

**RAPHAEL AUGUSTO DE OLIVEIRA SANTOS**

**Estudo da aplicabilidade de ferramentas cerâmicas experimentais na usinagem por  
torneamento da superliga VAT 80A®**

Guaratinguetá - SP  
2021

**Raphael Augusto de Oliveira Santos**

**Estudo da aplicabilidade de ferramentas cerâmicas experimentais na usinagem por torneamento da superliga VAT 80A®**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica na área de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Marcos Valério Ribeiro  
Coorientador: Prof. Dr. Manoel Cleber de Sampaio Alves

Guaratinguetá - SP  
2021

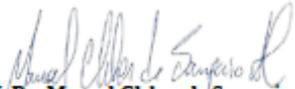
S237e	<p>Santos, Raphael Augusto de Oliveira</p> <p>Estudo da aplicabilidade de ferramentas cerâmicas experimentais na usinagem por torneamento da superliga VAT 80A® / Raphael Augusto de Oliveira Santos – Guaratinguetá, 2021.</p> <p>137 : il.</p> <p>Bibliografia: f. 132-137</p> <p>Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2021.</p> <p>Orientador: Prof. Dr. Marcos Valério Ribeiro</p> <p>Coorientador: Prof. Dr. Manoel Cleber de Sampaio Alves</p> <p>1. Ligas resistentes ao calor. 2. Usinagem. 3. Desgaste mecânico.</p> <p>I. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDU 669.715(043)</p>
-------	--

RAPHAEL AUGUSTO OLIVEIRA SANTOS

ESTA TESE FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
“MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA”

PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA  
CURSO: MESTRADO

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

  
Prof. Dr. Manoel Cleber de Sampaio Alves  
Coordenador

**BANCA EXAMINADORA:**

  
PROF. DR. MARCOS VALÉRIO RIBEIRO  
Orientador / UNESP/FEG  
participou por videoconferência

  
PROF. DR. JOSÉ VITOR CÂNDIDO DE SOUZA  
UNESP/FEG  
participou por videoconferência

  
PROF. DR. ALESSANDRO ROGER RODRIGUES  
DEM/USP  
participou por videoconferência

## **DADOS CURRICULARES**

### **RAPHAEL AUGUSTO DE OLIVEIRA SANTOS**

<b>NASCIMENTO</b>	02.02.1992 – Guaratinguetá / SP
<b>FILIAÇÃO</b>	Alomir dos Santos Miriam Aparecida de Oliveira Santos
<b>2010/2018</b>	Curso de Graduação – Engenharia Mecânica Universidade Estadual Paulista – “Júlio de Mesquita Filho”
<b>2019/2021</b>	Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, nível de Mestrado Universidade Estadual Paulista – “Júlio de Mesquita Filho”

dedico este trabalho à minha família

## **AGRADECIMENTOS**

Ao meu orientador, Prof. Dr. Marcos Valério Ribeiro que jamais deixou de me incentivar. Sem a sua orientação, dedicação e auxílio, o estudo aqui apresentado seria praticamente impossível.

ao meu coorientador Prof. Dr. Manoel Cléber Sampaio Alves que me ajudou nas análises e na preparação dos ensaios

ao professor Prof. Dr. José Vitor Candido de Souza FEG/UNESP por toda ajuda e auxílio técnico

aos meus pais Alomir e Miriam, que apesar das dificuldades enfrentadas, sempre incentivaram meus estudos.

às funcionárias da Biblioteca do Campus de Guaratinguetá pela dedicação, presteza e principalmente pela vontade de ajudar,

aos funcionários da Faculdade de Engenharia do Campos de Guaratinguetá pela dedicação e alegria no atendimento.

à Villares Metals, em especial Dr. Alexandre Belegard Farina, pela doação dos materiais desta pesquisa,

à SECO Tools, em especial ao MSc. Fábio Ricardo da Silva, pela doação dos suportes,

ao CNPq pela bolsa concedida

à FAPESP pelo apoio financeiro ao Grupo de Pesquisa

O presente trabalho foi realizado com apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – (CNPq) – código do financiamento 130133/2020-5.

“It has always seemed to me that my existence consisted purely and exclusively of nothing but the most outrageous nonsense.”

Thomas Ligotti,

## RESUMO

As superligas têm sua aplicação nos mais diversos ramos da indústria automotiva, aeronáutica e nuclear. Devido as suas propriedades mecânicas elevadas seu processo de usinagem é de interesse de vários pesquisadores. O objetivo deste trabalho é o estudo da usinagem de torneamento da superliga VAT 80A<sup>®</sup> utilizando ferramentas cerâmicas experimentais de alumina-magnésio e alumina-cromo. Para o planejamento experimental empregou-se a metodologia da superfície de resposta utilizando um modelo de segunda ordem para os experimentos com a ferramenta experimental de alumina-magnésio e um modelo de primeira ordem para a ferramenta experimental de alumina-cromo. As variáveis de entrada foram velocidade de corte, avanço e profundidade de corte e as variáveis de saída foram a potência de corte, vibração, rugosidade  $R_a$  e  $R_t$ , emissão acústica e desgaste de flanco. Realizou-se, também, a análise dos desgastes para determinar os tipos e mecanismos atuantes durante o processo de torneamento e a análise dos cavacos gerados. Para a ferramenta de alumina-magnésio determinou-se as regiões que produzem as menores respostas para cada variável de saída enquanto para a ferramenta experimental de alumina-cromo observou-se que as melhores condições ocorrem quando na combinação de parâmetros os parâmetros ótimos são  $V_C = 400$  m/min,  $f = 0,9$  mm/rev e  $a_p = 0,09$  mm. Observou-se que o mecanismo principal de desgaste ocorrido nas ferramentas durante os ensaios foi o do tipo abrasivo e adesivo, e os tipos de desgastes mais presentes foram o desgaste de flanco e a formação de uma aresta postiça de corte prejudicando a qualidade superficial da peça. Os cavacos formados durante o processo de usinagem podem ser classificados como cavacos de cisalhamento helicoidais, para menores valores de avanço e profundidade de corte, e cavacos de cisalhamento curto para valores intermediários e altos de avanço e profundidade de corte. Desta forma, pode-se afirmar que existe um grande potencial de aplicação das ferramentas cerâmicas experimentais na usinagem da superliga VAT 80A<sup>®</sup>.

**PALAVRAS-CHAVE:** Metodologia da superfície de resposta. Desgaste. Rugosidade. Monitoramento. Potência.

## ABSTRACT

Superalloys have their application in the most diverse branches of the automotive, aeronautics and nuclear industries. Due to its high mechanical properties its machining process is of interest to several researchers. The objective of this work is the study of the turning machining of the superalloy VAT 80A<sup>®</sup> using experimental ceramic tools of alumina-magnesium and alumina-chromium. For experimental planning, the response surface methodology was used using a second-order model for the experiments with the alumina-magnesium experimental tool and a first-order model for the experimental alumina-chromium tool. The input variables were cutting speed, feed, and depth of cut and the output variables were cutting power, vibration, roughness  $R_a$  and  $R_t$ , acoustic emission and flank wear. The wear analysis was also performed to determine the types and mechanisms that took place during the turning process and the analysis of the chips generated. For the alumina-magnesium tool, the regions that produce the lowest responses for each output variable were determined, and for the experimental alumina-chromium tool it was observed that the best conditions occur when in the combination of parameters the optimal parameters are  $V_C = 400$  m/min,  $f = 0.9$  mm/rev and  $a_p = 0.09$  mm. It was observed that the main wear mechanism occurred in the tools during the tests was the abrasive and adhesive type, and the most present types of wear were flank wear and the formation of a built-up edge impairing the surface quality of the part. Chips formed during the machining process can be classified as helical shear chips, for lower feed and depth of cut values, and short shear chips for intermediate and high feed and depth of cut values. Thus, it can be affirmed that there is a great potential for application of experimental ceramic tools in the machining of the VAT 80A<sup>®</sup>.

**KEYWORDS:** Response surface methodology. Wear. Roughness. Monitoring. Power.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Materiais utilizados para fabricação de motor a jato. ....	25
Figura 2 - Efeito do tempo e temperatura na dureza da superliga Nimonic 80A. ....	30
Figura 3 - Caracterização metalográfica por microscopia ótica da superliga VAT 80A com ataque com reagente glicerégia e solubilizada a 1.120°C por 30 min (ar) e envelhecida a 700°C por 16 h. ....	31
Figura 4 - Efeito dos carbeto presentes na microestrutura. ....	32
Figura 5 - Forças resultantes da ação da peça sobre a ferramenta de usinagem. ....	35
Figura 6 - Parâmetros de rugosidade $R_a$ e $R_t$ no comprimento L. ....	39
Figura 7 - Variáveis experimentais envolvidas na análise dos cavacos. ....	42
Figura 8 - Corte ortogonal e parâmetros de corte na formação de cavacos do tipo contínuo. ....	44
Figura 9 - Formato do cavaco durante o torneamento da superliga Inconel 718. ....	44
Figura 10 - Classificação da forma dos cavacos. ....	45
Figura 11- Principais áreas de desgaste de uma ferramenta de corte ....	46
Figura 12 - Parâmetros utilizados para medir os desgastes das ferramentas de corte. ....	47
Figura 13 - Comportamento do desgaste de uma ferramenta de corte com o tempo de corte. ....	48
Figura 14 - Mecanismos de desgaste em ferramentas em função da temperatura. ....	49
Figura 15 - Diagrama esquemático do mecanismo desgaste tipo abrasão. ....	50
Figura 16 - Desgaste de flanco. ....	52
Figura 17 - Desgaste de cratera. ....	52
Figura 18 - Desgaste do tipo entalhe. ....	53
Figura 19 - Diagrama esquemático de propagação das trincas em uma ferramenta de corte. ....	54
Figura 20 - Desgaste do tipo lascamento. ....	55
Figura 21 - Desgaste do tipo deformação plástica. ....	55
Figura 22 – Aresta postiça de corte. ....	56
Figura 23 - Quebra de uma ferramenta cerâmica. ....	57
Figura 24 - Classificação das cerâmicas industriais. ....	58
Figura 25- Etapas de aplicação do método de superfície de resposta. ....	62
Figura 26 - Representação esquemática de um planejamento do tipo Composto Central. ....	64
Figura 27 - Representação dos tipos de superfície de resposta. ....	67
Figura 28 – Corpo de prova utilizado no trabalho com $\varnothing 86 \times 226 \text{ mm}^2$ . ....	68
Figura 29 - Centro de torneamento CNC ROMI GL 240M ....	69
Figura 30 - Tela do programa supervisorio. ....	70

Figura 31 – Transformador de potência LEM modelo AT-100 conectado a uma das fases do	71
Figura 32 - Posicionamento dos sensores de vibração e emissão acústica no centro de torneamento. ....	72
Figura 33 - Curva de potência de um ensaio obtida pela rotina criada no software MATLAB® R2015b. ....	73
Figura 34 - Gráfico gerado pelo algoritmo para tratamento de dados feito pelo software MATLAB. ....	74
Figura 35- Processo de confecção das ferramentas experimentais cerâmicas.....	78
Figura 36- Desenho esquemático das dimensões da ferramenta cerâmica.....	79
Figura 37– Ferramenta cerâmica de a)Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + MgO b) Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....	80
Figura 38– Microestrutura da pastilha cerâmica experimental de composição alumina-magnésio.....	80
Figura 39– Microestrutura da pastilha cerâmica experimental de composição alumina-cromo. ....	81
Figura 40 - Análise dos efeitos principais para potência de corte utilizando ferramenta alumina-magnésio.....	88
Figura 41 – Superfície de resposta para potência de corte utilizando ferramenta de alumina-magnésio.....	89
Figura 42 – Gráfico de contorno para potência de corte utilizando ferramenta de alumina-magnésio.....	90
Figura 43 - Análise dos efeitos principais para vibração utilizando ferramenta de alumina-magnésio.....	92
Figura 44- Análise das interações para vibração utilizando ferramenta de alumina-magnésio. ....	93
Figura 45 - Superfície de resposta para vibração utilizando ferramenta de alumina-magnésio. ....	94
Figura 46 - Gráfico de contorno para vibração utilizando ferramenta de alumina-magnésio..	94
Figura 47 - Análise dos efeitos principais para rugosidade R <sub>a</sub> utilizando ferramenta de alumina-magnésio.....	97
Figura 48 - Superfície de resposta para Rugosidade Ra utilizando ferramenta de alumina-magnésio.....	98
Figura 49 - Gráfico de contorno para rugosidade R <sub>a</sub> utilizando ferramenta de alumina-magnésio. ....	98

Figura 50 - Análise dos efeitos principais para rugosidade $R_t$ utilizando ferramenta de alumina-magnésio.....	100
Figura 51 - Superfície de resposta para Rugosidade $R_t$ utilizando ferramenta de alumina-magnésio.....	101
Figura 52 - Gráfico de contorno para rugosidade $R_t$ utilizando ferramenta de alumina-magnésio. ....	102
Figura 53 - Análise dos efeitos principais para $V_b/L_c$ utilizando ferramenta de alumina-magnésio.....	106
Figura 54 - Superfície de resposta para $V_b/L_c$ utilizando ferramenta de alumina-magnésio..	107
Figura 55 - Gráfico de contorno para $V_b/L_c$ utilizando ferramenta de alumina-magnésio...	107
Figura 56 - Análise dos efeitos principais para potência de corte utilizando ferramenta de alumina-cromo.....	109
Figura 57 - Superfície de resposta para potência de corte utilizando ferramenta de alumina-cromo. ....	110
Figura 58 - Gráfico de contorno para potência de corte utilizando ferramenta de alumina-cromo. ....	110
Figura 59 - Análise dos efeitos principais para vibração utilizando ferramenta de alumina-cromo.....	112
Figura 60 - Superfície de resposta para valores de vibração utilizando ferramenta de alumina-cromo.....	113
Figura 61 - Gráfico de contorno para vibração utilizando ferramenta de alumina-cromo. ....	113
Figura 62 - Análise dos efeitos principais para rugosidade $R_a$ utilizando ferramenta de alumina-cromo.....	115
Figura 63 - Superfície de resposta para rugosidade $R_a$ utilizando ferramenta de alumina-cromo. ....	116
Figura 64 - Gráfico de contorno para rugosidade $R_a$ utilizando ferramenta de alumina-cromo. ....	116
Figura 65 - Análise dos efeitos principais para rugosidade $R_t$ utilizando ferramenta de alumina-cromo.....	118
Figura 66 - Superfície de resposta para valores de rugosidade $R_t$ utilizando ferramenta de alumina-cromo.....	119
Figura 67 – Gráfico de contorno para rugosidade $R_t$ utilizando ferramenta de alumina-cromo. ....	119

Figura 68 - Análise dos efeitos principais para emissão acústica utilizando ferramenta de alumina-cromo.....	121
Figura 69 - Análise das interações para emissão acústica utilizando ferramenta de alumina-cromo.....	121
Figura 70 - Superfície de resposta para valores de rugosidade $R_t$ utilizando ferramenta experimental a base de $Al_2O_3 + Cr_2O_3$ .....	122
Figura 71 - Gráfico de contorno para emissão acústica utilizando ferramenta experimental a base de $Al_2O_3 + Cr_2O_3$ .....	123
Figura 72 - Análise dos efeitos principais para $VB/L_c$ utilizando ferramenta de alumina-cromo. ....	124
Figura 73 - Análise das interações para $VB/L_c$ utilizando ferramenta de alumina-cromo. ...	125
Figura 74 - Superfície de resposta para valores de $V_b/L_c$ utilizando ferramenta de alumina-cromo.....	126
Figura 75 – Gráfico de contorno para rugosidade $R_t$ utilizando ferramenta de alumina-cromo. ....	126
Figura 76 - Desgaste de flanco para $V_c = 300$ m/min. $f = 0,15$ mm/rev e $a_p = 0,15$ mm.....	127
Figura 77 - Desgaste de flanco para $V_c = 400$ m/min. $f = 0,15$ mm/rev e $a_p = 0,15$ mm.....	128
Figura 78 - Desgaste de flanco para $V_C = 350$ m/min, $f = 0,09$ mm/rev e $a_p = 0,23$ mm. ....	128
Figura 79 - Desgaste de flanco para $V_C = 350$ m/min, $f = 0,36$ mm/rev e $a_p = 0,23$ mm.....	129
Figura 80 - Desgaste de flanco para $V_C = 350$ m/min, $f = 0,23$ mm/rev e $a_p = 0,09$ mm. ....	129
Figura 81 - Desgaste de flanco para $V_C = 350$ m/min, $f = 0,23$ mm/rev e $a_p = 0,36$ mm. ....	130
Figura 82 - Desgaste de flanco para $V_C = 350$ m/min, $f = 0,23$ mm/rev e $a_p = 0,23$ mm. ....	130
Figura 83 - Desgaste de flanco para $V_c = 300$ m/min. $f = 0,10$ mm/rev e $a_p = 0,10$ mm.....	131
Figura 85 - Desgaste de flanco para $V_c = 300$ m/min. $f = 0,30$ mm/rev e $a_p = 0,10$ mm.....	132
Figura 85 - Desgaste de flanco para $V_c = 400$ m/min. $f = 0,10$ mm/rev e $a_p = 0,10$ mm (ampliação 3x).....	133
Figura 87 - Desgaste de flanco para $V_c = 400$ m/min. $f = 0,10$ mm/rev e $a_p = 0,30$ mm (ampliação 3x).....	133
Figura 88 - Desgaste de flanco para $V_c = 300$ m/min. $f = 0,30$ mm/rev e $a_p = 0,30$ mm.....	134
Figura 88 – Cavacos produzidos para $f = 0,15$ mm/rev, $a_p = 0,15$ mm e a) $V_C = 300$ m/min e b) $V_C = 400$ m/min.....	135
Figura 89 – Cavacos produzidos para $V_C = 400$ m/min, $f = 0,30$ mm/rev, e a) $a_p = 0,15$ mm e b) $a_p = 0,30$ mm.....	136

Figura 90 – Cavacos produzidos para $V_C = 350$ m/min, $a_p = 0,23$ mm e a) $f = 0,09$ mm/rev e b) $f = 0,36$ mm/ver. ....	136
Figura 91 – Cavacos produzidos para $V_C = 350$ m/min, $f = 0,23$ mm/rev $a_p = 0,09$ mm. ....	137
Figura 92 – Cavacos produzidos para $V_C = 350$ m/min, $f = 0,23$ mm/rev $a_p = 0,23$ mm. ....	138
Figura 93 – Cavacos produzidos para $f = 0,10$ mm/rev, $a_p = 0,1$ mm e a) $V_C = 300$ m/min e b) $V_C = 400$ m/min. ....	138
Figura 94 – Cavacos produzidos para $f = 0,10$ mm/rev, $a_p = 0,30$ mm e a) $V_C = 300$ m/min e b) $V_C = 400$ m/min. ....	139
Figura 95 – Cavacos produzidos para $f = 0,30$ mm/rev e e $a_p = 0,30$ mm a) $V_C = 300$ m/min e b) $V_C = 400$ m/min. ....	139

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Análise química da Alumina CT3000 LS SG. Valores em %.....	77
Tabela 2 - Propriedades da Alumina CT3000 LS SG. ....	78
Tabela 3 – Propriedades das ferramentas cerâmicas experimentais.....	79
Tabela 4 - Níveis dos fatores para o experimento composto central.....	83
Tabela 5 - Combinação dos fatores utilizados no experimento para ferramenta alumina-magnésio.....	84
Tabela 6 - Fatores e seus níveis para ferramenta de alumina-cromo.....	85
Tabela 7 - Combinação dos fatores utilizados no experimento para ferramenta alumina-cromo. ....	85
Tabela 8 - Análise de variância (ANOVA) para potência de corte utilizando ferramenta de alumina-magnésio.....	86
Tabela 9 – Resumo dos fatores da análise de variância (ANOVA) para potência de corte utilizando ferramenta de alumina-magnésio.....	87
Tabela 10 - Análise de variância (ANOVA) para vibração utilizando ferramenta de alumina-magnésio.....	91
Tabela 11 - Resumo dos fatores da análise de variância (ANOVA) para vibração utilizando ferramenta de alumina-magnésio.....	91
Tabela 12 - Análise de variância (ANOVA) para rugosidade $R_a$ utilizando ferramenta de alumina-magnésio.....	95
Tabela 13 - Resumo dos fatores da análise de variância (ANOVA) para rugosidade $R_a$ utilizando ferramenta de alumina-magnésio.....	96
Tabela 14 - Análise de variância (ANOVA) para rugosidade $R_t$ utilizando ferramenta de alumina-magnésio.....	99
Tabela 15 - Resumo dos fatores da análise de variância (ANOVA) para rugosidade $R_t$ utilizando ferramenta de alumina-magnésio.....	99
Tabela 16 - Análise de variância (ANOVA) para emissão acústica utilizando ferramenta de alumina-magnésio.....	103
Tabela 17 - Resumo dos fatores da análise de variância (ANOVA) para emissão acústica utilizando ferramenta de alumina-magnésio.....	103
Tabela 18 - Análise de variância (ANOVA) para $V_b/L_c$ utilizando ferramenta de alumina-magnésio.....	104

Tabela 19 - Resumo dos fatores da análise de variância (ANOVA) para $V_b/L_c$ utilizando ferramenta de alumina-magnésio.....	105
Tabela 20 - Análise de variância (ANOVA) para potência de corte utilizando ferramenta de alumina-cromo.....	108
Tabela 21 - Análise de variância (ANOVA) para vibração utilizando ferramenta de alumina-cromo.....	111
Tabela 22 - Análise de variância (ANOVA) para rugosidade $R_a$ utilizando ferramenta de alumina-cromo.....	114
Tabela 23 - Análise de variância (ANOVA) para rugosidade $R_t$ utilizando ferramenta de alumina-cromo.....	117
Tabela 24 - Análise de variância (ANOVA) para emissão acústica utilizando ferramenta de alumina-cromo.....	120
Tabela 25 - Análise de variância (ANOVA) para $V_B/L_c$ utilizando ferramenta de alumina-cromo.....	123
Tabela 26- Resumo dos resultados da análise de variância para ferramenta de alumina-magnésio.....	140
Tabela 27- Nível dos parâmetros de entrada que minimizam as respostas para ferramenta de alumina-cromo.....	141
Tabela 28- Resumo dos resultados da análise de variância para ferramenta de alumina-magnésio.....	141
Tabela 29- Nível dos parâmetros de entrada que minimizam as respostas para ferramenta de alumina-cromo.....	142

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Composição química nominal das principais superligas comerciais. ....	27
Quadro 2 -Composição química nominal da superliga VAT 80A®. ....	29
Quadro 3 – Propriedades mecânicas da superliga Nimonic 80A .....	29
Quadro 4 – Propriedades mecânicas da superliga VAT 80A® .....	30
Quadro 5 - Comprimentos de amostragem e de avaliação para medição de rugosidade de acordo com a norma NBR ISO 4288:2008. ....	40
Quadro 6 - Comprimentos de amostragem e de avaliação para medição de rugosidade de perfis periódicos e Rz de perfis periódicos e não periódicos.....	41
Quadro 7 - Propriedades mecânicas e físicas das cerâmicas industriais. ....	58

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação brasileira de normas técnicas
ANOM	Análise de média
ANOVA	Análise de variância
ASTM	“ <i>American Society for Testing and Materials</i> ” – Sociedade Americana para Testes e Materiais
APC	Aresta postiça de corte
DIN	“ <i>Deutsches Institut für Normung</i> ” – Instituto Alemão de Padronizações
DOE	“ <i>Design of experiment</i> ” – Projeto de experimento
GL	Grau de liberdade
ISO	“ <i>International Organization for Standardization</i> ” - Organização Internacional de Normalização
MEV	Microscópio eletrônico de varredura
MSR	Metodologia da Superfície de Resposta
NBR	Norma brasileira registrada
SAE	“ <i>Society of Automotive Engineers</i> ” – Sociedade de Engenheiros Automotivos
SQ Adj	Soma dos quadrados ajustados
SQ Seq	Soma dos quadrados sequenciais
UNS	“ <i>Unified numbering system</i> ”- Sistema de Numeração Unificado
ZTA	“Zirconia Toughened Alumina” – Alumina tenacificada com zircônia

## LISTA DE SÍMBOLOS

$P_c$	Potência de corte (W)
$a_p$	Profundidade de corte (mm)
$V_c$	Velocidade de corte (m/min)
$f$	Avanço (mm/rev)
$\gamma$	Ângulo de saída ( $^\circ$ )
$\varphi_s$	Ângulo de cisalhamento
$\alpha$	Angulo de folga
$l_c$	Comprimento de contato entre ferramenta-cavaco
$r_\epsilon$	Raio de ponta (mm)
EA	Emissão acústica
$EA_{RMS}$	Valor médio quadrático de emissão acústica
$\Delta t$	Variação do tempo (s)
$R_a$	Rugosidade aritmética média ( $\mu\text{m}$ )
$R_t$	Rugosidade total do perfil ( $\mu\text{m}$ )
$L_c$	Comprimento de usinagem (mm)
$L_f$	Comprimento de avanço (mm)
$V_b$	Desgaste de flanco (mm)
Vib	Sinal da vibração (mm/s)
$U_{cc}$	Sinal de tensão do sensor (V)
D	Diâmetro da peça (mm)
N	Número de experimentos
$C_p$	Número de pontos centrais
K	Número de fatores
$t_c$	Espessura do cavaco deformado (mm)
$t_l$	Espessura do cavaco não deformado (mm)
$w_c$	Largura do cavaco (mm)

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>23</b>
1.1	OBJETIVOS GERAIS .....	24
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	24
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>25</b>
2.1	SUPERLIGAS .....	25
<b>2.1.1</b>	<b>Superligas a base de níquel</b> .....	<b>27</b>
<b>2.1.2</b>	<b>Superliga VAT 80A®</b> .....	<b>29</b>
<b>2.1.3</b>	<b>Usinagem de superligas</b> .....	<b>31</b>
2.2	MEDIÇÃO DOS PARÂMETROS DE USINAGEM .....	35
<b>2.2.1</b>	<b>Potência</b> .....	<b>35</b>
<b>2.2.2</b>	<b>Vibração</b> .....	<b>36</b>
<b>2.2.3</b>	<b>Emissão acústica (EA)</b> .....	<b>37</b>
<b>2.2.4</b>	<b>Rugosidade</b> .....	<b>38</b>
2.3	MECANISMOS DE FORMAÇÃO DO CAVACO .....	41
<b>2.3.1</b>	<b>Formação do Cavaco</b> .....	<b>42</b>
<b>2.3.2</b>	<b>Classificação dos cavacos</b> .....	<b>43</b>
2.4	DESGASTE E AVARIAS EM FERRAMENTAS DE CORTE .....	45
<b>2.4.1</b>	<b>Mecanismos de desgaste</b> .....	<b>48</b>
2.4.2.1	Adesão .....	49
2.4.2.2	Abrasão .....	49
2.4.2.3	Difusão .....	50
2.4.2.4	Oxidação .....	51
<b>2.4.2</b>	<b>Tipos de desgaste</b> .....	<b>51</b>
2.4.2.1	Desgaste de flanco ( $V_B$ ) .....	51
2.4.2.2	Desgaste de cratera ( $K_T$ ) .....	52
2.4.2.3	Desgaste tipo entalhe .....	53
2.4.2.4	Trincas .....	53
2.4.2.5	Lascamento .....	54
2.4.2.6	Deformação plástica .....	55

2.4.2.7 Quebra da ferramenta .....	56
2.5 MATERIAIS CERÂMICOS .....	57
2.5.1 Alumina ( $Al_2O_3$ ).....	59
2.6 METODOLOGIA DA SUPERFÍCIE DE RESPOSTA .....	60
2.6.1 Modelos de primeira ordem.....	62
2.6.2 Modelos de segunda ordem.....	63
2.6.3 Delineamento de composto central .....	63
2.6.4 Blocos .....	65
2.6.5 Determinação das condições de ótimo .....	65
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>68</b>
3.1 CORPO DE PROVA.....	68
3.2 EQUIPAMENTOS PARA OS ENSAIOS DE TORNEAMENTO E AQUISIÇÃO DE DADOS .....	69
3.3 TRATAMENTO DE DADOS .....	72
3.4 MEDIÇÃO DE RUGOSIDADE .....	74
3.5 MEDIÇÃO DOS DESGASTES DAS FERRAMENTAS .....	75
3.6 ANÁLISE DOS CAVACOS GERADOS DURANTE O PROCESSO DE TORNEAMENTO.....	75
3.7 FERRAMENTAS E PORTA-FERRAMENTAS.....	75
3.8 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL E ANÁLISE DE DADOS .....	81
3.8.1 Ferramenta alumina-magnésio .....	83
3.8.2 Ferramenta alumina-cromo .....	85
<b>4 RESULTADOS .....</b>	<b>86</b>
4.1 FERRAMENTA ALUMINA-MAGNÉSIO.....	86
4.1.1 Análise de potência.....	86
4.1.2 Análise de vibração .....	91
4.1.3 Análise rugosidade $R_a$ e $R_t$ .....	95
4.1.4 Análise de emissão acústica .....	102
4.1.5 Análise de desgaste de flanco ( $V_b$ )/ percurso de corte $L_c$ .....	104

4.2	FERRAMENTA ALUMINA-CROMO .....	108
4.2.1	Análise de potência.....	108
4.2.2	Análise de vibração .....	111
4.2.3	Análise rugosidade $R_a$ e $R_t$ .....	114
4.2.4	Análise de emissão acústica .....	120
4.2.5	Análise de desgaste de flanco ( $V_b$ )/ percurso de corte $L_c$ .....	123
4.3	ANÁLISE DOS DESGASTES .....	127
4.3.1	Ferramenta alumina-magnésio .....	127
4.3.2	Ferramenta alumina-cromo .....	131
4.4	ANÁLISE DOS CAVACOS .....	135
4.4.1	Ferramenta alumina-magnésio .....	135
4.4.2	Ferramenta alumina-cromo .....	138
4.5	RESUMO DOS RESULTADOS .....	140
4.5.1	Ferramenta alumina-magnésio .....	140
4.5.2	Ferramenta alumina-cromo .....	141
5	CONCLUSÕES .....	143
5.1	RECOMENDAÇÕES PARA FUTUROS TRABALHOS.....	144
	REFERÊNCIAS .....	145

## 1 INTRODUÇÃO

A constante busca por evolução na indústria automotiva em função do avanço tecnológico tem levado ao desenvolvimento de materiais com propriedades mecânicas superiores aos já existentes. Além disto, normas automotivas como por exemplo EURO IV e V tem incentivado as montadoras a reduzir a quantidade de poluentes que os motores de combustão interna produzem. Busca-se também reduzir a potência consumida pelas máquinas-ferramentas durante o processo de usinagem conforme descrito por Pelegrino (2018).

Com o desenvolvimento de materiais com estruturas cada vez mais complexas, faz-se necessário o estudo de novos materiais para ferramentas de corte. Neste contexto destacam-se os materiais cerâmicos que combinam propriedades mecânicas, como alta dureza e resistência ao desgaste, e propriedades químicas, como alta estabilidade química.

O planejamento experimental do tipo superfície de resposta tem sido utilizado para determinar as condições de corte ideais utilizando um número reduzido de experimentos. A Metodologia da Superfície de Resposta (MSR) é um conjunto de técnicas matemáticas e estatísticas utilizadas para desenvolver, implementar e otimizar processos. O objetivo da MSR é determinar as condições operacionais ideais para o sistema ou determinar uma região do espaço do fator em que os requisitos operacionais são satisfatórios (MONTGOMERY, 1988).

## 1.1 OBJETIVOS GERAIS

O objetivo desta dissertação é avaliar o comportamento das ferramentas cerâmicas experimentais no processo de torneamento da superliga VAT 80A<sup>®</sup> aplicando o método da superfície de resposta (MSR) para ferramentas experimentais cerâmicas à base de alumina tendo como aditivos óxido de magnésio e óxido de cromo.

## 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

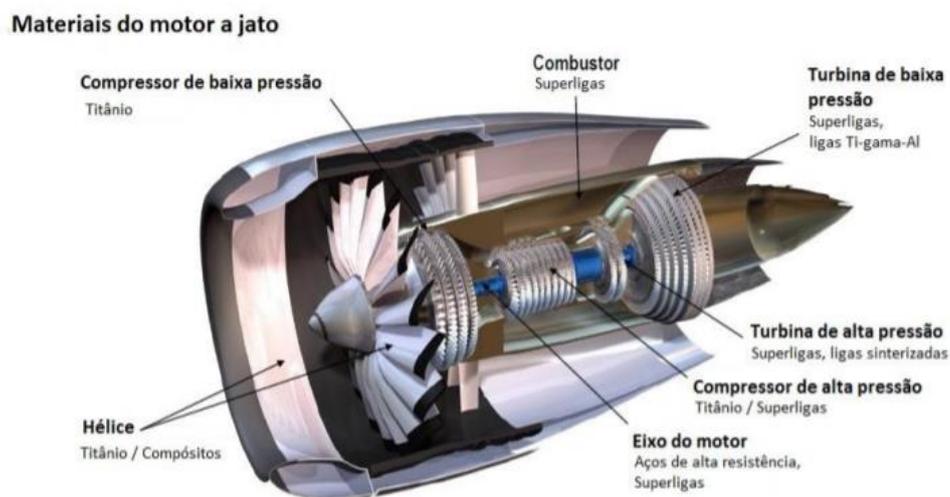
- Determinar as regiões de operabilidade que minimizem as variáveis respostas para ferramenta cerâmica experimental de alumina-magnésio utilizando um planejamento experimental do tipo superfície de resposta de segunda ordem.
- Determinar as regiões de operabilidade que minimizem as variáveis respostas para ferramenta cerâmica experimental de alumina-cromo utilizando um planejamento experimental do tipo superfície de resposta de segunda ordem.
- Analisar os desgastes e seus mecanismos gerados durante o processo de torneamento em função do comprimento de corte de cada aresta utilizada no ensaio.
- Analisar os cavacos gerados durante o processo de torneamento em função do comprimento de corte de cada aresta utilizada no ensaio.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 SUPERLIGAS

Superligas são ligas metálicas à base de níquel, ferro-níquel e cobalto produzidas para aplicações em temperaturas superiores a 540 °C. De acordo com a ASM International (2005) os usos das superligas são os mais diversos sendo comumente utilizados na fabricação de turbinas de aviões, turbinas para geradoras de energia, no processamento de metais em ferramentas de trabalho a quente, na fabricação de reatores nucleares, na indústria petroquímica e química ou em qualquer outra aplicação que exija que o material possua uma elevada resistência ou calor e/ou a corrosão. Na Figura 1 estão mostradas as aplicações das superligas em componentes de um motor a jato.

Figura 1 - Materiais utilizados para fabricação de motor a jato.



Fonte: Almeida (2017).

As superligas são classificadas, de acordo com ASM Internacional (2005), de acordo com o elemento principal em sua composição química. Elas são:

- Superligas a base de Ferro-Níquel;
- Superligas a base de Cobalto;

- Superligas a base de Níquel;

Superligas à base de Fe-Ni foram desenvolvidas a partir dos aços inoxidáveis austeníticos. O teor de Cr (10% – 25%) é balanceado para se obter resistência à oxidação e corrosão, e o teor de Ni (0% – 50%) deve ser suficiente para garantir a estabilidade da austenita às temperaturas elevadas. O uso de Nb e Ti visa evitar a formação de carbeto de cromo nos contornos de grão. Os elementos de Mo e W podem ser empregados para produzir o endurecimento por solução sólida. A densidade da maioria das superligas a base de ferro-níquel está entre 7,9 e 8,3 g/cm<sup>3</sup> (GOBBI, 2013).

Superligas a base de cobalto são endurecidas a partir de uma solução sólida na sua matriz austenítica na qual pequenas quantidades de carbeto são distribuídos. Em temperaturas abaixo de 417 °C, o cobalto se cristaliza em uma estrutura de forma hexagonal compacta, em altas temperaturas sua estrutura sofre uma transformação para cúbica de face centrada. Para evitar que isso ocorra durante o seu uso, há a adição de níquel em sua estrutura cuja função é estabilizar e manter a estrutura de cúbica de face centrada em temperaturas abaixo de 417 °C e as temperaturas de serviço. As ligas de cobalto apresentam melhor soldabilidade e resistência à fadiga térmica que as superligas de níquel e níquel-ferro. Outra vantagem que as superligas de cobalto possuem é a capacidade de serem soldadas sem a necessidade de uma atmosfera específica como as superligas de níquel que necessitam que o processo de soldagem seja realizado no vácuo. (ASM International, 2018). A composição nominal das principais superligas comerciais está indicada no Quadro 1.

Quadro 1 - Composição química nominal das principais superligas comerciais.

Liga/Elemento	Ni	Cr	Co	Mo	W	Nb	Al	Ti	Fe	Mn	Si	C	B	Zr	Outros
Astroloy	55	15	17	5,3	...	...	4	3,5	...	...	...	0,06	0,003	...	...
Cabot 214	75	16	...	...	...	...	4,5	...	2,5	...	...	...	...	...	0,01 Y
Hastelloy G-30	42,7	29,5	2	5,5	2,5	0,8	...	...	15	1	1	0,003	...	...	2,0 Cu
Hastelloy S	67	15,5	...	14,5	...	...	0,3	...	1	0,5	0,4	...	0,009	...	0,05 La
Haynes 230	57	22	...	2	14	...	0,3	...	...	0,5	0,4	0,1	...	...	0,02 La
Inconel 587	bal	28,5	20	...	...	0,7	1,2	2,3	...	...	...	0,05	0,003	0,1	...
Inconel 625	61	21,5	...	9	...	3,6	0,2	0,2	2,5	0,2	0,2	0,05	...	...	...
Inconel 718	52,5	19	...	3	...	5,1	0,5	0,9	18,5	0,2	0,2	0,04	...	...	...
Nimonic 80A <sup>1</sup>	76	19,5	...	...	...	...	1,4	2,4	...	0,3	0,3	0,06	0,003	0,1	...
Nimonic 263	51	20	20	5,9	...	...	0,5	2,1	...	0,4	0,3	0,06	0,001	0	...
Nimonic PE.16	43	16,5	1	1,1	...	...	1,2	1,2	33	0,1	0,1	0,05	0,02	...	...
Pyromet 860	43	12,6	4	6	...	...	1,3	3	30	0,1	0,1	0,05	0,01	...	...
Unimet 710	55	18	15	3	1,5	...	2,5	5	...	...	...	0,07	0,02	...	...
Waspaloy	58	19,5	13,5	4,3	...	...	1,3	3	...	...	...	0,08	0,006	...	...

Fonte: Adaptado de ASM International (2018)

### 2.1.1 Superligas a base de níquel

As superligas a base de níquel são uma classe de materiais com uma ótima combinação de propriedades tais como sua capacidade de manter sua resistência e dureza a altas temperaturas, sua boa resistência a corrosão e oxidação, excelente estabilidade térmica e alta resistência a fadiga. (ZHU; ZHANG; DING, 2013)

<sup>1</sup> A composição química da superliga VAT80A é similar a composição química da superliga Nimonic 80A.

Devido a suas propriedades as superligas são empregadas em diversas aplicações que necessitem de uma boa combinação e propriedades mecânicas e de resistência a corrosão. Alguns exemplos de aplicações são: a superliga Nimonic 80A é utilizada devido a sua alta resistência a pressão, temperatura e vapores, e após o tratamento de solubilização e envelhecimento, na fabricação de componentes para indústria automotiva tais como válvulas de escape para motores de combustão interna. A superliga Inconel 825 apresenta considerável resistência a corrosão e é comumente utilizada na indústria química e petroquímica. Outras superligas como Nimonic C-263, Nimonic-75 e Nimonic-105 são empregadas em câmara de combustão de turbinas de gases. (THAKUR; GANGOPADHYAY, 2016)

De acordo com ASM International (2018) a microestrutura de uma superliga a base de níquel é composta de:

- Matriz *Gamma* ( $\gamma$ ): é uma matriz cúbica de face centrada (CFC) não magnética que contém uma alta concentração de solução sólida dos elementos cobalto, ferro, cromo, molibdênio e tungstênio. Essa matriz está presente em todas as ligas de níquel.

- Matriz *Gamma Prime* ( $\gamma'$ ): Nesta fase o alumínio e o titânio são adicionados em quantidades suficientes para que se precipite a fase cúbica de face centrada  $\gamma'$  ( $\text{Ni}_3\text{Al,Ti}$ ) na matriz austenítica. Outros elementos como nióbio, tântalo e cromo podem também ser adicionados. Essa fase é necessária para que a superliga possua resistência a altas temperaturas e boa resistência a fluência.

- Matriz *Gamma Double Prime* ( $\gamma''$ ): Nesta fase, níquel e o nióbio combinam na presença do ferro para formar uma estrutura tetragonal de corpo centrado (TCC),  $\text{Ni}_3\text{Nb}$ , que é coerente com a matriz *Gamma*. Essa fase é responsável pela alta resistência a baixas e médias temperaturas, contudo essa fase apresenta instabilidade em temperatura acima de  $650^\circ\text{C}$ . Esse precipitado é comumente encontrado em superliga de ferro-níquel.

- Contorno de grão ( $\gamma'$ ): No contorno de grão é formado um filme fino da matriz  $\gamma'$ . Esse filme fino é produzido devido ao tratamento térmico de solubilização e envelhecimento sofrido pela superliga ou devido à sua aplicação.

- Carbetos: Carbono é adicionado em proporções que variam de 0,02 até 0,2 em peso. O carbono combina com elementos reativos como titânio, tântalo, háfnio e nióbio para formar carbetos na forma MC. Durante o tratamento térmico de solubilização e envelhecimento ou sua aplicação, tais carbetos tendem a se decompor e formar outros carbetos na forma  $\text{M}_{23}\text{C}_6$  e  $\text{M}_6\text{C}$  que se formam nas regiões de contorno de grão, conforme mostrado na Figura 2.

### 2.1.2 Superliga VAT 80A®

A superliga VAT 80A® é o nome comercial de superliga à base de níquel produzida industrialmente pela empresa Villares Metals com base na composição química da superliga à base de níquel Nimonic 80A. Outras denominações incluem Liga 80A, ASTM B 637 Wnr.2.4952, UNS N07080 e DIN 17742.

A superliga VAT 80A® possui boa resistência à fluência até temperaturas de 760 °C que pode ser estendida até 840 °C em intervalos de curta duração. Possui boa resistência mecânica, resistência à fadiga e à oxidação em altas temperaturas. Sua aplicação se dá em válvulas de motores a combustão interna que exigem altas resistência à fadiga, erosão e corrosão por gases provenientes do processo de combustão. Outras aplicações incluem a fabricação de parafusos sem porcas e parafusos em geral para aplicações em alta temperatura (METALS, 2015).

Na Quadro 2 está a composição química nominal da superliga VAT 80A®.

Quadro 2 -Composição química nominal da superliga VAT 80A®.

C	Si	Mn	Ni	Nb	Al	Ti	Cr	Fe
0.02	0.20	0.30	Balanço	--	1.50	2.20	20.00	0.30

Fonte: Farina; Liberto; Barbosa (2013).

No Quadro 2 estão dispostas as propriedades físicas da superliga Nimonic 80 A.

Quadro 3 – Propriedades mecânicas da superliga Nimonic 80<sup>a</sup>

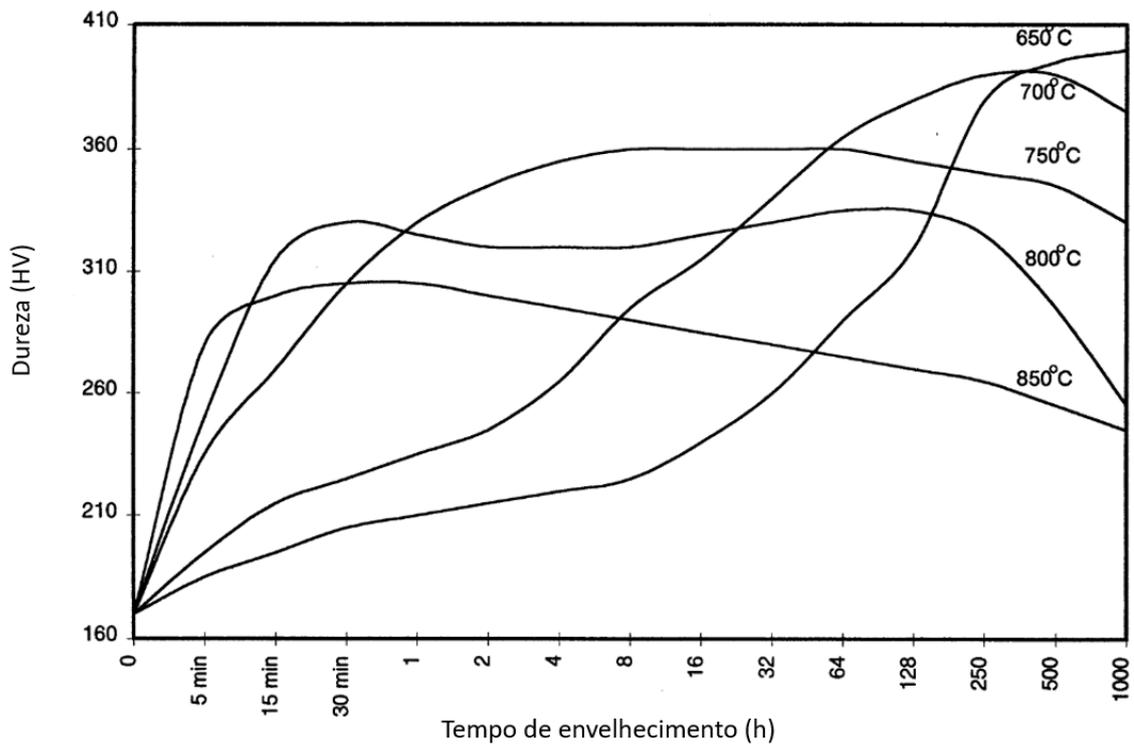
Propriedade física	Nimonic 80A
Densidade	8.19 g/cm <sup>3</sup>
Ponto de fusão	1320 – 1365 °C
Condutividade térmica à 600 °C	20.8 W/m x °C
Calor específico à 600 °C	599 J/kg x °C

Fonte: Adaptado de Special metals corporation (2004)

Para atingir as propriedades mecânicas desejadas, realiza-se o tratamento térmico de solubilização e envelhecimento de acordo com a norma SAE J775. O tempo e a temperatura de

envelhecimento são escolhidos de acordo com as propriedades mecânicas desejadas no componente mecânico. Na Figura 2 é mostrada a relação entre tempo, temperatura e dureza para superliga Nimonic 80A.

Figura 2 - Efeito do tempo e temperatura na dureza da superliga Nimonic 80A.



Fonte: Adaptado de Ezugwu *et al.* (1998)

No Quadro 4 estão dispostas as propriedades mecânicas da superliga VAT 80A.

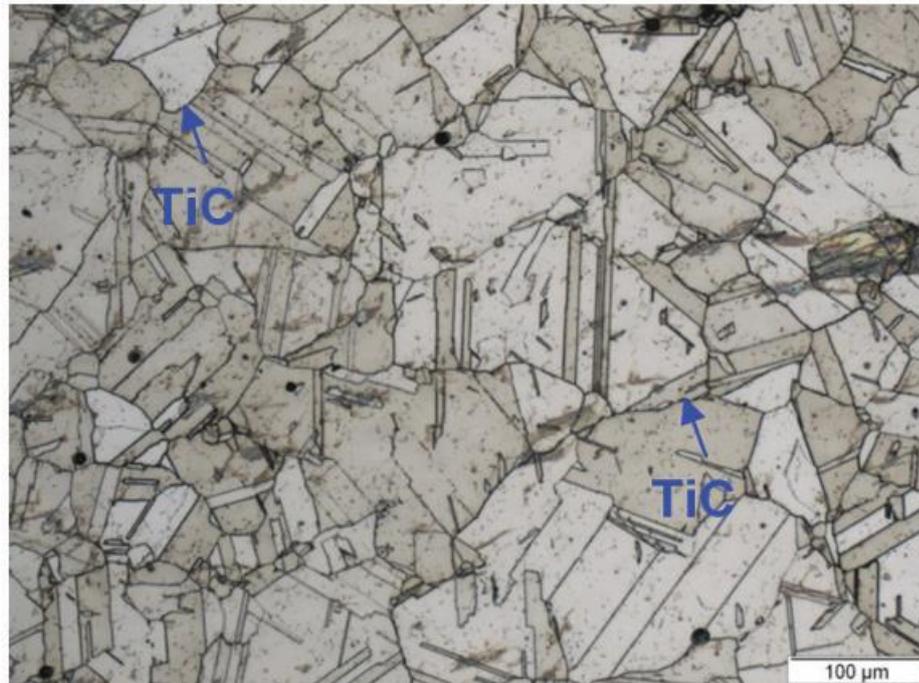
Quadro 4 – Propriedades mecânicas da superliga VAT 80A®

Propriedade mecânica	VAT 80A®
Limite de escoamento em 800 °C	591 MPa
Resistência à fadiga a 750°C. Carga para 100 milhões de ciclos (108)	378 MPa
Ruptura sob tensão: Tempo para ruptura a 800°C e carga de 100 MPa	1100 h
Dureza à Quente: Dureza Vickers 10 kg em 760°C	261 HV

Fonte: Farina *et al.* (2013)

Na Figura 3 está mostrada uma micrografia da superliga VAT 80A onde é possível observar a formação de carboneto de titânio nos contornos de grão.

Figura 3 - Caracterização metalográfica por microscopia ótica da superliga VAT 80A com ataque com reagente glicérgia e solubilizada a 1.120°C por 30 min (ar) e envelhecida a 700°C por 16 h.



Fonte: Farina *et al.* (2013)

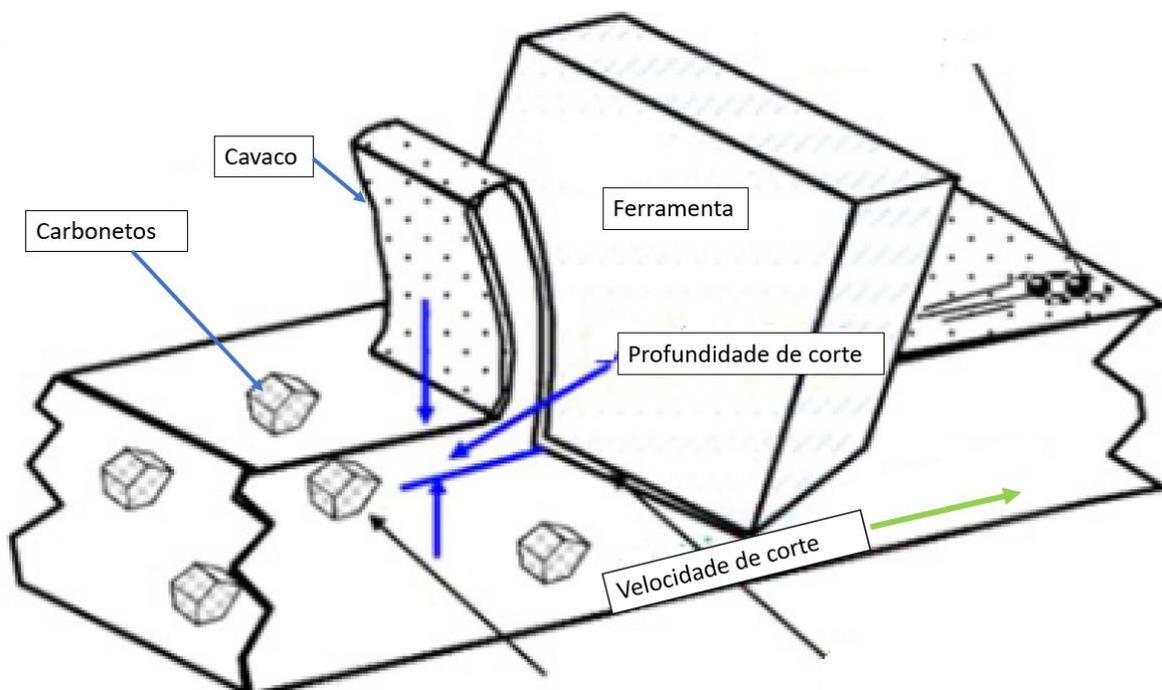
### 2.1.3 Usinagem de superligas

De acordo com Ezugwu *et al.* (1998), o processo de usinagem das superligas de níquel apresenta inúmeras dificuldades devido as propriedades mecânicas do material. São elas:

- Sua resistência se mantém constante a altas temperaturas onde outros materiais como aços e ligas de alumínio tendem a se tornar mais maleáveis;
- As superligas sofrem um rápido encruamento durante o processo de usinagem o que leva ao aparecimento de desgastes do tipo entalhe na ponta da ferramenta;
- Devido a presença de carbeto em sua microestrutura, as ferramentas sofrem um desgaste abrasivo intenso durante a retirada de material. Figura 2;

- Em função da alta presença de elementos de liga em sua microestrutura, ocorre o processo de difusão entre peça-ferramenta devido a altas temperaturas durante a usinagem;
- Há o fenômeno de adesão do cavaco na aresta de corte da ferramenta devido as propriedades químicas da superliga. Tal fenômeno ocasiona desgastes do tipo entalhe e lascamentos na superfície da ferramenta;
- Durante o processo de usinagem, os cavacos gerados são longos e prejudiciais a vida da ferramenta podendo ocasionar desgastes do tipo cratera;
- A baixa condutividade térmica da superliga concentra o calor gerado durante o processo de usinagem na ponta da ferramenta ao invés de ser dissipado por meio de cavaco.

Figura 4 - Efeito dos carbeto presentes na microestrutura.



Fonte: Adaptado de Ulutan; Ozel (2011)

Ezugwu *et al.* (1998) ainda destacam as propriedades que uma ferramenta de corte deve possuir para que a usinagem de uma superliga de níquel ocorra de forma satisfatória quanto a vida da ferramenta e a qualidade superficial do produto.

- Alta resistência ao desgaste;
- Alta resistência e alta tenacidade;

- Alta dureza a quente;
- Alta resistência a altas temperaturas;
- Alta estabilidade química a elevadas temperaturas.

A usinagem das superligas de níquel é realizada utilizando os mais diversos tipos de ferramentas: aços rápidos, metal duro com recobrimento CVD ou PVD, ferramentas de CBN e ferramentas cerâmicas (KAYA; AKYÜZ, 2017).

Ferramentas de aço rápido são aplicadas em operações de corte intermitentes como fresamento, furação e brochamento, contudo tais ferramentas têm sido substituídas por ferramentas de metal duro que combinam uma alta dureza e alta tenacidade para tais operações. Ferramentas cerâmicas a base de alumina, Sialon e cerâmicas reforçadas com *whiskers* tem sido estudada por diversos autores. Ainda há a aplicação de ferramentas de nitreto cúbico de boro (CBN) para operações de acabamento, contudo seu alto custo tem sido um limitante na indústria (ULUTAN; OZEL, 2011).

Günay *et al.* (2020) estudaram a performance de uma ferramenta de metal duro comercial na usinagem em torneamento do Nimonic 80A. Os parâmetros de corte utilizados foram velocidades de corte de 45, 60 e 75 m/min e avanço e profundidade de corte constante, 0,1 mm/rev e 1.0 mm, respectivamente. O estudo foi realizado utilizando atmosferas diversas como ar, ar resfriado e o MQF (Mínima Quantidade de Fluido). O estudo concluiu que para as condições propostas a combinação MQF e uma velocidade de corte de 60 m/min apresentaram os melhores resultados quanto a resposta quantidade de material removido e desgaste de flanco.

Korkmaz, Yaşar e Günay (2020) realizaram um estudo sobre a usinagem de torneamento da superliga Nimonic 80A utilizando uma ferramenta de metal duro comercial. O objetivo deste trabalho foi determinar experimentalmente e através de uma simulação o método de elementos finitos as forças que ocorrem durante o torneamento. Três parâmetros em três níveis cada foram escolhidos para realizar o estudo sendo eles: velocidade de corte nos níveis 45, 60 e 75 m/min; avanço 0,1; 0,2 e 0,3 mm/rev; e a profundidade de corte nos níveis 0,5, 1,0 e 1,5 mm. Os autores concluíram que as força relativa à profundidade de corte e ao avanço aumentam conforme seus valores crescem, contudo há um decréscimo de ambas as forças conforme a velocidade de corte tem seu valor aumentado.

Kondo *et al.* (2019a) estudaram o emprego de uma ferramenta de metal duro revestida (Ti-Al-Si-N) pelo método de deposição físico de vapor (PVD) na usinagem de torneamento da superliga de níquel VAT 32<sup>®</sup>. O planejamento experimental aplicado foi arranjo ortogonal Taguchi L<sub>8</sub> com a velocidade de corte em três níveis: 80, 90 e 110 m/min; avanço em dois

níveis: 0.25 e 0.40 mm/rev; profundidade de corte em dois níveis: 0.15 e 0.25 mm; e dois métodos de lubrificação: a seco e abundante. Observou-se que para as velocidades de corte de 80 e 90 m/min houve o processo de adesão de material na aresta de corte da ferramenta ocasionando a formação de uma aresta postiça de corte. Para a maior velocidade de corte, 110 m/min não houve o processo de formação de uma aresta postiça de corte na ferramenta. O desgaste de flanco foi causado pela abrasão na interface peça/ferramenta. O fluido de corte tem um efeito positivo na potência de corte, isto é, reduz a potência necessária para o corte, contudo seu efeito é negativo quanto ao desgaste de flanco da ferramenta.

Outros autores têm empregado o uso de ferramentas cerâmicas para o torneamento das superligas como Lima *et al.* (2017), Kondo *et al.* (2018), Chavan *et al.* (2019) e Bonhin *et al.* (2019).

As ferramentas cerâmicas possuem como vantagem frente as de metal duro a possibilidade de trabalharem com maiores velocidades de corte, superiores a 200 m/min. Chavan *et al.* (2019) estudaram o uso de uma ferramenta cerâmica de  $Al_2O_3 + TiC$  no torneamento da superliga Nimonic 80A utilizando quatro níveis de velocidade de corte: 100; 200; 300 e 400 m/min; quatro níveis de avanço: 0,12; 0,15; 0,18 e 0,22 mm/rev; e três níveis de profundidade de corte: 0,75; 0,90 e 1,10 mm. Os autores concluíram que para velocidades de corte abaixo de 250 m/min há uma maior tendência de adesão de material na aresta de corte e a formação de uma aresta postiça de corte o que acarreta uma diminuição da vida da ferramenta e uma pior qualidade no acabamento superficial da peça. Desta forma os autores recomendam uma combinação de valores moderados de avanço e profundidade de corte e altas velocidades de corte, sem a utilização de fluido refrigerante, para que a vida da ferramenta e a qualidade superficial sejam satisfatórias.

Lima *et al.* (2017) estudaram a aplicação de três tipos de ferramentas cerâmicas na usinagem da superliga Inconel 751 utilizando atmosferas de argônio e oxigênio como meio lubrificantes. As ferramentas cerâmicas empregadas foram do tipo Sialon ( $Si_3N_4+Al_2O_3$ ), cerâmica com adição de *Whiskers* ( $Al_2O_3+SiC_w$ ) e  $Al_2O_3+TiC$ . Os ensaios foram realizados a sem o uso de fluido lubrificante, e com duas atmosferas lubrificantes de argônio e oxigênio. Duas velocidades de corte foram escolhidas para a realização dos ensaios, 150 e 300 m/min, enquanto o avanço, profundidade de corte e raio de ponta foram constantes em 0.2 mm/rev, 2.0 mm e 1.2 mm respectivamente. Os autores concluíram que para velocidades de corte mais baixas, 150 m/min, a atmosfera é um fator significativo no desgaste sofrido pela ferramenta durante o processo de torneamento, contudo a velocidade de 300 m/min não houve diferença significativa do tipo de atmosfera na vida da ferramenta.

Pode-se destacar ainda os trabalhos de Bonhin *et al.* (2019) e Kondo *et al.* (2018) que estudaram a aplicação de uma ferramenta cerâmica experimental a base de óxido de alumina dopada com óxido de magnésio na usinagem de torneamento da superliga VAT 32<sup>®</sup> e Pinheiro (2018) que estudou a aplicação de uma ferramenta cerâmica experimental a base de óxido de alumina dopada com óxido de magnésio na usinagem de torneamento da superliga Inconel 718.

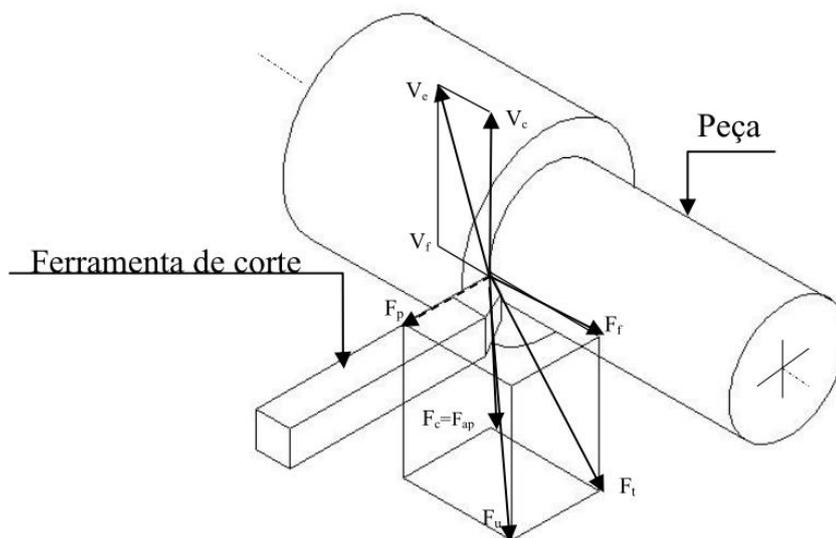
## 2.2 MEDIÇÃO DOS PARÂMETROS DE USINAGEM

### 2.2.1 Potência

A potência de usinagem pode ser definida como a soma das potências necessárias para cada componente da força de usinagem levando em consideração a força, velocidade e cosseno entre ambas. (SILVEIRA, 2015).

De acordo com Machado *et al.* (2009) as forças de corte que atuam no momento da usinagem são força de corte ou principal de corte, força de avanço e força de passiva ou força de profundidade, conforme Figura 5.

Figura 5 - Forças resultantes da ação da peça sobre a ferramenta de usinagem.



Fonte : Silva (2014).

As forças podem ser definidas como:

- Força de corte ou força principal de corte ( $F_c$ ): projeção da força de usinagem sobre o plano de trabalho, na direção de corte, dada pela velocidade de corte;
- Força de avanço ( $F_f$ ): projeção da força de usinagem sobre o plano de trabalho, na direção de avanço, dada pela velocidade de avanço;
- Força passiva ou força de profundidade ( $F_p$ ): projeção da força de usinagem perpendicular ao plano de trabalho.

Ainda de acordo com Machado *et al.* (2009) para se calcular a potência de corte deve-se multiplicar a força de corte pela velocidade de corte, conforme mostrado na Equação 1.

$$P_c = F_c VC \quad (1)$$

De acordo com Lauro *et al.* (2014) há duas formas de se determinar as forças de cortes e por consequência a potência de corte. São elas:

- Medição direta: Esta técnica envolve a montagem de uma ferramenta ou o conjunto de ferramenta/peça de trabalho em um dinamômetro, que responde às forças usando sinais elétricos proporcionais para as forças aplicadas. Utilizada quando as forças precisam ser precisamente conhecidas tanto em magnitude quanto em direção.
- Medição indireta: Esta técnica é menos precisa que a medição direta e consiste em monitorar os sinais elétricos provenientes do motor trifásico do centro de torneamento.

### 2.2.2 Vibração

A vibração é um fenômeno comum na usinagem de acabamento de peças com baixa rigidez. O grande interesse industrial é evitar as vibrações que produzem acabamento superficial ruim e que podem causar danos aos componentes de usinagem. (LAURO *et al.* 2014)

As vibrações que ocorrem no processo de usinagem podem ser divididas: independentes e dependentes. Os dois grupos não são mutuamente exclusivos. A vibração independente do corte metálico inclui vibração forçada causada por outras máquinas ou componentes da máquina, por exemplo, vibração transmitida através de fundações, desequilíbrio de peças rotativas, forças de inércia de peças recíprocas. A vibração dependente do corte metálico pode

demonstrar uma série de características em função do processo, por exemplo, corte interrompido. As diferentes forças de corte que ocorrem durante o corte metálico podem resultar de variações de não homogeneidade e propriedades no material de trabalho. (TETI *et al.* 2010)

De acordo com Diniz e Hara (1999), a avaliação da vibração apresenta limitações quanto ao monitoramento do seu sinal uma vez que sua variação é influenciada não somente pelo desgaste da ferramenta, mas também pelos parâmetros de corte e geometria da ferramenta. É possível observar:

- A vibração da ferramenta diminui com o aumento da dureza e da tenacidade.
- Quando a velocidade de corte ( $V_C$ ) é baixa, a vibração da ferramenta cresce com o aumento de " $V_C$ ". Quando " $V_C$ " trabalha na faixa de formação de aresta postiça de corte, a vibração tende a diminuir.
  - A vibração da ferramenta tende a aumentar com o aumento da profundidade de corte ( $a_p$ ). A influência do avanço ( $f$ ) é praticamente desprezível.
  - Quanto maior o raio de ponta ( $r_\epsilon$ ) da ferramenta, maior a sua vibração. Isto ocorre devido: (a) ao aumento do comprimento de contato entre a aresta cortante e a peça; (b) à espessura não uniforme do cavaco. Além disso, a potência de corte necessária aumenta.
  - O ângulo de saída ( $\gamma$ ) não apresenta forte influência sobre a vibração da ferramenta, principalmente quando se situa entre  $3^\circ$  e  $20^\circ$ .

### 2.2.3 Emissão acústica (EA)

A emissão acústica (EA) é a energia elástica transitória que é liberada por um material quando experimenta uma rápida mudança em sua estrutura, como deformação plástica ou crescimento de trincas, e o nome dado a técnica de monitoramento desses sinais de energia elástica transitória. Emissão acústica refere-se à detecção de sinais na faixa ultrassônica (20kHz a 1MHz) através do uso de transdutores piezoelétricos ligados à superfície da estrutura que está sendo monitorada, embora a EA detectada esteja comumente dentro da faixa de 100kHz a 300kHz (McCRORY, 2015).

Diversos autores têm estudado o emprego das técnicas de emissão acústica para monitorar o processo de usinagem e determinar os desgastes das ferramentas. Destacam-se os trabalhos de Papacharalampopoulos *et al.* (2013), Filippov *et al.* (2017), Klocke *et al.* (2019), Chethan; Ravindra e Krishnegowda (2019).

De acordo com Euzebio (2012) um parâmetro comumente utilizado no estudo da emissão acústica é seu valor médio quadrático (RMS). O valor RMS ou valor eficaz é uma medida estatística da magnitude de uma quantidade variável de sinal de EA. O nome deriva de sua equação que utiliza a raiz quadrada da média aritmética do quadrado dos valores. O valor RMS do sinal puro de emissão acústica pode ser expresso através da Equação 2.

$$EA_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{\Delta t} \int_0^{\Delta t} EA^2(t) dt} \quad (2)$$

Onde  $EA_{RMS}$  é o valor médio quadrático de emissão acústica,  $\Delta t$  o tempo de integração e  $EA^2$  é o sinal puro de emissão acústica.

#### 2.2.4 Rugosidade

A condição final de uma superfície usinada é resultado de um processo que envolve deformações plásticas, ruptura, recuperação elástica, geração de calor, vibração, tensões residuais e as vezes reações químicas. (MACHADO *et al.* 2009)

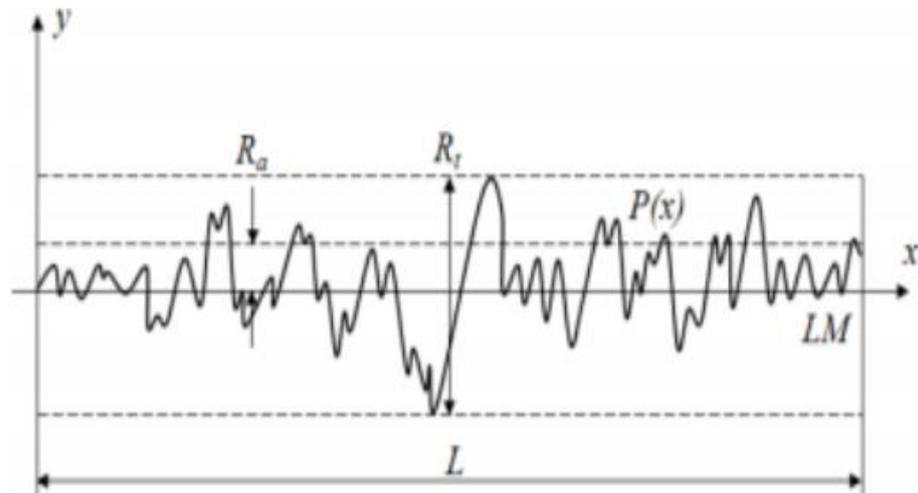
O conjunto de irregularidades na superfície da peça, as quais podem ser avaliadas com aparelhos como o rugosímetro, é conhecida como rugosidade, e é fundamental no comportamento dos componentes mecânicos, influenciando diretamente na qualidade de deslizamento, resistência ao desgaste, resistência na superfície ao escoamento de fluidos e lubrificantes (NBR ISO 4287:2002).

O desvio aritmético médio do perfil avaliado ( $R_a$ , *roughness average*) é definido como sendo a média aritmética dos valores absolutos das ordenadas de afastamento em y relacionada com os pontos do perfil de rugosidade em relação à linha mediano percurso total  $L_m$ , podendo corresponder a uma altura de um retângulo, onde a área é à soma das áreas delimitadas pelo perfil de rugosidade e pela linha média. (NBR ISO 4287:2002; SOUSA, 2020).

O parâmetro  $R_a$  é amplamente empregado como parâmetro de controle de processo, uma vez que alterações no seu valor representam alterações no processo, em especial no desgaste da ferramenta. Como é um fator médio não recebe a influência de efeitos ocasionais. Contudo o parâmetro  $R_a$  isoladamente não é suficiente para identificar algumas características importantes da superfície, pois superfícies geometricamente diferentes podem apresentar valores de  $R_a$  bem próximos, mas desempenhos em serviços bastante diversos (MACHADO *et al.* 2009).

A altura do perfil total,  $R_t$  rugosidade total, é definida como a soma das maiores alturas de pico de perfil e das maiores profundidades de vale do perfil, no comprimento da avaliação. (NBR ISO 4287:2002) conforme Figura 6.

Figura 6 - Parâmetros de rugosidade  $R_a$  e  $R_t$  no comprimento  $L$ .



Fonte: Adaptado de Sousa (2020).

Para análise da rugosidade utiliza-se o comprimento da amostra em direção ao eixo  $x$  para identificar as irregularidades características do perfil. Chama-se por  $l_n$  o comprimento total da avaliação e  $l_r$  o comprimento de amostragem conforme norma NBR ISO 4287:2002. O comprimento  $l_r$  é chamado também de *cut-off*. Para uma medição efetiva a norma NBR ISO 4287:2002 recomenda que o comprimento de avaliação seja igual a  $5x l_r$ . No Quadro 5 estão mostrados os valores de *cut-off* com base na rugosidade  $R_a$  esperada para o processo de usinagem que o material foi submetido.

Quadro 5 - Comprimentos de amostragem e de avaliação para medição de rugosidade de acordo com a norma NBR ISO 4288:2008.

Faixa de $R_a$ ( $\mu\text{m}$ )	Comprimento de amostragem da rugosidade $l_r$ (mm) [ <i>cut-off</i> ]	Comprimento de avaliação da rugosidade $l_n$ (mm)
$0,006 < R_a \leq 0,2$	0,08	0,4
$0,02 < R_a \leq 0,1$	0,25	1,25
$0,1 < R_a \leq 2$	0,8	4
$2 < R_a \leq 10$	2,5	12,5
$10 < R_a \leq 80$	8	40

Fonte: NBR ISO 4287 (2002).

De acordo com Machado *et al* (2009), pode-se calcular os valores de rugosidade  $R_a$  e  $R_t$  teoricamente com base nos parâmetros de corte e na geometria da ferramenta, conforme mostrados na Equação 3 e 4.

$$R_a = \frac{f^2}{18\sqrt{3}r_\epsilon} \quad (3)$$

$$R_t = \frac{f^2}{8r_\epsilon} \quad (4)$$

Onde  $f$  é o avanço em mm/rev e  $r_\epsilon$  é o raio de ponta da ferramenta de corte, em mm.

Desta forma, tem-se que para perfis periódicos os valores do *cut-off* podem ser determinados conforme o a distância entre sulcos na superfície do material e que são equivalentes ao avanço da ferramenta conforme Quadro 6.

Quadro 6 - Comprimentos de amostragem e de avaliação para medição de rugosidade de perfis periódicos e Rz de perfis periódicos e não periódicos.

Rz ( $\mu\text{m}$ )	Comprimento de amostragem da rugosidade $l_r$ (mm) [ <i>cut-off</i> ]	Comprimento de avaliação da rugosidade $l_n$ (mm)
$0,025 < Rz \leq 0,1$	0.08	0.4
$0,1 < Rz \leq 0,5$	0.25	1.25
$0,5 < Rz \leq 10$	0.8	4
$010 < Rz \leq 50$	2.5	12.5
$50 < Rz \leq 200$	8	40

Fonte: NBR ISO 4287 (2002).

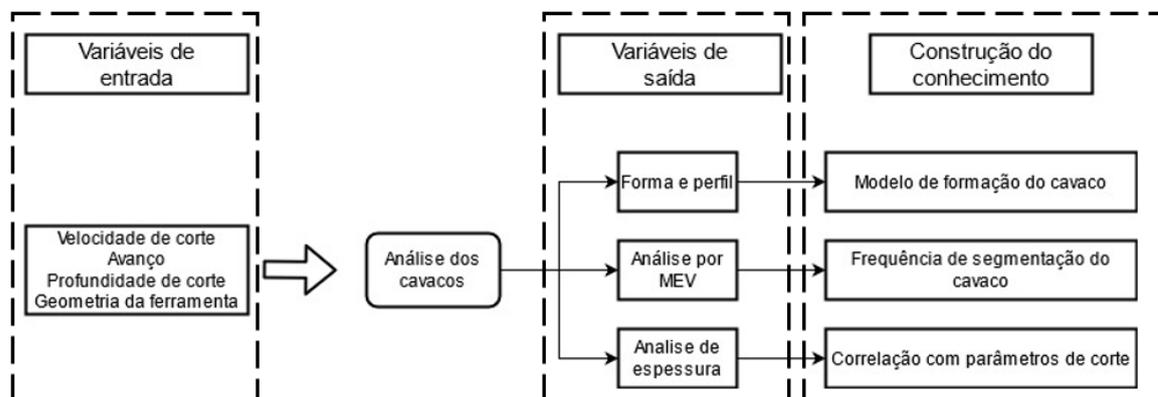
Nota-se que a rugosidade  $R_a$  e  $R_t$  estão diretamente ligadas aos parâmetros de corte e a geometria da ferramenta. Maiores valores de avanço resultaram em maiores rugosidades enquanto maiores raios de ponta da ferramenta utilizada resultaram em menores valores de rugosidade.

### 2.3 MECANISMOS DE FORMAÇÃO DO CAVACO

De acordo com Diniz, Marcondes e Coppini (2013) a formação do cavaco está diretamente correlacionada com diversas variáveis durante o processo de usinagem como o desgaste da ferramenta, esforços de corte, calor gerado, fluido de corte. Desta forma, o processo de formação do cavaco tem implicações quanto a qualidade superficial da peça, aspectos econômicos e segurança do operador.

A relação entre os parâmetros de corte, geometria da ferramenta e o conhecimento adquirido ao se realizar a análise dos cavacos está mostrada na Figura 8.

Figura 7 - Variáveis experimentais envolvidas na análise dos cavacos.



Fonte: Adaptado de Liu *et al.* (2021)

### 2.3.1 Formação do Cavaco

De acordo com Machado *et al.* (2009) o processo de formação do cavado pode ser dividido em quatro eventos distintos. São eles:

- **Recalque inicial:** devido à penetração da cunha cortante no material da peça, uma pequena porção deste (ainda unido à peça) é pressionada contra a superfície de saída da ferramenta.
- **Deformação e ruptura:** o material pressionado sofre, de início, uma deformação elástica, e, em seguida, uma deformação plástica, que aumenta progressivamente até o estado de tensões provocar a ruptura. Essa ruptura se dá, na maior parte das vezes, por cisalhamento, embora exista um estado de tensões que combina tensões de compressão-tração e de cisalhamento e leve o material à ruptura, segundo algum critério próprio de sua natureza frágil ou dúctil. Após a ruptura, há a formação de uma trinca que se propaga seguindo também um critério de propagação de trincas próprio de cada material. Como a formação de cavacos ocorre dinamicamente, há planos instantâneos de ruptura e de propagação de trincas que definirão uma certa região entre a peça e o cavaco, chamada "zona primária de cisalhamento".
- **Deslizamento das lamelas:** Haverá uma ruptura parcial ou completa na região do cisalhamento dependendo da propagação da trinca. As propriedades do material e as condições de avanço irão determinar quanto o segmento do material rompido permanecerá unido ao cavaco recém-formado, dando origem a cavacos contínuos ou descontínuos.

- Saída do cavaco: devido ao movimento relativo entre a ferramenta e a peça, inicia-se um escorregamento da porção de material deformado e rompida - o cavaco - sobre a superfície de saída da ferramenta. Enquanto tal evento ocorre, uma nova lamela de material (imediatamente adjacente à porção anterior) está se formando e passando pelos mesmos processos. Essa nova porção de material também escorregará sobre a superfície de saída da ferramenta, repetindo mais uma vez o fenômeno.

Desta forma, o processo de formação de cavacos é periódico uma vez que as fases de recalque, deformação, deslizamento e saída se repetem durante todo o processo de usinagem. A periodicidade da formação do cavaco é comprovada experimentalmente através de filmagens da interface peça-ferramenta e pela medida da amplitude da força de usinagem (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

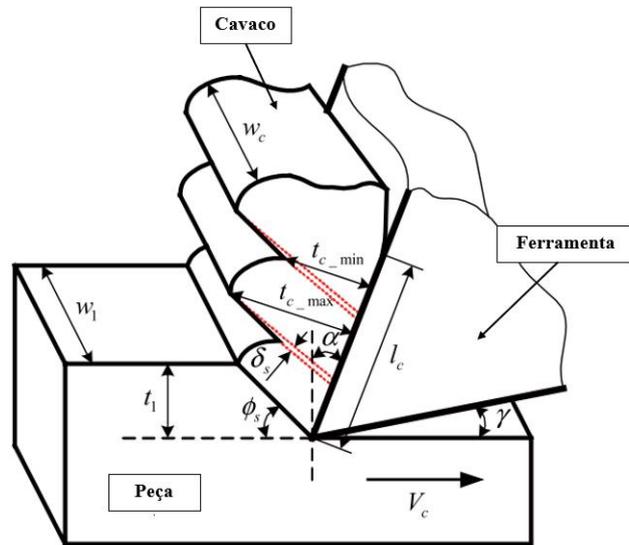
### 2.3.2 Classificação dos cavacos

De acordo com Diniz, Marcondes e Coppini (2013) os cavacos podem ser divididos em três grupos:

- Cavaco contínuo: Constituído de lamelas justapostas numa disposição contínua. Forma-se na usinagem de materiais dúcteis, como o aço, alumínio e cobre, onde o ângulo de saída deve assumir valores elevados.
  - Cavacos de cisalhamento: Constituído de lamelas justapostas bem distintas.
  - Cavaco de ruptura: Constituído de fragmentos arrancados da peça usinada. A superfície de contato entre cavaco e superfície de saída da ferramenta é reduzida, assim como a ação do atrito. O ângulo de saída da ferramenta deve assumir valores baixos, nulos ou negativos. É o tipo de cavaco mais comum na usinagem de materiais frágeis, como bronze e ferro fundido cinzentos.

Na Figura 9 está mostrado esquematicamente o corte ortogonal e parâmetros de corte envolvidas na formação d de cisalhamento

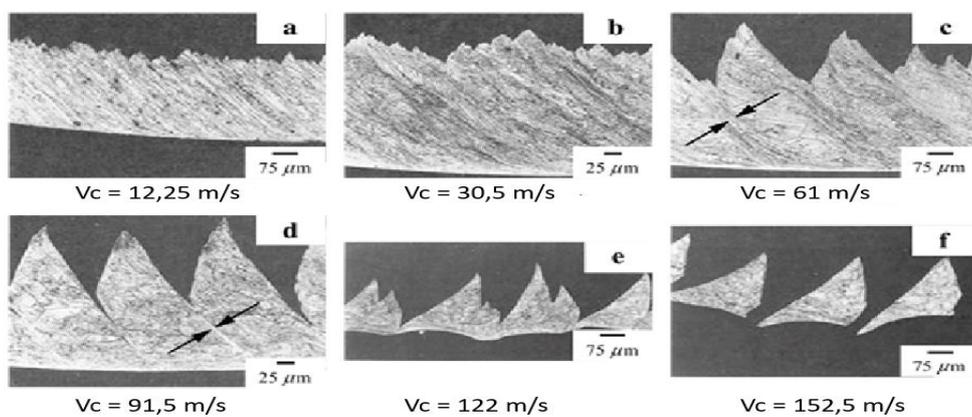
Figura 8– Corte ortogonal e parâmetros de corte na formação de cavacos do tipo contínuo.



Fonte: Adaptado de Liu *et al.* (2021)

Liu *et al.* (2021) estudaram o processo de formação de cavaco na superliga à base de níquel Inconel 718 conforme mostrado na Figura 9. Observa-se que para baixas velocidades de corte o cavaco formado durante o processo de torneamento é do tipo contínuo. Conforme aumenta-se a velocidade de corte, há uma mudança no tipo de cavaco para cavaco de cisalhamento em velocidades de corte médias, e cavacos de ruptura para elevadas velocidades de corte.

Figura 9– Formato do cavaco durante o torneamento da superliga Inconel 718.

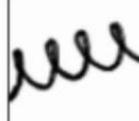
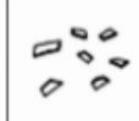


Fonte: Liu *et al.* (2021)

A forma do cavaco pode ser controlada alterando-se os parâmetros de corte durante o processo de torneamento ou alterando-se as dimensões geométricas da ferramenta de corte, isto é, alterando-se os ângulos de saída ou utilizando quebra cavacos.

A norma ABNT NBR ISO 3685:2017 – Ensaio de vida da ferramenta de ponta única para torneamento, classifica os cavacos gerados no processo de torneamento conforme mostrado na Figura 10.

Figura 10– Classificação da forma dos cavacos.

1 - Cavaco em fita	2 - Cavaco tubular	3 - Cavaco espiral	4 - Cavaco hel. tipo arruela	5 - Cavaco hel. cônico	6 - Cavaco em arco	7 - Cavaco fragmentado	8 - Cavaco tipo agulha
							
1-1- Longo	2-1- Longo	3-1- Plano	4-1- Longo	5-1- Longo	6-1- Conect.		
							
1-2- Curto	2-2- Curto	3-2- Cônico	4-2- Curto	5-2- Curto	6-2- Solto		
							
1-3 - Emaranhado	2-3 - Emaranhado		4-3 - Emaranhado	5-3 - Emaranhado			

Fonte: ABNT NBR ISO 3685 (2017).

## 2.4 DESGASTE E AVARIAS EM FERRAMENTAS DE CORTE

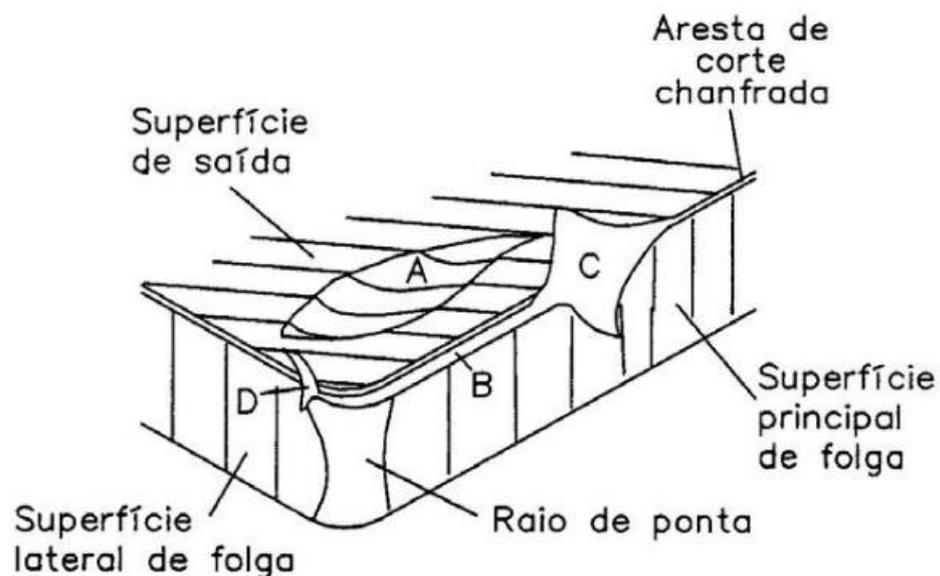
De acordo com Machado *et al.* (2009) por maior que seja a dureza e resistência ao desgaste das ferramentas de corte, e por menos que seja a resistência mecânica da peça de trabalho, a ferramenta de corte sofrerá um processo de desgaste que mais cedo ou tarde exigirá a sua substituição.

Pode-se distinguir três fenômenos que uma ferramenta de corte perde sua eficácia na usinagem: avaria, desgaste e deformação plástica, embora alguns autores considerem a deformação plástica como um mecanismo de desgaste. Define-se:

- **Avaria:** Fenômeno que ocorre de maneira repentina e inesperada, causado pela quebra, lascamento ou trinca da aresta de corte. A quebra e o lascamento levam a total destruição ou perda de uma quantidade considerável da aresta de corte de forma repentina e inesperada. A quebra é mais comum em ferramentas com baixa tenacidade como por exemplo as ferramentas cerâmicas.
- **Desgaste:** De acordo com a norma ABNT ISO 3685:2006 a definição de desgaste em ferramentas é: “Mudança de sua forma original durante o corte, resultante da perda gradual de material”. No desgaste, ao contrário da avaria, essa perda ocorre de maneira contínua e progressiva, em proporções pequenas, às vezes no nível atômico, às vezes no nível dos grãos do material. (MACHADO *et al.* 2009)

De acordo com Machado *et al.* (2009) os principais tipos de desgastes que ocorrem nas ferramentas de corte são: desgaste de cratera (A), desgaste frontal ou de flanco (B) e o desgaste do tipo entalhe (C) e (D) conforme Figura 11.

Figura 11- Principais áreas de desgaste de uma ferramenta de corte



Fonte: Adaptado de Dearnley E Trent (1982).

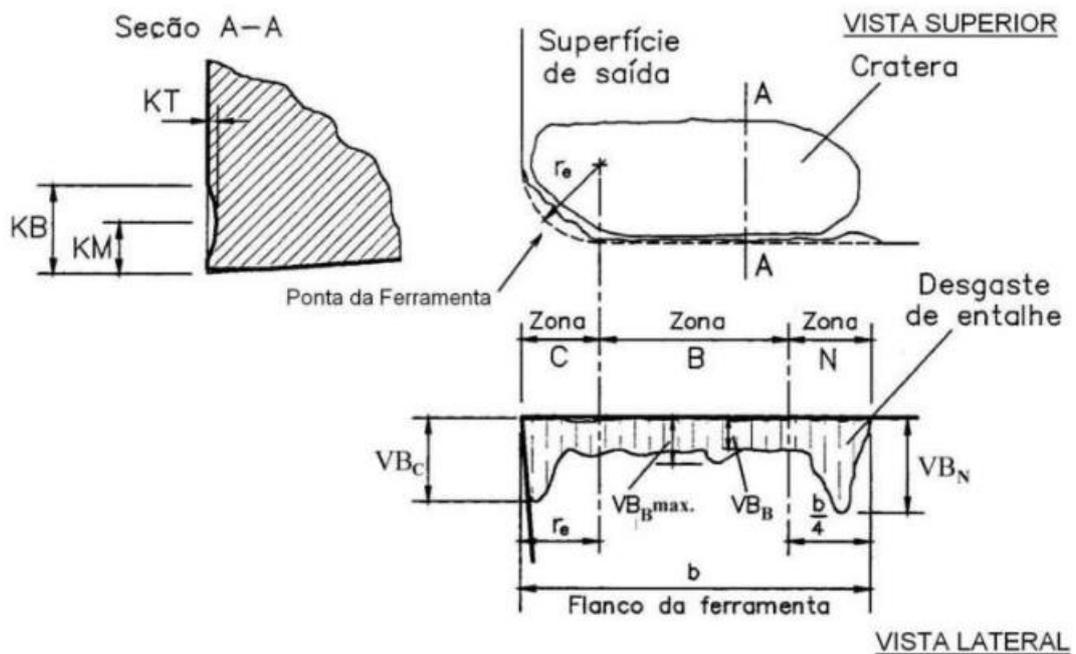
A norma ABNT NBR ISO 3685:2017 - Ensaio de vida da ferramenta de ponta única para torneamento apresenta os parâmetros para utilizados para mensurar os desgastes nas ferramentas conforme Figura 12. São eles:

- KT: profundidade de cratera, em milímetros;
- VB<sub>B</sub>: desgaste de flanco médio, em milímetros;
- VB<sub>MAX</sub>: desgaste de flanco máximo, em milímetros;
- VB<sub>N</sub>: desgaste de entalhe, em milímetros.

Os critérios de fim de vida recomendado pela norma ABNT ISO 3685:2017 são:

- Desgaste de flanco médio, VB = 0,3 mm (desgaste regular);
- Desgaste de flanco máximo, VB<sub>max.</sub> = 0,6 mm;
- Profundidade da cratera, KT = 0,06 + 0,3f onde f é avanço em mm/rev.;
- Desgaste de entalhe (VB<sub>N</sub> e VB<sub>C</sub>) = 1 mm;
- Falha catastrófica.

Figura 12 - Parâmetros utilizados para medir os desgastes das ferramentas de corte.

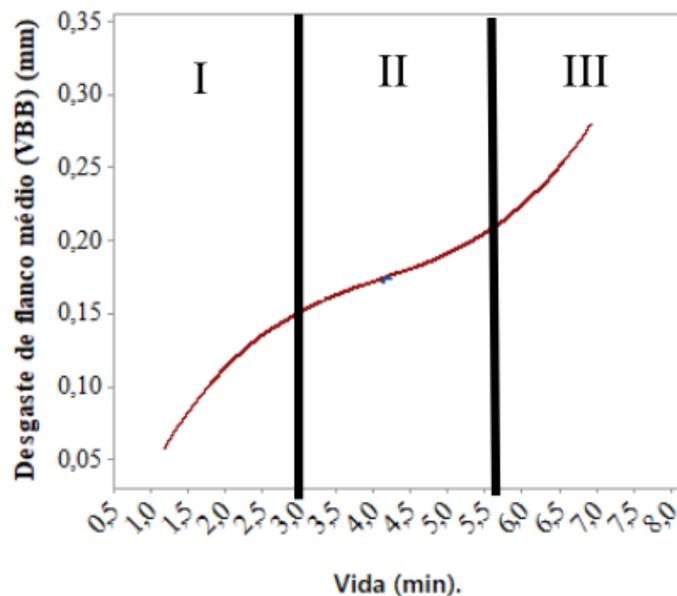


Fonte: ABNT ISO 3685 (2017).

Machado *et al.* (2009) descreve os três estágios de evolução do desgaste em ferramentas de corte, são eles:

- **Estágio I:** Ocorre nos primeiros instantes do corte, quando o desgaste apresenta uma taxa decrescente. Neste estágio a ferramenta sofre um desgaste acelerado, natural da adequação ao sistema tribológico envolvido;
- **Estágio II:** Caracteriza-se pela taxa de desgaste constante ao longo do tempo. A ferramenta já se encontra totalmente adequada ao processo e os mecanismos de desgaste operam em uma taxa constante até atingir nova inflexão.
- **Estágio III:** Acontece o início de uma aceleração no desgaste, aumentando acentualmente a taxa e promovendo, em curto tempo, a quebra da ferramenta, caso o corte tenha continuidade dentro desse estágio conforme Figura 13.

Figura 13 - Comportamento do desgaste de uma ferramenta de corte com o tempo de corte.



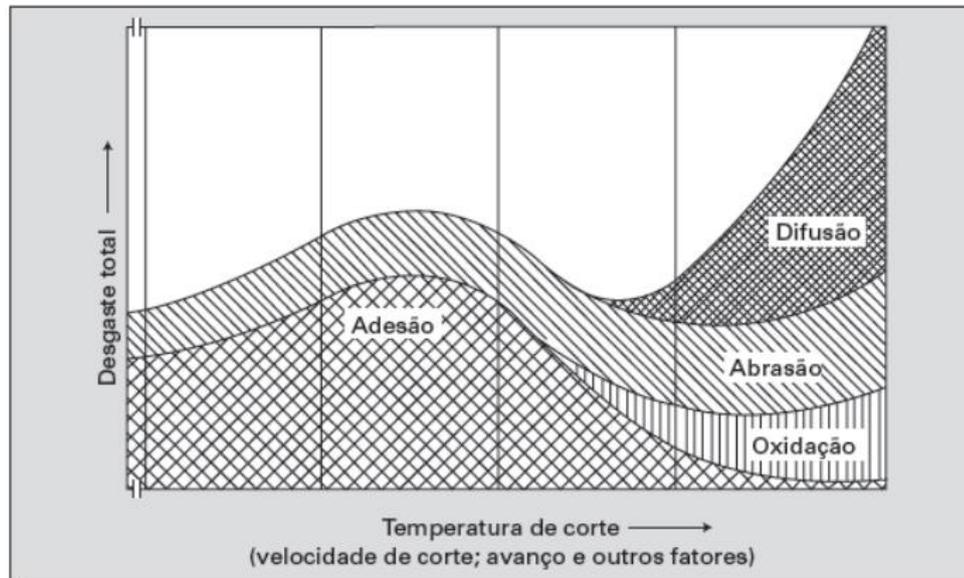
Fonte: Pinheiro (2018).

#### 2.4.1 Mecanismos de desgaste

Durante o processo de usinagem, a ferramenta está sujeita a diversos tipos esforços mecânicos e térmicos que produzem diversos mecanismos de desgaste. Os mecanismos são a adesão, difusão, abrasão e oxidação e todos eles estão ligados a temperatura. Conforme a

temperatura aumenta os mecanismos passam a atuar diretamente sobre a aresta de corte conforme a Figura 14.

Figura 14 - Mecanismos de desgaste em ferramentas em função da temperatura.



Fonte: Adaptado de Machado *et al.* (2009).

#### 2.4.1.1 Adesão

Adesão significa a recombinação gerada quando a ferramenta e o material da peça de trabalho entram em contato com a distância dos átomos. É o chamado fenômeno de soldagem a frio gerado pela deformação plástica sob pressão suficiente e temperatura, e é o resultado da força adesiva entre átomos pela deformação plástica ocorrida na área de contato real da superfície de atrito (ZHU; ZHANG; DING, 2013).

O fenômeno de adesão ocorre, geralmente, a baixas velocidades de corte, nas quais o fluxo de material sobre a superfície de saída da ferramenta se torna irregular. A aresta postiça de corte pode aparecer, e na sua presença o processo tem natureza menos contínua, principalmente se ela for instável. Sob tais condições, fragmentos microscópicos são arrancados da superfície da ferramenta e arrastados junto ao fluxo de material adjacente à interface (MACHADO *et al.*, 2009).

#### 2.4.1.2 Abrasão

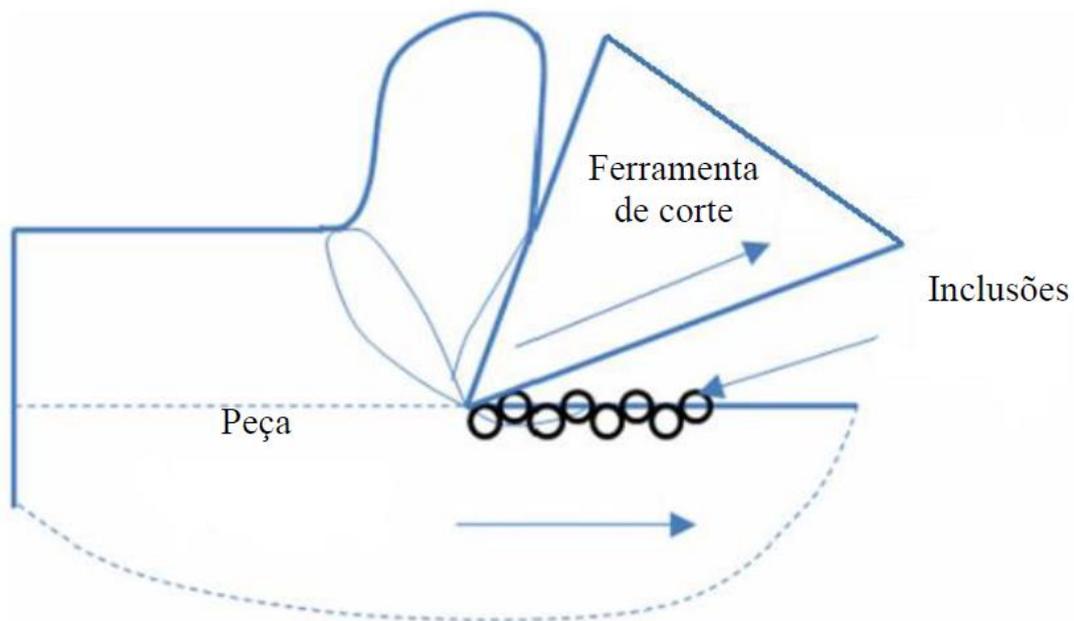
O desgaste abrasivo é o dano em uma superfície, que aparece devido ao movimento em relação à superfície de partículas mais duras ou ainda inclusões duras presas na interface peça-

ferramenta. O desgaste abrasivo presente em ferramentas de metal-duro e ferramentas cerâmicas são semelhantes (ZHU; ZHANG; DING, 2013).

No caso de as partículas estarem soltas, a abrasão é considerada de "três corpos", na qual as partículas "duras" são livres para rolar e escorregar. entre as duas superfícies. No caso de as partículas emergirem de "uma" das superfícies: a abrasão é considerada de "dois corpos". O desgaste abrasivo pode envolver deformação plástica e fratura frágil, gerando perda ou deslocamento de material por microsulcamento, microcorte ou microlascamento (MACHADO et al., 2009).

Na Figura 15 encontra-se o diagrama esquemático do mecanismo de desgaste do tipo abrasão.

Figura 15 - Diagrama esquemático do mecanismo de desgaste tipo abrasão.



Fonte: Adaptado de Zhu; Zhang; Ding (2013).

#### 2.4.1.3 Difusão

De acordo com Diniz, Marcondes e Coppini (2013) a difusão entre ferramenta e cavaco é um fenômeno microscópico ativado pela temperatura na zona de corte.

Esse mecanismo envolve a transferência de material, no nível atômico, e é fortemente dependente da temperatura, do tempo e da solubilidade dos elementos envolvidos na zona de

fluxo (zona secundária de cisalhamento) Entende-se por solubilidade dos elementos envolvidos a afinidade química entre os constituintes, Nesse processo, o tamanho dos átomos é também muito relevante, Átomos menores que os da matriz podem formar soluções sólidas intersticiais, Átomos de mesmo tamanho, em relação aos da matriz, tendem a formar soluções sólidas substitucionais. Já átomos maiores que os da matriz não apresentam solubilidade para se difundir na matriz (MACHADO *et al.* 2009).

Como as ferramentas cerâmicas trabalham com velocidades de corte maiores que as ferramentas de metal duro, o processo de difusão é acelerado devido as temperaturas mais elevadas durante a usinagem do material (EZUGWU; WANG; MACHADO, 1998).

#### 2.4.1.4 Oxidação

Devido as altas temperaturas durante o processo de corte e a presença de ar ou água, contida nos fluidos de corte, ocorrerá a oxidação na maioria dos metais. O desgaste gerado pela oxidação se forma na extremidade do contato cavaco-ferramenta devido ao acesso de ar nesta região, sendo esta uma possível explicação para o desgaste de entalhe (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

### 2.4.2 Tipos de desgaste

#### 2.4.2.1 Desgaste de flanco ( $V_B$ )

O desgaste de flanco ocorre na superfície de folga causado pelo contato entre ferramenta e peça. É o tipo de desgaste mais comum em processos de usinagem. Ocasiona deterioração do acabamento superficial da peça e porque também modifica totalmente a forma da aresta de corte original fazendo com que a peça saia da tolerância estabelecida conforme Figura 16 (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

Figura 16 - Desgaste de flanco.



Fonte: Sandvik (2020).

#### 2.4.2.2 Desgaste de cratera ( $K_T$ )

É o tipo de desgaste que ocorre na superfície de saída da ferramenta, causado pelo atrito entre ferramenta e cavaco. Pode não ocorrer em alguns processos de usinagem, principalmente quando se utiliza ferramentas de metal-duro recobertas, ferramentas cerâmicas ou quando o material da peça é frágil formando cavacos curtos. O mecanismo mais comum para a formação do desgaste de cratera é a difusão, podendo também ocorrer o mecanismo de abrasão e adesão. O crescimento do desgaste de cratera geralmente ocasiona a quebra da ferramenta conforme Figura 17 (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

Figura 17 - Desgaste de cratera.

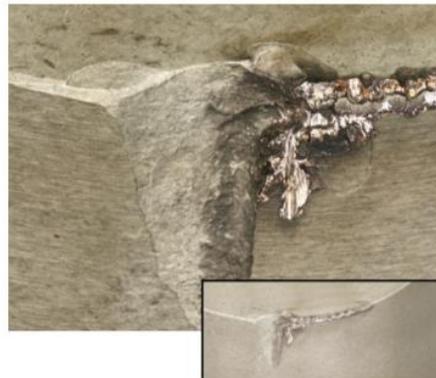


Fonte: Sandvik (2020).

#### 2.4.2.3 Desgaste tipo entalhe

O desgaste do tipo entalhe é um dano excessivo formado na superfície de saída da ferramenta e em sua lateral na direção da profundidade de corte. É um desgaste do tipo adesivo, porém causado por um mecanismo de oxidação. Ocorre uma solda do material da peça no material da ferramenta de corte através da pressão do cavaco, e em seguida a deformação da superfície desgastada. Isto ocorre devido ao desgaste ser localizado na extremidade da aresta da ferramenta, onde há presença de oxigênio na zona de corte. A superfície da aresta de corte é afetada, conseqüentemente influenciando no acabamento superficial da peça usinada conforme Figura 18 (BRAGA, 2017).

Figura 18 - Desgaste do tipo entalhe.



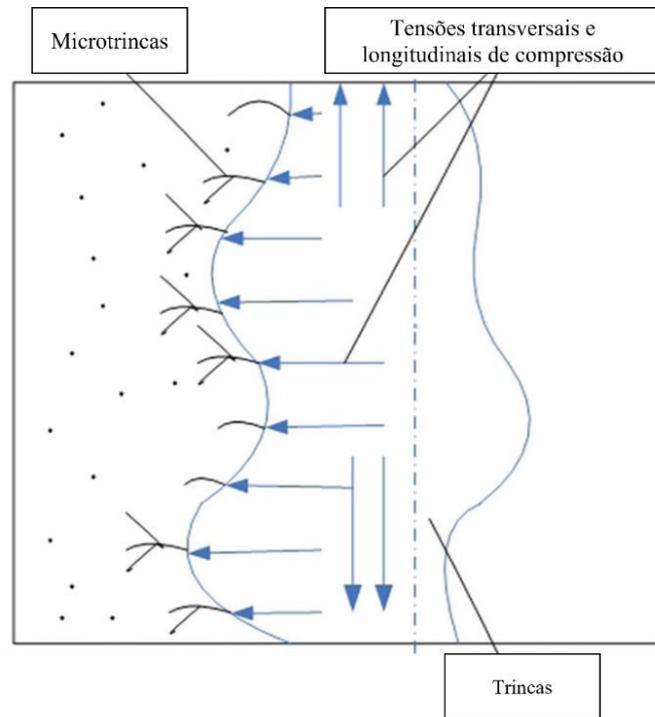
Fonte: Sandvik (2020).

#### 2.4.2.4 Trincas

São causados pela variação da temperatura e/ou variação dos esforços mecânicos. Os fatores que geram uma variação de temperatura e esforços durante o processo de usinagem são: corte interrompido, acesso irregular ao fluido de corte, variação da espessura de corte e solda da pastilha no porta-ferramenta. A avaria do tipo trinca irá levar a perda gradual e progressiva da ferramenta de corte (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

Na Figura 19 está mostrado o diagrama esquemático de propagação de uma trinca em uma ferramenta de corte.

Figura 19 - Diagrama esquemático de propagação das trincas em uma ferramenta de corte.



Fonte: Adaptado de Zhu; Zhang; Ding (2013)

#### 2.4.2.5 Lascamento

É um tipo de avaria da ferramenta, ao contrário dos desgastes frontal e de cratera que retiram continuamente partículas muito pequenas da ferramenta, no lascamento as partículas maiores são retiradas de uma só vez. Ocorrem principalmente em ferramentas com material frágil e/ou com arestas de corte pouco reforçadas. Prejudicam o acabamento superficial da peça e levam a quebra da ferramenta caso continuem crescendo conforme Figura 20 (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

Figura 20 - Desgaste do tipo lascamento.



Fonte: Sandvik (2020).

#### 2.4.2.6 Deformação plástica

Essa deformação plástica da aresta sob altas tensões de compressão ocorre na usinagem dos materiais de elevada dureza. As combinações de altas tensões de compressão com altas temperaturas na superfície de saída podem causar a deformação plástica em arestas de aço rápido ou metal duro. Isso geralmente ocorre a altas velocidades de corte e de avanço e leva a uma falha catastrófica conforme Figura 21 (MACHADO et al., 2009).

Figura 21 - Desgaste do tipo deformação plástica.



Depressão da aresta



Impressão da aresta

Fonte: Sandvik (2020).

#### 2.4.2.7 Aresta postiça de corte (APC)

A aresta postiça de corte é definida como uma camada de material encruado à superfície de saída de contato entre o cavaco e a superfície de saída da ferramenta. Logo, a aresta postiça de corte é constituída de material da peça usinada que se acumula na superfície de saída da ferramenta. Com o passar do tempo a aresta de corte postiça passa a desempenhar a função da aresta de corte prejudicando o acabamento superficial e danificando a ferramenta.

Segundo Diniz, Marcondes e Coppini (2013) a aresta postiça de corte tende a crescer gradualmente até um certo momento que se rompe bruscamente, causando uma perturbação dinâmica. Ao se romper a aresta postiça arranca partículas da da ferramenta, gerando um desgaste frontal muito acentuado mesmo em baixas velocidades de corte. Na Figura 22 está mostrada a aresta postiça de corte em uma ferramenta de corte.

Figura 22 – Aresta postiça de corte.



Fonte: Sandvik (2020).

#### 2.4.2.7 Quebra da ferramenta

A quebra da ferramenta pode ocorrer inesperadamente devido a avarias (trincas ou lascamentos) ou desgastes que evoluíram ao continuar o processo de usinagem. A quebra da ferramenta ocasiona dano não somente à aresta danificada, mas toda a pastilha, porta-ferramenta e na própria peça conforme Figura 23 (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

Figura 23 - Quebra de uma ferramenta cerâmica.



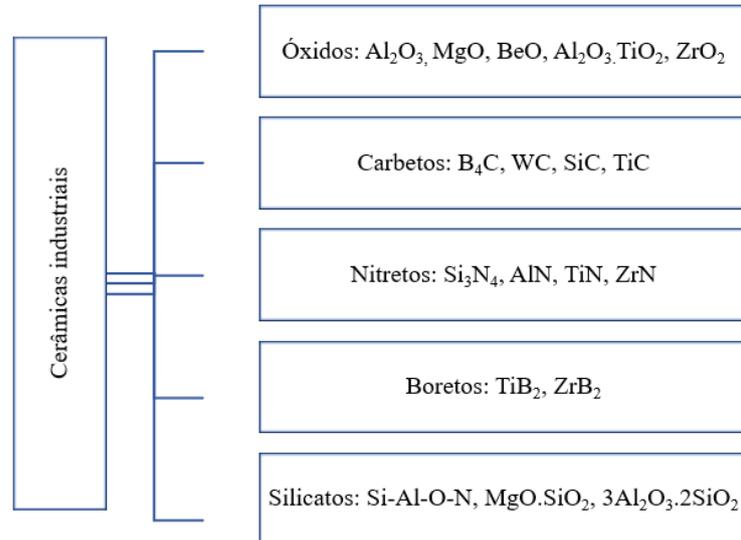
Fonte: Sandvik (2020).

## 2.5 MATERIAIS CERÂMICOS

Materiais cerâmicos são uma importante classe de materiais que tem sido empregado em diversos ramos tecnológicos. Materiais cerâmicos são geralmente substâncias cristalinas inorgânicas, sendo o vidro uma exceção, compostas por uma ligação iônica ou covalente entre metais e não metais. Os materiais cerâmicos têm como característica a baixa condutividade térmica, baixa condutividade elétrica, baixa densidade, dureza à quente, alta resistência ao desgaste e alta resistência a corrosão e boa estabilidade química. Como desvantagem os materiais cerâmicos possuem alta fragilidade e baixa tenacidade (RAKSHIT; DAS, 2019)

Na Figura 24 encontra-se a classificação dos materiais cerâmicos industriais e no Quadro 7 as propriedades mecânicas e físicas das cerâmicas industriais.

Figura 24 - Classificação das cerâmicas industriais.



Fonte: Adaptado de Rakshit, Das (2019)

Quadro 7 - Propriedades mecânicas e físicas das cerâmicas industriais.

Cerâmica Industrial	Módulo de Elasticidade (GPa)	Resistência a Flexão (MPa)	Tenacidade a Fratura ( $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ )	Condutividade Térmica (W/mK)	Coefficiente de expansão térmica (20 - 1000° C) ( $10^{-6}/^\circ\text{C}$ )
Alumina (99,9%)	393	455	5,0 - 6,0	35,0	6,5 - 9,0
Zirconia	160 - 240	970 - 1350	10,0 - 12,0	1,5 - 2,5	7,0 - 11,0
Carbeto de Silício	480	550 - 1300	4,6	30 - 200	3,2 - 5,0
Nitreto de Silício	290 - 320	900	6,0	20,0 - 30,0	2,6 - 3,7
Carbeto de Tungstênio	730	482 - 1200	2,0 - 3,8	120,0	4,5 - 7,1
ZTA - 14	338	586	6,0	24,0	6,0 - 7,1
Titanato de Alumínio	5 - 30	60	0,4 - 4,0	1,4 - 2,5	1,5 - 3,5

Fonte: Adaptado de Rakshit, Das (2019)

### 2.5.1 Alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )

Óxido de alumínio ou Alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) é um importante material cerâmico com aplicações em diversas áreas tecnológicas tais como materiais refratários, ferramentas de corte, dissipadores de calor, esferas para rolamentos, dentre outras aplicações que necessitem de um material com boa estabilidade química, resistência a oxidação, baixa densidade, baixo coeficiente de condução térmico e dureza elevada a altas temperaturas. Contudo seu uso em componentes estruturais é restrito devido a sua baixa tenacidade e alta fragilidade (SINGH *et al.*, 2018).

As ferramentas de corte de alumina se dividem em grupos que são caracterizados pela porcentagem em peso em sua composição. As cerâmicas consideradas puras com 98% de alumina em sua fase  $\alpha$  em sua composição e as que contenham 90% de alumina com adição de outros óxidos como  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  e ZTA (DINIZ; MACHADO; CORRÊA, 2016; NORFAUZI *et al.* 2019).

Alumina tenacificada com zircônia (ZTA) é um material cerâmico composto de óxido de alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) e óxido de zircônia ( $\text{ZrO}_2$ ). Quando adicionada a alumina, o óxido de zircônia atua inibindo o crescimento do contorno de grão (NORFAUZI *et al.*, 2019).

As ferramentas de corte de ZTA apresentam uma melhora considerável na dureza e resistência mecânica quando comparada com as ferramentas de alumina pura (SINGH *et al.*, 2018).

Diversos autores têm pesquisado como melhorar as propriedades das ferramentas cerâmicas utilizando óxidos em sua composição como Kumar, Durai e Sornakumar (2004) que desenvolverem em seu estudo uma ferramenta cerâmica experimental a base de óxido de alumina (95% em peso) com granulometria de 1.2  $\mu\text{m}$  dopadas com óxido de cério (5% em peso) e com uma granulometria de 5  $\mu\text{m}$ . As ferramentas foram comparadas com uma ferramenta cerâmica comercial (ZTA) e e uma ferramenta experimental de cerâmica pura. Os ensaios foram realizados no torneamento de uma liga de ferro fundido cinzento (170 BHN). Observou-se que a dureza da ferramenta de alumina-cério é superior à da alumina pura devido a sua maior densificação. Durante os ensaios foi observado que a ferramenta é comparável com a ferramenta cerâmica comercial e apresentou um menor desgaste de flanco e melhor acabamento superficial.

Singh, Mondal e Mandal (2016) estudaram o desenvolvimento de uma ferramenta cerâmica experimental de alumina-zircônia dopada com óxido de cromo. Sua aplicação se deu na usinagem de torneamento da liga de aço AISI 4340.

Singh *et al.* (2018) desenvolveram ferramentas cerâmicas experimentais a base de óxido de alumina – ZTA dopadas com óxido de magnésio. Foram testadas seis composições diferentes variando de 0% de MgO até 1% de MgO, sendo o incremento entre cada composição de 0,2%. O estudo concluiu que a composição com 0.6% de peso de MgO -ZTA apresentou os melhores resultados quanto a dureza, 17.04 GPa, e tenacidade a fratura 5.09 MPa.m<sup>1/2</sup>. Na usinagem em torneamento da liga de aço AISI 4340, a ferramenta experimental apresentou melhores resultados quando a velocidade de corte se situava entre 300 – 320 m/min.

Norfauzi *et al.* (2019) que estudaram a fabricação e a aplicação de uma ferramenta cerâmica experimental de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ZrO<sub>2</sub>-Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> alterando a composição dos pós de alumina e zircônia, 75 – 95% para Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e 25 – 5% de ZrO<sub>2</sub>, e mantendo a composição de 0.6% de Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

## 2.6 METODOLOGIA DA SUPERFÍCIE DE RESPOSTA

A Metodologia da Superfície de Resposta (MSR) é um conjunto de técnicas matemáticas e estatísticas utilizadas para desenvolver, implementar e otimizar processos. É também utilizada no desenvolvimento e formulação de novos produtos e na melhoria dos já existentes. De acordo com Myers, Montgomery e Anderson-Cook (2016) a aplicação da metodologia da superfície de resposta se dá quando se deseja mapear uma superfície sobre uma região de interesse, otimizar uma resposta e determinar as condições de operação que melhor se ajustem ao processo ou produto.

O método da superfície de resposta tem como objetivo descrever o comportamento de uma variável resposta ou um conjunto de variáveis respostas com base em uma equação polinomial que é modelada a partir dos dados experimentais (BEZERRA *et al.*, 2008). A relação entre resposta e os fatores está de acordo com a Equação 5.

$$\eta = f(x_1, x_2, \dots, x_N) \quad (5)$$

Onde  $\eta$  é a resposta,  $f$  é a função desconhecida da resposta e  $x_1$ ,  $x_2$  e  $x_n$  são os fatores independentes,  $n$  é o número de fatores e  $\varepsilon$  é o erro estatístico que representa outra fonte de variações que não são expressas através da função  $f$ .

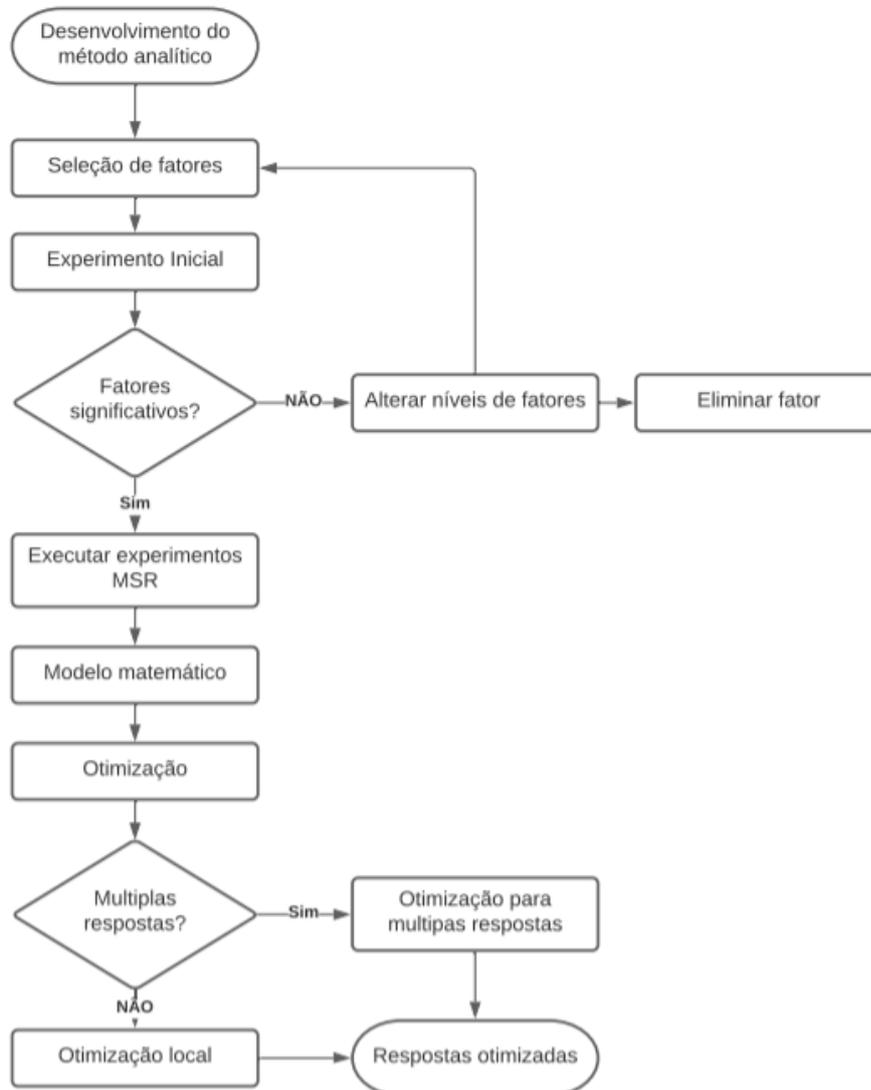
A metodologia de superfície de resposta faz uso dos testes de hipóteses, análises de variância (ANOVA) e regressão (Método dos Mínimos Quadrados) para criar os modelos e o

cálculo de Gradientes, Lagrangeanas e Hessianas das funções geradas, para a localização de pontos estacionários (PAIVA, 2012)

Diversos autores têm aplicado o uso do MSR no estudo de processos de usinagem como por exemplo Paiva (2012) que estudou a usinagem de torneamento do aço ABNT 52100 utilizando ferramentas cerâmicas, Sarikaya e Güllü (2014) que aplicaram a MSR na usinagem de torneamento do aço AISI 1050 para determinar a melhor condição de lubro-refrigeração em relação a resposta de rugosidade  $R_a$  e  $R_z$ . Destaca-se também, o trabalho de Rajmohan; Palanikumar (2013) que aplicaram o MSR utilizando um planejamento do tipo composto central para determinar os parâmetros de ótimo na usinagem de furação de uma matriz híbrida de alumínio Al 356 reforçada com carbeto de silício e mica; e o trabalho de Hessainia *et al.* (2013) que desenvolveram um modelo para predição dos valores de rugosidade  $R_a$  e  $R_t$  para usinagem de torneamento da liga 42CrMo4 utilizando uma ferramenta cerâmica à base de  $Al_2O_3 + TiC$ .

Na Figura 25 está mostrado um fluxograma das etapas para aplicação do método de superfície de resposta.

Figura 25- Etapas de aplicação do método de superfície de resposta.



Fonte: Adaptado de Candiotti *et al.* (2014).

### 2.6.1 Modelos de primeira ordem

Em primeiro momento, a forma de relacionamento entre os fatores e as respostas é desconhecido, portanto é necessário encontrar uma aproximação para o relacionamento entre a variável resposta,  $Y$ , e as variáveis dependentes ( $X_i, X_{ii}, \dots, X_n$ ). O modelo de primeira ordem pode ser definido conforme a Equação 6:

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i + \sum_{i=1 \leq i \leq j}^k \beta_{ij} X_i X_j + \varepsilon \quad (6)$$

Onde  $\beta_0$ ,  $\beta_i$  e  $\beta_{ij}$  são os coeficientes polinomiais,  $X_i$  são os fatores independentes,  $\varepsilon$  é o erro residual associado aos experimentos,  $k$  é o número de variáveis e  $Y$  é a resposta.

Para determinar a relação entre fatores e resposta, pode-se utilizar os planejamentos experimentais do tipo fatorial completo, fatorial fracionado ou Plackett-Burman. A superfície gerada não deve apresentar nenhuma curvatura.

### 2.6.2 Modelos de segunda ordem

Quando o resultado de um modelo de primeira ordem se aproxima da solução ótima, pode-se criar um modelo que incorpora a curvatura da superfície de resposta. segundo Myers, Montgomery e Anderson-Cook (2016). Os modelos de segunda ordem são caracterizados de acordo com a Equação 7.

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i=1}^k \beta_{ij} X_i X_j + \varepsilon \quad (7)$$

Onde  $\beta_0$  e  $\beta_i$  são os coeficientes polinomiais,  $\beta_{ij}$  é o coeficiente da interação dos fatores,  $\beta_{ii}$  é o coeficiente do fator quadrático,  $X_i$  são os fatores independentes,  $\varepsilon$  é o erro residual associado aos experimentos,  $k$  é o número de variáveis e  $Y$  é a resposta.

O planejamento experimental para os modelos de segunda ordem mais comumente utilizados são fatoriais completo do tipo  $3^k$ , Box-Behnken, Delineamento Composto Central e Doehlert (BEZERRA et al., 2008).

### 2.6.3 Delineamento de composto central

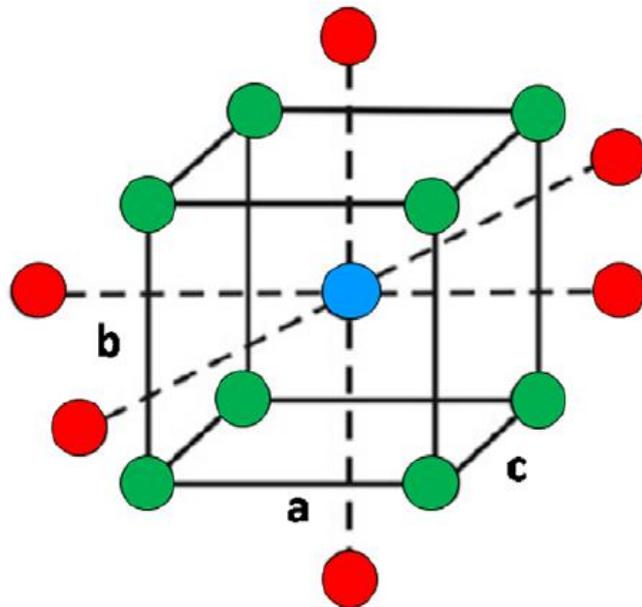
O experimento do tipo Delineamento Composto Central (DCC) é constituído de um fatorial completo ou fracionado, um grupo de pontos axiais distantes de uma distância  $\alpha$  do ponto central e um conjunto de pontos centrais. Este arranjo é largamente utilizado para ajustar um modelo de segunda ordem devido a sua relativa eficiência com respeito ao número de experimentos necessários (PAIVA, 2012)

De acordo com Myers, Montgomery e Anderson-Cook (2016) os pontos fatoriais estão correlacionados aos termos de primeira ordem e interação de fatores, o ponto central representa a curvatura da superfície (caso ela ocorra) e os pontos axiais representam uma estimativa para os termos de segunda ordem. A distância dos pontos axiais em relação ao ponto central é comumente representada por  $\alpha$  e confere ao arranjo a propriedade de “Rotacionalidade”.

Rotacionalidade é a capacidade que os arranjos de superfície de respostas têm de apresentar a mesma variância para a resposta prevista para todos os pontos presentes em uma circunferência de raio  $\alpha$  (MYERS, MONTGOMERY e ANDERSON-COOK, 2016).

Na Figura 26 está mostrado um planejamento experimental do tipo composto central em que os círculos verdes representam o fatorial completo, os círculos vermelhos os pontos axiais e o círculo azul o ponto central.

Figura 26 - Representação esquemática de um planejamento do tipo Composto Central.



Fonte: Adaptado de Candiotti *et al.*, 2014

De acordo com BEZERRA *et al.*, (2008) para que o planejamento de composto central seja uniforme e apresente a propriedade de rotacionabilidade deve possuir as seguintes características:

- O número de experimentos deve seguir conforme a Equação 8.

$$N = k^2 + 2k + C_p \quad (8)$$

Onde  $k$  é o número de fatores, e  $C_p$  é o número de réplicas do ponto central.

- Os valores de  $\alpha$  estão relacionados ao número de fatores no experimento e seu valor é 1,41; 1,68 e 2,00 para dois, três e quatro fatores respectivamente.
- Todos os fatores são estudados em cinco níveis ( $-\alpha, -1, 0, 1, \alpha$ )

#### 2.6.4 Blocos

De acordo com Myers, Montgomery e Anderson-cook (2016) em um planejamento experimental pode-se definir blocos como sendo um agrupamento de dados para eliminar fontes de variabilidade que não são de interesse do pesquisador

Um planejamento experimental pode ser composto em blocos ortogonais se os efeitos dos blocos não afetem as estimativas dos parâmetros da superfície de resposta, para isto é necessário que:

- Cada bloco deve possuir um planejamento de primeira ordem ortogonal.
- A fração da soma total dos quadrados para cada contribuição da variável de entrada deve ser igual a fração das observações totais que ocorrem em cada bloco.

#### 2.6.5 Determinação das condições de ótimo

As superfícies geradas por modelos lineares são utilizadas para determinar as condições de ótimo de operação do modelo proposto. Contudo, a região determinada pelo modelo pode não compreender os pontos de ótimo por razões físicas ou experimentais. Neste caso, deve-se encontrar a melhor condição operacional dentro dos limites do modelo.

Para modelos de segunda ordem (quadráticos), o ponto crítico pode ser caracterizado como máximo, mínimo ou sela. É possível calcular as coordenadas do ponto crítico através da primeira derivada da função matemática, que descreve a superfície de resposta e equivale a zero, conforme a Equação 9.

$$y = f(x_1, x_2 \dots x_n) \quad (9)$$

Onde  $y$  é a função resposta e  $x_1, x_2$  e  $x_n$  as variáveis dependentes.

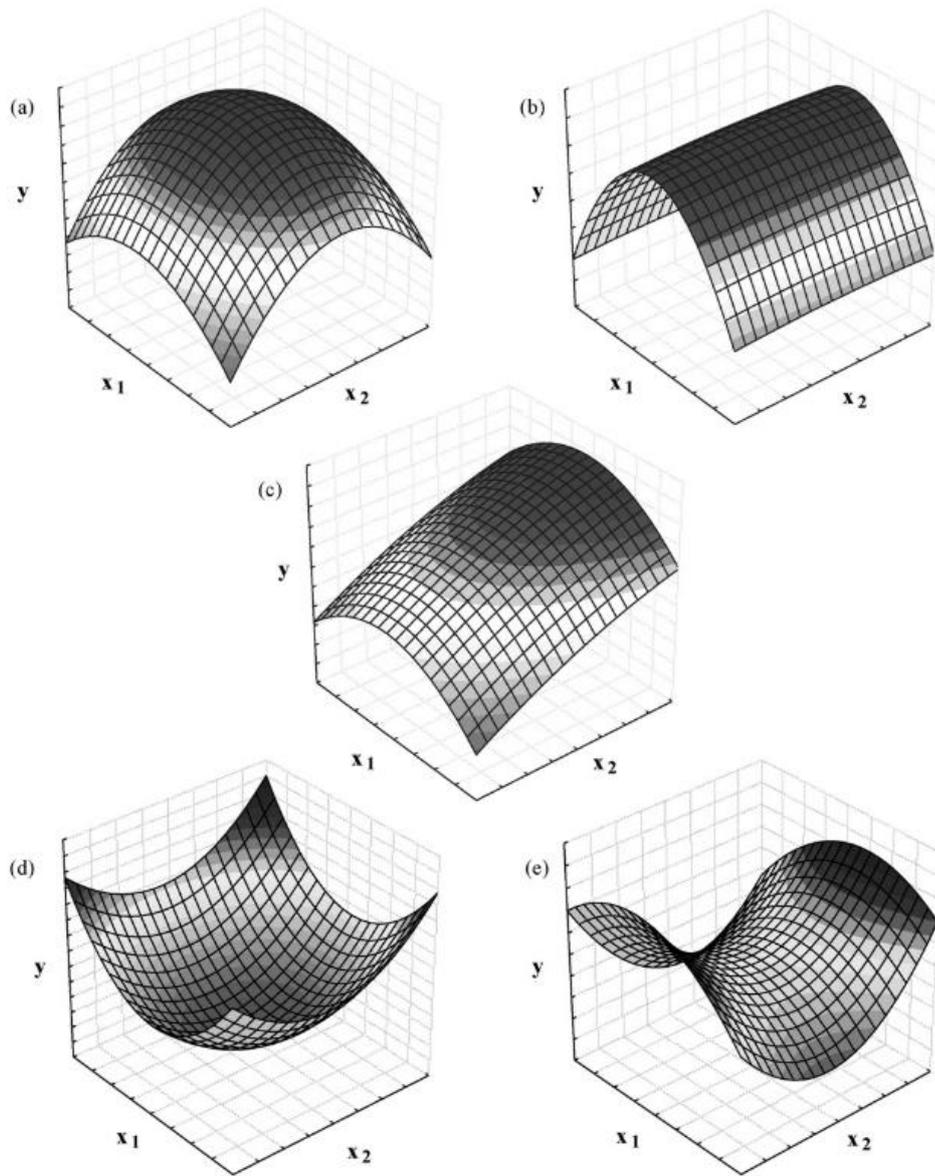
O ponto estacionário é definido através da Equação 10.

$$\frac{\partial y}{\partial x_n} = 0 \quad (10)$$

A visualização da equação do modelo previsto pode ser obtida pelo gráfico de resposta à superfície. Esta representação gráfica é uma superfície n-dimensional no (n+ 1) espaço dimensional. Normalmente, uma representação bidimensional de uma superfície tridimensional pode ser desenhada. Deste modo, se houver três ou mais variáveis no modelo, a visualização da superfície só é possível se uma ou mais variáveis assumirem um valor constante. Na Figura 23 é possível observar os tipos de superfície de resposta que podem ser obtidos através de um modelo quadrático. É possível definir as superfícies mostradas na Figura 27 como:

- a) O ponto de máximo se encontra dentro do intervalo do experimento.
- b) O ponto crítico é um platô.
- c) O ponto de máximo está fora do intervalo contido no experimento.
- d) O ponto de mínimo se encontra dentro do intervalo do experimento
- e) O ponto estacionário é o ponto de sela da superfície.

Figura 27 - Representação dos tipos de superfície de resposta.



Fonte: Bezerra *et al.* (2008)

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção serão descritos os materiais utilizados para a realização dos ensaios de torneamento tais como o material usinado, material da ferramenta, centro de torneamento e sensores utilizados. Ainda serão descritos o planejamento experimental utilizado e análises estatísticas realizadas.

#### 3.1 CORPO DE PROVA

O material utilizado neste trabalho foi um corpo de prova de formato cilíndrico do material VAT 80A®. Suas dimensões iniciais eram de um diâmetro de 86 mm e um comprimento de 226 mm, Figura 28. O material foi doado pela empresa *Villares Metals* na condição de solubilizado e envelhecido de acordo com a norma SAE J775 (FARINA; LIBERTO; BARBOSA, 2013).

Figura 28 – Corpo de prova utilizado no trabalho com  $\varnothing$  86 mm x 226 mm.



Fonte: Autoria própria.

### 3.2 EQUIPAMENTOS PARA OS ENSAIOS DE TORNEAMENTO E AQUISIÇÃO DE DADOS

O estudo foi realizado no Laboratório de Estudo da Usinagem do Departamento de Materiais e Tecnologia da Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá - UNESP. Para realização dos ensaios de torneamento utilizou-se o centro de torneamento CNC ROMI GL 240M, com potência instalada de 15 kW conforme Figura 29.

Figura 29 - Centro de torneamento CNC ROMI GL 240M

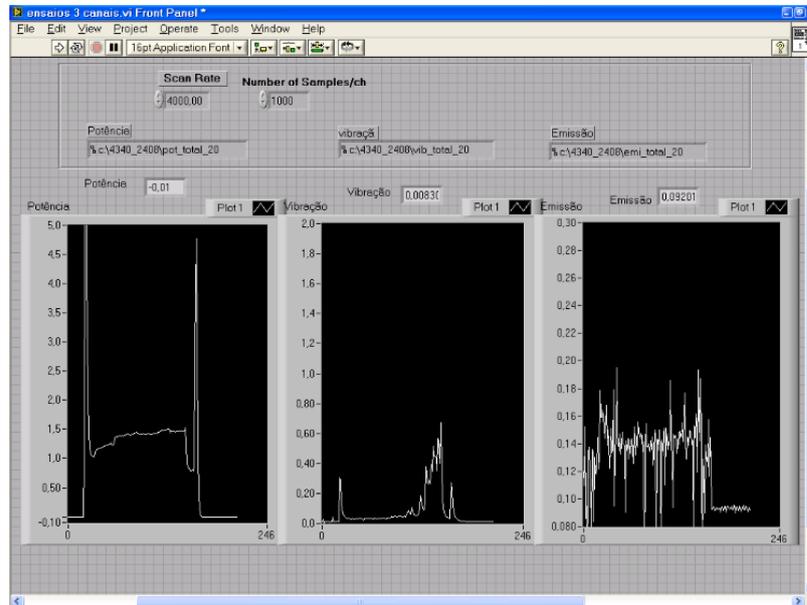


Fonte: ROMI (2021)

Instalado junto ao centro de torneamento, há um sistema de aquisição de dados para obter em tempo real os valores de potência de corte, vibração e emissão acústica do sistema. O sistema de aquisição é composto por um módulo de canais modelo BNC-2120 e uma placa de aquisição de dados modelo NI 6220, também da marca National Instruments.

Um programa supervisor foi criado utilizando o software LabView® para obter e armazenar os valores de potência, vibração e emissão acústica durante os ensaios. Os valores obtidos pelos sensores foram captados em unidade de tensão e o programa os registrava em um arquivo com extensão “.txt”. Na Figura 30 é possível visualizar a tela do programa supervisor gerado para captar e armazenar os dados durante os ensaios.

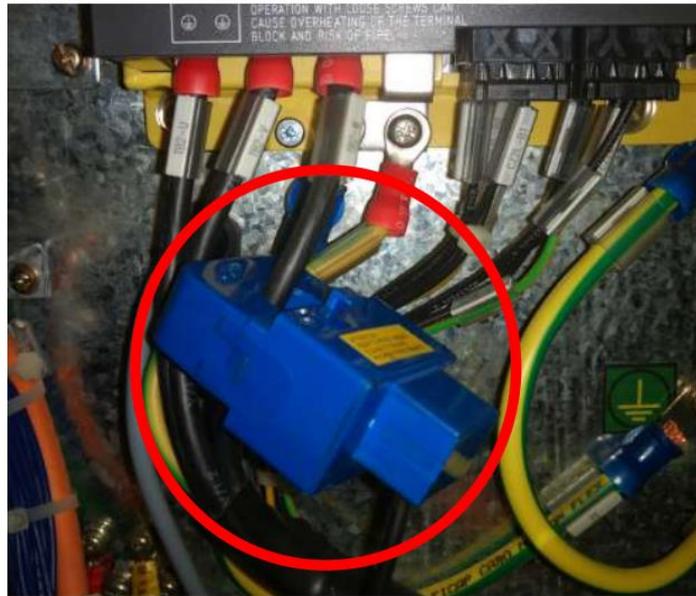
Figura 30 - Tela do programa supervisorio.



Fonte: Kondo (2019)

Para obtenção dos valores de potência de corte, utilizou-se um transformador de potência da marca LEM modelo AT-100, conectado a uma das fases de entrada do motor do centro de torneamento que é responsável pela rotação da placa e da peça conforme Figura 31. A resposta desse sensor é um valor de tensão proporcional à corrente elétrica de entrada do motor. A medida é realizada indiretamente para se obter a potência durante o ensaio de torneamento.

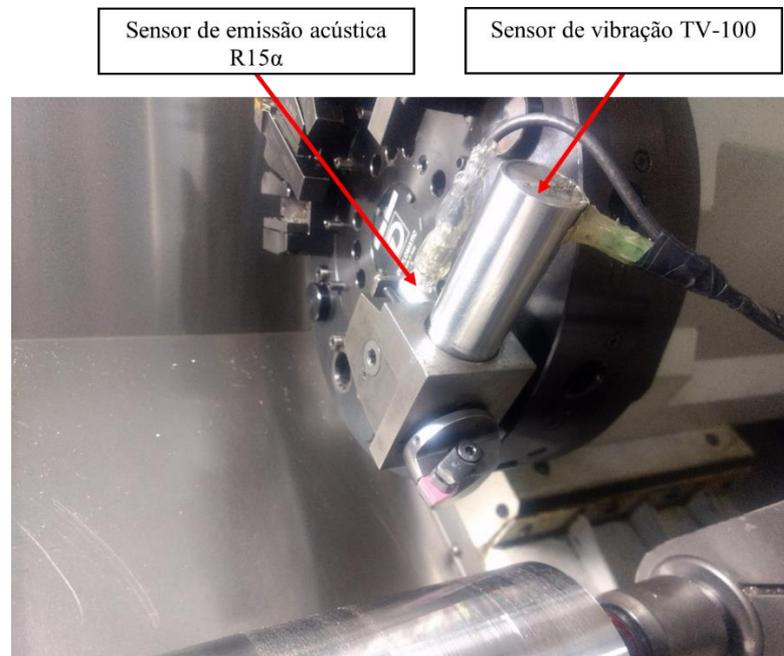
Figura 31 – Transformador de potência LEM modelo AT-100 conectado a uma das fases do motor.



Fonte: Pinheiro (2018)

Os sinais de vibração foram obtidos através de um sensor da marca Vibro Control modelo TV-100, com alcance de 25 mm/s em sinal RMS, conectado ao módulo de canais. Para obtenção dos valores de emissão acústica foi utilizado um sensor R15 $\alpha$  da marca Physical Acoustic Corporation, acoplado junto a um pré-amplificador modelo 1272 com saída RMS para o módulo de canais conforme Figura 32. Todos os sinais foram captados utilizando uma taxa de aquisição de 4000 Hz, isto é, 4000 pontos por segundo.

Figura 32 - Posicionamento dos sensores de vibração e emissão acústica no centro de torneamento.



Fonte: Autoria própria.

As Equações 11, 12 e 13 foram fornecidas pelos fabricantes dos sensores para conversão dos seus valores medidos em corrente para seus respectivos valores de potência (W), vibração (m/s) e emissão acústicas (RMS).

$$P_U = U_{cc} \times 10 \times 220 \times 0,79 \times \sqrt{3} \quad (11)$$

$$Vib = \frac{U_{cc} \times 25}{8} \quad (12)$$

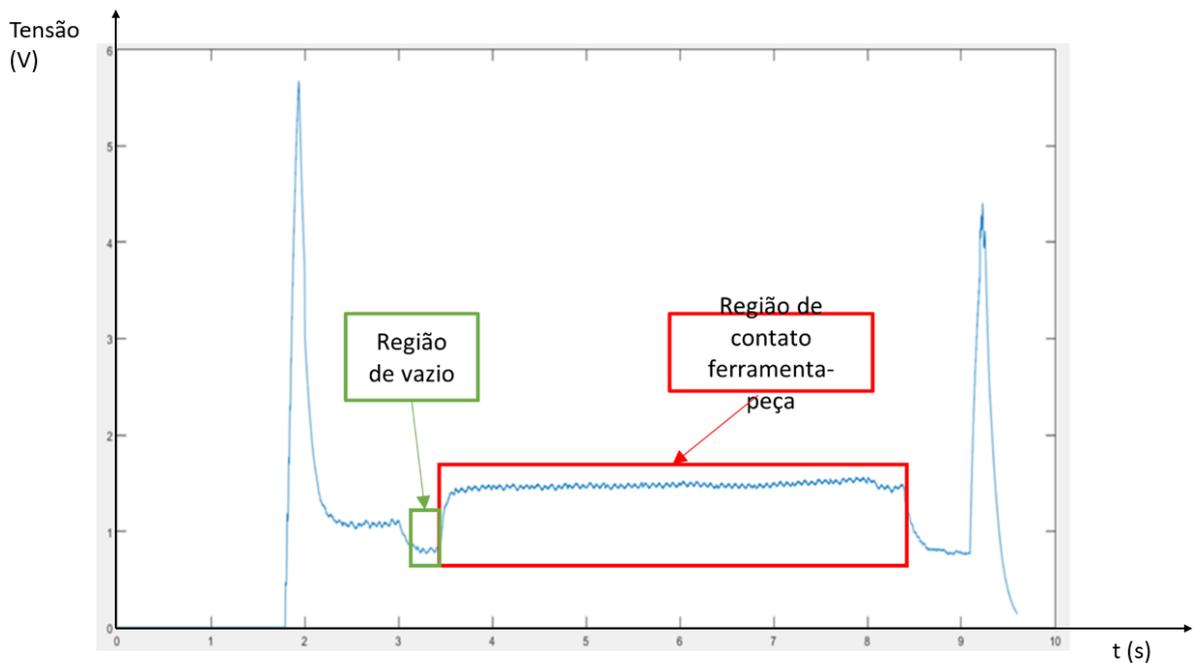
$$EA_{RMS} = U_{cc} \quad (13)$$

### 3.3 TRATAMENTO DE DADOS

Após os ensaios, fez-se necessário realizar o tratamento dos dados para posterior análise. Os dados foram processados em uma rotina criada no software MATLAB® R2015b. A rotina criada consiste em substituir o separador dos números decimais, converter a matriz de dados para uma coluna, transformar os valores de tensão obtidos para reais unidades tais como Watts

(potência), mm/s (vibração) e RMS (emissão acústica) e obter os valores de potência em vazio e valores máximos para o ensaio identificando as regiões que representam a partida do motor, a região de potência em vazio, a região de corte e a região de parada do motor conforme mostrado na Figura 33.

Figura 33 - Curva de potência de um ensaio obtida pela rotina criada no software MATLAB® R2015b.



Fonte: Autoria própria.

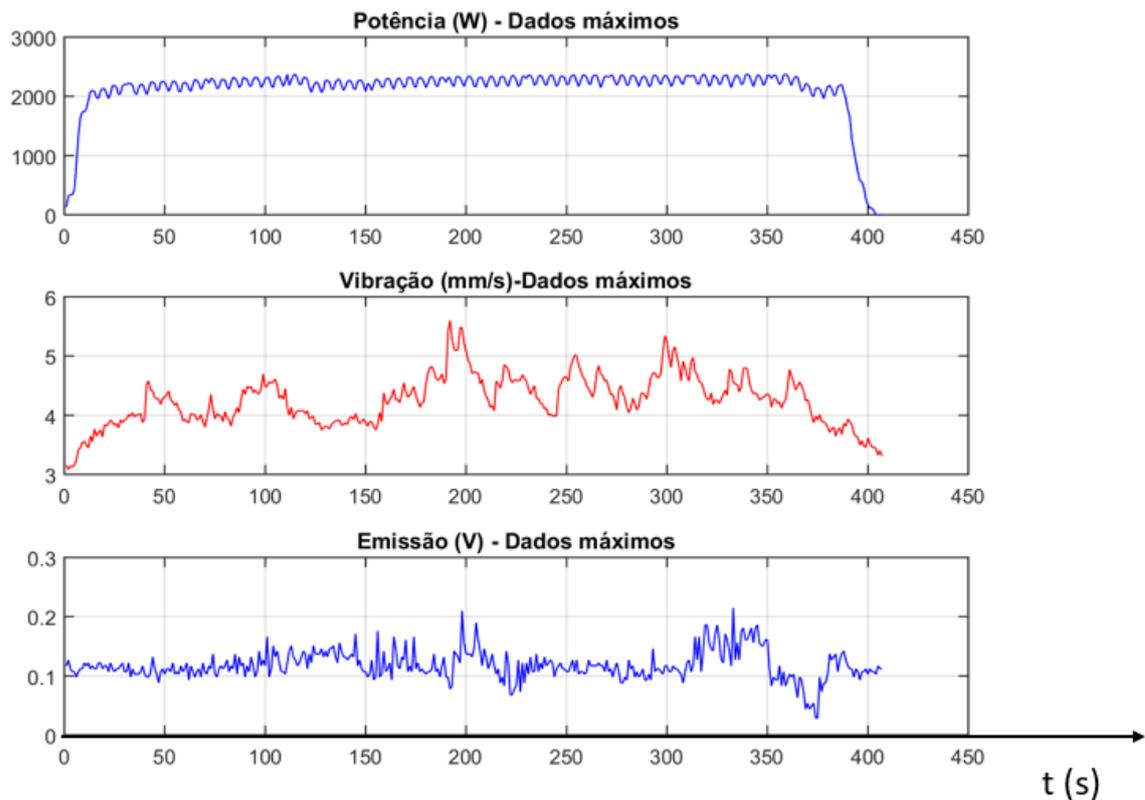
O eixo x do gráfico representa os valores referentes a duração do ensaio divididos por 10 enquanto o eixo y representa o valor de potência durante os ensaios em kW.

A região do vazio representa a potência em vazio do equipamento, isto é, a potência necessária para rotacionar a peça. Já a região de contato ferramenta-peça representa a potência em vazio somada com a potência necessária para remoção do material. Para se determinar a potência efetiva de corte primeiro é selecionada a região de corte e após é selecionada a região de potência em vazio, desta forma o algoritmo realiza a subtração e determina os valores de potência, vibração e emissão acústica.

Após a seleção das áreas de vazio e corte obteve-se as médias dos valores máximos, médios e mínimos para as três respostas do processo de torneamento (potência de corte, vibração e emissão acústica). Essa estratégia foi realizada para minimizar os possíveis erros provenientes do acabamento da peça, como pequenas elevações ou depressões, que poderiam

levar a um valor de vibração e emissão acústica que não representam o perfil das respostas durante os ensaios. Na Figura 34 está mostrada a resposta do gráfico das médias dos valores máximos.

Figura 34 - Gráfico gerado pelo algoritmo para tratamento de dados feito pelo software MATLAB.



Fonte: Autoria própria

A análise estatística das respostas dos ensaios foi realizada utilizando o software estatístico MINITAB 17.0 e os gráficos de superfície e contorno foram gerados utilizando o software RStudio.

### 3.4 MEDIÇÃO DE RUGOSIDADE

Para realizar a medição dos valores de rugosidade  $R_a$  e  $R_t$  foi utilizado o rugosímetro portátil da marca MAHR modelo MarSurf M300 + RD 18 com um *cut-off* de 0,8 mm de acordo com a norma ABNT NBR ISO 4288:2008 – Especificações geométricas do produto (GPS) –

Rugosidade: Método do Perfil – Regras e procedimentos para avaliação de rugosidade. As medidas foram realizadas na à direção do avanço da ferramenta e para cada ensaio foi realizado a medição em três pontos distintos da superfície da peça.

### 3.5 MEDIÇÃO DOS DESGASTES DAS FERRAMENTAS

A medição dos valores de desgaste de flanco das ferramentas ( $V_B$ ) foi realizada no Laboratório de Estudo da Usinagem do Departamento de Materiais e Tecnologia da FEG-UNESP. As imagens foram obtidas com o auxílio do sistema de medição Quick Scope SERIES 359 modelo QS-L2010ZB da marca Mitutoyo®.

Para os valores de desgaste de flanco medidos, optou-se por dividir seus valores pelo percurso de corte ( $L_c$ ). Tal decisão vem do fato que a cada ensaio o diâmetro do corpo de prova é reduzido afetando assim o comprimento de corte para cada combinação de fatores. O percurso de corte é definido conforme Equação 14.

$$L_c = \frac{\pi \times D \times L_f}{1000 \times f} \quad (14)$$

Na qual  $D$  é o diâmetro da peça em mm,  $L_f$  é o percurso de avanço em mm,  $f$  é o avanço em mm/rev.

### 3.6 ANÁLISE DOS CAVACOS GERADOS DURANTE O PROCESSO DE TORNEAMENTO

Após cada ensaio, os cavacos foram coletados e armazenados para posterior análise. A classificação dos cavacos foi realizada segundo a forma e o tipo de acordo com a norma ABNT NBR ISO 3685:2017. Os cavacos foram analisados com auxílio do sistema de medição Quick Scope SERIES 359 modelo QS-L2010ZB da marca Mitutoyo®.

### 3.7 FERRAMENTAS E PORTA-FERRAMENTAS

As ferramentas utilizadas neste trabalho foram desenvolvidas em escala laboratorial pelo Grupo de Estudo da Usinagem da Universidade Estadual Paulista – Campus de Guaratinguetá.

Para obter resultados de reprodutibilidade, as matérias primas foram caracterizadas quanto à pureza, tamanho médio de partículas, composições, tempo e meio de moagem, tempo e temperatura de secagem, estudo do percentual de adição de ligante, análise das cargas de compactação uniaxial e isostática para obtenção de densidade a verde superior 55%, variações de taxa de aquecimento, patamares de sinterização e resfriamento após sinterização. Para obtenção das propriedades desejadas, os processos de desenvolvimento das cerâmicas seguiram um controle rigoroso, e com reprodutibilidade.

Foram realizadas análises de retração linear, verificação de macro defeitos pós-sinterização e caracterizações de propriedades físicas e mecânicas. Para aplicação como ferramenta de corte o grupo de pesquisa tem observado que são necessárias dureza e tenacidade à fratura superior a 15GPa e 2,5 MPa.m<sup>1/2</sup> respectivamente, densidade relativa superior a 98%. Após definidos os parâmetros necessários que conduz a possibilidade de aplicação como ferramenta de corte, os blanks são submetidos ao processo de retificação de acordo com a norma ISO 1832, com especificação de tamanho e espessura dos chanfros, raios de ponta, para cada liga específica. Os métodos de desenvolvimento, caracterizações e o alinhamento para aplicações das ferramentas são fundamentados em literaturas e a experiência do grupo de pesquisa.

Para caracterizações das amostras cerâmicas, as ferramentas foram submetidas ao controle de qualidade pelo aspecto visual e dimensional com auxílio de um paquímetro, sendo em seguida analisada em um microscópio óptico para detecção de micro trincas. Posteriormente as cerâmicas foram submetidas à pesagem em balança analítica de alta precisão (0,0001 g) para análise de perda de massa dos corpos cerâmicos durante a sinterização, comparando as massas com a massa do corpo à verde. A densidade relativa foi avaliada utilizando o método de imersão proposto por Arquimedes. Os resultados da massa específica foram correlacionados com a massa específica teórica do material, avaliado através da regra das misturas, sendo obtida então, a densidade relativa das amostras.

As caracterizações microestruturais das cerâmicas sinterizados foram realizadas através da microscopia eletrônica de varredura (MEV). Para isso as amostras foram cortadas ao centro, embutidas, lixadas com sequência de lixas de 80, 120, 220, 320, 400, 500, 600, 1200, sendo seguida de polimento com pasta de diamante na granulometria de 3 e 1µm. Após acabamento com superfície espelhada, as cerâmicas foram desembutidas, colocadas em água destilada no ultrassom, secadas em estufa e submetidas ao tratamento térmico em temperatura de 1550 °C em um forno tubular vertical (Marca: Naber Therm –GMBh,made in Germany 30-3000 °C) sendo definido o tempo de 30 minutos como ideal para esta composição. As fases cristalinas

presentes nas misturas de pós e nas amostras sinterizadas foram avaliadas por difratometria de Raios-X, utilizando-se fichas de identificação compiladas pela Centro Internacional de Dados de Difração (*International Centre for Diffraction Data*).

Os estudos de tratamentos térmicos e as caracterizações microestruturais das cerâmicas sinterizadas foram realizadas no Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial na Divisão de Materiais (DCTA/AMR – São José dos Campos- Marca Zeiss, Modelo Leo 435VPI), enquanto as demais caracterizações descritas foram realizadas nos laboratórios da Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá (FEG-UNESP).

As ferramentas cerâmicas à base de alumina foram produzidas usando pós de alumina  $\alpha$  ( $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/ CT3000 LS SG da Almatís do Brasil Ltda.) e dois dopantes diferentes. São eles:

- Óxido de Magnésio (MgO da Magnesita do Brasil), com uma composição de 99,75% em peso de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e 0,25% em peso de MgO, com tamanho de partículas compreendido entre 0,40 - 0,60  $\mu$ m;
- Óxido de Cromo 3 com uma composição de 99,0% em peso de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e 1% em peso de Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

As características da Alumina CT3000 estão dispostas nas Tabelas 1 e 2.

Tabela 1 - Análise química da Alumina CT3000 LS SG. Valores em %.

Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	MgO	CaO
99,8	0,03	0,015	0,015	0,040	0,015

Fonte: Adaptado de Catálogo Almatís (2017)

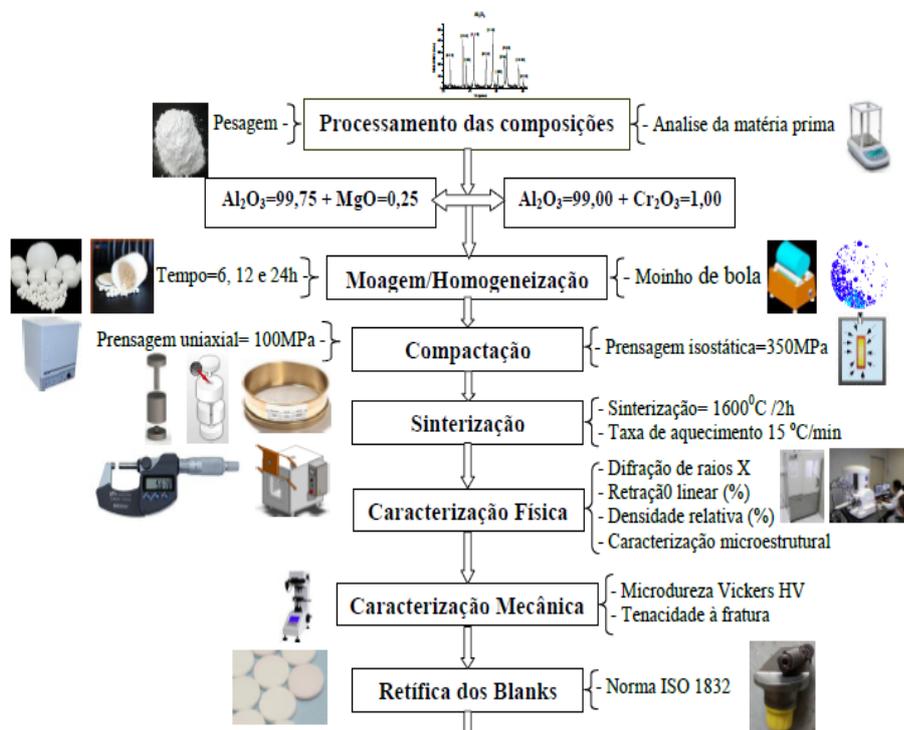
Tabela 2 - Propriedades da Alumina CT3000 LS SG.

Propriedade	Valor	Unidade
Tamanho da partícula – D50 Cilas	0,5	$\mu\text{m}$
Tamanho da partícula – D90 Cilas	2,0	$\mu\text{m}$
Densidade à verde	2,24	$\text{g}/\text{cm}^3$
Densidade sinterização (1540° C/ 1600 °C)	3,91/3,95	$\text{g}/\text{cm}^3$
Densidade à fogo (retração) (1540° C/ 1600 °C)	16,8 / 17,3%	%

Fonte: Adaptado de Catálogo Almatris (2017)

O processo de fabricação das ferramentas pode ser observado no fluxograma da Figura 35.

Figura 35- Processo de confecção das ferramentas experimentais cerâmicas.



Fonte: Adaptado de Sousa (2020).

Na Tabela 3 têm-se as propriedades das ferramentas cerâmicas experimentais.

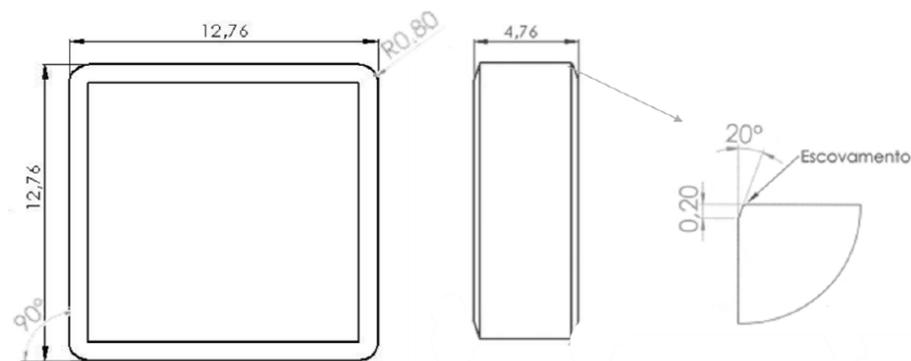
Tabela 3 – Propriedades das ferramentas cerâmicas experimentais.

Propriedade	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Densidade relativa (%)	98,25	98,14
Dureza (GPa)	14,16	20,54
Tenacidade à fratura (MPa.m <sup>1/2</sup> )	2,13 ± 0,25	3,25 ± 0,22

Fonte: Sousa (2020), Ribeiro (2020).

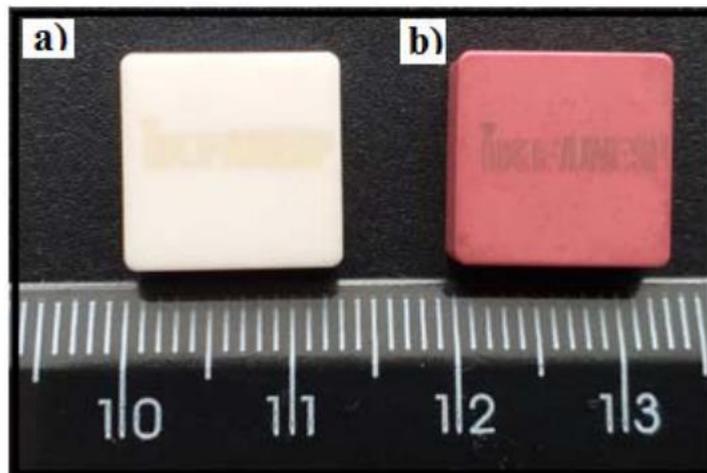
As ferramentas possuem geometria do tipo SNGN 120408 com dimensões 12,7 x 12,7 x 4,76 mm conforme Figura 36 e 37.

Figura 36- Desenho esquemático das dimensões da ferramenta cerâmica.



Fonte: Sousa (2020).

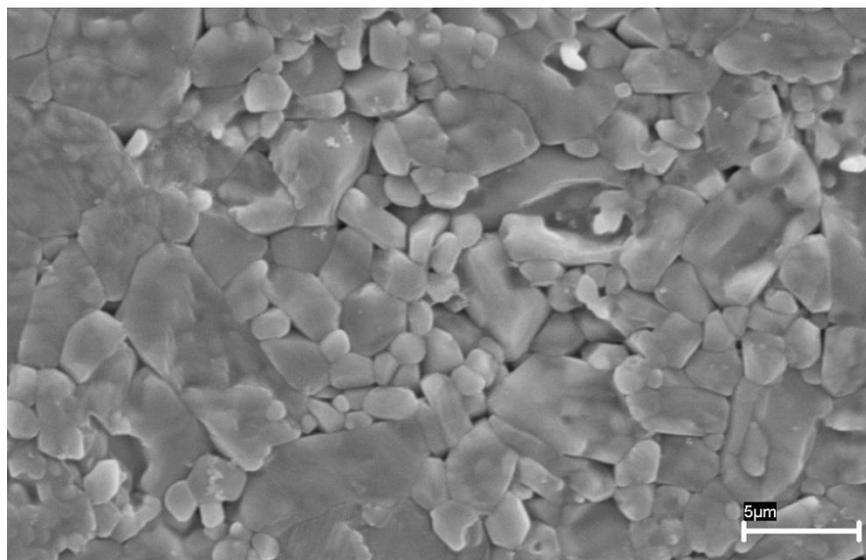
Figura 37– Ferramenta cerâmica de a)  $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{MgO}$  b)  $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Cr}_2\text{O}_3$



Fonte: Ribeiro (2020)

Nas Figuras 38 e 39 são mostradas as microestruturas das ferramentas alumina-magnésio e alumina-cromo respectivamente.

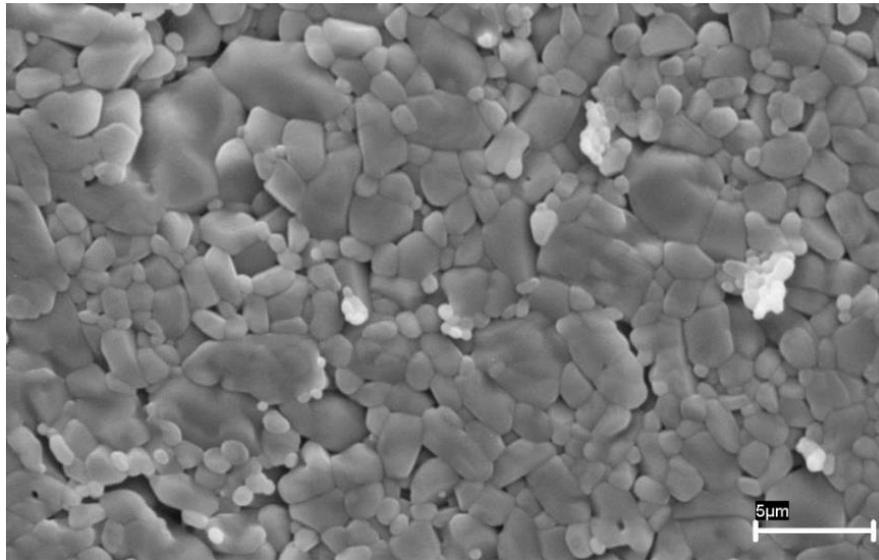
Figura 38– Microestrutura da pastilha cerâmica experimental de composição alumina-magnésio.



Fonte: UNESP (2020)<sup>2</sup>

<sup>2</sup> Material fornecido pelo grupo de pesquisa em usinagem do Departamento de Materiais e Tecnologia – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá – UNESP, Guaratinguetá/SP, 2020

Figura 39– Microestrutura da pastilha cerâmica experimental de composição alumina-cromo.



Fonte: UNESP (2020)<sup>3</sup>

O porta-ferramenta utilizado foi o modelo CAPTO B01T9032445 da empresa SECO TOOLS™, com ângulo de posição  $\chi_r = 75^\circ$ , ângulo de inclinação  $\lambda_s = -6^\circ$  e ângulo de saída  $\gamma_o = -6^\circ$ .

### 3.8 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL E ANÁLISE DE DADOS

Para cada tipo diferente de ferramenta utilizou-se um planejamento experimental específico uma vez que para a ferramenta cerâmica experimental de alumina-magnésio os trabalhos exploratórios de BONHIN et al., (2019) e KONDO et al., (2019) foram utilizados como base para determinação dos parâmetros de entrada, enquanto que para ferramenta cerâmica experimental de alumina-cromo realizou-se o trabalho exploratório. Após obtidos os resultados dos experimentos, realizou-se a análise de médias (ANOM) e a análise de variância (ANOVA) utilizando um intervalo de confiança de 95%. O objetivo destas análises é determinar quais os parâmetros são estatisticamente significativos e determinar os níveis dos fatores que produzam os menores valores da variável resposta.

<sup>3</sup> Material fornecido pelo grupo de pesquisa em usinagem do Departamento de Materiais e Tecnologia – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá – UNESP, Guaratinguetá/SP, 2020

Para que os resultados da análise de variância sejam efetivos é necessário que os resíduos dos valores possuam uma distribuição normal. Para verificar a normalidade dos dados foi empregado o teste de Anderson-Darling.

O teste de Anderson-Darling (AD) foi desenvolvido por T.W. Anderson e D.A. Darling e foi publicado em 1954 no artigo “*A test of goodness of fit*”. O teste de Anderson-Darling é utilizado para determinar se um conjunto de dados assume uma específica densidade de probabilidade, como por exemplo a distribuição normal. O teste AD é definido como conforme a Equação 15.

$$W_n^2 = -n - \frac{1}{n} \sum (2i - 1) \{ \log F^*(X_i) + \log(1 - F^*(X_{n+1-i})) \} \quad (15)$$

Na qual  $F^*(X_i)$  é a função cumulativa para a distribuição,  $X_i$ s são os dados ordenados e  $n$  é o tamanho da amostra.

As duas hipóteses assumidas no teste de Anderson-Darling para distribuição normal são:

$H_0$  = Os dados seguem uma distribuição específica

$H_1$  = Os dados não seguem uma distribuição específica

Utilizando um intervalo de confiança de 95% ( $\alpha = 0,05$ ), aceita-se a hipótese nula se o p-valor dos dados for superior a  $\alpha$  (p-valor  $\geq 0,05$ ) e rejeita-se a hipótese nula se o p-valor for inferior a  $\alpha$  (p-valor  $\leq 0,05$ ).

Uma vez rejeitada a hipótese nula faz-se necessário realizar uma normalização dos dados para que os pressupostos da análise de variância sejam cumpridos. Utilizou-se a transformação Box-Cox para normalizar os dados dos ensaios.

A transformação Box-Cox foi desenvolvida por G.E.P Box e D.R. Cox e foi publicada originalmente no trabalho “*An Analysis of Transformation*”. De acordo com Montgomery (2012), a transformação Box-Cox é utilizada para estabilizar a variância da resposta, aproximando a resposta de uma distribuição normal. A transformação Box-Cox pode ser definida conforme as Equações 16 e 17.

$$y^n \begin{cases} \frac{y^\lambda - 1}{\lambda y^{\lambda-1}} & \lambda \neq 0 \\ y \ln y & \lambda = 0 \end{cases} \quad (16)$$

$$\hat{y} = \ln^{-1} \left[ \left( \frac{1}{n} \sum \ln y \right) \right] \quad (17)$$

Onde  $\hat{y}$  é a média geométrica das respostas e  $\lambda$  é a estimativa de máxima verossimilhança de  $\lambda$  que valor em que a soma dos quadrados do erro é mínima.

O valor de  $\lambda$  é usualmente escolhido quando se realiza a análise gráfica dos valores da soma dos erros pelo valor de  $\lambda$  e escolhendo o valor que minimiza os valores da soma dos erros.

### 3.8.1 Ferramenta Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + MgO

O planejamento experimental escolhido para as ferramentas de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + MgO foi o composto central com três fatores. Os fatores escolhidos para avaliar o comportamento da ferramenta durante o processo de torneamento foram a velocidade de corte, avanço e profundidade de corte. Cada parâmetro foi selecionado em um nível baixo e um nível alto (-1,1), seus valores foram de 300 e 400 m/min para velocidade de corte, 0,15 e 0,30 mm/rev para o avanço e 0,15 e 0,30 para a profundidade de corte. Os níveis dos fatores foram escolhidos com base nos trabalhos de BONHIN et al., (2019) e KONDO et al., (2019) que estudaram a usinagem de torneamento da superliga VAT 32® utilizando a ferramenta experimental cerâmica de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + MgO. Os fatores e seus níveis indicados na Tabela 4.

Tabela 4 - Níveis dos fatores para o experimento composto central.

Fator	-1,68	-1	0	1	1,68
V <sub>c</sub>	265,91	300,00	350,00	400,00	434,09
<i>f</i>	0,09	0,15	0,23	0,30	0,36
a <sub>p</sub>	0,09	0,15	0,23	0,30	0,36

Fonte: Autoria própria.

O comprimento de avanço de cada ensaio foi de 37 mm. Os experimentos foram realizados de acordo com a ordem mostrada na Tabela 5, realizando-se as três repetições de forma consecutiva. Os ensaios 1 até o 14 foram realizados em triplicadas, enquanto os ensaios referentes ao ponto central (15-20) foram realizados somente uma vez. Devido ao alto número

de experimentos cada repetição foi classificada como um bloco de experimentos, desta forma têm-se 3 blocos distintos.

Tabela 5 - Combinação dos fatores utilizados no experimento para ferramenta alumina-magnésio.

Ensaio	$V_C$ (m/min)	$f$ (mm/rev)	$a_p$ (mm)	$\varnothing$ (mm)	$\eta$ (rpm)
1	300,00	0,15	0,15	86	1110
2	400,00	0,15	0,15	86	1481
3	300,00	0,30	0,15	85,7	1114
4	400,00	0,30	0,15	85,7	1486
5	300,00	0,15	0,30	85,1	1122
6	400,00	0,15	0,30	85,1	1496
7	300,00	0,30	0,30	84,5	1130
8	400,00	0,30	0,30	84,5	1507
9	265,91	0,23	0,23	83,9	1009
10	434,09	0,23	0,23	83,9	1647
11	350,00	0,09	0,23	83,4	1336
12	350,00	0,36	0,23	83,4	1336
13	350,00	0,23	0,09	82,9	1344
14	350,00	0,23	0,36	82,9	1344
15	350,00	0,23	0,23	82	1359
16	350,00	0,23	0,23	82	1110
17	350,00	0,23	0,23	82	1110
18	350,00	0,23	0,23	82	1110
19	350,00	0,23	0,23	82	1110
20	350,00	0,23	0,23	82	1110

Fonte: Autoria própria.

### 3.8.2 Ferramenta alumina-cromo

Para a ferramenta de alumina-cromo o planejamento escolhido foi o do tipo superfície de resposta de primeira ordem com 3 fatores em dois níveis cada ( $2^3$ ). Os fatores escolhidos para a análise foram a velocidade de corte, avanço e profundidade de corte. Seus níveis “baixo” e “alto” foram, respectivamente, 300 e 400 m/min, 0.10 e 0.30 mm/rev e 0.10 e 0.30 mm. Os experimentos foram realizados em triplicata, sendo estes realizados de forma sucessiva. Na Tabela 6 estão indicados os fatores e seus níveis e na Tabela 7 a combinação de fatores utilizados no experimento e a sequência que os experimentos foram realizados.

Tabela 6 - Fatores e seus níveis para ferramenta de alumina-cromo.

Fator	-1	1
$V_c$	300	400
$f$	0.10	0.30
$a_p$	0.10	0.30

Fonte: Autoria própria.

Tabela 7 - Combinação dos fatores utilizados no experimento para ferramenta alumina-cromo.

Ensaio	$V_c$ (m/min)	$f$ (mm/rev)	$a_p$ (mm)	$\varnothing$ (mm)	$\eta$ (rpm)
1	300,00	0,10	0,10	81	1179
2	400,00	0,10	0,10	81	1572
3	300,00	0,30	0,10	80,8	1182
4	400,00	0,30	0,10	80,8	1576
5	300,00	0,10	0,30	80,2	1191
6	400,00	0,10	0,30	80,2	1588
7	300,00	0,30	0,30	79,6	1200
8	400,00	0,30	0,30	79,6	1600

Fonte: Autoria própria.

## 4 RESULTADOS

### 4.1 FERRAMENTA ALUMINA-MAGNÉSIO

#### 4.1.1 Análise de potência

A análise ANOVA para os valores de potência obtidos durante os ensaios estão mostrados na Tabela 8 e na Tabela 9.

Tabela 8 - Análise de variância (ANOVA) para potência de corte utilizando ferramenta de alumina-magnésio.

Fonte	GL	SQ SEQ	SQ Adj	F-Valor	P-Valor	% Contribuição
V <sub>C</sub>	1	264417	264417	5,56	0,024	3,11
<i>f</i>	1	632806	632806	13,31	0,001	7,44
a <sub>p</sub>	1	5280496	5280496	112,50	0,000	62,12
V <sub>C</sub> <sup>2</sup>	1	223773	223773	6,55	0,015	2,63
<i>f</i> <sup>2</sup>	1	22333	22333	0,06	0,814	0,26
a <sub>p</sub> <sup>2</sup>	1	245984	245984	5,17	0,029	2,89
V <sub>C</sub> * <i>f</i>	1	30623	30623	0,64	0,428	0,36
V <sub>C</sub> * a <sub>p</sub>	1	27331	27331	0,57	0,453	0,32
<i>f</i> * a <sub>p</sub>	1	1409	1409	0,03	0,854	0,02
Falta de Ajuste	32	1611170	1371411	2,87	0,209	18,95
Erro	5	52604	110471			0,62
Total	46	8500178		R <sup>2</sup> = 80,43 %		R <sup>2</sup> adj= 74,27 %

Fonte: Autoria própria

Tabela 9 – Resumo dos fatores da análise de variância (ANOVA) para potência de corte utilizando ferramenta de alumina-magnésio.

Fonte	GL	SQ SEQ	SQ Adj	F-Valor	P-Valor	% Contribuição
Blocos	2	107232	31702	0,33	0,719	1,26
Linear	3	6177719	6245001	43,79	0,000	72,68
Quadrático	3	492090	492090	3,45	0,027	5,79
Interações	3	59363	59363	0,42	0,742	0,70
Erro	35	1663774	1663774			19,57
Total	46	9146973				

Fonte: Autoria própria

Os fatores significativos de primeira para a resposta de potência foram a profundidade de corte (p-valor = 0,000), avanço (p-valor = 0,001) e velocidade de corte (p-valor = 0,024) e os fatores de segunda ordem a velocidade de corte (p-valor = 0,015) e a profundidade de corte (p-valor = 0,029).

Os valores quadráticos de R e quadráticos de R ajustado foram, respectivamente, 80,43 % e 74,27 % o modelo apresentou uma falta de ajuste não significativo (p-valor > 0,05).

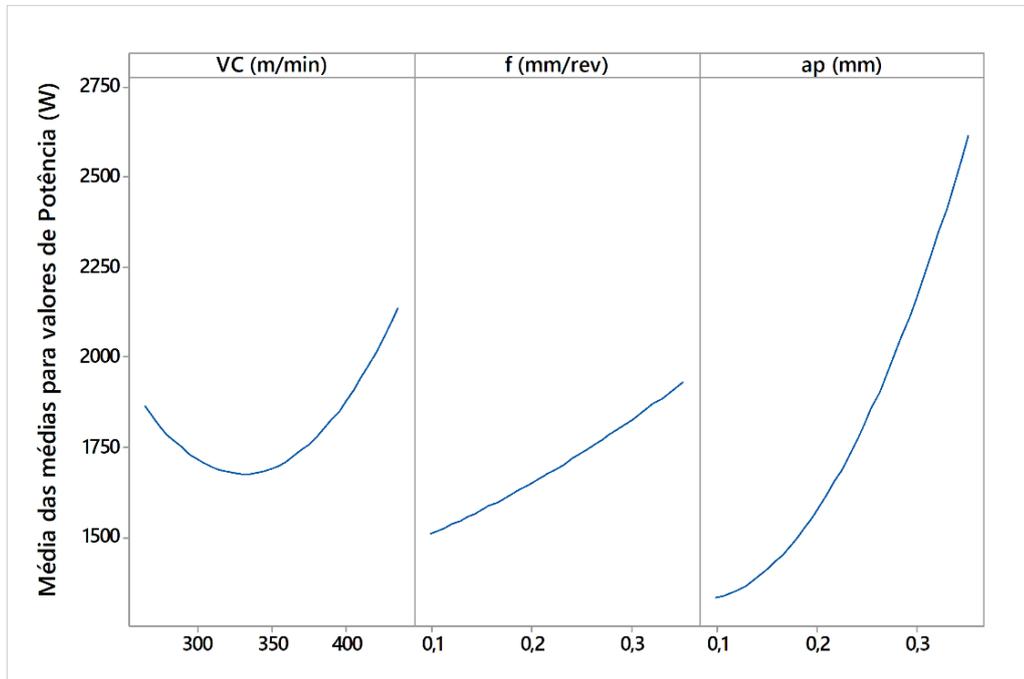
O teste de Anderson-Darling foi aplicado para verificar a normalidade dos resíduos do modelo e como resultado obteve-se um p-valor de 0,421 verificando a normalidade.

A partir da análise ANOVA, determinou-se a equação que modela o comportamento da potência de corte durante o experimento conforme mostrado na Equação 18.

$$Pot (W) = 5684 - 28 \times VC + 4510 \times f - 5615 \times Ap + 0,0425 \times VC^2 - 1751 \times f^2 + 17342 \times Ap^2 - 9,5 \times VC \times f + 9,0 \times VC \times Ap - 1362 \times f \times Ap \quad (18)$$

A partir dos valores de potência de corte medidos durante os ensaios realizou-se a análise de médias que está mostrada na Figura 40.

Figura 40 - Análise dos efeitos principais para potência de corte utilizando ferramenta alumina-magnésio.



Fonte: Autoria própria

A partir da análise dos efeitos principais para potência observa-se que o comportamento da curva referente a velocidade de corte apresenta um ponto de mínimo dentro do intervalo entre 300 e 400 m/min, enquanto as curvas de  $f$  e  $a_p$  apresentam seus valores mínimos no menor valor utilizado no experimento.

Em relação ao avanço um acréscimo de seu valor representa um aumento da taxa de remoção de material da peça, logo o motor do centro de torneamento demandará uma maior quantidade de corrente para suprir os parâmetros de entrada.

Ao se aumentar a profundidade de corte, aumenta-se a o volume de material retirado da peça, logo, haverá um aumento da demanda de potência requerida pelo motor do centro de torneamento.

Para se determinar a o ponto de mínimo para a curva de  $V_C$  deve-se realizar a primeira derivada da Equação 18 e igualar a zero utilizando os valores de  $f$  e  $a_p$  que produzem a menor resposta de potência.

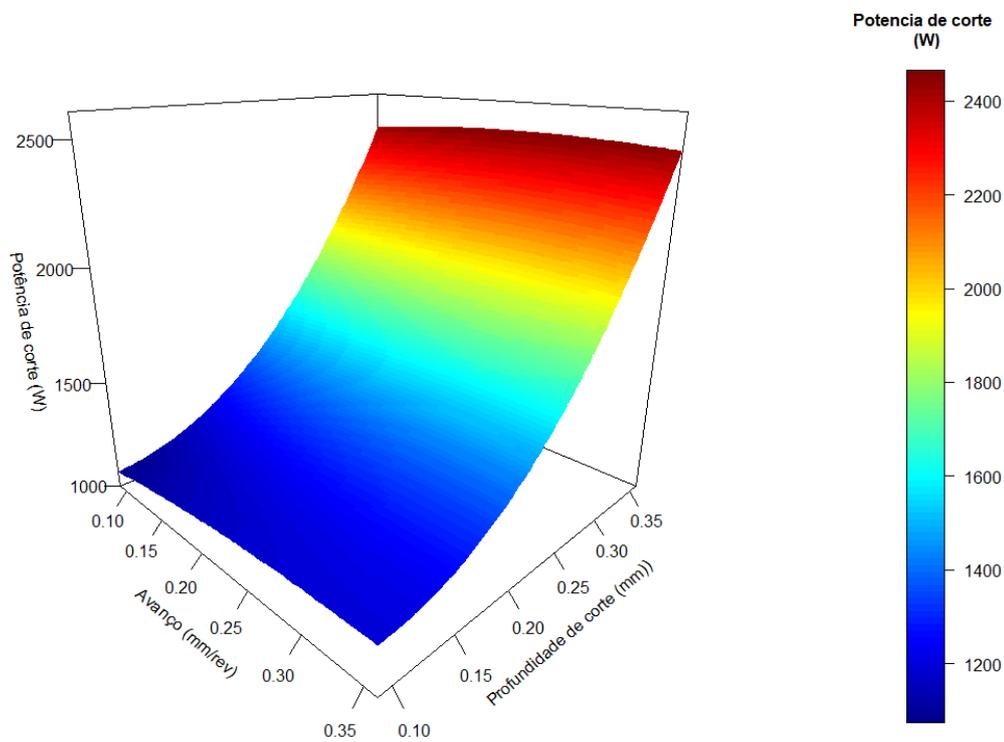
$$\frac{\partial Pot}{\partial V_C} = -28 + 0,085 \times V_C - 9,5 \times f + 9 \times a_p = 0 \quad (19)$$

A combinação de fatores que produz os menores valores de potência é  $V_C = 330$  m/min.  $f = 0,98$  mm/rev e  $a_p = 0,09$  mm.

A diminuição da potência de corte com o aumento da velocidade de corte está de acordo com a literatura como mostram os trabalhos de Kondo *et al.* (2018) e Vishwanath *et al.* (2019).

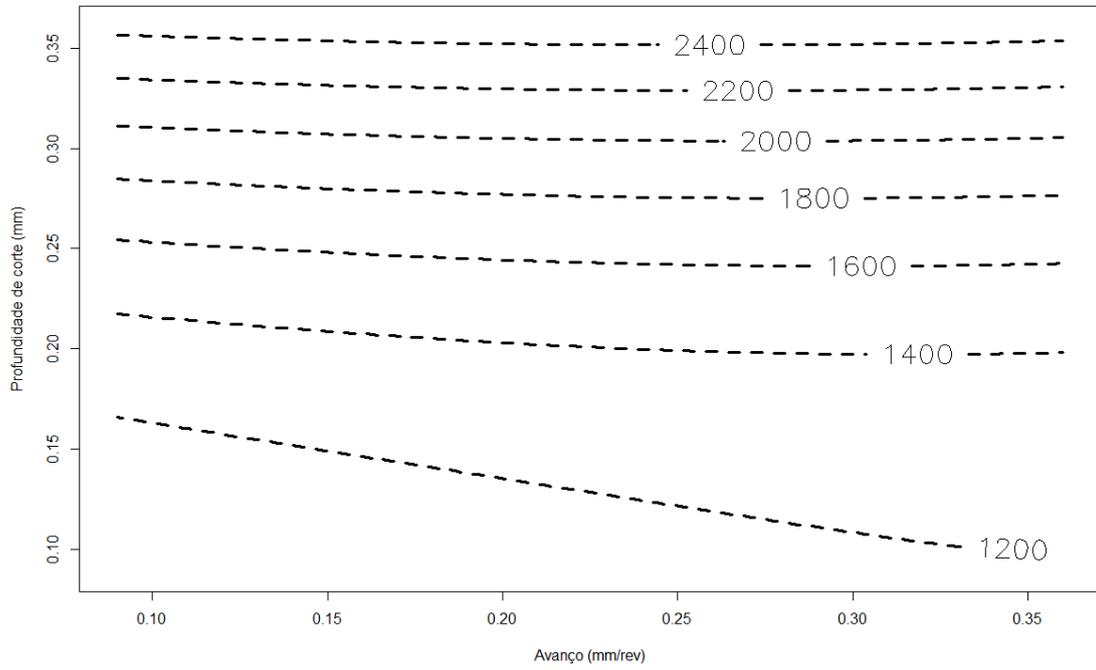
Utilizando o modelo descrito na Equação 16 foi possível gerar a superfície de resposta para a potência de corte e o gráfico de contorno, conforme mostrado nas Figura 41 e 42 considerando a velocidade de corte constante com valor igual a 330 m/min.

Figura 41 – Superfície de resposta para potência de corte utilizando ferramenta de alumina-magnésio.



Fonte: Autoria própria

Figura 42 – Gráfico de contorno para potência de corte utilizando ferramenta de alumina-magnésio.



Fonte: Autoria própria

#### 4.1.2 Análise de vibração

A análise ANOVA para os valores de vibração está mostrada nas Tabelas 10 e 11.

Tabela 10 - Análise de variância (ANOVA) para vibração utilizando ferramenta de alumina-magnésio.

Fonte	GL	SQ SEQ	SQ Adj	F-Valor	P-Valor	% Contribuição
$V_C$	1	29,207	29,207	17,25	0,000	8,00
$f$	1	108,084	108,084	63,82	0,000	29,59
$a_p$	1	122,719	119,287	70,43	0,000	33,60
$V_C^2$	1	9,097	2,427	1,543	0,239	2,49
$f^2$	1	4,242	5,559	3,28	0,079	1,16
$a_p^2$	1	1,414	1,414	0,83	0,367	0,39
$V_C * f$	1	8,493	8,493	5,01	0,032	2,33
$V_C * a_p$	1	2,597	2,597	1,53	0,224	0,71
$f * a_p$	1	17,338	17,338	10,24	0,003	4,75
<i>Falta de Ajuste</i>	32	43,496	43,496	0,26	0,982	11,91
Erro	3	15,780	15,780			4,32
Total	46	365,231		$R^2 = 83,77 \%$		$R^2 \text{ adj} = 78,67 \%$

Fonte: Autoria própria

Tabela 11 - Resumo dos fatores da análise de variância (ANOVA) para vibração utilizando ferramenta de alumina-magnésio.

Fonte	GL	SQ SEQ	SQ Adj	F	P	% Contribuição
Blocos	2	2,765	1,188	0,35	0,707	0,76
Linear	3	260,010	256,568	85,523	0,000	71,19
Quadrático	3	14,752	14,752	2,90	0,048	4,04
Interações	3	28,428	28,428	5,601	0,003	7,65
Erro	35	59,275	59,275			16,23
Total	46	362,231				

Fonte: Autoria própria

Todos os fatores de primeira ordem foram significativos, sendo a velocidade de corte (p-valor = 0,000), avanço (p-valor = 0,000) e profundidade de corte (p-valor = 0,000). As interações de primeira ordem entre o  $V_C \times f$  e  $f \times a_p$  apresentaram nível de significância com p-valor respectivamente 0,032 e 0,003.

Os valores quadráticos de R e quadráticos de R ajustado foram respectivamente 83,77 % e 78,67 %, o modelo apresentou uma falta de ajuste não significativo (p-valor > 0.05).

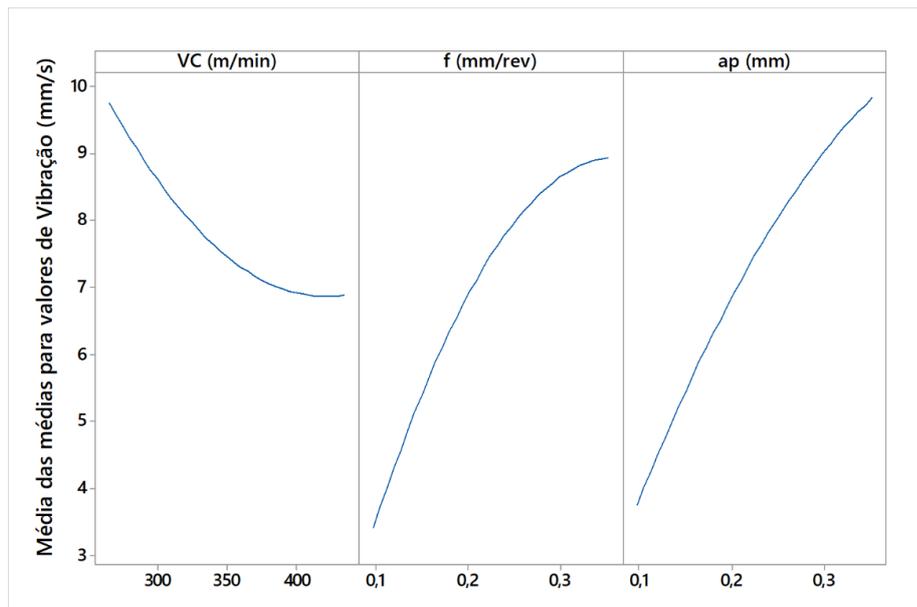
Para verificar um dos pressupostos da ANOVA o teste Anderson-Darling foi aplicado aos resíduos e obteve-se um p-valor igual a 0,225, garantindo a normalidade dos resíduos.

A partir da análise ANOVA, determinou-se a equação que modela o comportamento da vibração durante o experimento conforme mostrado na Equação 20.

$$Vib \text{ (mm/s)} = -0.2 - 0.0445 \times VC + 79.1 \times f + 39.2 \times Ap + 0.000119 \times VC^2 - 79.8 \times f^2 - 41.6 \times Ap^2 - 0.1586 \times VC \times f - 0.0877 \times VC \times Ap + 151.1 \times f \times Ap \quad (20)$$

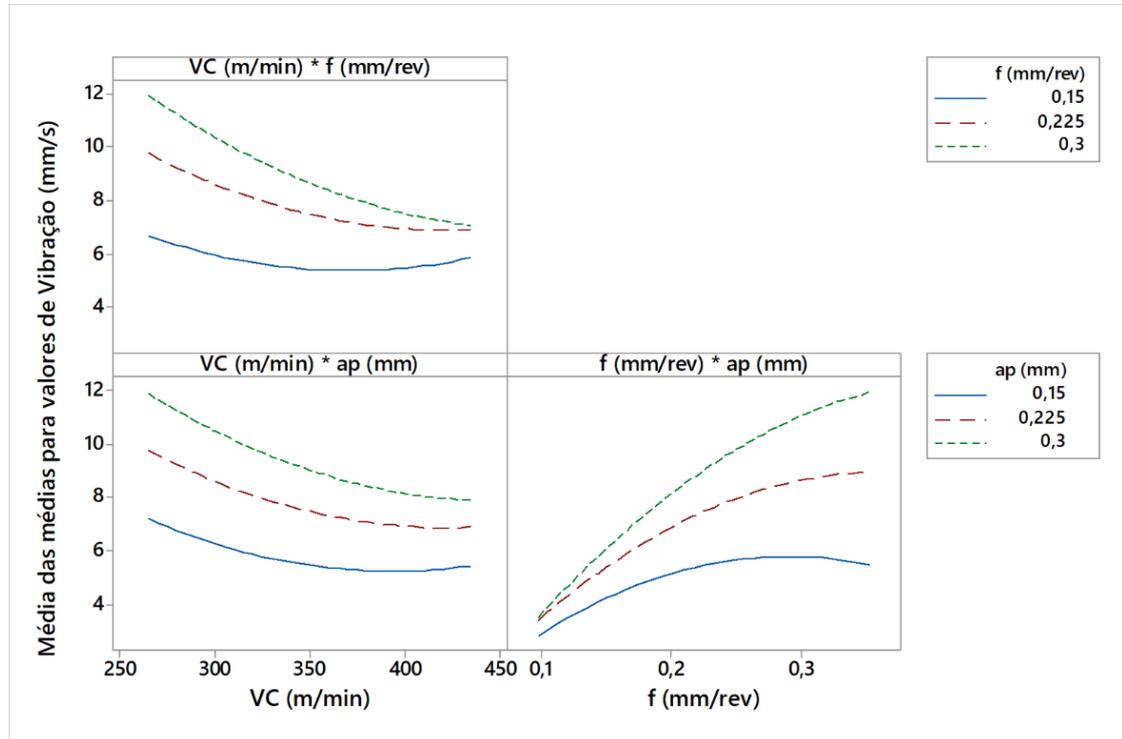
A partir dos valores de vibração medidos durante os ensaios realizou-se a análise de médias para os fatores principais e para as interações dos fatores que está mostrada na Figura 43e Figura 44.

Figura 43 - Análise dos efeitos principais para vibração utilizando ferramenta de alumina-magnésio.



Fonte: Autoria própria

Figura 44- Análise das interações para vibração utilizando ferramenta de alumina-magnésio.



Fonte: Autoria própria

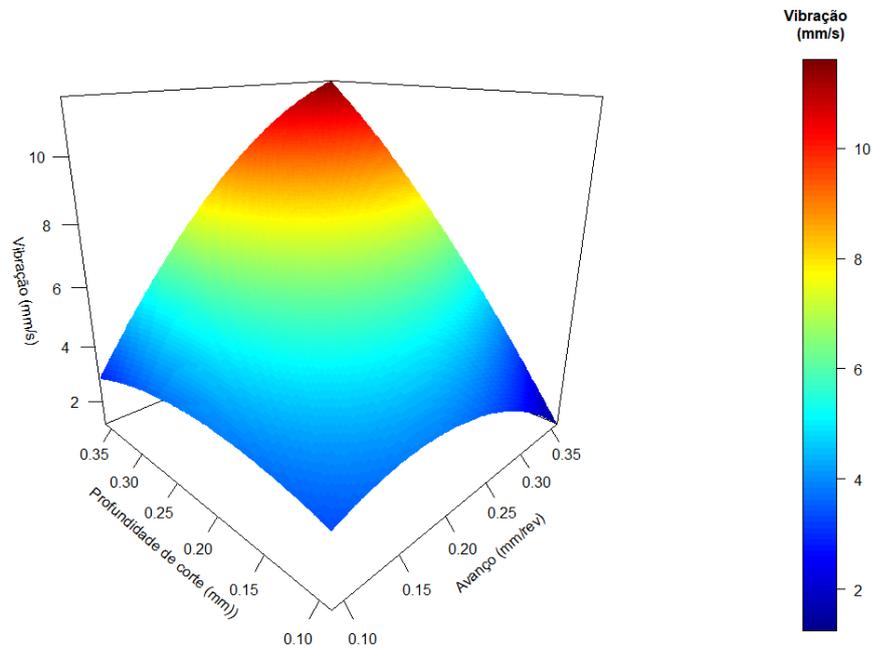
Observa-se que a resposta vibração possui uma correlação negativa com o parâmetro velocidade de corte dentro dos limites do experimento, portanto, ao se aumentar o valor de velocidade de corte, a vibração do sistema diminui. É possível observar um ponto de mínimo localizado no ponto  $V_C = 408$  m/min.

Para o parâmetro  $f$  e  $a_p$  observa-se que ao se aumentar seu valor, a resposta a vibração tende a se elevar conforme aumenta-se o nível de ambos os parâmetros. É possível observar tal fato através da Figura 35.

A combinação de fatores que produz a resposta desejada, isto é, um menor valor de vibração é  $V_C = 409$  m/min.  $f = 0,09$  mm/rev e  $a_p = 0,09$  mm.

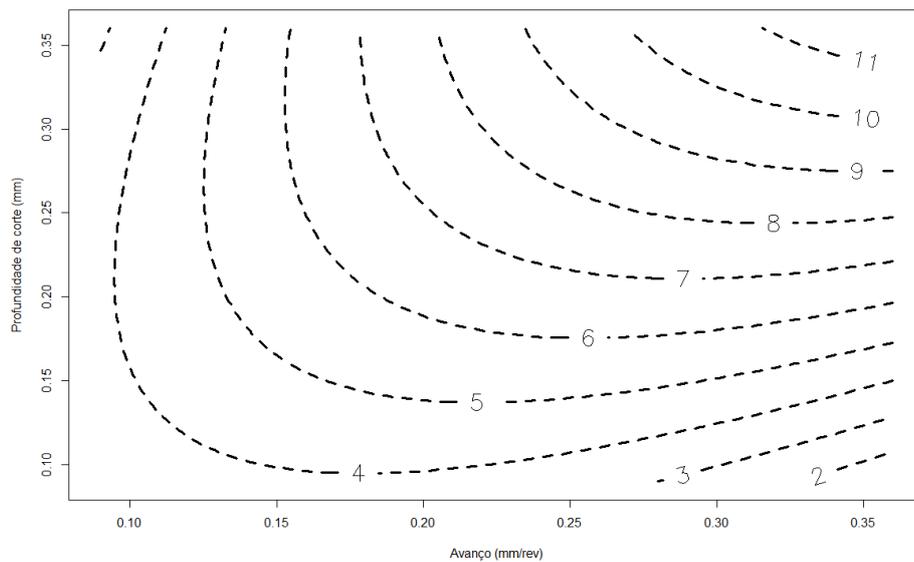
A partir da Equação 20 foi possível criar a superfície de resposta e o gráfico de contorno para a resposta a vibração conforme Figuras 45 e 46, considerando a velocidade de corte constante no valor de 409 m/min.

Figura 45 - Superfície de resposta para vibração utilizando ferramenta de alumina-magnésio.



Fonte: Autoria própria

Figura 46 - Gráfico de contorno para vibração utilizando ferramenta de alumina-magnésio.



Fonte: Autoria própria

### 4.1.3 Análise rugosidade $R_a$ e $R_t$

Os valores medidos de rugosidade após os ensaios.  $R_a$  e  $R_t$  foram submetidos a análise das médias (ANOM) e análise de variância (ANOVA) de forma a se detectar quais os fatores significativos para o resultado. Empregou-se a normalização dos dados medidos através da transformação Box-Cox utilizando um  $\lambda = 0$ . Nas Tabela 12 e 13 estão mostrados a análise ANOVA para os valores medidos de  $R_a$ .

Tabela 12 - Análise de variância (ANOVA) para rugosidade  $R_a$  utilizando ferramenta de alumina-magnésio.

Fonte	GL	SQ SEQ	SQ Adj	F-Valor	P-Valor	% Contribuição
$V_C$	1	0,3821	0,03821	3,16	0,084	1,69
$f$	1	15,7306	15,7306	130,30	0,000	69,65
$a_p$	1	0,1257	0,0872	0,72	0,401	0,56
$V_C^2$	1	0,5355	0,0230	0,19	0,665	4,02
$f^2$	1	0,3530	0,7346	6,08	0,019	1,56
$a_p^2$	1	0,6484	0,6484	5,37	0,026	2,87
$V_C * f$	1	0,2312	0,2312	1,92	0,175	1,02
$V_C * a_p$	1	0,2525	0,2523	2,09	0,157	1,12
$f * a_p$	1	0,0350	0,0350	0,29	0,594	0,16
Falta de ajuste	32	4,1024	4,1024	3,12	0,189	18,17
Erro	3	0,1231	0,1231			0,55
Total	46	22,5839		$R^2 = 81,29 \%$		$R^2 \text{ adj} = 75,41\%$

Fonte: Autoria própria

Tabela 13 - Resumo dos fatores da análise de variância (ANOVA) para rugosidade  $R_a$  utilizando ferramenta de alumina-magnésio.

Fonte	GL	SQ SEQ	SQ Adj	F-Valor	P-Valor	% Contribuição
Blocos	2	0,0643	0,0543	0,22	0,800	0,28
Linear	3	16,2384	16,1998	44,73	0,000	71,90
Quadrático	3	1,5369	1,5469	4,24	0,012	6,81
Interações	3	0,5187	0,5187	1,43	0,250	2,30
Erro	35	4,2256	4,2256			18,71
Total	46	22,5839				

Fonte: Autoria própria

Observa-se que o parâmetro  $f$  apresenta significância em seu nível linear (p-valor = 0,000) e quadrático (p-valor = 0,019). O fator  $a_p$  em seu nível quadrático também apresenta significância estatística (p-valor = 0,026).

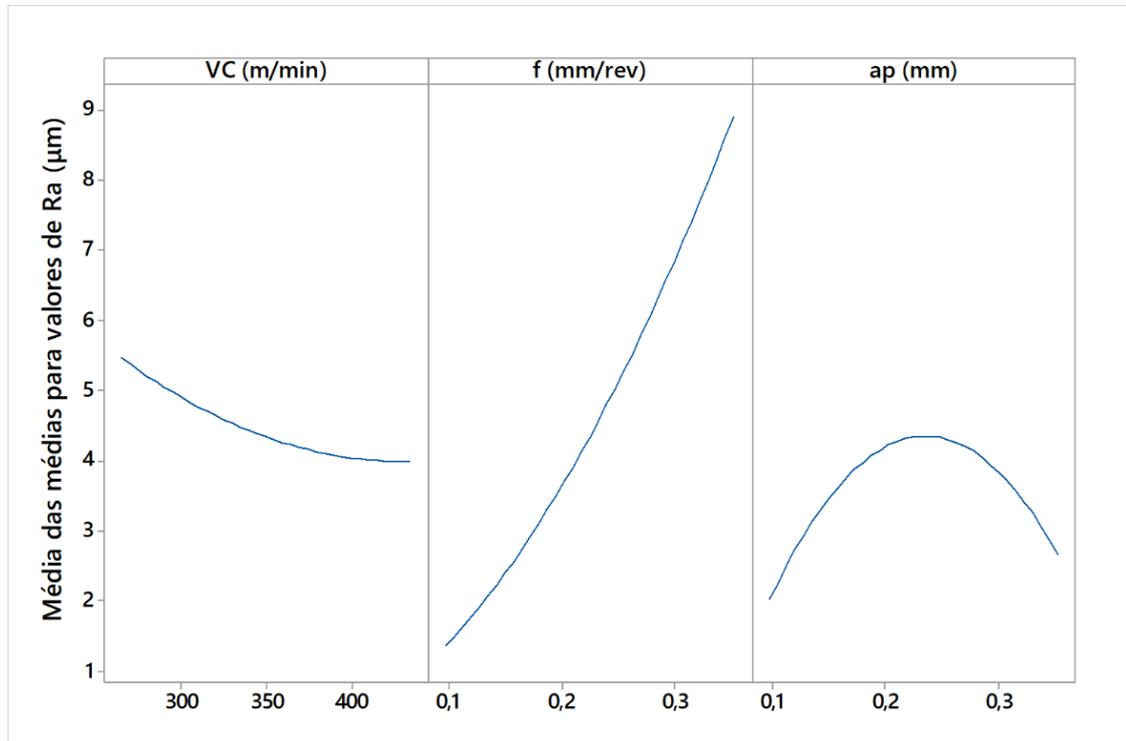
Os valores quadráticos de R e quadráticos de R ajustado foram respectivamente 81,29 % e 75,41 %, o modelo apresentou uma falta de ajuste não significativo (p-valor > 0,05). O teste de Anderson-Darling foi aplicado nos resíduos e o p-valor encontrado foi de 0,929 garantindo assim a normalidade dos resíduos.

A partir da análise ANOVA, realizou-se a transformação Box-Cox dos dados de utilizando  $\lambda = 0$  e determinou-se a equação que modela o comportamento da rugosidade  $R_a$  durante o experimento conforme mostrado na Equação 21.

$$\ln(Ra) (\mu m) = -5,23 + 0,0020 \times VC + 28,95 \times f + 21,36 \times Ap + 0,000012 \times VC^2 - 29,0 \times f^2 - 28,2 \times Ap^2 - 0,0262 \times VC \times f - 0,0274 \times VC \times Ap + 6,8 \times f \times Ap \quad (21)$$

A partir dos valores de rugosidade  $R_a$  realizou-se a análise de médias que está mostrada na Figura 47.

Figura 47 - Análise dos efeitos principais para rugosidade  $R_a$  utilizando ferramenta de alumina-magnésio.



Fonte: Autoria própria

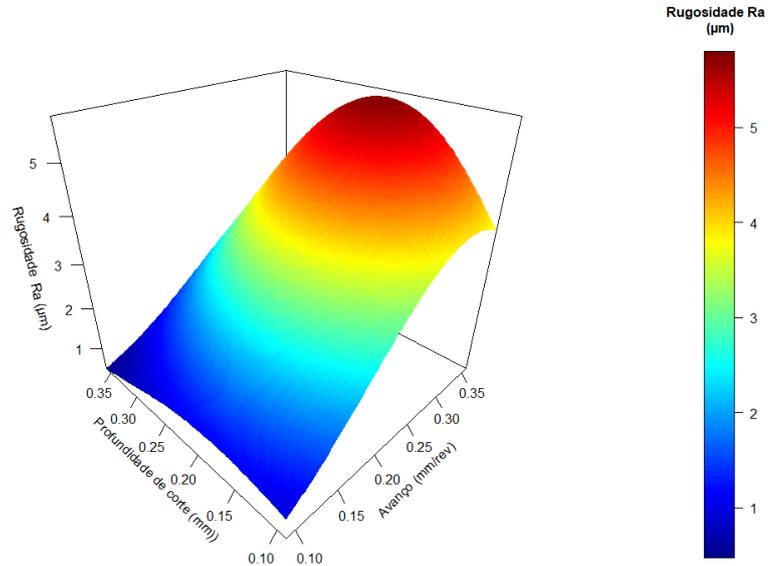
Observa-se que para o parâmetro  $V_C$  o aumento do seu nível acarreta uma diminuição da rugosidade superficial da peça, enquanto para o parâmetro  $f$  o aumento do seu nível leva a um aumento significativo em relação a rugosidade  $R_a$ . Tal resultado está de acordo com a literatura conforme discutido no item 2.2.5 deste trabalho.

O parâmetro  $a_p$  apresenta um ponto de máximo dentro do intervalo do experimento, contudo como o objetivo desta análise é determinar a combinação de parâmetros que produz as menores respostas referentes a rugosidade o ponto de máximo não é significativo.

A combinação de fatores que produz os menores valores de rugosidade  $R_a$  é  $V_C = 434$  m/min,  $f = 0,09$  mm/rev e  $a_p = 0,09$  mm.

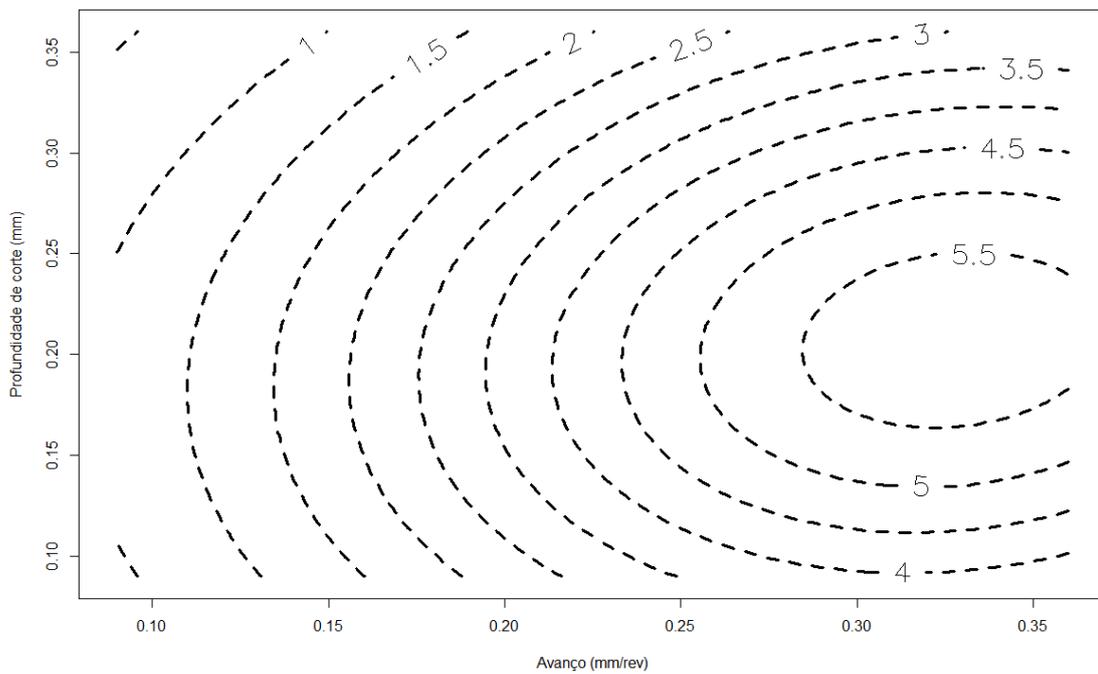
A partir da Equação 21 foi possível criar a superfície de resposta e o gráfico de contorno para a resposta a rugosidade  $R_a$  conforme Figuras 48 e 49, considerando a velocidade de corte constante no valor de 434 m/min.

Figura 48 - Superfície de resposta para Rugosidade Ra utilizando ferramenta de alumina-magnésio.



Fonte: Autoria própria

Figura 49 - Gráfico de contorno para rugosidade  $R_a$  utilizando ferramenta de alumina-magnésio.



Fonte: Autoria própria

Na Tabela 14 e 15 têm-se a análise ANOVA para os valores medidos durante o experimento de rugosidade  $R_t$ .

Tabela 14 - Análise de variância (ANOVA) para rugosidade  $R_t$  utilizando ferramenta de alumina-magnésio.

Fonte	GL	SQ SEQ	SQ Adj	F-Valor	P-Valor	% Contribuição
$V_C$	1	0,7772	0,7772	9,35	0,004	5,53
$f$	1	8,4534	8,4534	101,71	0,000	60,19
$a_p$	1	0,1651	0,0887	1,07	0,309	1,18
$V_C^2$	1	0,4803	0,1816	2,18	0,148	3,42
$f^2$	1	0,1271	0,0018	0,02	0,883	0,90
$a_p^2$	1	0,5608	0,5608	6,75	0,014	3,99
$V_C * f$	1	0,0002	0,0002	0,00	0,962	1,02
$V_C * a_p$	1	0,0043	0,0043	0,05	0,821	0,03
$f * a_p$	1	0,3500	0,3500	4,21	0,048	2,49
Falta de ajuste	32	2,8013	2,8013	2,44	0,253	19,94
Erro	3	0,1076	0,1076			0,77
Total	46	14,0454		$R^2 = 79,29 \%$		$R^2 \text{ adj} = 72,78\%$

Fonte: Autoria própria

Tabela 15 - Resumo dos fatores da análise de variância (ANOVA) para rugosidade  $R_t$  utilizando ferramenta de alumina-magnésio.

Fonte	GL	SQ SEQ	SQ Adj	F-Valor	P-Valor	% Contribuição
Blocos	2	0,2181	0,1868	1,12	0,337	1,55
Linear	3	9,3956	9,3193	37,38	0,000	66,89
Quadrático	3	1,1683	1,1683	4,69	0,007	8,32
Interações	3	0,3545	0,3545	1,42	0,253	2,52
Erro	35	2,9089	2,9089			20,71
Total	46	14,0454				

Fonte: Autoria própria

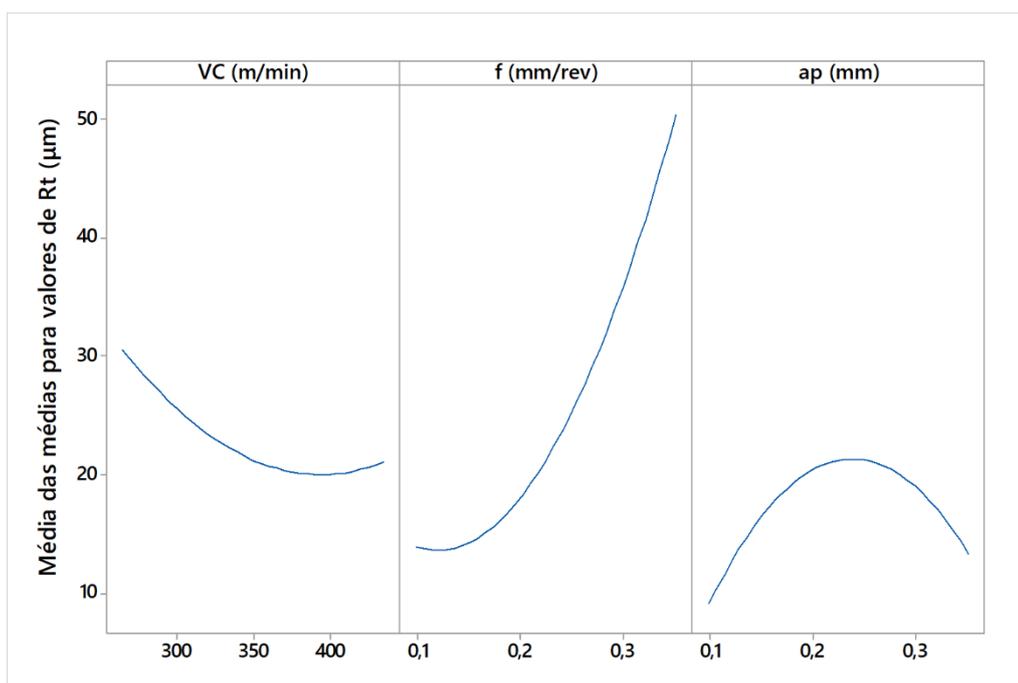
Observa-se a partir da análise ANOVA que os fatores significativos para o resultado de rugosidade  $R_t$  foram os fatores de primeira ordem  $f$  (p-valor = 0,000),  $V_C$  (p-valor = 0,004), o fator quadrático  $a_p$  (p-valor = 0,014) e a interação de primeira ordem  $f \times a_p$  (p-valor = 0,048). Os valores quadráticos de  $R$  e quadráticos de  $R$  ajustado foram respectivamente 79,29 % e 72,78 %, o modelo apresentou uma falta de ajuste não significativo (p-valor > 0,05). O teste de Anderson-Darling foi aplicado nos resíduos e o p-valor encontrado foi de 0,750 garantindo assim a normalidade dos resíduos.

A partir da análise ANOVA, realizou-se a transformação Box-Cox dos dados de utilizando  $\lambda = 0$  e determinou-se a equação que modela o comportamento da rugosidade  $R_t$  durante o experimento conforme mostrado na Equação 22.

$$\ln(R_t) (\mu\text{m}) = 4,95 - 0,0245 \times VC + 0,84 \times f + 8,85 \times Ap + 0,000032 \times VC^2 - 1,45 \times f^2 - 26,2 \times Ap^2 - 0,0007 \times VC \times f - 0,036 \times VC \times Ap + 21,5 \times f \times Ap \quad (22)$$

A partir dos valores de rugosidade  $R_a$  realizou-se a análise de médias que está mostrada na Figura 50.

Figura 50 - Análise dos efeitos principais para rugosidade  $R_t$  utilizando ferramenta de alumina-magnésio.



Fonte: Autoria própria

Observa-se que as curvas dos fatores  $V_C$  e  $f$  apresentar pontos de mínimos que não estão localizados nos extremos do intervalo, portanto pode-se determinar tais valores a partir da derivada parcial da equação do modelo em função dos parâmetros, Equação 22, e resolvendo o sistema de equações.

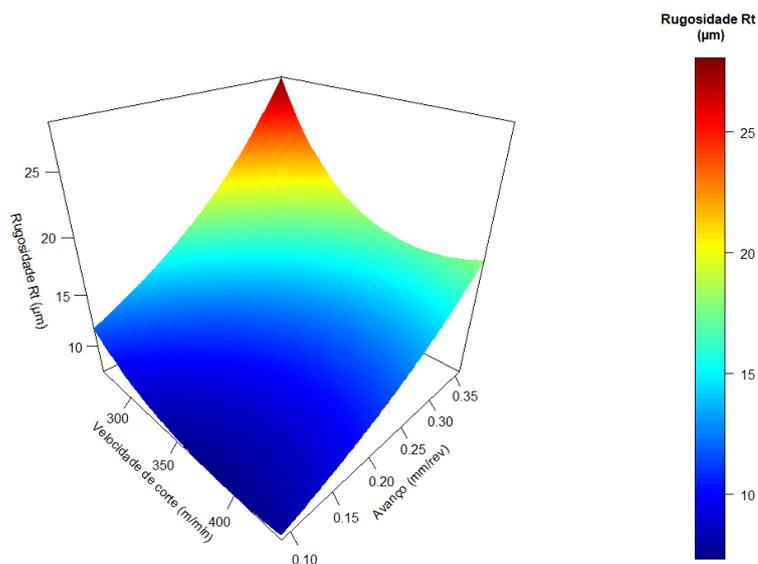
$$\frac{\partial \ln(Rt)}{\partial V_C, f} = 0 \quad (23)$$

A curva referente ao fator  $a_p$  apresenta um ponto de máximo localizado no intervalo do experimento, porém como o objetivo deste trabalho é determinar os fatores que produzem a menor resposta para rugosidade  $R_t$  tal valor não deve ser considerado.

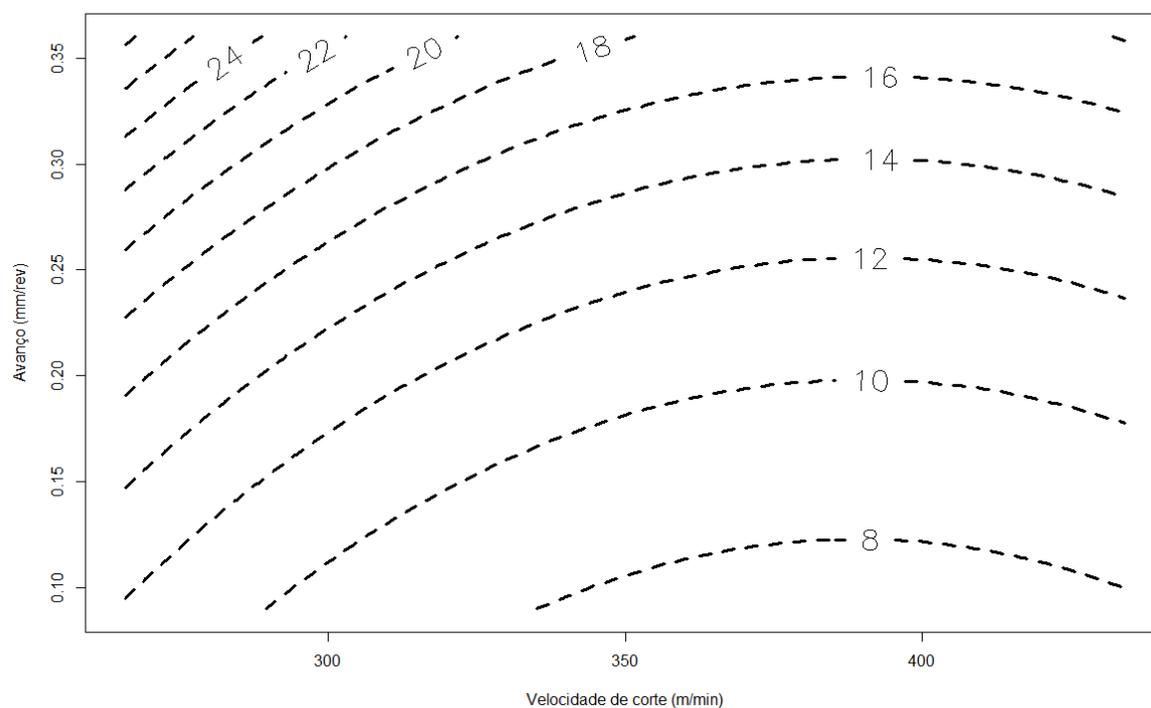
Após a resolução da Equação 21, a combinação de valores que produz o menor resultado para rugosidade  $R_t$  é  $V_C = 419$  m/min.  $f = 0,115$  mm/rev e  $a_p = 0,09$  mm.

A partir da Equação 23 foi possível criar a superfície de resposta e o gráfico de contorno para a resposta rugosidade  $R_t$  conforme Figuras 51 e 52, considerando a profundidade de corte constante com valor igual a 0.09 mm.

Figura 51 - Superfície de resposta para Rugosidade  $R_t$  utilizando ferramenta de alumina-magnésio.



Fonte: Autoria própria

Figura 52 - Gráfico de contorno para rugosidade  $R_t$  utilizando ferramenta de alumina-magnésio.

Fonte: Autoria própria

#### 4.1.4 Análise de emissão acústica

Os resultados de emissão acústica medidos durante o experimento foram transformados utilizando a transformada Box-Cox com  $\lambda = -3$ . A análise ANOVA para os valores de emissão acústica está mostrada nas Tabelas 16 e 17.

Tabela 16 - Análise de variância (ANOVA) para emissão acústica utilizando ferramenta de alumina-magnésio.

Fonte	GL	SQ SEQ	SQ Adj	F-Valor	P-Valor	% Contribuição
V <sub>C</sub>	1	2518,5		2,72	0,108	6,19
<i>f</i>	1	12,9	12,9	0,01	0,907	0,03
a <sub>p</sub>	1	33,3	33,3	0,16	0,691	0,08
V <sub>C</sub> <sup>2</sup>	1	1442,4	392,7	0,42	0,519	3,54
<i>f</i> <sup>2</sup>	1	366,6	2,1	0,00	0,963	0,90
a <sub>p</sub> <sup>2</sup>	1	2497,5	2497,5	2,69	0,110	6,14
V <sub>C</sub> * <i>f</i>	1	941,4	914,4	0,99	0,327	2,25
V <sub>C</sub> * a <sub>p</sub>	1	139,2	139,2	0,15	0,701	0,34
<i>f</i> * a <sub>p</sub>	1	6,9	6,9	0,01	0,932	0,02
Falta de ajuste	32	31332,2	31332,2	2,64	0,231	77,00
Erro	3	1112,5	1112,5			2,73
Total	46	40693,6		R <sup>2</sup> = 20,27 %		R <sup>2</sup> adj= 0,00%

Fonte: Autoria própria

Tabela 17 - Resumo dos fatores da análise de variância (ANOVA) para emissão acústica utilizando ferramenta de alumina-magnésio.

Fonte	GL	SQ SEQ	SQ Adj	F-Valor	P-Valor	% Contribuição
Blocos	2	317,2	222,3	0,81	0,631	0,78
Linear	3	2564,7	2680,8	0,12	0,887	6,30
Quadrático	3	4306,5	4305,5	0,96	0,421	10,58
Interações	3	1060,5	1060,5	1,55	0,219	2,61
Erro	35	32444,7	32444,7	0,38	0,767	79,73
Total	46	40693,6				

Fonte: Autoria própria

Nenhum fator foi significativo para o resultado de emissão acústica. A falta de ajuste do modelo representou 77 % do resultado, desta forma não é possível utilizar o modelo obtido para determinar as condições de melhor operação.

O valor quadrático de R e o valor quadrático de R ajustado foram respectivamente 20,27 % e 0,00%. O teste de Anderson-Darling foi aplicado nos resíduos para verificar a normalidade e o p-valor encontrado foi de 0,281, garantindo assim a normalidade.

#### 4.1.5 Análise de desgaste de flanco ( $V_b$ )/ percurso de corte $L_c$

A análise ANOVA para os valores de  $V_b/L_c$  está mostrada nas Tabelas 18 e 19.

Tabela 18 - Análise de variância (ANOVA) para  $V_b/L_c$  utilizando ferramenta de alumina-magnésio.

Fonte	GL	SQ SEQ	SQ Adj	F-Valor	P-Valor	% Contribuição
$V_C$	1	11,253	18,993	1,74	0,198	1,14
$f$	1	453,439	462,384	42,24	0,000	46,05
$a_p$	1	132,428	139,459	12,74	0,001	13,45
$V_C^2$	1	8,618	1,434	0,13	0,720	0,08
$f^2$	1	0,339	0,981	0,09	0,767	0,04
$a_p^2$	1	21,978	21,119	1,93	0,175	2,23
$V_C * f$	1	2,206	1,197	0,11	0,743	0,21
$V_C * a_p$	1	7,985	5,338	0,49	0,491	0,81
$f * a_p$	1	27,859	27,859	2,55	0,121	2,83
Falta de ajuste	26	258,113	258,113	0,50	0,860	26,22
Erro	3	59,281	59,281			6,02
Total	40	984,596		$R^2 = 67,79 \%$		$R^2 \text{ adj} = 55,53 \%$

Fonte: Autoria própria

Tabela 19 - Resumo dos fatores da análise de variância (ANOVA) para  $V_b/L_c$  utilizando ferramenta de alumina-magnésio.

Fonte	GL	SQ SEQ	SQ Adj	F-Valor	P-Valor	% Contribuição
Blocos	2	1,196	0,403	0,202	0,982	0,12
Linear	3	597,120	584,991	17,81	0,000	60,65
Quadrático	3	30,995	30,234	0,92	0,443	3,15
Interações	3	37,871	37,871	1,15	0,334	3,85
Erro	29	317,414	317,414			3,24
Total	40	984,596				

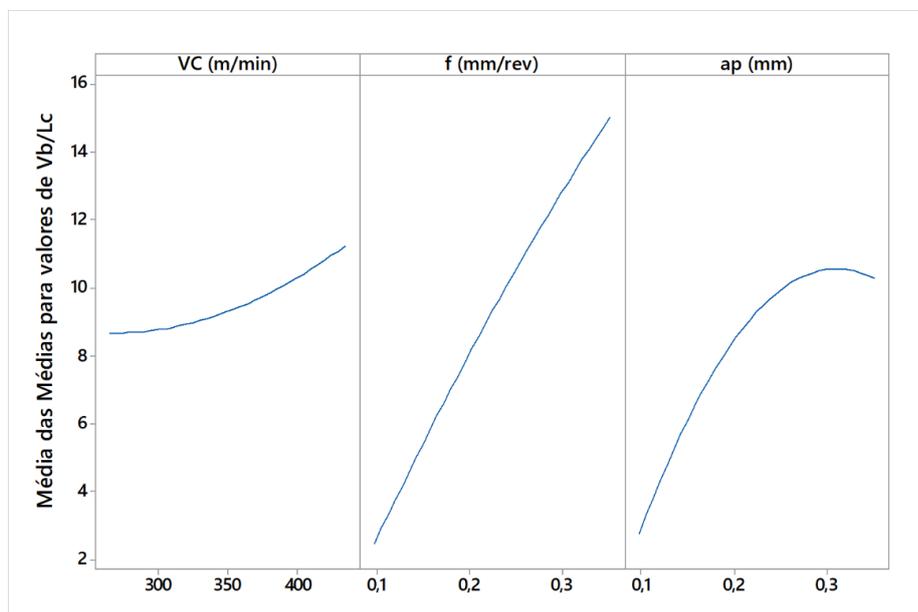
Fonte: Autoria própria

Observa-se a partir da análise ANOVA que os fatores significativos para a relação  $V_b/L_c$  foram o parâmetro  $f$  (p-valor = 0,000) e o  $a_p$  (p-valor = 0,001).

Os valores quadráticos de R e quadráticos de R ajustado foram respectivamente 67,79 % e 55,53 %, o modelo apresentou uma falta de ajuste não significativo (p-valor > 0,05). O teste de Anderson-Darling foi aplicado nos resíduos e o p-valor encontrado foi de 0.239 garantindo assim a normalidade dos resíduos.

A partir da análise ANOVA, realizou-se a análise de médias para os valores de  $V_b/L_c$  conforme mostrado na Figura 53.

Figura 53 - Análise dos efeitos principais para  $V_b/L_c$  utilizando ferramenta de alumina-magnésio.



Fonte: Autoria própria

Observa-se que os fatores, que apresentaram significância estatística de acordo com a análise de variância, produzem a menor resposta de  $V_b/L_c$  quando seus níveis estão no seu nível mínimo, isto é, quando ambos os valores são ajustados em 0,09.

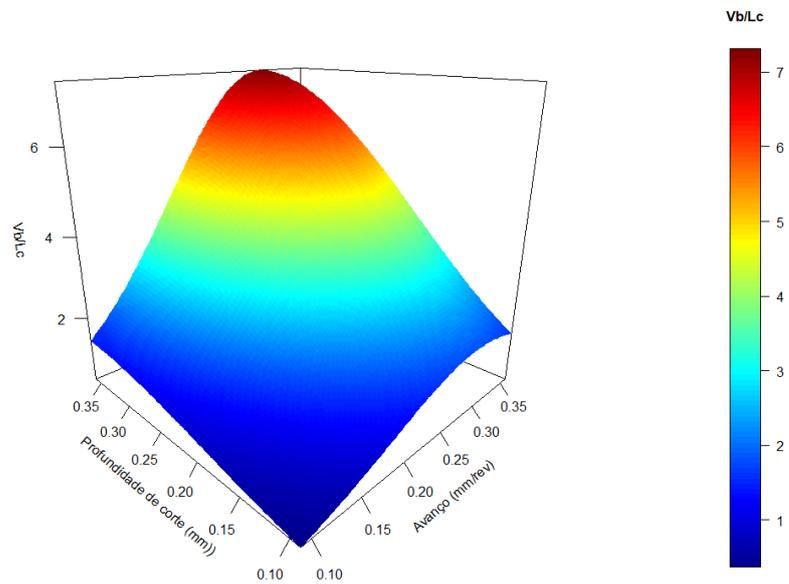
A curva referente ao fator  $a_p$  apresenta um ponto de máximo dentro do intervalo do experimento, contudo o objetivo deste trabalho é determinar os níveis de parâmetros que produzem a menor resposta, logo tal ponto de máximo não será determinado.

A partir da análise ANOVA, determinou-se a equação que modela o comportamento da relação  $V_b/L_c$  durante o experimento conforme mostrado na Equação 24.

$$\ln\left(\frac{V_b}{L_c}\right) = -4,33 - 0,0022 \times VC + 28,5 \times f + 18,3 \times Ap + 0,000016 \times VC^2 - 36,9 \times f^2 - 18,7 \times Ap^2 - 0,0182 \times VC \times f - 0,0127 \times VC \times Ap + 0,3 \times f \times Ap \quad (24)$$

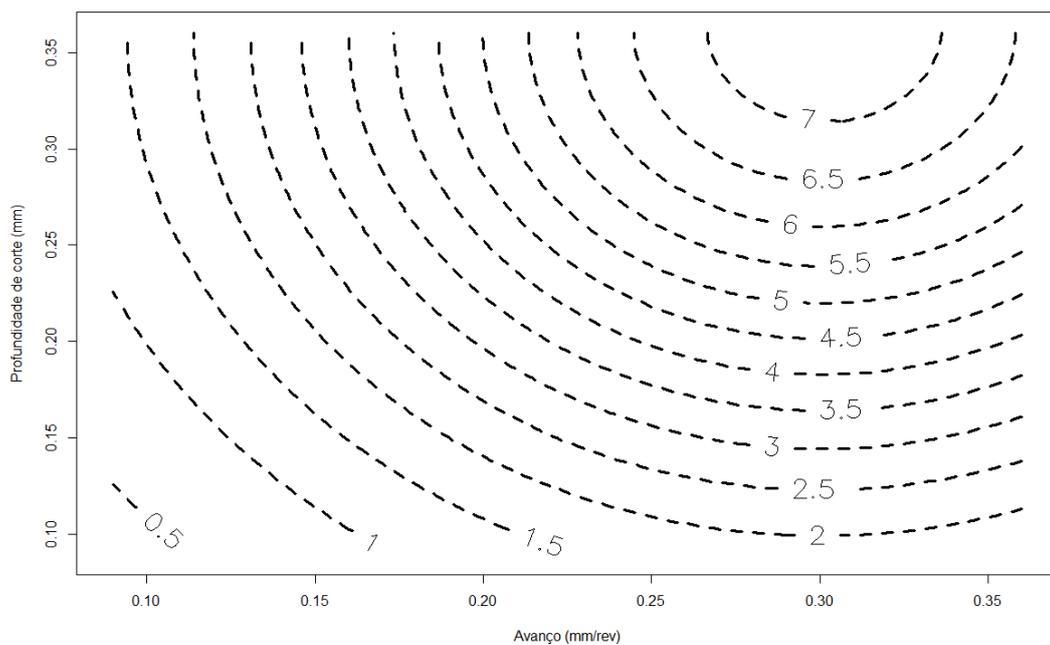
A partir da equação 24 foi possível criar a superfície de resposta e o gráfico de contorno para a resposta  $V_b/L_c$  conforme Figuras 54 e 55, considerando a velocidade de corte constante com valor igual a 265 m/min.

Figura 54 - Superfície de resposta para  $V_b/L_c$  utilizando ferramenta de alumina-magnésio.



Fonte: Autoria própria

Figura 55 - Gráfico de contorno para  $V_b/L_c$  utilizando ferramenta de alumina-magnésio.



Fonte: Autoria própria

## 4.2 FERRAMENTA ALUMINA+CROMO

### 4.2.1 Análise de potência

A análise de variância (ANOVA) para os dados de potência está mostrada na Tabela 20.

Tabela 20 - Análise de variância (ANOVA) para potência de corte utilizando ferramenta de alumina-cromo.

Fonte	GL	SQ SEQ	SQ Adj	F-Valor	P-Valor	% Contribuição
$V_C$	1	416550	416550	32,6	0,000	6,53%
$f$	1	9507	9507	0,74	0,401	0,15%
$a_p$	1	5307689	5307689	415,45	0,000	83,25%
$V_C * f$	1	67260	67260	5,26	0,360	1,05%
$V_C * a_p$	1	244413	244413	19,13	0,000	3,83%
$f * a_p$	1	74624	74624	5,84	0,028	1,17%
$V_C * f * a_p$	1	51456	51456	4,03	0,062	0,81%
Erro	16	204411	12775.69			
Total	23	6375910	416550	$R^2 = 96,76\%$		$R^2_{adj} = 92,79\%$

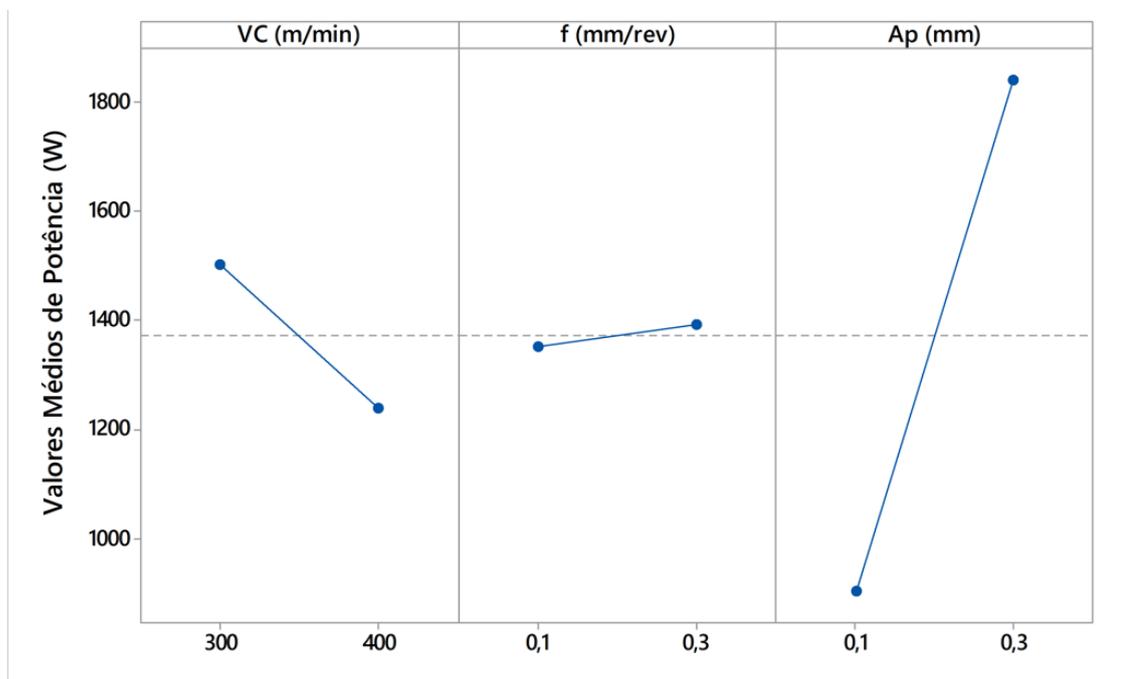
Fonte: Autoria própria

Através da análise de variância (ANOVA) utilizando um intervalo de confiança de 95% ( $\alpha = 5\%$ ) observa-se que os parâmetros que apresentaram significância estatística foram os fatores de primeira ordem  $V_C$  (p-valor = 0,000),  $a_p$  (p-valor = 0,000) e a interação entre  $V_C$  x  $a_p$  (p-valor = 0,000) e  $f * a_p$  (p-valor = 0,028).

O valor de R quadrático foi de 96,76% e o valor de R quadrático predito foi de 92,79%. Realizou-se o teste de Anderson-Darling para verificar a normalidade dos resíduos e obteve-se um p-valor = 0,235, desta forma garantindo a normalidade dos resíduos cumpridos.

Na Figura 56 está mostrado o gráfico de efeitos principais para potência de corte.

Figura 56 - Análise dos efeitos principais para potência de corte utilizando ferramenta de alumina-cromo.



Fonte: Autoria própria

Ao se aumentar o nível do parâmetro  $a_p$  aumenta-se a quantidade de material removido da peça durante o processo de torneamento, desta forma demandando-se uma maior energia do motor do centro de torneamento para executar a operação.

Em relação ao parâmetro  $V_C$ , observa-se que ao há uma diminuição da potência consumida pelo centro de torneamento quando há um aumento da velocidade de corte.

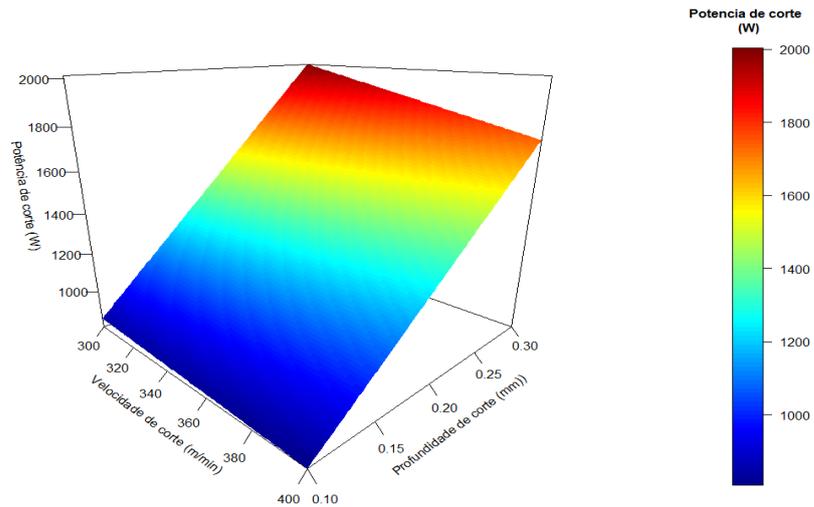
O valor médio de potência de corte durante os ensaios foi de 1374 W. A condição que minimiza os valores de potência é  $V_C = 400$  m/min,  $f = 0,1$  mm/rev e  $a_p = 0,1$  mm.

A partir da análise ANOVA, foi possível definir a equação que descreve o modelo de potência de corte conforme mostrado na Equação 25.

$$\begin{aligned}
 \text{Potência} = & 235 - 0,18 \times VC - 1462 \times f + 6400 \times Ap + 7,9 \times VC \times f - \\
 & 1,7 \times VC \times Ap + 26836 \times f \times Ap - 92,6 \times VC \times f \times Ap
 \end{aligned} \tag{25}$$

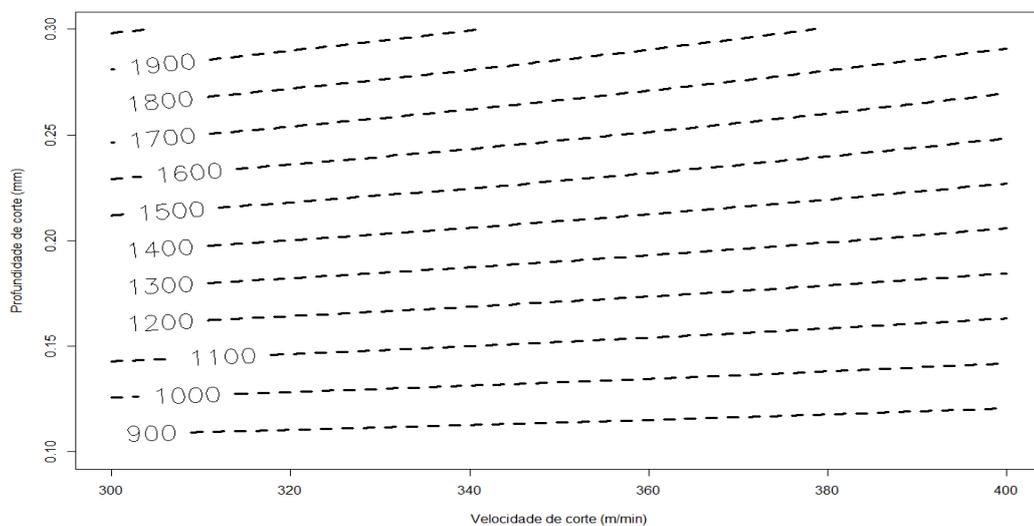
A partir da Equação 25 foi possível criar a superfície de resposta e o gráfico de contorno para a resposta potência de corte conforme Figuras 57 e 58, considerando o avanço constante com valor igual a 0,1 mm/rev.

Figura 57 - Superfície de resposta para potência de corte utilizando ferramenta de alumina-cromo.



Fonte: Autoria própria

Figura 58 - Gráfico de contorno para potência de corte utilizando ferramenta de alumina-cromo.



Fonte: Autoria própria

#### 4.2.2 Análise de vibração

Fez-se necessário realizar a transformação Box-Cox dos dados de vibração, após verificar a não normalidade dos resíduos ( $p$ -valor  $< 0,005$ ). Utilizou-se a Equação 14 com um valor estimado de  $\lambda$  igual a 0.

Após a normalização dos valores realizou-se a análise de variância para os valores de vibração conforme mostrado na Tabela 21.

Tabela 21 - Análise de variância (ANOVA) para vibração utilizando ferramenta de alumina-cromo.

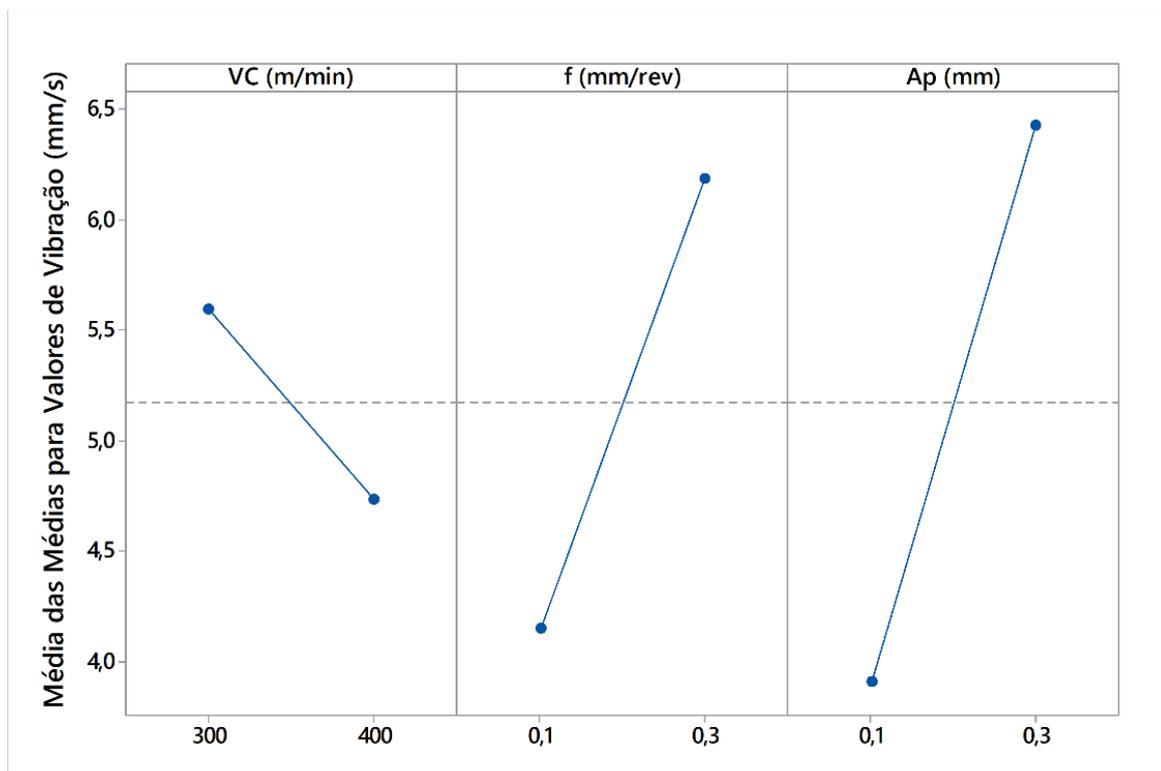
Fonte	GL	SQ SEQ	SQ Adj	F-Valor	P-Valor	% Contribuição
$V_C$	1	0,1132	0,1132	1,20	0,290	3,26%
$f$	1	0,58071	0,58071	6,15	0,025	16,71%
$a_p$	1	1,03159	1,03159	10,92	0,004	29,69%
$V_C * f$	1	0,05451	0,05451	0,58	0,459	1,57%
$V_C * a_p$	1	0,00376	0,00376	0,04	0,844	0,11%
$a_p * f$	1	0,17907	0,17907	1,90	0,188	5,15%
$V_C * f * a_p$	1	0,00013	0,00013	0,00	0,971	0,00%
Erro	16	1,51137				43,50%
Total	23	3,47436		$R^2 = 56,50 \%$		$R^2 \text{ adj} = 34,47\%$

Fonte: Autoria própria

Os fatores que se mostraram significativos para a resposta foi o fator  $a_p$  ( $p$ -valor = 0,004) e o  $f$  ( $p$ -valor = 0,025). O erro representou 43,50 % do resultado, desta forma sendo o fator que mais contribuiu para o resultado de vibração.

O valor quadrático de R foi de 56,50 % e o valor quadrático de R ajustado foi de 34,47 %. Aplicou-se o teste de Anderson-Darling nos resíduos e obteve-se um  $p$ -valor igual a 0,050, garantindo a normalidade dos resíduos. Na Figura 59 está mostrado o gráfico de efeitos principais para potência de corte.

Figura 59 - Análise dos efeitos principais para vibração utilizando ferramenta de alumina-cromo.



Fonte: Autoria própria

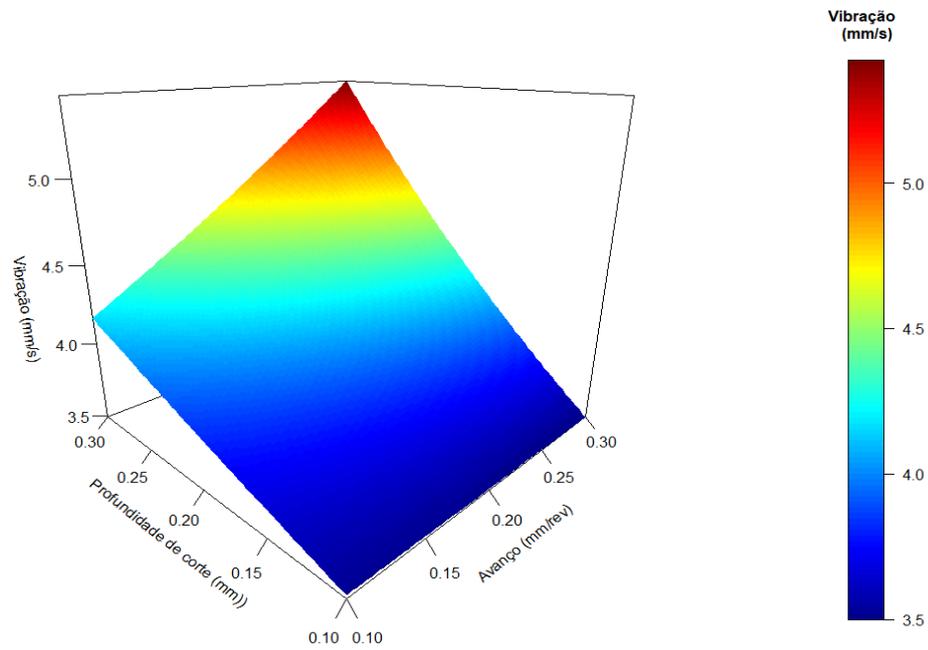
A combinação de parâmetros que produz o menor valor de vibração durante o processo de torneamento é  $V_C = 400$  m/min,  $f = 0,1$  mm/rev e  $a_p = 0,1$  mm. O valor médio de vibração durante os ensaios foi de 5,173 mm/s.

Realizou-se a transformação Box-Cox dos dados vibração com um  $\lambda = 0$ . A Equação 26 descreve o comportamento da vibração durante o processo de torneamento dentro dos limites do experimento:

$$\ln(\text{Vibração}) = 0,75 + 0,00112 \times VC + 3,49 \times f + 1,54 \times Ap - 0,0105 \times VC \times f - 0,0034 \times VC \times Ap + 7 \times f \times Ap + 0,005 \times VC \times f \times Ap \quad (26)$$

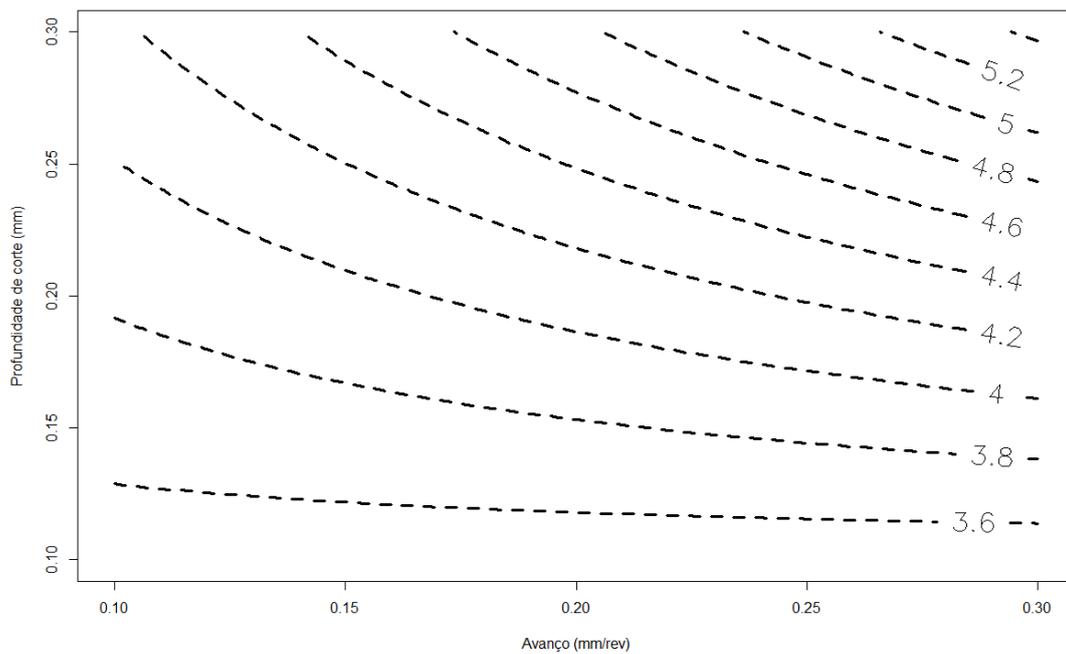
A partir da Equação 26 foi possível criar a superfície de resposta e o gráfico de contorno para a resposta vibração conforme Figuras 60 e 61, considerando a velocidade de corte constante com valor igual a 400 m/min.

Figura 60 - Superfície de resposta para valores de vibração utilizando ferramenta de alumina-cromo.



Fonte: Autoria própria

Figura 61 - Gráfico de contorno para vibração utilizando ferramenta de alumina-cromo.



Fonte: Autoria própria

### 4.2.3 Análise rugosidade $R_a$ e $R_t$

Os valores medidos de rugosidade após os ensaios.  $R_a$  e  $R_t$ . foram submetidos a análise das médias (ANOM) e análise de variância (ANOVA) de forma a se detectar quais os fatores significativos para o resultado.

Na Tabela 22 está mostrada a análise ANOVA para os valores de  $R_a$ .

Tabela 22 - Análise de variância (ANOVA) para rugosidade  $R_a$  utilizando ferramenta de alumina-cromo.

Fonte	GL	SQ SEQ	SQ Adj	F-Valor	P-Valor	% Contribuição
$V_C$	1	0,7025	0,7025	0,65	0,434	1,09
$f$	1	44,1623	44,1623	40,55	0,000	68,75
$a_p$	1	0,1273	0,1273	0,12	0,737	0,20
$V_C * f$	1	0,6848	0,6848	0,53	0,665	1,07
$V_C * a_p$	1	1,0542	1,0542	0,63	0,340	1,64
$f * a_p$	1	0,0088	0,0088	0,01	0,929	0,01
$V_C * f * a_p$	1	0,0746	0,0746	0,07	0,797	0,12
Erro	16	17,4249	1,0891			27,12
Total	23	64,2394		$R^2 = 72,88 \%$		$R^2_{adj} = 61,01 \%$

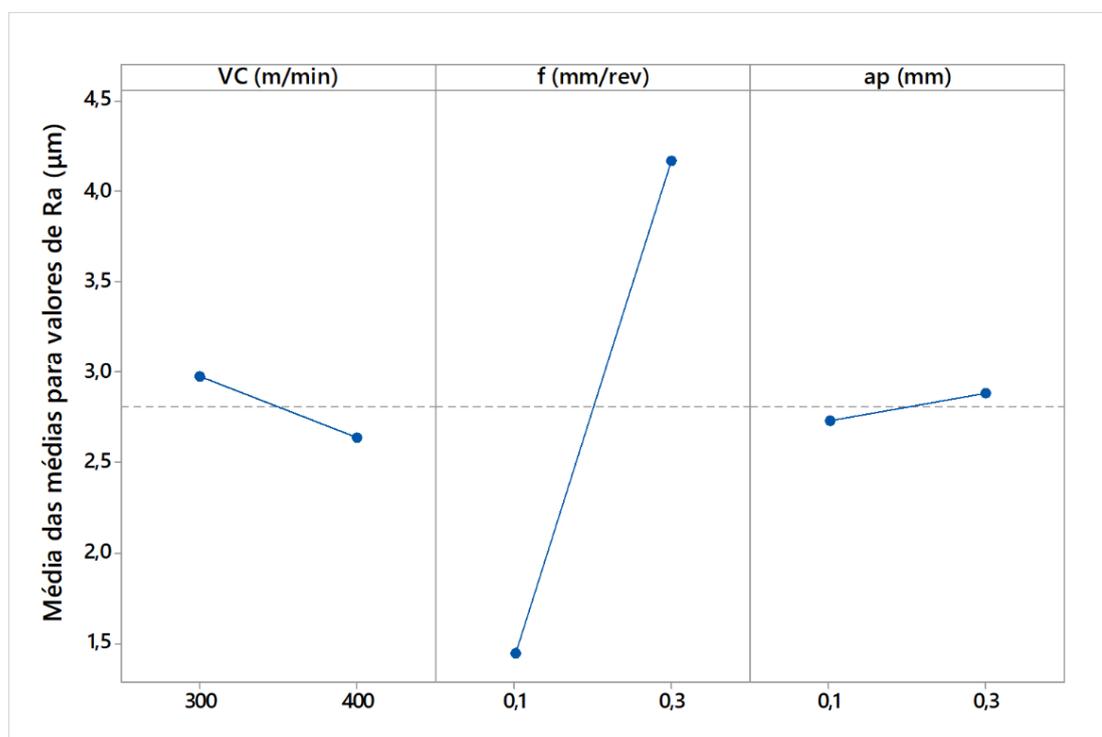
Fonte: Autoria própria

Observa-se que o único parâmetro que apresentou significância estatística foi o avanço (p-valor = 0,000). Tal resultado está de acordo com literatura sobre o tema conforme discutida no item 2.2.5 deste trabalho.

O valor quadrático de R foi de 72,88 % e o valor quadrático de R ajustado foi de 61,01 %. Aplicou-se o teste de Anderson-Darling nos resíduos e obteve-se um p-valor igual a 0,119, garantindo a normalidade dos resíduos.

A seguir realizou-se a análise das médias (ANOM) para os valores de rugosidade  $R_a$  conforme Figura 62.

Figura 62 - Análise dos efeitos principais para rugosidade Ra utilizando ferramenta de alumina-cromo.



Fonte: Autoria própria

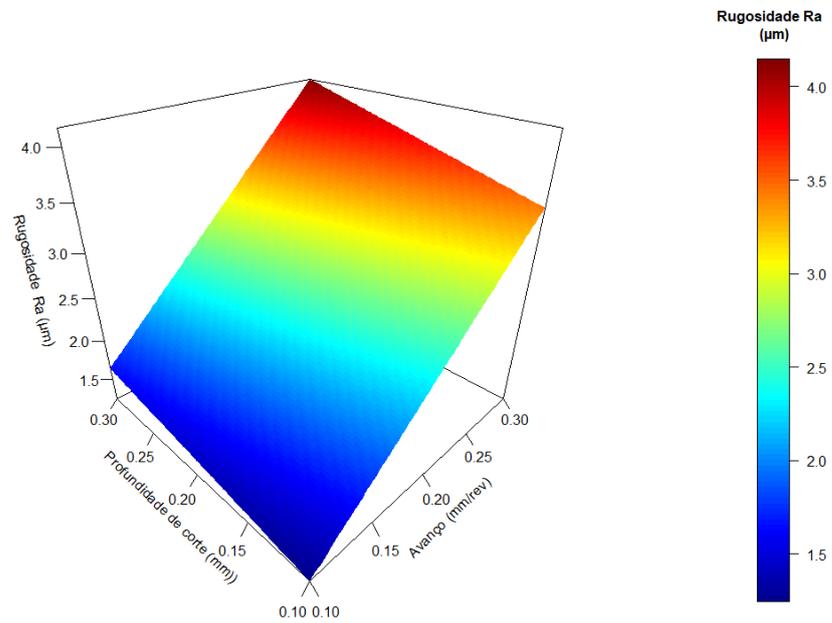
A partir da análise de médias é possível determinar o nível dos parâmetros que produz a menor resposta quanto a rugosidade  $R_a$ . A combinação de valores que minimiza a resposta é  $V_C = 400$  m/min,  $f = 0,1$  mm/rev e  $a_p = 0,1$  mm. O valor médio de rugosidade  $R_a$  durante o experimento foi de  $2,848 \mu\text{m}$ .

A partir da análise ANOVA determinou-se a equação que modela o resultado de rugosidade  $R_a$  para o experimento, conforme mostrado na Equação 27.

$$Ra (\mu\text{m}) = 0,23 + 0,0006 \times VC + 32,8 \times f - 6,5 \times Ap - 0,0561 \times VC \times f + 0,0196 \times VC \times Ap - 37 \times f \times Ap - 0,111 \times VC \times f \times Ap \quad (27)$$

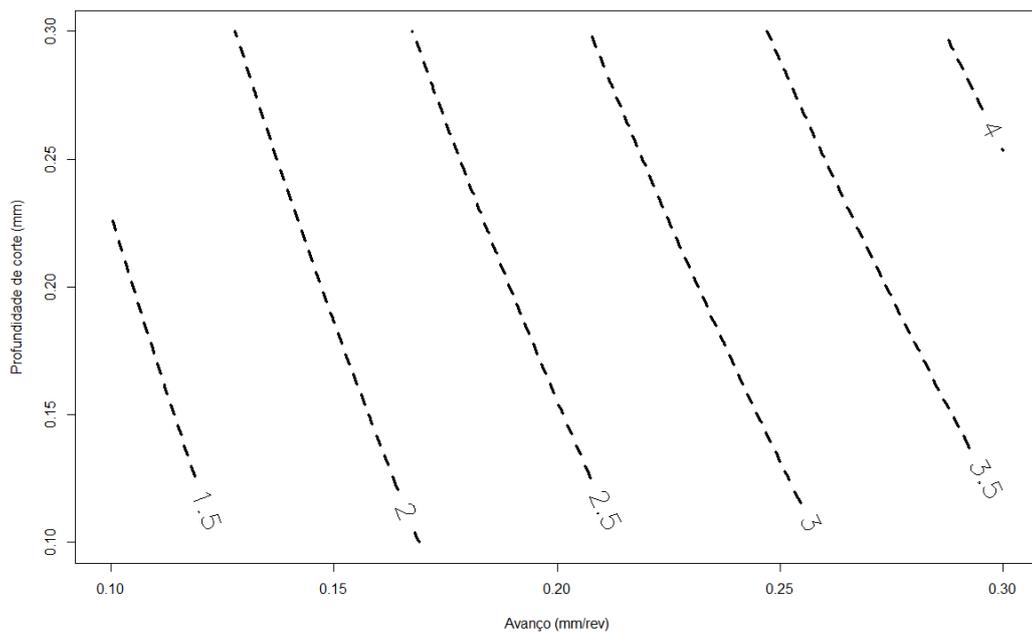
A partir da Equação 27 foi possível criar a superfície de resposta e o gráfico de contorno para a resposta rugosidade  $R_a$  conforme Figuras 63 e 64, considerando a velocidade de corte constante no valor de 400 m/min.

Figura 63 - Superfície de resposta para rugosidade  $R_a$  utilizando ferramenta de alumina-cromo.



Fonte: Autoria própria

Figura 64 - Gráfico de contorno para rugosidade  $R_a$  utilizando ferramenta de alumina-cromo.



Fonte: Autoria própria

Na Tabela 23 está mostrada a análise ANOVA para os valores de  $R_t$ .

Tabela 23 - Análise de variância (ANOVA) para rugosidade  $R_t$  utilizando ferramenta de alumina-cromo.

Fonte	GL	SQ SEQ	SQ Adj	F-Valor	P-Valor	% Contribuição
$V_C$	1	2,37	2,37	0,08	0,787	0,17%
$f$	1	579,88	579,88	18,49	0,001	41,74%
$a_p$	1	28,13	28,13	0,9	0,358	2,02%
$V_C * f$	1	59,39	59,39	1,89	0,188	4,27%
$V_C * a_p$	1	142,74	142,74	4,55	0,049	10,27%
$f * a_p$	1	44,64	44,64	1,42	0,250	3,21%
$V_C * f * a_p$	1	30,46	30,46	0,97	0,339	2,19%
Erro	16	501,74	31,3587			36,11%
Total	23	1389,39		$R^2 = 63,89 \%$		$R^2_{adj} = 48,09 \%$

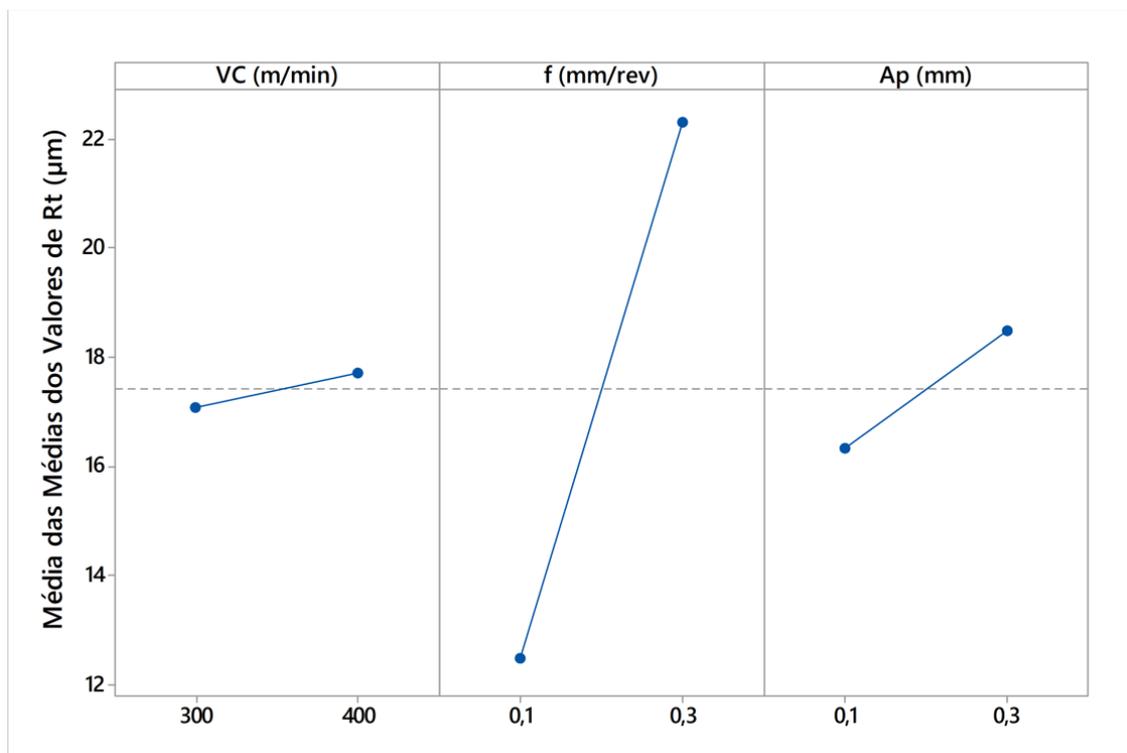
Fonte: Autoria própria

Observa-se que o parâmetro  $f$  (p-valor =0,001) e a interação entre  $V_C$  x  $a_p$  (p-valor = 0,049) foram os fatores que apresentaram significância estatística de acordo com a análise de variância.

O valor quadrático de R foi de 63,89 % e o valor quadrático de R ajustado foi de 48,09%. Aplicou-se o teste de Anderson-Darling nos resíduos e obteve-se um p-valor igual a 0,314, garantindo a normalidade dos resíduos

A seguir realizou-se a análise das médias (ANOM) para os valores de rugosidade  $R_t$  conforme Figura 65.

Figura 65 - Análise dos efeitos principais para rugosidade  $R_t$  utilizando ferramenta de alumina-cromo.



Fonte: Autoria própria

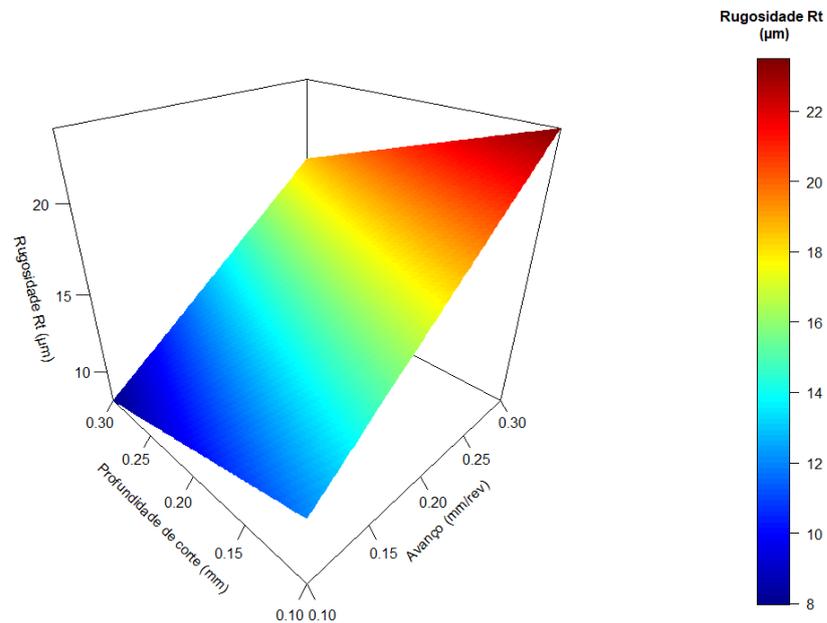
Observa-se a partir da análise de médias que para se obter os menores valores de rugosidade  $R_t$  todos os parâmetros devem ser ajustados em seu nível baixo, portanto a combinação que reduz o valor de  $R_t$  foi  $V_C = 300$  m/min,  $f = 0,1$  mm/rev e  $a_p = 0,1$  mm. A média das médias para valores de  $R_t$  foi de  $17,42 \mu\text{m}$ .

Na Equação 28 está descrito o modelo de rugosidade  $R_t$  para os valores dos ensaios.

$$R_t (\mu\text{m}) = -10,7 + 0,062 \times VC + 290 \times f - 29 \times Ap - 0,765 \times VC \times f + 0,037 \times VC \times Ap + 652 \times f \times Ap - 2,25 \times VC \times f \times Ap \quad (28)$$

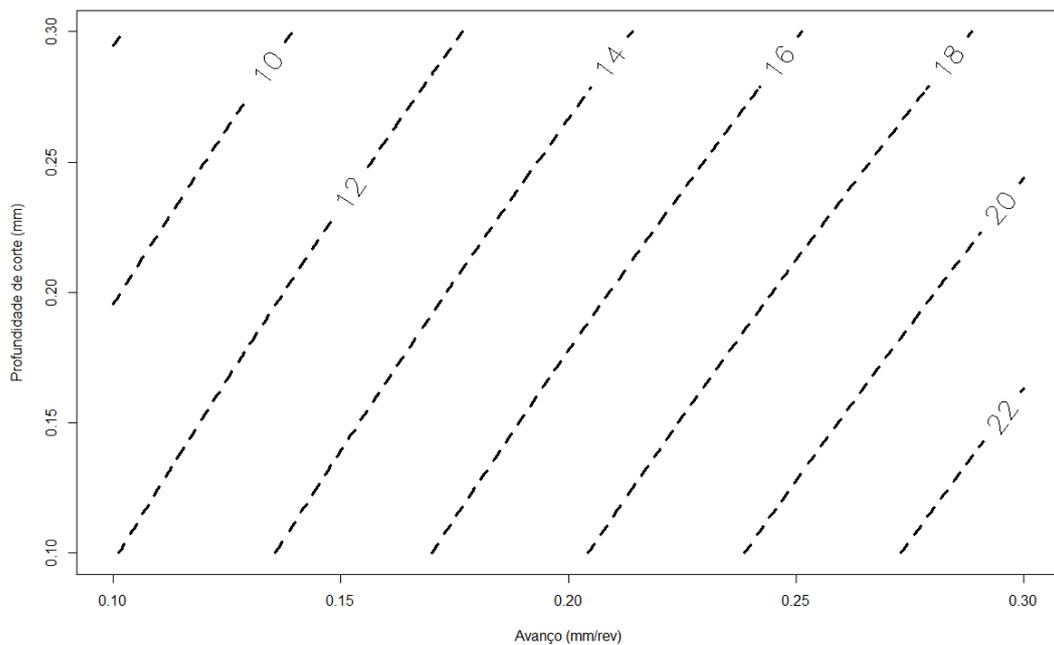
A partir da Equação 28 foi possível criar a superfície de resposta e o gráfico de contorno para a resposta rugosidade  $R_t$  conforme Figuras 66 e 67, considerando a velocidade de corte constante no valor de 300 m/min.

Figura 66 - Superfície de resposta para valores de rugosidade  $R_t$  utilizando ferramenta de alumina-cromo.



Fonte: Autoria própria

Figura 67 – Gráfico de contorno para rugosidade  $R_t$  utilizando ferramenta de alumina-cromo.



Fonte: Autoria própria

#### 4.2.4 Análise de emissão acústica

Os dados de emissão acústica medidos durante os ensaios de torneamento foram normalizados utilizando a transformação Box-Cox com um  $\lambda = -4$ . Após a normalização dos dados realizou-se a análise ANOVA dos resultados conforme mostrado na Tabela 24

Tabela 24 - Análise de variância (ANOVA) para emissão acústica utilizando ferramenta de alumina-cromo.

Fonte	GL	SQ SEQ	SQ Adj	F-Valor	P-Valor	% Contribuição
V <sub>C</sub>	1	1	1	0	0,992	0,00%
<i>f</i>	1	119398	119398	11,74	0,003	19,15%
a <sub>p</sub>	1	2723	2723	0,27	0,612	0,44%
V <sub>C</sub> * <i>f</i>	1	112340	112340	11,04	0,004	18,02%
V <sub>C</sub> * a <sub>p</sub>	1	33073	33073	3,25	0,090	5,30%
<i>f</i> * a <sub>p</sub>	1	191809	191809	18,86	0,001	30,76%
V <sub>C</sub> * <i>f</i> * a <sub>p</sub>	1	1483	1483	0,15	0,708	0,24%
Erro	16	162738	162738			26,10%
Total	23	623565	623565	R <sup>2</sup> = 73,90 %		R <sup>2</sup> adj = 62,48 %

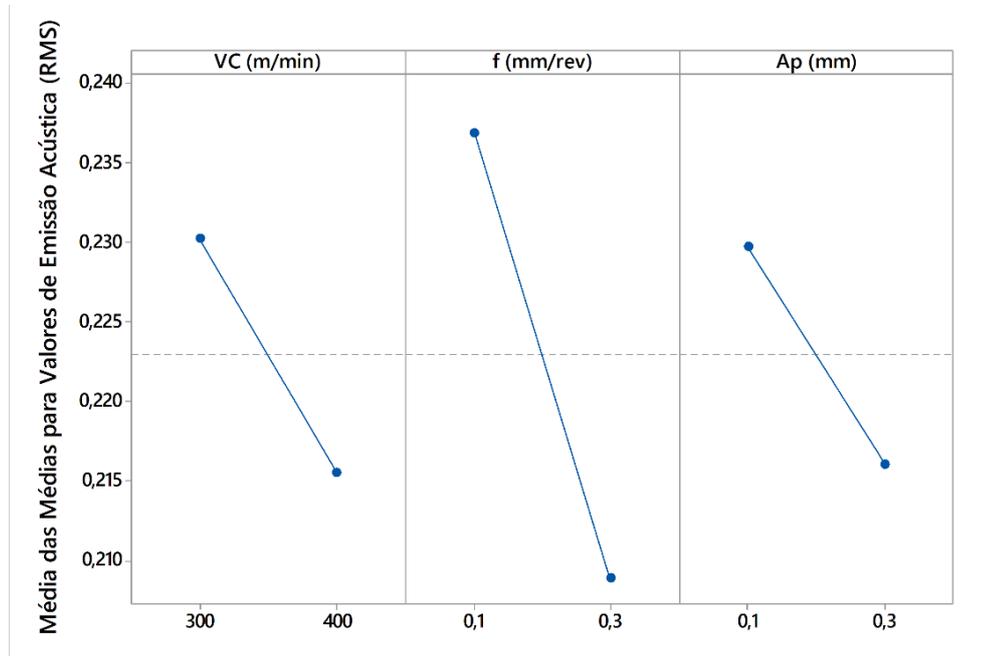
Fonte: Autoria própria

Os fatores significativos foram o avanço (p-valor = 0,003), as interações entre *f* x a<sub>p</sub> (p-valor = 0,001) e V<sub>C</sub> x *f* (p-valor = 0,004).

O valor quadrático de R foi de 73,90 % e o valor quadrático de R predito foi de 62,48 %. O teste de normalidade de Anderson-Darling foi aplicado nos resíduos e se obteve um p-valor de 0,887 garantindo a normalidade dos resíduos.

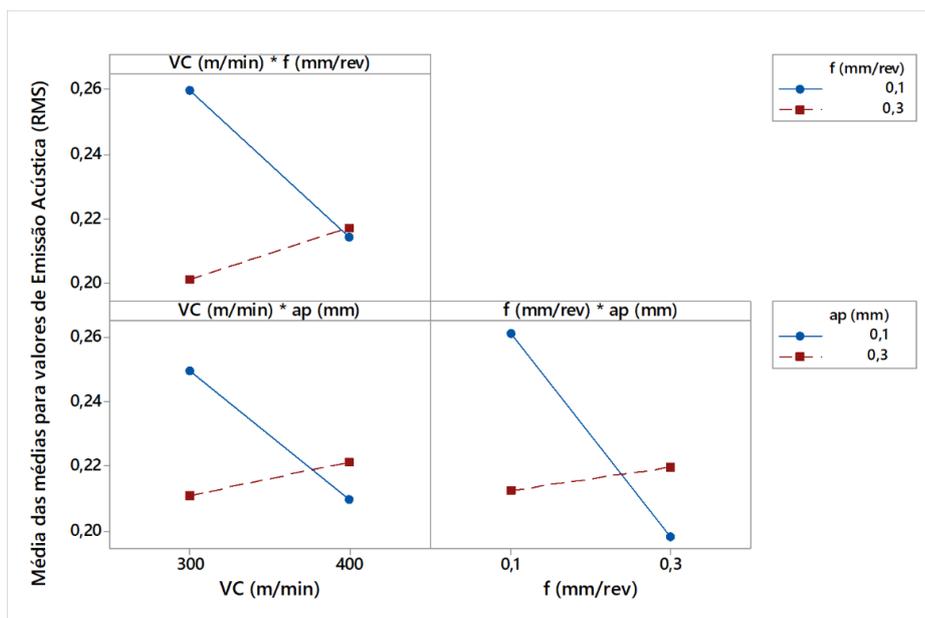
Os valores medidos de emissão acústica durante os ensaios foram analisados através de análise das médias (ANON), conforme mostrado nas Figuras 68 e 69.

Figura 68 - Análise dos efeitos principais para emissão acústica utilizando ferramenta de alumina-cromo.



Fonte: Autoria própria

Figura 69 - Análise das interações para emissão acústica utilizando ferramenta de alumina-cromo.



Fonte: Autoria própria

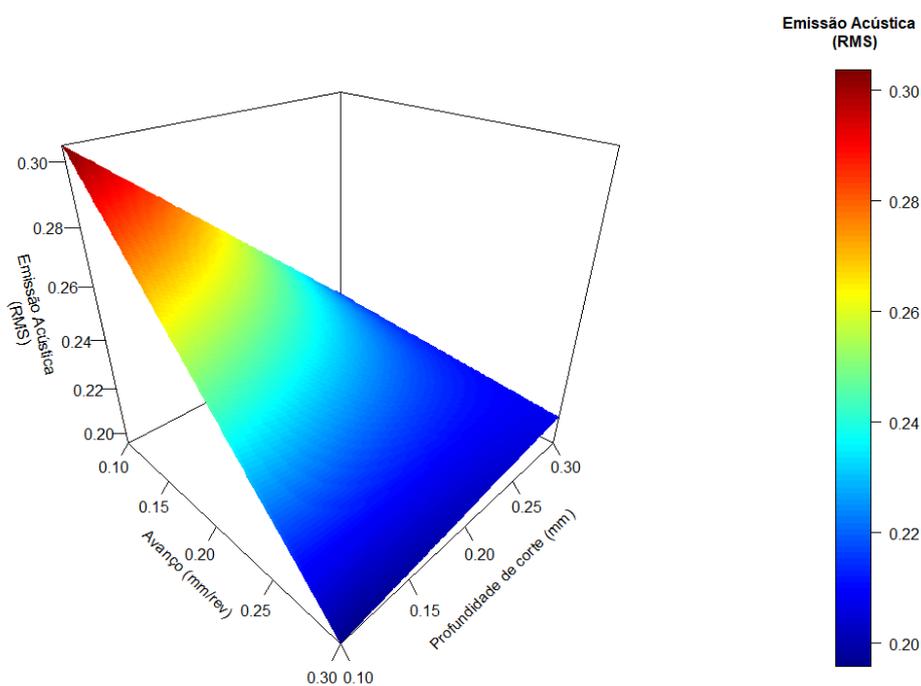
A partir da análise de efeitos principais e interações de fatores, observa-se que o menor resultado de emissão acústica durante o processo de torneamento ocorre quando a combinação dos fatores está em seu nível alto. Portanto a combinação que produz os menores resultados é  $V_C = 400$  m/min,  $f = 0,3$  mm/rev e  $a_p = 0,3$  mm. O valor médio da emissão acústica durante os ensaios foi de 0.222.

A partir da análise ANOVA determinou-se o modelo para emissão acústica, conforme descrito na Equação 29.

$$EA (RMS) = -1689 + 4.85 \times VC + 8383 \times f + 5380 \times Ap - 16.83 \times VC \times f - 10.57 \times VC \times Ap - 14442 \times f \times Ap + 15.7 \times VC \times f \times Ap \quad (29)$$

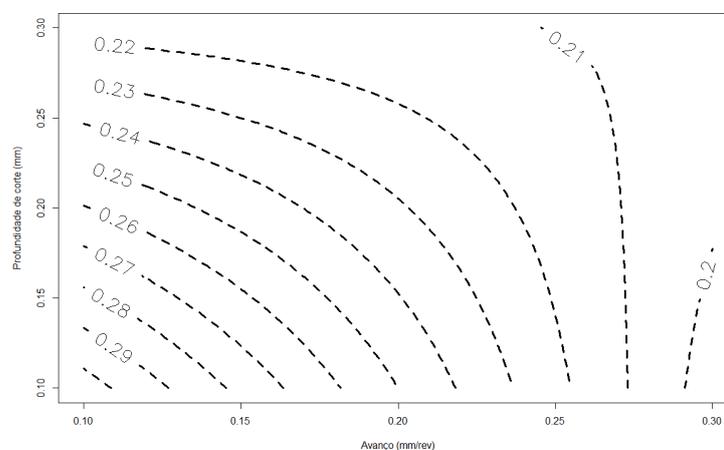
A partir da Equação 29 foi possível criar a superfície de resposta e o gráfico de contorno para a resposta de emissão acústica conforme Figuras 70 e 71, considerando a velocidade de corte constante no valor de 300 m/min.

Figura 70 - Superfície de resposta para valores de rugosidade  $R_t$  utilizando ferramenta experimental a base de  $Al_2O_3 + Cr_2O_3$ .



Fonte: Autoria própria

Figura 71 - Gráfico de contorno para emissão acústica utilizando ferramenta experimental a base de  $Al_2O_3 + Cr_2O_3$ .



Fonte: Autoria própria

#### 4.2.5 Análise de desgaste de flanco (VB)/ percurso de corte $L_c$

Os dados de VB/ $L_c$  medidos durante os ensaios de torneamento foram normalizados utilizando a transformação Box-Cox com um  $\lambda = 0$ . Após a normalização dos dados realizou-se a análise ANOVA dos resultados conforme Tabela 25

Tabela 25 - Análise de variância (ANOVA) para  $V_B/L_c$  utilizando ferramenta de alumina-cromo.

Fonte	GL	SQ SEQ	SQ Adj	F-Valor	P-Valor	% Contribuição
$V_C$	1	0,012	0,012	0,01	0,925	0,07%
$f$	1	11,3047	11,3047	82,50	0,000	61,36%
$a_p$	1	3,9630	3,9630	28,92	0,000	21,51%
$V_C * f$	1	0,0075	0,0075	0,05	0,822	0,04%
$V_C * a_p$	1	0,0714	0,0714	0,52	0,481	0,39%
$f * a_p$	1	0,8836	0,8836	6,45	0,022	4,80%
$V_C * f * a_p$	1	0,0003	0,0003	0,00	0,966	0,00%
Erro	16	2,21923	2,21923			12,05%
Total	23	18,4237		$R^2 = 88,10$ %		$R^2$ adj = 82,89 %

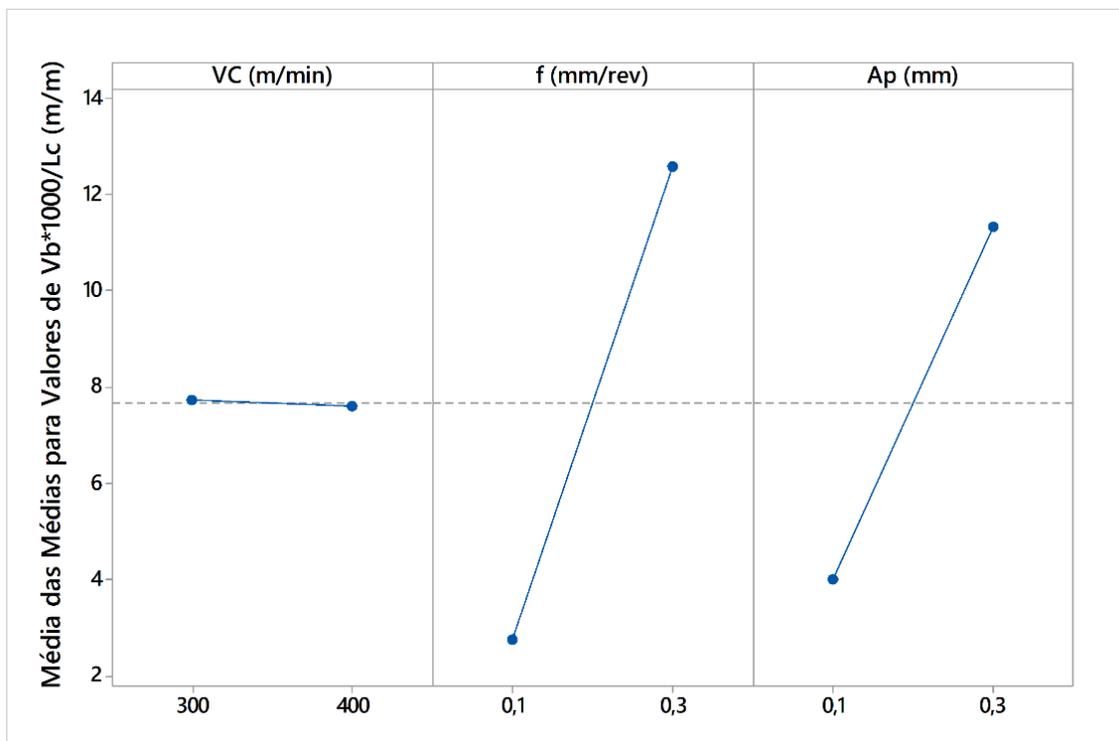
Fonte: Autoria própria

O parâmetro  $f$  (p-valor = 0,000),  $a_p$  (p-valor = 0,000) e a interação  $f * a_p$  (p-valor = 0,022) foram os fatores significativos para a resposta desgaste de flanco/percurso de corte.

O modelo apresentou um valor quadrático de R de 88,10 % e um valor quadrático de R predito de 82,89 %, e o teste de normalidade de Anderson-Darling apresentou um p-valor igual a 0,222 garantindo a normalidade dos resíduos.

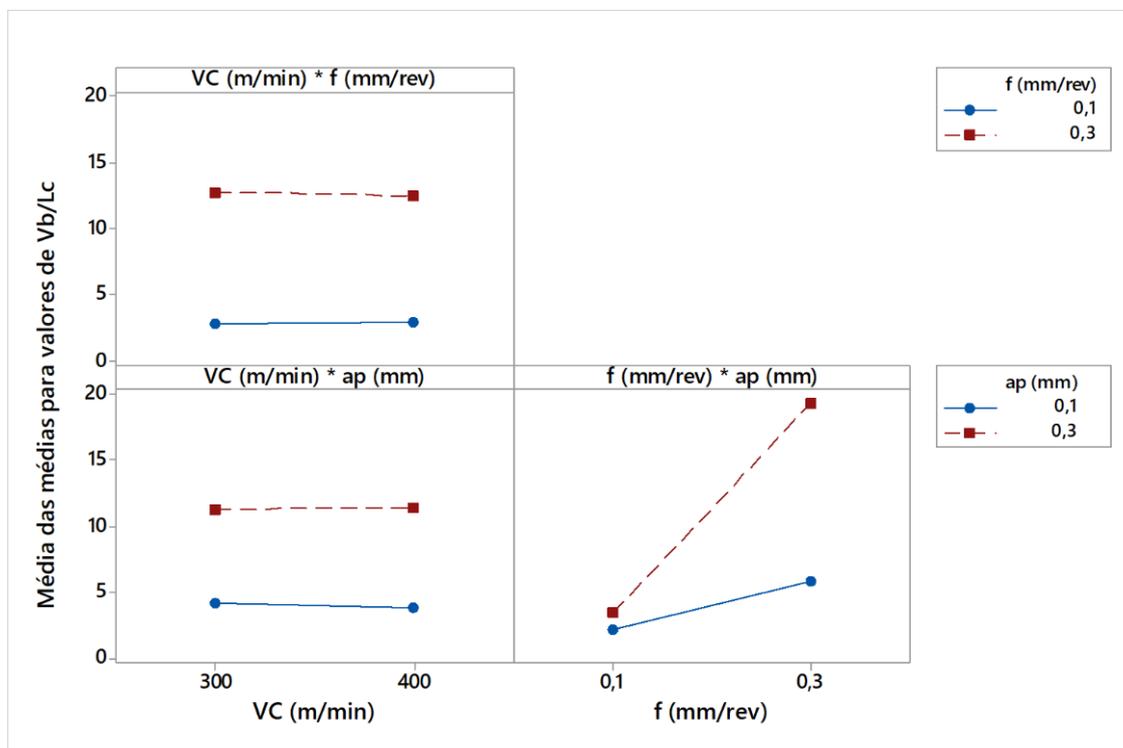
Os valores medidos de VB/Lc durante os ensaios foram analisados através de análise das médias (ANON). conforme mostrado nas Figuras 72 e 73.

Figura 72 - Análise dos efeitos principais para VB/Lc utilizando ferramenta de alumina-cromo.



Fonte: Autoria própria

Figura 73 - Análise das interações para VB/Lc utilizando ferramenta de alumina-cromo.



Fonte: Autoria própria

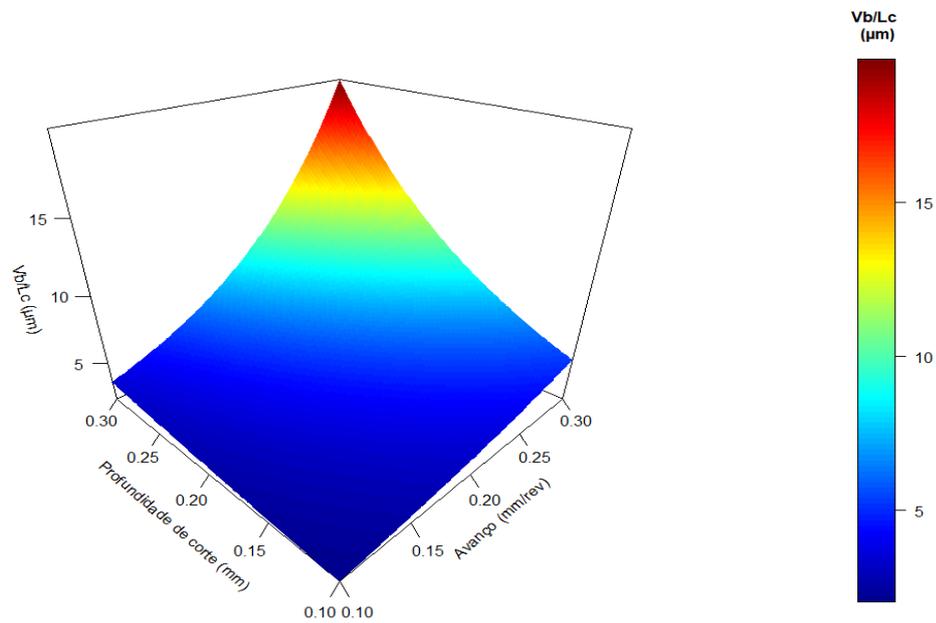
A partir da análise das médias, observa-se que para minimizar o resultado  $VB/L_c$  a combinação de parâmetros de entrada é  $V_C = 400$  m/min,  $f = 0,1$  mm/rev e  $a_p = 0,1$  mm.

Realizou-se a transformação Box-Cox dos dados utilizando um  $\lambda = 0$ . A partir da análise ANOVA determinou-se o modelo para  $VB/L_c$ , conforme descrito na Equação 30.

$$\ln V_b/L_c = 0,7 - 0,00137 \times VC + 4,7 \times f - 3,1 \times Ap - 0,0048 \times VC \times f + 0,0096 \times VC \times Ap - 16,9 \times f \times Ap + 0,007 \times VC \times f \times Ap \quad 30)$$

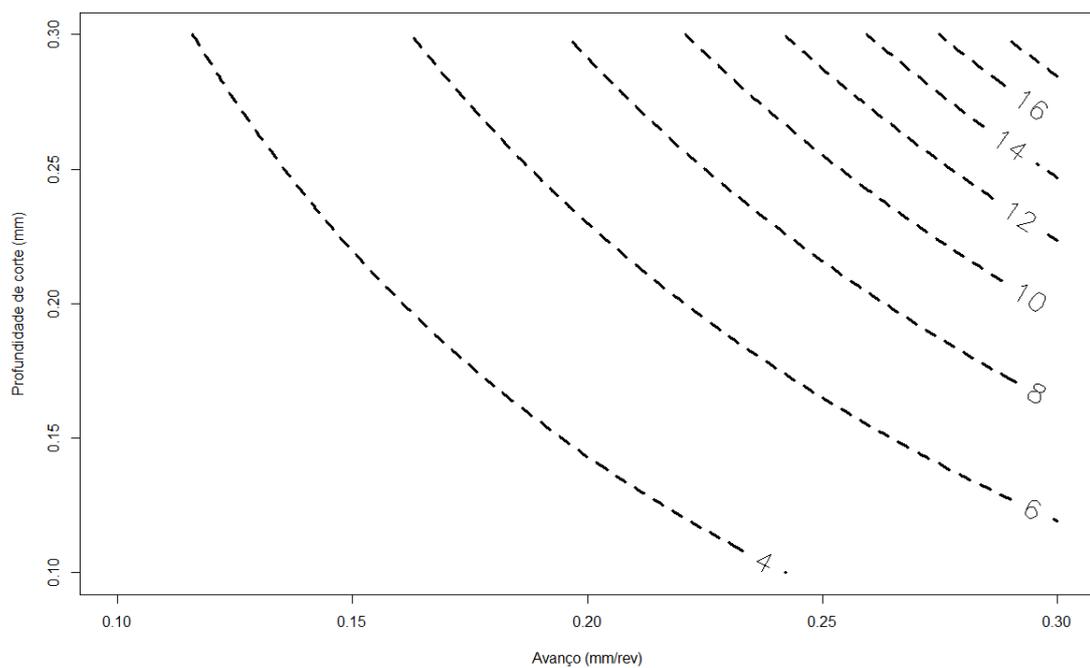
A partir da Equação 30, foi possível criar a superfície de resposta e o gráfico de contorno para a resposta  $V_b/L_c$  conforme Figuras 74 e 75, considerando a velocidade de corte constante no valor de 400 m/min

Figura 74 - Superfície de resposta para valores de  $V_b/L_c$  utilizando ferramenta de alumina-cromo.



Fonte: Autoria própria

Figura 75 – Gráfico de contorno para rugosidade  $R_t$  utilizando ferramenta de alumina-cromo.



Fonte: Autoria própria

### 4.3 ANÁLISE DOS DESGASTES

Nesta seção serão descritos os desgastes observados nas ferramentas cerâmicas experimentais durante os ensaios de torneamento.

#### 4.3.1 Ferramenta alumina-magnésio

Nas Figuras 76 e 77 estão mostrados os desgastes da ferramenta cerâmica de alumina-magnésio para as condições  $V_C = 300$  m/min,  $f = 0,15$  mm/rev e  $a_p = 0,15$  mm e  $V_C = 400$  m/min,  $f = 0,15$  mm/rev e  $a_p = 0,15$  mm respectivamente.

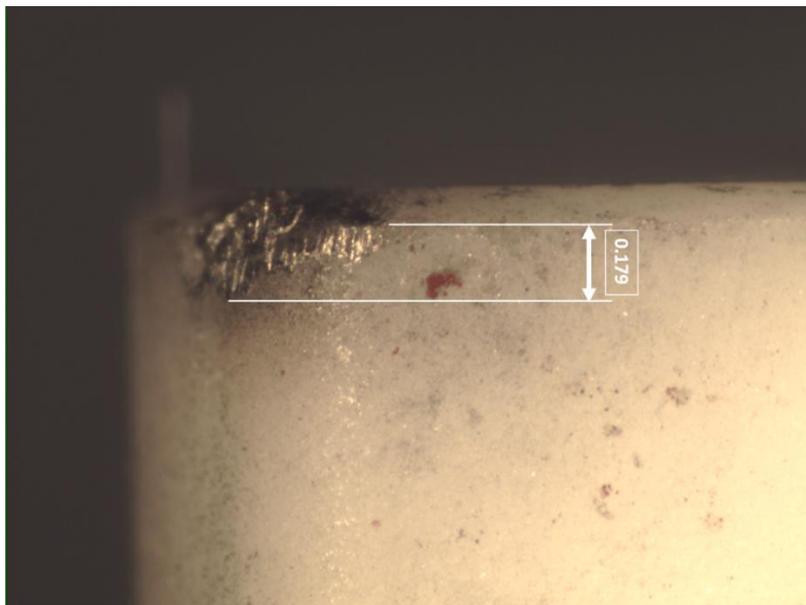
É possível observar o desgaste de flanco na superfície de folga da ferramenta em ambas as condições de corte, contudo para  $V_C = 300$  m/min há a presença do desgaste do tipo lascamento na aresta de corte. O mecanismo de desgaste atuante durante o processo de torneamento foi o do tipo abrasivo devido as características da superliga VAT 80A e conforme descrito por, Ezugwu *et al.* (2003), Chavan *et al.* (2019), Ribeiro (2020) e Günay *et al.* (2020).

Figura 76 - Desgaste de flanco para  $V_C = 300$  m/min,  $f = 0,15$  mm/rev e  $a_p = 0,15$  mm.



Fonte: Autoria própria.

Figura 77 - Desgaste de flanco para  $V_c = 400$  m/min,  $f = 0,15$  mm/rev e  $a_p = 0,15$  mm.



Fonte: Autoria própria.

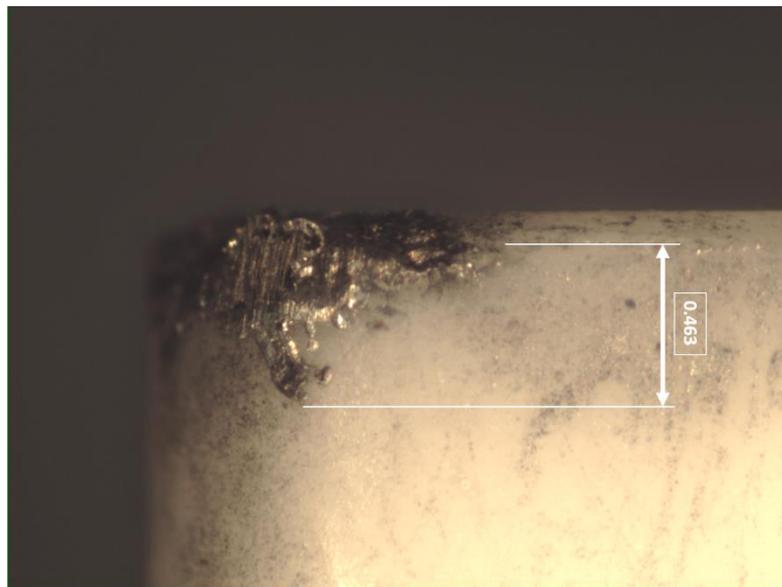
Nas Figuras 78 e 79 estão mostrados os desgastes da ferramenta cerâmica de alumina-magnésio para as condições a)  $V_C = 350$  m/min,  $f = 0,09$  mm/rev e  $a_p = 0,23$  mm e b)  $V_C = 350$  m/min,  $f = 0,36$  mm/rev e  $a_p = 0,23$  mm.

Figura 78 - Desgaste de flanco para  $V_C = 350$  m/min,  $f = 0,09$  mm/rev e  $a_p = 0,23$  mm.



Fonte: Autoria própria.

Figura 79 - Desgaste de flanco para  $V_C = 350$  m/min,  $f = 0.36$  mm/rev e  $a_p = 0.23$  mm.

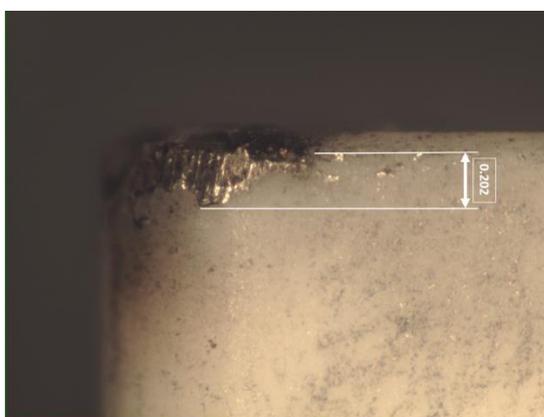


Fonte: Autoria própria.

De acordo com a análise de variância o avanço foi o fator que mais contribuiu para o resultado do desgaste de flanco/percurso de corte. Para o menor avanço,  $f = 0.09$  mm/ver, o desgaste medido foi de 0.087 mm e para o maior avanço,  $f = 0.36$  mm/rev, o desgaste medido foi de 0.463. O mecanismo principal de desgaste observado é do tipo abrasivo.

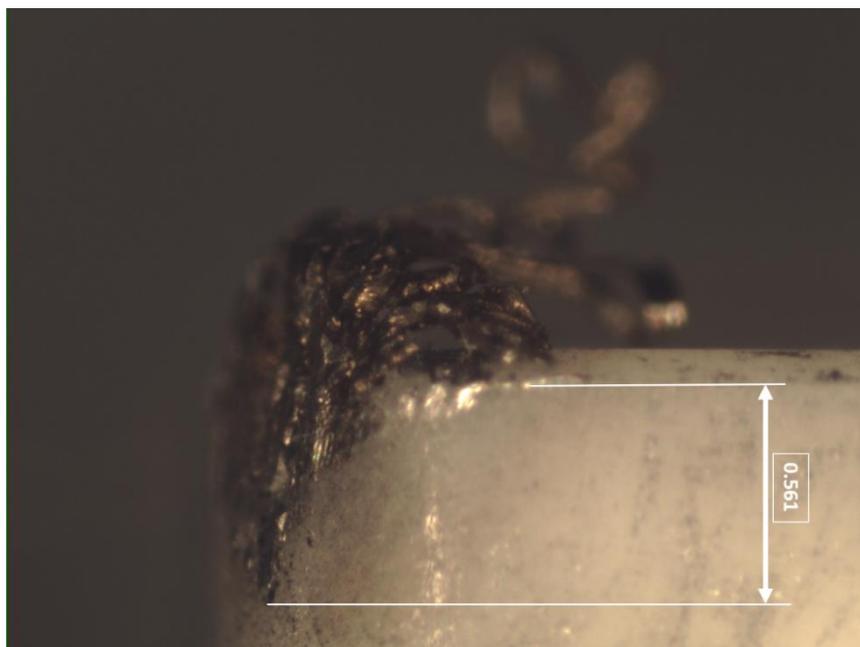
Nas figuras 80, 81 e 82 estão mostrados, respectivamente, os desgastes observados para as seguintes condições  $V_C = 350$  m/min,  $f = 0,23$  mm/rev e  $a_p = 0,09$  mm;  $V_C = 350$  m/min,  $f = 0.09$  mm/rev e  $a_p = 0.36$  mm;  $V_C = 350$  m/min,  $f = 0,23$  mm/rev e  $a_p = 0,23$  mm

Figura 80 - Desgaste de flanco para  $V_C = 350$  m/min,  $f = 0,23$  mm/rev e  $a_p = 0,09$  mm.



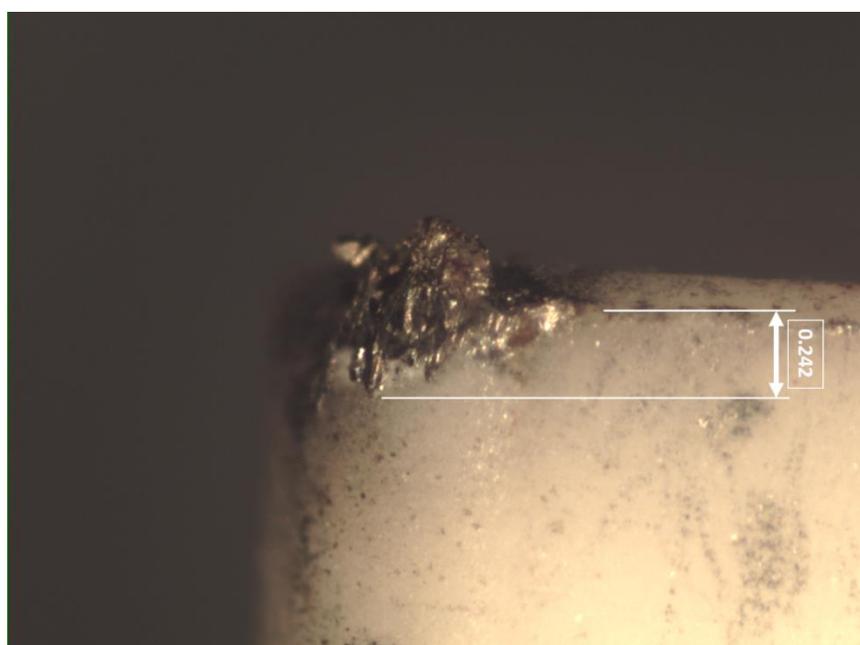
Fonte: Autoria própria.

Figura 81 - Desgaste de flanco para  $VC = 350$  m/min,  $f = 0,23$  mm/rev e  $a_p = 0,36$  mm.



Fonte: Autoria própria.

Figura 82 - Desgaste de flanco para  $VC = 350$  m/min,  $f = 0,23$  mm/rev e  $a_p = 0,23$  mm.



Fonte: Autoria própria.

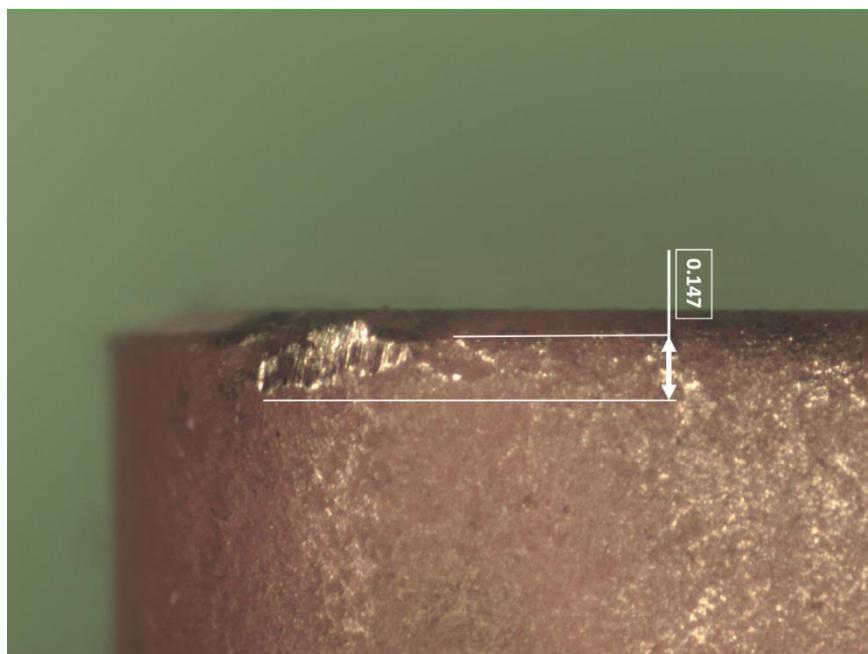
É possível observar a influência do parâmetro  $a_p$  no resultado de desgaste da ferramenta cerâmica de alumina-magnésio. Para valores de  $a_p = 0,23$  mm e  $a_p = 0,36$  mm, é possível

observar a presença de material aderido na aresta de corte da ferramenta, o que não ocorre quando o fator se apresenta em seu nível mínimo,  $a_p = 0,09$  mm.

### 4.3.2 Ferramenta alumina-cromo

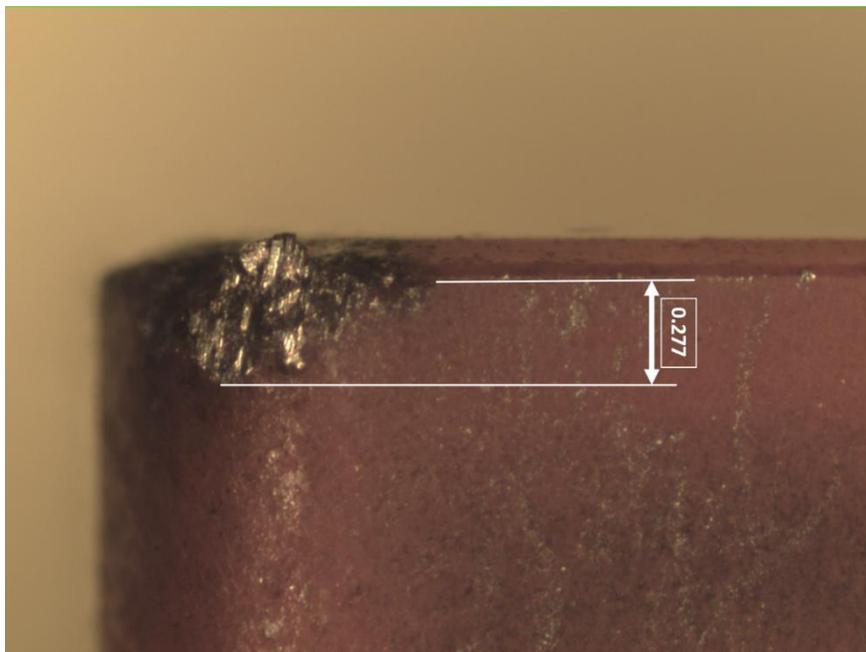
Nas figuras 83 e 84 estão dispostos, respectivamente, os desgastes ocorridos na ferramenta de corte de alumina-cromo com os parâmetros de corte  $V_C = 300$  m/min,  $a_p = 0,1$  mm e  $V_c = 300$  m/min.  $f = 0,30$  mm/rev e  $a_p = 0,10$  mm.

Figura 83 - Desgaste de flanco para  $V_c = 300$  m/min.  $f = 0,10$  mm/rev e  $a_p = 0,10$  mm.



Fonte: Autoria própria

Figura 84 - Desgaste de flanco para  $V_c = 300$  m/min.  $f = 0,30$  mm/rev e  $a_p = 0,10$  mm.



Fonte: Autoria própria

Conforme o resultado da análise de variância ANOVA, o avanço é fator que mais contribuiu para o resultado do desgaste de flanco/percurso de corte ( $VB/L_c$ ). No nível baixo, isto é,  $f = 0,1$  mm/rev o desgaste medido foi de 0,147 mm enquanto em seu nível alto,  $f = 0,3$ , mm/rev, o desgaste medido foi de 0,277 mm.

Observa-se que para ambos os níveis há a presença de material aderido na aresta de corte, sendo este mais pronunciado no nível alto. Desta forma, afirma-se que um dos mecanismos atuantes durante os ensaios foi o de adesão que acarreta a formação de uma aresta postiça de corte na superfície da ferramenta. Devido as características da superliga VAT 80A<sup>®</sup>, é possível observar na aresta de corte da ferramenta a atuação de outro mecanismo de desgaste que é o desgaste por abrasão.

Nas figuras 85 e 86 estão dispostos, respectivamente, os desgastes ocorridos na ferramenta de corte de alumina-cromo com os parâmetros de corte  $V_C = 400$  m/min,  $f = 0,1$  mm e corte  $V_C = 400$  m/min,  $f = 0,3$  mm.

A figura 86 representa a melhor condição de parâmetros de entrada quanto a resposta ( $V_b/L_c$ ).

Figura 85 - Desgaste de flanco para  $V_c = 400$  m/min.  $f = 0,10$  mm/rev e  $a_p = 0,10$  mm (ampliação 3x).



Fonte: Autoria própria

Figura 86 - Desgaste de flanco para  $V_c = 400$  m/min.  $f = 0,10$  mm/rev e  $a_p = 0,30$  mm (ampliação 3x).

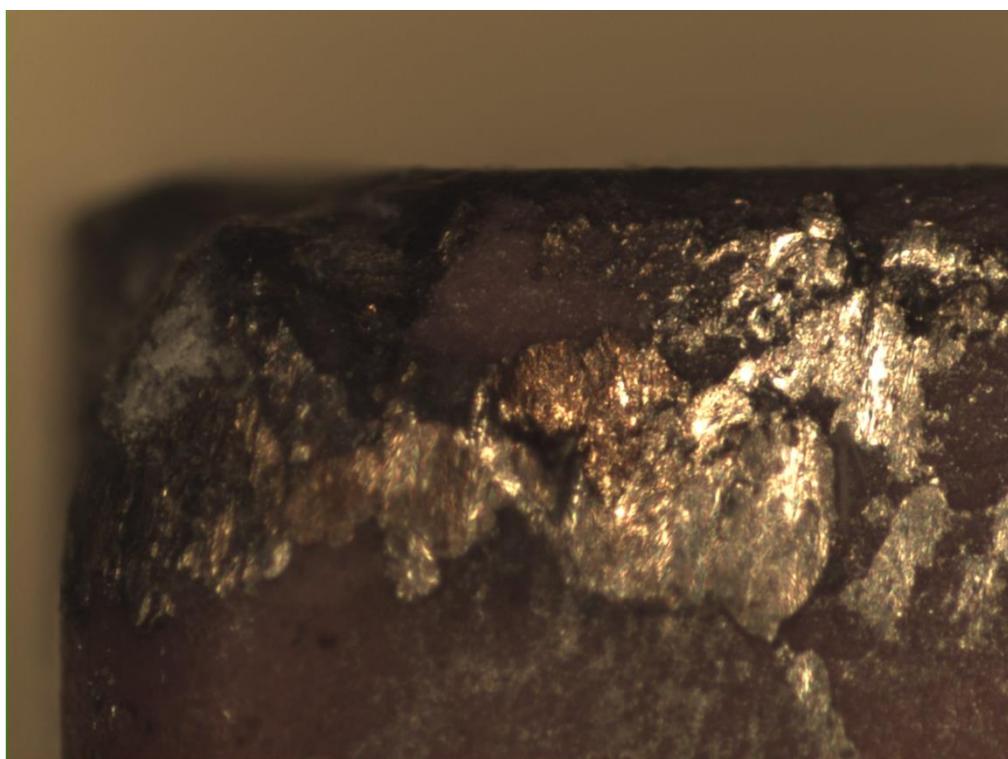


Fonte: Autoria própria

De acordo com a análise de variância, a profundidade de corte representou 21.51 % do resultado de desgaste de flanco/percurso de corte ( $VB/L_c$ ). É possível observar que tanto para o nível baixo,  $a_p = 0,1$  mm, e o nível alto,  $a_p = 0,3$  mm, há a presença de material aderido na aresta de corte da ferramenta e desgaste do tipo abrasivo.

A combinação de parâmetros de corte para  $V_c = 300$  m/min.  $f = 0,30$  mm/rev e  $a_p = 0,30$  mm produz a maior resposta quanto a potência de corte consumida. Na Figura 88 está mostrada a aresta de corte para essa condição.

Figura 87 - Desgaste de flanco para  $V_c = 300$  m/min.  $f = 0,30$  mm/rev e  $a_p = 0,30$  mm.



Fonte: Autoria própria

Nesta combinação de parâmetros de entrada ocorre a quebra da aresta de corte da ferramenta devido a combinação dos altos esforços que ocorrem durante o processo de torneamento e a alta abrasividade do material. Os desgastes apresentados estão de acordo com Ribeiro (2020) que estudou o emprego de ferramentas cerâmicas experimentais na usinagem da superliga VAT 32<sup>®</sup>.

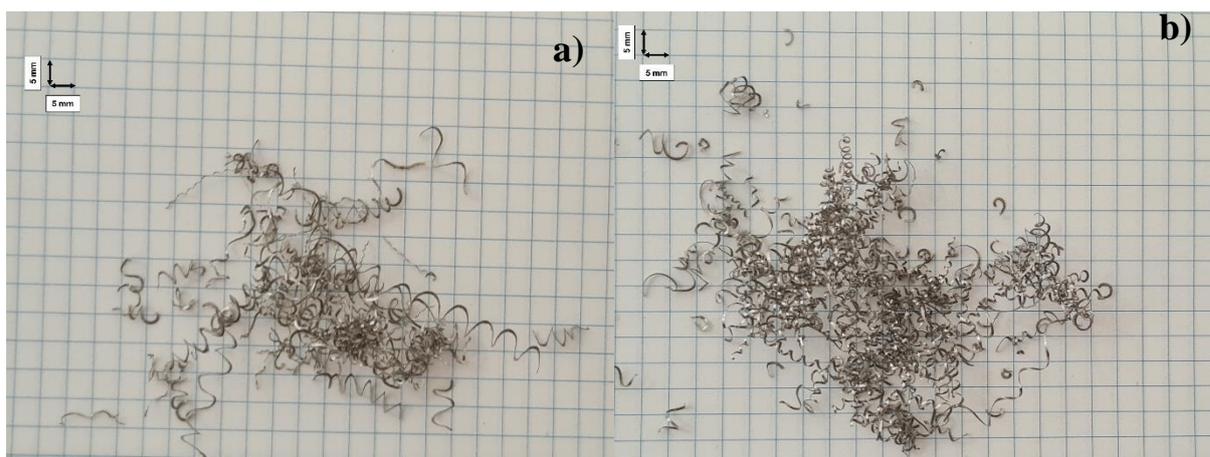
#### 4.4 ANÁLISE DOS CAVACOS

Nesta seção serão descritos os desgastes observados nas ferramentas cerâmicas experimentais durante os ensaios de torneamento.

##### 4.4.1 Ferramenta alumina-magnésio

Nas Figuras 89a e 89b estão mostrados os cavacos produzidos durante os ensaios de torneamento para os fatores  $f = 0,15$  mm/rev e  $a_p = 0,15$  mm. Observa-se que o formato dos cavacos produzidos foi do tipo helicoidal curto. Para a Figura 88a o parâmetro  $V_C = 300$  m/min, e para Figura 88b  $V_C = 400$  m/min.

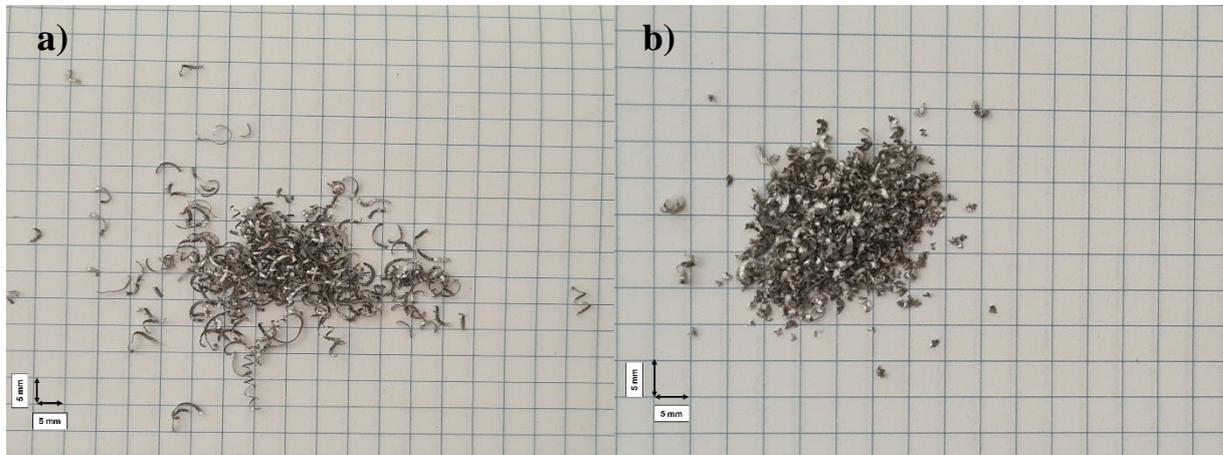
Figura 88 – Cavacos produzidos para  $f = 0,15$  mm/rev,  $a_p = 0,15$  mm e a)  $V_C = 300$  m/min e b)  $V_C = 400$  m/min.



Fonte: Autoria própria

Mantendo-se constante os valores de  $V_C = 400$  m/min,  $f = 0,30$  mm e alterando-se o parâmetro  $a_p$ , observa-se que o formato dos cavacos produzidos se altera. Para  $a_p = 0,15$  mm, os cavacos são classificados como helicoidais curtos, enquanto para  $a_p = 0,30$  mm os cavacos podem ser classificados como cavacos fragmentados, conforme mostrados nas Figuras 89a e 89b

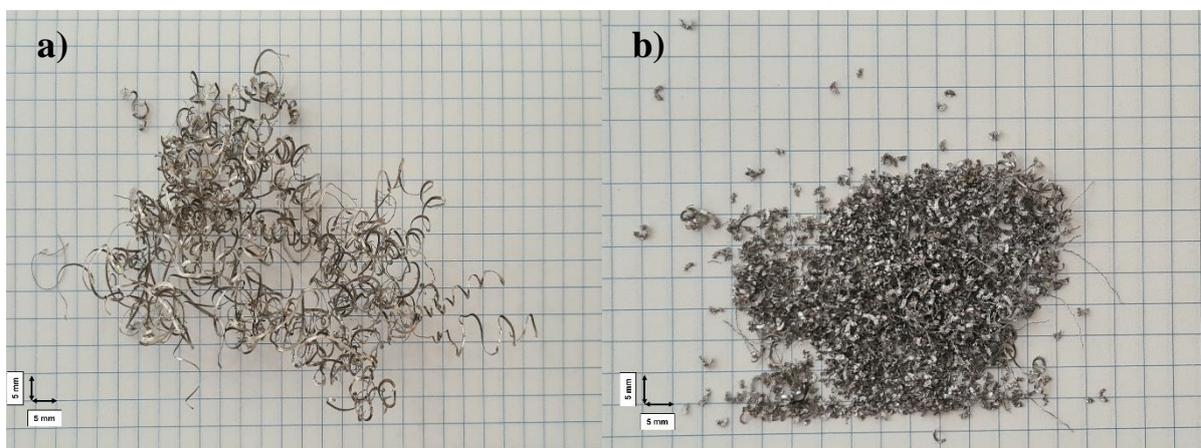
Figura 89 – Cavacos produzidos para  $V_C = 400$  m/min,  $f = 0,30$  mm/rev, e a)  $a_p = 0,15$  mm e b)  $a_p = 0,30$  mm



Fonte: Autoria própria

Quando se altera o nível do avanço durante os ensaios de torneamento observa-se a mudança do formato do cavaco. Para  $f = 0,09$  mm/rev têm-se um cavaco contínuo em formato helicoidal conforme mostrado na Figura 90a, ao se elevar o avanço para seu  $f = 0,36$  mm/rev, têm-se um cavaco do fragmentado conforme mostrado na Figura 90b, nesta configuração de parâmetros de entrada têm-se os maiores valores de rugosidade  $R_a$  de acordo com a análise de variância.

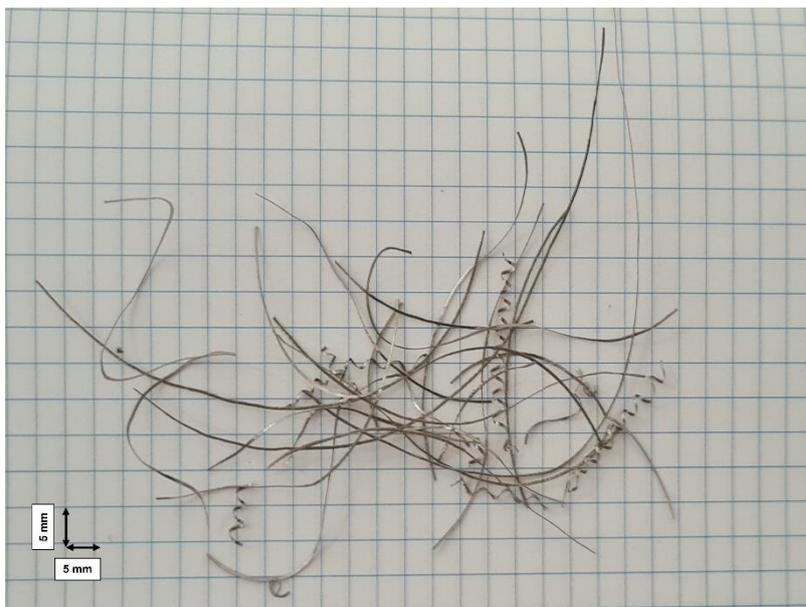
Figura 90 – Cavacos produzidos para  $V_C = 350$  m/min,  $a_p = 0,23$  mm e a)  $f = 0,09$  mm/rev e b)  $f = 0,36$  mm/ver.



Fonte: Autoria própria

Na Figura 91 têm-se os cavacos produzidos para a seguinte configuração de parâmetros de entrada  $V_C = 350$  m/min,  $f = 0,23$  mm/rev  $a_p = 0,09$  mm. Observa-se a formação de um cavaco em fita e contínuo que é indesejável durante o processo de torneamento.

Figura 91 – Cavacos produzidos para  $V_C = 350$  m/min,  $f = 0,23$  mm/rev  $a_p = 0,09$  mm.



Fonte: Autoria própria

Na Figura 92 têm-se os cavacos produzidos para a seguinte combinação de parâmetros de entrada  $V_C = 350$  m/min,  $f = 0.23$  mm/rev  $a_p = 0.23$  mm. Observa-se que os cavacos curtos e do tipo fragmentado.

Figura 92 – Cavacos produzidos para  $V_C = 350$  m/min,  $f = 0,23$  mm/rev  $a_p = 0,23$  mm.

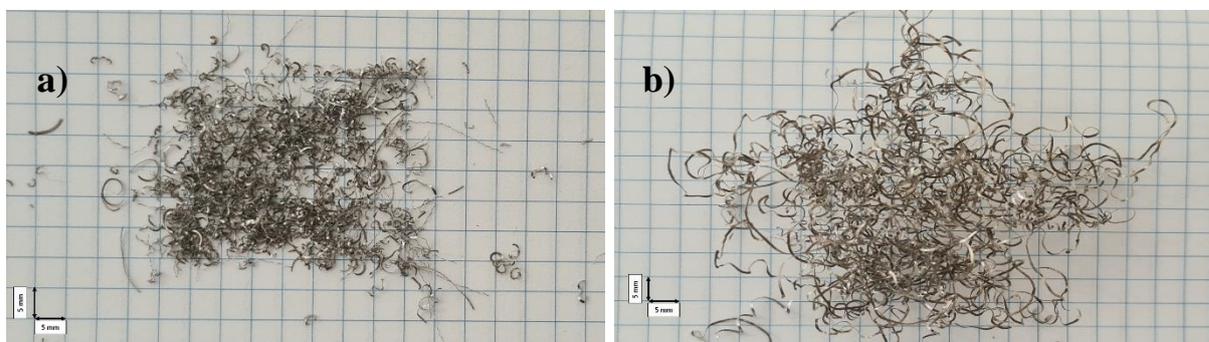


Fonte: Autoria própria

#### 4.4.2 Ferramenta alumina-cromo

Nas Figuras 94a e 94b estão mostrados os cavacos referentes aos ensaios 1 e 2 respectivamente. Nesta condição manteve-se os parâmetros de corte  $f$  e  $a_p$  constantes em seu nível baixo e alterou-se a velocidade de corte. Para Figura 93a  $V_C = 300$  m/min e para Figura 93b  $V_C = 400$  m/min

Figura 93 – Cavacos produzidos para  $f = 0,10$  mm/rev,  $a_p = 0,1$  mm e a)  $V_C = 300$  m/min e b)  $V_C = 400$  m/min.

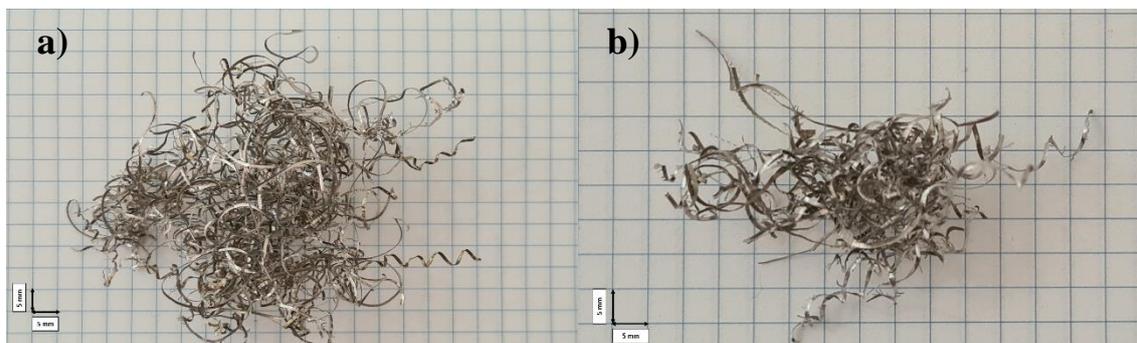


Fonte: Autoria própria

Observa-se que para  $V_C = 300$  m/min o cavaco produzido durante o ensaio de torneamento possui o formato de helicoidal curto enquanto para  $V_C = 400$  m/min o cavaco

assume forma de fita contínua. O mesmo formato de cavaco ocorre nos ensaios 5 e 6 conforme mostrado na Figura 94a e 94b.

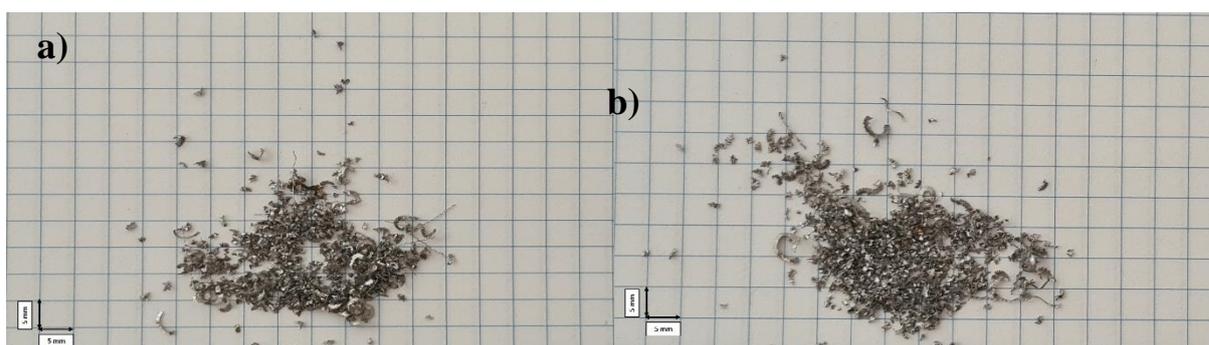
Figura 94 – Cavacos produzidos para  $f = 0,10$  mm/rev,  $a_p = 0,30$  mm e a)  $V_C = 300$  m/min e b)  $V_C = 400$  m/min.



Fonte: Autoria própria

Quando combinados os parâmetros de avanço e profundidade de corte, o formato dos cavacos produzidos durante os ensaios de torneamento é do tipo fragmentado tanto para as velocidades de corte no nível baixo quanto para a velocidade de corte no nível alto conforme mostrado na Figura 95.

Figura 95 – Cavacos produzidos para  $f = 0,30$  mm/rev e  $a_p = 0,30$  mm a)  $V_C = 300$  m/min e b)  $V_C = 400$  m/min.



Fonte: Autoria própria

## 4.5 RESUMO DOS RESULTADOS

### 4.5.1 Ferramenta alumina-magnésio

Na Tabela 26 estão dispostos os parâmetros que apresentaram significância estática para as respostas medidas do processo de torneamento.

Tabela 26- Resumo dos resultados da análise de variância para ferramenta de alumina-magnésio.

Fonte	Pot (W)	Vib (mm/s)	R <sub>a</sub> (μm)	R <sub>t</sub> (μm)	EA (RMS)	V <sub>b</sub> /L <sub>c</sub>
V <sub>C</sub>	X	X	-	X	-	-
<i>f</i>	X	X	X	X	-	X
a <sub>p</sub>	X	X	-	-	-	X
V <sub>C</sub> <sup>2</sup>	X	-	-	-	-	-
<i>f</i> <sup>2</sup>	-	-	X	-	-	-
a <sub>p</sub> <sup>2</sup>	X	-	X	X	-	-
V <sub>C</sub> * <i>f</i>	-	X	-	-	-	-
V <sub>C</sub> * a <sub>p</sub>	-	X	-	-	-	-
<i>f</i> * a <sub>p</sub>	-	-	-	X	-	-

Fonte: Autoria própria

Na Tabela 27 estão dispostos os níveis dos parâmetros que produzem as menores respostas durante o processo de torneamento e o valor estimado da resposta com base nas equações do modelo definidas através da análise de variância.

Tabela 27- Nível dos parâmetros de entrada que minimizam as respostas para ferramenta de alumina-magnésio.

Fonte	$V_C$ (m/min)	$f$ (mm/ver)	$a_p$ (mm)	Valor Estimado
Potência (W)	330	0,09	0,09	1084
Vibração (mm/s)	409	0,09	0,09	3,510
$R_a$ ( $\mu\text{m}$ )	434	0,09	0,09	1,067
$R_t$ ( $\mu\text{m}$ )	419	0,115	0,09	8,370
EA (RMS)	-	-	-	-
$V_b/L_c$	265	0,09	0,09	0,436

Fonte: Autoria própria

#### 4.5.2 Ferramenta alumina-cromo

Na Tabela 28 estão dispostos os parâmetros que apresentaram significância estática para as respostas medidas do processo de torneamento.

Tabela 28- Resumo dos resultados da análise de variância para ferramenta de alumina-cromo.

Fonte	Pot (W)	Vib (mm/s)	$R_a$ ( $\mu\text{m}$ )	$R_t$ ( $\mu\text{m}$ )	EA (RMS)	$V_b/L_c$
$V_C$	X	-	-	-	-	-
$f$	-	X	X	X	X	X
$a_p$	X	X	-	-	-	X
$V_C * f$	-	-	-	-	X	-
$V_C * a_p$	X	-	-	X	-	-
$f * a_p$	X	-	-	-	X	X
$V_C * f * a_p$	-	-	-	-	-	-

Fonte: Autoria própria

Na Tabela 29 estão dispostos os níveis dos parâmetros de entrada que produzem os menores valores para as respostas do processo de torneamento

Tabela 29- Nível dos parâmetros de entrada que minimizam as respostas para ferramenta de alumina-cromo

Fonte	$V_C$ (m/min)	$f$ (mm/ver)	$a_p$ (mm)	Valor Estimado
Potência (W)	400	0,1	0,1	803
Vibração (mm/s)	400	0,1	0,1	3,576
Ra ( $\mu\text{m}$ )	400	0,1	0,1	1,241
R <sub>t</sub> ( $\mu\text{m}$ )	300	0,1	0,1	12,211
EA (RMS)	400	0,3	0,3	0,232
$V_b/L_c$	400	0,1	0,1	1,997

Fonte: Autoria própria

## 5 CONCLUSÕES

A aplicação da metodologia da superfície de resposta (MSR) na usinagem de torneamento da superliga à base de níquel VAT 80A<sup>®</sup> com ferramentas cerâmicas experimentais à base de alumina-magnésio e alumina-cromo mostrou-se uma técnica estatística capaz de prever com boa precisão o comportamento das variáveis respostas durante o processo de torneamento. Determinou-se a influência dos parâmetros de corte, sua influência para o resultado e seu nível que minimizasse as respostas desejadas.

A partir do modelo de segunda ordem, aplicado a ferramenta cerâmica experimental de alumina-magnésio, determinou-se as equações que modelam o comportamento das variáveis respostas e por conseguinte determinou-se as regiões de operabilidade que minimizem os valores das repostas durante o processo de torneamento.

O modelo de primeira ordem aplicado a ferramenta cerâmica experimental de alumina-cromo se mostrou satisfatório como exploração inicial da aplicabilidade da ferramenta na usinagem da superliga VAT 80A<sup>®</sup>. A combinação de parâmetros de entrada que produziu as menores respostas foram  $V_C = 400$  m/min,  $f = 0,10$  mm/rev e  $a_p = 0,10$  mm.

Em relação ao formato dos cavacos, observou-se que para valores de avanço e profundidade de corte abaixo de 0,15 mm os cavacos são helicoidais longos ( $f = 0,09$  mm) e em fita longo ( $a_p = 0,09$  mm), que são indesejáveis durante o processo de usinagem de torneamento.

Os desgastes observados nas ferramentas foram do tipo abrasivo, devido à alta abrasividade característica das superligas à base de níquel, e o do tipo adesivo, devido à afinidade química entre o material da ferramenta e o material da peça usinada. Há a formação de uma aresta postiça de corte em combinações de parâmetros como velocidades de corte inferiores a 350 m/min, e valores médios de avanço e profundidade de corte.

## 5.1 RECOMENDAÇÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Para futuros trabalhos relacionados a usinagem da superliga VAT 80A<sup>®</sup> utilizando ferramentas cerâmicas experimentais, recomenda-se:

- Aplicação de um modelo de segunda ordem para a ferramenta cerâmica experimental de alumina-cromo;
- Realização de análises utilizando microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectroscopia por energia dispersiva de raios-x (EDS) na aresta de corte da ferramenta para caracterização dos elementos químicos.
- Realização de ensaios de vida para as ferramentas de alumina-magnésio e alumina-cromo.
- Realização dos ensaios metalográficos nos cavacos.

## REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMA TÉCNICA. **NBR ISO 4287**: especificações geométricas do produto (GPS) - rugosidade: método do perfil - termos, definições e parâmetros da rugosidade. Rio de Janeiro: ABNT, 2002.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMA TÉCNICA. **NBR ISO 3685**: ensaio de vida da ferramenta de ponta única para torneamento. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.
- ASM HANDBOOK. **Wrought stainless steels**. In: PROPERTIES and selection: irons, steels, and high-performance alloys. Ohio: ASM, 2018. v. 1, cap. 6, p. 1763 – 2451.
- ALMEIDA, G. F. C. **Estudo do comportamento mecânico em temperaturas elevadas da liga Ti-6Al-4V após tratamento superficial de nitretação por plasma**. 2017. Tese (Doutorado em Tecnologia Nuclear - Materiais) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/85/85134/tde-27042017-154740/>. Acesso em: 02 fev. 2020.
- ANDERSON T. W.; DARLING D. A. A test of goodness of fit. **Journal of the American Statistical Association**, v. 49, n. 268, p. 765-769, dez. 1954. Disponível em: <https://doi.org/10.2307/2281537/>. Acesso em: 02 mar. 2020.
- BEZERRA, M. A. *et al.* Response surface methodology (RSM) as a tool for optimization in analytical chemistry. **Talanta**, v. 76, n. 5, p. 965–977, 2008. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0039914008004050>. / . Acesso em: 15 fev. 2020.
- BONHIN, E. P. *et al.* Effect of machining parameters on turning of VAT32® superalloy with ceramic tool. **Materials and Manufacturing Processes**, v. 34, n. 7, p. 800–806, 2019. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/10426914.2019.1594261/>. Acesso em: 10 jun. 2020.
- BOX G.E.P.; COX D.R. An analysis of transformations. **Journal of the Royal Statistical Society**, v. 26, n. 2, p. 211-252, 1964. Disponível em: <https://www.jstor.org/stable/2984418>. / . Acesso em: 22 jul. 2020.
- BRAGA, M. D. A. **Avaliação do tipo de desgaste de alumina-zircônia para usinagem de ligas metálicas em uso aeroespacial**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Tecnologia Espaciais / Ciência e Tecnologia de Materiais e Sensores) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, São José dos Campos, 2017.
- CHAVAN, V.; KADAM, S.; SADAIAH, M. Performance of alumina-based ceramic inserts in high-speed machining of nimonic 80A. **Materials and Manufacturing Processes**, v. 34, n. 1, p. 8–17, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/10426914.2018.1532084/>. Acesso em: 19 maio 2020.
- CHETHAN, Y. D.; RAVINDRA, H. V.; KRISHNEGOWDA, Y. T. Optimization of machining parameters in turning Nimonic-75 using machine vision and acoustic emission signals by Taguchi technique. **Measurement**, v. 144, p. 144–154, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.05.035> / . Acesso em: 13 out. 2020.

DINIZ, A. E.; MACHADO, Á. R.; CORRÊA, J. G. Tool wear mechanisms in the machining of steels and stainless steels. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 87, n. 9–12, p. 3157–3168, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-016-8704-3/>. Acesso em: 03 jan. 2021

DINIZ, A. E.; COPPINI, F. C.; LEMOS, N. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. 8. ed. ed. São Paulo: Artliber Editora, 2013.

EUZEBIO, C. D. G. **uma contribuição da aplicação de modelos fuzzy empregados na detecção da queima de peças na retificação plana**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia, Bauru, 2012.

EZUGWU, E. O.; BONNEY, J.; YAMANE, Y. An overview of the machinability of aeroengine alloys. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 134, n. 2, p. 233–253, 2003.

EZUGWU, E. O.; WANG, Z. M.; MACHADO, A. R. The machinability of nickel-based alloys: a review. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 86, n. 1–3, p. 1–16, 1998. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013698003148/>. Acesso em: 22 maio 2020.

FARINA, A. B.; LIBERTO, R. C. N.; BARBOSA, C. A. Desenvolvimento de novos aços válvula para aplicação em motores de alto desempenho. **Tecnologia em Metalurgia Materiais e Mineração**, v. 10, n. 4, p. 329–335, 2013.

FILIPPOV, A. V. *et al.* Vibration and acoustic emission monitoring the stability of peakless tool turning: experiment and modeling. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 246, p. 224–234, 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.03.030/>. Acesso em: 17 out. 2020.

GOBBI, V. J. **Comportamento em fluência e caracterização microestrutural das superligas VAT 36, VAT 32 e NIMONIC 80A**. 2013. Tese (Doutorado em Ciências Mecânicas) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2013. Disponível em: <http://repositorio.unb.br/handle/10482/15039/>. Acesso em: 11 abr. 2020.

GÜNAY, M.; KORKMAZ, M. E.; YAŞAR, N. Performance analysis of coated carbide tool in turning of Nimonic 80A superalloy under different cutting environments. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 56, n. May, p. 678–687, 2020.

HESSAINIA, Z. *et al.* On the prediction of surface roughness in the hard turning based on cutting parameters and tool vibrations. **Measurement**, v. 46, n. 5, p. 1671–1681, 2013. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.measurement.2012.12.016>. Acesso em: 11 abr. 2020.

HESSER, D. F.; MARKERT, B. Tool wear monitoring of a retrofitted CNC milling machine using artificial neural networks. **Manufacturing Letters**, v. 19, p. 1–4, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2018.11.001/>. Acesso em: 20 dez. 2019.

KARKALOS, N. E.; GALANIS, N. I.; MARKOPOULOS, A. P. Surface roughness prediction for the milling of Ti–6Al–4V ELI alloy with the use of statistical and soft

computing techniques. **Measurement**, v. 90, p. 25–35, 2016. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0263224116301063>. Acesso em: 22 fev. 2021.

KAYA, E.; AKYÜZ, B. Effects of cutting parameters on machinability characteristics of Ni-based superalloys: a review. **Open Engineering**, v. 7, n. 1, p. 330–342, 2017.

KLOCKE, F. *et al.* Acoustic emission signal source separation for a flank wear estimation of drilling tools. **Procedia CIRP**, v. 79, n. i, p. 57–62, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.02.011>. Acesso em: 19 jun. 2020.

KONDO, M. Y. **Análise do processo de torneamento da superliga Vat 32® com ferramentas de corte experimentais e comerciais**. 2019. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Guaratinguetá, 2019.

KONDO, M. Y. *et al.* Cutting parameters influence investigations on cutting consumed power, surface roughness and tool wear during turning of superalloy VAT 32 with PVD coated carbide tools using Taguchi method. **Materials Research Express**, v. 6, n. 6, p. 066543, 2019. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/2053-1591/ab0da8/>. Acesso em: 29 out. 2020.

KONDO, M. Y. *et al.* Optimizing cutting parameters for cutting power and roughness in VAT 32® turning with an experimental Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-MgO ceramic tool using Taguchi’s method. **Procedia CIRP**, v. 77, n. Hpc, p. 610–613, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.08.200>. Acesso em: 18 out. 2020.

KORKMAZ, M. E.; YAŞAR, N.; GÜNAY, M. Numerical and experimental investigation of cutting forces in turning of Nimonic 80A superalloy. **Engineering Science and Technology, an International Journal**, v. 23, n. 3, p. 664–673, 2020.

KUMAR, R.; CHAUHAN, S. Study on surface roughness measurement for turning of Al 7075/10/SiCp and Al 7075 hybrid composites by using response surface methodology (RSM) and artificial neural networking (ANN). **Measurement**, v. 65, p. 166–180, 2015. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0263224115000214>. Acesso em: 22 fev. 2021.

LAURO, C. H. *et al.* Monitoring and processing signal applied in machining processes: a review. **Measurement**, v. 58, p. 73–86, 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.measurement.2014.08.035>. Acesso em: 22 out. 2020.

LIMA, F. F. *et al.* Wear of ceramic tools when machining Inconel 751 using argon and oxygen as lubri-cooling atmospheres. **Ceramics International**, v. 43, n. 1, p. 677–685, 2017.

LIU, C. *et al.* Chip formation mechanism of inconel 718: a review of models and approaches. **Chinese Journal of Mechanical Engineering (English Edition)**, v. 34, n. 1, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1186/s10033-021-00552-9>. Acesso em: 15 ago. 2021.

MACHADO, Á. R. *et al.* **Teoria da usinagem dos materiais**. São Paulo: Edgard Blucher, 2009.

MCCRORY, J. **Advanced Acoustic Emission (AE) monitoring techniques for aerospace structures**. 2015. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Cardiff University, Cardiff, 2015.

METALS, V. **Ligas especiais**, 2015. Disponível em: [http://www.villaresmetals.com.br/content/download/43080/540435/file/Catálogo Ligas Especiais\\_Specialty Alloys.pdf](http://www.villaresmetals.com.br/content/download/43080/540435/file/Catálogo_Ligas_Especiais_Specialty_Alloys.pdf). Acesso em: 20 dez. 2019.

MONTGOMERY, D. C. **Design and analysis of experiments**. 8. ed. Arizona: John Wiley & Sons, 1988.

MYERS, R. H.; MONTGOMERY, D. C.; ANDERSON-COOK, C. M. **Response surface methodology: process and product optimization using designed experiments**. Arizona: Wiley, 2016.

NORFAUZI, T. *et al.* Fabrication and machining performance of ceramic cutting tool based on the Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ZrO<sub>2</sub>-Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> compositions. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 8, n. 6, p. 5114–5123, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.08.034>. Acesso em: 20 maio 2020.

PAIVA, E. J. **Erro quadrático médio multivariado na otimização do torneamento do aço ABNT 52100 endurecido**. 2012. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2012.

PAPACHARALAMPOPOULOS, A. *et al.* Acoustic emission signal through turning tools: a computational study. **Procedia CIRP**, v. 8, p. 426–431, 2013. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.procir.2013.06.128>. Acesso em: 19 out. 2020.

PELEGRINO, D. H. **Estudo do consumo de energia elétrica em máquinas: ferramentas**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018.

PINHEIRO, C. **Avaliação da usinagem do inonel 718 via metodologia de Taguchi**. 2018. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Guaratinguetá, 2018. Disponível em: [https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/154790/pinheiro\\_c\\_dr\\_guara\\_int.pdf?sequence=6&isAllowed=y](https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/154790/pinheiro_c_dr_guara_int.pdf?sequence=6&isAllowed=y). Acesso em: 10 maio 2020.

RAJMOHAN, T.; PALANIKUMAR, K. Application of the central composite design in optimization of machining parameters in drilling hybrid metal matrix composites. **Measurement: Journal of the International Measurement Confederation**, v. 46, n. 4, p. 1470–1481, 2013. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.measurement.2012.11.034>. Acesso em: 19 out. 2020.

RAKSHIT, R.; DAS, A. K. A review on cutting of industrial ceramic materials. **Precision Engineering**, v. 59, n. January, p. 90–109, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2019.05.009>. Acesso em: 15 set. 2020.

RIBEIRO, L. A. **Aplicação de ferramentas cerâmicas à base de óxido de alumínio no torneamento da superliga VAT32®**. 2019. Dissertação (Mestrado Engenharia de Mecânica) – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Guaratinguetá, 2019.

SAE INTERNATIONAL. **SAE J775**. Engine poppet valve information report. Warrendale, 2004.

SANDVIK. **Desgaste de arestas de corte**. Disponível em: <https://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/materials/pages/wear-on-cutting-edges.aspx>. Acesso em: 15 ago. 2020.

SARIKAYA, M.; GÜLLÜ, A. Taguchi design and response surface methodology-based analysis of machining parameters in CNC turning under MQL. **Journal of Cleaner Production**, v. 65, p. 604–616, 2014.

SENTHIL KUMAR, A.; RAJA DURAI, A.; SORNAKUMAR, T. Development of alumina-ceria ceramic composite cutting tool. **International Journal of Refractory Metals and Hard Materials**, v. 22, n. 1, p. 17–20, 2004.

SILVA, F. V. P. **Forças de corte geradas por torneamento: um estudo de caso das ligas Cu-Al-Be E Cu-Al-Be-Nb-Ni passíveis do efeito memória de forma**. 2014. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2014.

SILVEIRA, N. S. **Utilização do fator de potência como indicador da eficiência energética no torneamento da liga de alumínio 2011F ( Al-Cu )**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade de Campinas, Campinas, 2015.

SINGH, B. K.; MONDAL, B.; MANDAL, N. Machinability evaluation and desirability function optimization of turning parameters for Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> doped zirconia toughened alumina (Cr-ZTA) cutting insert in high-speed machining of steel. **Ceramics International**, v. 42, n. 2, p. 3338–3350, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ceramint.2015.10.128>. Acesso em: 15 jan. 2021.

SINGH, B. K. *et al.* Development and machinability evaluation of MgO doped Y-ZTA ceramic inserts for high-speed machining of steel. **Machining Science and Technology**, v. 22, n. 6, p. 899–913, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/10910344.2017.1415937>. Acesso em: 22 jun. 2020.

SOUSA, T. A. **Usinagem de ferro fundido vermicular com ferramenta de corte à base de alumina magnésio**. 2020. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Guaratinguetá, 2020. Disponível em: [https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/192492/sousa\\_ta\\_dr\\_guara.pdf?sequence=3&isAllowed=y](https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/192492/sousa_ta_dr_guara.pdf?sequence=3&isAllowed=y). Acesso em: 15 maio 2021.

SPECIAL METALS CORPORATION. **NIMONIC alloy 80A-specification sheet**, special metals, 2004. Disponível em: [www.specialmetals.com](http://www.specialmetals.com) Acesso em: 04 fev. 2020.

TETI, R. *et al.* Advanced monitoring of machining operations. **CIRP Annals**, v. 59, n. 2, p. 717–739, 2010. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0007850610001976>. Acesso em: 15 jun. 2020.

THAKUR, A.; GANGOPADHYAY, S. State-of-the-art in surface integrity in machining of nickel-based super alloys. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 100, p. 25–54, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2015.10.001>. Acesso em: 20 jun. 2020.

ULUTAN, D.; OZEL, T. Machining induced surface integrity in titanium and nickel alloys: A review. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, Volume 51, Issue 3, 2011, Pages 250-280, ISSN 0890-6955. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2010.11.003>. Acesso em: 29 out. 2020.

VERA CANDIOTI, L. *et al.* Experimental design and multiple response optimization. Using the desirability function in analytical methods development. **Talanta**, v. 124, p. 123–138, 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.talanta.2014.01.034>. Acesso em: 19 set. 2020.

ZHU, D.; ZHANG, X.; DING, H. Tool wear characteristics in machining of nickel-based superalloys. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 64, p. 60–77, 2013. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2012.08.001>. Acesso em: 11 set. 2020.