

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

ESTUDO DO TORNEAMENTO DA LIGA DE ALUMÍNIO
7075-T6, UTILIZANDO FERRAMENTAS COM E SEM
REVESTIMENTO

GUSTAVO FERREIRA RABÊLO GARCIA

Itajubá, abril de 2019

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

GUSTAVO FERREIRA RABÊLO GARCIA

ESTUDO DO TORNEAMENTO DA LIGA DE ALUMÍNIO
7075-T6, UTILIZANDO FERRAMENTAS COM E SEM
REVESTIMENTO

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Mecânica como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Ciências em Engenharia Mecânica.

Área de Concentração: Projeto, Materiais e Processos

Orientador: Prof. Dr. João Roberto Ferreira

Coorientador: Prof. Dr. Wanderley Xavier Pereira

Abril de 2019

Itajubá

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

GUSTAVO FERREIRA RABÊLO GARCIA

ESTUDO DO TORNEAMENTO DA LIGA DE ALUMÍNIO
7075-T6, UTILIZANDO FERRAMENTAS COM E SEM
REVESTIMENTO

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências em Engenharia Mecânica.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Carlos Alberto Carvalho Castro - CEFET

Prof. Dr. Edmilson Otoni Correa - UNIFEI

Prof. Dr. João Roberto Ferreira (Orientador) - UNIFEI

Prof. Dr. Wanderley Xavier Pereira (Coorientador) - CEFET

Itajubá

2019

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a meus familiares, principalmente meu pai, Sebastião e minha mãe, Sirlene, por terem sacrificado tanto em suas vidas para que eu pudesse chegar onde cheguei. Em especial, dedico este trabalho à minha esposa, Daniele, que me apoiou nos momentos mais difíceis, sendo meiga quando necessário e ‘dura’ quando necessário também.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador João Roberto Ferreira, pela paciência, por ter exigido o melhor de mim e por me direcionar em todos os aspectos deste trabalho.

Ao meu coorientador Wanderley Xavier Pereira, pelos conselhos e contribuições neste trabalho, em especial na área de vibração.

Ao coordenador dos laboratórios do CEFET, Eduardo Pereira da Silva, pelo grande apoio e conselhos nos experimentos.

Ao professor e doutorando Daniel Soares de Alcântara, pelos importantes conselhos e apoio nos tópicos relacionados à medição e análise da vibração.

Ao professor Anderson Paulo de Paiva, pelos conselhos quanto ao planejamento fatorial utilizado na primeira etapa deste trabalho.

Aos colaboradores e colegas do Unis, MG pelo auxílio, em especial ao vice-reitor, Luiz Carlos Vieira Guedes pelo fornecimento do material utilizado neste trabalho; ao professor Fabiano Farias de Oliveira e o técnico de laboratório Everton pelo auxílio com a preparação inicial dos corpos de prova; à professora Nancy Christiane Ferreira Silva pelos conselhos quanto à análise estatística dos experimentos.

À minha esposa Daniele de Sousa Moura Garcia, por auxiliar com o texto e me motivar.

Aos colegas e amigos da pós-graduação, em especial Leonardo Albergaria Oliveira, Marcos de Paula Cougo e Carlos Roberto Ribeiro.

A todos que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho

Ipsa scientia potestas est

Francis Bacon

RESUMO

GARCIA, G. R. F. 2019. **Estudo do torneamento da liga de alumínio 7075-T6, utilizando ferramentas com e sem revestimento**, 113 p., Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Instituto de Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, MG.

O uso do alumínio nas mais diferentes áreas de fabricação é uma tendência, justificada pela ampla gama de propriedades de suas ligas, além da relativa facilidade de sua conformação; dentre elas, a liga de alumínio-zinco, 7075-T6, se destaca por sua combinação de baixa densidade com boa dureza e resistência à corrosão. A princípio de uso aeronáutico, essa liga tem sido empregada para diversas atividades, desde estrutural até moldes de injeção de plástico. Portanto, é justificável que os processos de usinagem da mesma sejam mais estudados e compreendidos. Nesse contexto, este trabalho propõe o estudo do torneamento da liga 7075-T6, por meio de uma análise baseada em Projeto de Experimentos das variáveis explicativas Velocidade de Corte (V_c), Avanço (f) e Profundidade de Corte (a_p) sobre as respostas Rugosidade Média (R_a) e Vibração (Sentidos de Corte e de Avanço), utilizando ferramentas de metal duro revestido e sem revestimento, com geometria idêntica. Os resultados mostram que o inserto revestido gerou piores valores de rugosidade, se comparados aos valores obtidos com o inserto sem revestimento. Observou-se, também, maior desgaste do inserto revestido, o que poderia indicar reação entre os elementos do revestimento com o alumínio. Ademais, observou-se que o Avanço (f) da ferramenta influenciou significativamente na rugosidade da superfície torneada, havendo certo grau de correlação desta com a vibração no sentido de corte. Finalmente, verificou-se que a vibração, apesar de influenciada pelas três variáveis explicativas, sofre influência de outros fatores não previstos no estudo.

Palavras-Chave:

Torneamento; Liga de Alumínio 7075-T6; Ferramenta com e sem cobertura; Rugosidade Média; Vibração; Projeto de experimentos.

ABSTRACT

GARCIA, G. R. F. 2019. **Study on turning of the aluminum alloy 7075-T6 using coated and uncoated tools**, 114 p., Dissertation (Master in Mechanical Engineering). Instituto de Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, MG.

The use of aluminum in the most varied industries areas is a trend, justified by the range of properties of his alloys, besides the relative ease of their conformation; among them is the aluminum-zinc alloy Al 7075-T6, that stands out for its combination of density with good hardness and resistance to corrosion. Made in principle for aeronautical use, that alloy has been used for various activities, from structurals to plastic injection molds. Therefore, it is justifiable that the machining processes of this alloy must be more studied and understood. In this context, this work proposes the study of the Al 7075-T6 alloy turning, through an analysis based on Design of Experiments of the explanatory variables Cutting Speed (V_c), Feed (f) and Depth of Cut (a_p) on the responses Roughness average (R_a) and Vibration (Cutting and Feed Direction) using coated and uncoated carbide tools with the same geometry. The results show that the coated insert gave slightly inferior surface roughness values when compared to the values obtained with the uncoated insert. It was also observed a bigger tool wear of the coated insert, which could indicate reaction between the elements of the coating with the aluminum. Therefore, it was observed that the Feed rate had a statistical significance influence on the surface roughness, and it was a significant relationship between roughness and cutting direction vibration. Finally, it was verified that the vibration, although influenced by the three explanatory variables, is influenced by other factors not foreseen in the study.

Key words:

Turning; Aluminum alloy 7075-T6; Coated and Uncoated Tool; Average Roughness; Vibration; Design of Experiments.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Objetivos	3
1.1.1	Objetivo Principal.....	3
1.1.2	Objetivos Específicos	3
1.2	Estrutura do Trabalho	3
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1	Ligas de alumínio	5
2.1.1	Classificação das ligas de alumínio	5
2.1.2	Liga 7075	7
2.1.3	Efeitos dos elementos de liga no alumínio	8
2.1.4	Tratamentos térmicos nas ligas de alumínio	8
2.2	Vida e Desgaste da Ferramenta	9
2.3	Formação de Cavacos.....	12
2.3.1	Formação de Aresta Postiça de Corte (APC)	13
2.4	Integridade Superficial	16
2.4.1	Rugosidade na usinagem	18
2.5	Vibrações na Usinagem.....	19
2.5.1	Vibrações livres	20
2.5.2	Vibrações forçadas.....	20
2.5.3	Vibrações autoexcitadas na usinagem	21
2.5.4	Medições de Vibração	23
2.6	Usinabilidade do Alumínio	24
2.6.1	Forças de Corte na Usinagem do Alumínio.....	26
2.6.2	Temperatura e Fluidos de Corte na Usinagem do Alumínio	27

2.6.3	Ferramentas de Usinagem para o Alumínio	30
2.6.4	Integridade Superficial na usinagem do Alumínio	31
2.6.5	Vibração na Usinagem do Alumínio	35
2.7	Metodologia de Planejamento de Experimentos	36
2.8	Planejamento Fatorial.....	39
2.8.1	Planejamento Fatorial Fracionado	40
2.8.2	Estimativas de Efeitos e Análise de Variância no planejamento 2^k	40
2.9	Superfície de Resposta	41
2.9.1	Planejamento Composto Central	42
3	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	44
3.1	Limitações e Hipóteses do Experimento	44
3.2	Material	45
3.3	Máquina, Ferramentas e Lubri-refrigeração.....	46
3.4	Vibração da ferramenta	47
3.5	Rugosidade	49
3.5.1	Integridade do Inserto	50
3.6	Preparação	50
3.6.1	Preparação dos Corpos de Prova	50
3.6.2	Fixação dos Acelerômetros.....	51
3.7	Procedimento Experimental	52
3.7.1	Níveis e Fatores estudados na Fase 1	54
3.7.2	Níveis e Fatores estudados na Fase 2	55
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	57
4.1	Experimentos de Torneamento – Fase 1	57
4.2	Resultados de Rugosidade, Inserto Revestido – Fase 1	57
4.2.1	ANOVA da Rugosidade, Inserto Revestido – Fase 1.....	58
4.3	Resultados de Rugosidade, Inserto sem Revestimento – Fase 1.....	60

4.3.1	ANOVA da Rugosidade, Inserto sem Revestimento – Fase 1	61
4.4	Comparação dos valores de Rugosidade – Fase 1	63
4.5	Análise preliminar da Vibração – Fase 1	65
4.6	Desgaste dos Insertos – Fase 1	67
4.7	Experimentos de Torneamento – Fase 2	69
4.8	Relação entre Parâmetros de Corte e Rugosidade – Fase 2	71
4.9	Relação entre Parâmetros de Corte e Vibração – Fase 2	76
4.10	Relação entre Vibração e Rugosidade – Fase 2	82
4.10.1	Desgaste do Inserto sem Revestimento – Fase 2	89
5	CONCLUSÕES	92
5.1	Sugestões para Trabalhos Futuros	93
6	REFERÊNCIAS	94
7	APÊNDICE I	103
7.1	Vibração RMS, sentido do Avanço	103
7.2	Gráficos de Regressão para Rugosidade e Vibração (sentido de corte)	104
7.3	Dados de Aquisição	107
7.3.1	Espectros da Fase 1, com Inserto Revestido	107
7.3.2	Espectros da Fase 1, com Inserto sem Revestimento	108
7.3.3	Espectros da Fase 2, com Inserto sem Revestimento	110

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Desgastes em ferramentas de corte.....	11
Figura 2.2: Processo de formação da Aresta Postiça de Corte.....	14
Figura 2.3: Formação de Aresta Postiça de Corte.....	15
Figura 2.4: Efeitos residuais da APC no cavaco e na superfície usinada	16
Figura 2.5: Fatores influenciadores na Integridade Superficial	17
Figura 2.6: Fatores superficiais – ondulações, falhas e rugosidade	18
Figura 2.7: Relação entre fatores na formação teórica da rugosidade	19
Figura 2.8: Definição de usinabilidade	24
Figura 2.9: Forças de corte na usinagem da liga 7075-T6. Valores para Força de Corte (F_c) e Força de Avanço (F_f)	26
Figura 2.10: Regiões onde o calor é percebido durante a formação de cavacos.....	27
Figura 2.11: Furos produzidos na furação da liga $AlSi_8Cu_3Fe$, com brocas revestidas..	30
Figura 2.12: Modelo teórico da rugosidade com base na Velocidade de Corte.....	33
Figura 2.13: Rugosidades obtidas pelo torneamento da liga 6061.....	34
Figura 2.14: Rugosidades obtidas no torneamento do Al-puro	35
Figura 2.15: Modelo genérico de um sistema ou processo	37
Figura 2.16: Representação gráfica de uma superfície de resposta	41
Figura 2.17: Representação de planejamento composto central para três fatores.....	42
Figura 3.1: Corpos de prova.....	45
Figura 3.2: Torno CNC Logic 195 III.....	46
Figura 3.3: Geometria dos insertos	47
Figura 3.4: Equipamento para medição da vibração.....	48
Figura 3.5: Montagem dos componentes para medição da vibração	48
Figura 3.6: Rugosímetro portátil Surftest 201.....	49
Figura 3.7: Pontos (amostras) definidos para medição da rugosidade	49
Figura 3.8: Microscópio BX41M-LED.....	50
Figura 3.9: Dimensões dos corpos de prova	50
Figura 3.10: Chapa de apoio	51
Figura 3.11: Fixação dos acelerômetros.....	51
Figura 3.12: Direção das medições	52
Figura 3.13: Fluxograma do Experimento	53
Figura 4.1: Comparação dos valores de R_a com e sem revestimento	63

Figura 4.2: Comparação dos valores de Ra com e sem revestimento	64
Figura 4.3: Espectro no domínio do Tempo – Peça 12, melhor rugosidade; inserto sem revestimento. Valor de RMS global de 39,4 cV	65
Figura 4.4: Espectro no domínio do Tempo – Peça 7, pior rugosidade; inserto revestido. Valor de RMS global de 46,6 cV	65
Figura 4.5: Sobreposição dos espectros no domínio do tempo das peças 7 (pior rugosidade, azul) e 12 (melhor rugosidade, vermelha)	66
Figura 4.6: Desgastes no Inserto Revestido (Ampliação 5 vezes)	68
Figura 4.7: Desgastes no Inserto sem Revestimento (Ampliação 5 vezes)	68
Figura 4.8: Desgaste de flanco no inserto sem revestimento (Ampliação 20 vezes)	69
Figura 4.9: Adesão do alumínio no inserto sem revestimento (Ampliação 20 vezes)	69
Figura 4.10: Análise gráfica de resíduos do modelo de Rugosidade Ra	74
Figura 4.11: Superfície de Resposta para Ra (V_c ; f)	75
Figura 4.12: Curva de Contorno para Ra – relação $V_c \times f$	75
Figura 4.13: Análise gráfica de resíduos do modelo de vibração RMS	79
Figura 4.14: Superfície de Resposta para RMS	80
Figura 4.15: Curva de Contorno para RMS – relação $V_c \times a_p$	81
Figura 4.16: Curva de Contorno para RMS – relação $a_p \times f$	81
Figura 4.17: Curva de Contorno para RMS – relação $V_c \times f$	82
Figura 4.18: Relação entre Rugosidade média (Ra) e os valores de RMS para Vibrações (sentido de corte e de avanço)	83
Figura 4.19: Gráfico de Dispersão para Rugosidade média Ra e Vibração RMS, sentido do corte (Y) e do avanço (X)	83
Figura 4.20: Primeira análise de <i>outliers</i> (em vermelho) para RMS-Y e Ra	84
Figura 4.21: Primeira análise de <i>outliers</i> (em vermelho) para RMS-X e Ra	85
Figura 4.22: Segunda análise de <i>outliers</i> para (a) RMS-Y e (b) RMS-X	86
Figura 4.23: Gráfico de Dispersão para Rugosidade média Ra e Vibração RMS, sentido do corte e do avanço, sem <i>outliers</i>	86
Figura 4.24: Modelo teórico da rugosidade com base na Velocidade de Corte	89
Figura 4.25: Aresta de Corte nº1, utilizada nos Corpos de Prova 1 a 4	89
Figura 4.26: Aresta de Corte nº2, utilizada nos Corpos de Prova 5 a 8	90
Figura 4.27: Aresta de Corte nº3, utilizada nos Corpos de Prova 9 a 12	90
Figura 4.28: Aresta de Corte nº4, utilizada nos Corpos de Prova 13 a 16	90
Figura 4.29: Aresta de Corte nº5, utilizada nos Corpos de Prova 17 a 20	91

Figura 7.1: Modelo Linear	105
Figura 7.2: Modelo Quadrático	105
Figura 7.3: Modelo Cúbico	106
Figura 7.4: Fase 1, Inserto Revestido (Peças 1 a 7)	107
Figura 7.5: Fase 1, Inserto sem Revestimento (Peças 8 a 14).....	108
Figura 7.6: Fase 2, Inserto sem Revestimento (Peça 15 a 34)	110

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Propriedades da liga 7075-T6	7
Tabela 3.1: Composição química da liga 7075 (valores em %).....	45
Tabela 3.2: Parâmetros de corte indicados para os insertos.....	47
Tabela 3.3: Matriz experimental para torneamento usando inserto com e sem revestimento – Experimento Fatorial Fracionado	54
Tabela 3.4: Matriz experimental, PCC, para o torneamento, para o melhor inserto.....	56
Tabela 4.1: Resultado experimental de Ra, para inserto revestido	58
Tabela 4.2: ANOVA para Rugosidade Ra, Inserto Revestido	58
Tabela 4.3: Coeficientes, Inserto Revestido.....	59
Tabela 4.4: ANOVA para Rugosidade Ra, Inserto Revestido – Reduzido.....	60
Tabela 4.5: Resultado experimental de Ra, para inserto sem revestimento.....	61
Tabela 4.6: ANOVA para Rugosidade Ra, Inserto sem Revestimento.....	61
Tabela 4.7: Coeficientes, Inserto sem Revestimento	62
Tabela 4.8: ANOVA para Rugosidade Ra, Inserto sem Revestimento – Reduzido	62
Tabela 4.9: Teste-T Pareado para comparação das médias.....	64
Tabela 4.10: Correlação entre Rugosidade e Vibração, Inserto Revestido – Fase 1	66
Tabela 4.11: Correlação entre Rugosidade e Vibração, Inserto sem Revestimento – Fase 1	67
Tabela 4.12: Resultado experimental de Ra e RSM	70
Tabela 4.13: ANOVA para Rugosidade Ra, PCC, Sem Revestimento	71
Tabela 4.14: Coeficientes estimados, Ra	72
Tabela 4.15: ANOVA para Rugosidade Ra, PCC, Sem Revestimento – Modelo Reduzido.....	73
Tabela 4.16: Análise de Variância para Vibração (RMS), sentido de corte	76
Tabela 4.17: Coeficientes estimados, RMS, sentido de corte.....	77
Tabela 4.18: ANOVA para Vibração RMS, PCC, Sem Revestimento – Modelo Reduzido.....	78
Tabela 4.19: Análise de Correlação entre Rugosidade e Vibração.....	87
Tabela 4.20: ANOVA para Rugosidade, preditor RMS-Y (sentido de corte)	87
Tabela 4.21: Análise de Correlação entre Rugosidade, Pico e Fator de Crista.....	88
Tabela 7.1: ANOVA para Vibração no Avanço, PCC, Sem Revestimento.....	103
Tabela 7.2: Coeficientes estimados para Vibração, sentido do Avanço	104

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1: Classificação das ligas de alumínio	6
Quadro 2.2: Tratamentos térmicos do alumínio.....	9
Quadro 2.3: Parâmetros de Corte e Usinabilidade	25
Quadro 2.4: Elementos de liga e sua influência na usinabilidade do alumínio.....	25

SÍMBOLOS, ABREVIACÕES E UNIDADES DE MEDIDA

Letras Latinas e Gregas

α	Nível de significância pré-estabelecido para Testes de Hipótese.
	Distância dos pontos axiais em relação aos pontos centrais.

Unidades de Medida

g/cm ³	Gramas por centímetro cúbico, unidade de densidade.
Hz	Hertz, unidade de frequência.
kg	Quilogramas, unidade de massa.
mm	Milímetros, unidade de comprimento.
MPa	Megapascal, unidade de pressão e tensão, equivale a 10 ⁶ Pascals.
GPa	Gigapascal, unidade de pressão e tensão, equivale a 10 ⁹ Pascals.
RPM	Rotações por Minuto, unidade de velocidade angular.

Siglas e Abreviaturas

Sigla	Significado	Unidade
ABAL	Associação Brasileira do Alumínio	-
ALCOA	Companhia de Alumínio da América (<i>Aluminum Company of America</i>)	-
a _p	Profundidade de corte	mm
APC	Aresta Postiça de Corte	-
CNC	Comando Numérico Computadorizado	-
BUE	<i>Built-Up Edge</i> (Aresta Postiça de Corte)	-
f	Avanço de corte	mm/rot
PCC	Planejamento Composto Central	-
PCD	Diamante Policristalino (<i>Pollycrystalline Diamond</i>)	-
R ²	Coeficiente de Determinação	-
R ² (adj)	Coeficiente de Determinação Ajustado	-
Ra	Rugosidade Média	μm
RMS	Valor Eficaz (<i>Root Mean Square</i>)	-
T6	Tratamento de solubilização e envelhecimento artificial	-
Vc	Velocidade de corte	m/min

ÍNDICE DE ELEMENTOS QUÍMICOS

Bi	Bismuto
Cd	Cádmio
Cr	Cromo
Cu	Cobre
Fe	Ferro
Mg	Magnésio
Mn	Manganês
Pb	Chumbo
Si	Silício
Sn	Estanho
Zn	Zinco

1 INTRODUÇÃO

O alumínio representa um importante campo de estudo dos processos de fabricação, principalmente por suas propriedades mecânicas e químicas. Sua baixa densidade o torna um material bastante atrativo para aplicações estruturais, apesar de sua baixa resistência mecânica, enquanto material puro – propriedade melhorada mediante formação de ligas que não afetam significativamente sua densidade, tais como cobre, zinco, magnésio, entre outros. Outras vantagens do alumínio são: boa resistência à corrosão na maioria dos meios naturais, ausência de toxidade, boa condutibilidade elétrica e reciclabilidade (MORETO, 2012).

Especificamente para este estudo, será avaliada a liga de alumínio 7075-T6, um liga desenvolvida em meados da década de 50, sendo de maior uso em componentes estruturais de veículos aeronáuticos (ALUMINUM ASSOCIATION, 2018; MORETO, 2012). Essa liga se destaca por suas propriedades mecânicas, como sua dureza (150 HB) e seus limites de tração (572 MPa) e escoamento (503 MPa), superiores aos de um aço AISI 1020 e próximos a de um aço AISI 1045, por exemplo.

Outro destaque da liga de alumínio 7075 é sua boa usinabilidade, podendo ser avaliada em função da temperatura de corte, da potência total consumida, da força de usinagem, do acabamento da superfície usinada, do controle do cavaco, da taxa de desgaste da ferramenta de corte, entre outros parâmetros, dependendo das necessidades do fabricante (CHILDS et al., 2000; DINIZ et al., 2014; NARAHARI et al., 1999).

O conjunto geral dessas características torna a liga 7075 bastante relevante, em um momento em que as indústrias automobilística e aeroespacial têm se voltado cada vez mais à fabricação de peças em alumínio (DEMIR e GÜNDÜZ, 2009). Dessa forma, justifica-se uma maior compreensão dos processos de fabricação relacionados a essa liga, em especial os processos de usinagem.

Processos de usinagem estão entre os mais comuns e importantes na indústria metal-mecânica. Entre esses processos, o torneamento é um dos mais relevantes, permitindo a fabricação de peças cilíndricas, cônicas e de revolução; com amplo espectro de utilização. Sendo assim, a escolha correta de parâmetros, ferramentas e materiais no torneamento e,

portanto, a melhoria na usinabilidade, reflete em aumento da produtividade, menores custos e padrões mais elevados de qualidade.

Uma das formas de se avaliar a qualidade de uma peça usinada é a sua integridade superficial, influenciada por **alterações subsuperficiais**, como microdureza, tensões residuais e recristalização; e **acabamento**, formado pelas ondulações, falhas e rugosidade superficiais. Em muitos casos, a rugosidade é utilizada como parâmetro de resposta para controlar um processo de usinagem, sendo influenciada por vários parâmetros, como: máquina-ferramenta, propriedades do material da peça, geometria e material da ferramenta, e operação de usinagem (MACHADO et al., 2009). Com base nos experimentos deste trabalho, destacam-se: a **operação de usinagem**, considerando os parâmetros de corte do torneamento e a **ferramenta**, mais especificamente o seu revestimento.

Quanto à operação de torneamento, são numerosos os estudos relacionando os três principais parâmetros de corte – Velocidade de Corte (V_c), Profundidade de Corte (a_p) e Avanço (f) – com diversos materiais. Certamente, esses estudos auxiliam na compreensão dos fenômenos envolvidos na fabricação de formas diversas; além de exporem as peculiaridades da usinagem de cada material.

Quanto à ferramenta, vale destacar que sua geometria tende a ser o seu aspecto mais estudado em experimentos acadêmicos, enquanto há certo consenso de que o revestimento gera bons resultados no torneamento de ligas de aço. Porém, como afirmado anteriormente, diferentes materiais usinados apresentam peculiaridades. Em específico no caso do alumínio, não há total consenso quanto à efetividade do revestimento de insertos na qualidade de peças usinadas (POLLI, 2005).

Além dos parâmetros de usinagem já citados, é plausível supor que o nível de vibração do conjunto peça-ferramenta-máquina possa ser utilizado para se controlar a rugosidade superficial de peças usinadas. A própria medição da vibração, por sua vez, é um ponto que deve ser avaliado, considerando-se os diferentes métodos de medição, como o valor RMS (*Root Mean Square*, também chamado de Valor Eficaz), o valor de Pico e o Fator de Crista, por exemplo (KUNDU et al., 2017).

Portanto, neste trabalho será realizada uma análise exploratória do torneamento da liga 7075-T6, com base nos fatores V_c , f e a_p , através de experimento Fatorial Fracionado, buscando verificar se há diferença significativa no uso de revestimento sobre a qualidade do acabamento. Concomitantemente, será analisada a vibração do conjunto máquina-ferramenta, em uma investigação inicial de eventuais correlações entre rugosidade e vibração. Por fim, para maior refinamento dos dados, será utilizado um Planejamento Composto Central, que

permita a geração de um modelo quadrático, com o objetivo de encontrar uma região ideal para a configuração dos principais parâmetros de corte.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Principal

Este trabalho tem como objetivo principal avaliar a usinabilidade da liga de alumínio 7075-T6, do ponto de vista da sua rugosidade e o custo-benefício da ferramenta, considerando insertos revestidos e sem revestimento. Considerando-se, então, o efeito do revestimento da ferramenta sobre a rugosidade e a relação desta com a vibração do conjunto máquina-ferramenta-peça.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Tornear dois conjuntos de amostras da liga 7075-T6: um grupo usinado com inserto revestido e outro grupo usinado com inserto sem revestimento. Comparar os resultados de rugosidade desses dois grupos, eleger o inserto com melhor custo-benefício, considerando a rugosidade.
- Dos dois grupos citados acima, fazer uma análise inicial das vibrações, buscando-se uma eventual relação entre essa e a rugosidade da superfície torneada.
- Escolher o inserto de melhor custo-benefício, usinar um terceiro conjunto de amostras da liga 7075-T6, com mais peças, a fim de se estudar com maior profundidade os mecanismos envolvidos no torneamento dessa liga.
- Desse terceiro conjunto, avaliar a influência de diferentes parâmetros de corte sobre a rugosidade das peças usinadas.
- Avaliar a influência de diferentes parâmetros de corte sobre a vibração, no sentido de corte e no sentido de avanço, das peças.
- Avaliar uma eventual correlação entre os valores de rugosidade e diversas grandezas da vibração.

1.2 Estrutura do Trabalho

Esta dissertação está estruturada da seguinte forma:

No **Capítulo 1** são apresentados os aspectos principais do trabalho, sua importância e os objetivos buscados.

No **Capítulo 2** se discute o referencial bibliográfico utilizado como embasamento para esta pesquisa. Tratam-se as propriedades das ligas de alumínio, mais especificamente da liga 7075; em seguida, são abordados os aspectos essenciais do processo de torneamento, além dos fatores relacionados a ele: integridade superficial – especialmente a rugosidade – e vibração. Finalmente, apresenta-se o método estatístico utilizado para as análises deste trabalho, a metodologia de Planejamento de Experimentos, especificamente o Planejamento Fatorial Fracionado e o Planejamento Composto Central; ainda, a utilidade dos Pontos Centrais é mencionada.

No **Capítulo 3** é exposto o procedimento experimental utilizado neste trabalho, apresentando as limitações e hipóteses do experimento, material, máquina, ferramentas e instrumentos de medição. Encerra-se com um fluxograma do procedimento experimental e o detalhamento das etapas do experimento.

No **Capítulo 4** são discutidos os resultados do experimento, dividido em: (a) Fase 1, voltada a um experimento exploratório (*screening*), comparando inserto revestido e sem revestimento; (b) Fase 2, voltada à obtenção dos melhores resultados de rugosidade, por meio da análise de Superfícies de Resposta.

No **Capítulo 5** são apresentadas as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Ligas de alumínio

O alumínio e suas ligas são caracterizados por uma massa específica de $2,7 \text{ g/cm}^3$ e temperatura de fusão de 660°C , o que restringe a temperatura máxima na qual o alumínio pode ser utilizado. Muitas de suas ligas são conformadas com facilidade, em virtude de sua ductilidade elevada, mantida mesmo em temperaturas muito baixas, devido à sua estrutura cristalina CFC (cúbica de face centrada) (CALLISTER, 2008). Outras vantagens do alumínio são: boa resistência à corrosão na maioria dos meios naturais, ausência de toxicidade, boa condutibilidade elétrica e reciclabilidade (MORETO, 2012).

Destaca-se, também, as ligas de alumínio com outros metais de baixa massa específica – como o manganês e o titânio – como materiais de engenharia para a área de transportes, visando à redução do consumo de combustíveis. Tais ligas apresentam significativa resistência específica, se comparado com outros materiais, como o aço (CALLISTER, 2008).

2.1.1 Classificação das ligas de alumínio

Conforme a Aluminum Association (2017), as ligas de alumínio são divididas em oito séries, baseadas nos elementos de liga utilizados em sua composição, conforme indicado no Quadro 2.1:

Quadro 2.1: Classificação das ligas de alumínio

Série	Características
1xxx	Comercializada como alumínio puro, composta por ligas com pureza de 99% ou mais de alumínio. Excelente resistência à corrosão, excelente usinabilidade, alta condutividade térmica e elétrica;
2xxx	O cobre é o principal elemento de liga dessa série, que pode ser tratada termicamente. Apresentam uma boa combinação de força e resistência, apesar de não apresentarem a mesma resistência à corrosão que várias outras ligas – para contrapor essa característica, é comum pintar ou revestir peças que sejam expostas a tais ambientes. São as ligas mais conhecidas para aplicações aéreas;
3xxx	Manganês é o principal elemento de liga da série, frequentemente adicionada à pequenas quantidades de magnésio. A liga 3003 é bastante utilizada, devido à sua resistência moderada e boa usinabilidade, podendo ser usada em trocadores de calor e utensílios de cozinha;
4xxx	Liga de alumínio combinado com silício, que em quantidades suficientes, pode reduzir o ponto de fusão do alumínio, sem causar fragilidade. Devido a isso, a série 4xxx produz excelentes arames de solda e ligas de brazagem, que requer menor ponto de fusão;
5xxx	Magnésio é o elemento de liga primário da série, sendo um dos mais efetivos e usados elementos de liga do alumínio. Ligas dessa série possuem moderada a alta resistência, além de boa soldabilidade e resistência à corrosão em ambientes marinhos. Devido a isso, ligas alumínio-magnésio são amplamente usadas em construção, tanques de armazenamento, vasos de pressão e marinha;
6xxx	Série que contém silício e magnésio, formando silicato de magnésio na liga. Uma série versátil, tratável termicamente, com altas conformabilidade, soldabilidade, além de resistência moderada, combinada com excelente resistência à corrosão. Produtos extrudados da série 6xxx são a primeira opção para aplicações arquitetônicas e estruturais;
7xxx	Zinco é o elemento de liga primário da série; quando uma pequena quantidade de magnésio é adicionada, o resultado é uma liga muito resistente e termicamente tratável. Outros elementos, como cobre e cromo podem ser adicionados em pequenas quantidades. As ligas mais conhecidas são 7050 e 7075, amplamente utilizadas na indústria aeronáutica;
8xxx	Série composta por outros elementos de liga, como estanho e lítio.

Fonte: Aluminum Association (2017)

2.1.2 Liga 7075

As ligas da série 7xxx apresentam elevada resistência mecânica, sendo conhecidas como ultraduroalumínio, porém, não possuem boas características de resistência à corrosão – característica essa melhorada na liga 7075 – e de soldabilidade, apesar disso, esta liga apresenta excelente usinabilidade na fabricação de peças espessas e de geometria complexa (CAMARGO, 2007; OKUMURA e TANIGUCHI, 1982).

A liga de alumínio 7075 foi desenvolvida nos EUA, em meados da década de 50, para ser utilizada em componentes estruturais de veículos aeronáuticos. Seus estudos, inclusive, levariam ao desenvolvimento da liga 7050, também bastante utilizada na indústria aeronáutica (ALUMINUM ASSOCIATION, 2017; MORETO, 2012).

Atualmente, a liga 7075 tem sido utilizada em componentes estruturais e rebites de aeronaves devido à sua alta resistência à fadiga e corrosão (o que a diferencia das outras ligas da série 7xxx), além da alta razão resistência/peso (BAO e ZHANG, 2010). Também, essa liga tem aplicações nas indústrias automobilística e marítima, na fabricação de máquinas e equipamentos, moldes para injeção e na indústria bélica (ALCOA, 2017). Suas propriedades mecânicas são apresentadas na Tabela 2.1. Nota-se uma dureza considerável da liga, superior, por exemplo, ao aço AISI 1020, cuja dureza média é de aproximadamente 121 HB (MATWEB, 2017a).

Tabela 2.1: Propriedades da liga 7075-T6

Propriedade	Valor
Densidade [g/cm ³]	2,81
Dureza Brinell (carga de 500 kg, com esfera de 10 mm) [HB]	150
Limite de Resistência à Tração [MPa]	572
Limite de Escoamento [MPa]	503
Módulo de Elasticidade [GPa]	71,7
Limite de Resistência ao Cisalhamento [MPa]	331
Usinabilidade	70%

Fonte: ALCOA (2017); Matweb (2017b)

2.1.3 Efeitos dos elementos de liga no alumínio

O Zn, principal elemento de liga da série 7xxx, torna as ligas suscetíveis à fratura a quente, e à fratura por corrosão; contudo, na proporção de 3% a 7,5%, combinado com o Mg, forma os precipitados $MgZn_2$, com grande resposta a tratamentos térmicos – gerando-se, assim, uma liga de grande resistência mecânica e boa usinabilidade (KOPELIOVICH, 2012; SANTOS JÚNIOR, 2012).

Hatch (1984) destaca que metais de baixo ponto de fusão, como Bi, Pb, Sn e Cd, têm baixa solubilidade no alumínio sólido e, portanto, formam uma fase macia de baixo ponto de fusão, que facilita a quebra de cavacos e ajudam a lubrificar a ferramenta de corte. Já o ferro é a impureza mais comum, reduzindo a solubilidade do Si no Al em teores acima de 0,04%, formando, também, fases intermetálicas do tipo $AlFeSi$.

O Silício, por sua vez, é a segunda impureza mais comum no alumínio, variando de 0,01% a 0,15%; ele melhora a fluidez e a resistência ao desgaste das ligas, mas teores maiores que 12% formam ligas extremamente abrasivas, devido à formação de fases com maior dureza; também, torna as ligas adesivas, gerando altas temperaturas e aresta postiça de corte, prejudicando a vida das ferramentas (HATCH, 1984; KELLY e COTTERELL, 2002).

O Cobre, em teores de 2% a 10%, melhora o processo de solubilização/envelhecimento, aumentando a resistência mecânica e a dureza; e diminuindo o alongamento da liga. Combinado com o Mg, aumenta a resistência após solubilização e têmpera. O Mn aumenta a resistência do alumínio, tanto na solução sólida, quanto em fase intermetálica finamente dispersa; e atua, também, como um refinador de grãos (HATCH, 1984; KOPELIOVICH, 2012).

2.1.4 Tratamentos térmicos nas ligas de alumínio

Os grupos das ligas de alumínio tratáveis termicamente compreendem as séries 2xxx, 6xxx, 7xxx e algumas das séries 4xxx e 5xxx. Já as ligas trabalháveis – sendo, portanto, não tratáveis termicamente – compreendem as séries 1xxx, 3xxx, 4xxx e 5xxx (EVANGELISTA, 1999; HATCH, 1984).

Segundo as normas norte americana ANSI H35.1, a europeia EN 515 e a internacional ISO 2107, as condições em que o alumínio e suas ligas se encontram, podem ser classificadas como: F – como fabricada; O – recozida; H – encruada; W – solubilizada e T – tratada termicamente. Precedendo a letra, pode-se utilizar números para detalhar o processo sofrido. As condições H – encruada e T – tratada termicamente são consideradas as principais

características dadas às ligas de alumínio (BENEDYK, 2010; HATCH, 1984; MATWEB, 2017a). O Quadro 2.2 resume os tratamentos térmicos aplicados às ligas.

Quadro 2.2: Tratamentos térmicos do alumínio

Código	Descrição
T1	Resfriamento de temperatura elevada, em um processo de conformação e envelhecido naturalmente;
T2	Resfriamento de temperatura elevada, em um processo de conformação, trabalhado a frio e envelhecido naturalmente;
T3	Solubilizado, trabalhado a frio e envelhecido naturalmente;
T4	Solubilizado e envelhecido naturalmente;
T5	Resfriamento de uma temperatura elevada em um processo de conformação e envelhecido naturalmente;
T6	Solubilizado e envelhecido artificialmente;
T7	Solubilizado e estabilizado;
T8	Solubilizado, trabalhado a frio e envelhecido artificialmente;
T9	Solubilizado, envelhecido artificialmente e encruado;
T10	Resfriamento de um processo de conformação em temperatura elevada, envelhecida artificialmente e encruada.

Fonte: Matweb (2017a)

As classificações T1 até T10 podem ser seguidas de dígitos adicionais, a fim de se indicar uma variação no tratamento, que altera de maneira significativa as características do produto (ASM INTERNATIONAL, 2015; MATWEB, 2017a).

Um exemplo do efeito dos tratamentos térmicos sobre as ligas de alumínio pode ser encontrado em Tan e Ögel (2007), que verificaram que a liga 6066 (cuja dureza, após recozimento não ultrapassou 60 HB no estudo), solubilizada a 530 °C e temperada a 20±2 °C, ou seja, tratamento T6, chegou a apresentar dureza de 140 HB.

2.2 Vida e Desgaste da Ferramenta

Segundo Diniz et al. (2014), vida da ferramenta é o tempo que a mesma trabalha efetivamente (deduzidos os tempos passivos), até perder sua capacidade de corte, dentro de

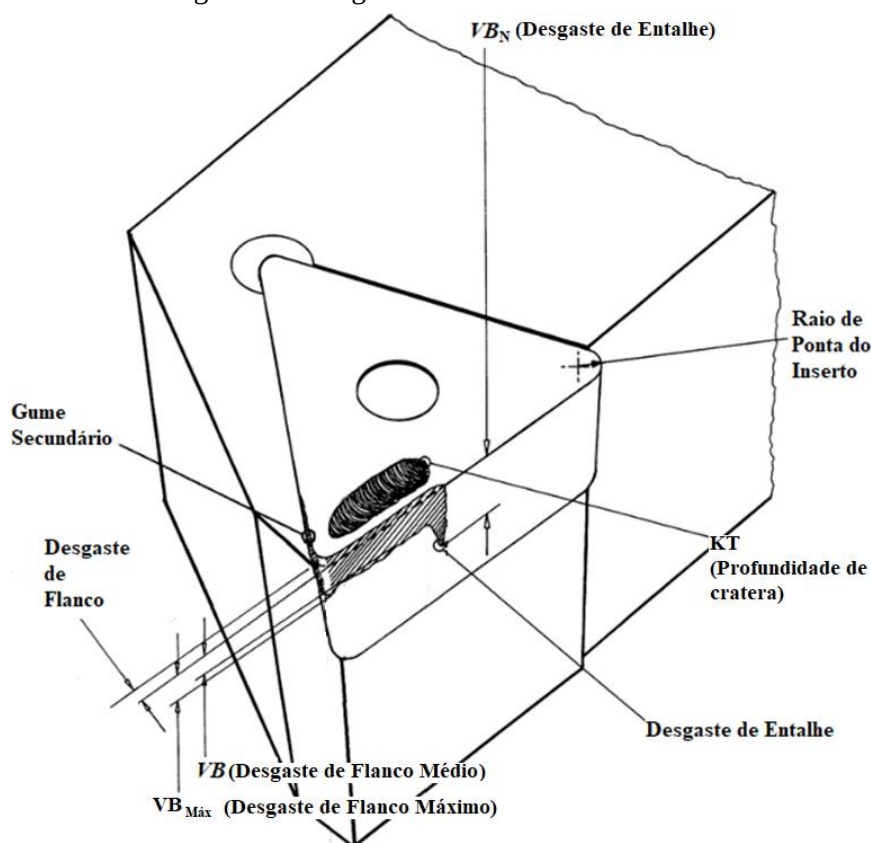
um critério previamente estabelecido; atingido esse tempo, a ferramenta deve ser reafiada ou substituída. Segundo Machado et al. (2009), podem-se distinguir três fenômenos pelos quais uma ferramenta de corte perde sua eficácia na usinagem: a) **avaria**, destruição total ou perda de uma quantidade considerável do material da aresta de corte; b) **desgaste**, mudança da forma original da ferramenta, resultante da perda gradual de material; c) **deformação plástica**, mudança da geometria da aresta de corte pelo deslocamento de material. Esses três fenômenos causam a mudança na geometria da aresta de corte. Os dois primeiros, geralmente, promovem a perda de material, enquanto o último promove somente o seu deslocamento.

Assim, para Diniz et al. (2014), a ferramenta deve ser retirada de uso quando:

- Os desgastes atingirem proporções tão elevadas que se receia a quebra da aresta de corte. Isto é crítico em operações de desbaste onde, por não ser necessária a obtenção de tolerâncias apertadas e bons acabamentos superficiais, permite-se que os desgastes cheguem a valores altos.
- Devido ao desgaste da superfície de folga da ferramenta não é mais possível a obtenção de tolerâncias apertadas e/ou de bons acabamentos superficiais da peça. Isto é crítico em operações de acabamento.
- Os desgastes crescem muito, fazendo com que a temperatura da aresta cortante ultrapasse a temperatura na qual a ferramenta perde o fio de corte (a aresta de corte se decompõe). Isto é crítico em ferramentas de aço rápido que suportam temperaturas menores que outros materiais para ferramentas.
- O aumento da força de usinagem, proveniente dos desgastes elevados da ferramenta, interfere no funcionamento da máquina.

Segundo Ferraresi (1977), pode-se distinguir os desgastes originados na superfície de saída, na superfície de folga ou incidência e o deslocamento da aresta cortante. A Figura 2.1 apresenta as principais grandezas relacionadas ao desgaste de insertos.

Figura 2.1: Desgastes em ferramentas de corte



Fonte: adaptado de Smith (2007)

Nas ferramentas de metal duro sem cobertura, o desgaste frontal é geralmente maior que o desgaste de cratera. Os desgastes aumentam progressivamente até a quebra da cunha cortante, que deve ser evitada devido às suas consequências danosas. Na usinagem de muitos materiais, essa quebra se dá para valores de Desgaste de Flanco (VB) da ordem de 0,8 a 1,5 mm. Em operações de acabamento, a ferramenta deve ser retirada muito antes de o desgaste atingir valores que ponham em risco a aresta de corte, a fim de não comprometer a precisão da peça e seu acabamento superficial. Nestas operações o valor de $VB_{Máx}$ não deve exceder 0,2 mm para uma qualidade IT7 e 0,3 mm para uma qualidade IT8 em operações de torneamento (DINIZ et al., 2014).

Quando se utiliza ferramentas de metal duro com cobertura, o desgaste de flanco da ferramenta cresce bastante lentamente, devido à alta resistência ao desgaste das camadas de cobertura da ferramenta, até atingir valores de VB da ordem de 0,3 a 0,4 mm. Neste momento, as camadas de cobertura já estão quase que totalmente consumidas pelo desgaste e, então, o corte passa a ser realizado pelo substrato da ferramenta, que é bem menos resistente ao desgaste, chegando em valores da ordem de 0,8 a 1,0 mm num tempo muito curto. Assim, a

ferramenta deve ser substituída quando este momento é atingido. Nestas ferramentas, o desgaste de cratera, em geral, é muito pequeno ou inexistente.

2.3 Formação de Cavacos

Para Diniz et al. (2014), a formação do cavaco influencia diversos fatores ligados à usinagem, como: desgaste da ferramenta, esforços de corte, calor gerado na usinagem, penetração do fluido de corte, etc. Para um estudo mais detalhado da formação de cavacos, pode-se dividir o processo em quatro eventos, que ocorrem de maneira periódica (DINIZ et al., 2014; MACHADO et al., 2009):

- **Recalque Inicial:** devido à penetração da cunha cortante no material da peça, uma pequena porção – ainda solidária à peça – é pressionada contra a superfície de saída da ferramenta.
- **Deformação e Ruptura:** a deformação plástica aumenta progressivamente, até que as tensões de cisalhamento se tornem suficientemente grandes, de modo a se iniciar um deslizamento (sem que haja perda de coesão) entre a porção de material recalcado e a peça.
- **Deslizamento das Lamelas:** continuando a penetração da ferramenta na peça, haverá uma ruptura parcial, ou completa, na região de cisalhamento, dependendo da extensão da propagação da trinca que, por sua vez, dependerá da ductilidade do material e das condições de usinagem.
- **Saída do Cavaco:** devido ao movimento relativo entre a ferramenta e a peça, inicia-se um escorregamento da porção de material deformada 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.

Ainda, destacam Diniz et al. (2014) que as quatro fases são bem definidas na usinagem de materiais dúcteis, como o alumínio; já em materiais frágeis, as fases **Recalque Inicial** e **Deformação e Ruptura** são curtas, na fase **Deslizamento das Lamelas** a ruptura do cavaco é total e a fase **Saída do Cavaco** é praticamente inexistente, gerando um pequeno cavaco que ‘pula’ fora da região de corte.

Também, segundo Diniz et al. (2014), diversos problemas práticos têm relação com a forma do cavaco produzido na usinagem, já que esta tem implicações nas seguintes áreas:

- **Segurança do operador:** cavacos longos, em forma de fita, podem atingir e ferir os operadores;
- **Possível dano à ferramenta e à peça:** cavacos em forma de fita podem se enrolar na peça, danificando o acabamento superficial. Também, quando o cavaco se enrola sobre a peça, ele pode penetrar entre a interface peça-ferramenta, podendo causar a quebra da ferramenta;
- **Manuseio e armazenagem do cavaco:** cavacos longos são mais difíceis de manipular, também ocupando um espaço muito maior que um cavaco curto com o mesmo peso;
- **Forças de corte, temperatura e vida da ferramenta:** ao se procurar deformar mais o cavaco visando-se aumentar sua capacidade de quebra, pode-se aumentar bastante os esforços de corte, com consequente aumento da temperatura e diminuição da vida da ferramenta.

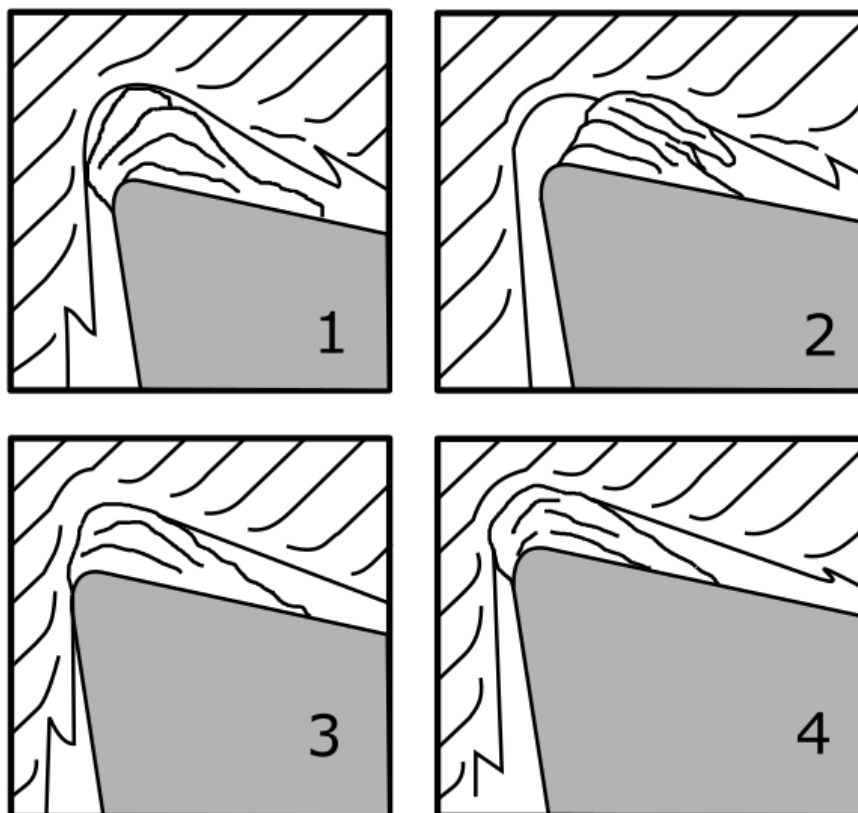
2.3.1 Formação de Aresta Postiça de Corte (APC)

Quando se usina a baixas velocidades de corte, o fenômeno conhecido como aresta postiça de corte (APC) – *built-up edge* (BUE), em inglês – pode ocorrer na interface ferramenta-cavaco (MACHADO et al., 2009).

Na interface ferramenta-cavaco, a primeira camada do material da peça que se une à ferramenta por meio de ligações atômicas é endurecido a frio, aumentando, assim, seu limite de escoamento e, por conseguinte, a tensão de cisalhamento torna-se insuficiente para romper tais ligações. As deformações, então, continuam nas camadas superiores adjacentes, mais afastadas da interface, até que estejam também encruadas o suficiente. Pela repetição desse processo uma sucessão de camadas forma a APC (MACHADO et al., 2009).

A APC, então, passa a se comportar como uma aresta de corte. Porém, a APC tende a crescer gradualmente, até chegar a um ponto em que ela se rompe bruscamente, causando uma perturbação dinâmica (DINIZ et al., 2014). A sequência de quadros de 1 a 4 na Figura 2.2 mostra como o processo de crescimento da APC e de cisalhamento de partes desta acontecem – trata-se de um processo que se repete ciclicamente (MACHADO et al., 2009).

Figura 2.2: Processo de formação da Aresta Postiça de Corte



Fonte: adaptado de Machado et al. (2009)

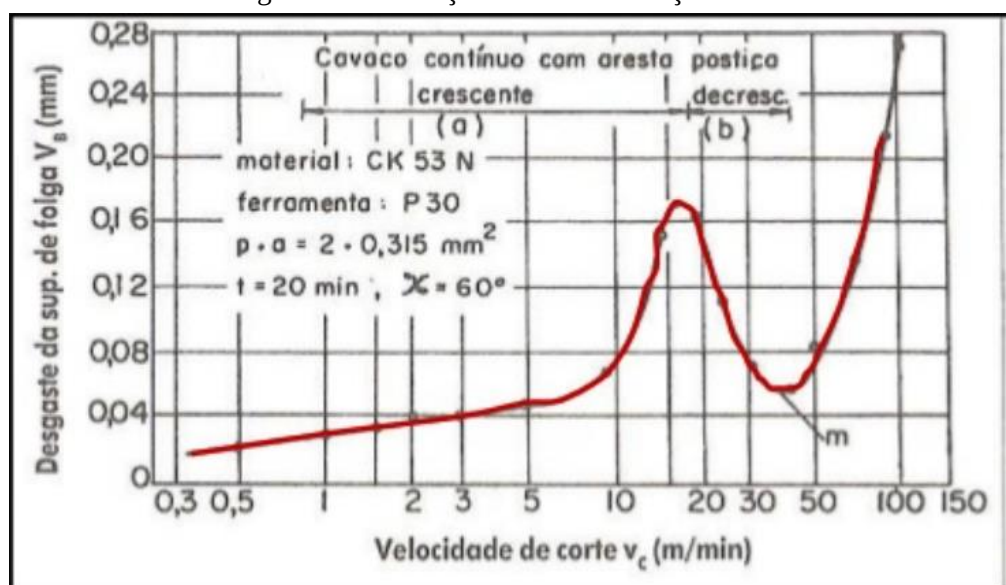
Para Trent e Wright (2000), a aresta postiça de corte ocorre em ligas metálicas com mais de uma fase, não sendo observada no corte da maioria dos materiais puros comercializados; isso se deve à alta ductilidade desses materiais, aumentando a superfície de contato peça-ferramenta, além de sua baixa tendência ao encruamento. Além de ocorrer em velocidades de corte intermediárias, sendo que os valores exatos dependem da liga usinada e do avanço de corte. Os autores também destacam que a aresta postiça de corte é uma estrutura dinâmica, construída de sucessivas camadas endurecidas sob condições de extrema tensão; no corte do aço, por exemplo, pesquisadores mediram valores de dureza de arestas de corte variando entre 600 e 650 HV. Nesse sentido, Ferraresi (1977) destaca os estudos de M. Gappisch, Witten e W. Schilling, que identificaram durezas equivalentes ao material temperado na APC, na usinagem do aço CK53N. .

Também, Diniz, Marcondes e Coppini (2014) e Ferraresi (1977) apontam que a formação da APC se deve à temperatura de corte que, essencialmente, é influenciada pela velocidade de corte (V_c), juntamente com o ângulo de saída γ . Assim, ao se aumentar V_c , há a redução da APC até uma certa velocidade – chamada de **velocidade crítica**, (ponto m na

Figura 2.3) – em que a APC deixa de existir. Além disso, ao aumentar γ , a temperatura de usinagem diminui, aumentando, também, a velocidade crítica.

Tal velocidade está relacionada com diversos fatores da usinagem. Todas as variações que podem ser feitas no processo e que aumentam a temperatura de corte, tais como aumento do avanço e da profundidade de usinagem, diminuição dos ângulos de saída e de inclinação, retirada da refrigeração, etc., tendem a diminuir a velocidade crítica. Além disso, à medida que a ductilidade do material da peça diminui, decresce também a ocorrência da aresta postiça, pois os cavacos ficam mais curtos e atiram menos com a superfície de saída da ferramenta (DINIZ et al., 2014; FERRARESI, 1977).

Figura 2.3: Formação de Aresta Postiça de Corte



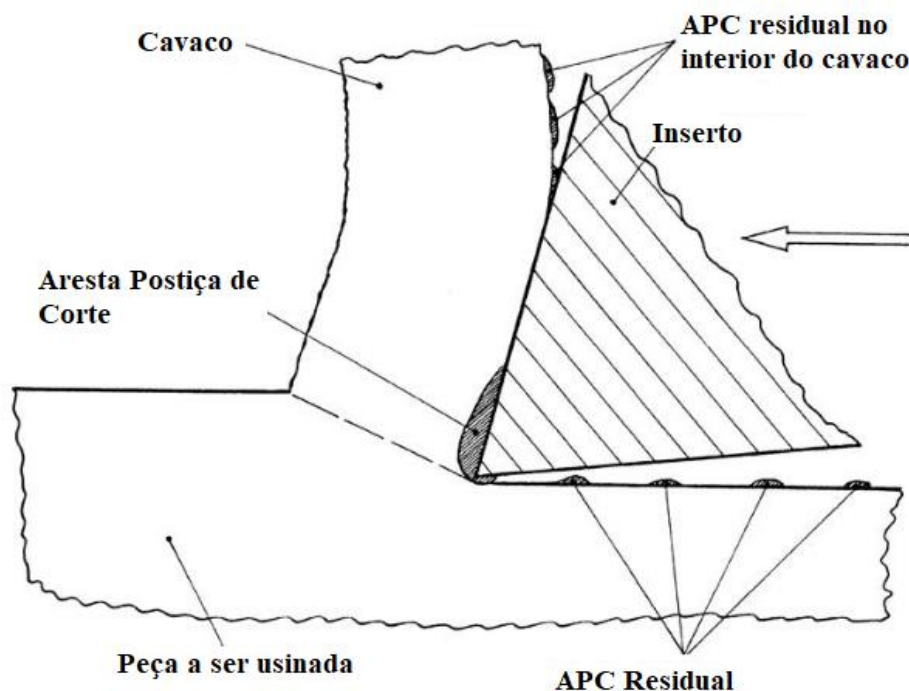
Fonte: Diniz, Marcondes e Coppini (2014); Ferraresi (1977)

Diniz, Marcondes e Coppini (2014) explicam o fenômeno da influência da V_c considerando que, à medida que a velocidade de corte cresce, a temperatura de corte também cresce. Quando a temperatura de recristalização do material do cavaco é ultrapassada, não há mais formação de APC, pois com a formação de novos grãos no cavaco, não existe mais a possibilidade de encruamento da mesma, fator fundamental para a formação da APC.

Smith (2007) aponta que as condições de usinagem que geram APC são relativamente bem-definidas, sendo possível evitar sua formação ao se controlar corretamente a velocidade de corte. Em situações em que ocorra a formação de APC, ela resulta em pobre acabamento da superfície usinada e, se o fenômeno não for revertido, ela pode resultar em quebra da aresta

de corte ou em fratura do inserto. A Figura 2.4 ilustra os efeitos residuais da APC na usinagem.

Figura 2.4: Efeitos residuais da APC no cavaco e na superfície usinada



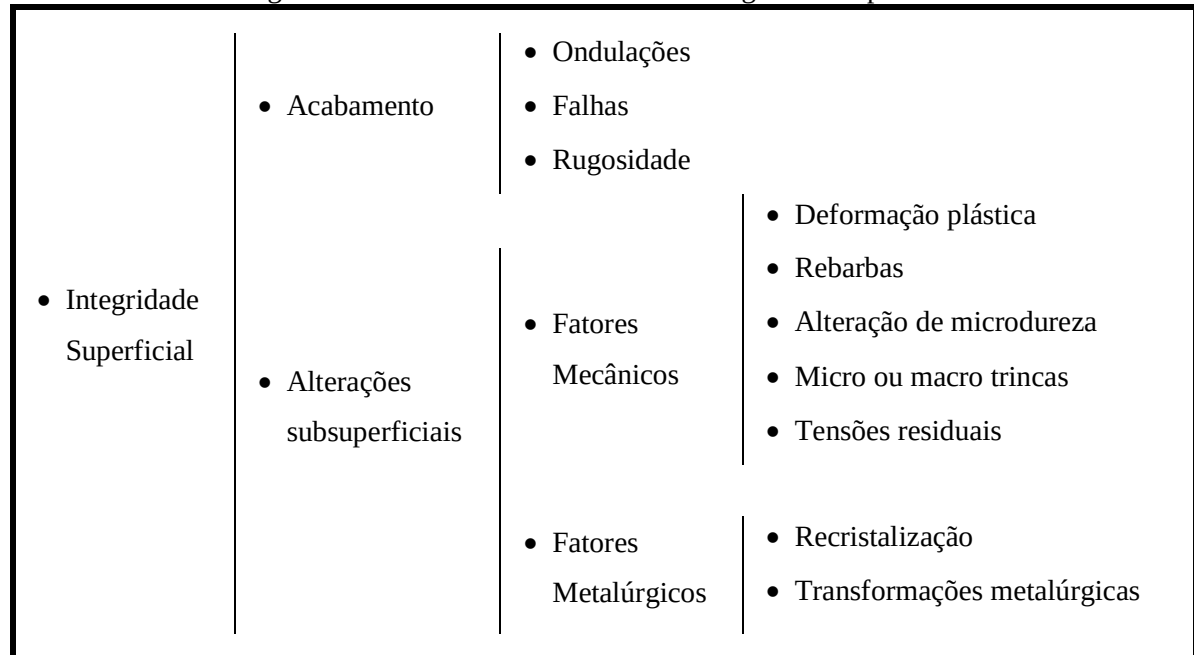
Fonte: adaptado de Smith (2007)

2.4 Integridade Superficial

O termo integridade superficial é utilizado para descrever a qualidade de uma superfície e, portanto, engloba um grande número de alterações sofridas por ela (MACHADO et al., 2009). Para Kalpakjian e Schmid (2009) o termo acabamento superficial se refere às características geométricas de uma superfície, enquanto a integridade superficial se aplica às propriedades do material, como resistência à fadiga e à corrosão, que, por sua vez, são fortemente influenciadas pela natureza da superfície produzida. Também, para Shaw (2005), a integridade superficial envolve fatores como: acabamento superficial e ausência de trincas, mudanças químicas, danos térmicos e tensão residual. O diagrama da Figura 2.5 mostra alterações que podem ocorrer em superfícies usinadas e uma classificação destas.

A exigência de acabamento de um componente deve estar prevista em seu projeto, sendo composta pelos fatores: ondulações, falhas e rugosidade (MACHADO et al., 2009).

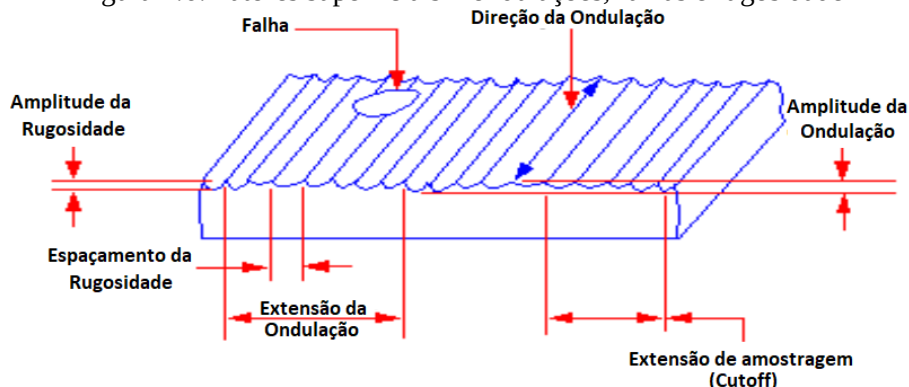
Figura 2.5: Fatores influenciadores na Integridade Superficial



Fonte: Adaptado de Machado et al. (2009)

Conforme Machado et al. (2009), **ondulações** consistem de irregularidades superficiais ou de erros geométricos cujos espaçamentos são maiores que as irregularidades consideradas rugosidades, sendo causadas por vibrações e flexões da ferramenta e/ou peça, devido à força de usinagem, temperatura de corte ou erros de fixação da peça ou ferramenta. Já **falhas** são interrupções na topografia típica de uma superfície, sendo causadas por defeitos como inclusões, trincas, bolhas ou durante a usinagem. Finalmente, a **rugosidade** é composta de irregularidades finas ou de erros microgeométricos resultantes da ação inerente ao processo de corte, como marcas de avanço, aresta postiça de corte, desgaste da ferramenta, etc. Essa descrição está ilustrada na Figura 2.6.

Figura 2.6: Fatores superficiais – ondulações, falhas e rugosidade



Fonte: Adaptado de Srithar, Palanikumar e Durgaprasad (2014)

Convém ressaltar que tais fatores superficiais indicadas por (MACHADO et al., 2009) se baseiam na norma **ANSI/ASME B46.1-2009** apesar disso, há normalização nacional, na forma das normas **NBR ISO 4287:2002**, **ISO 12179:2002**, **ISO 4288:2008** e **ISO 3274:2008**. Para eventuais consultas, destaca-se o trabalho de Hu et al. (2006), que apresentam um comparativo das normas ASME B46.1 (2002) e ISO 3274 (1997), distinguindo termos, definições e parâmetros da textura superficial.

2.4.1 Rugosidade na usinagem

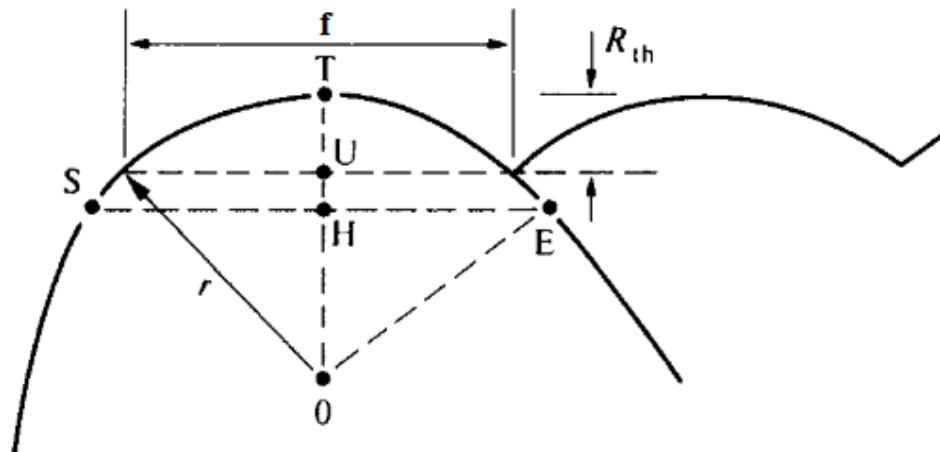
Machado et al. (2009) apontam que, normalmente, ondulações e falhas devem ser evitadas na fabricação de uma superfície, por serem erros de fabricação. Por outro lado, a rugosidade é um parâmetro especificado, de acordo com a aplicação da peça: rugosidades baixas são adequadas para mancais, aplicação de pintura, superfícies de escoamento de fluidos e gases, superfícies reflexivas e estética.

Para Shaw (2005), diversos fatores influenciam na formação da rugosidade no processo de torneamento, como deformação e fluxo lateral do cavaco, vibração do sistema ferramenta-peça-fixação-máquina, desgaste da ferramenta, avanço e raio de ponta. Estes dois últimos, inclusive, apresentam uma contribuição geométrica, que permite uma estimativa prévia do valor de rugosidade. Tal estimativa, chamada de rugosidade teórica (R_{th}), é apresentada na Fórmula (2.1) relaciona o raio de ponta (r) e o avanço (f) na rugosidade.

$$R_{th} \cong \frac{f^2}{8r} \quad (2.1)$$

A estrutura do cálculo é ilustrada pela Figura 2.7. Cabe destacar, porém, que essa fórmula somente pode ser usada nas situações em que $t/2 < EH$, indicada na figura abaixo.

Figura 2.7: Relação entre fatores na formação teórica da rugosidade



Fonte: Shaw (2005)

2.5 Vibrações na Usinagem

A vibração está presente em todos os elementos estruturais e, em muitos casos, afeta significativamente a natureza de projetos de engenharia. As propriedades vibracionais de equipamentos projetados são, frequentemente, fatores limitantes de sua *performance* (INMAN, 2007).

Processos de fabricação estão intrinsecamente ligados à vibração, seja do motor, seja do contato entre peça e ferramenta. Para Altintas (2012), a estrutura de uma máquina-ferramenta é constituída por três grupos principais, sejam eles: a estrutura mecânica, os acionamentos (*drives*) e o sistema de controle.

A **estrutura mecânica** é composta de partes estacionárias, tais como a base e coluna, e por partes móveis, como mesas, eixo-árvore, engrenagens e rolamentos. Em geral, as dimensões das máquinas-ferramentas são superdimensionadas para minimizar deformações estáticas e dinâmicas durante a usinagem. Os **acionamentos** englobam os motores que movimentam as partes móveis da estrutura mecânica. O **sistema de controle**, formado por computadores, chaves e amplificadores, deve determinar quando e como devem funcionar os acionamentos da máquina-ferramenta (ALTINTAS, 2012).

O sistema máquina-ferramenta-peça pode ser representado por vários corpos conectados entre si, que possuem massa, elasticidade e amortecimento. Nesse caso, a vibração sobre esses corpos pode ser dividida em três categorias principais: vibrações livres, forçadas e autoexcitadas (SCHMITZ e SMITH, 2019).

2.5.1 Vibrações livres

As vibrações livres ocorrem na ausência de uma força de excitação externa de longo prazo. É o resultado de algumas condições iniciais impostas ao sistema, como um deslocamento da posição de equilíbrio do sistema, por exemplo. A vibração livre produz movimento em uma ou mais das frequências naturais do sistema e, como todas as estruturas físicas exibem alguma forma de amortecimento, ela é vista como uma oscilação decrescente de duração relativamente curta (SCHMITZ e SMITH, 2019).

2.5.2 Vibrações forçadas

Vibrações forçadas ocorrem quando uma excitação periódica externa contínua produz uma resposta com a mesma frequência que a função causadora. Enquanto a vibração livre é frequentemente representada no domínio do tempo, a vibração forçada é tipicamente analisada no domínio da frequência. Isso enfatiza a magnitude e a dependência de fase na frequência e permite a identificação conveniente de frequências naturais. Uma fonte típica de vibração forçada em sistemas mecânicos é o desequilíbrio rotativo (SCHMITZ e SMITH, 2019).

As vibrações forçadas tornam-se problemáticas quando sua frequência de excitação está próxima de uma das frequências naturais do sistema e/ou de seus harmônicos, resultando em corte instável. Conforme Smith (2007) e Tobias (1961), as vibrações forçadas são:

- **Vibrações devido à falta de homogeneidade da peça:** a presença de diferentes fases, no material de uma peça, causa pequenos choques sobre a ferramenta, resultando em vibrações. Sendo esses impactos absorvidos, os efeitos não são consideráveis, fazendo parte apenas do “ruído de fundo” da usinagem. Entretanto, se estes pequenos choques sobre a ferramenta não forem rapidamente amortecidos, originam vibrações de grande amplitude prejudiciais ao processo.
- **Vibrações causadas pela máquina-ferramenta:** surgem tanto em acionamentos de componentes dotados de movimento rotativo quanto de componentes com movimento de translação. Estas podem se apresentar sob duas formas: forçadas e livres. As vibrações forçadas são causadas por rotação de massas desbalanceadas, engrenagens e correias de acionamento e rolamentos com irregularidades. As vibrações livres resultam de impactos causados por massas desbalanceadas oscilantes e por um tipo de vibração autoexcitada, geralmente encontrada em guias lineares (*stick-slip*).

- **Vibrações causadas por corte interrompido:** Na usinagem com corte interrompido, a ferramenta sofre impactos consideráveis que podem levar a níveis indesejáveis de vibrações. Vibrações desse tipo são típicas de fresamento, ocorrendo com pouca frequência nos processos de torneamento.
- **Vibrações externas à máquina-ferramenta:** vibrações geradas em equipamentos próximos (prensas, compressores, outras máquinas de usinagem, etc.) são transmitidas através da fundação, podendo resultar em forças vibratórias nas máquinas-ferramenta que estão próximas. A vibração proveniente do chão de fábrica contém um amplo espectro de frequência, sendo praticamente inevitável que uma destas frequências se aproxime da frequência de vibração natural de um determinado equipamento de usinagem. A amplitude desse ruído de fundo é geralmente pequena, mas pode tornar-se problemática em operações com acabamento e tolerância minuciosos. Tais problemas geralmente são resolvidos aplicando-se métodos de isolamento de vibrações, preferencialmente na fonte geradora.

As condições de usinagem, conforme o valor da rugosidade, representam uma medida relativa para a estabilidade do processo. Nesse contexto, a noção de estabilidade não é empregada no sentido da técnica de controle, mas sob o aspecto tecnológico, priorizando o resultado de trabalho. Um processo estável pode ser caracterizado relativamente por boa qualidade da superfície e reduzido desgaste de ferramenta, enquanto que um instável é associado a um acabamento de superfície deteriorado e desgastes pronunciados de ferramenta. (POLLI, 2005)

Há, também, de se destacar a utilização de métodos *online* de controle da qualidade do produto, onde a medição das vibrações mecânicas durante o processo é utilizada tanto na estimativa do desgaste da ferramenta, como na avaliação da qualidade superficial do componente usinado, sendo que exemplos podem ser encontrados em Dinardo et al. (2018), além de Gierlak et al. (2017) e Vishwakarma et al. (2017).

2.5.3 Vibrações autoexcitadas na usinagem

Na vibração autoexcitada, uma força de entrada constante está presente, como no caso da vibração forçada. No entanto, essa força de entrada é modulada em vibração próxima ou em uma das frequências naturais do sistema, como ocorre com a vibração livre. Os mecanismos físicos que fornecem essa modulação são variados (SCHMITZ e SMITH, 2019).

Em determinadas combinações de parâmetros de corte, uma grande variação na espessura de cavaco pode ocorrer. Essa variação da espessura do cavaco gera grandes forças

de corte e deslocamentos promovendo vibrações autoexcitadas (*chatter*). Esse fenômeno de instabilidade no processo de usinagem dos metais é um dos fatores limitantes para se alcançar maiores taxas de remoção de material e qualidade superior nas peças usinadas principalmente quando se pretende utilizar a técnica de *High Speed Machining* (HSM) (GANGULI et al., 2005).

O *chatter* é caracterizado por vibrações violentas, ruído e qualidade ruim na superfície usinada, exigindo, quando possível, retrabalho, aumentando o custo da peça (CERVELIN, 2014). Além disso, o *chatter* reduz a vida da ferramenta, afetando a produtividade por alterar o funcionamento normal da máquina.

O *chatter* é uma vibração autoexcitada, que pode se caracterizada como primária ou secundária (ALTINTAS, 2012). *Chatter* primário ocorre devido ao atrito entre ferramenta e peça a ser usinada, pelos efeitos termo-mecânicos na formação de cavaco ou pelo acoplamento de modos. *Chatter* secundário ocorre devido ao efeito regenerativo causado pelas modulações na espessura de corte (ALTINTAS, 2012).

As vibrações autoexcitadas ou regerativas não são causadas por forças externas, mas por forças geradas pelo próprio corte do material pela ferramenta. Essa vibração, geralmente caracterizada por um alto ruído, é altamente prejudicial à vida da ferramenta e ao acabamento superficial. As vibrações autoexcitadas também afetam a produtividade já que, em muitos casos, o seu amortecimento apenas é obtido através da redução da taxa de remoção de material (TOBIAS, 1961).

As vibrações regenerativas em máquinas-ferramentas são essencialmente um problema de estabilidade dinâmica. Uma máquina-ferramenta usinando livre de vibrações pode ser comparada a um sistema dinâmico em equilíbrio. Sistemas desse tipo podem se tornar dinamicamente instáveis e entrar em oscilação. Tais instabilidades são causadas por alterações nas condições de corte, resultantes de distúrbios no processo de corte (por exemplo, um ponto de alta dureza no material). Como resultado, uma componente de força, variável no tempo, é imposta à força de corte. Se essa componente de força atuar de maneira a amplificar as instabilidades iniciais, as oscilações/vibrações aumentarão e o sistema torna-se instável (LARA, 2017).

A influência da estrutura da máquina-ferramenta na estabilidade dinâmica do processo de corte é também de fundamental importância. Por exemplo, considerando hipoteticamente uma estrutura (máquina-ferramenta, ferramenta, peça e sistema de fixação) de rigidez e/ou amortecimento infinito, o processo de corte não poderia ser afetado porque as instabilidades não teriam capacidade de produzir a vibração necessária para torna-lo instável. Isso indica que

otimizações estruturais no sentido de aumentar a rigidez e/ou o amortecimento são sempre benéficas ao processo do ponto de vista das vibrações regenerativas (ALTINTAS, 2012).

2.5.4 Medições de Vibração

Essencialmente, há dois conjuntos de monitoramento da vibração de um sistema: métodos no domínio do tempo e no domínio da frequência (MESQUITA et al., 2002).

De acordo com Kundu et al. (2017), as características dinâmicas geralmente são extraídas dos dados de vibração no domínio do tempo, e apontam que a raiz média quadrática (RMS), o valor de pico (PV), a curtose (Kurt) e o fator de crista (CF), obtidos a partir de sinais de vibração no domínio do tempo, são os principais recursos para detectar falhas e desgastes em ferramentas e equipamentos.

Para Chowdhury e Helali (2008), por exemplo, o processo de fricção (ou corte) é um fenômeno prático importante, pois a influência da vibração pode causar mudanças significativas neste processo e o desgaste do flanco da ferramenta aumentam os valores da Kurtosis e do RMS (raiz média quadrática). Para este trabalho, serão tratadas as medidas RMS, valor de pico e fator de crista, que são baseadas no domínio do tempo.

Os valores de RMS e pico refletem a energia e a amplitude da vibração no domínio do tempo. O valor de RMS é utilizado para detectar desbalanceamento em elementos rolantes, sendo obtido pela Equação 2.2, onde x_i é um ponto de uma série de sinais para $i=1, 2, 3..., N$ e N é o número de pontos coletados (KUNDU et al., 2017):

$$RMS (X_{rms}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i)^2}{N}} \quad (2.2)$$

Convém destacar que a medida RMS pode ser utilizada para representar intervalos específicos ou para representar todo o intervalo observado, onde é chamado de RMS Global. (RAO, 2011)

Pico representa a maior divergência do sinal a partir do zero ou ponto de equilíbrio, obtido pela fórmula:

$$Pico (X_p) = \max |x_i| \quad (2.3)$$

Fator de crista detecta a mudança nos padrões do sinal, causada por fontes de vibração impulsivas, como a quebra de uma engrenagem, por exemplo. Ele é obtido pela fórmula:

$$Fator\ de\ Crista (X_{cf}) = \frac{X_p}{X_{rms}} \quad (2.4)$$

Outro ponto a se destacar para a aquisição dos dados é o teorema de Nyquist, que afirma que a taxa de amostragem f_s deve ser maior que o dobro da componente de maior frequência do sinal a ser medido, esse valor é também chamado de frequência de Nyquist, f_N (ALTINTAS, 2012).

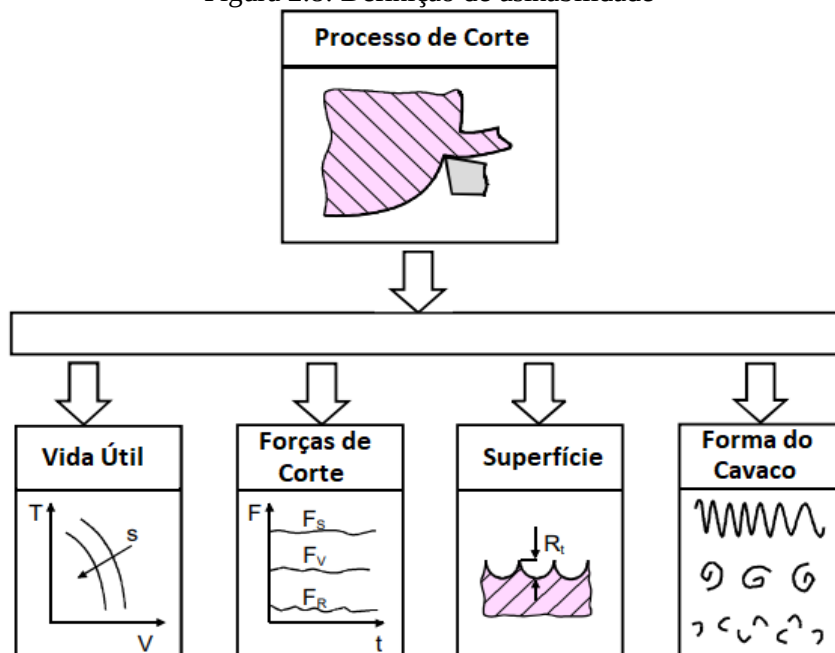
$$f_s > 2 \cdot f_N \quad (2.5)$$

Para usinagem, a taxa de amostragem utilizada em diversos trabalhos tem variado entre 2 e 50 kHz, conforme mostrado no item “2.6.5 Vibração na Usinagem do Alumínio”.

2.6 Usinabilidade do Alumínio

Entende-se a usinabilidade de um material como a facilidade de atingir uma produção requerida de componentes usinados, considerando o custo (CHILDS et al., 2000). Tal aspecto pode ser avaliado com base em parâmetros como: vida da ferramenta ou desgaste, forças de corte necessárias, acabamento superficial e morfologia do cavaco; outros parâmetros – como a energia necessária e a temperatura de corte – podem ser adotados, dependendo da necessidade do pesquisador. A Figura 2.8 resume esses parâmetros (JOHNE, 1994; KALPAKJIAN e SCHMID, 2009; NARAHARI et al., 1999; TRENT e WRIGHT, 2000).

Figura 2.8: Definição de usinabilidade



Fonte: adaptado de Johne (1994)

Os parâmetros que influenciam na usinabilidade, por sua vez, são afetados por fatores diversos, como processo de usinagem, a composição química, a microestrutura, o tratamento térmico, as propriedades físicas e mecânicas do material (JOHNE, 1994; TRENT e WRIGHT, 2000). O Quadro 2.3, sumariza os fatores em quatro conjuntos.

Quadro 2.3: Parâmetros de Corte e Usinabilidade

Fatores Governantes	Parâmetros de Corte			
	Forma do Cavaco	Superfície	Desgaste	Força de Corte
Processo	●	●	●	●
Material	●	◐	●	◐
Condições e Geometria de Corte	◐	●	●	◐
Máquina	○	●	◐	○
Material da Ferramenta	○	◐	●	○
● Grande influência; ◐ Influência moderada; ○ Pouca ou nenhuma influência				

Fonte: Adaptado de Johnne (1994)

Para Machado et al. (2009), o alumínio e suas ligas apresentam boa usinabilidade, podendo ser usinado a seco; apesar disso, os autores recomendam a utilização de fluido de corte, para remoção do calor, em fluxo contínuo e abundante. Também, Ferraresi (1977) afirma que, comparado com os metais ferrosos, o alumínio e suas ligas são de mais fácil usinagem, apresentando pressão específica de corte mais baixa, velocidades mais altas de corte e avanço, além de grande produção de cavaco. O Quadro 2.4 apresenta os principais elementos de liga do alumínio e sua influência na usinabilidade.

Quadro 2.4: Elementos de liga e sua influência na usinabilidade do alumínio

Elementos de Liga	Influência na usinabilidade
Sn, Bi, Pb	Atuam como lubrificantes e como fragilizadores do cavaco
Fe, Mn, Cr, Ni	Combinam entre si ou com o alumínio e/ou com o silício, formando partículas duras, que favorecem a quebra do cavaco e têm efeito abrasivo sobre a ferramenta
Mg	Em teores pequenos (cerca de 0,3%), aumenta a dureza do cavaco e diminui o coeficiente de atrito entre cavaco e ferramenta
Si	Aumenta a abrasividade da peça – a vida da ferramenta diminui com o aumento do tamanho da fase primária do silício
Cu	Forma o intermetálico CuAl_2 que fragiliza o cavaco
Zn	Não exerce influência na usinabilidade

Fonte: Diniz et al. (2010)

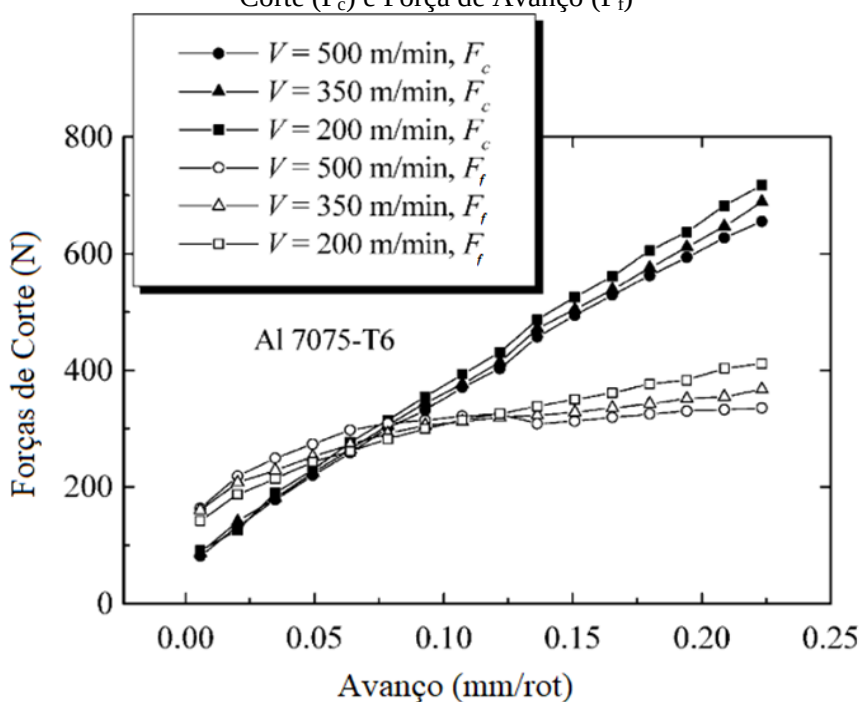
2.6.1 Forças de Corte na Usinagem do Alumínio

Segundo Weingaertner e Schroeter (1991) dentre os fatores que podem afetar as áreas e tensões dos planos de cisalhamento estão o tipo de material da peça, as condições de corte e as alterações geométricas da ferramenta de corte

Durante a usinagem das ligas de alumínio, as forças de usinagem são baixas, comparadas aos aços (KELLY e COTTERELL, 2002). Ligas de alumínio apresentam pressões específicas até 70% menores que o aço, contudo, essa diferença não é muito grande entre as ligas de alumínio, dependendo da composição química e das propriedades físicas das ligas (JOHNE, 1994). Ainda assim, ao compararem o torneamento ortogonal das ligas 7075-T6, 6061-T6 e 2024-T351, Fang e Wu (2005) registraram aumento da força de usinagem com o aumento da dureza.

As condições de corte são fatores que influem grandemente a força de usinagem nas ligas de alumínio, pois afetam as áreas e as tensões de cisalhamento nos planos primário e secundário. Independente do nível de resistência mecânica da liga de alumínio, normalmente, o aumento da velocidade de corte pode reduzir a força de usinagem (MILLS e REDFORD, 1983), ponto demonstrado, também, por Fang e Wu (2005), no torneamento da liga 7075-T6, profundidade de corte constante de 3 mm, ilustrado na figura Figura 2.9.

Figura 2.9: Forças de corte na usinagem da liga 7075-T6. Valores para Força de Corte (F_c) e Força de Avanço (F_f)

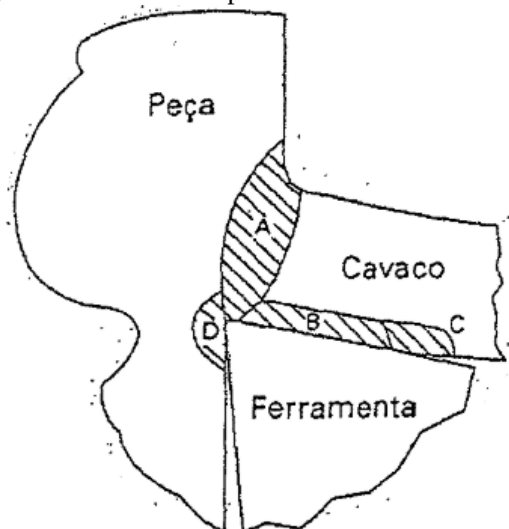


Fonte: adaptado de Fang e Wu (2005)

2.6.2 Temperatura e Fluidos de Corte na Usinagem do Alumínio

A ação da ferramenta de corte para se formar o cavaco provoca altas taxas de deformação (elastoplástica) no material usinado, fazendo com que praticamente toda a energia de deformação seja convertida em calor na região de corte (SEKER e KORKUT, 2016). Essa energia pode ser dividida em três elementos: (a) no trabalho para cisalhar o material, assim formando o cavaco e a nova superfície; (b) no trabalho para movimentar o cavaco sobre a superfície de saída e (c) no trabalho necessário para mover a recém-usinada superfície sobre a superfície de folga (ABUKHSHIM et al., 2006; BACCI e WALLBANK, 1999). A partir dessas parcelas de trabalho, Machado et al. (2009) apresentam quatro zonas de transferência de calor, conforme indicado na Figura 2.10.

Figura 2.10: Regiões onde o calor é percebido durante a formação de cavacos



Fonte: adaptado de (FANG e WU, 2005)

Na zona do plano de cisalhamento ou **zona primária** de cisalhamento (A); na interface entre o cavaco e a superfície de saída da ferramenta ou **zona secundária** de cisalhamento (B e C); e na interface de contato da peça com a superfície de folga da ferramenta ou **zona terciária** de cisalhamento (D).

O calor gerado nas zonas A e B são altamente dependentes das condições de corte, sendo assumidas como uniformemente distribuídas (ABUKHSHIM et al., 2006). O calor gerado na zona C depende do atrito cinético da superfície inferior do cavaco sobre a superfície de saída da ferramenta (MILLS e REDFORD, 1983) e pode ser assumida linearmente decrescente, a partir do fim da zona de aderência, até o fim da zona de escorregamento, onde se anula (ABUKHSHIM et al., 2006); finalmente, o calor gerado na

zona D depende do ângulo de folga, do desgaste de flanco e do atrito cinético da superfície recém-usinada contra a superfície de folga da ferramenta (ABUKHSHIM et al., 2006; MACHADO et al., 2009; SEKER e KORKUT, 2016).

Quanto maiores são a velocidade de corte, o avanço e a profundidade de corte – portanto, maiores taxas de remoção do material – maior será a taxa de geração de calor nas zonas A e B e, portanto, maior será a temperatura na região de corte (DIMLA SR, 2004; MILLS e REDFORD, 1983).

Vernaza-Peña et al. (2002) afirmam que altas temperaturas na região de corte, especialmente em peças de alumínio com paredes finas, podem gerar distorções devido às tensões residuais, amaciamento do material, desgaste acelerado, quebra e destacamento na ferramenta de corte. Vernaza-Peña et al. (2002) Também, Kelly e Cotterell (2002) afirmam que, a elevação da temperatura a determinados patamares pode gerar mudanças microestruturais, tensões residuais na superfície usinada, erros de tolerância e distorções na peça usinada, aumento do desgaste da ferramenta e aumento de volume de material aderido na superfície da peça e na aresta de corte da ferramenta.

Sánchez et al. (2005) citam que temperaturas de corte da ordem de 750°C foram obtidas durante o torneamento a seco das ligas de alumínio 2024 e 7075, ocasionando processo adesivo na superfície de corte da ferramenta. Também, Tang et al. (2009), durante o fresamento da liga de alumínio 7050-T7451 – liga com propriedades semelhantes à liga 7075 – observaram aumento significativo na tensão residual de tração na superfície da peça, devido ao aumento do desgaste de flanco e consequente aumento da temperatura de corte, especialmente acima de desgastes da ordem de 0,21 mm ou mais; destaca-se, neste caso, um processo de desgaste e aumento de temperatura que se retro-alimenta.

Zaghbani e Songmene (2008) constataram, em simulações por elementos finitos no fresamento das ligas 7075-T6 e 6061-T6, que maiores temperaturas de corte se manifestam nos planos de cisalhamento secundário e na usinagem das ligas de alumínio com maiores resistências mecânicas, devido às altas taxas de deformações que ocorrem nessa região.

Apesar desses pontos, Trent e Wright (2000) apontam que o grande problema da temperatura de corte está nas ligas de alumínio que possuem partículas duras, como as ligas hipereutéticas de silício (17% e 23%), que geram temperaturas de corte elevadas, devido ao constante atrito das partículas de precipitados de Si (com dureza da ordem de 400 HV), portanto, gerando mais calor, nas superfícies de saída e de folga das ferramentas de corte.

A seleção do fluido de corte depende do material da peça e da ferramenta, além do processo de usinagem. No caso das ligas de alumínio, para se diminuir a expansão térmica e

as distorções, podem ser usadas emulsões (óleo mineral e gordura) e emulsões solúveis. Os óleos emulsionáveis têm sido uma boa solução ao se usinar com ferramentas de aço rápido, devido à sua baixa resistência às altas temperaturas de corte; ou de liga fundida, de metal-duro, de PCD e de CBN, por serem submetidas às altas temperaturas de corte (MACHADO et al., 2009).

Dentre os métodos de aplicação de fluido de corte, estão: (a) jorro, que aplica o fluido na região de corte em abundância; (b) pulverização, utilizando pequenas vazões de fluido de corte, atomizado em um jato de ar comprimido; e (c) sistema de alta pressão, aplica o fluido em abundância a pressões da ordem de 100 Bar (MACHADO et al., 2009).

Na usinagem das ligas de alumínio, as principais funções dos fluidos de corte são a de prevenir a formação de óxidos na superfície da peça usinada e a adesão na superfície de corte da ferramenta, proporcionar rápida dissipação do calor da peça, aumentar a vida da ferramenta, diminuir a rugosidade da superfície usinada e facilitar a liberação do cavaco da região de corte (KELLY e COTTERELL, 2002; SREEJITH, 2008).

Roy et al. (2009) afirmam que o alumínio e suas ligas aderem-se facilmente na aresta de corte, o que pode provocar quebra da ferramenta, imprecisão de usinagem e acabamento ruim da superfície usinada, argumentando que a usinagem a seco é um grande desafio.

Há, porém, certa indefinição na relação da rugosidade com os métodos de lubrificação, onde diferentes resultados foram atingidos em ambientes com diferentes níveis de lubrificação. Como exemplo, Suarez (2008) argumenta que a utilização de fluido de corte, seja em jorro ou MQF (mínima quantidade de fluido) não apresentou melhoras em rugosidade no fresamento da liga 7075-T7. Já para Kelly e Cotterell (2002), o melhor resultado de acabamento na furação de ligas de alumínio ACP 5080, foi com MQF. Resultado diferente, também, de Sreejith (2008), que aponta um melhor acabamento em jorro, na liga 6061.

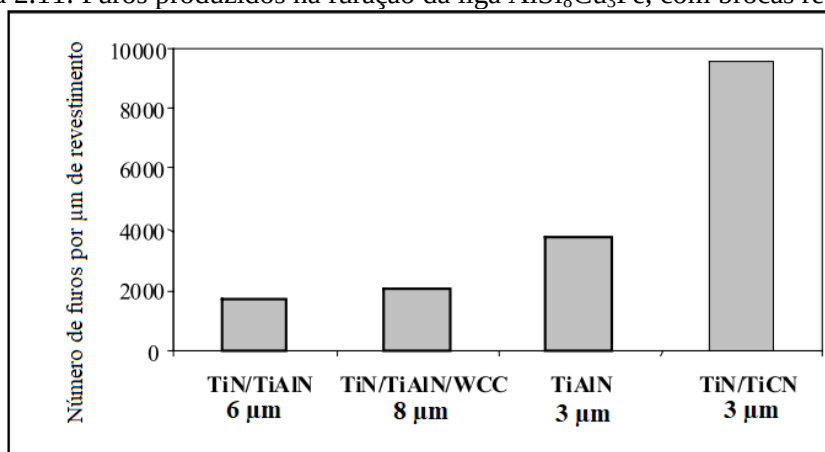
Destaca-se, porém, que a ação dos fluidos de corte – seja como refrigerante, seja como lubrificante – contribui para a redução da adesividade na superfície de corte da ferramenta, através da diminuição do amolecimento do material e da redução do atrito da superfície de corte (DASCH et al., 2009). Tal característica é demonstrada por Sreejith (2008) no torneamento da liga de alumínio 6061, onde a quantidade de material aderido à superfície de corte foi mínima com jorro. Também Dasch et al. (2009), em processo de furação da liga de alumínio B319, atingiram 10.000 furos por broca utilizando fluido de corte, contra apenas 30 furos por broca, na furação a seco, devido à aderência de material usinado na superfície de saída e entupimento dos canais da broca.

2.6.3 Ferramentas de Usinagem para o Alumínio

As ferramentas utilizadas na usinagem das ligas de alumínio podem ser de aço rápido, metal duro (WC+Co) e diamante, não sendo recomendável a utilização de cerâmicas (Si_3N_4), devido à alta solubilidade do Si no Al (KELLY e COTTERELL, 2002). Para Weingaertner e Schroeter (1991) não são recomendáveis ferramentas de metal duro contendo titânio, devido à sua alta afinidade com o alumínio, os autores também destacam a subclasse K10 para cortes contínuos; a K20, para cortes intermitentes e mudanças bruscas de temperatura, e a classe K01, para cortes de ligas de alumínio com partículas abrasivas¹.

Para Roy et al. (2009), revestimentos à base de nitretos, como TiN, TiAlN e CrN apresentam baixo desempenho na usinagem das ligas de alumínio, pois favorecem a formação da aresta postiça de corte, devido à grande afinidade química do alumínio com esses revestimentos. Em processo de furação da liga de alumínio $\text{AlSi}_8\text{Cu}_3\text{Fe}$, Viana e Machado (2009) chegaram em conclusão semelhante ao compararem o desempenho de brocas de aço com diferentes revestimentos à base de titânio, conforme mostrado na Figura 2.11.

Figura 2.11: Furos produzidos na furação da liga $\text{AlSi}_8\text{Cu}_3\text{Fe}$, com brocas revestidas



Fonte: adaptado de Fang e Wu (2005)

Com relação à geometria das ferramentas de corte, destaca-se o ângulo de saída, variando de 0° a 20°. Em Shetty e Kamath (2008), foi utilizado um ângulo de saída de 0°, utilizando ferramenta de CBN, para o torneamento da liga de alumínio 6061 (presença de partículas duras, SiC). Por outro lado, Toropov, Ko e Kim (2005), no torneamento da liga de alumínio 6061-T6, utilizando ferramental de metal duro, optaram por um ângulo de saída de 20°. Destaca-se o estudo de Tang et al. (2009), no fresamento da liga de alumínio 7075-

¹ O texto original é contemporâneo à ISO 513:1991, portanto, escrito antes da atualização da norma, que acrescentou as classes N (não ferrosos), S (superligas) e H (materiais endurecidos).

T7451, que utilizaram ferramenta de metal duro, com ângulo de saída de 25°. De modo geral, utilizam-se ângulos menores em ligas com maior concentração de partículas duras.

Com exceção das ligas de alumínio com partículas duras (como Al_2O_3 , SiC e Si) (KELLY e COTTERELL, 2002), o **desgaste de ferramentas** não é um problema característico na usinagem das ligas de alumínio, como a liga 7075-T6, pois as taxas de desgaste, em virtude de seu ponto de fusão, permanecem baixas, mesmo em altas velocidades de corte. Na usinagem das ligas de alumínio, com metal duro e aço rápido, podem ser empregadas velocidades de 600 m/min e de 300 m/min, respectivamente, garantindo-se, ainda assim, boa vida à ferramenta (TRENT e WRIGHT, 2000).

Porém, Kannan e Kishawy (2007) destacam que as partículas de Al_2O_3 , presentes na liga 7075, são as bases constitutivas de algumas ferramentas de corte, o que piora a usinabilidade dessas ligas.

Para efeitos de comparação, Yanming e Zehua (2000) destacam os valores aproximados de dureza de materiais de ferramentas e de partículas duras, a se destacar, para este estudo: Al_2O_3 (19,5 GPa); ferramentas classe K10 (16 GPa), K01 (18 GPa) e CBN (50 GPa).

Embora o desgaste de flanco seja o principal tipo de desgaste na usinagem das ligas de alumínio, há registros de desgaste de cratera, associado ao mecanismo abrasivo e difusivo de desgaste (HAMADE e ISMAIL, 2005).

Liang, Vohra e Thompson (2008) apontam que, na usinagem em altas velocidades das ligas de alumínio, há a presença de destacamentos inesperados nos revestimentos, em função do alto coeficiente de atrito na interface cavaco-ferramenta, e impactos de partículas duras sobre a aresta de corte. Isso se deve à incapacidade da adesão revestimento-substrato de resistir à força de atrito na interface cavaco-ferramenta, ou mesmo devido à baixa resistência mecânica do revestimento.

Para reduzir o desgaste das ferramentas, Mills e Redford (1983) aconselham a adição de elementos de livre-corte (com Sn, Bi e Pb) à liga, material adequado de ferramenta e lubri-refrigeração.

2.6.4 Integridade Superficial na usinagem do Alumínio

A rugosidade da superfície usinada pode ser dividida em (a) rugosidade teórica, advinda das marcas da geometria da ferramenta e do avanço de corte e (b) rugosidade real, advinda, também, de fragmentos da aresta postiça de corte, vibrações, imprecisão da máquina, defeitos estruturais do material usinado, esmagamento no corte de materiais dúcteis, aglomeração de cavaco sobre a peça e desgaste da ferramenta (BOOTHROYD e KNIGHT, 2006; CHILDS et

al., 2000). Assim, Trent e Wright (2000) afirmam que o acabamento da superfície usinada pode ser usado como um critério para avaliação do desgaste da ferramenta de corte.

Para Boothroyd e Knight (2006) e Trent e Wright (2000) os fragmentos da aresta postiça de corte são um dos principais fatores que contribuem para o aumento da rugosidade real, ao aderirem-se à superfície da peça. Boothroyd e Knight (2006) recomendam grandes ângulos de saída e altas velocidade de corte, além de superfícies de saída com baixa afinidade química e elementos de liga que auxiliem no corte do material usinado, enquanto Machado et al. (2009) e Trent e Wright (2000) recomendam ferramentas afiadas, aplicação de lubrificação adequada e baixos avanços.

Na avaliação da rugosidade, seguem-se as orientações da NBR ISO 4288 (2008); especificamente para ligas de alumínio, a avaliação da rugosidade tem sido realizada com comprimento de amostragem (*cut-off*) de 0,8 mm (BRAGA et al., 2002; RAO e SHIN, 2001; RODRIGUES e COELHO, 2007).

A qualidade da superfície usinada das ligas de alumínio depende da rugosidade gerada pelas marcas da ferramenta na peça (rugosidade teórica), do comprimento de destacamento do cavaco da peça e da rigidez ou estabilidade do sistema (JOHNE, 1994).

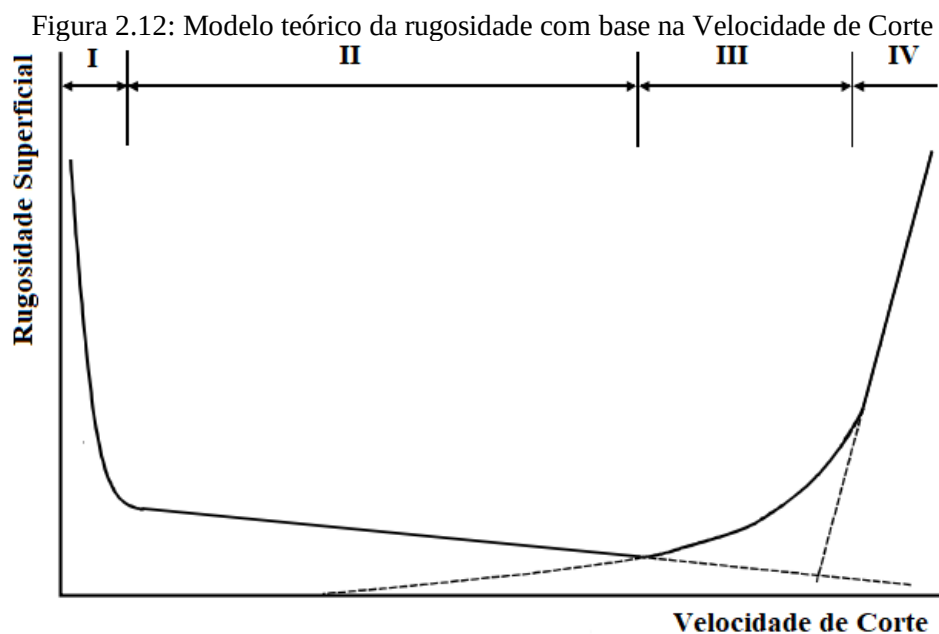
Normalmente, a rugosidade da superfície usinada é bastante influenciada pelas características de dureza e microestrutura das ligas de alumínio. Assim, maiores valores de dureza tendem a provocar menor rugosidade da superfície usinada, devido à menor adesividade nas superfícies de saída e de folga (TASH et al., 2006).

Por outro lado, em ligas cuja dureza é resultado de partículas duras presentes na matriz de alumínio, há a tendência de aumento da rugosidade da superfície usinada, pois as partículas duras se desprendem da matriz e aderem ou riscam a superfície usinada (JOHNE, 1994), o que também gera desgaste da ferramenta, conforme argumentado anteriormente (TRENT e WRIGHT, 2000).

Destaca-se, também, que a alta afinidade das ligas de alumínio à maioria dos materiais de ferramentas, é um fator que contribui para piorar a rugosidade da superfície usinada. Roy et al. (2009), no torneamento do Al-puro (12% Si) registraram acúmulo de material, com ferramentas de WC+6% Co e WC + 6% Co revestidas com TiC, TiN, TiB₂, Al₂O₃ e ALON, acelerando o aparecimento de aresta postiça de corte, resultando em piores valores de rugosidade.

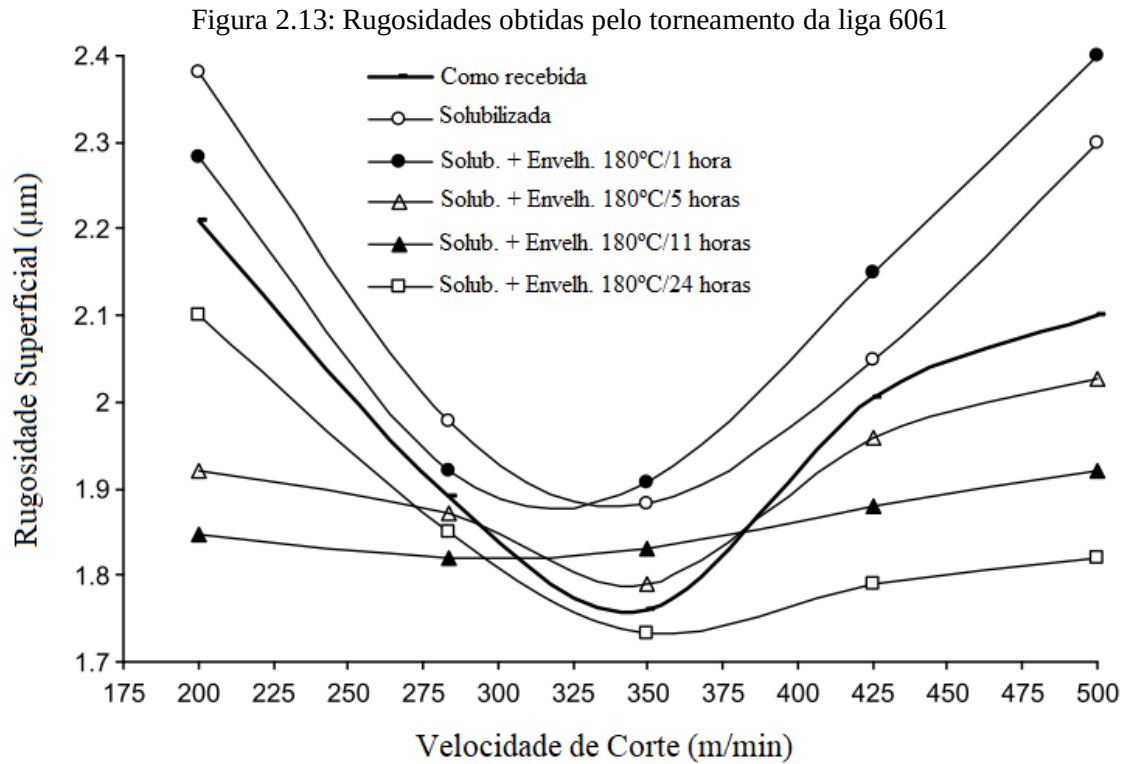
Para Johnne (1994), Machado et al. (2009) e Trent e Wright (2000), o aumento da velocidade de corte, por aumentar a temperatura na região de corte, tende a inibir a formação da aresta postiça, que ocorre e é instável em baixas velocidades de corte. Especificamente,

Johne (1994) propõe quatro regiões de rugosidades superficiais em função da velocidade de corte, conforme ilustrado na Figura 2.12. Na **Região I**, a rugosidade é afetada pela formação da aresta postiça de corte; na **Região II**, apresentam-se melhores valores de rugosidade, devido à redução da aresta postiça de corte; na **Região III**, a rugosidade começa a ser afetada por vibrações, devido ao aumento da velocidade de corte; na **Região IV**, a rugosidade é afetada pelo acúmulo de material na superfície de corte e pelo desgaste da ferramenta.



Fonte: adaptado de Johne (1994)

Destaca-se, nesse caso, o trabalho de Demir e Gündüz (2009) que identificaram as quatro regiões propostas por Johne (1994), durante o torneamento da liga de alumínio 6061, sob diferentes tratamentos térmicos, conforme Figura 2.13.

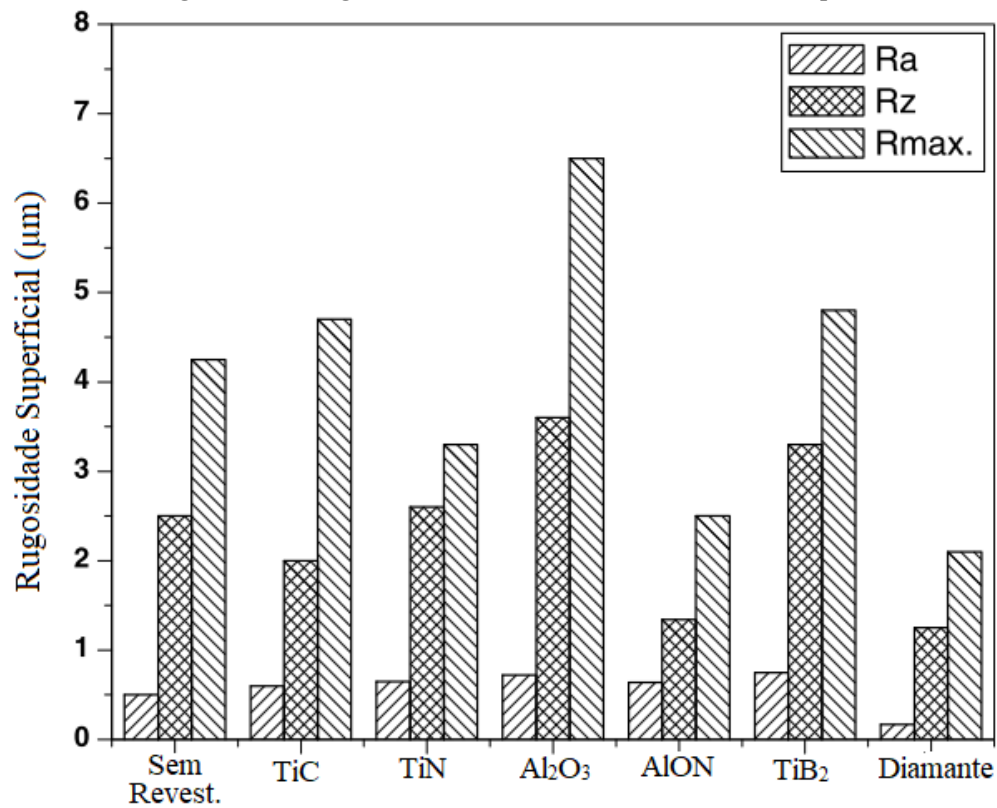


Fonte: adaptado de Demir e Gündüz (2009)

Para Hamade e Ismail (2005), durante o torneamento de ligas de alumínio, pode-se reduzir problemas de rugosidade da superfície usinada com velocidades de corte, em nível de *High Speed Machining*, entre 2100 e 3000 m/min, a variar de acordo com a precisão do processo, da rigidez e da frequência de vibração do sistema máquina-ferramenta.

Roy et al. (2009) durante o torneamento do Al-puro, com ferramentas de metal duro revestidas com diamante, observaram menores rugosidades superficiais, pois sua alta dureza e inércia química impediram a adesão de material na superfície de corte da ferramenta, conforme mostrado na Figura 2.14.

Figura 2.14: Rugosidades obtidas no torneamento do Al-puro



Fonte: adaptado de Roy et al. (2009)

Fuh e Wu (1995), no fresamento da liga de alumínio 2014-T6, constataram que o aumento da velocidade de corte e do raio de ponta da ferramenta e a diminuição do avanço, reduziram a rugosidade da superfície usinada.

2.6.5 Vibração na Usinagem do Alumínio

Vibração é o resultado da variação cíclica da força de usinagem sobre a ferramenta de corte e da interação cíclica desta, com as características dinâmicas de rigidez da máquina, suporte de ferramenta e peça (CHILDS et al., 2000). Essa interação depende das condições de corte, cujo efeito pode ser a deformação elástica da estrutura da máquina e, com isso, o deslocamento da interface ferramenta-peça, tornando-se um processo cíclico vibracional (BOOTHROYD e KNIGHT, 2006).

Os principais eventos que provocam a vibração durante a usinagem são: componentes defeituosos, partes desbalanceadas, montagens inadequadas, desgaste de ferramentas, cavacos segmentados, cortes interrompidos, falta de rigidez da máquina e usinagem de peças irregulares (MACKERLE, 1999; TRENT e WRIGHT, 2000).

Pode-se destacar como inconvenientes gerados pela vibração em processos de usinagem, segundo Childs (2000); Mackerle (1999); Trent e Wright (2000), o acabamento ruim da superfície usinada, erros dimensionais na peça usinada, taxa de crescimento do desgaste, falha da ferramenta e da máquina.

Para Childs (2000), os processos mais suscetíveis à vibração são os que utilizam ferramentas cuja relação comprimento-diâmetro é muito grande.

Duas possibilidades de redução da vibração na usinagem de alumínio são (a) adição de elementos de livre corte no material usinado (DASCH et al., 2009); (b) a utilização de ferramentas de diamante policristalino (PCD, *Polycrystalline Cubic Diamond*) ou de metal duro, com geometria positiva e arestas afiadas, desde que sejam utilizadas máquinas estáveis (KISHAWY et al., 2005).

Em aplicação industrial, o monitoramento da intensidade (amplitude) da vibração pode ser realizado com acelerômetros (SONG et al., 2004). A grande vantagem dos acelerômetros é a de avaliar o estado triaxial de aceleração de um corpo, o qual possibilita capturar fenômenos físicos vibracionais com diferentes frequências. (DIMLA SR, 2004), monitorou a vibração com um acelerômetro triaxial, em um processo de torneamento, a uma taxa de aquisição de 20 kHz; enquanto Tatar e Gren (2008), em um processo de fresamento, monitoraram a vibração no suporte da ferramenta e na ferramenta, com uma taxa de aquisição entre 2 e 50 kHz. Suyama (2014), no estudo de torneamento interno de acabamento no aço AISI 4340 endurecido utilizou uma taxa de aquisição de 10 kHz. Já Santos (2015) utilizou uma taxa de 50 kHz, no desenvolvimento de um método de variação dinâmica de parâmetros de corte, de forma a reduzir as vibrações em processos de torneamento.

2.7 Metodologia de Planejamento de Experimentos

Um experimento é um teste ou uma série de testes, cuja aplicação é um importante método de estudo sobre como sistemas e processos funcionam. A validade das conclusões que são retiradas de um experimento depende, em grande parte, de como o experimento foi conduzido; daí, a importância do planejamento desses experimentos (MONTGOMERY e RUNGER, 2009).

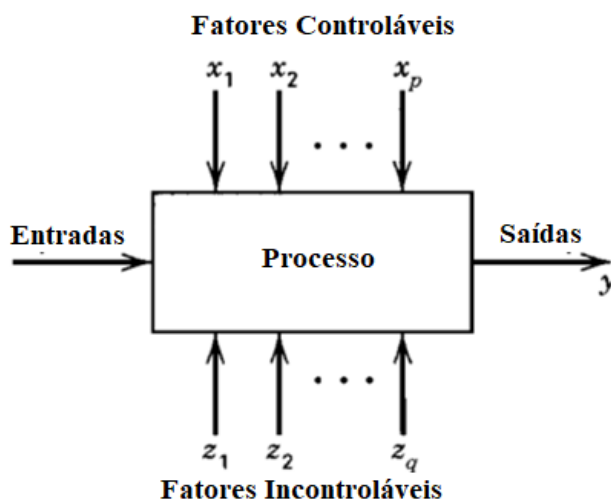
Conforme Montgomery (2001), pode-se visualizar o processo como uma combinação de máquinas, métodos, pessoas e outros recursos que transformam algum *input* em um *output* (*y*), que tem uma ou mais respostas observáveis. Algumas variáveis do processo

$(x_1, x_2, \dots, x_p)$ são controláveis, ao passo que outras variáveis $(z_1, z_2, \dots, z_q)$ são incontroláveis (apesar delas poderem ser controláveis para efeitos de teste). Os objetivos do experimento podem incluir o seguinte:

- Determinar quais variáveis são mais influentes na resposta y ;
- Determinar o valor do influenciador x , de forma que y será quase sempre próximo ao valor nominal desejado;
- Determinar o valor do influenciador x , de forma que a variabilidade de y seja pequena;
- Determinar o valor do influenciador x , de forma que os efeitos das variáveis incontroláveis $z_1, z_2, \dots, z_q$ sejam minimizados.

O funcionamento desses sistemas e processos pode ser representado pela Figura 2.15

Figura 2.15: Modelo genérico de um sistema ou processo



Fonte: Montgomery (2001)

Dessa forma, projetar corretamente um experimento é de grande importância para analisá-lo corretamente. Para tanto, a utilização de métodos de planejamento de experimentos (*Design of Experiments*, DOE) possibilita investigar, de maneira econômica e eficiente, a influência de um conjunto de fatores, no desempenho de um determinado processo (MONTGOMERY e RUNGER, 2009).

Em suma, o que se quer ao se aplicar planejamento de experimentos é obter um modelo matemático apropriado para descrever certo fenômeno, utilizando o mínimo possível de experimentos. O planejamento experimental permite eficiência e economia no processo experimental e o uso de métodos estatísticos na análise dos resultados obtidos resulta em objetividade científica nas conclusões (SUAREZ, 2008).

Os três princípios básicos de um planejamento de experimentos são replicação, aleatoriedade e blocagem (BARROS NETO et al., 2001; CALADO e MONTGOMERY, 2003).

- **Replicação:** é a repetição do experimento básico. Existem duas propriedades importantes desse princípio que são: permitir ao experimentalista obter estimativas do erro experimental; e se a média da amostra é usada para estimar o efeito de m fator no experimento, a replicação também permite ao experimentalista obter uma estimativa mais precisa desse efeito.
- **Aleatorização:** é o processo de definir a ordem dos tratamentos da matriz experimental, por meio de sorteios ou por limitações específicas dos testes. Refere-se, também, ao processo de alocação do material e equipamento às diferentes condições de experimentação.
- **Blocagem:** consiste em conter e avaliar a variabilidade produzida pelos fatores perturbadores (controláveis e não-controláveis) do experimento. Esta técnica permite criar um experimento (grupos ou unidades experimentais balanceadas) mais homogêneo e aumentar a precisão das respostas que são analisadas.

Adicionalmente, Montgomery (2001) aponta quatro princípios a se observar durante o planejamento de um experimento:

- **Utilizar o conhecimento não-estatístico do problema:** o conhecimento prático e acadêmico da área específica do experimento auxiliará muito na escolha dos fatores, na determinação dos níveis dos fatores, decidir o número de réplicas, interpretar os resultados da análise, entre outros. O uso puro da estatística não substitui a reflexão das especificidades do experimento.
- **Manter o projeto e a análise o mais simples possível:** o uso de técnicas estatísticas complexas e sofisticadas não é obrigatório. Métodos de projeto e análise estatística simples são, quase sempre, melhores.
- **Reconhecer a diferença entre significância estatística e prática:** o fato de que duas condições experimentais tenham produzido mudanças significativas no resultado, não quer dizer que o impacto tenha sido suficiente, do ponto de vista prático. Mesmo que a alteração de um parâmetro gere resultados melhores, os custos para tal alteração no processo produtivo podem ser inviáveis.
- **Experimentos geralmente são iterativos:** é imprudente projetar um experimento muito abrangente no início de um estudo. Projetos bem-sucedidos exigem

conhecimento dos fatores importantes, a faixa em que tais fatores variam, o número apropriado de níveis para cada fator, além dos métodos e unidades de medida adequados para cada fator e resposta. Portanto, não é recomendável investir mais de 25% dos recursos (amostras, orçamento, tempo, etc.) no primeiro experimento. Geralmente, tal esforço tem a função de aprendizado.

2.8 Planejamento Fatorial

Um experimento fatorial é uma técnica poderosa para problemas com dois ou mais fatores. Geralmente, em um planejamento fatorial de experimentos, tentativas (ou corridas) experimentais são feitas em todas as combinações dos níveis dos fatores (MONTGOMERY; RUNGER, 2009).

Planejamentos fatoriais são extremamente úteis para medir os efeitos (ou influências) de uma ou mais variáveis na resposta de um processo. O usual é realizar um planejamento com dois níveis, no máximo três. O uso de mais níveis aumentaria sobremaneira o número de pontos experimentais, fato esse que se quer evitar quando se propõe um planejamento (CALADO e MONTGOMERY, 2003). Em cada tentativa ou réplica, todas as combinações possíveis dos níveis de cada variável são investigadas. Quando o efeito de um fator depende do nível de outro fator, diz-se que há interação entre estes fatores.

Em essência, Planejamentos Fatoriais geram modelos lineares, que podem ser adequados em várias situações. Porém, para se avaliar o ajuste do modelo ao fenômeno estudado, recomenda-se a utilização de Pontos Centrais (*Center Points*), onde se adicionam ao experimento fatorial pontos com níveis intermediários aos níveis dos fatores (PAIVA, 2006).

Como experimentos Fracionados geram somente modelos de Primeira Ordem, os Pontos Centrais trazem a possibilidade de se identificar uma eventual falta de ajuste, indicando, assim, maior adequação de um modelo de Segunda Ordem. Assim, Pontos Centrais indicam uma eventual curvatura no modelo, além de permitir uma estimativa independente do erro (MONTGOMERY, 2001).

O uso de Pontos Centrais pressupõe que os fatores sejam quantitativos e, quanto à quantidade utilizada por experimento, Montgomery (2001) recomenda o uso de três a cinco Pontos Centrais.

2.8.1 Planejamento Fatorial Fracionado

Normalmente, trabalhos experimentais podem envolver muitos fatores (f_i), com muitos níveis (n_i), cujas combinações podem gerar muitos tratamentos, tornando a execução deste planejamento fatorial muito onerosa. Uma ferramenta que possibilita reduzir a quantidade de tratamentos de um planejamento e, eficientemente, analisar os efeitos conjuntos de vários fatores (k) sobre várias respostas (y_i), é o planejamento fatorial 2^k (SANTOS JÚNIOR, 2012).

Para experimentos fatoriais fracionados, Montgomery e Runger (2009) apresentam o conceito de **Resolução**, que seria uma medida da severidade de associação em um planejamento fatorial fracionado, sendo utilizados os valores III, IV e V. Para Shen e Wan (2009), a resolução de um planejamento fatorial fracionário caracteriza o grau de confusão; então, um projeto de Resolução III pode estimar independentemente todos os principais efeitos, mas alguns efeitos principais são confundidos com interações de dois fatores, já um projeto de Resolução V tem todos os estimadores de efeitos principais e de interação de dois fatores independentes um do outro. Como consequência, quanto maior a resolução, mais pontos experimentais são necessários.

2.8.2 Estimativas de Efeitos e Análise de Variância no planejamento 2^k

As estimativas dos efeitos fatoriais possibilitam as investigações das fontes de variação (fatores principais e interações), cujas variações (-1 e +1) têm efeitos significativos sobre a variação média da resposta (y_i), no planejamento fatorial 2^k . Apesar de essas estimativas mostrarem as fontes de variação mais significativas, por exemplo, com uma análise de Pareto; elas, porém, não definem nenhum valor de corte. Portanto, serão eficientemente conduzidas, juntamente com uma análise de variância, através da qual poder-se-ão selecionar as fontes de variação com p-Valor muito baixo, normalmente, menor do que um nível de significância (α) de 5% (MONTGOMERY, 2001).

Todo o estudo de análise de variância é feito com base nos contrastes das fontes de variação, obtidos a partir dos resultados das respostas (y_i) dos tratamentos do planejamento fatorial 2^k . Ele é a soma do produto da coluna de níveis da fonte de variação, pela coluna da soma das observações da resposta (y_i), caso haja mais de uma observação.

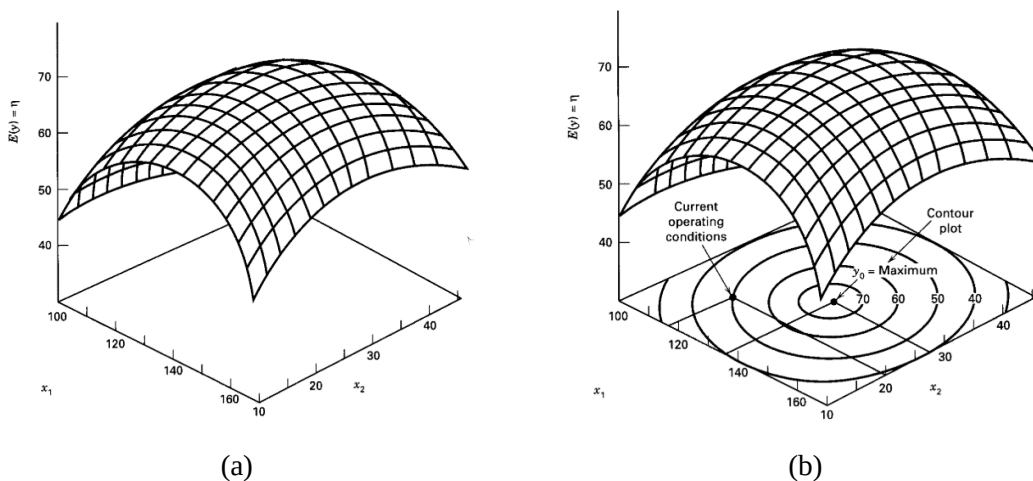
2.9 Superfície de Resposta

A Metodologia de Superfície de Resposta (*Response Surface Methodology*, RSM) foi inventada por Box e Wilson (1951)² para encontrar a combinação de entradas que minimizem a saída de um sistema real, não simulado (ANGÜN et al., 2002).

O planejamento fatorial é uma estratégia analítica útil e sua principal aplicação reside na triagem das variáveis mais relevantes de um determinado sistema analítico. Após este processo de triagem das variáveis mais significativas, são executados experimentos que permitem refinamento e um melhor conhecimento do sistema em estudo (BARROS NETO et al., 2001).

Essencialmente, a Metodologia de Superfície de Resposta é uma coleção de técnicas matemáticas e estatísticas úteis para desenvolvimento, melhoria e otimização, sendo amplamente utilizada para a previsão e otimização de parâmetros de corte em usinagem. (MASMIATI e SARHAN, 2015). Tipicamente, representa-se a superfície de resposta graficamente, como mostrado na Figura 2.16 (a), onde η é plotado em relação aos níveis x_1 e x_2 . Para auxiliar na visualização da forma de uma superfície de resposta, costuma-se plotar o contorno da superfície de resposta, como mostrado na Figura 2.16 (b); na plotagem do contorno, linhas de resposta são desenhadas no plano x_1, x_2 , onde cada contorno corresponde a uma altura particular da superfície de resposta.

Figura 2.16: Representação gráfica de uma superfície de resposta
a) Plotagem da superfície de resposta b) Plotagem do contorno



Fonte: Montgomery (2001)

² Box, G. E. P.; Wilson, K. B. (1951) On the experimental attainment of optimum conditions. *Journal of Royal Statistical Society, Series B* 13 (1): 1-38.

A análise de uma superfície de resposta é feita em termos de uma superfície ajustada. Se tal superfície é adequada, sua análise será aproximadamente equivalente a análise da superfície real. Evidentemente, usando-se um arranjo experimental adequado para coletar os dados de y , os parâmetros do modelo serão estimados eficazmente. Geralmente, quando se está em um ponto da região experimental distante do ponto de ótimo, a curvatura do sistema é bem pequena, de onde decorre que um modelo de primeira ordem seja adequado para modelar a resposta. O objetivo experimental deve ser, portanto, caminhar em direção à região de ótimo. Uma vez encontrada tal região, um modelo quadrático deve ser utilizado (PAIVA, 2006).

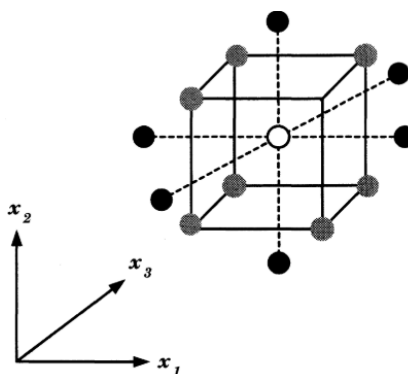
2.9.1 Planejamento Composto Central

Dentre os delineamentos padrões, o Planejamento Composto Central (PCC) é considerado um delineamento ótimo, requerindo poucos ensaios para sua realização (MATEUS et al., 2001).

Em geral, um planejamento composto central para k fatores, (codificados como $x_1, \dots, x_k$) é formado de três partes, também ilustradas na Figura 2.17 (BARROS NETO et al., 2001):

1. Uma parte chamada de **fatorial** (ou **cúbica**), contendo um total de n_{fat} pontos de coordenadas $x_i = -1$ ou $x_i = +1$, para todos os $i = 1, \dots, k$;
2. Uma parte **axial** (ou **em estrela**), formada por $n_{\text{ax}} = 2k$ pontos com todas as coordenadas nulas exceto uma, que é igual a um certo valor α (ou $-\alpha$);
3. Um total de n_{centr} ensaios realizados no **ponto central**, onde, consequentemente, $x_1 = \dots x_k = 0$

Figura 2.17: Representação de planejamento composto central para três fatores.



Fonte: Barros Neto, Scarminio e Bruns (2001)

Na Figura 2.17, as bolas pretas representam a parte axial, as cinzas representam a parte fatorial e a branca representa o ponto central

Para a **região fatorial**, ou de pontos cúbicos, utiliza-se, essencialmente, um planejamento fatorial completo. Porém, para Barros Neto, Scarminio e Bruns (2001), considerando que o número de ensaios pode se tornar inconvenientemente grande, especialmente quando se pretende avaliar um número grande de fatores, há a possibilidade de se utilizar um planejamento fracionário nessa região, apesar de ser necessário um cuidado com relação à fração e, conseqüentemente, a resolução escolhida.

Já para a **região axial**, existe a definição do valor α que, para Barros Neto, Scarminio e Bruns (2001), costuma ficar entre 1 e $\sqrt{k}$. Quando $\alpha = \sqrt{k}$, os pontos cúbicos e os pontos axiais ficam sobre a superfície de uma esfera – ou hiperesfera em situações acima de três dimensões – e o planejamento é chamado esférico. Por outro lado, em casos onde $\alpha = 1$, os pontos axiais se localizam nos centros das faces do cubo – ou hipercubo, acima de três dimensões – definido pela região cúbica (fatorial) do planejamento, situação mais adequada quando se há três níveis de fatores, mais comum em fatores qualitativos.

Para a escolha de α , há o conceito de rotabilidade (*rotability*) proposto por Box e Hunter (1957)³, onde diz-se que um planejamento é rotável se a variância de suas estimativas, $V(\hat{y})$, só depender da distância em relação ao ponto central, isto é, se a precisão da resposta prevista for a mesma em todos os pontos situados numa dada (hiper)esfera com centro no próprio entro do planejamento. Para um planejamento cuja porção cúbica seja um fatorial completo ou um fatorial fracionário de resolução V, pode-se demonstrar que a rotabilidade é obtida pela fórmula :

$$\alpha = \sqrt[4]{n_{fat}}. \quad (2.6)$$

Na **região central**, utiliza-se repetições para duas finalidades: fornecer uma medida do erro puro e estabilizar a variância da resposta prevista (BARROS NETO et al., 2001).

³ Box, G. E. P.; Hunter, J. S. (1957) Multifactor experimental designs for exploring response surfaces. *Ann. Math. Statist.*, 28, 195-241

3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Neste capítulo serão apresentados: material, equipamentos ferramentas e instrumentos utilizados no experimento. Em seguida, será apresentado o fluxo de procedimentos, detalhes sobre as matrizes experimentais e procedimentos de medição.

3.1 Limitações e Hipóteses do Experimento

Para o desenvolvimento do trabalho, foram considerados os seguintes pontos:

- Os equipamentos estão devidamente calibrados e ajustados para o experimento;
- Por apresentarem a mesma geometria de corte, os revestimentos não afetarão significativamente o resultado final da rugosidade;
- As arestas de corte utilizadas não apresentam diferença relevante na geometria, a ponto de influenciar nos resultados do experimento;
- O método de Planejamento de Experimentos do tipo Experimento Fatorial Fracionado 2^{3-1} , com Pontos Centrais apresenta resultados confiáveis para relacionar os parâmetros de entrada e os resultados obtidos; apesar de não gerar informações referentes a interações de ordem alta;
- O Experimento do tipo Planejamento Composto Central apresenta resultados confiáveis para relacionar os parâmetros de entrada e os resultados obtidos, permitindo relacionar interações de ordem alta e permitindo a geração de Superfícies de Resposta;

3.2 Material

Para este trabalho, foram utilizadas barras de alumínio 7075-T6, redondas com diâmetro 1 ¼”, adquiridas através da empresa Alumaticopper Comercial de Metais Ltda. que foram usinadas, conforme Figura 3.1.

Figura 3.1: Corpos de prova
a) desbastadas para fixação na placa b) desbastadas após o experimento



(a)



(b)

Fonte: Próprio Autor, 2019

O material apresenta a seguinte composição química:

Tabela 3.1: Composição química da liga 7075 (valores em %)

Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Outros
87,1- 91,4	0,40	0,50	1,2- 2,0	0,30	2,1- 2,9	0,18- 0,28	5,1- 6,1	0,20	0,15

Fonte: Alumaticopper (2017) e Aluminum Association (2017)

Observa-se que os elementos de liga mais presentes na composição da liga 7075 são o Zinco, seguido do Manganês e do Cobre. Conforme detalhado no Quadro 2.4, espera-se que, devido à presença do Mg, haja um aumento da dureza do cavaco, combinada a uma redução do coeficiente de atrito entre o cavaco e a ferramenta; também, a presença do Cu formará a fase intermetálica CuAl_2 , o que fragilizará o cavaco, .

3.3 Máquina, Ferramentas e Lubri-refrigeração

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Usinagem CNC (LUCNC), do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, CEFET-MG, Campus de Varginha. A máquina-ferramenta utilizada foi um Torno CNC marca Nardini Logic 195, com potência do motor principal de 10 Hp (7457 W) e rotação máxima de 3500 rpm, conforme Figura 3.2.

Considerando a rotação máxima de 3500 rpm no torneamento das barras de 1 ¼” (portanto, 31,75 mm, chegando a 28 mm, após o torneamento), o maior valor de Velocidade de Corte possível de se alcançar seria de, aproximadamente, 307 m/min.

Figura 3.2: Torno CNC Logic 195 III



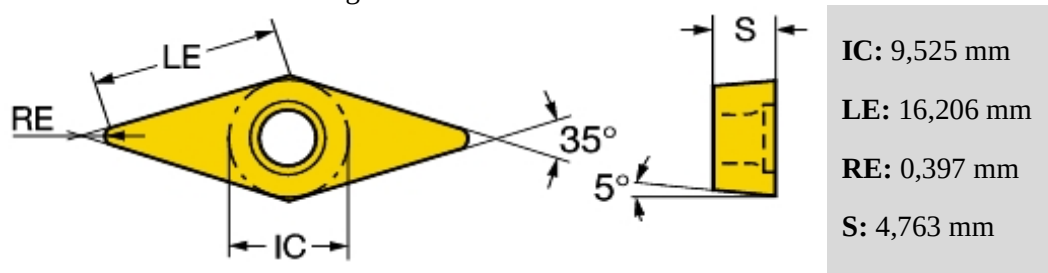
Fonte: Próprio Autor, 2019

Nos experimentos utilizou-se um suporte de ferramenta Coroturn 107 marca Sandvik-Coromant, código ISO SVJBL 2020K 16, com os seguintes insertos:

- VBGT 16 04 04-UM **H13A**, metal duro ISO N15 sem revestimento, contendo substrato predominante de carboneto de tungstênio.
- VBGT 16 04 04-UM **1125**, inserto de metal duro ISO M25, revestido com ((Ti,Al)N+(Al,Cr)₂O₃), processo por Deposição Física de Vapor (PVD).

Ambos os insertos são indicados para operações médias, apresentando uma geometria conforme Figura 3.3. Estes insertos são de face única e com duas arestas de corte.

Figura 3.3: Geometria dos insertos



Fonte: Sandvik (2018)

Vale destacar, também, que o fabricante indica valores bastante discrepantes entre os dois insertos para a Velocidade de Corte do alumínio, conforme mostrado na Tabela 3.2.

Tabela 3.2: Parâmetros de corte indicados para os insertos

Parâmetro de Corte	VBGT 16 04 04-UM H13A (sem revestimento)			VBGT 16 04 04-UM 1125 (com revestimento)		
	f [mm/r]	Vc [m/min]	ap [mm]	f [mm/r]	Vc [m/min]	ap [mm]
Valor Máximo	0,30	2400	4,0	0,30	590	4,0
Valor Mínimo	0,08	240	0,5	0,08	60	0,5

Fonte: Sandvik (2017)

Finalmente, optou-se por não utilizar fluido de corte, tendo em vista os tempos reduzidos de usinagem, além da indisponibilidade de um sistema que pudesse garantir uma lubri-refrigeração uniforme entre os experimentos; tendo em vista que tal variação poderia resultar em ruído, ou seja, uma variável não controlada que poderia mascarar os resultados.

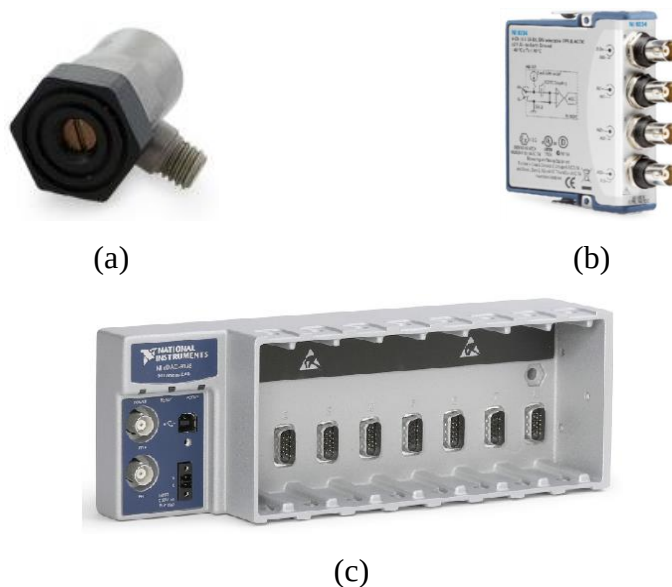
Durante a usinagem da liga 7075-T6 foi medida a vibração da ferramenta e, após o torneamento, foi medida a rugosidade da peça e o desgaste das ferramentas. Os instrumentos e procedimentos de medição são descritos nos próximos itens.

3.4 Vibração da ferramenta

Foram utilizados dois acelerômetros PCB General Purpose, 10mV/g, ICP®, da National Instruments, acoplados ao suporte da ferramenta, conforme Figura 3.4 (a).

Os acelerômetros foram ligados a um módulo NI-9234, Figura 3.4 (b), de entrada de som e vibração, Série C, 5V, 51,2 S/s/canal e 4 canais, também da National Instruments. O módulo, por sua vez, foi ligado a um chassi CompactDAQ 9178, Figura 3.4 (c).

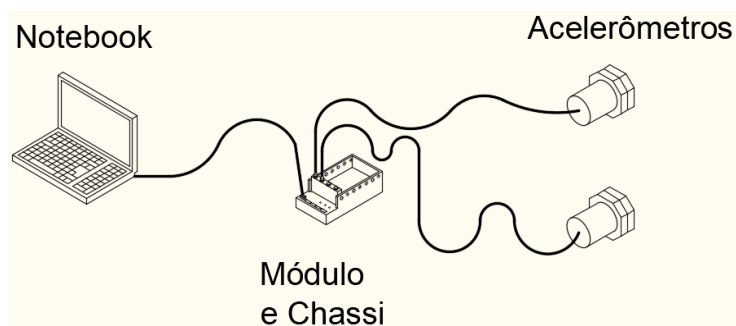
Figura 3.4: Equipamento para medição da vibração.
 (a) Acelerômetro PCB General Purpose, (b) Módulo NI-9234, (c) Chassi



Fonte: Próprio Autor, 2019

O conjunto de aquisição foi ligado, por conexão USB, a um computador com processador Intel® Core i3 2.4 GHz, rodando o *software* LabVIEW 2014. A Figura 3.5 apresenta os componentes montados. A taxa de aquisição utilizada foi de 10 kHz, com respostas no domínio do tempo, unidades em centivolts (cV).

Figura 3.5: Montagem dos componentes para medição da vibração



Fonte: Próprio Autor, 2019

3.5 Rugosidade

Para a medição dos valores de rugosidade média (R_a) dos corpos de prova usinados, foi utilizado o rugosímetro portátil Rugosurf 20, da Hexagon Metrology, precisão ISO 3274, classe 1, mostrado na Figura 3.6. O rugosímetro calibrado antes das medições, utilizando o parâmetro de *cut-off* de 0,8 mm em todas as medidas.

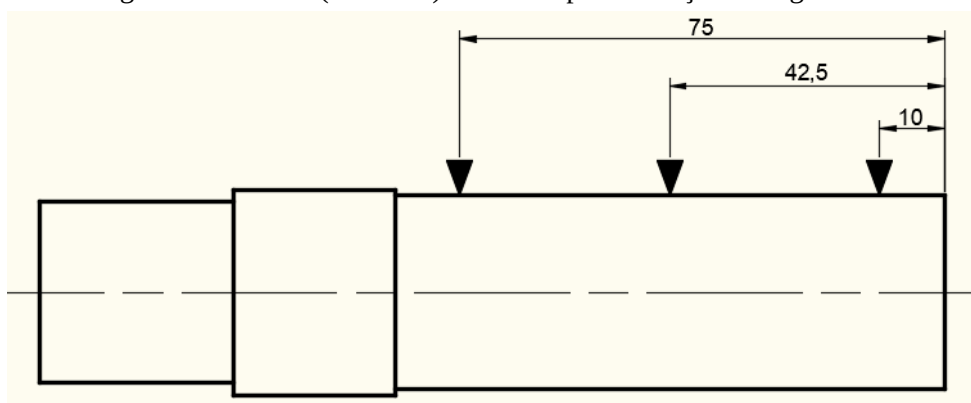
Figura 3.6: Rugosímetro portátil Surftest 201



Fonte: Próprio Autor, 2019

Para maior precisão, foram medidos três pontos de rugosidade na peça, conforme a Figura 3.7 e, em seguida, calculada a média aritmética destes valores.

Figura 3.7: Pontos (amostras) definidos para medição da rugosidade



Fonte: Próprio Autor, 2019

A medição da rugosidade e do desgaste do inserto, no item seguinte, foi realizada no Laboratório de Segurança, Metrologia e Metalografia (LASM), do CEFET-MG, Campus Varginha.

3.5.1 Integridade do Inserto

Para a avaliação da integridade das arestas de corte, foi utilizado um microscópio óptico para uso metalúrgico modelo BX41M-LED, fabricante Olympus e capacidade de ampliação de até 100 vezes, mostrado na Figura 3.8.

Figura 3.8: Microscópio BX41M-LED



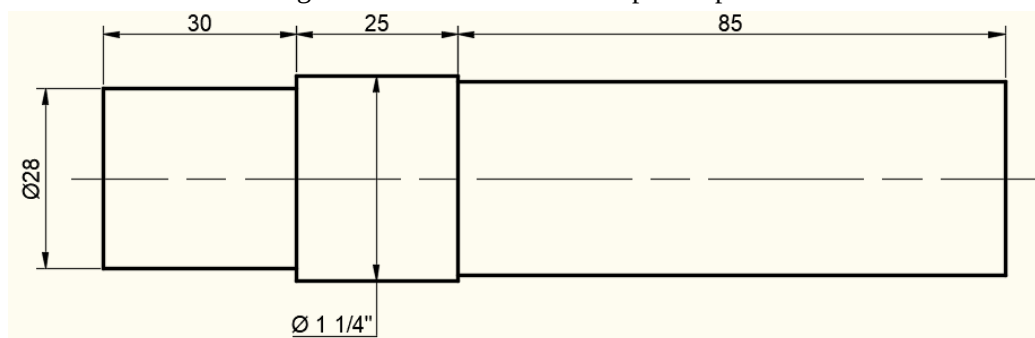
Fonte: Systems (2018)

3.6 Preparação

3.6.1 Preparação dos Corpos de Prova

Os corpos de prova foram cortados com serra de fita. Para padronizar suas dimensões, os mesmos foram faceados nas duas extremidades e, em seguida, foi feito um desbaste de 30 mm de comprimento por 28 mm de diâmetro, para que as peças pudessem ser fixadas com mais precisão, conforme Figura 3.9.

Figura 3.9: Dimensões dos corpos de prova

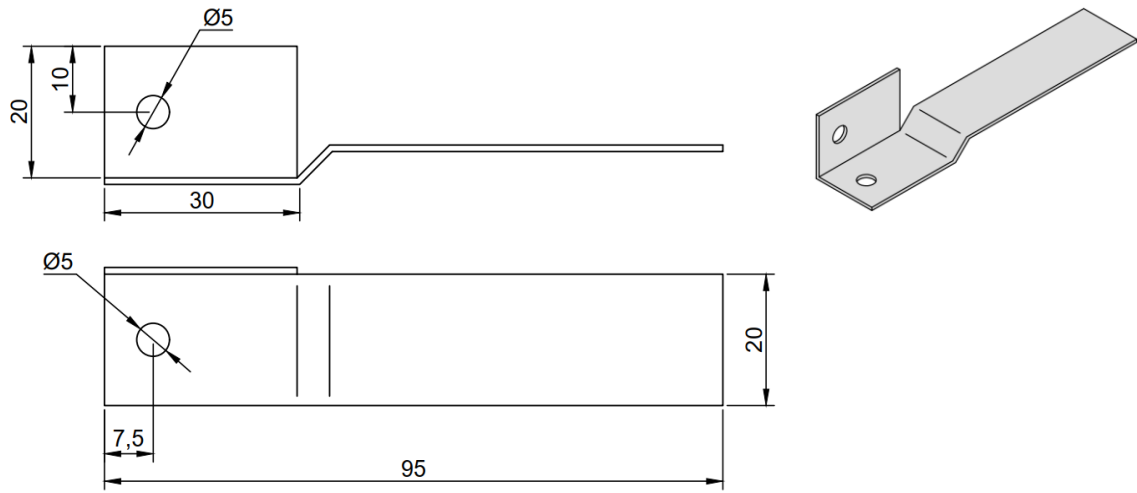


Fonte: Próprio Autor, 2019

3.6.2 Fixação dos Acelerômetros

Os acelerômetros foram fixados, utilizando uma peça de apoio, mostrada na Figura 3.10.

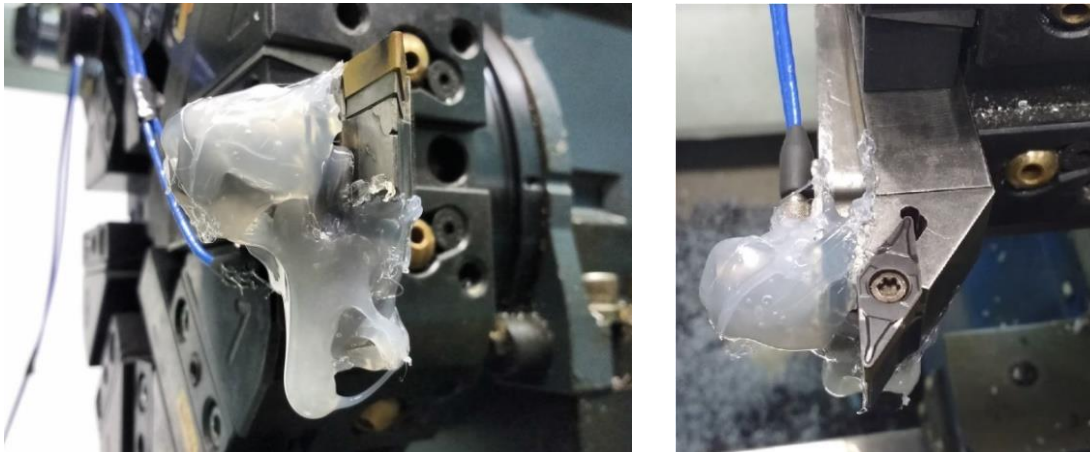
Figura 3.10: Chapa de apoio



Fonte: Próprio Autor, 2019

Além da chapa, que manteve a fixação dos acelerômetros, percebeu-se a necessidade de isolar os mesmos do contato de cavacos. Assim, para proteger os acelerômetros, foi aplicada uma densa cobertura de cola quente, conforme Figura 3.11.

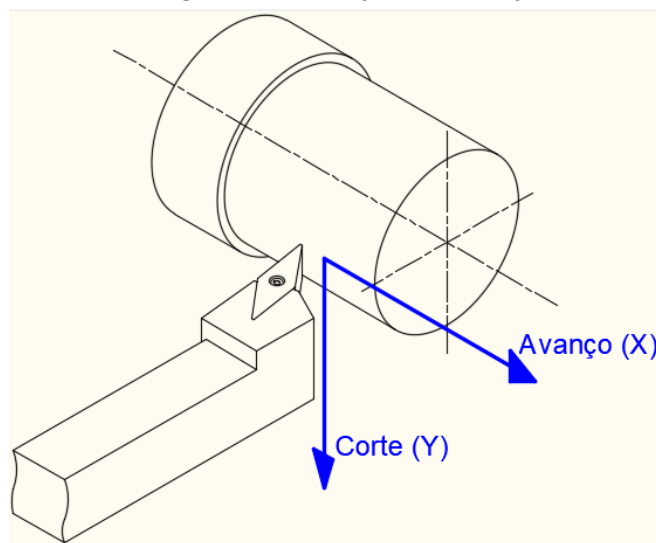
Figura 3.11: Fixação dos acelerômetros



Fonte: Próprio Autor, 2018

Dessa forma, na Figura 3.12 estão indicadas as direções de vibração medidas durante o torneamento, sendo no sentido de Avanço (direção no eixo X) e no sentido de Corte (direção no eixo Y).

Figura 3.12: Direção das medições



Fonte: Próprio Autor, 2019

3.7 Procedimento Experimental

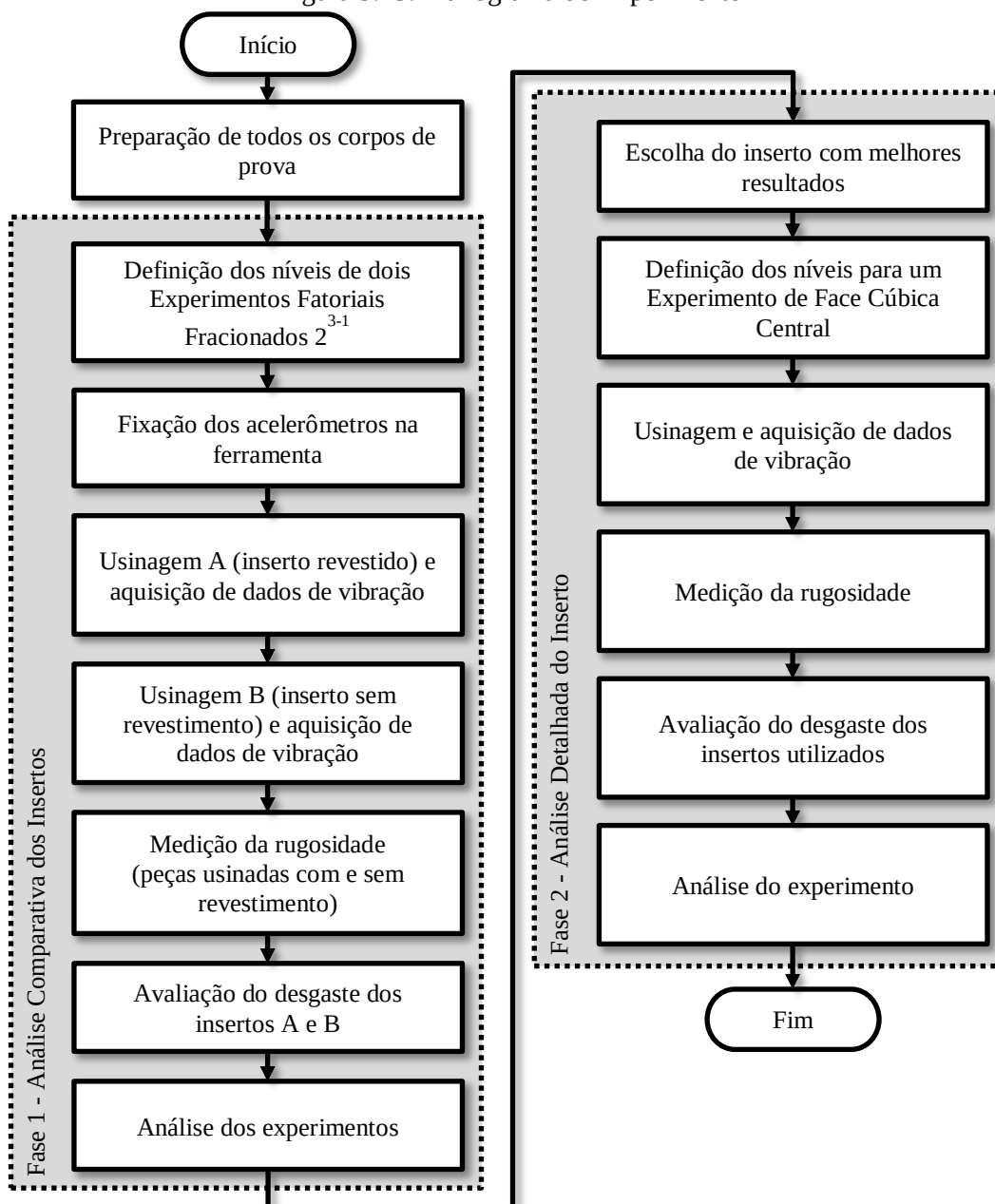
Este trabalho foi desenvolvido em duas Fases, a Figura 3.13. detalha as etapas, em um fluxograma.

Em ambas as Fases, utilizou-se a metodologia de Projeto de Experimentos, com as entradas (fatores): Velocidade de Corte (V_c), Avanço de Corte (f) e Profundidade de Corte (a_p). Foram avaliadas, então, as saídas (respostas): Rugosidade Média (R_a) e Vibração no domínio do tempo, representada pelas grandezas Valor Eficaz (RMS), Valor de Pico e Fator de Crista.

Na **Fase 1**, os experimentos foram organizados por meio de Planejamento Fatorial Fracionado, com os três fatores, resultando em 2^{3-1} combinações, portanto 4 corpos de prova; sendo, também, adicionados três Pontos Centrais, totalizando 7 corpos de prova. Dessa forma, foram torneados 7 corpos de prova com o inserto revestido, mais 7 corpos de prova com o inserto sem revestimento, utilizando os mesmos parâmetros de corte; a partir dos resultados obtidos, foi identificado o inserto com os melhores valores de rugosidade. Adicionalmente, foi medido o comportamento dinâmico do sistema, principalmente na região próxima à interface peça-ferramenta, para se buscar uma relação entre esse comportamento e a rugosidade das peças usinadas;

Na **Fase 2**, organizou-se os experimentos mediante Planejamento Composto Central, com os três fatores, resultando em 2^k pontos fatoriais, mais $2k$ pontos axiais – com k sendo o número de fatores estudados – e 6 pontos Centrais, totalizando 20 corpos de prova. Eles, então, foram torneados, na tentativa de encontrar os parâmetros mais recomendáveis para uma menor rugosidade. Da mesma forma que na Fase 1, nesta fase também foi medida a vibração da região próxima à interface peça-ferramenta, buscando alguma correlação entre o comportamento dinâmico do sistema e a rugosidade das peças usinadas.

Figura 3.13: Fluxograma do Experimento



3.7.1 Níveis e Fatores estudados na Fase 1

Na Fase 1, buscou-se identificar se o revestimento impactaria de maneira significativa na rugosidade da superfície usinada. Considerando se tratar de experimentos exploratórios (*screening*), optou-se por não utilizar réplicas; porém, foram utilizados três pontos centrais, que auxiliaram na estimativa do erro experimental. Os fatores utilizados, com seus respectivos níveis foram:

- **Avanço** (f), onde foram adotados os níveis 0,10 mm/v (-1) e 0,20 mm (+1), com um ponto central (0) de 0,15 mm;
- **Velocidade de corte** (V_c), onde foram aplicados os níveis 140 m/min (-1) e 260 m/min (+1), com um ponto central (0) de 200 m/min.
- **Profundidade de corte** (a_p) onde foram utilizados os níveis 0,8 mm (-1) e 1,6 mm (+1), com um ponto central (0) de 1,2 mm;

Os níveis utilizados nesta Fase se basearam na recomendação do fabricante, além da rotação máxima do torno, conforme apresentado no item “3.3 Máquina, Ferramentas e ”.

A Tabela 3.3 apresenta a sequência de experimentos, do tipo Fatorial Fracionado, aleatorizados através do *software* Minitab. A mesma matriz foi utilizada para os experimentos utilizando inserto revestido e sem revestimento.

Tabela 3.3: Matriz experimental para torneamento usando inserto com e sem revestimento – Experimento Fatorial Fracionado

Peças	f	V_c	a_p	f (mm/v)	V_c (m/min)	a_p (mm)
1 e 8	1	-1	-1	0,20	140	0,80
2 e 9	0	0	0	0,15	200	1,2
3 e 10	0	0	0	0,15	200	1,2
4 e 11	0	0	0	0,15	200	1,2
5 e 12	-1	-1	1	0,10	140	1,6
6 e 13	-1	1	-1	0,10	260	0,80
7 e 14	1	1	1	0,20	260	1,6

Fonte: Próprio Autor, 2018

3.7.2 Níveis e Fatores estudados na Fase 2

Após a definição de qual ferramenta traria resultados mais eficientes, avaliada pelos resultados da Fase 1, na Fase 2 buscou-se, através da Metodologia de Superfície de Resposta, os valores mais adequados de parâmetros de corte para se minimizar a rugosidade, dentro das limitações do torno e do inserto utilizados. Nesta fase, também se optou por não replicar o experimento, mas foram utilizados cinco Pontos Centrais (P.C.). Os fatores observados, com seus respectivos níveis, respeitando as limitações do inserto e do torno, foram:

- **Avanço** (f), onde foram adotados os mesmos pontos centrais e fatoriais da Fase 1, com a adição dos pontos axiais, níveis 0,068 mm/v (-1,633) e 0,231 mm/v (+1,633);
- **Velocidade de corte** (V_c), onde foram adotados os mesmos pontos centrais e fatoriais da Fase 1, com a adição dos pontos axiais, níveis 102 m/min (-1,633) e 298 m/min (+1,633).
- **Profundidade de corte** (a_p) onde foram adotados os mesmos pontos centrais e fatoriais da Fase 1, com a adição dos pontos axiais, níveis 0,546 mm (-1,633) e 1,853 mm (+1,633);

A Tabela 3.4, na próxima página, apresenta a matriz experimental do Planejamento Composto Central (PCC) que foi utilizada no desenho da superfície de resposta, para o inserto que apresentasse os melhores valores de acabamento e/ou melhor relação custo-benefício.

Tabela 3.4: Matriz experimental, PCC, para o torneamento, para o melhor inserto

Peça	Ordem	f	Vc	a_p	f (mm/v)	Vc (m/min)	a_p (mm)
15	19	0	0	0	0,15	200	1,20
16	18	0	0	+1,633	0,15	200	1,853
17	13	-1,633	0	0	0,068	200	1,20
18	15	0	-1,633	0	0,15	102	1,20
19	17	0	0	-1,633	0,15	200	0,546
20	20	0	0	0	0,15	200	1,20
21	14	+1,633	0	0	0,231	200	1,20
22	16	0	+1,633	0	0,15	297	1,20
23	5	0	0	0	0,15	200	1,20
24	3	+1	-1	+1	0,20	140	1,60
25	2	+1	+1	-1	0,20	260	0,80
26	4	-1	+1	+1	0,10	260	1,60
27	1	-1	-1	-1	0,10	140	0,80
28	6	0	0	0	0,15	200	1,20
29	7	+1	-1	-1	0,20	140	0,80
30	10	+1	+1	+1	0,20	260	1,60
31	9	-1	-1	+1	0,10	140	1,60
32	12	0	0	0	0,15	200	1,20
33	8	-1	+1	-1	0,10	260	0,80
34	11	0	0	0	0,15	200	1,20

Fonte: Próprio Autor, 2018

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Experimentos de Torneamento – Fase 1

Na primeira fase, o objetivo foi realizar um estudo preliminar comparativo, entre um processo de torneamento utilizando duas ferramentas de igual geometria, porém, com revestimento (VBGT 16 04 04-UM 1125) e sem revestimento (VBGT 16 04 04-UM H13A).

Os experimentos foram organizados como experimentos fatoriais fracionados 2^{3-1} , sem replicação. Para compensar a redução de precisão devido à falta de réplicas, foram inseridos 3 pontos centrais (*center points*). Como resultado, nas análises a seguir deve-se considerar o fato de que não é possível avaliar as interações entre os fatores. Porém, tendo em vista que, na Fase 1, o objetivo é comparar os resultados de insertos com e sem revestimento, não há impacto significativo nessa análise.

4.2 Resultados de Rugosidade, Inseto Revestido – Fase 1

A Tabela 4.1 apresenta os resultados obtidos no primeiro experimento, utilizando o inserto revestido (VBGT 16 04 04-UM 1125), para rugosidade, em micrometros (μm), ao lado, na coluna “s” está indicado o desvio-padrão das três medidas de rugosidade coletadas.

A tabela apresenta também os dados referentes à vibração, representados por um ponto RMS para cada 1.000 pontos coletados, no sentido de Corte (Direção Y). Desses dados, foram gerados os valores de RMS global, valor de Pico e Fator de Crista, somente durante a usinagem, descartando, portanto, a vibração decorrente do avanço e do recuo da ferramenta.

Tabela 4.1: Resultado experimental de Ra, para inserto revestido

Peça	f	V _c	a _p	f	V _c	a _p	Ra _{méd}	s	RMS	Pico	Fator de Crista
1	1	-1	-1	0,2	140	0,8	3,53	0,12	40,3	42,5	1,054
2	0	0	0	0,15	200	1,2	2,30	0,05	39,4	41,8	1,060
3	0	0	0	0,15	200	1,2	2,10	0,15	39,3	42,2	1,076
4	0	0	0	0,15	200	1,2	2,23	0,18	39,1	41,5	1,060
5	-1	-1	1	0,1	140	1,6	0,99	0,10	39,2	41,3	1,054
6	-1	1	-1	0,1	260	0,8	1,10	0,06	38,1	39,7	1,043
7	1	1	1	0,2	260	1,6	3,62	0,16	46,6	50,3	1,081

Fonte: Próprio Autor, 2018

Nota-se que o melhor resultado (médio) foi de 0,99 μm , no 5º experimento; já o pior resultado (médio) foi de 3,62 μm , no 7º experimento. Esses resultados são compatíveis com o referencial teórico que foi apresentado no trabalho, considerando o tipo de ferramenta utilizado, como obtido por Roy et al. (2009), com valores de Rugosidade Média de aproximadamente 0,5 μm e Demir e Gündüz (2009), com valores de aproximadamente 1,75 μm .

Com os dados coletados, passou-se à análise dos fatores e respostas, através do *software* Minitab, avaliando-se, dessa forma, as características do modelo linear gerado nesta primeira Fase. Ao longo dos diversos testes de ANOVA deste capítulo, foi considerado um nível de significância (α) de 5%.

4.2.1 ANOVA da Rugosidade, Inserto Revestido – Fase 1

Para avaliar a adequação do modelo gerado, referente à rugosidade Ra do torneamento, a Análise de Variância é apresentada na Tabela 4.2.

Tabela 4.2: ANOVA para Rugosidade Ra, Inserto Revestido

Fonte	GL	SQ Aj	MQ Aj	Valor-F	P-Valor
Modelo	4	6,42918	1,60729	147,42	0,007
Linear	3	6,41117	2,13706	196,01	0,005
Curvatura	1	0,01801	0,01801	1,65	0,327
Erro	2	0,02181	0,01090		
Total	6	6,45098			
$S=0,104417$		$R^2=99,66\%$		$R^2(adj)=98,99\%$	

Fonte: Próprio Autor, 2019

Destaca-se, que o modelo apresentou um bom ajuste, considerando o coeficiente de determinação ajustado, R^2 (adj) de 98,99%, indicando, portanto, que o modelo é bastante adequado na predição dos valores de rugosidade, reforçado pelo baixo P-Valor do Modelo (0,007), indicado como Linear, primariamente, devido à utilização de Planejamento Fatorial Fracionado. Percebe-se, porém, a baixa significância da Curvatura (P-Valor de 0,327>0,05), obtida através dos Pontos Centrais, indicando que o ponto ótimo do processo pode ainda estar distante dos níveis adotados no experimento, devido à linearidade da região observada.

Os coeficientes obtidos neste primeiro modelo são detalhados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3: Coeficientes, Inseto Revestido

Termo	Efeito	Coefic.	SE Coef.	Valor T	Valor P
Constante	-	2,3115	0,0522	44,27	0,001
f	2,5300	1,2650	0,0522	24,23	0,002
Vc	0,1010	0,0505	0,0522	0,97	0,435
a _p	-0,0080	-0,0040	0,0522	-0,08	0,946
P.C.	-	-0,1025	0,0798	-1,29	0,327

Fonte: Próprio Autor, 2019

Percebe-se que somente o Avanço de Corte (f) apresentou valor P inferior a $\alpha=0,05$, portanto, sendo o fator mais significativo no torneamento, considerando-se a rugosidade; assim, a baixa significância dos preditores Vc e a_p, levam a concluir que os mesmos podem ser descartados do modelo. Deve-se destacar, também, que, devido à estrutura fracionada do planejamento, não foi possível avaliar as interações entre os fatores.

Com relação à ausência de curvatura no modelo apresentado (Valor P do P.C. de 0,327), vale destacar que os parâmetros de corte f e a_p estão próximos dos limites estabelecidos pelo fabricante dos insertos, e o valor de Vc está próximo do limite de rotação do torno utilizado no experimento. Assim, no torneamento sem tais restrições, pode-se esperar valores ainda melhores na rugosidade da superfície usinada.

Dessa forma, foi realizada a redução do modelo, a fim de garantir um maior ajuste do mesmo, através do aumento do coeficiente de determinação ajustado, R^2 (adj). Optou-se por descartar, assim, a profundidade de corte (a_p) do modelo, devido à sua baixa significância no modelo (Valor P de 0,946, bastante acima de α); manteve-se a velocidade de corte (Vc)

devido aos indicativos da literatura de que a mesma influencia na rugosidade Ra, mesmo que seu P-Valor tenha sido superior ao nível de significância considerado.

Tabela 4.4: ANOVA para Rugosidade Ra, Inserto Revestido – Reduzido

Fonte	GL	SQ Aj	MQ Aj	Valor-F	P-Valor
Modelo	3	6,42911	2,14304	293,97	0,000
Linear	2	6,41110	3,20555	439,72	0,000
f	1	6,40090	6,40090	878,04	0,000
Vc	1	0,01020	0,01020	1,40	0,322
Curvatura	1	0,01801	0,01801	2,47	0,214
Erro	3	0,02187	0,00729		
Falta de Ajuste	1	0,00006	0,00006	0,01	0,946
Erro Puro	2	0,02181	0,01090		
Total	6	6,45098			
$S=0,0853815$		$R^2=99,66\%$		$R^2(adj)=99,32\%$	

Fonte: Próprio Autor, 2019

Com o modelo reduzido, obteve-se um valor de R^2 (adj) de 99,32%, superior, ao valor anterior de 98,99%, gerando, na prática, um modelo tão eficaz quanto o anterior, mas considerando menos preditores. Destaca-se, também, que, mesmo com a redução de um fator, o valor R^2 se manteve. O modelo reduzido é mostrado na Fórmula (4.1).

$$Ra_{(Revestido)} = -1,652 + 25,300 f + 0,000842 Vc - 0,1025 Ct Pt \quad (4.1)$$

4.3 Resultados de Rugosidade, Inserto sem Revestimento – Fase 1

A Tabela 4.5 apresenta os resultados obtidos no segundo experimento, utilizando o inserto sem revestimento (VBGT 16 04 04-UM H13A), com os dados de vibração referentes ao sentido de corte (Direção Y), da mesma forma da medição feita com o inserto revestido.

Tabela 4.5: Resultado experimental de Ra, para inserto sem revestimento

Peça	f	V _c	a _p	f	V _c	a _p	Ra _{méd}	s	RMS	Pico	Fator de Crista
8	1	-1	-1	0,2	140	0,8	3,29	0,18	39,6	41,8	1,054
9	0	0	0	0,15	200	1,2	2,02	0,04	38,0	40,2	1,058
10	0	0	0	0,15	200	1,2	2,12	0,19	39,1	41,1	1,052
11	0	0	0	0,15	200	1,2	1,89	0,10	39,0	42,1	1,078
12	-1	-1	1	0,1	140	1,6	0,87	0,07	39,4	41,7	1,057
13	-1	1	-1	0,1	260	0,8	0,97	0,08	38,2	40,8	1,067
14	1	1	1	0,2	260	1,6	3,30	0,22	46,9	51,2	1,091

Fonte: Próprio Autor, 2018

Nota-se que o melhor resultado (médio) foi de 0,87 μm , no 12º experimento; já o pior resultado (médio) foi de 3,29 μm , no 8º experimento.

Ao se comparar a Tabela 4.1 com a Tabela 4.5, percebe-se a ocorrência de resultados inesperados: os valores de rugosidade parecem melhores para o inserto sem revestimento. Posteriormente, esses resultados serão analisados com mais detalhes.

4.3.1 ANOVA da Rugosidade, Inserto sem Revestimento – Fase 1

Para avaliar a adequação do modelo gerado, a Análise de Variância é apresentada na Tabela 4.6.

Tabela 4.6: ANOVA para Rugosidade Ra, Inserto sem Revestimento

Fonte	GL	SQ Aj	MQ Aj	Valor-F	P-Valor
Modelo	4	5,66706	1,41676	108,68	0,009
Linear	3	5,65082	1,88361	144,49	0,007
Curvatura	1	0,01624	0,01624	1,25	0,380
Erro	2	0,02607	0,01304		
Total	6	5,69313			
$S=0,114177$		$R^2=99,54\%$		$R^2(adj)=98,63\%$	

Fonte: Próprio Autor, 2019

Semelhante ao modelo de torneamento utilizando inserto revestido, percebe-se que o modelo apresentou um bom ajuste, considerando o coeficiente de determinação ajustado, R^2 (adj) de 98,63%, confirmado pelo baixo P-Valor do Modelo (0,009), também linear. Assim como no modelo anterior, a ANOVA indica que o modelo para o torneamento com inserto sem revestimento apresenta baixa significância da Curvatura (P-Valor de 0,380>0,05),

indicando que o ponto ótimo do processo pode ainda estar distante dos níveis adotados no experimento.

Tabela 4.7: Coeficientes, Inserto sem Revestimento

Termo	Efeito	Coefic.	SE Coef.	Valor T	Valor P
Constante	-	2,1060	0,0571	36,89	0,001
f	2,3760	1,1880	0,0571	20,81	0,002
Vc	0,0560	0,0280	0,0571	0,49	0,672
a _p	-0,0480	-0,0240	0,0571	-0,42	0,715
P.C.	-	-0,0973	0,0872	-1,12	0,380

Fonte: Próprio Autor, 2019

Assim como no modelo de inserto revestido, somente o Avanço de Corte (f) apresentou valor P inferior a 0,05, sendo, portanto, o fator mais significativo na rugosidade da superfície usinada. Novamente, a baixa significância dos preditores Vc e a_p levam a concluir que os mesmos podem ser descartados do modelo. Além disso, o modelo também apresentou ausência de curvatura significativa (Valor P do P.C. de 0,380).

Dessa forma, foi realizada a redução do modelo, objetivando a redução de R² (adj). Também optou-se por descartar a profundidade de corte (a_p) e manter a velocidade de corte (Vc) do modelo, pelos motivos supracitados.

Tabela 4.8: ANOVA para Rugosidade Ra, Inserto sem Revestimento – Reduzido

Fonte	GL	SQ Aj	MQ Aj	Valor-F	P-Valor
Modelo	3	5,66475	1,88825	199,63	0,001
Linear	2	5,64851	2,82426	298,58	0,000
f	1	5,64538	5,64538	596,83	0,000
Vc	1	0,00314	0,00314	0,33	0,605
Curvatura	1	0,01624	0,01624	1,72	0,281
Erro	3	0,02838	0,00946		
Falta de Ajuste	1	0,00230	0,00230	0,18	0,715
Erro Puro	2	0,02607	0,01304		
Total	6	5,69313			
<i>S</i> =0,0972568		<i>R</i> ² =99,50%		<i>R</i> ² (adj)=99,00%	

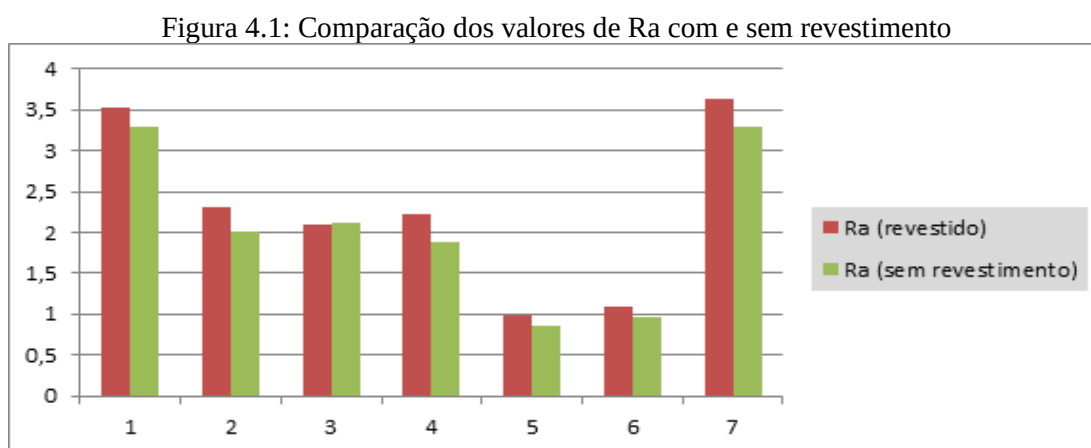
Fonte: Próprio Autor, 2019

Com o modelo reduzido, obteve-se um valor de R^2 (adj) de 99,00%, superior ao valor anterior de 98,63%. Já o valor de R^2 sofreu uma pequena redução – de 99,54% para 99,50% – devido, naturalmente, à redução do número de preditores no modelo. O modelo reduzido é mostrado na Fórmula (4.2).

$$Ra_{(\text{Sem Revestimento})} = -1,551 + 23,760 f + 0,000467 V_c - 0,0973 C_t P_t \quad (4.2)$$

4.4 Comparação dos valores de Rugosidade – Fase 1

Com a finalização da Fase 1, destacou-se o resultado dos testes comparativos. Conforme ilustra a Figura 4.1, os valores de rugosidade utilizando o inserto sem revestimento foram melhores, exceto no experimento 3, que apresentou uma ligeira vantagem do inserto revestido.

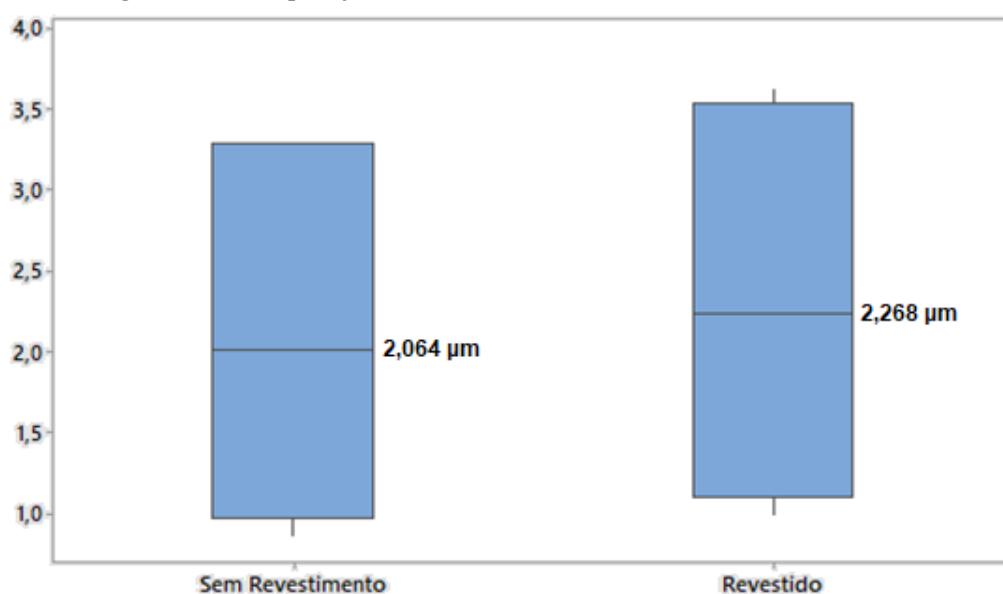


Fonte: Próprio Autor, 2019

Os resultados são resumidos na Figura 4.2, pelo gráfico *Boxplot* (Gráfico de Caixa). Percebe-se, de modo geral, que a rugosidade obtida pela ferramenta sem revestimento é ligeiramente menor que a rugosidade obtida pela ferramenta com revestimento, exceto na terceira dupla de amostras, nas peças 3 e 10, tratando-se de um Ponto Central.

Uma possível explicação para esse fenômeno seria o raio da aresta de corte que, na ferramenta revestida, poderia ser levemente superior – devido ao próprio revestimento. Outra possibilidade, poderia ser um desgaste maior na aresta de corte do inserto revestido, que poderia ser causado por reações entre o alumínio e os materiais do revestimento, como o Ti.

Figura 4.2: Comparação dos valores de Ra com e sem revestimento



Fonte: Próprio Autor, 2019

Finalmente, para uma análise mais precisa, utilizou-se o Teste T Pareado, de forma a verificar se o revestimento dos insertos afetou significativamente os valores de rugosidade obtidos, para comparar as variâncias entre os dois conjuntos de dados, conforme a Tabela 4.9.

Tabela 4.9: Teste-T Pareado para comparação das médias

	N	Média	Desv. Padr.	SE Média
Inserto Revestido	7	2,268	1,037	0,392
Inserto Sem Revestimento	7	2,064	0,974	0,368
Diferença	7	0,2031	0,1318	0,0498
<i>IC 95% para diferença das médias: (0,0812; 0,3250)</i>				
<i>Teste-T da diferença das médias = 0 (vs ≠ 0): T-Valor = 4,08; P-Valor = 0,007</i>				

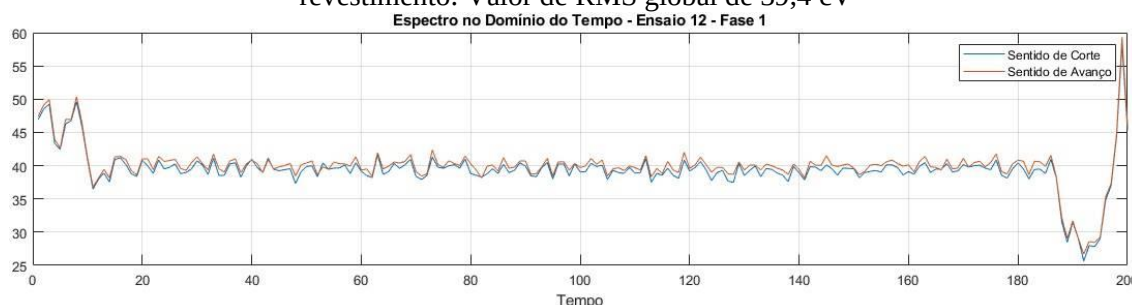
Fonte: Próprio Autor, 2019

A partir dos resultados do teste de hipótese, conclui-se que houve diferença significativa entre os dois conjuntos de dados, tendo em vista que o P-Valor foi inferior a $\alpha=0,05$. Portanto, ao se considerar, também, o critério econômico na escolha entre as ferramentas, há o indicativo de que a opção de melhor custo-benefício será o inserto sem revestimento (VBGT 16 04 04-UM H13A) para a Fase 2 dos experimentos.

4.5 Análise preliminar da Vibração – Fase 1

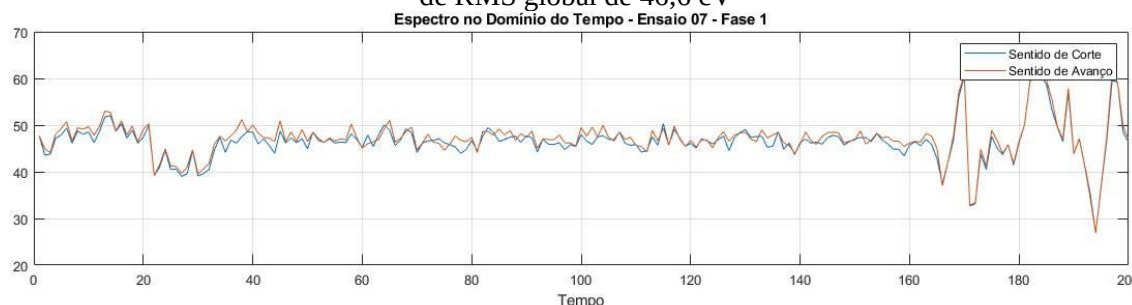
Ao longo dos processos de torneamento, foram capturados dados referentes ao comportamento dinâmico do sistema máquina-ferramenta-peça, no sentido de corte e do avanço, com uma taxa de aquisição de 10 kHz. Os dados referentes ao sentido de avanço (Direção X) foram colocados em anexo, devido à sua semelhança com os dados no sentido do corte. Analisando o comportamento no Domínio do Tempo, a Figura 4.3 e a Figura 4.4 comparam o comportamento da amostra com a melhor rugosidade (peça 12, usinada com inserto sem revestimento, com um valor de RMS global de 39,4 cV) com a amostra de pior rugosidade (peça 7, usinada com inserto revestido, com valor de RMS global de 46,6 cV). Destaque-se que, em ambos os casos, as extremidades dos gráficos apresentam grandes amplitudes; elas refletem a movimentação da torre do torno antes e depois do corte.

Figura 4.3: Espectro no domínio do Tempo – Peça 12, melhor rugosidade; inserto sem revestimento. Valor de RMS global de 39,4 cV



Fonte: Próprio Autor, 2019

Figura 4.4: Espectro no domínio do Tempo – Peça 7, pior rugosidade; inserto revestido. Valor de RMS global de 46,6 cV

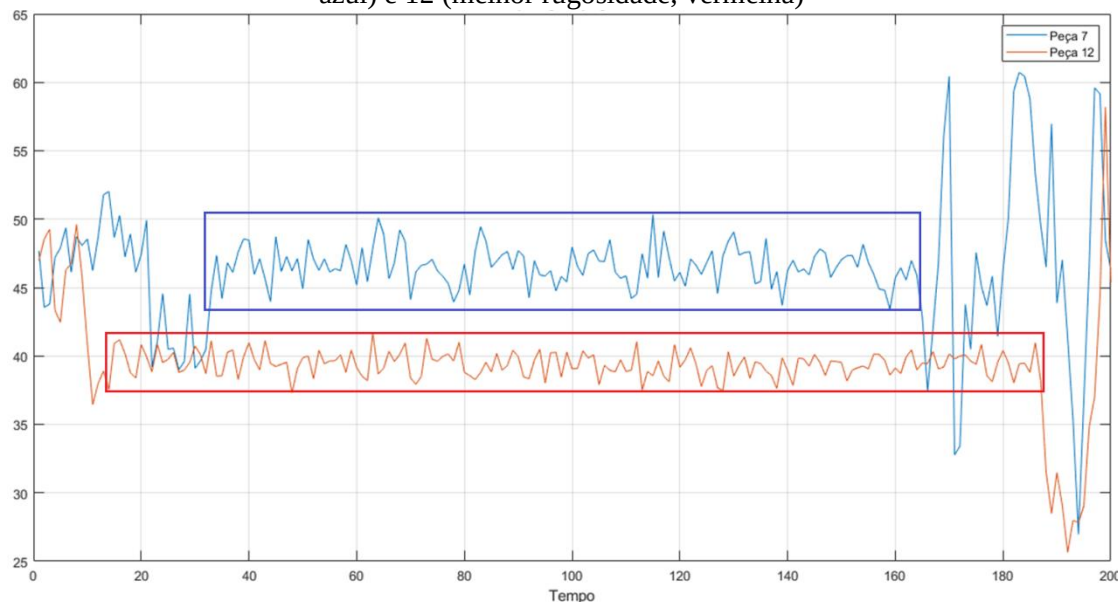


Fonte: Próprio Autor, 2019

Visualmente, os espectros no domínio do tempo indicam uma diferença significativa entre a peça 12 (melhor rugosidade) e a peça 7 (pior rugosidade), mais perceptível na sobreposição dos espectros, no sentido de corte, apresentada na Figura 4.5 (as dimensões no eixo ‘Tempo’ foram ajustadas para melhor visualizar a sobreposição), onde o espectro de cor

azul é referente à peça 7 (pior rugosidade) e o espectro de cor vermelha é referente à peça 12 (melhor rugosidade). As regiões destacadas representam o intervalo relativo à usinagem propriamente dita.

Figura 4.5: Sobreposição dos espectros no domínio do tempo das peças 7 (pior rugosidade, azul) e 12 (melhor rugosidade, vermelha)



Fonte: Próprio Autor, 2019

Percebe-se, que a peça com melhor acabamento apresentou menores amplitudes e valores médios, se comparada à peça com acabamento mais grosseiro, um resultado, a priori, esperado. Assim, há um indicativo de que houve uma relação entre a rugosidade e a vibração.

Para uma análise mais detalhada, foram calculados os coeficientes de correlação para os resultados obtidos com inserto revestido e sem revestimento, detalhados na Tabela 4.10 e na Tabela 4.11. Destaca-se, adicionalmente, que na Fase 2, essa mesma análise será feita, mas com uma amostragem maior.

Tabela 4.10: Correlação entre Rugosidade e Vibração, Inserto Revestido – Fase 1

	RMS (Corte)	Valor de Pico	Fator de Crista
Rugosidade	r = 0,718	r = 0,636	r = -0,714
	P-Valor = 0,069	P-Valor = 0,125	P-Valor = 0,057

Fonte: Próprio Autor, 2019

Da Tabela 4.10, relacionada à usinagem com inserto revestido, pode-se destacar que **(a)** há uma correlação positiva entre a rugosidade e a vibração no sentido do corte, medida em RMS, considerando o coeficiente de correlação r de Pearson (valor de 0,718), porém, o P-Valor acima de 0,05, indica uma baixa significância dessa correlação; **(b)** há, também, alguma correlação positiva entre a rugosidade e os valores de Pico da vibração, porém, estatisticamente não significativa (P-Valor de 0,125, acima de α); **(c)** finalmente, há uma correlação negativa quase significativa (P-Valor de 0,057, levemente superior a α) entre a rugosidade e o Fator de Crista.

Tabela 4.11: Correlação entre Rugosidade e Vibração, Inserto sem Revestimento – Fase 1

	RMS (Corte)	Valor de Pico	Fator de Crista
Rugosidade	$r = 0,608$	$r = 0,562$	$r = -0,391$
	P-Valor = 0,147	P-Valor = 0,190	P-Valor = 0,386

Fonte: Próprio Autor, 2019

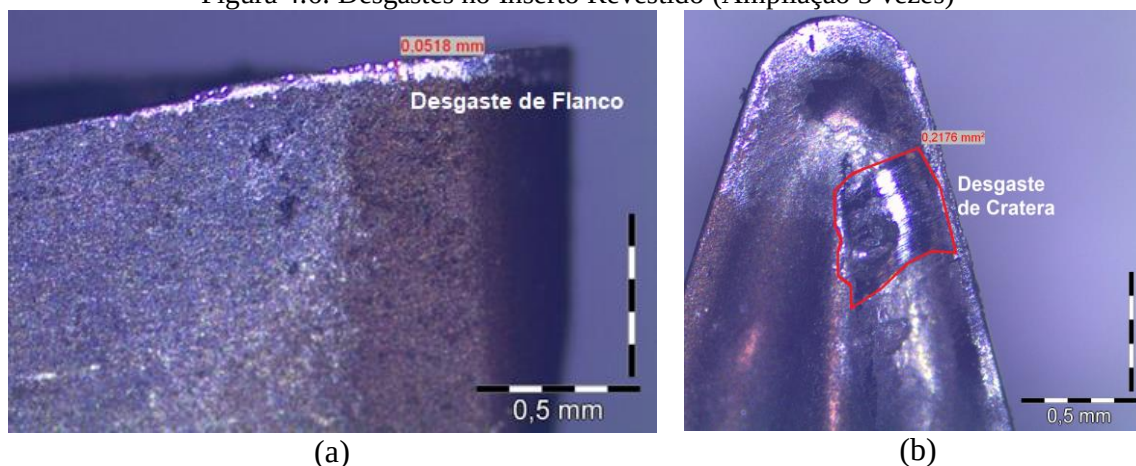
Da segunda tabela, relacionada à usinagem com inserto sem revestimento, pode-se destacar que os resultados se assemelham à Tabela 4.10, porém, há menor significância na correlação entre a rugosidade e os três valores de vibração (RMS, Pico e Fator de Crista). Tais resultados serão investigados com mais detalhes na Fase 2 do experimento.

4.6 Desgaste dos Insertos – Fase 1

Neste trabalho, buscou-se minimizar os efeitos de eventuais desgastes das ferramentas sobre os experimentos. Dessa forma, buscou-se reduzir o uso das arestas de corte, dentro das possibilidades do orçamento do experimento. Assim, na Fase 1, cada aresta de corte foi utilizada para tornear 7 peças.

Após o experimento, foi avaliado o desgaste do **inserto revestido** (VBGT 16 04 04-UM 1125), com o objetivo de verificar se o desgaste poderia ter afetado os resultados. Com mencionado anteriormente, os sete experimentos foram testados em uma única aresta de corte, cujo desgaste é mostrado na Figura 4.6.

Figura 4.6: Desgastes no Inserto Revestido (Ampliação 5 vezes)

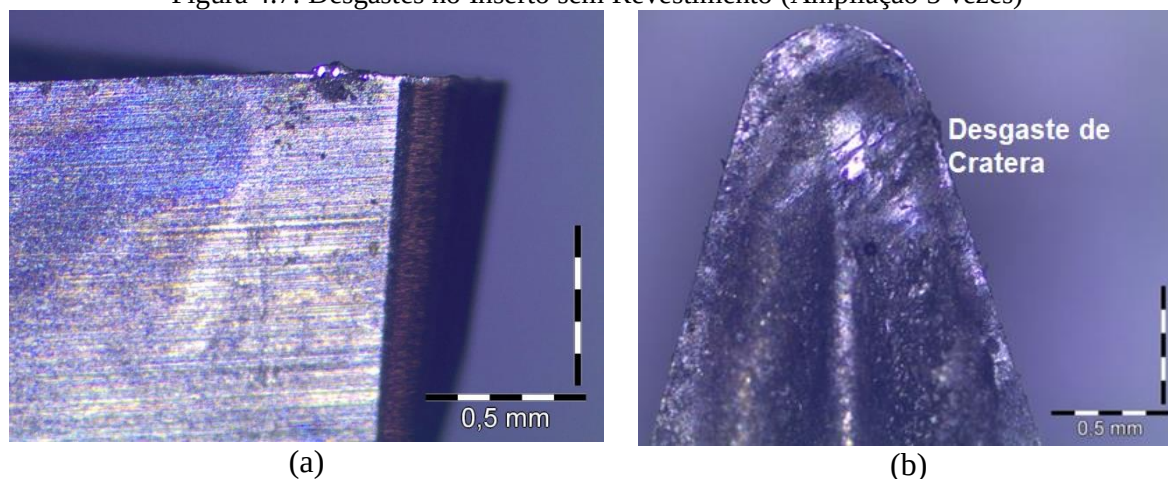


Fonte: Próprio Autor, 2018

Observa-se, na Figura 4.6a que o desgaste de flanco foi pouco significativo, de aproximadamente 0,0518 mm. Já na Figura 4.6b, pode-se observar um início de desgaste de cratera no inserto, apesar de ter dimensões pouco significativas. Dessa forma, pode-se concluir que os pequenos desgastes, impactaram de maneira mínima nos resultados.

Após o experimento, foi avaliado o desgaste do **inserto sem revestimento** (VBGT 16 04 04-UM H13A), com o objetivo de verificar se o desgaste poderia ter afetado os resultados. Os sete experimentos foram testados em uma única aresta de corte, cujo desgaste é mostrado na Figura 4.7.

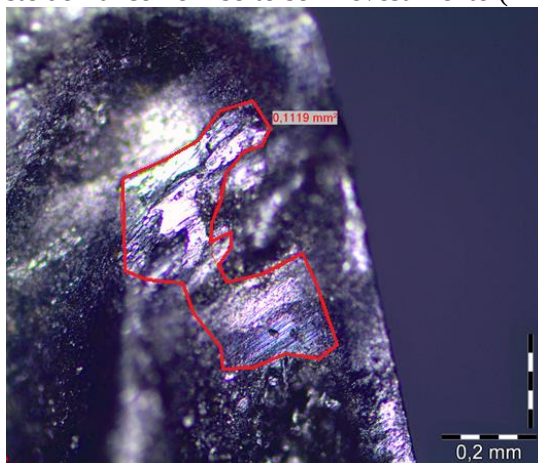
Figura 4.7: Desgastes no Inserto sem Revestimento (Ampliação 5 vezes)



Fonte: Próprio Autor, 2018

Observa-se que não houve desgaste de flanco significativo, assim como, também, a presença do desgaste de cratera se deu em dimensões menores que no inserto revestido, destacado na Figura 4.8.

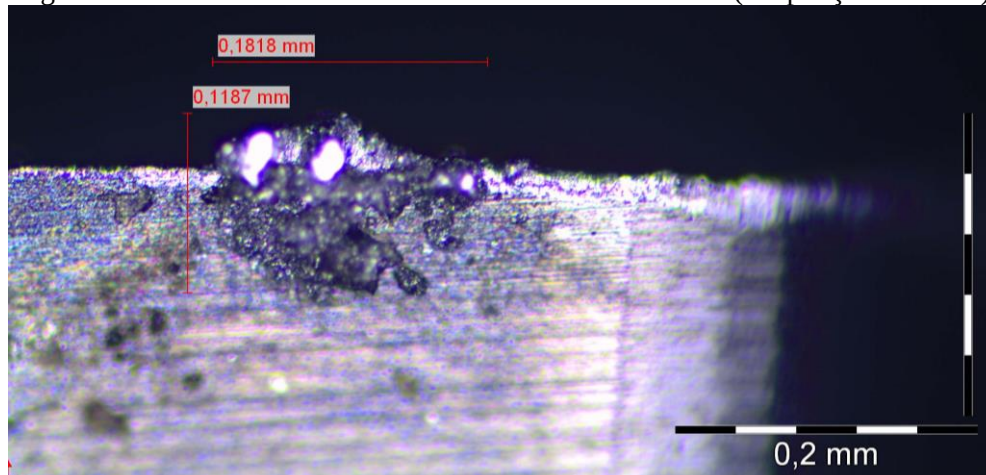
Figura 4.8: Desgaste de flanco no inserto sem revestimento (Ampliação 20 vezes)



Fonte: Próprio Autor, 2018

Destaca-se uma pequena porção de alumínio aderida à aresta de corte, conforme a Figura 4.9. Tal quantidade ainda seria pequena para afetar a rugosidade, mas poderia indicar uma afinidade química do alumínio ao material do inserto.

Figura 4.9: Adesão do alumínio no inserto sem revestimento (Ampliação 20 vezes)



Fonte: Próprio Autor, 2018

Conclui-se, portanto, que os insertos apresentaram boas condições após os experimentos, indicando que não houve desgastes significativos para os experimentos.

4.7 Experimentos de Torneamento – Fase 2

Nesta fase, a partir da escolha do inserto mais indicado, buscou-se realizar um experimento completo, juntamente com os pontos axiais, portanto, um Planejamento Composto Central, o que permitiria gerar uma regressão quadrática, permitindo a definição de

um ponto ótimo. Há de se destacar, contudo, que os experimentos anteriores não apresentaram curvatura significativa; um forte indicativo, portanto, de que ainda não foi possível atingir a região ótima da Superfície de Resposta a ser gerada. Porém, destaca-se que os pontos axiais utilizados nesta Fase 2 já atingiram os limites recomendados pelo fabricante (no caso dos insertos) ou do equipamento (RPM máximo). Portanto, nestas condições, será possível indicar as regiões ideais, dentro das limitações técnicas do experimento. Se não houvesse esse tipo de limitação, seria possível utilizar técnicas de otimização para continuar a investigar a curvatura da SR.

Na segunda fase, o objetivo foi inter-relacionar os fatores (a) **Parâmetros de Corte**, (b) **Rugosidade** e (c) **Vibração**, buscando, assim, compreender melhor os fenômenos relacionados ao acabamento no torneamento da liga 7075-T6. Foi utilizado o *software* Minitab para a análise dos resultados e construção de gráficos. Os resultados dos experimentos são mostrados na Tabela 4.12.

Tabela 4.12: Resultado experimental de Ra e RSM

Peça	f	V _c	a _p	f	V _c	a _p	Bloco	Ra _{méd}	s	RMS (Corte)	Pico (Corte)	Fator de Crista (Corte)
15	0	0	0	0,15	200	1,2	3	1,83	0,03	39,5	41,8	1,0583
16	0	0	1,633	0,15	200	1,8532	3	2,04	0,30	44,3	47,4	1,0688
17	-1,633	0	0	0,0684	200	1,2	3	0,57	0,05	37,3	38,7	1,0365
18	0	-1,633	0	0,15	102	1,2	3	1,58	0,19	37,0	39,8	1,0744
19	0	0	-1,633	0,15	200	0,5468	3	1,98	0,19	37,9	39,9	1,0530
20	0	0	0	0,15	200	1,2	3	2,45	0,79	39,3	41,9	1,0682
21	1,633	0	0	0,2317	200	1,2	3	5,03	0,45	38,7	41,9	1,0565
22	0	1,633	0	0,15	298	1,2	3	2,17	0,25	39,0	41,6	1,0669
23	0	0	0	0,15	200	1,2	1	1,37	0,46	39,1	41,4	1,0589
24	1	-1	1	0,2	140	1,6	1	2,45	1,08	39,3	42,7	1,0856
25	1	1	-1	0,2	260	0,8	1	2,92	0,33	40,9	44,2	1,0811
26	-1	1	1	0,1	260	1,6	1	0,97	0,19	38,2	40,4	1,0597
27	-1	-1	-1	0,1	140	0,8	1	1,09	0,26	36,8	38,5	1,0449
28	0	0	0	0,15	200	1,2	1	2,15	1,05	39,3	45,0	1,0669
29	1	-1	-1	0,2	140	0,8	2	3,46	0,08	38,2	41,2	1,0786
30	1	1	1	0,2	260	1,6	2	3,13	0,41	44,3	48,5	1,0926
31	-1	-1	1	0,1	140	1,6	2	1,16	0,21	38,0	39,7	1,0428
32	0	0	0	0,15	200	1,2	2	1,78	0,11	39,5	41,7	1,0550
33	-1	1	-1	0,1	260	0,8	2	1,25	0,18	37,8	40,1	1,0587
34	0	0	0	0,15	200	1,2	2	1,86	0,19	39,3	43,1	1,0947

Fonte: Próprio Autor, 2018

Destaca-se que o melhor valor de rugosidade foi obtido na peça 17 (menor valor de avanço) e o pior valor de rugosidade foi obtido na peça 21 (maior valor de avanço). Já a peça que apresentou maior nível de vibração no sentido de corte, representada pelo valor de RMS, foram as peças 16 e 30, e a com menor vibração foi a peça 27.

Além disso, nota-se que o maior valor de RMS, na peça 16, coincidiu com o maior nível de profundidade de corte (a_p), enquanto o menor valor de RMS, na peça 27, se apresentou na peça com um nível baixo de a_p – portanto, em uma análise rápida, pode-se supor que haja uma relação entre a a_p e o nível médio de vibração, representado por RMS.

4.8 Relação entre Parâmetros de Corte e Rugosidade – Fase 2

Neste item, serão estudadas as relações entre os Parâmetros de Corte e a Rugosidade das peças usinadas. A Tabela 4.13 apresenta a ANOVA para a rugosidade R_a obtida nos experimentos; dessa forma, será avaliada a adequação do modelo quadrático gerado pelo Planejamento Composto Central.

Tabela 4.13: ANOVA para Rugosidade R_a , PCC, Sem Revestimento

Fonte	GL	SQ Aj	MQ Aj	Valor-F	P-Valor
Modelo	11	18,3579	1,6689	9,94	0,002
Blocos	2	0,5124	0,2562	1,53	0,274
Linear	3	16,5322	5,5107	32,83	0,000
Quadrático	3	1,1717	0,3906	2,33	0,151
Interação	3	0,1416	0,0472	0,28	0,838
Erro Residual	8	1,3428	0,1679	-	-
Falta de Ajuste	5	0,8353	0,1671	0,99	0,540
Erro Puro	3	0,5075	0,1692	-	-
Total	19	19,7007			
$S=0,409697$		$R^2=93,18\%$		$R^2(adj)=83,81\%$	

Fonte: Próprio Autor, 2019

De forma semelhante aos modelos encontrados na Fase 1, este modelo também se apresenta Linear (P-Valor de 0,000) e sem Interações significativas. Também, não há

significância dos Blocos, indicando que fatores externos, não previstos no experimento, não foram significativos.

Destaca-se o P-Valor da característica Quadrática do modelo que se apresenta um pouco acima de α . Indicando que, após a redução do modelo, a mesma possa ser mais significativa.

Também, o modelo não apresenta falta de ajuste (P-Valor em Falta de Ajuste: $0,540 > \alpha$), apresentando um valor razoável de R^2 (adj). Apesar disso, para garantir mais adequação do modelo, serão descartadas as interações dos preditores e de outros fatores, se conveniente, de forma a obter um melhor valor de R^2 (adj).

A Tabela 4.14 apresenta os coeficientes estimados para este primeiro modelo.

Tabela 4.14: Coeficientes estimados, Ra

Termo	Efeito	Coefic.	SE Coef.	Valor T	Valor P
Constante	1,904	0,167	11,40	0,000	-
Bloco 1	-0,221	0,134	-1,65	0,137	1,47
Bloco 2	0,062	0,134	0,46	0,658	1,47
f	2,217	1,109	0,112	9,88	0,000
Vc	0,160	0,080	0,112	0,71	0,495
a _p	-0,137	-0,068	0,112	-0,61	0,559
f*f	0,570	0,285	0,113	2,53	0,035
Vc*Vc	-0,123	-0,062	0,113	-0,55	0,599
a _p *a _p	-0,021	-0,010	0,113	-0,09	0,929
f*Vc	0,045	0,023	0,145	0,16	0,880
f*a _p	-0,148	-0,074	0,145	-0,51	0,623
Vc*a _p	0,216	0,108	0,145	0,75	0,476

Fonte: Próprio Autor, 2019

Dos valores registrados, destacam-se: (a) elevada significância do avanço de corte, f, na rugosidade da superfície torneada; (b) a baixa significância da velocidade, Vc, e da profundidade de corte, a_p, apesar de a primeira ainda ser mais significativa que a última; (c) significância de f quadrático, aspecto não identificado na Fase 1, devido às limitações do Planejamento Fatorial Fracionado; (d) a baixa significância de todas as interações entre os três fatores.

Após diversas iterações, buscando a redução do modelo, foi encontrado o modelo cuja ANOVA é descrita na Tabela 4.15.

Tabela 4.15: ANOVA para Rugosidade Ra, PCC, Sem Revestimento – Modelo Reduzido

Fonte	GL	SQ Aj	MQ Aj	Valor-F	P-Valor
Modelo	3	17,5909	5,8636	44,47	0,000
Linear	2	16,4699	8,2350	62,45	0,000
f	1	16,3842	16,3842	124,25	0,000
Vc	1	0,0857	0,0857	0,65	0,432
Quadrado	1	1,1210	1,1210	8,50	0,010
f x f	1	1,1210	1,1210	8,50	0,010
Erro Residual	16	2,1098	0,1319		
Falta de Ajuste	11	1,4340	0,1304	0,96	0,557
Erro Puro	5	0,6758	0,1352		
Total	19	19,7007			
$S=0,363130$		$R^2=89,29\%$		$R^2(adj)=87,28\%$	

Fonte: Próprio Autor, 2019

O novo modelo apresenta um ajuste ligeiramente superior ao anterior; com R^2 (adj) de 87,28% do modelo reduzido contra um R^2 (adj) de 83,81% do modelo original. Destaca-se que houve uma redução de R^2 , devido à redução do número de preditores; apesar disso, o P-Valor de Falta de Ajuste do modelo reduzido é superior ao do modelo completo.

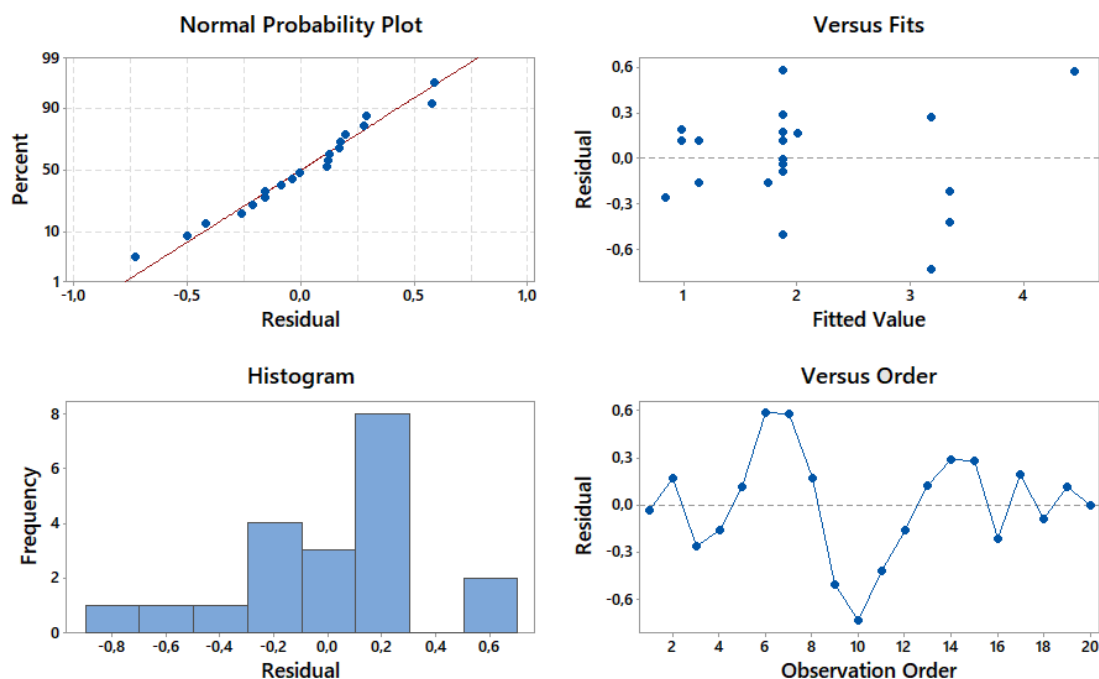
O fator Avanço de Corte, f, ainda continua sendo o mais significativo, mas, assim como nos modelos lineares da Fase 1, optou-se por manter a Velocidade de Corte, Vc, devido às indicações da literatura de que a mesma tem influência sobre o acabamento de superfícies usinadas. Finalmente, percebe-se que o modelo reduzido possui características quadráticas, diferentemente dos modelos obtidos na Fase 1.

O modelo final é apresentado na Fórmula (4.3), abaixo.

$$Ra_{(\text{Sem Revestimento})} = 1,868 + 1,1085 f + 0,0802 Vc + 0,2901 f^2 \quad (4.3)$$

Tratando-se de um modelo mais completo que os modelos da Fase 1, convém analisar em mais detalhes os resíduos do modelo, conforme ilustrado na Figura 4.10.

Figura 4.10: Análise gráfica de resíduos do modelo de Rugosidade Ra

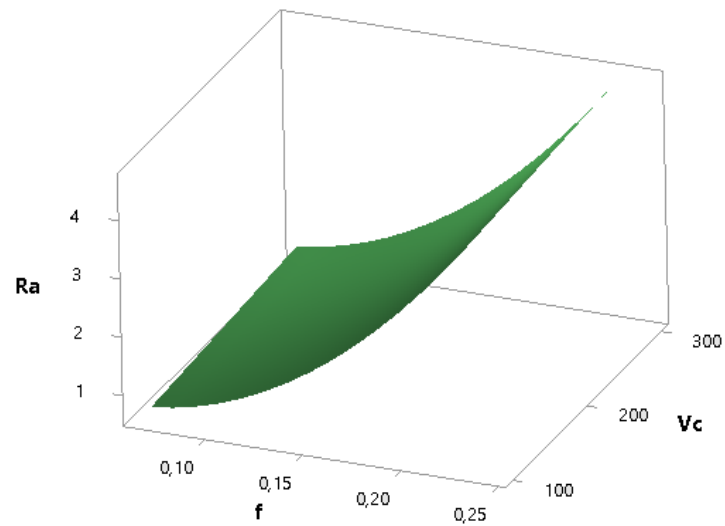


Fonte: Próprio Autor, 2019

Na análise de resíduos, conclui-se que (a) com base no Gráfico de Probabilidade Normal, pode-se pressupor que os resíduos estão normalmente distribuídos, refletindo o valor de R^2 de 89,29%; (b) o Histograma indica uma possível assimetria dos resíduos, mas uma distribuição semelhante à uma curva de Gauss; (c) com base no gráfico Versus Ajustado, percebe-se que a dispersão não é excessiva, nem apresenta padrões definidos, indicando que os resíduos não são correlacionados; (d) com base no gráfico Versus Ordem, percebe-se que os resíduos são aleatoriamente distribuídos, considerando a sequência de coleta dos dados, indicando, assim, poucos indícios de autocorrelação entre os resíduos. Assim, considerando a análise dos resíduos, pode-se concluir que o modelo apresenta boa confiabilidade.

A seguir, na Figura 4.11, é apresentada a Superfície de Resposta obtida pelo modelo reduzido. Convém destacar que, conforme já comentado na Fase 1, a superfície não se aproximou do ponto ótimo, mesmo o intervalo estando próximo aos limites de operação especificados pelo fabricante do inserto (f e a_p) e, também, do limite de rotação (V_c) do torno utilizado para os experimentos.

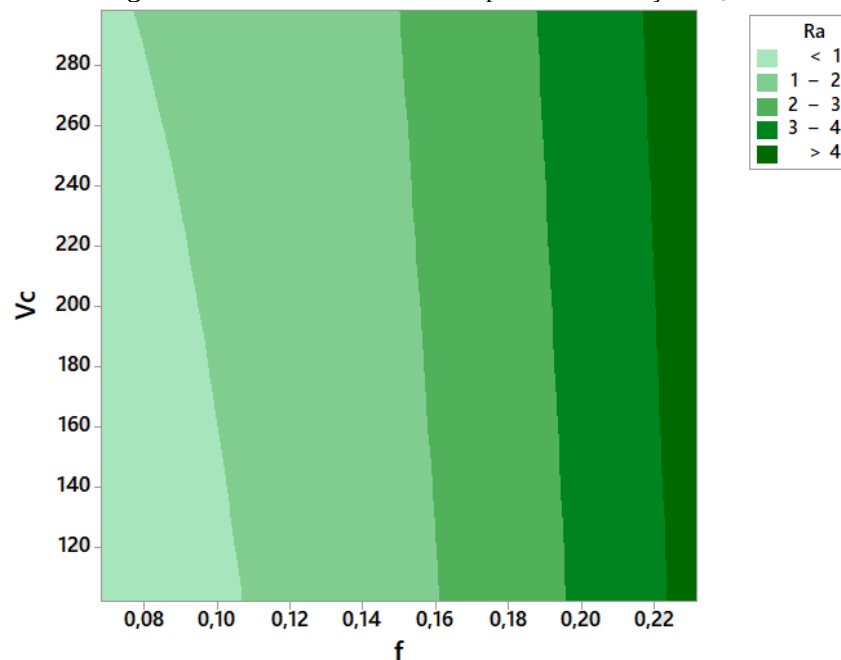
Figura 4.11: Superfície de Resposta para Ra (V_c ; f)



Fonte: Próprio Autor, 2019

Na Figura 4.12, são apresentadas as curvas de contorno, referentes aos fatores V_c e f sobre a resposta R_a .

Figura 4.12: Curva de Contorno para R_a – relação $V_c \times f$



Fonte: Próprio Autor, 2019

Percebe-se, pela análise das curvas de contorno, que menores valores de Avanço de Corte trazem um melhor resultado na rugosidade, apesar de que, se combinada com maiores Velocidade de Corte, é necessária uma redução de f , para se adquirir melhores qualidades das superfícies torneadas. É possível conjecturar que, à medida que a Velocidade de Corte

aumenta, fatores como desgaste da ferramenta e vibração se tornam mais significativas sobre a rugosidade, conforme afirmado por Johnne (1994).

4.9 Relação entre Parâmetros de Corte e Vibração – Fase 2

Destaca-se, novamente, que os valores estudados neste item se referem ao comportamento dinâmico no sentido de corte (Direção Y), os valores obtidos no sentido do avanço (Direção X) se encontram em anexo, devido à sua similaridade com os resultados obtidos no sentido de corte. Neste item, serão estudadas as relações entre os Parâmetros de Corte e a Vibração das peças usinadas.

Tabela 4.16: Análise de Variância para Vibração (RMS), sentido de corte

Fonte	GL	SQ Aj	QM Aj	Valor-F	P-Valor
Modelo	11	67,4269	6,1297	5,27	0,013
Blocos	2	1,0702	0,5351	0,46	0,647
Linear	3	46,7404	15,5801	13,40	0,002
Quadrático	3	13,0024	4,3341	3,73	0,061
Interação	3	6,6137	2,2046	1,90	0,209
Erro Residual	8	9,2986	1,1623		-
Falta de Ajuste	5	9,2386	1,8477	92,39	0,002
Erro Puro	3	0,0600	0,0200	-	-
Total	19	76,7255			
$S=0,946910$		$R^2=87,88\%$		$R^2(adj)=71,22\%$	

Fonte: Próprio Autor, 2019

O modelo obtido inicialmente do PCC para a vibração RMS se apresenta Linear (P-Valor de 0,005), sem Interações significativas e sem influência de Blocos. Porém, há de se destacar que o modelo apresenta Falta de Ajuste (P-Valor de 0,002), o que leva à hipótese de que o modelo não seja adequado. Considerando ainda um coeficiente de determinação ajustado, R^2 (adj) de 71,22% (um valor, portanto, pouco satisfatório) há a necessidade de redução do modelo, de forma a melhorar seu ajuste aos dados coletados.

A Tabela 4.17 apresenta os coeficientes estimados para este primeiro modelo.

Tabela 4.17: Coeficientes estimados, RMS, sentido de corte

Termo	Efeito	Coefic.	SE Coef.	Valor T	Valor P
Constante	-	39,328	0,440	89,45	0,000
Bloco 1	-	-0,258	0,352	-0,73	0,485
Bloco 2	-	0,325	0,352	0,93	0,382
f	2,130	1,065	0,295	3,61	0,007
Vc	1,827	0,913	0,295	3,09	0,015
a _p	2,481	1,241	0,295	4,20	0,003
f*f	-0,915	-0,457	0,297	-1,54	0,162
Vc*Vc	-0,914	-0,457	0,297	-1,54	0,163
a _p *a _p	1,417	0,709	0,297	2,39	0,044
f*Vc	1,625	0,812	0,381	2,13	0,066
f*a _p	0,725	0,362	0,381	0,95	0,369
Vc*a _p	0,375	0,188	0,381	0,49	0,636

Fonte: Próprio Autor, 2019

Percebe-se que os três parâmetros de torneamento influenciaram nos resultados, com destaque para a velocidade e a profundidade de corte quadráticos. Assim como nos modelos anteriores, nenhuma interação foi significativa.

Após diversas iterações, buscando a redução do modelo, foi encontrado o modelo cuja ANOVA é descrita na Tabela 4.18.

Tabela 4.18: ANOVA para Vibração RMS, PCC, Sem Revestimento – Modelo

Reduzido

Fonte	GL	SQ Aj	MQ Aj	Valor-F	P-Valor
Modelo	4	54,6014	13,6504	9,25	0,001
Linear	3	46,7049	15,5683	10,56	0,001
f	1	15,0959	15,0959	10,23	0,006
Vc	1	11,0998	11,0998	7,53	0,015
ap	1	20,5091	20,5091	13,91	0,002
Quadrado	1	7,8607	7,8607	5,33	0,036
ap x ap	1	7,8607	7,8607	5,33	0,036
Erro Residual	15	22,1241	1,4749	-	-
Falta de Ajuste	10	22,0107	2,2011	97,11	0,000
Erro Puro	5	0,1133	0,0227	-	-
Total	19	76,7255			
$S=1,21447$		$R^2=71,16 \%$		$R^2(adj)=63,48\%$	

Fonte: Próprio Autor, 2019

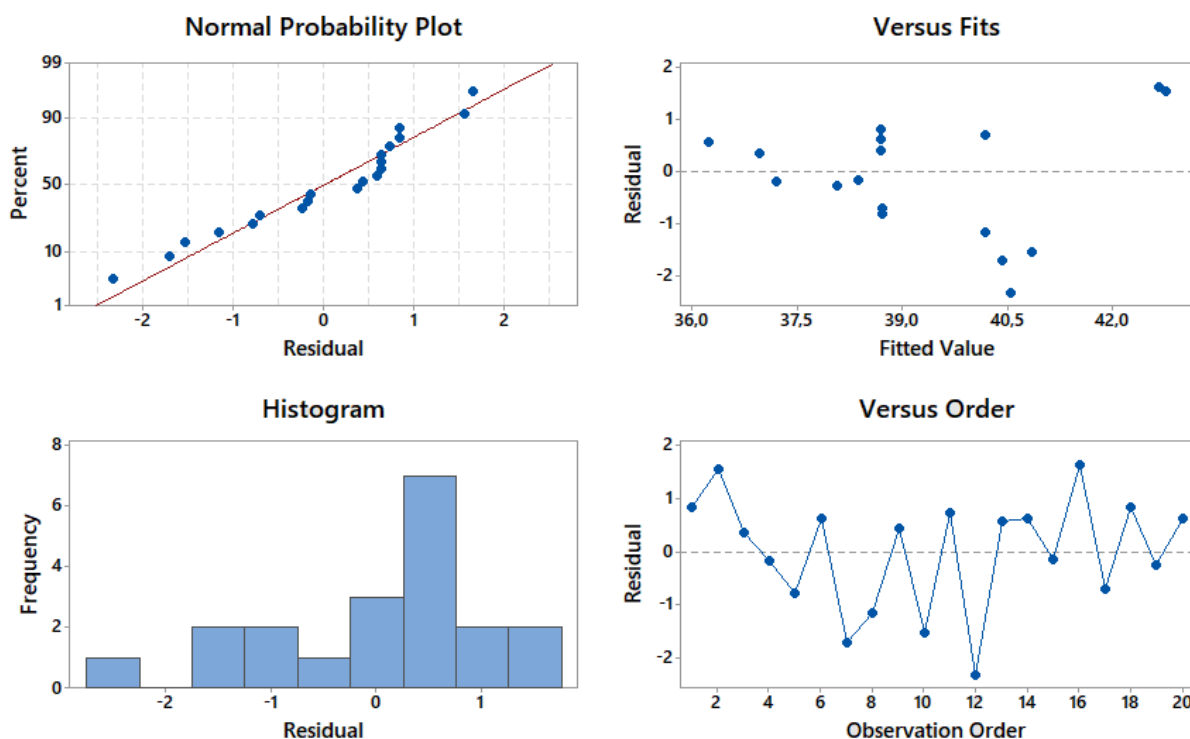
Percebe-se que o modelo ainda apresenta Falta de Ajuste significativa e um coeficiente de determinação levemente inferior – R^2 (adj) de 63,48% do modelo reduzido, contra 71,22% do modelo inicial. Tais resultados levam à conclusão de que há outras variáveis que afetam significativamente a vibração do sistema e que não foram previstas e, por isso, não foram medidas no experimento, dentre as quais, poderiam ser citadas: (a) aquecimento e consequente dilatação de componentes do torno, (b) desgaste das arestas de corte (mais detalhes no item 4.10.1), (c) diferenças na fixação das arestas de corte, (d) presença de partículas duras na liga e (e) variações na fixação dos corpos de prova.

O modelo final é apresentado na Fórmula (4.4), abaixo.

$$RMS_{(Corte)} = 38,672 + 1,064 f + 0,913 Vc + 1,241 ap + 0,769 ap^2 \quad (4.4)$$

Tratando-se de um modelo mais completo que os modelos da Fase 1, convém analisar em mais detalhes os resíduos do modelo, conforme ilustrado na Figura 4.13.

Figura 4.13: Análise gráfica de resíduos do modelo de vibração RMS

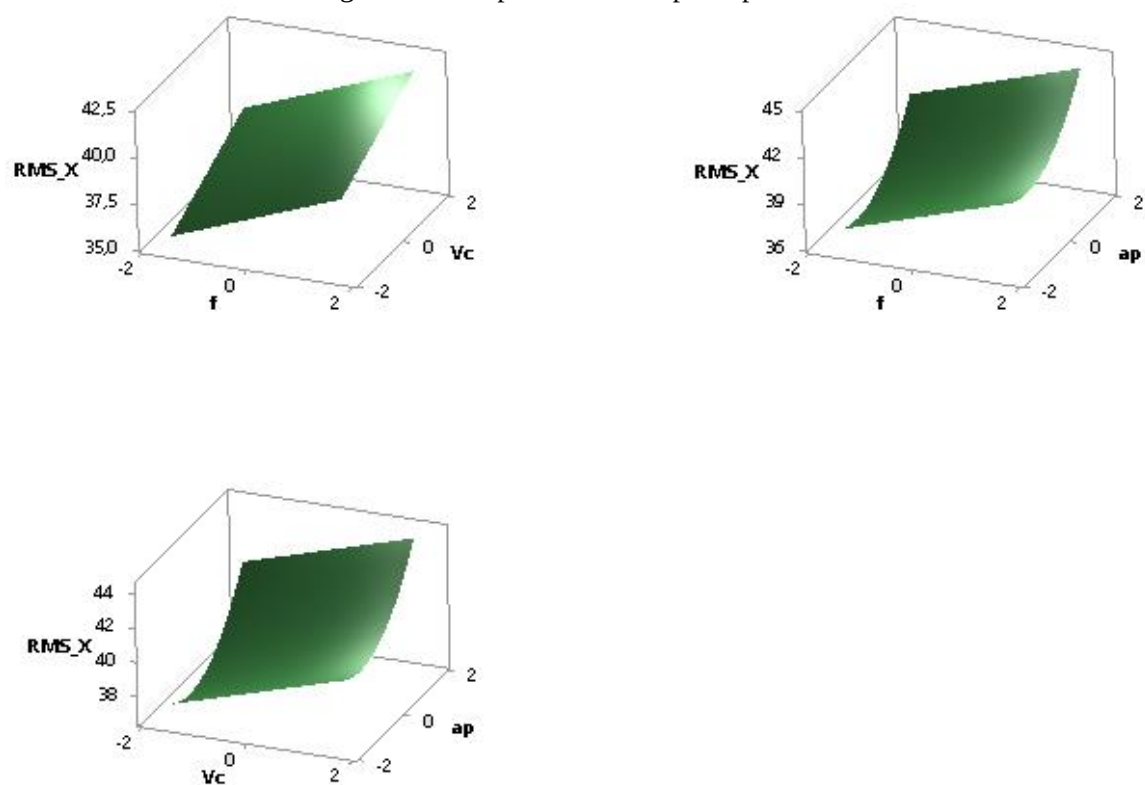


Fonte: Próprio Autor, 2019

Na análise de resíduos, conclui-se que (a) com base no Gráfico de Probabilidade Normal, pode-se pressupor que os resíduos estão normalmente distribuídos; (b) o Histograma indica uma distribuição relativamente Normal e assimétrica; (c) o gráfico Versus Ajustado, indica uma dispersão significativa e maior concentração de pontos acima do zero, ou seja, uma distribuição assimétrica no sentido do eixo das ordenadas, o que poderia indicar a ausência de um ou mais preditores; (d) com base no gráfico Versus Ordem, percebe-se que os resíduos são aleatoriamente distribuídos, portanto, não há indícios de autocorrelação entre os resíduos.

A seguir, na Figura 4.14, são apresentadas as Superfícies de Resposta obtidas pelo modelo reduzido, lembrando que o mesmo não apresentou um ajuste adequado.

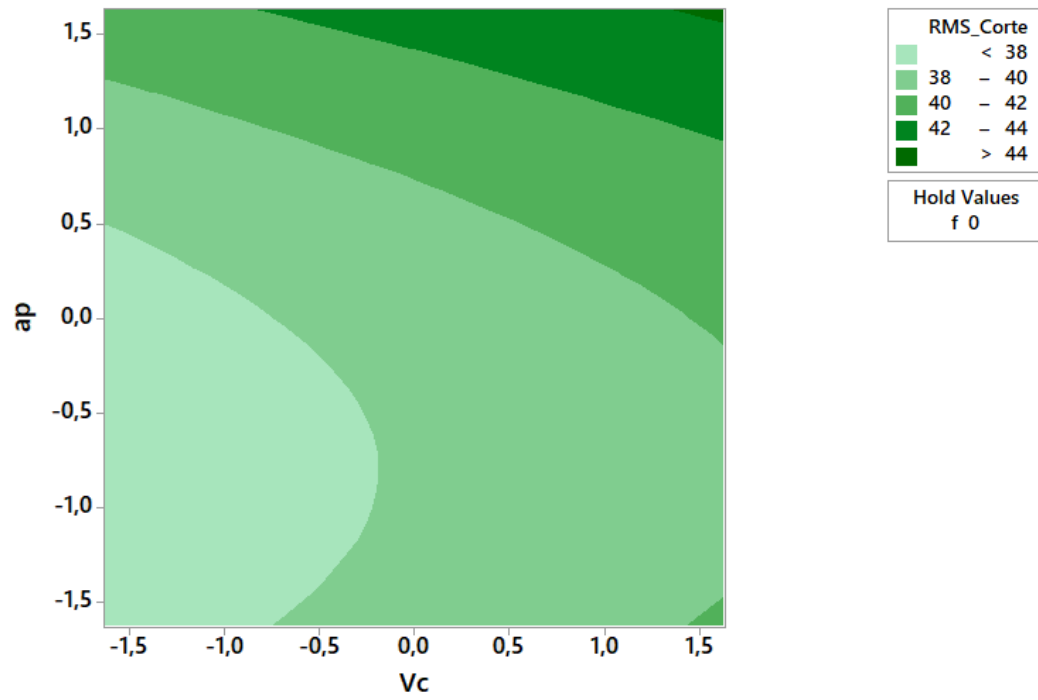
Figura 4.14: Superfície de Resposta para RMS



Fonte: Próprio Autor, 2019

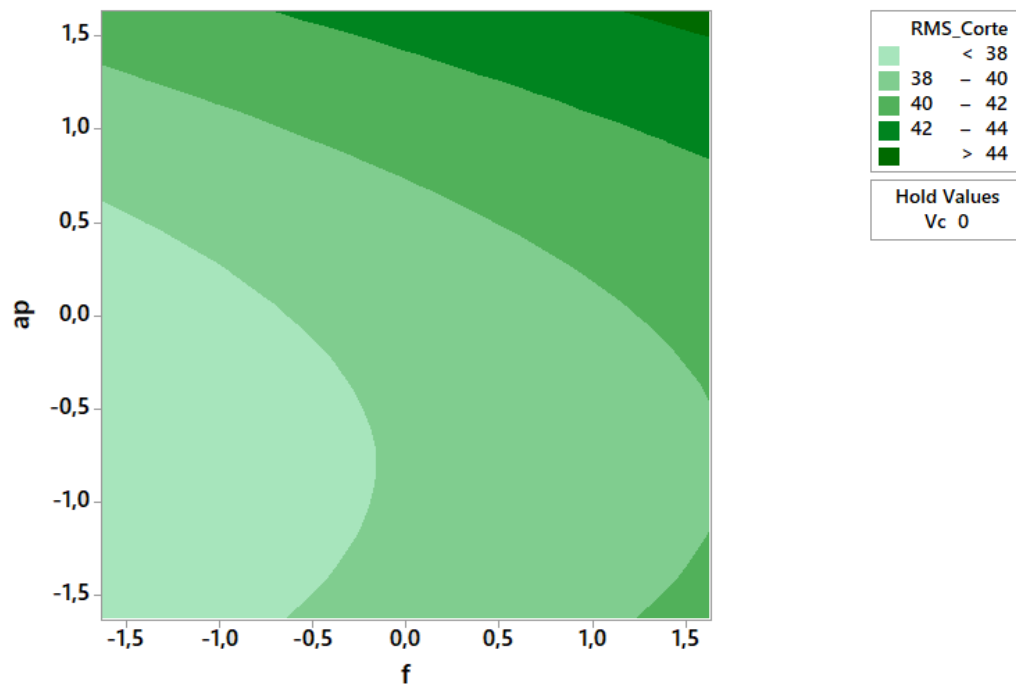
A seguir, na Figura 4.15, na Figura 4.16 e na Figura 4.17, são apresentadas as curvas de contorno, indicando os efeitos dos três parâmetros de corte estudados sobre a rugosidade.

Figura 4.15: Curva de Contorno para RMS – relação V_c x ap

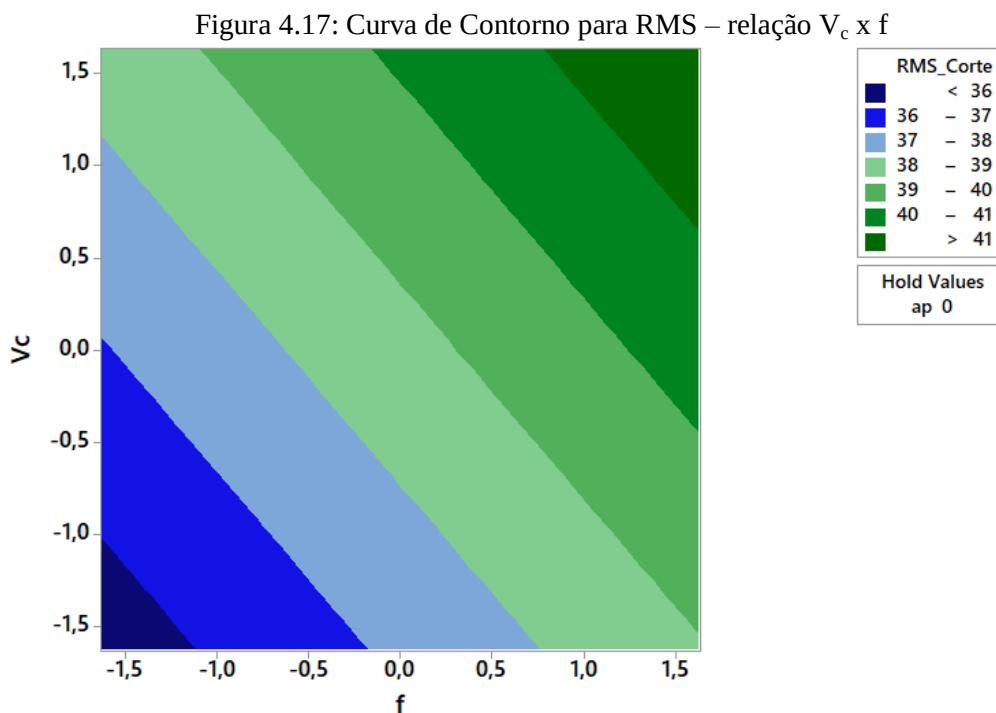


Fonte: Próprio Autor, 2019

Figura 4.16: Curva de Contorno para RMS – relação ap x f



Fonte: Próprio Autor, 2019



Fonte: Próprio Autor, 2019

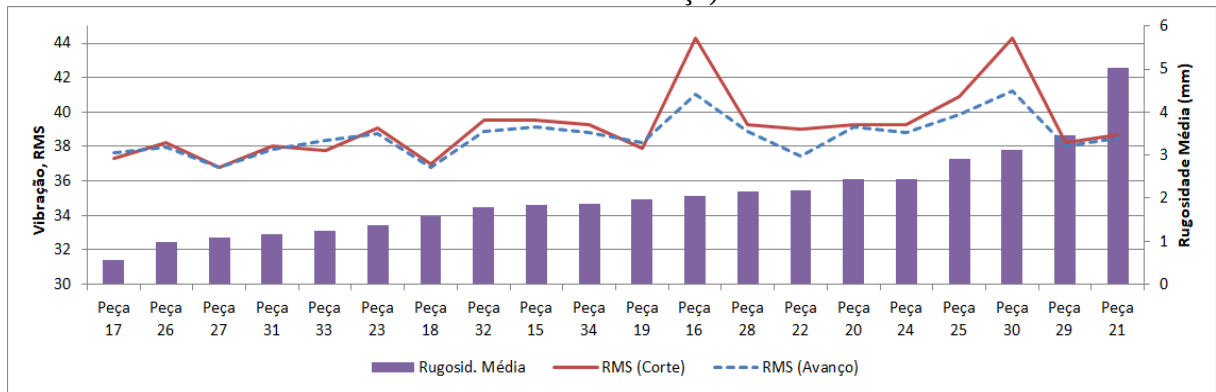
Percebe-se que, com o modelo obtido, há a indicação de que os parâmetros de corte utilizados também resultaram em regiões distantes do ponto ótimo. Porém, vale destacar que a vibração é um entre diversos parâmetros que podem influenciar na rugosidade da superfície usinada. Assim, convém investigar a relação dessas duas saídas, para maior compreensão dos fenômenos relacionados ao torneamento da liga 7075-T6.

4.10 Relação entre Vibração e Rugosidade – Fase 2

Neste item, serão estudadas as relações entre os valores de Vibração, no sentido de corte e de avanço, com a Rugosidade das peças usinadas.

A princípio, os dados são apresentados na Figura 4.18, onde os valores referentes à rugosidade foram posicionados em ordem crescente (portanto, da superfície mais polida até a mais rugosa).

Figura 4.18: Relação entre Rugosidade média (Ra) e os valores de RMS para Vibrações (sentido de corte e de avanço)

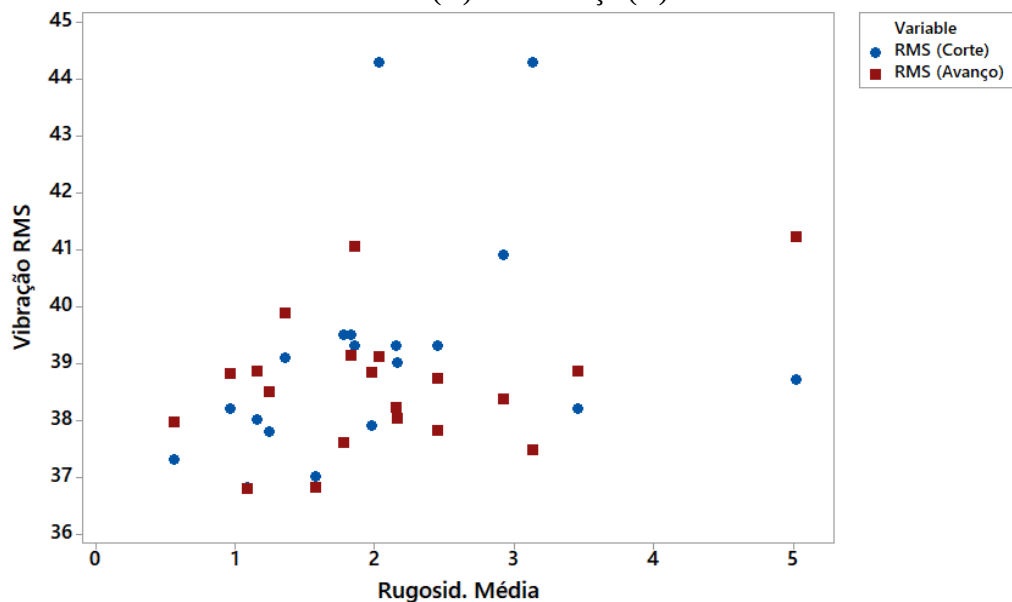


Fonte: Próprio Autor, 2019

A priori, não parece haver uma relação óbvia entre a rugosidade e a intensidade da vibração, seja no sentido de corte ou de avanço. Destacam-se dois conjuntos relevantes de informação: **(a)** as peças 29 e 21, apresentaram os piores níveis de rugosidade, mas não apresentaram níveis especialmente altos de vibração RMS; **(b)** as peças 16 e 30 apresentaram os maiores níveis de vibração RMS, respectivamente, enquanto apresentaram valores intermediários de rugosidade.

Outra forma possível de se visualizar eventuais correlações entre valores está mostrada na Figura 4.19, que apresenta um gráfico de dispersão relacionando as variáveis Rugosidade, Vibração RMS no sentido de Corte (Direção Y) e Vibração RMS no sentido do Avanço (Direção X).

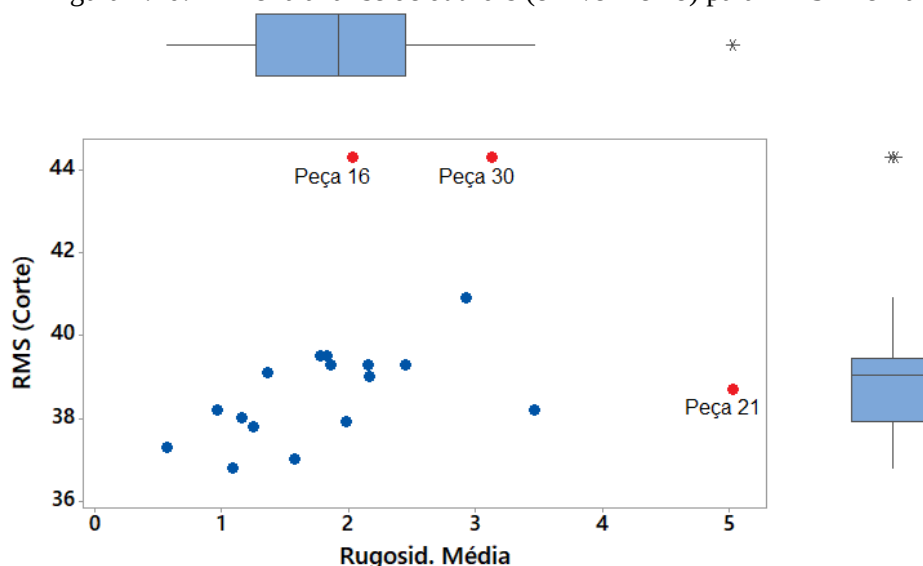
Figura 4.19: Gráfico de Dispersão para Rugosidade média Ra e Vibração RMS, sentido do corte (Y) e do avanço (X)



Fonte: Próprio Autor, 2019

Analisando o gráfico, há um aparente comportamento de crescimento, inclusive, com aumento da dispersão no sentido do aumento da rugosidade. Assim, é plausível cogitar que haja uma relação entre aumento de rugosidade e aumento de vibração; porém, precebe-se a presença de possíveis *ouliers* que poderiam influenciar um modelo de regressão. Dessa forma, foi feita uma análise dos pontos, mostrada nos gráficos de dispersão com *boxplots* marginais na Figura 4.20 e na Figura 4.21.

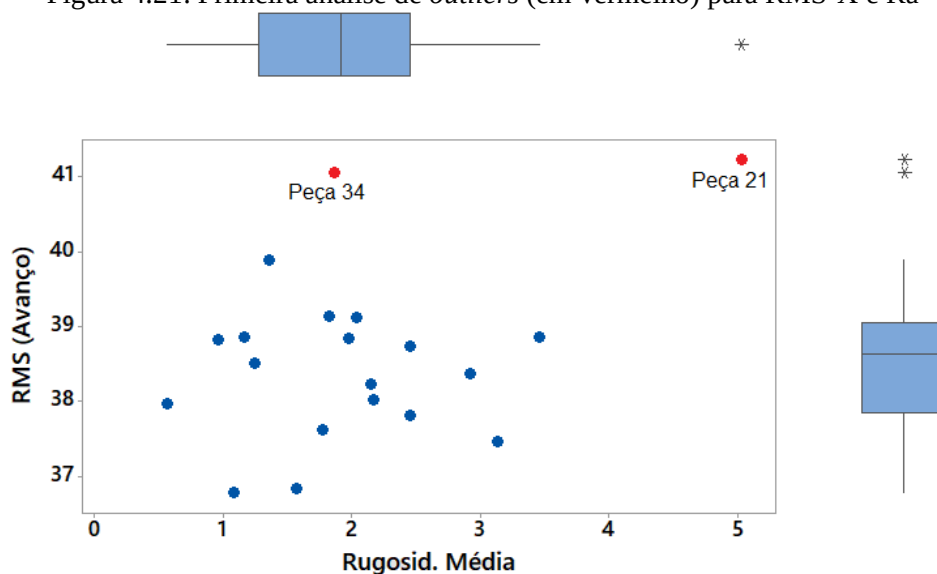
Figura 4.20: Primeira análise de *outliers* (em vermelho) para RMS-Y e Ra



Fonte: Próprio Autor, 2019

Da análise do gráfico, percebeu-se que os pontos representantes das peças 16 e 30 estão acima dos limites superiores indicados pelo *boxplot* (no caso do Minitab, de 1,5 do terceiro quartil), considerando a vibração no sentido de corte. Já a peça 21 está acima dos limites superiores para a rugosidade. Todos os três pontos estão marcados em vermelho e se apresentam como *outliers*, portanto, serão desconsiderados nas análises de regressão a seguir.

Figura 4.21: Primeira análise de *outliers* (em vermelho) para RMS-X e Ra



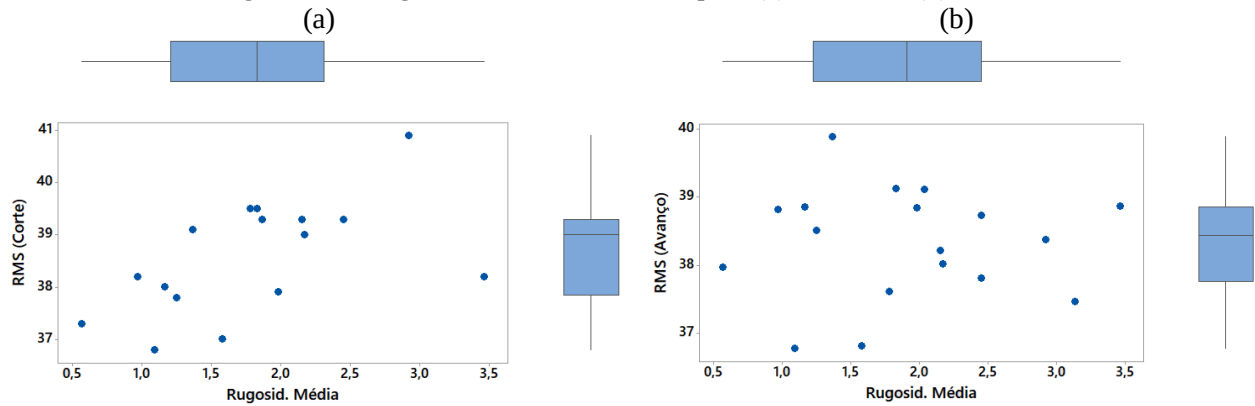
Fonte: Próprio Autor, 2019

Da análise dos gráficos, percebeu-se que os pontos representantes das peças 21 e 34 estão acima dos limites superiores indicados pelo *boxplot*, considerando a vibração no sentido do avanço. Já a peça 21 está acima dos limites superiores para a rugosidade. Os dois pontos estão marcados em vermelho e se apresentam como *outliers*, também sendo descartados das análises de regressão seguintes.

Destaca-se que, no experimento, a peça 16 representou ponto axial, com o maior valor de profundidade de corte no experimento. A peça 30 representou ponto fatorial com níveis altos de avanço, profundidade e velocidade de corte. Finalmente, a peça 21 representou ponto axial, com maior valor de avanço de corte, enquanto a peça 34 trata-se de ponto central.

Os *outliers* foram, então, retirados da análise e uma nova análise dos valores de vibração foi realizada, conforme Figura 4.22.

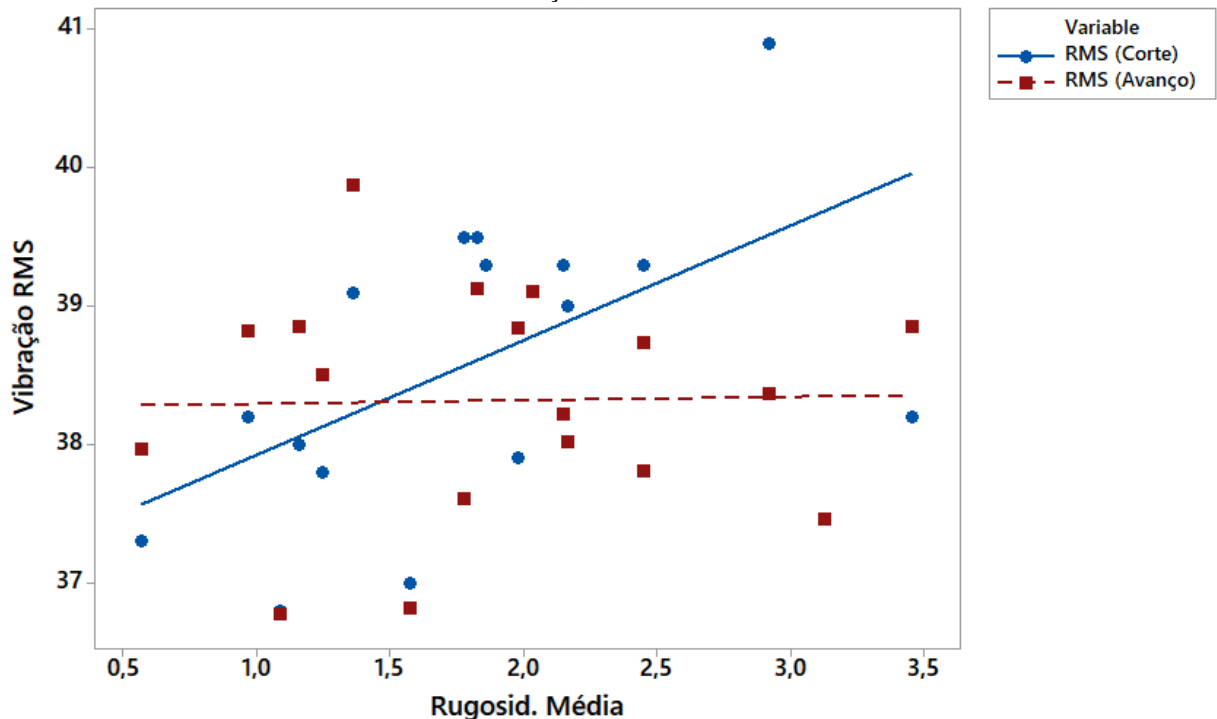
Figura 4.22: Segunda análise de *outliers* para (a) RMS-Y e (b) RMS-X



Fonte: Próprio Autor, 2019

Ao se analisar o gráfico, percebe-se que não há mais valores que podem ser considerados *outliers*. Com os três pontos anteriores excluídos, obtém-se o gráfico de dispersão indicado na Figura 4.23.

Figura 4.23: Gráfico de Dispersão para Rugosidade média Ra e Vibração RMS, sentido do corte e do avanço, sem *outliers*



Fonte: Próprio Autor, 2019

Apesar de ser perceptível uma tendência de aumento dos valores de vibração, em conjunto com a rugosidade, há uma dispersão considerável dos resultados. Para se analisar com mais precisão, portanto, foi feita uma análise de correlação, através do coeficiente de Pearson, indicado na Tabela 4.19.

Tabela 4.19: Análise de Correlação entre Rugosidade e Vibração

	Ra	RMS (Corte)
RMS (Corte)	r = 0,572	-
	P-Valor = 0,016	-
RMS (Avanço)	r = 0,022	r = 0,380
	P-Valor = 0,930	P-Valor = 0,147

Fonte: Próprio Autor, 2019

Com a análise, pôde-se concluir três pontos: **(a)** há uma correlação positiva entre a rugosidade e a vibração no sentido do corte, considerando o coeficiente de correlação **r** de Pearson (valor de 0,572), em conjunto com o P-Valor obtido (abaixo de 0,05) que indica relação significativa entre vibração no sentido do corte e a rugosidade; sendo plausível afirmar a vibração, no sentido de corte, influencia na rugosidade; **(b)** apesar de haver correlação positiva entre a rugosidade e a vibração no sentido do avanço, ela é menos significativa (destaque-se o P-Valor bastante superior a α), se comparada à vibração no sentido de corte; **(c)** finalmente, há uma pequena correlação positiva entre a vibração no sentido de corte e de avanço, porém, estatisticamente, não é significativa.

Como última análise, convém avaliar o modelo de regressão que pode ser gerado para a resposta Ra, com o preditor RMS-Y (vibração no sentido do corte); modelo expresso pela Função 4.5.

$$Ra = -13,39 + 0,3941 \text{ RMS-Y} \quad (4.5)$$

Para o modelo linear apresentado, foi montada a Análise de Variância detalhada na Tabela 4.20, abaixo.

Tabela 4.20: ANOVA para Rugosidade, preditor RMS-Y (sentido de corte)

Fonte	GL	SQ Aj	MQ Aj	Valor-F	P-Valor
Regressão	1	2,88480	2,88480	7,29	0,016
Erro	15	5,93569	0,39571	-	-
Total	16	8,82049	-	-	-
<i>S</i> =0,629057		<i>R</i> ² =32,79 %		<i>R</i> ² (adj)=28,2%	

Fonte: Próprio Autor, 2019

Analisando a ANOVA, percebe-se que a vibração no sentido de corte é significativa no modelo linear apresentado, porém, deve-se destacar o baixo valor $R^2(\text{adj})$ de 28,2%. Dessa forma, pode-se concluir que, há uma correlação entre a rugosidade usinada e a vibração no sentido de corte, porém, o modelo obtido não foi suficientemente explicativo para esse fenômeno. No Apêndice, item 7.2, são apresentados outros modelos, especificamente, um modelo quadrático e um modelo cúbico; os mesmos apresentaram maiores valores de R^2 , porém, também resultaram em menores valores de R^2 ajustado; isso deve ao fato de que o cálculo de R^2 ajustado reduz o valor de R^2 ao se adicionar mais variáveis, evitando, assim, modelos excessivamente complexos que não são necessariamente mais eficientes.

Para uma última análise, foi realizada uma análise de correlação da rugosidade com os aspectos Pico e Fator de Crista, no sentido de corte; os dados são mostrados na

Tabela 4.21: Análise de Correlação entre Rugosidade, Pico e Fator de Crista

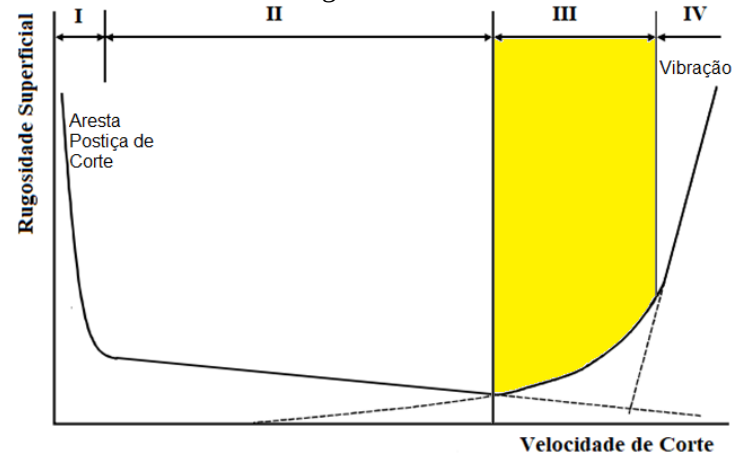
	Fator de Crista	Pico
Rugosidade	r = 0,452	r = 0,452
	P-Valor = 0,046	P-Valor = 0,046

Fonte: Próprio Autor, 2019

Pela análise da tabela de regressão, conclui-se que, assim como a grandeza RMS, embora em menor significância estatística, há correlação entre a rugosidade e os parâmetros Fator de Crista e Pico.

Finalmente, pode-se relacionar esse fenômeno com o modelo proposto por Johnne (1994), na Figura 4.24, onde a vibração teria impacto mais direto na rugosidade superficial usinada ao se atingir maiores valores de Velocidade de Corte (Regiões III e IV), levando a crer que o experimento realizado se manteve na Região III, em destaque, com alguns pontos do experimento possivelmente estando na Região II.

Figura 4.24: Modelo teórico da rugosidade com base na Velocidade de Corte



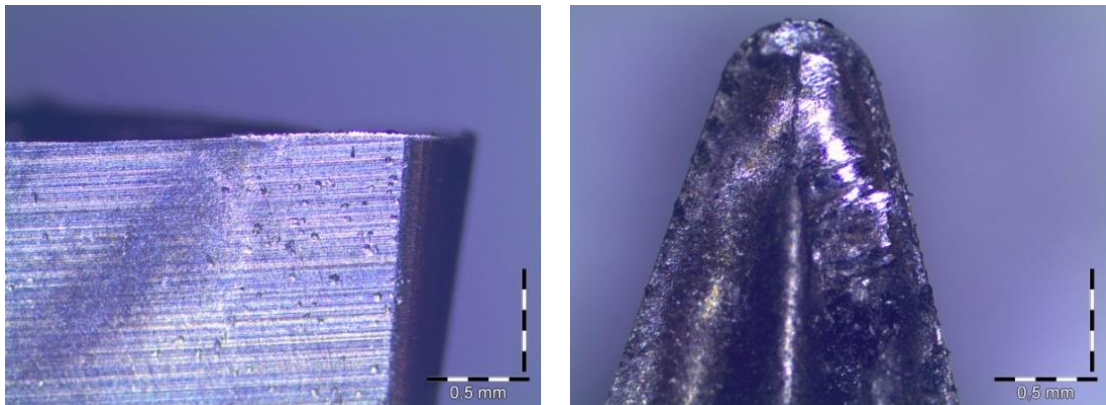
Fonte: adaptado de Johne (1994)

4.10.1 Desgaste do Inserto sem Revestimento – Fase 2

A seguir, são apresentados os desgastes dos insertos utilizados nos experimentos.

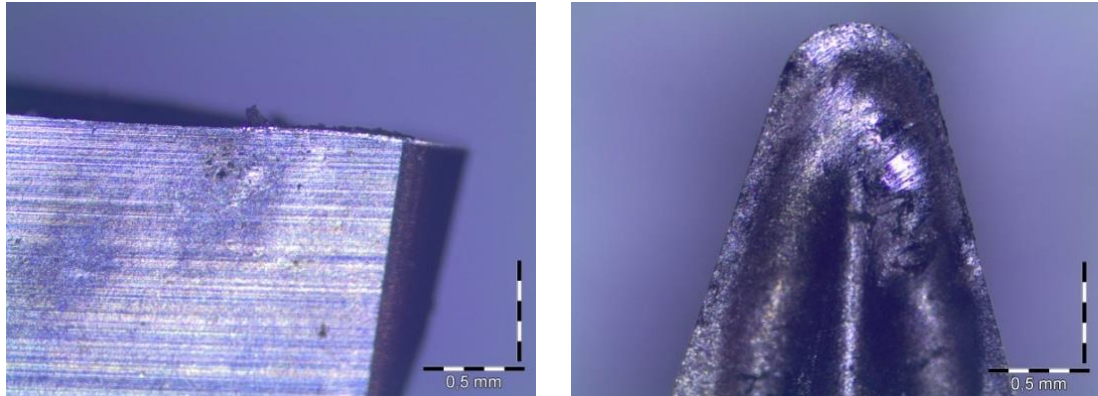
Figura 4.25: Aresta de Corte nº1, utilizada nos Corpos de Prova 15 a 18

(a) Detalhe Lateral (b) Detalhe Superior



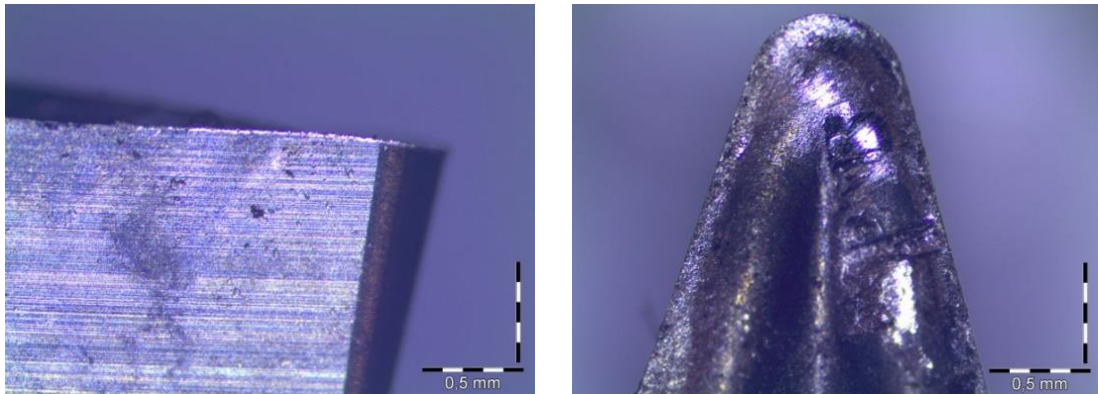
Fonte: Próprio Autor, 2018

Figura 4.26: Aresta de Corte nº2, utilizada nos Corpos de Prova 19 a 22
(a) Detalhe Lateral (b) Detalhe Superior



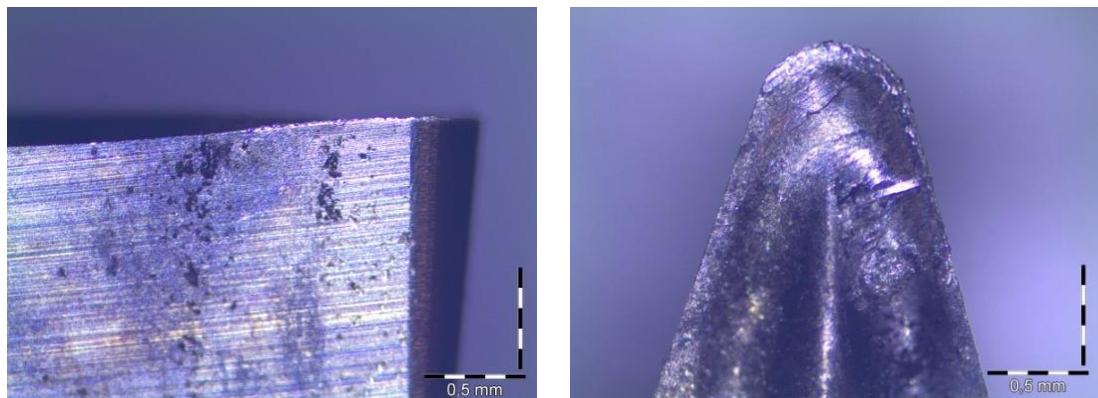
Fonte: Próprio Autor, 2018

Figura 4.27: Aresta de Corte nº3, utilizada nos Corpos de Prova 23 a 26
(a) Detalhe Lateral (b) Detalhe Superior



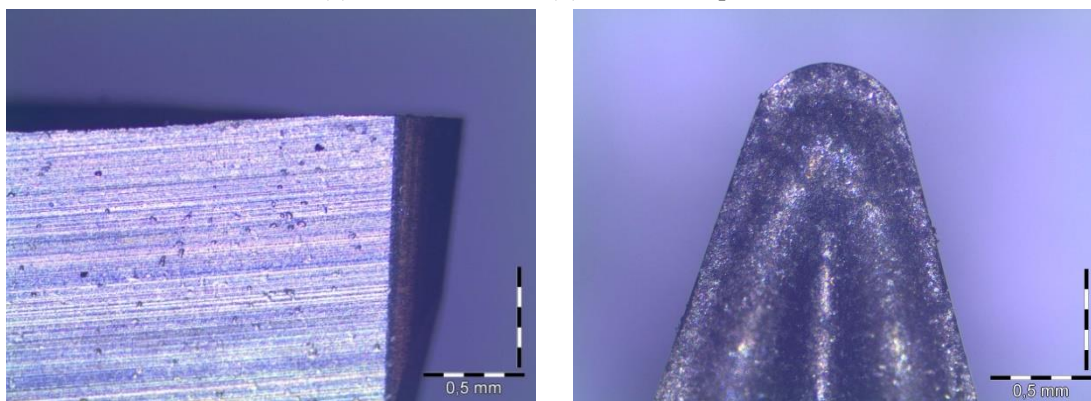
Fonte: Próprio Autor, 2018

Figura 4.28: Aresta de Corte nº4, utilizada nos Corpos de Prova 27 a 30
(a) Detalhe Lateral (b) Detalhe Superior



Fonte: Próprio Autor, 2018

Figura 4.29: Aresta de Corte nº5, utilizada nos Corpos de Prova 31 a 34
(a) Detalhe Lateral (b) Detalhe Superior



Fonte: Próprio Autor, 2018

Destaca-se que, em todos eles, o desgaste foi mínimo ou inexistente, o que leva a concluir que o desgaste da ferramenta não foi um fator que impactou nos resultados de rugosidade e, principalmente, de vibração.

5 CONCLUSÕES

Este trabalho foi proposto com o objetivo de avaliar a usinabilidade da liga de alumínio 7075-T6, do ponto de vista da sua rugosidade, avaliando o impacto do revestimento e o comportamento dinâmico do sistema máquina-ferramenta-peça. A partir dos estudos realizados, pode-se concluir que:

- Observou-se maior desgaste no inserto revestido do que no inserto sem revestimento. Considerando a composição do revestimento, é plausível cogitar que houve reação com o Ti ou o TiAlN, acelerando o processo de desgaste da ferramenta.
- Na Fase 1 de testes, composta por experimentos fatoriais fracionados 2^{3-1} , com pontos centrais, houve influência significativa do Avanço sobre a rugosidade, representada por um modelo linear. Ademais, a relevância do Avanço sobre os outros dois fatores (Velocidade e Profundidade de Corte) foi comprovada na Fase 2, com o uso de Experimento Composto Central, que indicou um modelo quadrático, com preponderância do Avanço sobre a rugosidade superficial.
- Do ponto de vista estatístico, houve diferença significativa entre os resultados de rugosidade R_a , sendo o inserto revestido superior ao sem revestimento. Do ponto de vista prático e econômico, a escolha pelo inserto sem revestimento se torna mais interessante, considerando seu custo-benefício.
- O avanço foi o parâmetro de corte que mais influenciou na rugosidade superficial, sendo que, valores na faixa de 0,0684 mm/volta obtiveram os melhores resultados. Porém, deve-se considerar que tal valor também implica em produtividade muito baixa, o que exigiria maiores valores de V_c e a_p .
- Na Fase 2, foi obtido um modelo relacionando os três parâmetros de corte estudados (V_c , a_p e f) com a vibração, tendo como base o valor eficaz (RMS) nos sentidos de corte e de avanço.

- Finalmente, pôde-se concluir que, dentro dos limites do experimento, a rugosidade apresentou correlação positiva com a vibração no sentido de corte, representada pelas grandezas RMS, Pico e Fator de Crista; mas houve baixa correlação positiva com a vibração no sentido do avanço. Segundo a literatura apresentada, é possível que, com o aumento da Velocidade de Corte, essa correlação possa aumentar.

5.1 Sugestões para Trabalhos Futuros

Ao término deste trabalho, observou-se que os seguintes temas podem ser trabalhados:

- Realizar experimentos com ferramentas de outras geometrias, mas com e sem revestimento, de maneira a verificar se os resultados apresentados se repetem em outros casos.
- Estudar as superfícies de resposta do torneamento, utilizando o inserto com revestimento, para avaliar a semelhança ou discrepância entre os dois modelos de insertos.
- Analisar o processo de desgaste de ambos os insertos, na busca de uma explicação definitiva sobre o fenômeno apresentado neste trabalho.
- Medir índices de vibração com ferramentas em outros materiais, especialmente o diamante que, conforme literatura, apresenta resultados superiores ao metal duro.
- Utilizar metodologia de otimização para encontrar o melhor resultado no torneamento da liga 7075-T6.
- Utilizar um maior espectro de Velocidades de Corte, de forma a se investigar um eventual aumento da correlação entre rugosidade e vibrações em altas rotações.

6 REFERÊNCIAS

ABUKHSHIM, N. A.; MATIVENGA, P. T.; SHEIKH, M. A. Heat generation and temperature prediction in metal cutting : A review and implications for high speed machining. **International Journal of Machine Tool & Manufacture**, v. 46, p. 782–800, 2006.

ALCOA. **Alloy 7050 Plate and Sheet Best Combination of Properties**. Disponível em: <http://www.arconic.com/mill_products/catalog/pdf/alloy7050techsheetrev.pdf>. Acesso em: 30 out. 2017.

ALTINTAS, Y. **Manufacturing automation: metal cutting mechanics, machine tool vibrations, and CNC design**. 2. ed. New York: Cambridge University Press, 2012.

ALUMICOPPER. **Alumínio 7075-T651**. Disponível em: <http://www.alumicopper.com.br/produtos_aluminio_7075t651.html>. Acesso em: 1 maio. 2017.

ALUMINUM ASSOCIATION. **International Alloy Designations and Chemical Composition Limits for Wrought Aluminum and Wrought Aluminum Alloys**, 2017. Disponível em: <http://www.aluminum.org/sites/default/files/TEAL_1_OL_2015.pdf>. Acesso em: 10 jun. 2017

ALUMINUM ASSOCIATION. **Aluminum Alloys 101**. Disponível em: <<http://www.aluminum.org/resources/industry-standards/aluminum-alloys-101>>. Acesso em: 20 jul. 2018.

ANGÜN, E. et al. **Response Surface Methodology Revisited**. Winter Simulation Conference. **Anais...**Tilburg University, School of Economics and Management: 2002

ASM INTERNATIONAL. Heat Treating. **ASM International**, p. 1–7, 2015.

BACCI, M.; WALLBANK, J. Cutting temperature : prediction and measurement methods - a review. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 88, p. 195–202, 1999.

BAO, R.; ZHANG, X. Fatigue crack growth behaviour and life prediction for 2324-T39 and 7050-T7451 aluminium alloys under truncated load spectra. **International Journal of Fatigue**, v. 32, n. 7, p. 1180–1189, 2010.

BARROS NETO, B. DE; SCARMINIO, I. S.; BRUNS, R. E. **Como fazer experimentos: pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria**. 2. ed. Campinas: Editora da Unicamp, 2001.

BENEDYK, J. C. International Temper Designation Systems for Wrought Aluminum Alloys: Part II – Thermally Treated (T Temper) Aluminum Alloys. **Light Metal Age**, 2010.

BOOTHROYD, G.; KNIGHT, W. A. **Fundamentals of Machining and Machine Tools**. 2 ed. ed. New York: Marcel Dekker, 2006.

BRAGA, D. U. et al. Using a minimum quantity of lubricant (MQL) and a diamond coated tool in the drilling of aluminum-silicon alloys. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 122, p. 127–138, 2002.

CALADO, V.; MONTGOMERY, D. C. **Planejamento de Experimentos Usando o Statistica**. Rio de Janeiro: E-Papers Serviços Editoriais, 2003.

CALLISTER, W. D. **Ciência e Engenharia dos Materiais: Uma Introdução**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

CAMARGO, J. A. M. DE. **A Influência do Shot Peening e das anodizações crômica, sulfúrica e dura sobre a resistência à fadiga da liga Al 7050-T7451 de uso aeronáutico**. Guaratinguetá: Universidade Estadual Paulista, 2007.

CERVELIN, J. E. **Redução de vibrações mecânicas em processos de torneamento usando material piezelétrico**. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos: Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

CHILDS, T. et al. **Metal Machining Theory and Applications**. Nova York: Arnold, 2000.

CHOWDHURY, M. A.; HELALI, M. The effect of amplitude of vibration on the coefficient of friction for different materials. **Tribology International**, v. 41, p. 307–314, 2008.

DASCH, J. M. et al. Journal of Materials Processing Technology The effect of free-machining elements on dry machining of B319 aluminum alloy. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 209, p. 4638–4644, 2009.

DEMIR, H.; GÜNDÜZ, S. The effects of aging on machinability of 6061 aluminium alloy. **Materials and Design**, v. 30, n. 5, p. 1480–1483, 2009.

DIMLA SR, D. E. The impact of cutting conditions on cutting forces and vibration signals in turning with plane face geometry inserts. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 156, p. 1708–1715, 2004.

DINARDO, G.; FABBIANO, L.; VACCA, G. A smart and intuitive machine condition monitoring in the Industry 4.0 scenario. **Measurement: Journal of the International Measurement Confederation**, v. 126, n. January, p. 1–12, 2018.

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia de usinagem dos materiais**. São Paulo: MM Editora, 2014.

EVANGELISTA, E. C. E. **Experimental behaviour of internal joints with beams of different heights, steel grade S690** European Aluminium Association, 1999.

FANG, N.; WU, Q. The effects of chamfered and honed tool edge geometry in machining of three aluminum alloys. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 45, n. 10, p. 1178–1187, 2005.

FERRARESI, D. **Fundamentos da usinagem dos metais**. São Paulo: Edgard Blücher Ltda., 1977. v. 1

FUH, K. H.; WU, C. F. A residual-stress model for the milling of aluminum alloy (2014-T6). **Journal of Materials Processing Tech.**, v. 51, n. 1–4, p. 87–105, 1995.

GANGULI, A. et al. Active damping of chatter in machine tools - Demonstration with a “hardware-in-the-loop” simulator. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part I: Journal of Systems and Control Engineering**, v. 219, n. 5, p. 359–369, 2005.

GIERLAK, P. et al. On-line manipulator tool condition monitoring based on vibration analysis. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 89, p. 14–26, 2017.

HAMADE, R. F.; ISMAIL, F. A case for aggressive drilling of aluminum. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 166, p. 86–97, 2005.

HATCH, J. E. **Aluminum: Properties and Physical Metallurgy**. Ohio: ASM International, 1984.

HU, K. et al. **Comparison between ASME and ISO standards on surface texture**. Third International Symposium on Precision Mechanical Measurements. **Anais...Urumqi**: Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE), 13 out. 2006

INMAN, D. J. **Engineering Vibration**. 3. ed. New Jersey: Pearson Prentice Hall, 2007.

JOHNE, P. **Machining of Products**. in: European Aluminium Association: TALAT, Training in Aluminum Application Technologies: Lecture 3100, 1994.

KALPAKJIAN, S.; SCHMID, S. R. **Manufacturing Engineering and Technology**. 6. ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2009.

KANNAN, S.; KISHAWY, H. A. Tribological aspects of machining aluminium metal matrix composites. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 8, p. 399–406, 2007.

KELLY, J. F.; COTTERELL, M. G. Minimal lubrication machining of aluminium alloys. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 120, p. 327–334, 2002.

KISHAWY, H. A. et al. Effect of coolant strategy on tool performance , chip morphology and surface quality during high-speed machining of A356 aluminum alloy. **Machine Tools & Manufacture**, v. 45, p. 219–227, 2005.

KOPELIOVICH, D. **Effects of alloying elements on properties of aluminum alloys**, 2012. Disponível em: <http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=effects_of_alloying_elements_on_properties_of_aluminum_alloys>. Acesso em: nov. 2018.

KUNDU, P.; CHOPRA, S.; LAD, B. K. Multiple failure behaviors identification and remaining useful life prediction of ball bearings. **Journal of Intelligent Manufacturing**, 2017.

LARA, A. P. DE. **Análise das vibrações no processo de torneamento interno da liga de alumínio 6351-t6**. . Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais: Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2017.

LIANG, Q.; VOHRA, Y. K.; THOMPSON, R. Diamond & Related Materials High speed continuous and interrupted dry turning of A390 Aluminum / Silicon Alloy using nanostructured diamond coated WC – 6 wt .% cobalt tool inserts by MPCVD. **Diamond & Related Materials**, v. 17, n. 12, p. 2041–2047, 2008.

MACHADO, Á. R.; ABRÃO, A. M.; COELHO, R. T.; SILVA, M. C. **Teoria da usinagem dos materiais**. 1. ed. São Paulo: Editora Blücher, 2009.

MACKERLE, J. Finite-element analysis and simulation of machining : a bibliography (1976 – 1996). **Journal of Materials Processing Technology**, v. 86, p. 17–44, 1999.

MASMIATI, N.; SARHAN, A. A. D. Optimizing cutting parameters in inclined end milling for minimum surface residual stress - Taguchi approach. **Measurement: Journal of the International Measurement Confederation**, v. 60, p. 267–275, 2015.

MATEUS, N. B.; BARBIN, D.; CONAGIN, A. Viabilidade de uso do delineamento composto central. **Acta Scientiarum. Technology**, v. 23, n. 6, p. 1537–1546, 2001.

MATWEB. **Aluminum Alloy Heat Treatment Temper Designations**. Disponível em: <<http://www.matweb.com/reference/aluminumtemper.aspx>>. Acesso em: 8 jun. 2017a.

MATWEB. **Material Property Data**. Disponível em: <<http://www.matweb.com/index.aspx>>. Acesso em: 15 nov. 2016b.

MESQUITA, A. L. A.; MIRANDA, U.; PEDERIVA, R. Detecção de falhas em rolamentos usando transformadas tempo-frequência: Comparação com análise de envelope. **Mecânica Computacional**, v. XXI, n. Outubro, 2002, p. 1938–1954, 2002.

MILLS, B.; REDFORD, A. H. **Machinability of Engineering Materials**. London: Applied Science Publishers, 1983.

MONTGOMERY, D. C. **Design and analysis of experiments**. 5^a ed. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2001.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Probabilidade e Estatística I Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros**. 4^a ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

MORETO, J. **Estudo da corrosão e corrosão-fadiga em ligas de Al e Al – Li de Alta Resistência para Aplicação Aeronáutica**. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2012.

NARAHARI, P.; PAI, B. C.; PILLAI, R. M. Some Aspects of Machining Cast Al-SiCp Composites with Conventional High Speed Steel and Tungsten Carbide Tools. **ASM International**, v. 8, n. October, p. 538–542, 1999.

OKUMURA, T.; TANIGUCHI, C. **Engenharia de Soldagem e Aplicações**. Rio de Janeiro: LTC, 1982.

PAIVA, A. P. DE. **Metodologia de Superfície de Resposta e Análise de Componentes Principais em Otimização de Processos de Manufatura com Múltiplas Respostas Correlacionadas Metodologia de Superfície de Resposta e Análise de Componentes Principais em Otimização de Processos**. Tese (Doutorado) - Instituto de Engenharia Mecânica: Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2006.

POLLI, M. L. **Análise da estabilidade dinâmica do processo de fresamento a altas velocidades de corte**. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos: Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

RAO, B.; SHIN, Y. C. Analysis on high-speed face-milling of 7075-T6 aluminum using carbide and diamond cutters. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 41, n. 12, p. 1763–1781, set. 2001.

RAO, S. S. **Mechanical Vibrations**. 5^a ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2011.

RODRIGUES, A. R.; COELHO, R. T. Influence of the Tool Edge Geometry on Specific Cutting Energy at High-Speed Cutting. **Journal of the Braz. Soc. of Mech. Sci. & Eng.**, v. XXIX, n. 3, p. 279–283, 2007.

ROY, P. et al. Int . Journal of Refractory Metals & Hard Materials Machinability study of pure aluminium and Al – 12 % Si alloys against uncoated and coated carbide inserts. **International Journal of Refractory Metals and Hard Materials**, v. 27, n. 3, p. 535–544,

2009.

SÁNCHEZ, J. M. et al. Microstructural characterisation of material adhered over cutting tool in the dry machining of aerospace aluminium alloys. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 165, p. 911–918, 2005.

SANDVIK. **Corokey**. [s.l.] Sandvik Coromant, 2017.

SANDVIK. **VBGT 16 04 04-UM**. Disponível em: <[https://www.sandvik.coromant.com/en-gb/products/pages/productdetails.aspx?c=VBGT 16 04 04-UM 1125](https://www.sandvik.coromant.com/en-gb/products/pages/productdetails.aspx?c=VBGT_16_04_04-UM_1125)>. Acesso em: 20 ago. 2017.

SANTOS, R. G. DOS. **Desenvolvimento de um método para minimizar vibrações em operações de torneamento variando dinamicamente a área de corte**. Tese (Doutorado) - Departamento de Engenharia de Produção: Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

SANTOS JÚNIOR, M. C. DOS. **Emprego de ferramentas estatísticas para avaliação da usinabilidade de ligas de alumínio**. Tese (Doutorado) - Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica: Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2012.

SCHMITZ, T. L.; SMITH, K. S. **Machining Dynamics: Frequency Response to Improved Productivity**. 2. ed. Cham: Springer International Publishing, 2019.

SEKER, U.; KORKUT, I. **The measurement of temperature during machining**, 2016.

SHAW, M. C. **Metal Cutting Principles**. 2ª ed. New York: Oxford University Press, 2005.

SHEN, H.; WAN, H. Controlled sequential factorial design for simulation factor screening. **European Journal of Operational Research**, v. 198, n. 2, p. 511–519, 2009.

SHETTY, R.; KAMATH, V. Machinability study on discontinuously reinforced aluminium composites (DRACs) using response surface methodology and Taguchi's design of experiments under dry cutting condition. **Maejo International Journal of Science and Technology**, n. September 2018, p. 227–239, 2008.

SMITH, G. T. **Cutting Tool Technology: industrial handbook**. 1. ed. London: Springer International Publishing, 2007. v. 1

SONG, J. M. et al. Vibration behavior of a precipitation-hardening aluminum alloy under resonance. **Scripta Materialia**, v. 51, p. 1153–1157, 2004.

SREEJITH, P. S. Machining of 6061 aluminium alloy with MQL, dry and flooded lubricant conditions. **Materials Letters**, v. 62, n. 2, p. 276–278, 2008.

SRITHAR, A.; PALANIKUMAR, K.; DURGAPRASAD, B. Experimental investigation and surface roughness analysis on hard turning of AISI D2 steel using coated Carbide insert. **Procedia Engineering**, v. 97, p. 72–77, 2014.

SUAREZ, M. P. **Fresamento de canais da liga de alumínio aeronáutico 7075-t7**. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica: Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2008.

SUYAMA, D. I. **Uma contribuição ao estudo do torneamento interno em aços endurecidos**. Tese (Doutorado) - Faculdade de Engenharia Mecânica: Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2014.

SYSTEMS, M. **Olympus BX41M LED**. Disponível em: <<https://www.microscopesales.co.uk/olympus-microscopes/materials-science-microscopes/olympus-bx41m-led.html>>. Acesso em: 12 ago. 2018.

TAN, E.; ÖGEL, B. Influence of Heat Treatment on the Mechanical Properties of AA6066 Alloy. **Turkish Journal of Eng. Env. Sci.**, v. 31, p. 53–60, 2007.

TANG, Z. T. et al. The influence of tool flank wear on residual stresses induced by milling aluminum alloy. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 209, n. 9, p. 4502–4508, 2009.

TASH, M. et al. Effect of metallurgical parameters on the machinability of heat-treated 356 and 319 aluminum alloys. **Materials Science & Engineering A**, v. 434, p. 207–217, 2006.

TATAR, K.; GREN, P. Measurement of milling tool vibrations during cutting using laser vibrometry. **International Journal of Machine Tool & Manufacture**, v. 48, p. 380–

387, 2008.

TOBIAS, S. A. Machine tool vibration research. **International Journal of Machine Tool Design and Research**, v. 1, n. 1–2, p. 1–14, set. 1961.

TOROPOV, A.; KO, S.; KIM, B. Experimental study of burrs formed in feed direction when turning aluminum alloy Al6061-T6. **Machine Tools & Manufacture**, v. 45, p. 1015–1022, 2005.

TRENT, E. M.; WRIGHT, P. K. **Metal Cutting**. 4^a ed. ed. Oxford: Butterworth Heinemann, 2000.

VERNAZA-PEÑA, K. M.; MASON, J. J.; LI, M. Experimental Study of the Temperature Field Generated During Orthogonal Machining of an Aluminum Alloy. **Experimental Mechanics**, n. 42 (2), p. 221–229, 2002.

VIANA, R.; MACHADO, A. R. Influence of Adhesion between Coating and Substrate on the Performance of Coated HSS Twist Drills. **Journal of the Braz. Soc. of Mech. Sci. & Eng.**, v. XXXI, n. 4, p. 327–332, 2009.

VISHWAKARMA, M. et al. Vibration Analysis & Condition Monitoring for Rotating Machines: A Review. **Materials Today: Proceedings**, v. 4, n. 2, p. 2659–2664, 2017.

WEINGAERTNER, W. L.; SCHROETER, R. B. **Tecnologia de usinagem do alumínio e suas ligas**. 2 ed. ed. São Paulo: Alcan Alumínio do Brasil, 1991.

YANMING, Q.; ZEHUA, Z. Tool wear and its mechanism for cutting SiC particle-reinforced aluminium matrix composites. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 100, p. 194–199, 2000.

ZAGHBANI, I.; SONGMENE, V. A force-temperature model including a constitutive law for Dry High Speed Milling of aluminium alloys. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 9, n. 1991, p. 2532–2544, 2008.

7 APÊNDICE I

7.1 Vibração RMS, sentido do Avanço

A seguir, são apresentados os resultados da ANOVA, obtidos na Fase 2, para o Tempo de Torneamento, e os coeficientes estimados desse modelo, para fins de informação:

Tabela 7.1: ANOVA para Vibração no Avanço, PCC, Sem Revestimento

Fonte	DF	SQ Aj	MQ Aj	Valor-F	P-Valor
<i>Modelo</i>	11	21,7346	1,97589	4,51	0,021
Blocos	2	0,5414	0,27068	0,62	0,563
<i>Linear</i>	3	13,1547	4,38491	10,01	0,004
<i>Quadrado</i>	3	6,8744	2,29147	5,23	0,027
Interação	3	1,1637	0,38792	0,89	0,489
Erro Residual	8	3,5054	0,43818		
<i>Falta de Ajuste</i>	5	3,4804	0,69609	83,53	0,002
Erro Puro	3	0,0250	0,00833		
Total	19	25,2400			
S=0,661942		R ² =86,11%		R ² (adj)=67,11%	

Fonte: Próprio Autor, 2019

Tabela 7.2: Coeficientes estimados para Vibração, sentido do Avanço

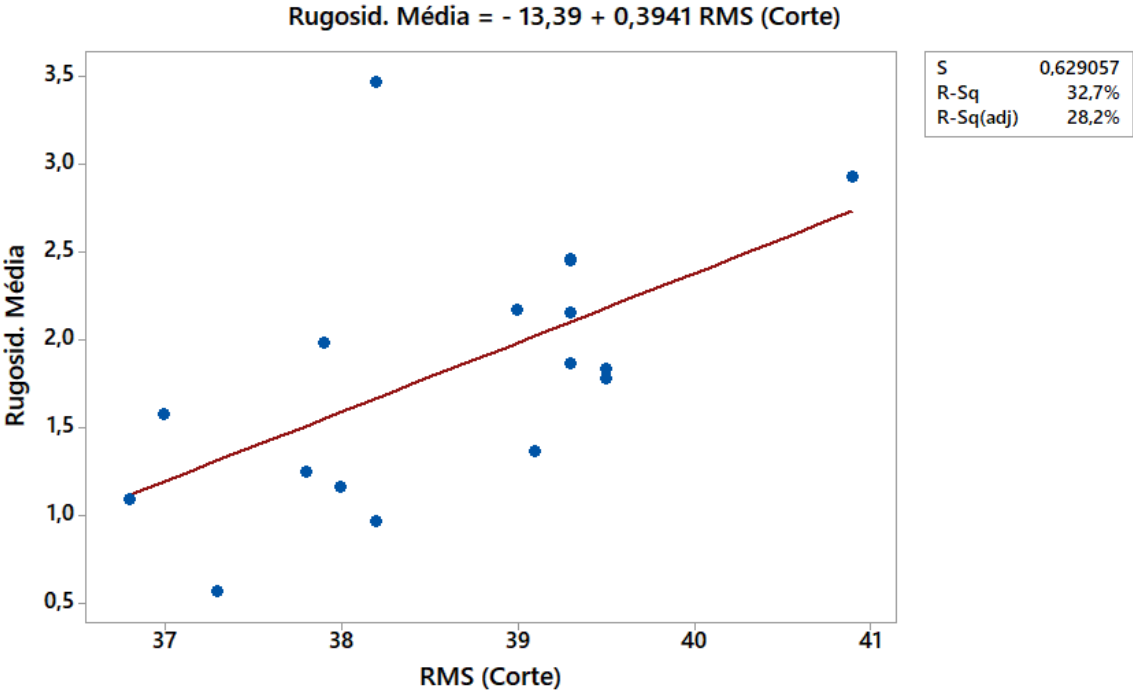
Termo	Efeito	Coefic.	SE Coef.	Valor T	Valor P
Constante		38,904	0,270	144,12	0,000
Bloco 1		-0,097	0,216	-0,45	0,664
Bloco 2		0,236	0,216	1,09	0,306
f	1,255	0,628	0,181	3,46	0,009
V _c	1,086	0,543	0,181	3,00	0,017
a _p	1,091	0,545	0,181	3,01	0,017
f*f	-0,453	-0,226	0,182	-1,24	0,249
V _c *V _c	-1,128	-0,564	0,182	-3,10	0,015
a _p *a _p	0,709	0,355	0,182	1,95	0,087
f*V _c	0,625	0,313	0,234	1,34	0,219
f*a _p	0,375	0,188	0,234	0,80	0,446
V _c *a _p	-0,225	-0,112	0,234	-0,48	0,644

Fonte: Próprio Autor, 2019

7.2 Gráficos de Regressão para Rugosidade e Vibração (sentido de corte)

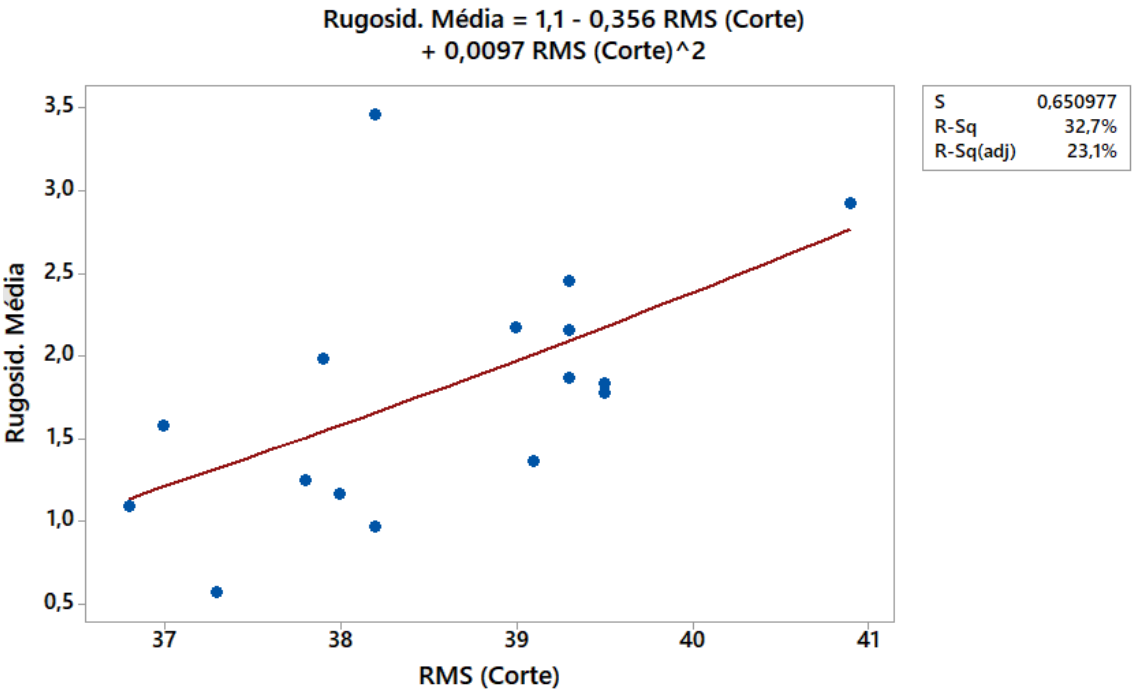
A seguir, são apresentados os gráficos de regressão, considerando modelos Lineares, Quadráticos e Cúbicos, na análise de Vibração e Rugosidade.

Figura 7.1: Modelo Linear



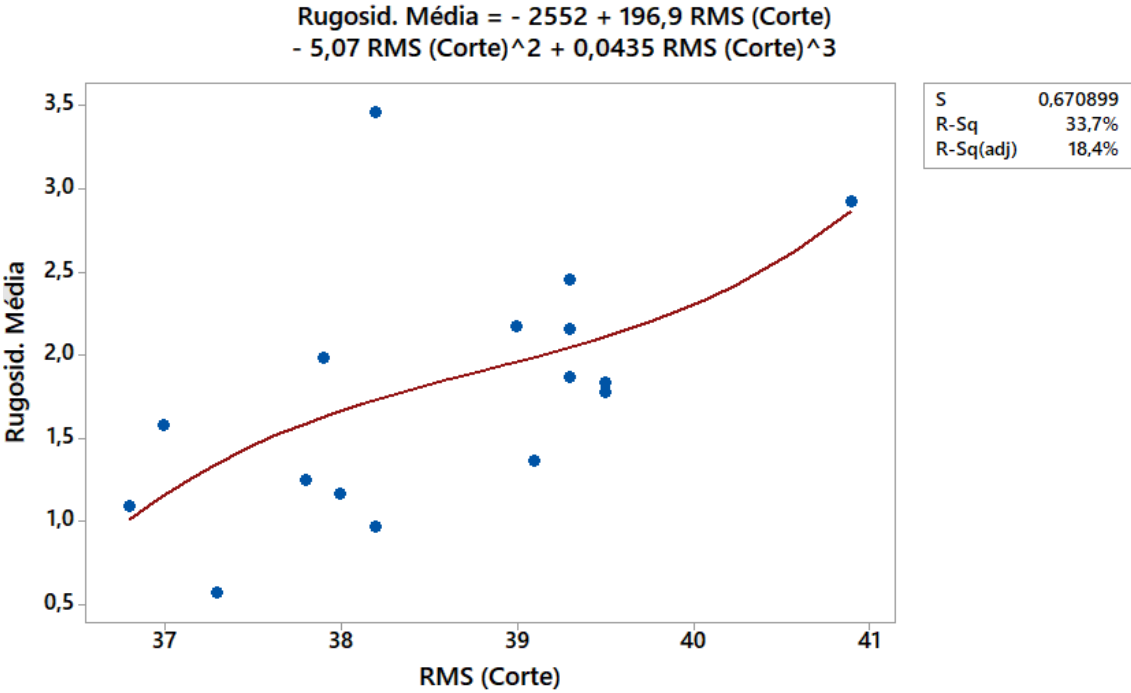
Fonte: Próprio Autor, 2019

Figura 7.2: Modelo Quadrático



Fonte: Próprio Autor, 2019

Figura 7.3: Modelo Cúbico

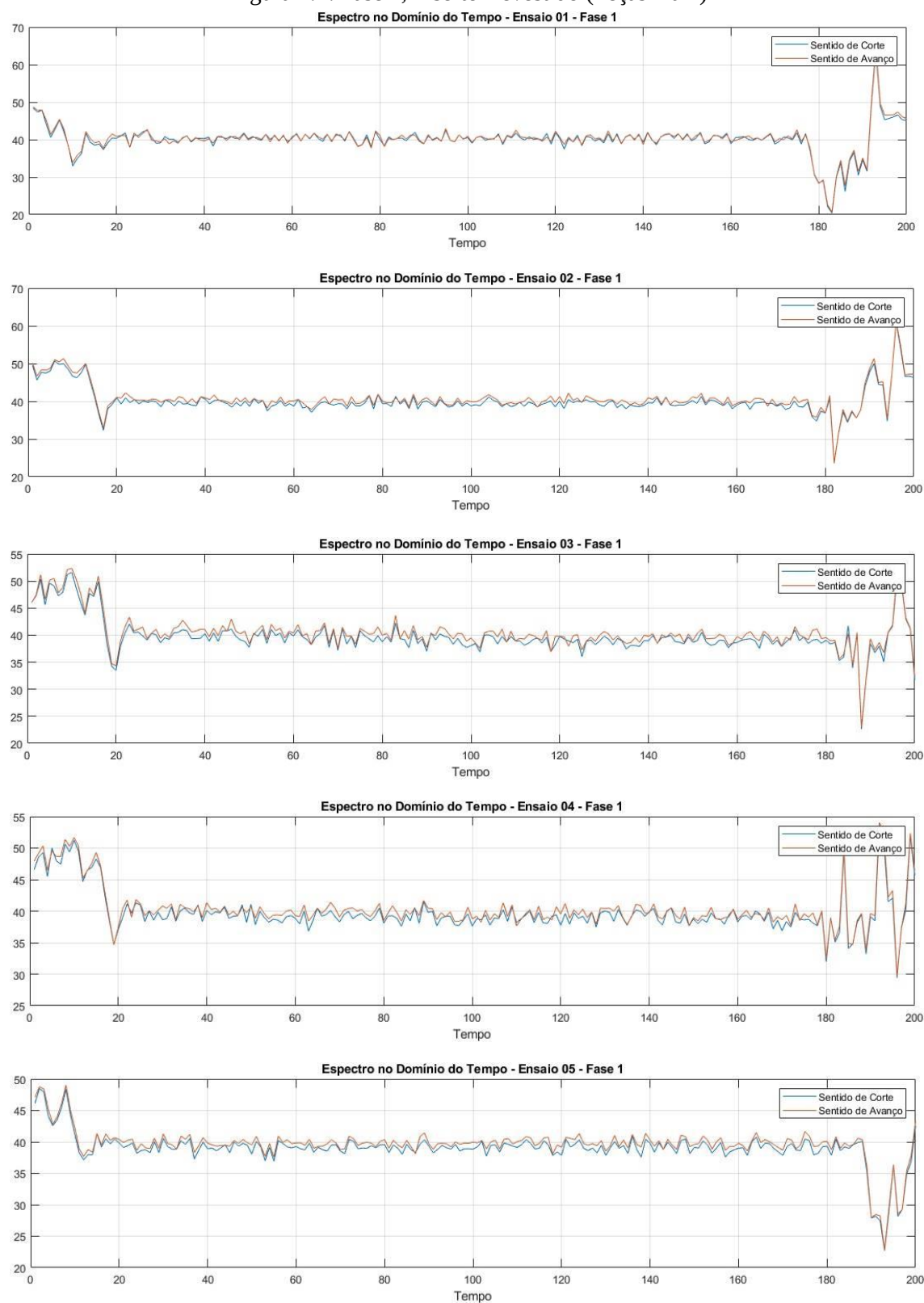


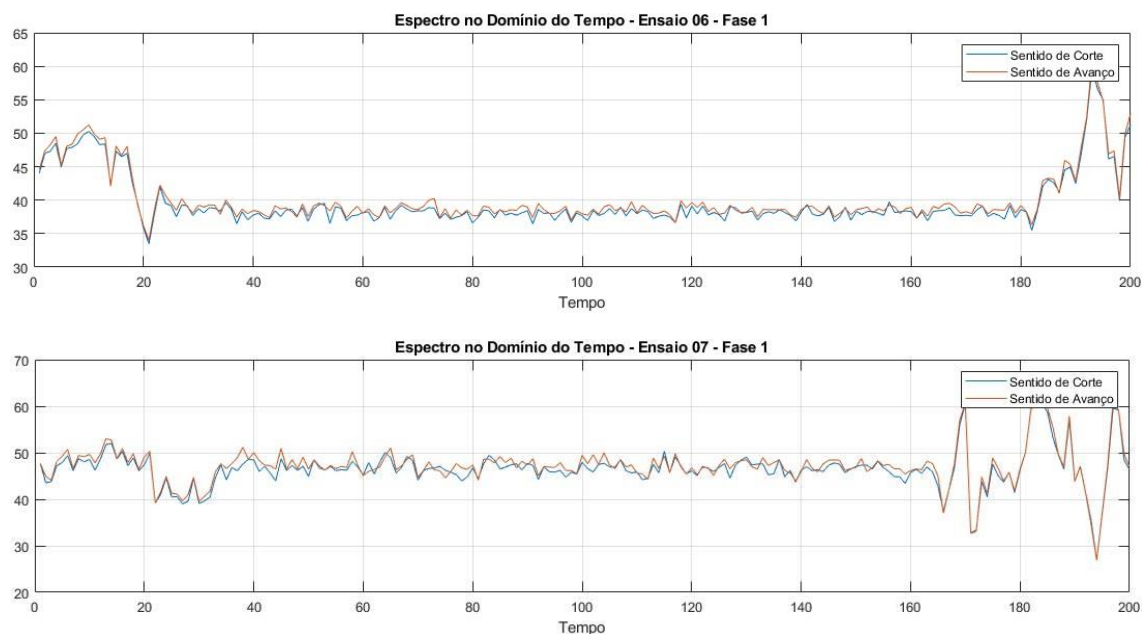
Fonte: Próprio Autor, 2019

7.3 Dados de Aquisição

7.3.1 Espectros da Fase 1, com Inserto Revestido

Figura 7.4: Fase 1, Inserto Revestido (Peças 1 a 7)

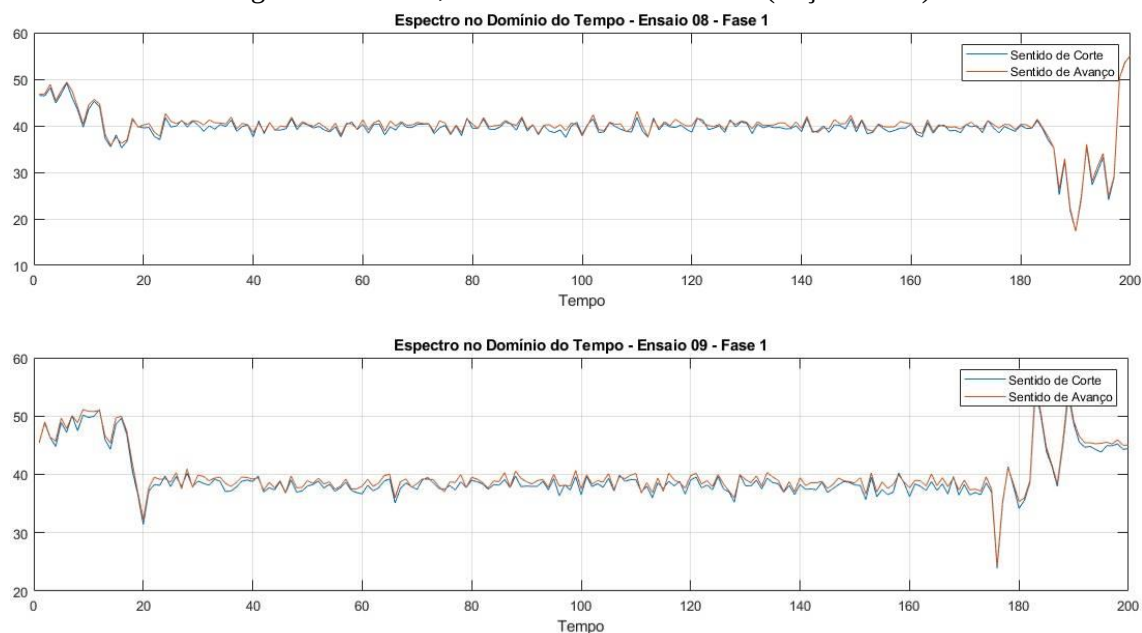


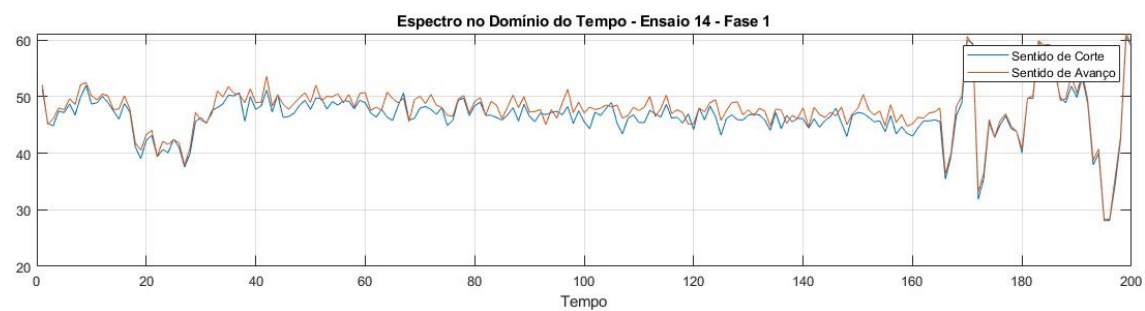
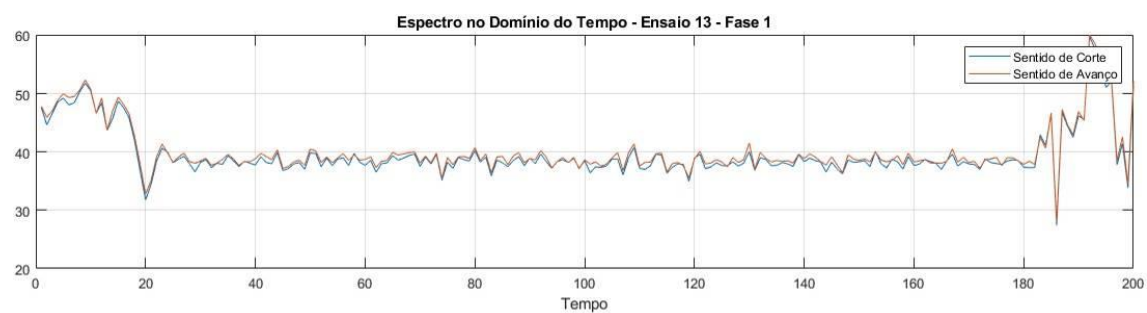
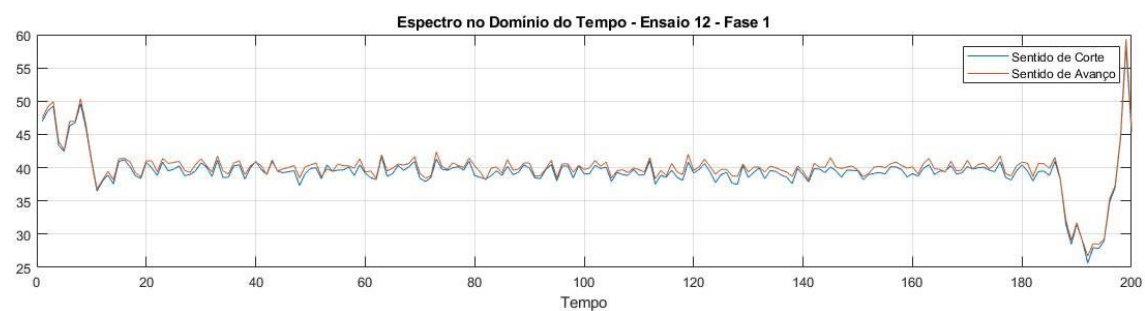
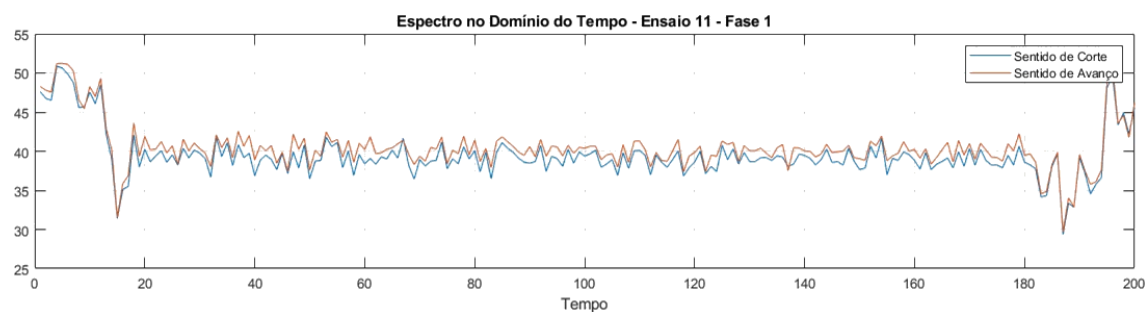
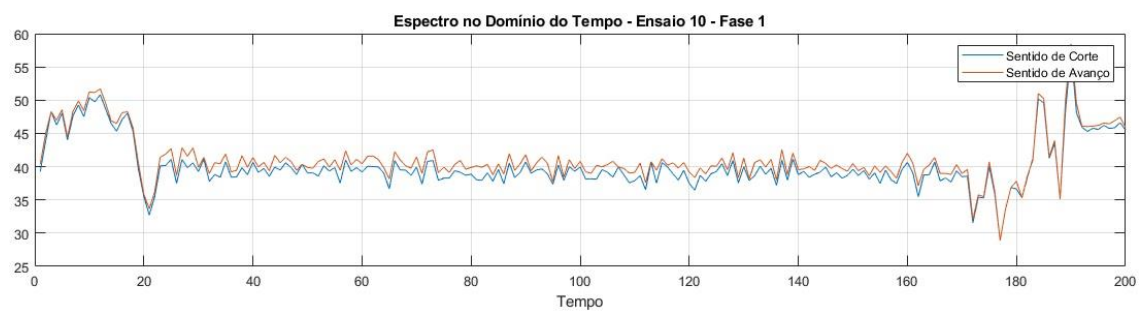


Fonte: Próprio Autor, 2019

7.3.2 Espectros da Fase 1, com Inserto sem Revestimento

Figura 7.5: Fase 1, Inserto sem Revestimento (Peças 8 a 14)

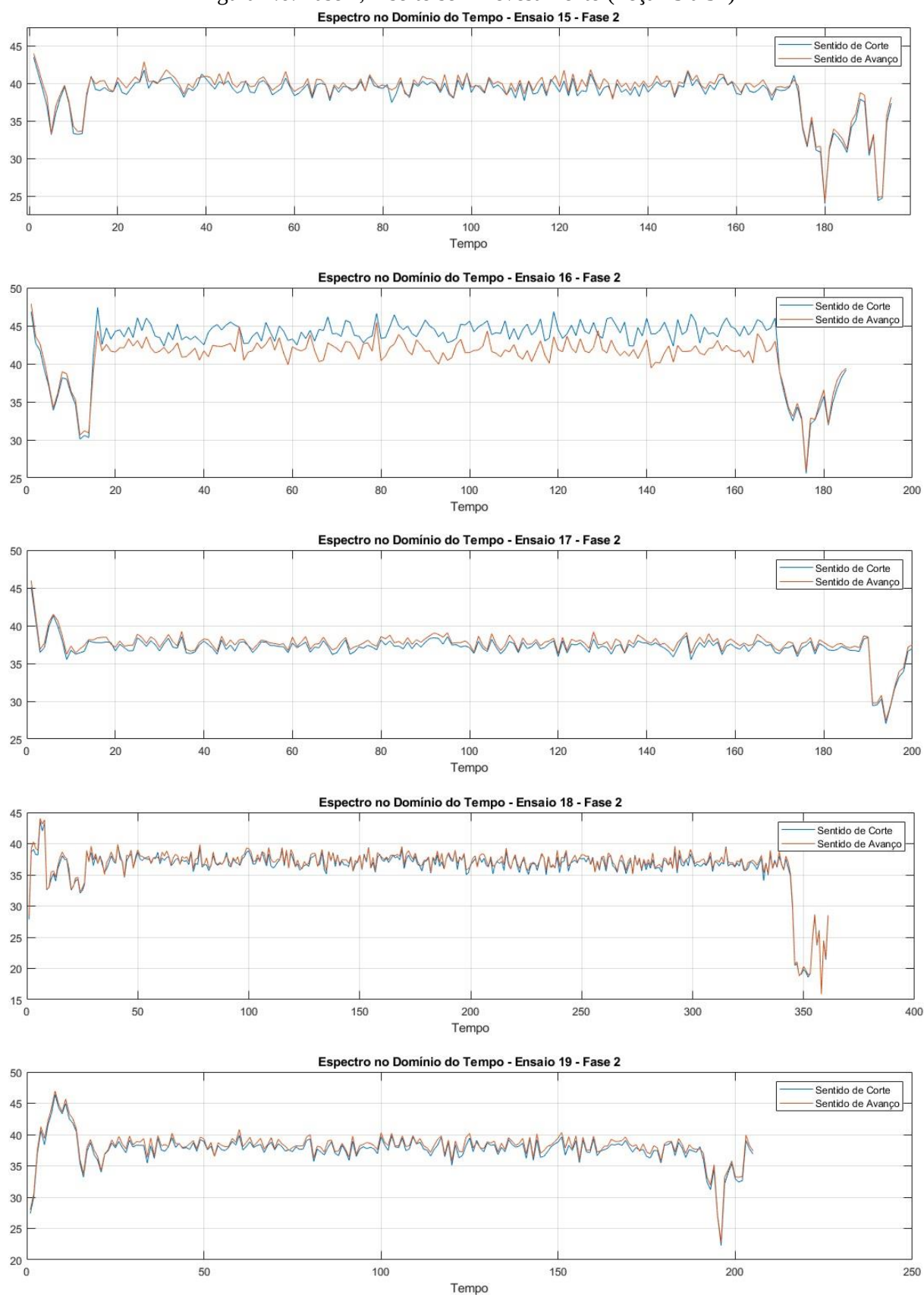


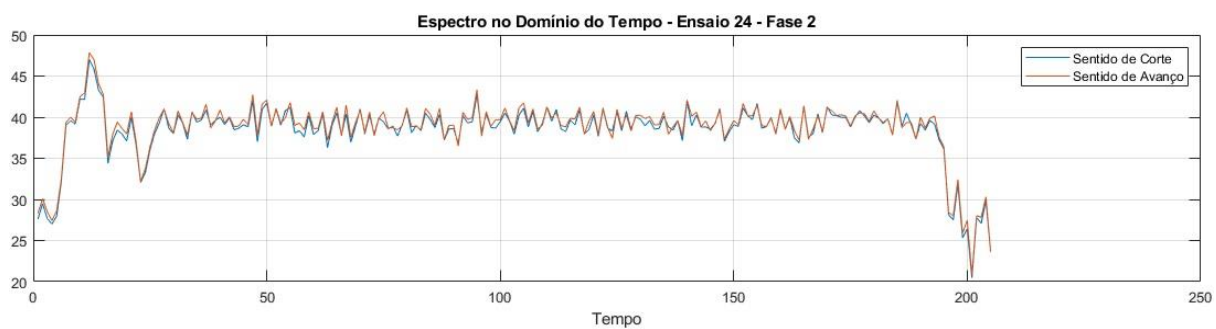
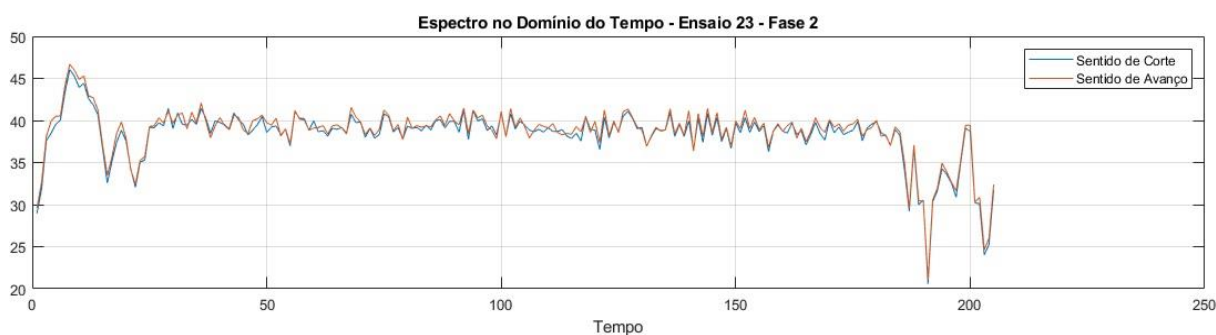
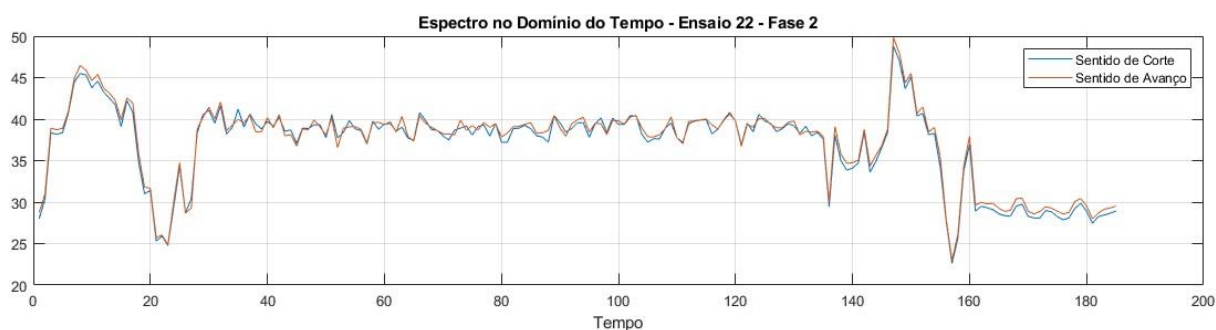
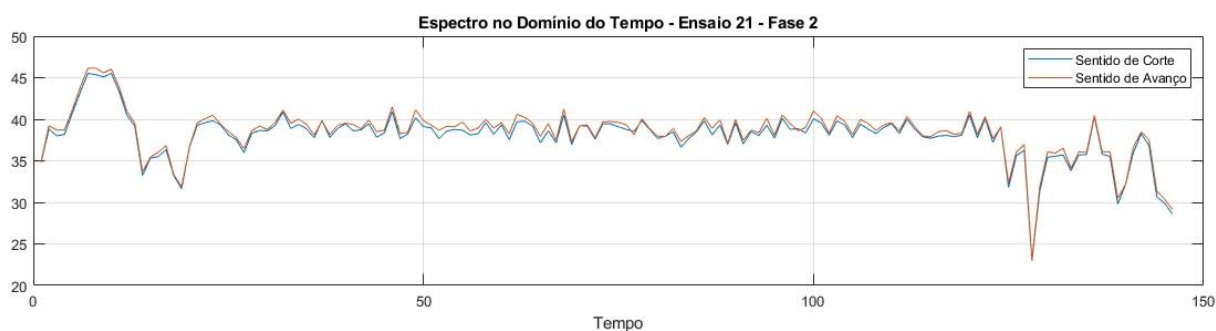
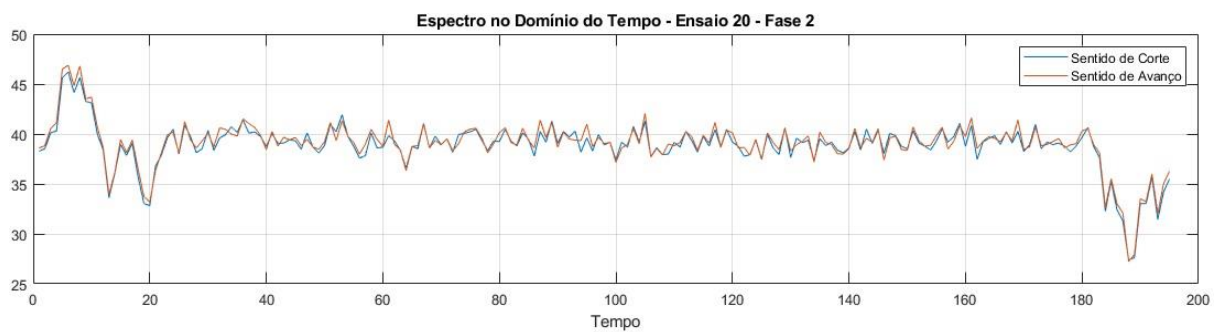


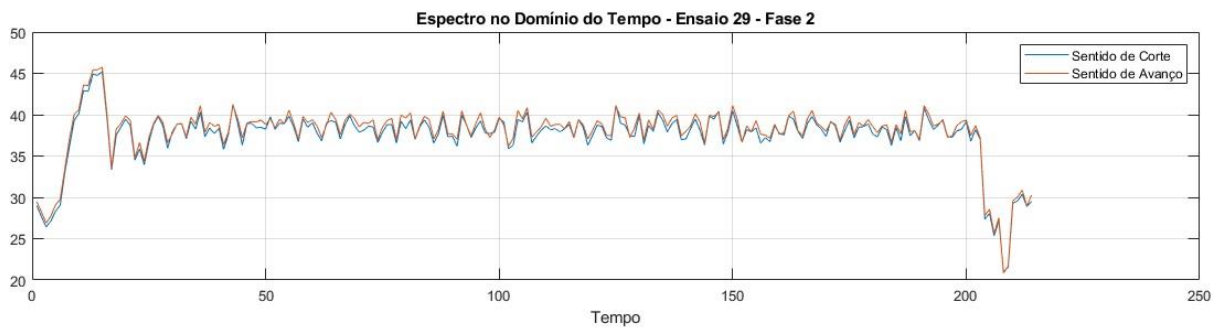
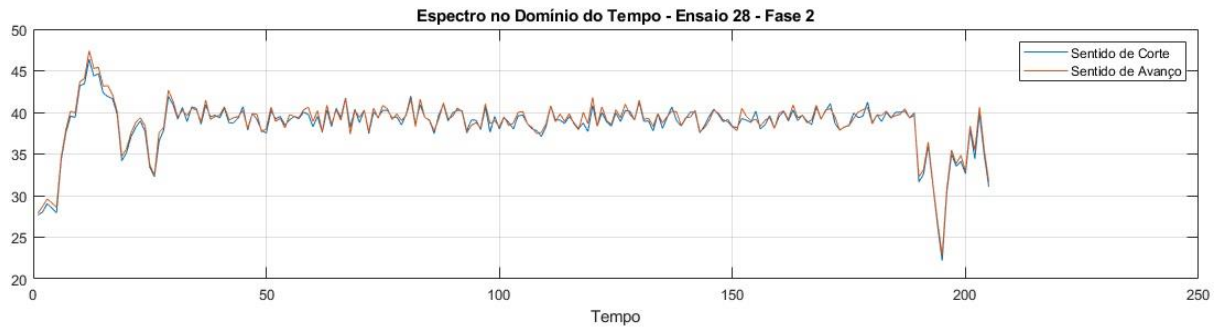
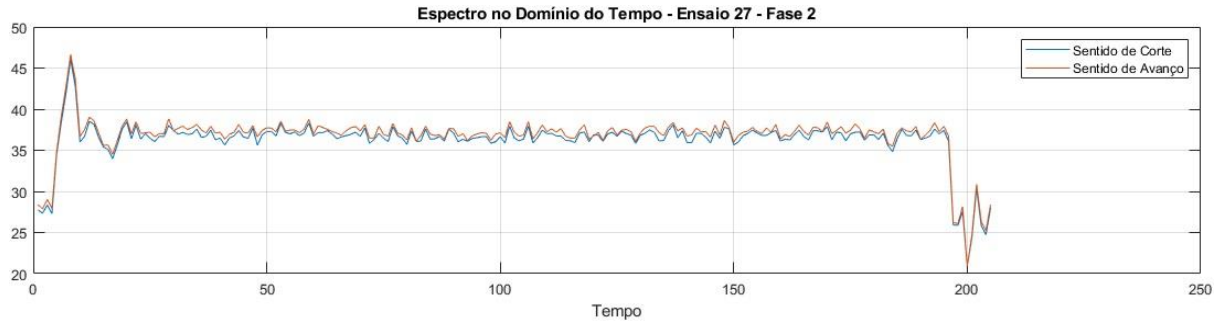
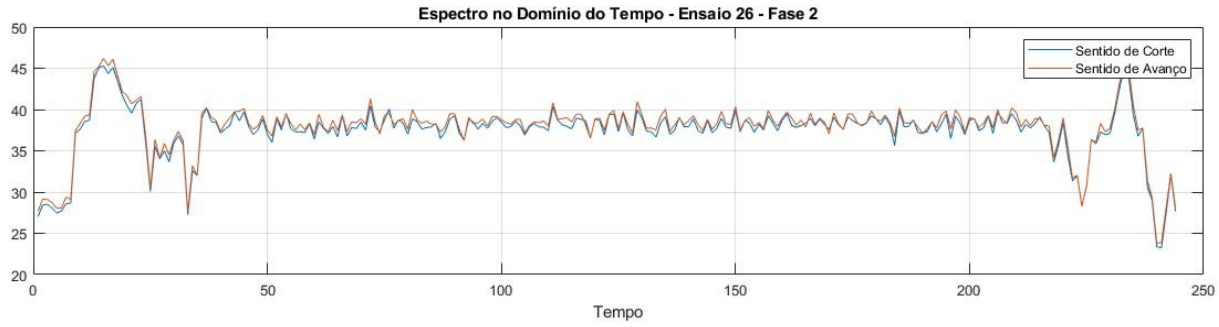
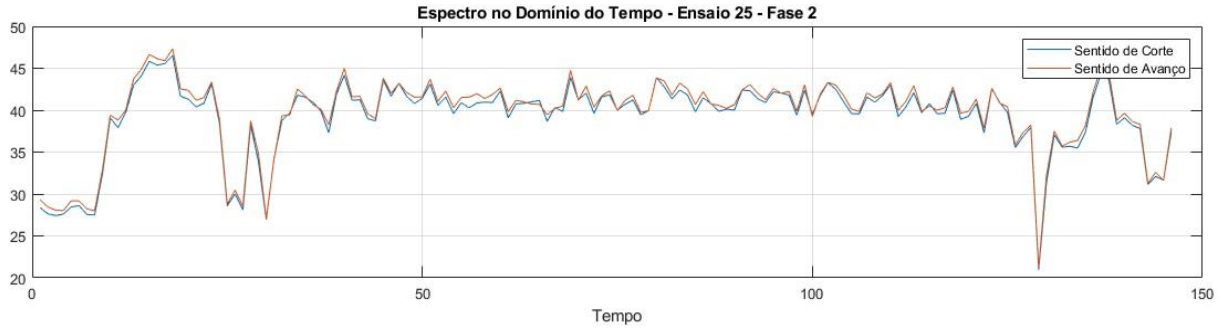
Fonte: Próprio Autor, 2019

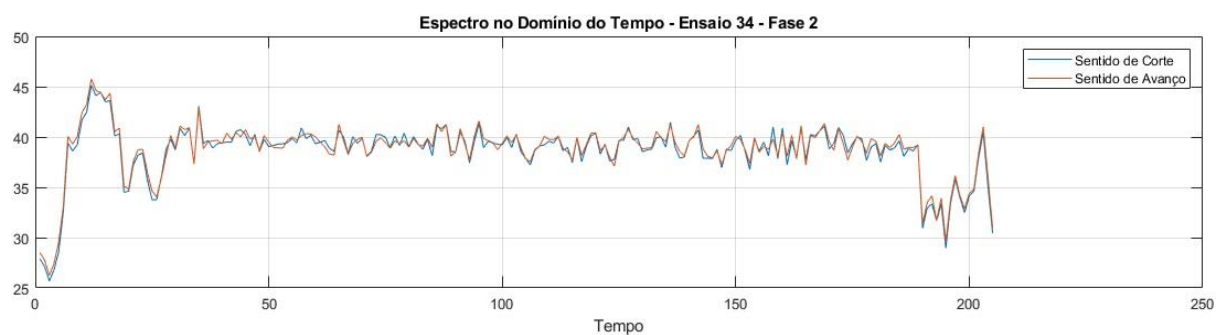
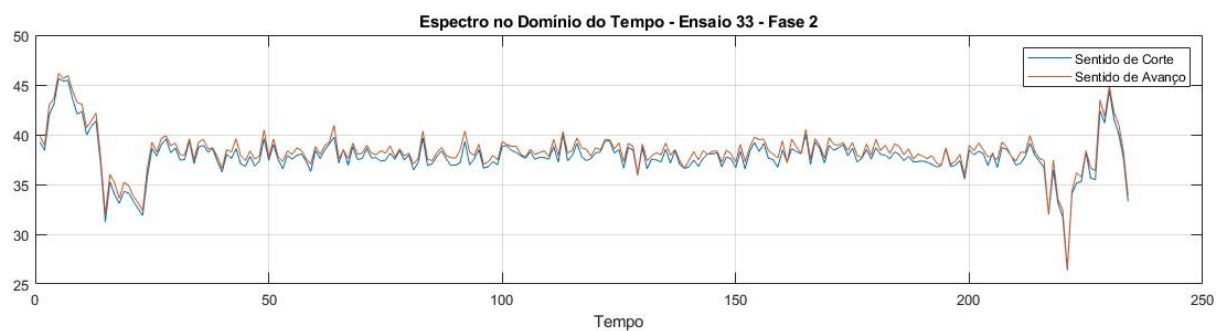
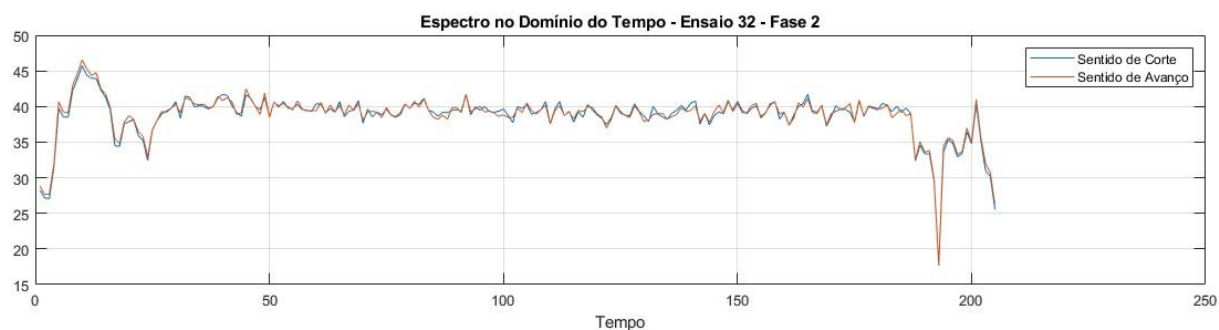
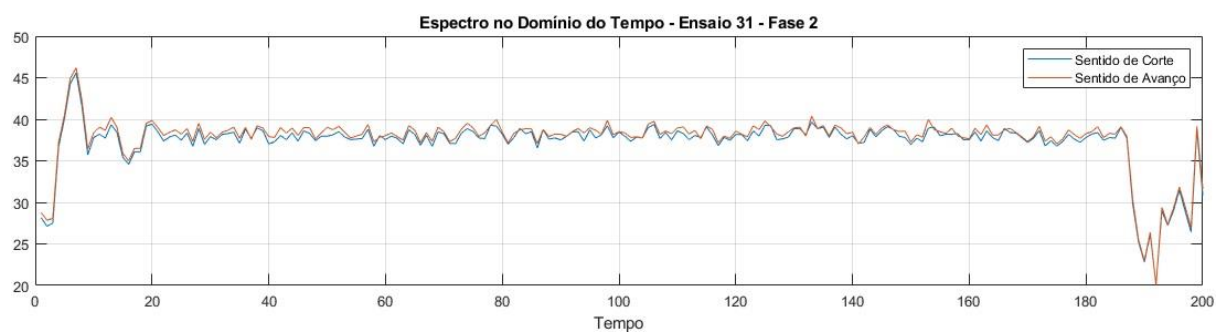
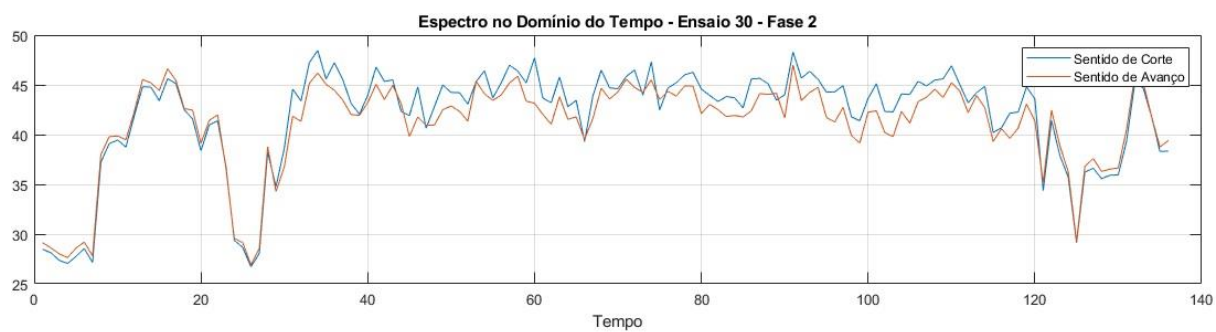
7.3.3 Espectros da Fase 2, com Inserto sem Revestimento

Figura 7.6: Fase 2, Inserto sem Revestimento (Peça 15 a 34)









Fonte: Próprio Autor, 2019