobacter xylosoxidans* using Response Surface Methodology". *Bioresource Technology*, Vol. 102: 9668-9674.
- Hintze, W., Steinbach, S., Susemihl, C., Kahler, F., 2018. "HPC-milling of WC-Co cemented carbides with PCD". *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, Vol. 72, pp.126-134.
- Kazlauskas, D., Jankauskas, V., Bendikiene, R., Keturakis, G., Macenaite, L., 2017. "Wear of cemented tungsten carbide (WC) router cutters during oak wood milling". *Mechanika*, Vol. 23, pp. 469-472.
- Makadia, A. J., Nanavati, J. I., 2013. "Optimisation of machining parameters for turning operations based on response surface methodology". *Measurement*, Vol. 46, pp.1521-1529.
- Montgomery, D. C., Runger, G.C., 2007. *Applied statistics and probability for engineers*. Hoboken, NJ, Wiley.
- Moussa, N. B., Sidhom, H., Braham, C., 2012. "Numerical and experimental analysis of residual stress and plastic strain distributions in machined stainless steel". *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 64, No 1, pp. 82-93.
- Razavykia, A., Farahany, S., Yusof, N. M., 2015. "Evaluation of cutting force and surface roughness in the dry turning of Al-Mg₂Si in-situ metal matrix composite inoculated with bismuth using DOE approach". *Measurement*, Vol. 76, pp. 170-182.
- Rodrigues, A. R., Matsumoto, H., Yamakami, W. J., Paulo, R. G. da R., Assis, C. L. F., 2010. "Effects of milling condition on the surface integrity of hot forged steel". *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, Vol. 32, No.1, pp. 37-43.
- Sarnobat, S. S., Raval, H. K., 2019. "Experimental investigation and analysis of the influence of tool edge geometry and work piece hardness on surface residual stresses, surface roughness and work-hardening in hard turning of AISI D2 steel". *Measurement*, Vol. 131, pp. 235-260.
- Tanikić, D., & Marinković, V., 2012. "Modelling and optimization of the surface roughness in the dry turning of the cold rolled alloyed steel using regression analysis". *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, Vol. 34, No. 1, pp. 41-48.

7. RESPONSIBILITY NOTICE

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper.