

**Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais
CEFET-MG/ Divinópolis**

**Departamento de Engenharia Mecatrônica
Curso de graduação em Engenharia Mecatrônica**

GIORDANO FRANCIS VIEIRA

**ESTUDO DA RELAÇÃO ENTRE A VIBRAÇÃO MECÂNICA E A RUGOSIDADE DE
CHAPAS NO FRESAMENTO UTILIZANDO O *CEPSTRUM* DE POTÊNCIA**

Divinópolis, 2015

GIORDANO FRANCIS VIEIRA

**ESTUDO DA RELAÇÃO ENTRE A VIBRAÇÃO MECÂNICA E A RUGOSIDADE DE
CHAPAS NO FRESAMENTO UTILIZANDO O *CEPSTRUM* DE POTÊNCIA**

Monografia de Trabalho de Conclusão de Curso
apresentada ao Colegiado de Graduação em Engenharia
Mecatrônica como parte dos requisitos exigidos para a
obtenção do título de Engenheiro Mecatrônico.
Áreas de integração: Mecânica e Controle.

Orientador: Prof. Dr. Wagner Custódio de Oliveira

Divinópolis, 2015

GIORDANO FRANCIS VIEIRA

**ESTUDO DA RELAÇÃO ENTRE A VIBRAÇÃO MECÂNICA E A RUGOSIDADE DE
CHAPAS NO FRESAMENTO UTILIZANDO O *CEPSTRUM* DE POTÊNCIA**

Monografia de Trabalho de Conclusão de Curso
apresentada ao Colegiado de Graduação em Engenharia
Mecatrônica como parte dos requisitos exigidos para a
obtenção do título de Engenheiro Mecatrônico.

Áreas de integração: Mecânica e Controle.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Wagner Custódio de Oliveira
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Prof. Dr. Emerson de Sousa Costa
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Prof. Me. Cláudio Parreira Lopes
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Divinópolis, 15 de maio de 2015.

Minha família: Maria da Conceição, José Francisco, Glauber, Gláucia e Laryssa. Vocês são peças fundamentais em minha existência, sem vocês nada disso seria possível, dedico esse trabalho a vocês.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Maria da Conceição Pereira Vieira e José Francisco Vieira, por acreditarem em minha vida, todo apoio e amor incondicional.

Aos meus irmãos, Glauber Francimar Vieira e Gláucia Maria Vieira, por sempre me proteger, me alegrar e pelos bons exemplos.

À minha namorada, Laryssa Costa Gomes. Obrigado por compreender as horas em que me fiz ausente, pelos auxílios e por me incentivar.

Ao professor Dr. Emerson de Sousa Costa por acreditar em meu potencial como aluno de iniciação científica, pelos ensinamentos e principalmente pela amizade.

Ao professor Dr. Wagner Custódio de Oliveira, por meu segundo projeto de iniciação científica, pelo acompanhamento e orientação.

Aos professores Me. Christian Gonçalves Herrera e Me. Cláudio Parreira Lopes, pelas disponibilidades e orientações fundamentais à realização desse trabalho.

Ao amigo Eng. Lucas Moreira Rossi, pela parceria, incentivo emocional e compartilhamento de conhecimento. Pela dedicação e comprometimento com nosso projeto de iniciação científica e meu TCC.

Ao Eng. Henderson Soares Madureira pela disponibilidade e por compartilhar as técnicas de fresamento e usinagem em geral.

Ao Eng. Nelson de Figueiredo Barroso, pelo auxílio na utilização do *software LabVIEW*.

Ao Sr. Aldeci Santos por intermediar e à empresa Sandvik do Brasil S/A por doar pastilhas de fresamento para este projeto.

À FAPEMIG pela concessão da bolsa de iniciação científica e apoio financeiro.

Aos amigos da primeira turma de Mecatrônica do CEFET-MG pelos momentos alegres e de estudos compartilhados. Tenho muito orgulho de fazer parte desse grupo.

Finalmente, a todos aqueles que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

"Se você cometeu algum erro, isso significa tempo de aprender e não de desistir."

Chico Xavier/André Luís

RESUMO

A qualidade do acabamento superficial de peças usinadas é influenciada significativamente pelo processo de usinagem, geometria da ferramenta de corte e pelos parâmetros de usinagem. Foi feito um estudo experimental para determinar a relação entre o acabamento de chapas de aço carbono ABNT 1020 e a vibração mecânica gerada durante o processo de fresamento com o objetivo de avaliar a influência de parâmetros de usinagem sobre a rugosidade das superfícies usinadas. Os parâmetros analisados foram a rotação, a profundidade de corte e a vibração durante a usinagem. O método empregado para realizar este estudo consistiu na variação de dois níveis de rotação e dois de profundidade de corte durante o fresamento de chapas. Para analisar a vibração, foi acoplado à mesa de uma fresadora um acelerômetro para a aquisição dos sinais de vibração. Esses dados foram obtidos no domínio do tempo e então tratados, utilizando o *Cepstrum* de potência, para que fosse possível identificar alguma fonte de modulação correlacionada com a usinagem das chapas. Para determinar a rugosidade foi utilizado um rugosímetro. Os resultados foram então correlacionados com os valores medidos de vibração mecânica de forma a caracterizar a influência da mesma no acabamento. Após realizar todos os experimentos conclui-se que de acordo com a análise de variância, os parâmetros de rotação e profundidade de corte não interferiram nos valores de rugosidade R_a e R_q . Porém, o parâmetro de profundidade de corte interferiu nos valores de rugosidade R_y e R_z , ou seja, deve existir uma desigualdade entre os procedimentos. Pode-se afirmar que os valores dos parâmetros de rotação e profundidade de corte relacionados à uma maior produtividade foram 460 rpm e 0,6 mm.

Palavras-chave: Rugosidade. Vibração mecânica. Fresamento de chapas. *Cepstrum* de potência.

ABSTRACT

The quality of machined surface is significantly influenced by the machining process parameters and the cutting tool geometry. An experimental study was conducted to determine the relationship between the work piece surface roughness of ABNT 1020 carbon steel plates and the vibration generated during the milling operation. The main objective was evaluated the influence of machining process parameters and the surface roughness. The parameters analyzed were the rotation, cutting depth and vibration during milling process. The method used in this work was the variation of two different levels of rotation and cutting depth during milling operation. An accelerometer sensor was attached to the table of the milling machine for the acquisition of vibration signals. These data were obtained in the time domain and then processed using a power cepstrum, in order that was possible to measure some source modulation-correlation for milling plates. To determine the surface roughness was used a portable surface roughness tester. The results were then correlated with the measured values of vibration in order to characterize its influence on the surface roughness. After performing all the experiments, it was possible concluded that the rotation and cutting depth does not interfere in the Ra and Rq roughness parameters but interfere in the Ry and Rz roughness parameters. It can be affirmed that the values of rotation parameters and cutting depth related to the best productivity for milling operation were 460 rpm and 0.6 mm.

Keywords: Roughness. Mechanical vibration. Milling plates. Power Cepstrum.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 – Fresamento concordante (Sandvik, 2015).	23
FIGURA 2.2 – Fresamento discordante (Sandvik, 2015).	24
FIGURA 2.3 – Movimento combinado (adaptado de USINAGEM, 2014)	24
FIGURA 2.4 – Fresamento frontal (ABNT, 1971)	25
FIGURA 2.5 – Profundidade de corte (a_p), largura de corte (a_e) (adaptado de ABNT, 1989)	26
FIGURA 2.6 – Movimentos e velocidades da ferramenta no fresamento (ABNT, 1989)	27
FIGURA 2.7 – Avanço por rotação (f), avanço por dente (f_z) no fresamento (adaptado de SANDVIK, 2014)	27
FIGURA 2.8 – Exemplo de classificação das superfícies: a) superfície geométrica; b) superfície real; c) superfície efetiva.....	30
FIGURA 2.9 – Exemplo de classificação dos perfis: a) perfil geométrico; b) perfil real; c) perfil efetivo	30
FIGURA 2.10 – Parâmetro de rugosidade média (R_a) (FACCIO, 2003)	31
FIGURA 2.11 – Perfil teórico de superfície usinada por fresamento frontal (MACHADO <i>et al.</i> , 2009)	32
FIGURA 2.12 – Parâmetro de rugosidade máxima (R_y) (MITUTOYO, 2014).	33
FIGURA 2.13 – Parâmetro de rugosidade R_z (MITUTOYO, 2014)	34
FIGURA 2.14 – Parâmetro de rugosidade R_q (adaptado de MITUTOYO, 2014).....	35
FIGURA 2.15 – Grandezas relacionadas a um sinal de vibração harmônico puro: a) função deslocamento; b) função da velocidade; c) função da aceleração (adaptado de NEPOMUCENO, 1989)	38
FIGURA 2.16 – Sinal obtido no tempo comparado com seu respectivo sinal convertido pelo <i>Cepstrum</i> de potência (adaptado de GUIMARÃES, COSTA e GONÇALVES, 2008)	44
FIGURA 2.17 – Exemplo de amostragem (LEITE, 2013)	45
FIGURA 2.18 – Exemplo de sistema para realizar amostragem (adaptado de FERNANDES, 2011)	48
FIGURA 3.1 – Máquina fresadora Diplomat 3001 (DEBMAQ, 2014)	49

FIGURA 3.2 – Ferramenta de corte APMT 100308PDER-DM (ZCCCT, 2014)	50
FIGURA 3.3 – Dimensões do corpo de prova	51
FIGURA 3.4 – Tacômetro digital TC-5030.....	52
FIGURA 3.5 – Acelerômetro <i>Delta Tron</i> 4514-B-001 (BRÜEL & KJAER, 2014)	53
FIGURA 3.6 – Conjunto módulo de aquisição NI USB-9233 e Transportador de dados NI USB-9162.....	53
FIGURA 3.7 – Rugosímetro <i>Surftest</i> SJ 201	54
FIGURA 3.8 – Corpo de prova utilizado na realização dos ensaios.....	55
FIGURA 3.9 – Imagem capturada durante um ensaio.....	56
FIGURA 3.10 – Instrumentação virtual para a aquisição de dados (ROSSI, 2014)	57
FIGURA 3.11 – <i>Cepstrum</i> (gráfico inferior) em relação ao sinal de vibração adquirido (gráfico superior) em um ensaio aleatório	58

LISTA DE TABELAS

TABELA 3.1 – Dados dimensionais da ferramenta APMT 100308PDER-DM (ZCCCT, 2014)	50
TABELA 3.2 – Parâmetros de usinagem variáveis	51
TABELA 3.3 – Dados do fabricante do acelerômetro <i>Delta Tron</i> 4514-B-001 (BRÜEL & KJAER, 2014).....	52
TABELA 3.4 – Dados do fabricante do módulo NI USB-9233 (NATIONAL INSTRUMENTS, 2007)	54
TABELA 4.1 – Dados de Rugosidade R_a	61
TABELA 4.2 – Dados de Rugosidade R_y	61
TABELA 4.3 – Dados de Rugosidade R_z	62
TABELA 4.4 – Dados de Rugosidade R_q	62
TABELA 4.5 – ANOVA para Rugosidade R_a	63
TABELA 4.6 – ANOVA para Rugosidade R_y	64
TABELA 4.7 – ANOVA para Rugosidade R_z	64
TABELA 4.8 – ANOVA para Rugosidade R_q	65
TABELA 5.1 – Valores médios de rugosidade.....	66
TABELA 5.2 – Comparação entre os valores médios de rugosidades e vibração	67

LISTA DE ACRÔNIMOS E NOTAÇÃO

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
A/D	Analogico/Digital
ANOVA	Analysis of Variance (Análise de Variância)
ASTM	American Society for Testing and Materials
D/A	Digital/Analógico
DAQmx	Data Acquisition System (Sistema de Aquisição de Dados mx)
F	Valor para distribuição de Fischer
F(CALC.)	Valor calculado para distribuição de Fisher
F(TAB.)	Valor tabelado para distribuição de Fisher
Hz	Hertz
ISO	International Organization for Standardization
PVD	Physical Vapor Deposition (Deposição Física de Vapor)
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
rpm	Rotações por minuto
TiAlN	Nitreto de titânio-alumínio
USB	Universal Serial Bus (Porta Serial Universal)

A	Amplitude (m)
A1	Porta digital usada como canal de comunicação
a_p	Profundidade de corte (mm)
a_e	Largura de corte (mm)
$a(t)$	Função da aceleração da massa(m/s^2)
$c(\tau)$	Função do <i>Cepstrum</i> de potência do sinal
d	Diâmetro da fresa (mm)
d_p	Diâmetro do furo da pastilha (mm)
f	Avanço por rotação (mm/rot)
f_r	Frequência (Hz)
f_z	Avanço por dente (mm/dente)
g	Faixa dinâmica de leitura de acelerômetro
H_0	Hipótese de nulidade

H_1	Hipótese alternativa
Hz	Hertz
I	Número de tratamentos
I(t)	Trem de impulsos
I.W	Largura da ferramenta (mm)
J	Número de repetições
k	Posição da amostra do sinal
KHz	Kilohertz
L	Comprimento da ferramenta (mm)
l _m	Comprimento amostrado (mm)
mA	Miliampère
mm	Milímetro
mV	Milivolt
n	Rotação da árvore da fresadora (rpm)
p ₁	Valor de pico na posição 1 (μm)
p ₂	Valor de pico na posição 2 (μm)
p ₃	Valor de pico na posição 3 (μm)
p ₄	Valor de pico na posição 4 (μm)
p ₅	Valor de pico na posição 5 (μm)
p _n	Valor de pico na posição n (μm)
R _a	Rugosidade média (μm)
R _q	Rugosidade quadrática média (μm)
R _y	Rugosidade máxima (μm)
R _z	Parâmetro de rugosidade R _z (μm)
r _ε	Raio de ponta da ferramenta (mm)
s	Segundos
S	Espessura da ferramenta (mm)
S(f)	Função densidade espectral de potência do sinal (W/Hz)
T	Período (s)
t	Tempo (s)
V	Volt
v _c	Velocidade de corte (m/min)
v _e	Velocidade efetiva de corte (m/min)
v _f	Velocidade de avanço (mm/min)

v_1	Valor de vale na posição 1 (μm)
v_2	Valor de vale na posição 2 (μm)
v_3	Valor de vale na posição 3 (μm)
v_4	Valor de vale na posição 4 (μm)
v_5	Valor de vale na posição 5 (μm)
v_n	Valor de vale na posição n (μm)
$v(t)$	Função da velocidade da massa (m/s)
$x(k)$	Sinal amostrado
$x(t)$	Função de deslocamento da massa(m)
$x^*(s)$	Função contínua construída com as amostras
$X(z)$	Transformada Z da sequência de dados $c(\tau)$
Y_P	Valor de pico (μm)
Y_V	Valor de vale (μm)
$y(t)$	Sinal contínuo no tempo
y_k^*	Sinal amostrado resultante
z	Número de dentes
$Z(x)$	Altura do perfil avaliado em qualquer posição x
\mathfrak{F}	Operador da transformada de <i>Fourier</i>
α	Nível de significância
δ	Função Delta de Dirac
θ	Ângulo de fase (rad)
μm	Micrômetro
τ	Quefrência (Hz)
φ	Ângulo de contato da fresa com a peça (rad)
Φ	Diâmetro (mm)
ω	Frequência angular (rad/s)
ω_N	Frequência de <i>Nyquist</i> (Hz)
ω_s	Frequência de amostragem (Hz)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	Definição do Problema	18
1.2	Motivação	19
1.3	Objetivo	19
2	FUNDAMENTOS	20
2.1	Revisão de Literatura	20
2.2	Metodologia	21
2.3	Fundamentação Teórica	22
2.3.1	O Processo de Fresamento	22
2.3.2	O Fresamento Frontal	25
2.3.3	Parâmetros do Fresamento Frontal	25
2.3.4	Rugosidade	29
2.3.5	Parâmetros de Rugosidade	31
2.3.6	Vibrações Geradas no Processo de Usinagem	35
2.3.7	Vibrações Mecânicas	36
2.3.8	Vibrações Geradas no Processo de Fresamento	39
2.3.9	Monitoramento das Vibrações Geradas no Processo de Fresamento ...	41
2.3.10	Cepstrum de potência	42
2.3.11	A Amostragem na Aquisição de Sinais	44
3	MATERIAIS E MÉTODOS	49
3.1	Materiais, Equipamentos, Ferramentas e Variáveis	49
3.2	Procedimento experimental	55
4	ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS	60
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	66
6	CONCLUSÕES	69
6.1	Trabalhos Futuros	70
	REFERÊNCIAS	71
	ANEXO A	74
	ANEXO B	77

1 INTRODUÇÃO

O presente trabalho apresenta a avaliação da relação entre a rugosidade e a vibração mecânica de chapas de aço carbono ABNT 1020, no processo de fresamento, variando-se os parâmetros de rotação e profundidade de corte em uma máquina fresadora.

O trabalho está subdividido em seis capítulos. No primeiro, são apresentadas as motivações para o seu desenvolvimento e objetivos a serem alcançados.

No Capítulo 2 é apresentada uma fundamentação teórica dos assuntos essenciais para a compreensão do trabalho. Em princípio, é realizada uma revisão da literatura para situar o presente estudo em relação a outros realizados em meio acadêmico. Em seguida, é descrita a metodologia utilizada. Por fim, são descritos os conceitos teóricos pertinentes ao tema: fresamento, rugosidade, vibrações no processo de usinagem, *Cepstrum* de potência e aquisições de sinais.

O Capítulo 3 apresenta a descrição progressiva de como os ensaios de fresamento foram realizados. Esse desenvolvimento do trabalho relata a fabricação dos corpos de prova, a escolha da ordem dos parâmetros de corte, o método utilizado no fresamento, o conjunto montado para a aquisição dos dados de vibração e procedimento para a medição da rugosidade na superfície da peça usinada.

O Capítulo 4 traz a análise estatística com base nos dados adquiridos no projeto. É realizada uma análise de variância com base nos dados de rugosidade medidos.

No Capítulo 5 são apresentados os principais resultados obtidos, a partir deles, são realizadas discussões sobre seus valores e significados.

Por fim, o Capítulo 6 traz as conclusões obtidas com base nas discussões do capítulo anterior e perspectivas para a continuidade de trabalhos e estudos posteriores.

1.1 Definição do Problema

A usinagem é uma atividade presente em todas as regiões do mundo. Operações realizadas nessa área conferem à peça um formato, determinada dimensão ou acabamento superficial ou ainda, uma combinação de qualquer um destes itens de forma a retirar material da peça. Dentre os processos de usinagem está o fresamento com sua enorme versatilidade de aplicação como também por sua grande capacidade de remoção de cavaco.

Antes de realizar o fresamento é necessário definir os valores parâmetros de corte que serão utilizados. A dificuldade consiste em tomar essa decisão, pois, cada parâmetro possui uma influência sobre o processo.

Ao fim de um processo de corte, as peças usinadas apresentam um determinado acabamento que deve ser adequado ao tipo de função que exercem. Este acabamento é medido por um rugosímetro cujos valores definem a rugosidade superficial. Portanto, é necessário adotar parâmetros de fresamento que possibilitem os menores valores possíveis de rugosidade.

Outra consequência do fresamento é a geração de vibrações no sistema que também influenciam no acabamento das peças. É necessário realizar um monitoramento da vibração mecânica durante o processo de fresamento que possibilite um melhor controle do acabamento da peça. A influência de cada parâmetro de usinagem sobre a vibração mecânica é tão complexa, que normalmente só pode ser aplicada para um determinado processo de corte em particular. Por isso é necessário realizar um estudo de quais parâmetros apresentam melhores resultados já que os resultados não podem ser generalizados para outras situações.

Neste sentido, estudos que relacionam acabamento e vibração nos processos de fabricação por usinagem são de fundamental importância para a fabricação de peças com qualidade superficial e melhor custo-benefício.

1.2 Motivação

O interesse em trabalhar o tema apresentado surgiu devido ao entusiasmo e familiarização do autor com a área de materiais e processos de fabricação. A partir da vontade de futuramente atuar nesse campo, foram feitos contatos com professores que ministraram disciplinas ligadas a esse eixo do ensino. Junto a isso, surgiu a oportunidade de participar e ser aprovado em um processo seletivo de um trabalho de iniciação científica ligado ao tema proposto.

Durante as disciplinas de Tecnologia de Fabricação Mecânica I e II foram estudados conceitos que se aplicam diretamente à engenharia, tais como processos de usinagem e métodos para análise, monitoramento e avaliação de superfícies usinadas. Para a aplicação de tais procedimentos faz-se uso de conceitos vistos em outras disciplinas, tais como: Metrologia e Materiais de Construção Mecânica - ligadas ao eixo de Mecânica - e Instrumentação e Controle Digital - voltadas para o eixo de Controle.

Aplicar as teorias estudadas em sala causa grande entusiasmo, pois para a obtenção e tratamentos dos dados coletados são utilizadas técnicas que envolvem transdução, transmissão e tratamento de sinais e desempenho de instrumentos, desdobramentos vistos na disciplina de Instrumentação Industrial, e procedimentos sobre amostragem e reconstrução de sinais, características de respostas - tópicos pertencentes ao Controle Digital.

Outra motivação diz respeito ao futuro. O aperfeiçoamento da técnica proposta neste projeto pode futuramente evoluir para uma técnica mais avançada, tal como o desenvolvimento de uma rede neural, para um possível trabalho de pós-graduação. Portanto, o projeto apresenta também relevância pessoal, pois existe a pretensão de que este trabalho seja o início de uma qualificação na área.

1.3 Objetivo

O objetivo fundamental deste trabalho é relacionar a rugosidade medida em chapas de aço carbono ABNT 1020, após serem fresadas, com a vibração mecânica gerada durante o processo. Para tal, os parâmetros de rotação e profundidade de corte na máquina fresadora durante o procedimento de corte são variados e a vibração medida.

2 FUNDAMENTOS

Neste capítulo são apresentadas de forma sucinta as teorias dos principais tópicos pertinentes à realização deste trabalho.

2.1 Revisão de Literatura

O acabamento de uma superfície fresada, por mais aperfeiçoado que seja o processo, apresenta irregularidades, mesmo que microscópicas. Essas imperfeições são tratadas como um parâmetro de qualidade, denominado rugosidade superficial. A necessidade de se ter um produto confiável, com superfície adequada para funções que necessitem estabilidade, alavancou a busca por melhores técnicas de usinagem.

Santos (2001) apresenta um procedimento baseado em redes neurais para analisar experimentalmente a influência dos principais parâmetros de fresamento no acabamento de uma superfície usinada e no desgaste das ferramentas. O trabalho envolve o fresamento frontal de barras de aço ABNT 1045 e condições de corte aleatórias a cada passo da ferramenta para tratamento da rede neural. Dentre os parâmetros avaliados, a vibração foi a que exerceu maior influência nos resultados para estimativa da rugosidade R_a e do desgaste da ferramenta.

Sick (2002) trata do monitoramento *on-line* em processos de usinagem com o objetivo de supervisionar o desgaste das ferramentas. Foram analisados métodos aplicados em outros trabalhos como forma de classificar os melhores e apontar possíveis direções para o desenvolvimento da área. Outra questão abordada é a vibração mecânica e suas possíveis causas. Entre suas conclusões, Sick (2002) afirma não ser possível generalizar os processos de fresamento.

Faccio (2003) investiga o acabamento superficial após usinagens em altíssima velocidade de corte. Foi realizado o fresamento de forma com que gradativamente a profundidade de corte tivesse seu valor alterado. Após o processo, foram analisados os parâmetros de rugosidade das peças usinadas e verificado que, quando comparados, a distância média entre picos apresenta melhores resultados para fresamento em altíssima velocidade. O autor também

verificou a dispersão entre os parâmetros de rugosidade e concluiu que em muitos casos, o aumento da profundidade de corte não ocasionou aumento nos parâmetros de rugosidade.

Guimarães, Costa e Gonçalves (2008) apresentam uma correlação entre valores de rugosidade e a amplitude dos sinais de vibração medidas durante o fresamento de uma liga ASTM-6351 T6. Para o tratamento dos dados coletados utilizou-se o *Cepstrum* de potência, que possibilitou a extração da periodicidade dos sinais associados à frequência de rotação e ao número de dentes da fresa.

Baseado nessas abordagens, o presente trabalho busca a investigação do tema proposto, de forma a se obter uma fundamentação teórica na área de parâmetros de fresamento, rugosidade e análise de vibrações mecânicas.

2.2 Metodologia

Para o desenvolvimento do trabalho, foi feito um planejamento em cinco etapas. A primeira consistiu em definir os objetivos do projeto. Foram decididas quais áreas seriam abordadas e quais parâmetros de corte seriam e os níveis de alteração de seus valores. Foi feito um levantamento de insumos e equipamentos disponíveis para utilização, confirmando assim, a possibilidade de realizar o trabalho.

A etapa seguinte foi realizar um levantamento de outros trabalhos da área. Depois de finalizada, foram realizadas comparações com os trabalhos mais próximos ao tema deste projeto, a fim de estimar quais resultados seriam possíveis.

Em seguida, foi realizado um estudo teórico com temas relevantes à área do trabalho. Foram definidas quais abordagens seriam adotadas em relação à rugosidade, vibração mecânica, *Cepstrum* de potência e aquisições de sinais.

A próxima etapa consistiu em um estudo dos métodos e procedimentos que seriam adotados para a realização dos ensaios de fresamento. De imediato foram revistos procedimentos para a utilização dos equipamentos, tais como a máquina fresadora, tacômetro digital, rugosímetro e conjunto para aquisição de sinais. Em seguida foram escolhidos os valores dos parâmetros de corte que seriam utilizados e a posição onde o acelerômetro seria afixado.

O passo posterior constituiu na preparação dos corpos de prova. Logo após, foram definidos que a configuração dos parâmetros de corte seria realizada de forma aleatória. Com isso, foram realizados os procedimentos de fresamento e adquiridos os sinais de vibração em tempo real. Por fim, todas as peças usinadas tiveram a rugosidade de suas superfícies medidas.

A última etapa consistiu em tratar os dados coletados utilizando o *Cepstrum* de potência.

2.3 Fundamentação Teórica

Nesse item, são apresentados os conceitos teóricos relevantes ao tema do trabalho, são tratados temas como rugosidade, vibrações no processo de usinagem, *Cepstrum* de potência e aquisições de sinais.

2.3.1 O Processo de Fresamento

Santos (2013) define a usinagem como o ato de remover material de uma matéria bruta. A usinagem possui diversos fatores que influenciam no resultado desejado. Isso se deve principalmente as combinações de parâmetros de entradas que o processo possui: material da ferramenta, material da peça, geometria da ferramenta, parâmetros de corte e o maquinário usado.

O fresamento é um dos processos de usinagem mais empregados na indústria atual. Segundo Machado *et al.* (2009), essa operação é reconhecida pela versatilidade na produção de geometrias diversas, além de aspectos como alta taxa de remoção de material, boa precisão dimensional e geométrica. Além de ser um processo de elevada flexibilidade, sendo utilizado na fabricação de superfícies planas, contornos, ranhuras e cavidades.

De acordo com Diniz, Marcondes e Coppini (2006), o processo de fresamento utiliza uma ferramenta denominada fresa, que é provida de arestas cortantes dispostas simetricamente em torno de um eixo, cuja rotação proporciona o movimento de corte. O movimento de avanço é geralmente feito pela própria peça durante a usinagem, que está fixada na mesa da máquina, a qual obriga a peça a passar sob a ferramenta em rotação, que lhe dá forma e dimensão desejadas.

Segundo Krabbe (2006) o processo de fresamento pode ser classificado em relação a disposição dos dentes ativos da fresa como frontal ou tangencial. O fresamento tangencial é definido como o processo no qual o eixo da fresa é paralelo à superfície fresada.

De acordo com Krabbe (2006), o fresamento tangencial pode ser dividido em fresamento concordante e discordante. Para isso, define-se o ângulo de contato φ , este representa o ângulo delimitado pela linha radial que passa pelo centro da fresa até o ponto de contato dente-peça e outra linha que passa pelo ponto onde a espessura de cavaco é zero.

Krabbe (2006) define o fresamento concordante como sendo o fresamento no qual, na região de penetração do dente da fresa na peça, o sentido do movimento de corte coincide com o sentido do movimento de avanço. Neste tipo de movimento quando a aresta de corte penetra na peça, o cavaco tem espessura máxima e prossegue até atingir um valor de espessura igual a zero. Com isso, o ângulo φ começa com um valor máximo e decresce até zero. A Figura 2.1 mostra um exemplo desse conceito, destacando o início da retirada de material da peça.

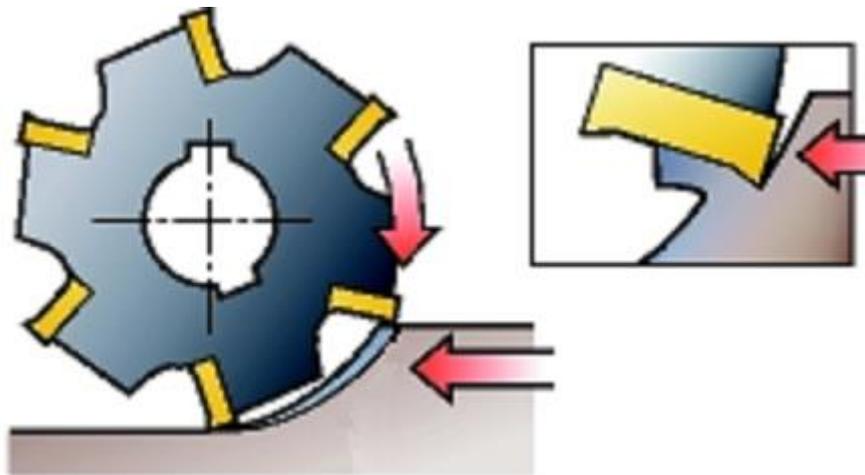


FIGURA 2.1 – Fresamento concordante (Sandvik, 2015).

Segundo Krabbe (2006), o fresamento discordante, ocorre quando o sentido do movimento de corte, na região de penetração do dente na peça é contrário ao sentido do movimento de avanço. Neste fresamento, a espessura de corte aumenta progressivamente de zero até um valor máximo. Para este sentido de movimento, o ângulo φ cresce de zero até um valor máximo. A Figura 2.2 mostra um exemplo desse conceito, destacando a retirada de material da peça.

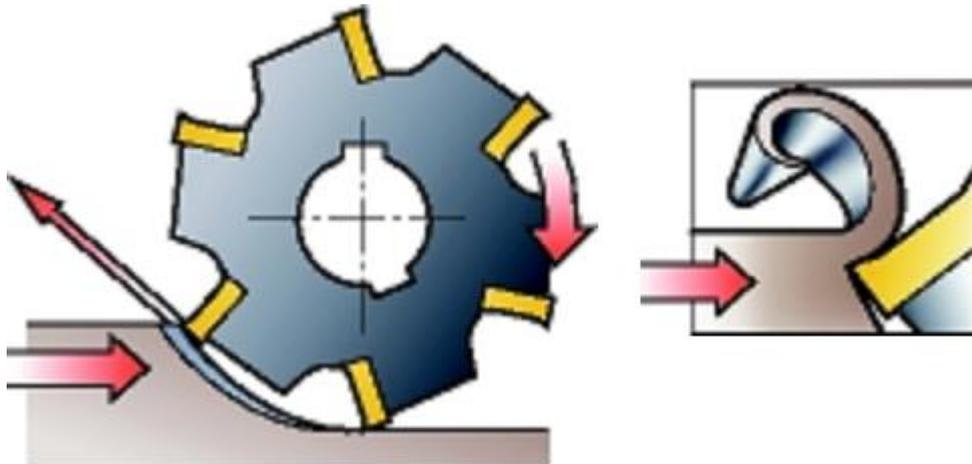


FIGURA 2.2 – Fresamento discordante (Sandvik, 2015).

De acordo com Krabbe (2006), no fresamento frontal, os conceitos de fresamento concordante e discordante não são totalmente aplicáveis, pois a primeira metade do contato do dente da fresa com a peça, a espessura de corte cresce (o que poderia ser chamado de corte discordante) e na segunda metade deste contato, a espessura diminui (o que poderia ser chamado de corte concordante), formando assim um movimento combinado de ambos. A Figura 2.3 mostra como esse movimento ocorre.

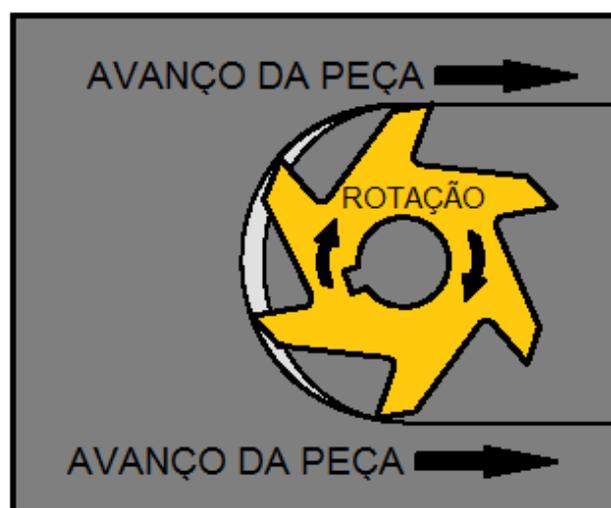


FIGURA 2.3 – Movimento combinado (adaptado de USINAGEM, 2014).

2.3.2 O Fresamento Frontal

Segundo ABNT (1971), o fresamento frontal é definido como o processo destinado à obtenção de superfície plana perpendicular ao eixo de rotação da ferramenta. A Figura 2.4 mostra um exemplo de fresamento frontal.

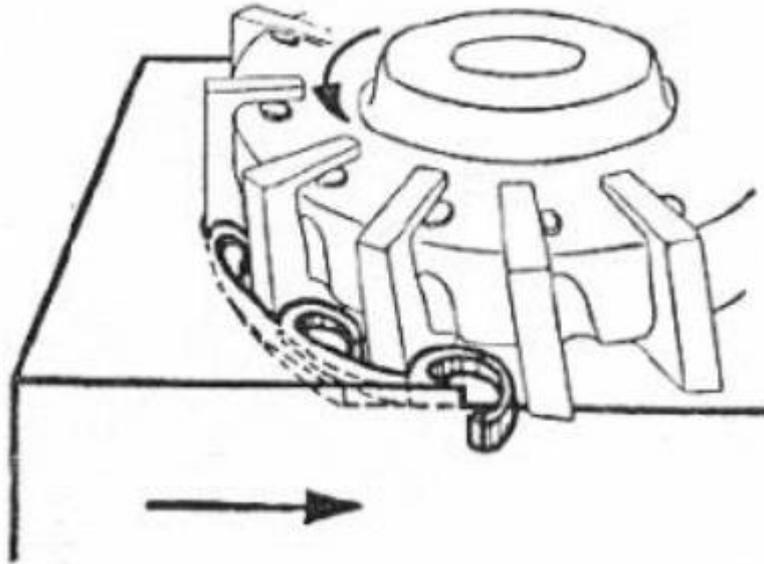


FIGURA 2.4 – Fresamento frontal (ABNT, 1971).

2.3.3 Parâmetros do Fresamento Frontal

Antes de iniciar um processo de fresamento é importante definir alguns parâmetros que são essenciais na configuração do sistema.

A profundidade de corte (a_p) é a quantidade que a ferramenta penetra na peça, medida perpendicularmente ao plano de trabalho (DINIZ, MARCONDES e COPPINI, 2006), como é possível observar na Figura 2.5.

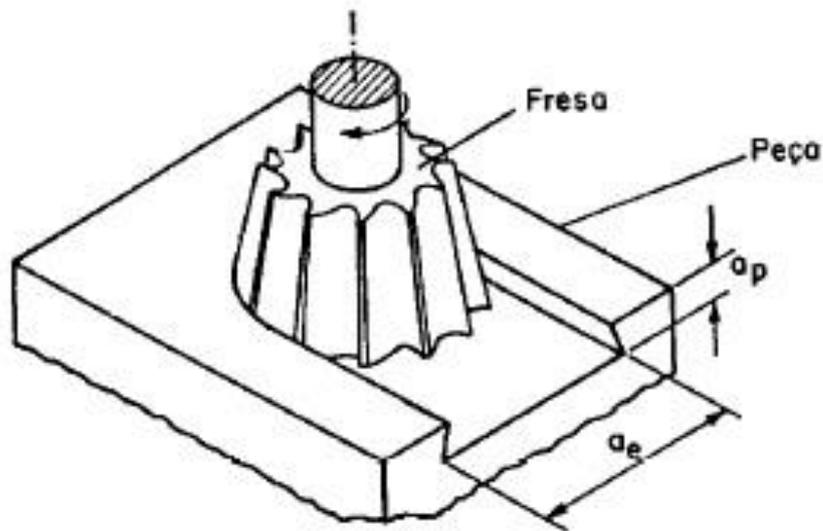


FIGURA 2.5 – Profundidade de corte (a_p), largura de corte (a_e) (adaptado de ABNT, 1989).

A largura de corte (a_e) é a quantidade que a ferramenta penetra na peça, medida no plano de trabalho e perpendicular a direção de avanço (DINIZ, MARCONDES e COPPINI, 2006). A Figura 2.5 ilustra esse conceito.

Segundo Machado *et al.* (2009), a velocidade de corte (v_c) é a velocidade instantânea do ponto de referência da aresta cortante da ferramenta, segundo a direção e o sentido do corte. A v_c é obtida pela Equação 2.1.

$$v_c = \frac{\pi d n}{1000} \quad (2.1)$$

Em que:

v_c – velocidade de corte (m/min);

d – diâmetro da fresa (mm);

n – rotação da árvore da fresadora (rpm).

A Figura 2.6 mostra os movimentos e as velocidades da ferramenta no fresamento.

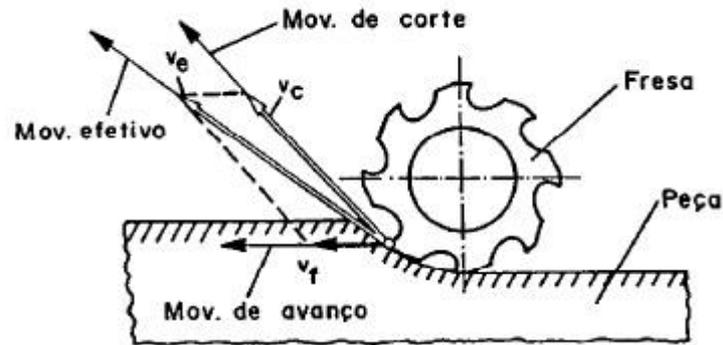


FIGURA 2.6 – Movimentos e velocidades da ferramenta no fresamento (ABNT, 1989).

De acordo com Sandvik (2014), o avanço por rotação (f) é um valor que indica a distância percorrida pela ferramenta durante uma rotação completa. É usado em cálculos de avanço e geralmente pode determinar a capacidade de acabamento de uma fresa. A Figura 2.7 ilustra esse conceito.

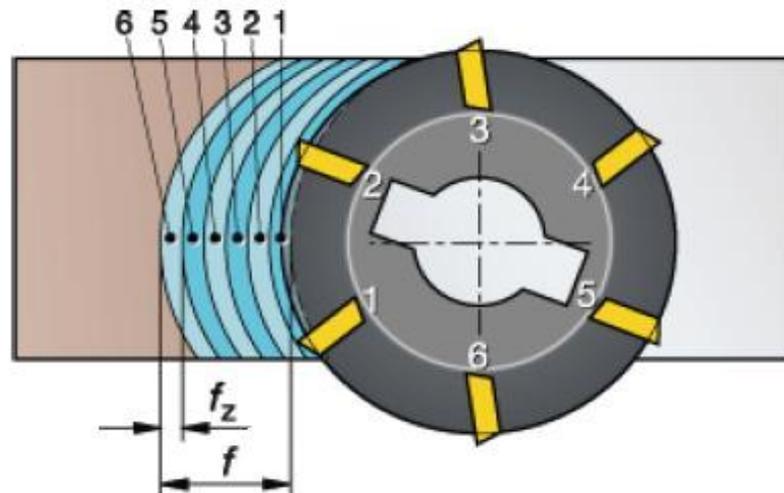


FIGURA 2.7 – Avanço por rotação (f), avanço por dente (f_z) no fresamento (adaptado de SANDVIK, 2014).

Segundo Machado *et al.* (2009), o avanço por dente (f_z) ocorre no caso de ferramenta que possuem mais de um dente, como a fresa. O f_z representa o percurso de avanço de cada dente medido na direção de avanço da ferramenta. A representação dessa grandeza é mostrada na Figura 2.7.

De acordo com Machado *et al.* (2009), o avanço (f) por ser representado pela Equação 2.2.

$$f = f_z \cdot z \quad (2.2)$$

Em que:

f – avanço por rotação (mm/rot);

f_z – avanço por dente (mm/dente);

z – número de dentes.

Sandvik (2014) define a velocidade de avanço (v_f) ou avanço da mesa como o movimento da ferramenta com relação à peça, dependendo do avanço por dente (f_z) e do número de dentes da fresa (z). Essa relação é dada pela Equação 2.3.

$$v_f = f_z \cdot n \cdot z \quad (2.3)$$

Em que:

v_f – velocidade de avanço (mm/min)

n – rotação da árvore da fresadora (rpm).

f_z – avanço por dente (mm/dente);

z – número de dentes.

Segundo Sandvik (2015), o ângulo de posição ocorre entre a aresta principal de corte da pastilha e a superfície da peça. Esse ângulo afeta diretamente a espessura de cavacos, forças de corte e vida útil da ferramenta. Reduzido o ângulo de posição ϕ em arestas retas, diminui-se a espessura de cavacos para uma determinada faixa de avanço por dente. Os ângulos de posição pequenos oferecem uma posição mais gradual no corte, reduzindo a pressão radial e protegendo a aresta de corte. Porém, as forças axiais mais altas ocorrem com a diminuição dos ângulos de posição.

2.3.4 Rugosidade

A superfície de uma peça usinada, por melhor que seja o processo efetuado, apresenta irregularidades. Ao analisar detalhadamente a região cortada, de acordo com Rosa (2005), são observadas saliências e reentrâncias irregulares causadas pela ação da ferramenta de corte. O conjunto dessas imperfeições que caracterizam o plano trabalhado define a rugosidade.

O acabamento superficial depende diretamente da rugosidade. Ele possui influência na atuação de componentes mecânicos. Conforme Rosa (2005), o desempenho de um ajuste acoplado, o atrito entre elementos, a resistência à corrosão, ao desgaste e a fadiga, vedação, aparência e além de outras aplicações, são dependentes da qualidade do acabamento da superfície.

Embora seja algo natural, a rugosidade pode indicar algumas instabilidades no sistema de usinagem. Segundo Rosa (2005), ao analisar a amplitude, a orientação e o grau das irregularidades, é possível determinar falhas que ocorrem devido a anormalidades do processo de fresamento tais como vibrações mecânicas e/ou desgastes da ferramenta, que podem influenciar no processo.

Antes de desenvolver uma investigação aprofundada é essencial definir alguns conceitos básicos. De acordo com ABNT (2002), a NBR ISO 4287 tem por objetivo especificar termos, definições e parâmetros para a determinação do estado da superfície (rugosidade, ondulação e perfil primário) pelo método do levantamento do perfil. Portanto, os termos citados serão embasados nesta norma.

A superfície da peça é classificada de acordo com seu estado. A superfície geométrica é considerada ideal quando possui um acabamento sem imperfeições. Outra especificação é chamada de superfície real que, segundo ABNT (2002), limita o corpo e o separa do meio ambiente. Ou seja, é a face resultante do processo de usinagem, avaliada visualmente. Por fim, têm-se a superfície efetiva que corresponde à área dada como resposta pelo método de medição sem que ocorra uma filtragem, e que, dependendo do procedimento, pode apresentar diferentes superfícies efetivas para a mesma região. A Figura 2.8 exemplifica a diferença entre tais classificações.

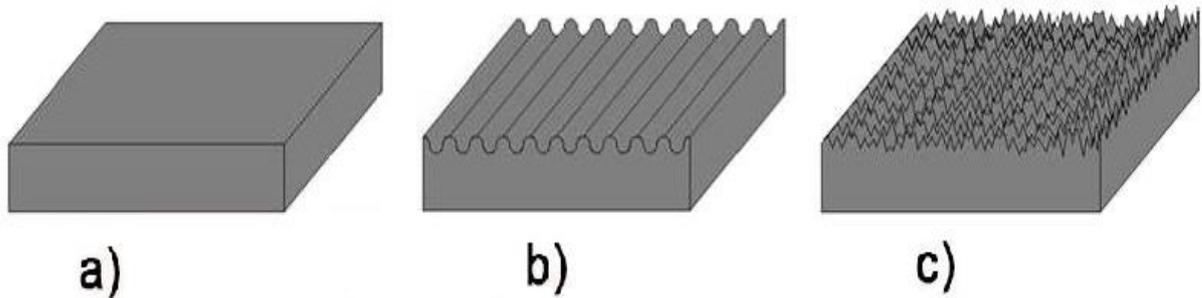


FIGURA 2.8 – Exemplo de classificação das superfícies: a) superfície geométrica; b) superfície real; c) superfície efetiva.

Traçando um plano específico de forma que ocorra uma interseção com a superfície trabalhada é encontrado o perfil da mesma. De forma análoga à classificação das superfícies, os perfis são denominados como geométricos, reais ou efetivos, dependendo da área a qual interceptam. A Figura 2.9 mostra a diferença entre os tipos de perfis.

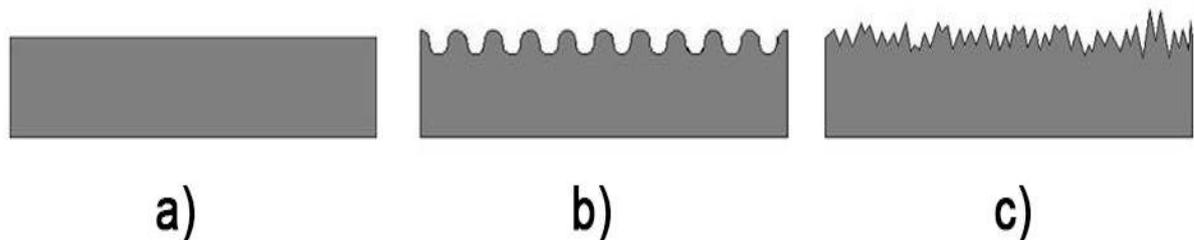


FIGURA 2.9 – Exemplo de classificação dos perfis: a) perfil geométrico; b) perfil real; c) perfil efetivo.

De acordo com ABNT (2002), ao realizar uma filtragem do perfil efetivo, de forma a eliminar os componentes de comprimento de ondas longas, é encontrado o perfil de rugosidade. Este serve como base para a avaliação de seus parâmetros.

O erro de forma é outro parâmetro adquirido do perfil efetivo. Faccio (2003) discute esse conceito, o qual afirma ser arbitrário, e o define como uma medição do afastamento de forma de uma superfície com seu formato de projeto.

Outro elemento que é obtido a partir do perfil efetivo é o denominado perfil de ondulação. ABNT (2002) indica que este perfil é adquirido após a aplicação de filtros específicos para extinguir os componentes de comprimento de ondas curtas e longas. Faccio (2003) define o perfil de ondulação como toda sinuosidade periódica presente em uma escala intermediária entre a rugosidade e o erro de forma.

2.3.5 Parâmetros de Rugosidade

Para avaliar os perfis de rugosidade devem-se adotar parâmetros que possibilitem essa análise. O conceito de rugosidade média (R_a) é bastante difundido em estudos na área. Santos (2001), Faccio (2003), Guimarães, Costa e Gonçalves (2008) são alguns dos pesquisadores que utilizaram esse parâmetro em seus trabalhos. A rugosidade média é usualmente definida como o valor médio dos desvios de um perfil em referência a uma linha média, sobre um comprimento amostrado. Ela é expressa pela Equação 2.4.

$$R_a = \frac{1}{l_m} \int_0^{l_m} |Z(x)| dx \quad (2.4)$$

Em que:

R_a – rugosidade média (μm);

l_m – comprimento amostrado (mm);

$Z(x)$ – altura do perfil avaliado em qualquer posição x .

Para uma melhor compreensão da Equação 2.4 é apresentado um exemplo gráfico desta operação matemática na Figura 2.10.

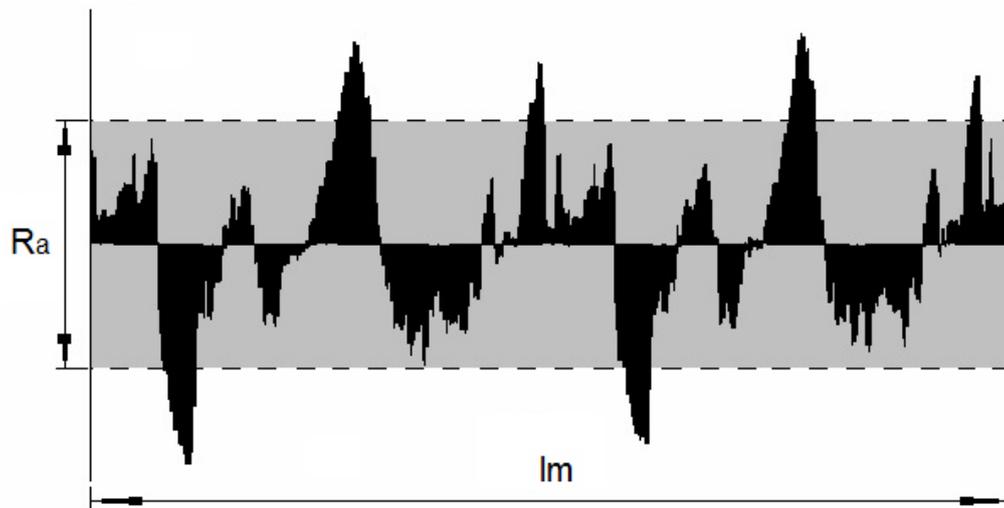


FIGURA 2.10 – Parâmetro de rugosidade média (R_a) (FACCIO, 2003).

Segundo Machado *et al.* (2009) em uma operação de fresamento frontal a rugosidade média pode ser teoricamente calculada pela Equação 2.5. A simbologia é mostrada na Figura 2.11.

$$R_a = \frac{r_\varepsilon - \sqrt{r_\varepsilon^2 - \left(\frac{f_z}{2}\right)^2}}{2} \quad (2.5)$$

Em que:

R_a – rugosidade média (μm);

f_z – avanço por dente (mm/dente);

r_ε – raio de ponta da ferramenta (mm).

Segundo Rebrac (2014), a rugosidade média possui a vantagem de ser consideravelmente difundida mundialmente, visto que, grande parte dos equipamentos apresenta esse parâmetro como critério de avaliação da qualidade superficial. Porém, existe a desvantagem de distorcer valores ao não apontar pontos extremos, o que pode omitir defeitos, e não caracterizar a distinção de picos e vales.

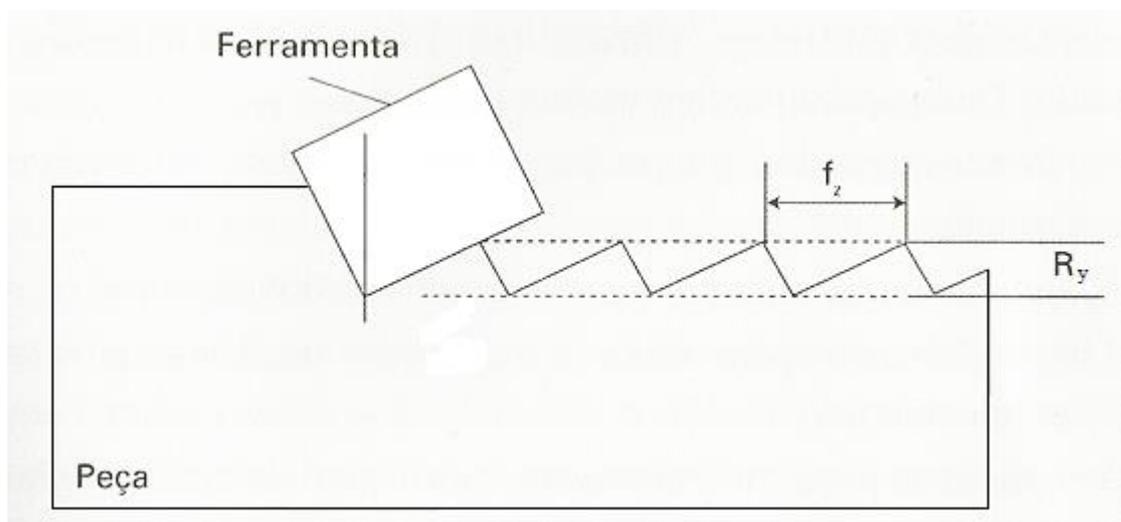


FIGURA 2.11 – Perfil teórico de superfície usinada por fresamento frontal (MACHADO *et al.*, 2009).

De acordo com Mitutoyo (2014), o parâmetro R_y , ou rugosidade máxima, é definido como o maior afastamento existente entre picos e vales dentro do comprimento do perfil de rugosidade analisado. Para mensurá-lo é necessário somar

o valor de pico mais elevado e o de vale mais profundo. Para uma melhor concepção do conceito é apresentado um exemplo gráfico na Figura 2.12.

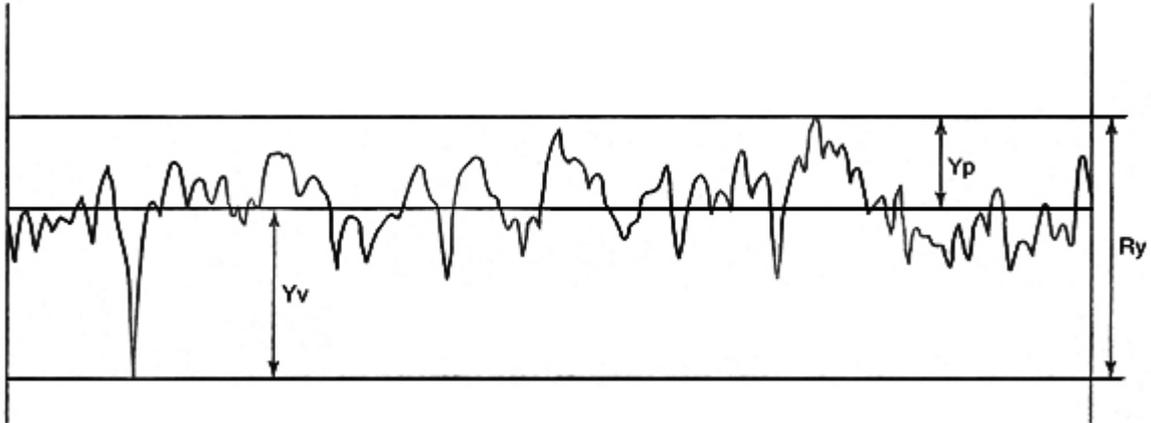


FIGURA 2.12 – Parâmetro de rugosidade máxima (R_y) (MITUTOYO, 2014).

Entre as vantagens do parâmetro R_y , segundo Rebrac (2014), está o fato de indicar a máxima deterioração da superfície vertical, complementando assim, a principal desvantagem do parâmetro R_a . Porém, quando analisado de forma particular, não é suficiente em informar o formato da superfície, e conseqüentemente, podem existir diferentes modelos de superfície com o mesmo valor de R_y .

De acordo com Mitutoyo (2014), a rugosidade R_z é descrita como a média aritmética dos 5 maiores valores de distância entre pico e vale dentro de um comprimento de amostragem. A Equação 2.6 expressa essa relação.

$$R_z = \frac{1}{5} (\sum_{n=1}^5 p_n + \sum_{n=1}^5 v_n) \quad (2.6)$$

Em que:

R_z – parâmetro de rugosidade R_z (μm);

p_n – valor de pico na posição n ;

v_n – valor de vale na posição n .

A Figura 2.13 apresenta um exemplo gráfico para uma melhor assimilação do conceito. Como é possível perceber, são selecionados os 5 maiores valores de pico e de vale para o cálculo do parâmetro.

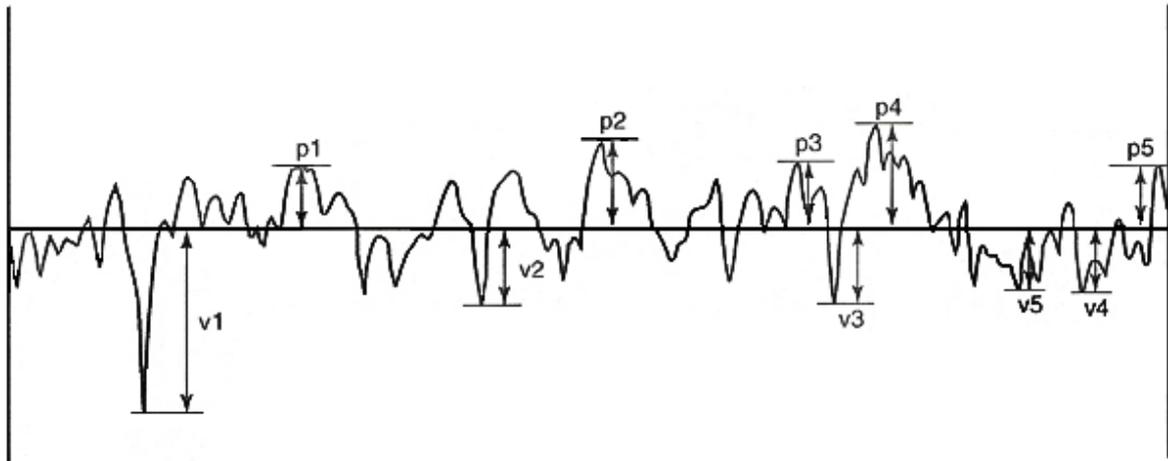


FIGURA 2.13 – Parâmetro de rugosidade R_z (MITUTOYO, 2014).

Segundo Rebrac (2014), uma das vantagens do parâmetro R_z é ser uma definição mais precisa da qualidade superficial analisada, isso ocorre devido ao aumento no número de amostradas coletadas no mesmo comprimento de superfície. Além disso, sua resposta se torna mais precisa em relação às alterações de rugosidade de perfil, porque o parâmetro analisa os pontos máximos dos perfis e não a média de toda a superfície. Porém, existe uma diferença de conotação entre alguns países onde os instrumentos para medição utilizam o conceito de R_z de forma distinta, e isso pode levar a erros se não for constatado previamente. Portanto, essa é uma desvantagem que precisa ser eliminada antes dos exames superficiais.

Ao analisar os parâmetros R_y e R_z em conjunto, é possível perceber que caso indiquem valores similares, provavelmente o acabamento superficial analisado é consistente, e caso indiquem valores muito distintos, possivelmente existem imperfeições superficiais consideráveis.

De acordo com Mitutoyo (2014), a rugosidade quadrática média (R_q) é baseada na amplitude do perfil de rugosidade em um determinado comprimento, e é definida como a raiz quadrática média dos quadrados das amplitudes do perfil dentro do comprimento de amostragem. Esse conceito é descrito pela Equação 2.7.

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{l_m} \int_0^{l_m} Z^2(x) dx} \quad (2.7)$$

Em que:

R_q – rugosidade quadrática média (μm);

l_m – comprimento amostrado (mm);

$Z(x)$ – altura do perfil avaliado em qualquer posição x .

A Figura 2.14 apresenta um exemplo gráfico para uma melhor compreensão do conceito da rugosidade R_q .

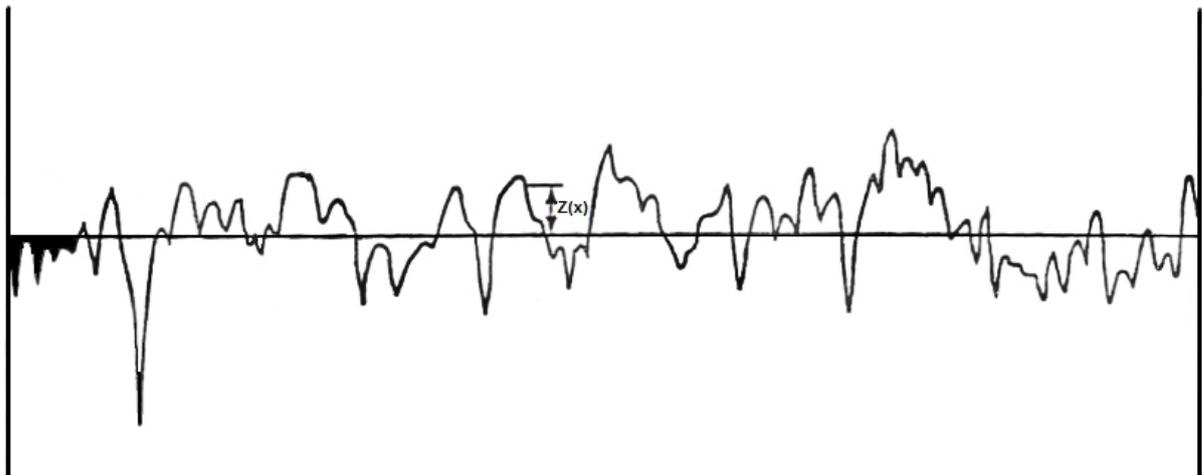


FIGURA 2.14 – Parâmetro de rugosidade R_q (adaptado de MITUTOYO, 2014).

Segundo Nunes (2011), a rugosidade quadrática média possui a vantagem de evidenciar irregularidades no acabamento superficial, pois, devido ao termo que eleva a altura de picos e vales ao quadrado, conforme Equação 2.7, os desvios são destacados, favorecendo assim a sua correção.

2.3.6 Vibrações Geradas no Processo de Usinagem

Os processos de usinagem são acompanhados de vibrações entre a ferramenta e a peça. Segundo Duarte *et al.* (2003), durante a operação da máquina, vários modos próprios de vibração do sistema são excitados e a amplitude com que estes modos vibram refletem as características de rigidez do sistema, a inércia, as

tolerâncias de fabricação, níveis de fricção entre as partes, choques mecânicos e outros parâmetros típicos do sistema.

Vibrações também podem ser providas por fontes externas, tais como, desconformidade do material usinado, oscilações do solo causadas por outras máquinas ferramenta presentes no ambiente, folgas na própria máquina ferramenta, vibrações auto excitadas causadas pelo próprio processo de usinagem, além de defeitos da máquina ferramenta, dentre outras causas. Antes de se aprofundar nas vibrações geradas no processo de fresamento, é conveniente mostrar uma breve fundamentação sobre vibrações.

2.3.7 Vibrações Mecânicas

De acordo com Nepomuceno (1989), a vibração é um movimento oscilatório de um sistema dinâmico saindo de sua posição de estabilidade. A vibração é resultante da troca entre as energias cinética e potencial que são naturalmente armazenadas pelo sistema. O exemplo clássico utiliza um modelo massa-mola, onde ao aplicar determinada força sobre uma massa fixada a uma mola, ocorrerá uma movimentação partindo do ponto de repouso até os limites inferior e superior e posteriormente retornará à posição de equilíbrio. O deslocamento máximo alcançado pela massa é chamado de amplitude. O movimento completo recebe a denominação de ciclo. O tempo que a massa leva para executar um ciclo completo é denominado período. A vibração é caracterizada pela realização de diversos ciclos completos em uma determinada unidade de tempo e a quantidade executada recebe o nome de frequência. A Equação 2.8 descreve a relação entre o período e a frequência.

$$f_r = \frac{1}{T} \quad (2.8)$$

Em que:

f_r – frequência (Hz);

T – período (s).

Segundo Nepomuceno (1989), caso a relação básica entre as amplitudes de deslocamento e aceleração da massa ocorra de modo que a segunda seja diretamente proporcional à primeira, ocorrerá um movimento harmônico simples. A função de deslocamento retilíneo da massa em relação ao ponto de equilíbrio pode ser descrita matematicamente pela Equação 2.9.

$$x(t) = A \operatorname{sen}(\omega t + \theta) \quad (2.9)$$

Em que:

$x(t)$ – função de deslocamento da massa(m);

A – amplitude (m);

ω – frequência angular (rad/s);

t – tempo(s);

θ – ângulo de fase (rad).

Conforme Nepomuceno (1989), a função da velocidade da massa é obtida derivando a função de deslocamento da massa em relação ao tempo conforme apresentado pela Equação 2.10.

$$v(t) = \frac{dx}{dt} = A \omega \cos(\omega t + \theta) \quad (2.10)$$

Em que:

$v(t)$ – função da velocidade da massa (m/s);

A – amplitude (m);

ω – frequência angular (rad/s);

t – tempo(s);

θ – ângulo de fase (rad).

De acordo com Nepomuceno (1989), a função da aceleração da massa é obtida derivando a função da velocidade da massa em relação ao tempo conforme apresentado pela Equação 2.11.

$$a(t) = \frac{dv}{dt} = -A \omega^2 \text{sen}(\omega t + \theta) \quad (2.11)$$

Em que:

$a(t)$ – função da aceleração da massa (m/s^2);

A – amplitude (m);

ω – frequência angular (rad/s);

t – tempo (s);

θ – ângulo de fase (rad).

A Figura 2.15 ilustra graficamente a relação entre as grandezas demonstradas anteriormente. A imagem foi modificada para adequação com a notação matemática adotada.

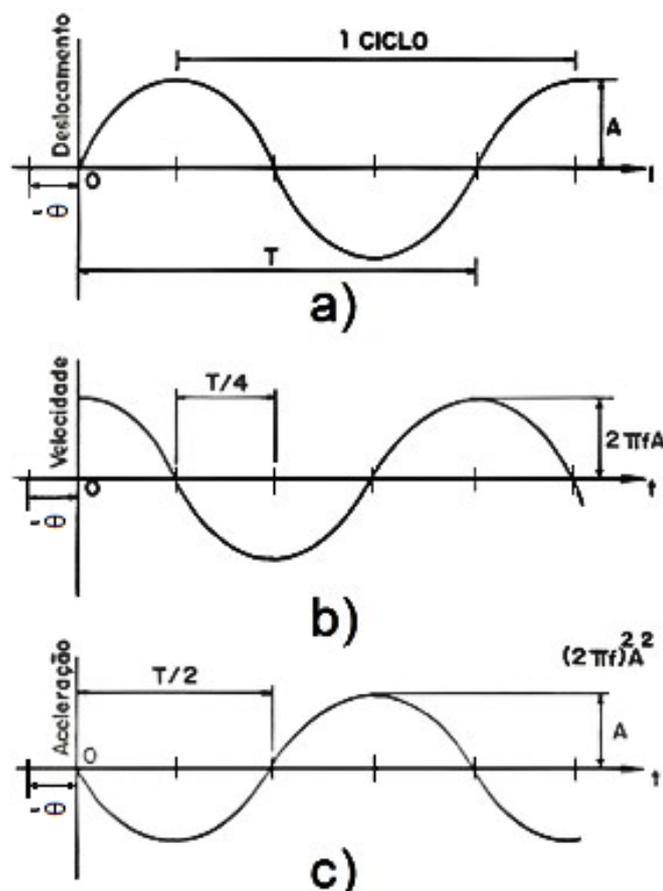


FIGURA 2.15 – Grandezas relacionadas a um sinal de vibração harmônico puro: a) função deslocamento; b) função da velocidade; c) função da aceleração (adaptado de NEPOMUCENO, 1989).

No processo de fresamento a maior parcela das vibrações existentes não contém movimento harmônico puro, podendo ser caracterizadas como movimentos periódicos. Segundo Silva (2010), as vibrações são produzidas por variações cíclicas nas componentes dinâmicas das forças. Os movimentos vibracionais são descritos como iniciando com pequenas trepidações devido aos pequenos serrilhamentos na superfície da peça e irregularidades na espessura do cavaco, e sua continuidade gera a vibração propriamente dita.

De acordo com Dimla (2000), a medição direta da vibração é difícil de ser conseguida por causa de seu aspecto característico, pois o modo de vibração é dependente da frequência. Portanto, parâmetros relacionados como a taxa com que as forças dinâmicas mudam por unidade de tempo (aceleração) são medidas e as características de vibração derivadas desses padrões obtidos.

2.3.8 Vibrações Geradas no Processo de Fresamento

Durante o processo de fresamento ocorrem vibrações devido à ação de forças dinâmicas atuantes na execução do corte. De acordo com Cheng (2009), o ciclo de impactos e variação da força de corte induzem vibrações entre a ferramenta e a peça. Além disso, podem fornecer energia que excite uma vibração de modo natural em qualquer parte do sistema máquina-ferramenta. Para que não haja degradação na superfície usinada e a precisão do sistema seja mantida, estas vibrações devem ser minimizadas, além disso, em condições desfavoráveis podem tornar-se instáveis, levando a trepidações, o que pode causar o desgaste acelerado da ferramenta ou a sua quebra, o desgaste e danos à máquina fresadora e seus elementos constituintes. Em usinagem de alta velocidade e, especialmente, fresamento, uma taxa elevada de vibração instável é um fator limitante na produção.

Determinar onde são geradas as vibrações é essencial para minimizar seus efeitos no processo de fresamento, as duas principais fontes de vibração são classificadas como vibrações forçadas e vibrações autoexcitadas.

Segundo Nepomuceno (1989), vibrações são ditas forçadas quando o sistema oscilatório é obrigado a oscilar pela aplicação de uma força externa. Essa energia é transferida do excitador para o sistema através de ressonância. Como

resultado de uma vibração forçada a máquina fresadora apresentará rotação instável. O resultado será uma peça cortada com uma superfície irregular.

Em sua dissertação, Pires (2011) cita as principais vibrações forçadas:

- Vibrações devido à falta de homogeneidade da peça: a ocorrência de regiões com diferentes durezas em uma peça gera impactos na ferramenta que resultam em vibrações. Caso sejam absorvidos pelo sistema, os choques são descartados e considerados ruídos. Entretanto, caso estes impactos sobre a ferramenta não sejam amortecidos, ocorrem vibrações com amplitudes elevadas que são prejudiciais ao processo.
- Vibrações causadas pela máquina-ferramenta: máquinas equipadas de componentes rotativos e com movimentos de translação ocasionam esse tipo de vibração, que podem se apresentar tanto de forma forçada quanto de forma livre. As vibrações forçadas são geradas 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.
- Vibrações causadas por corte interrompido: a usinagem com corte interrompido, causa na ferramenta choques consideráveis que podem levar a níveis indesejáveis de vibrações. Durante o processo de fresamento, a componente periódica da força de usinagem incita vibrações forçadas na frequência de passagem dos dentes e de suas harmônicas.
- Vibrações externas à máquina-ferramenta: essas vibrações são geradas em maquinários presentes no mesmo ambiente que a máquina-ferramenta utilizada no fresamento. As trepidações são transmitidas através do solo do local de trabalho para os equipamentos mais próximos da fonte. O espectro de frequência desse tipo de vibração é amplo, com isso, constantemente uma destas frequências possui valores próximos da frequência de vibração natural da máquina-ferramenta. A influência da amplitude dessas vibrações é geralmente imperceptível, porém, em operações onde as tolerâncias de acabamento são pequenas podem se tornar um problema.

As vibrações autoexcitadas conforme afirmado por Cheng (2009), são sistemas excitados por forças dependentes da cinemática do movimento. Esse tipo de vibração ocorre por não ser possível ao sistema acompanhar a dinâmica imposta pelo processo de corte. Caso haja um aumento das amplitudes em regime transiente da ondulação o sistema de fresamento pode adquirir comportamento instável decorrente da autoexcitação.

De acordo com Pires (2011) as instabilidades são causadas por alterações nas condições de corte, resultantes de distúrbios no processo de corte, como por exemplo um ponto de alta dureza no material. O resultado desse corte será então uma superfície ondulada proveniente da primeira passagem da ferramenta, o segundo passo remove a camada ondulada, porém resulta novamente um acabamento com ondulações em decorrência das vibrações estruturais. Se as fases das ondulações de cada passagem apresentar valores distintos, as vibrações podem ser atenuadas ou ampliadas. O aumento das vibrações pode ocasionar a quebra da ferramenta de corte e um desgaste excessivo comprometendo a qualidade superficial e dimensional da peça.

2.3.9 Monitoramento das Vibrações Geradas no Processo de Fresamento

O monitoramento utilizando vibrações mecânicas tem como objetivo aperfeiçoar a qualidade e a produtividade do processo de usinagem. O monitoramento possibilita a identificação de falhas e condições operacionais críticas, utilizando o estado operacional do equipamento para um aperfeiçoamento que possibilite minimizar perdas de material e estragos de equipamentos permitindo um uso eficiente dos insumos disponíveis.

Segundo Duarte *et al.* (2003), os procedimentos de monitoramento baseados em vibração mecânica são fundamentados no fato de que os sistemas mecânicos com partes móveis, ciclo de movimento fechado e repetitivo são compostos de elementos flexíveis que oscilam em torno de suas posições de equilíbrio estático, em decorrência das excitações dinâmicas oriundas das variações de esforços que atuam sobre o sistema. Essas operações afetam a resposta de vibração do sistema, sendo que as variações na aquisição dos sinais de vibrações podem ser detectadas utilizando ferramentas de análise apropriadas.

Ainda em conformidade com Duarte *et al.* (2003), a dificuldade em se utilizar as vibrações mecânicas para o monitoramento, diz respeito à identificação do indício vibratório que está correlacionado com o que se deseja monitorar, uma vez que os níveis de vibração são fortemente dependentes das funções de resposta em frequência da região onde a medição está sendo realizada.

Sousa (1998) executou um mapeamento de pontos onde os acelerômetros poderiam ser acoplados em uma fresadora para um melhor caminho de propagação da vibração gerada no processo. Determinou 80 locais que poderiam receber o posicionamento do sensor na fresadora. Realizou então uma análise de sensibilidade utilizando funções de resposta em frequência e verificou que muitos dos pontos apresentavam características dinâmicas semelhantes. Com isso, foi possível reduzir o número de possíveis locais de acoplamento para 29. As regiões que apresentaram menor influência possível de ruídos gerados por outras fontes foram na mesa de trabalho, próximas do mancal inferior do eixo porta-ferramenta e uma na própria peça a ser usinada.

2.3.10 Cepstrum de potência

Childers, Skinner e Kemerait (1977) apresentam um guia literário para o uso do *Cepstrum*, onde o define como uma operação matemática que extrai a transformada de *Fourier* do espectro do sinal na forma logarítmica. Os autores descrevem também uma técnica heurística, denominada *Cepstrum* de potência usada para encontrar os tempos de chegada dos ecos de um sinal composto. Os atrasos de eco aparecem como ondulações no logaritmo do espectro de potência da função analisada. É enunciado que a frequência desta ondulação pode ser obtida, porém, o resultado encontrado estará no domínio do tempo. Para que não haja confusão entre as ondulações e as frequências logarítmicas, a palavra frequência foi substituído pelo termo neológico quefrência.

A definição matemática do *Cepstrum* de potência descrita por Braun (1986) é apresentada na Equação 2.12.

$$c(\tau) = \mathfrak{F}^{-1}\{\ln |S(f)|^2\} \quad (2.12)$$

Em que:

$c(\tau)$ – função do *Cepstrum* de potência do sinal;

τ – quefrência (Hz);

\mathfrak{F} – operador da transformada de *Fourier*,

$|S(f)|^2$ – função densidade espectral de potência do sinal (W/Hz).

Os sinais adquiridos no processo em sua grande maioria não possuem seqüências onde as transformadas de *Fourier* convergem. Com isso, é aplicada a transformada Z calculada sobre o círculo unitário. Phillips e Nagle (1995) definem a transformada Z como qualquer seqüência de números de um sinal discreto no tempo, e pode ser usada na análise de qualquer tipo de sistema descrito por equações lineares a diferenças invariantes no tempo.

Childers, Skinner e Kemerait (1977) definem o *Cepstrum* de potência após aplicada a transformada Z na forma apresentada pela Equação 2.13.

$$c(\tau) = \left\{ \frac{1}{2\pi j} \oint \log |X(z)|^2 z^{n-1} dz \right\}^2 \quad (2.13)$$

Em que:

$c(\tau)$ – função do *Cepstrum* de potência do sinal;

τ – quefrência (Hz);

$X(z)$ – é a transformada Z da seqüência de dados $c(\tau)$.

A análise de Braun (1986) aponta que uma alta taxa de quefrência, corresponde a um leve intervalo entre as frequências repetitivas e que uma taxa baixa aponta uma flutuação prolongada do padrão de repetição, não possuindo, portanto relação com as frequências absolutas do sinal analisado. O autor aponta o *Cepstrum* de potência como uma boa ferramenta para análise de sinais contendo atrasos de fase e ecos.

A Figura 2.16 ilustra um resultado obtido por Guimarães, Costa e Gonçalves (2008) envolvendo um sinal no domínio do tempo e o *Cepstrum* de potência.

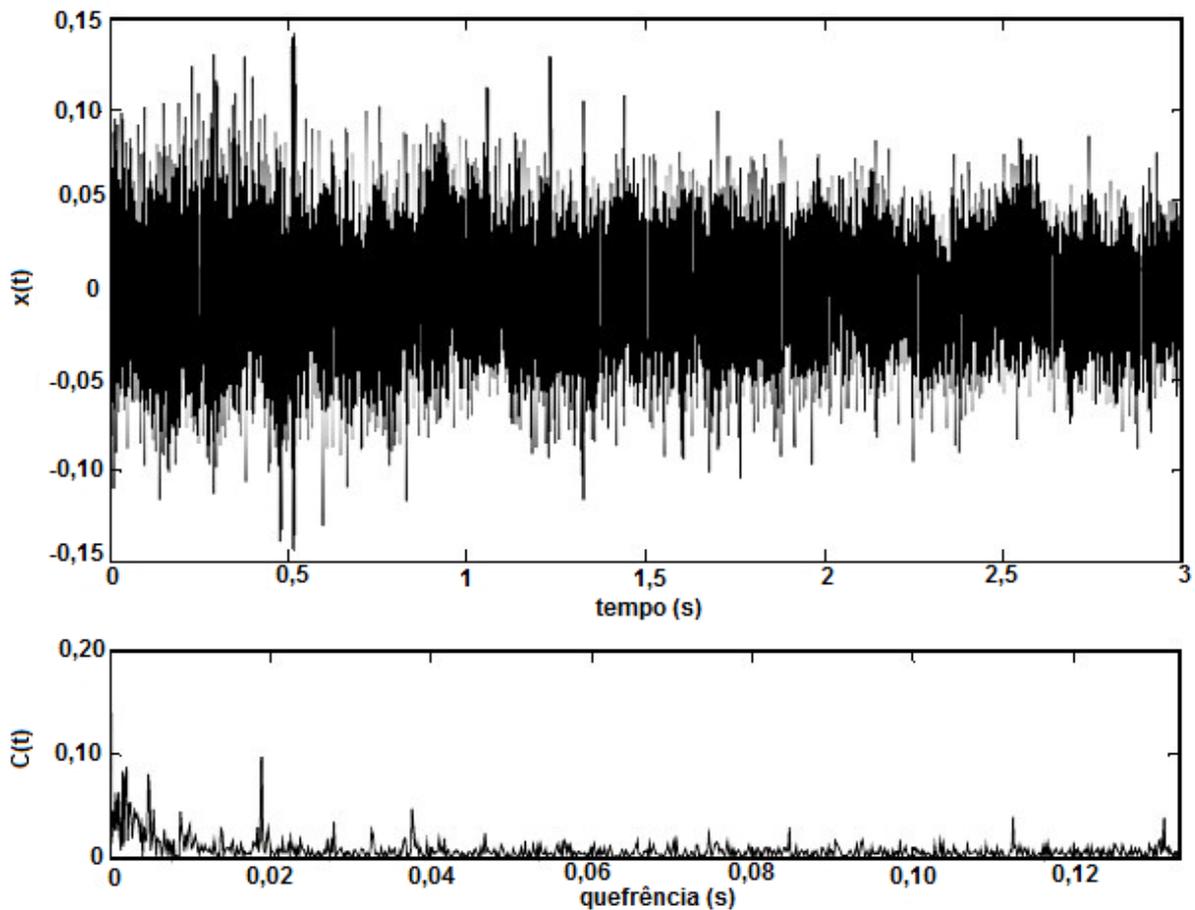


FIGURA 2.16 – Sinal obtido no tempo comparado com seu respectivo sinal convertido pelo *Cepstrum* de potência (adaptado de GUIMARÃES, COSTA e GONÇALVES, 2008).

De acordo com Guimarães, Costa e Gonçalves (2008) o sinal no domínio do tempo mostra uma periodicidade que, ao ser convertido utilizando o *Cepstrum* de potência, aparece sob forma de picos. Presente na Figura 2.16, o gráfico de $c(\tau)$ possui um pico em 0,0189s e outro em 0,378s ($2 \cdot 0,0189$), conforme afirmado por Guimarães, Costa e Gonçalves (2008), o que indica a existência de uma ou mais componentes de vibração geradas pelo movimento da fresa.

2.3.11 A Amostragem na Aquisição de Sinais

A maioria dos sinais disponíveis como resultados de um processo físico são sinais no tempo contínuo. Executar um processamento numérico deste tipo de sinal exigiria *hardwares* de grande complexidade. Por isso, em vez de realizar a aquisição da amplitude do sinal para todos os instantes de tempo, faz-se essa aquisição em

intervalos sequenciados de tempo, ou seja, são realizadas amostras do sinal contínuo no tempo. O novo sinal é dito como discreto no tempo.

Åström e Wittenmark (1996) explicam que a amostragem é um sinal contínuo no tempo que é substituído por uma sequência de números, que representa os valores do sinal em determinados momentos. Ogata (1995) define amostragem como uma função impulso modulada pela função do sinal contínuo no tempo no instante da amostragem.

A Figura 2.17 foi apresentada por Leite (2013) para ilustrar os conceitos de amostragem. A função $y(t)$ representa o sinal contínuo no tempo. A função $l(t)$ é interpretada como o trem de impulsos, nos seus nesses intervalos ocorrem as aquisições. A função y_k^* é o sinal amostrado resultante.

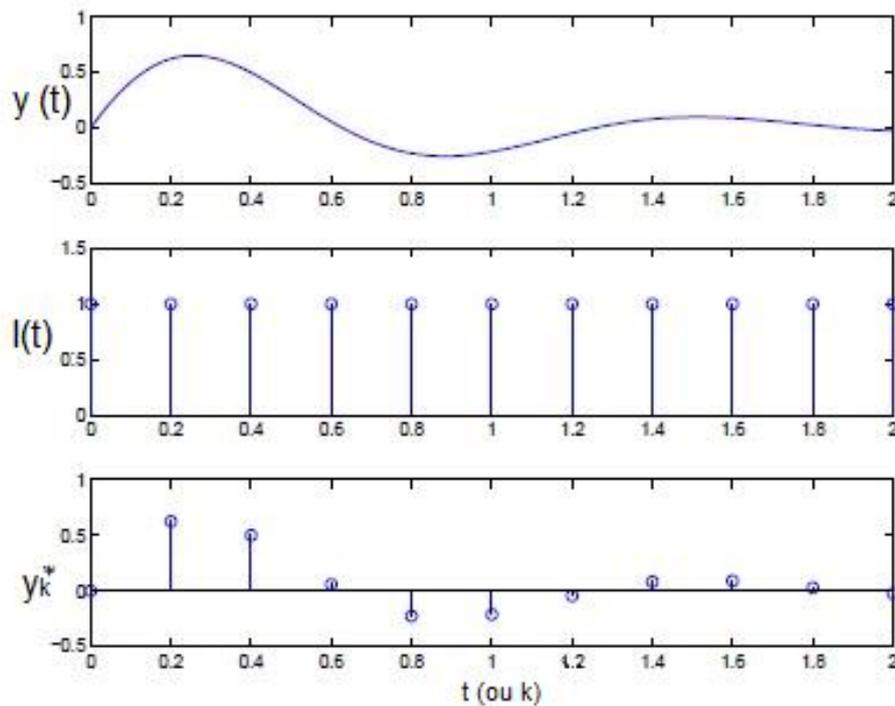


FIGURA 2.17 – Exemplo de amostragem (LEITE, 2013).

Ogata (1995) demonstra as Equações 2.14, 2.15 e 2.16. Essas equações mostram matematicamente os conceitos apresentados com a Figura 2.17.

Considerando um sinal qualquer amostrado no tempo, ele será representado pela Equação 2.14.

$$x(k) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} x_i \delta(k - i) \quad (2.14)$$

Em que:

$x(k)$ – sinal amostrado;

k – posição da amostra do sinal;

δ – função Delta de Dirac.

O trem de impulsos pode ser escrito como apresentado na Equação 2.15.

$$I(t) = \delta(t) + \delta(t - T) + \delta(t - 2T) + \dots + \delta(t - nT) \quad (2.15)$$

Em que:

$I(t)$ – trem de impulsos;

t – instante de tempo (s);

T – período (s);

δ – função Delta de Dirac.

E por fim ao aplicar o trem de impulsos no sinal contínuo no tempo é encontrada a Equação 2.16, que representa o sinal amostrado.

$$x^*(s) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} x(kT)I(t - kT) \quad (2.16)$$

Em que:

$x^*(s)$ – função contínua construída com as amostras;

$I(t)$ – trem de impulsos;

t – instante de tempo (s);

T – período (s);

k – posição da amostra do sinal.

Em sistemas onde o sinal passa por um computador o sinal de saída deve ser amostrado dentro de um determinado período de T segundos. De acordo com Åström e Wittenmark (1996), o processo de amostragem cria novos componentes de frequência denominados *aliasing*. Uma consequência disso é que haverá

componentes de baixa frequência gerados sempre que o sinal amostrado conter frequências que são maiores do que a metade da frequência de amostragem. A frequência contida na amostra do sinal é chamada de frequência de *Nyquist*.

A frequência de amostragem é definida pela Equação 2.17.

$$\omega_s \triangleq \frac{2\pi}{T} \quad (2.17)$$

ω_s – frequência de amostragem (Hz);

T – período de amostragem (s);

Segundo Åström e Wittenmark (1996) a frequência de *Nyquist* pode ser obtida através da Equação 2.18.

$$\omega_N \triangleq \frac{\omega_s}{2} \quad (2.18)$$

ω_N – frequência de *Nyquist* (Hz);

ω_s – frequência de amostragem (rad/s);

Åström e Wittenmark (1996) afirmam que para não haver perda do sinal original, é essencial que todos os componentes de sinal com frequências mais elevadas do que a frequência de *Nyquist* sejam removidos antes de o sinal ser amostrado. Os filtros que reduzem os componentes dos sinais de alta frequência são chamados filtros *antialiasing*. Este tipo de filtro é um componente importante de sistemas controlados. A seleção adequada de períodos de amostragem e filtros *antialiasing* são aspectos importantes da concepção desses sistemas.

De acordo com Fernandes (2011), a maioria das estações de trabalho possuem entradas (*inputs*) e saídas (*outputs*) que são sinais de tempo contínuo. Realizar operações e controlar as variáveis desse tipo de sinal pode gerar cálculos de grande complexidade. Para contornar essa dificuldade é utilizado na entrada do controlador um conversor analógico/digital (A/D). O sinal, agora discreto no tempo, pode ser trabalhado com maior facilidade sem perder a fidelidade do sinal real. Na saída do controlador, o sinal é novamente transformado, agora por um conversor digital/analógico (D/A) e enviado a entrada da estação de trabalho.

A Figura 2.18 mostra um exemplo de sistema que realiza a filtragem do sinal recebido da estação de trabalho, em seguida captura a amostra, logo após converte o sinal contínuo para um sinal digital e por fim o envia ao microprocessador (controlador), onde o sinal será trabalhado.

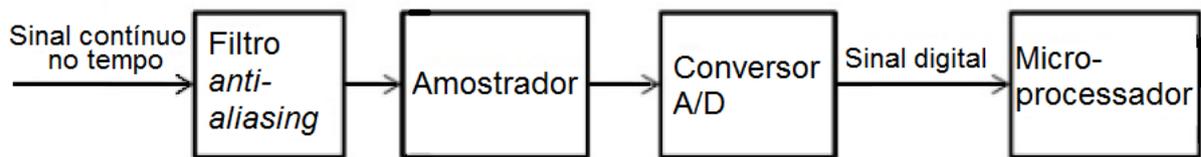


FIGURA 2.18 – Exemplo de sistema para realizar amostragem (adaptado de FERNANDES, 2011).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão apresentados os materiais utilizados e a descrição dos métodos realizados no desenvolvimento da pesquisa. Todos os ensaios experimentais foram realizados no laboratório de usinagem do CEFET-MG Divinópolis.

3.1 Materiais, Equipamentos, Ferramentas e Variáveis

O material escolhido para a realização dos ensaios de fresamento foi o aço ABNT 1020. O parâmetro mantido constante em todos os ensaios foi a velocidade de avanço da mesa (v_f) de 200 mm/min.

A máquina ferramenta utilizada foi uma fresadora da marca *Diplomat* modelo 3001, conforme mostrado na Figura 3.1.



FIGURA 3.1 – Máquina fresadora *Diplomat* 3001 (DEBMAQ, 2014).

A ferramenta de corte utilizada foi APMT 100308PDER-DM fabricada por *ZhuZhou* CCCT. Essa é uma pastilha de metal duro, classe PVD. Possui 2-4 μm de cobertura de nitreto de titânio-alumínio (TiAlN) combinado com substrato de grão ultra-fino (ZCCCT, 2014). Informações sobre as dimensões da ferramenta são mostradas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Dados dimensionais da ferramenta APMT 100308PDER-DM (ZCCCT, 2014).

Código de identificação	r_ϵ (mm)	L (mm)	I.W (mm)	S (mm)	d_p (mm)
APMT 100308PDER-DM	0,8	17,25	9,25	4,76	4,4

A geometria e as dimensões da ferramenta são mostradas na Figura 3.2.

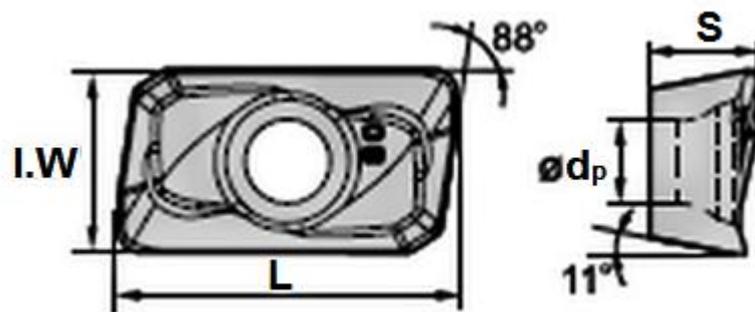


FIGURA 3.2 – Ferramenta de corte APMT 100308PDER-DM (ZCCCT, 2014).

O sistema de fixação da ferramenta é composto por um porta ferramenta e cone modelo NT 30-FMB-M12 da marca *Vertex*. O diâmetro da fresa alcança o valor de 39mm. O fabricante da pastilha de corte recomenda utilizar em aços uma velocidade de corte entre 180 e 360 m/min. O valor de rotação do eixo da fresadora deveria estar entre 1469 e 2938 rpm, de acordo com a Equação 2.1. Porém, esses valores foram considerados altos para serem utilizados em uma fresadora vertical aberta, foi decidido portanto que seriam usados valores mais baixos de rotação.

Foram definidos para os experimentos duas variáveis independentes, cada uma variando em dois níveis. A primeira variável foi a rotação de eixo máquina ferramenta (n), seus valores foram estabelecidos em 460 rpm e 650 rpm. A segunda variável escolhida foi a profundidade de corte (a_p), seus valores definidos foram 0,3 mm e 0,6 mm. Conforme mostrado na Tabela 3.2. Para cada ensaio foram

realizadas três réplicas, num total de $2 \times 2 \times 3 = 12$ ensaios, realizados em ordem aleatória para garantir que as variáveis apresentassem caráter aleatório.

Tabela 3.2 – Parâmetros de usinagem variáveis.

Fator de controle	Unidade	Nível 1	Nível 2
Rotação (n)	rpm	460	650
Profundidade de corte (a_p)	mm	0,3	0,6

Em razão dos valores de rotação, a velocidade de corte dos ensaios foram respectivamente 56,36 m/min para a rotação de 460rpm e 79,64 m/min para a rotação de 650rpm.

Foi definido que em cada ensaio seria usada apenas uma ferramenta de corte. Os valores do avanço por dente (f_z) calculado através da Equação 2.3 foram 0,435 mm/dente para a rotação de 460 rpm e 0,308 mm/dente para a rotação de 650 rpm.

Os corpos de prova foram definidos com as dimensões de 17 mm de espessura, 49,5 mm de largura e 100 mm de comprimento e acabamento desbastado. Cada peça possui uma tolerância de $\pm 0,2$ mm. A Figura 3.3 mostra as dimensões dos corpos de prova.

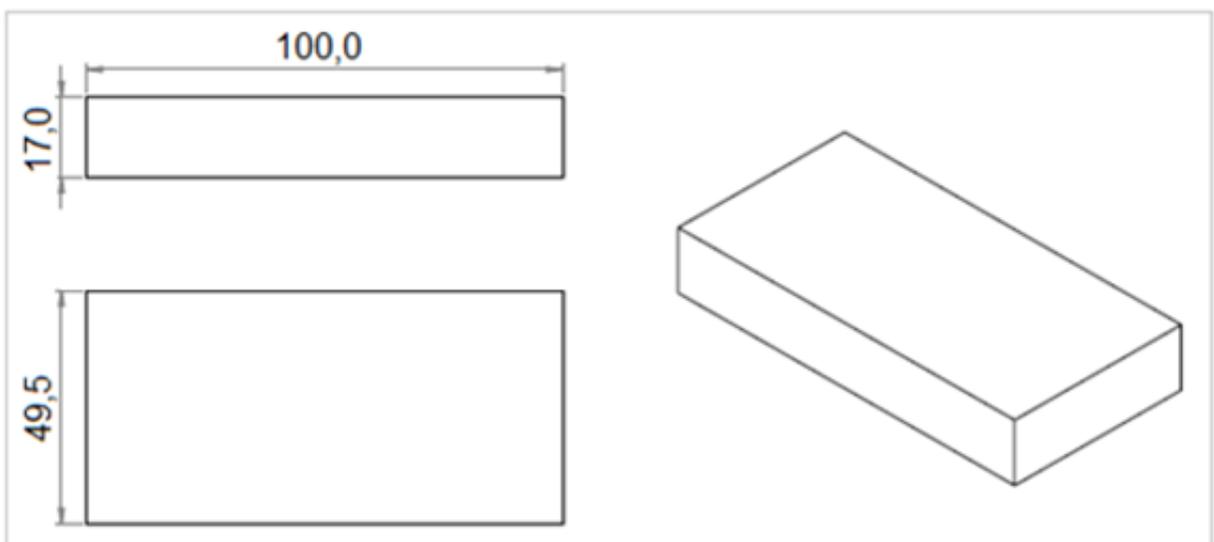


FIGURA 3.3 – Dimensões do corpo de prova.

Para o ajuste da rotação da fresa foi utilizado um tacômetro digital da marca ICEL modelo TC-5030 que mede rotações por minuto utilizando um feixe de *laser*. A Figura 3.4 mostra o tacômetro utilizado nos ensaios.

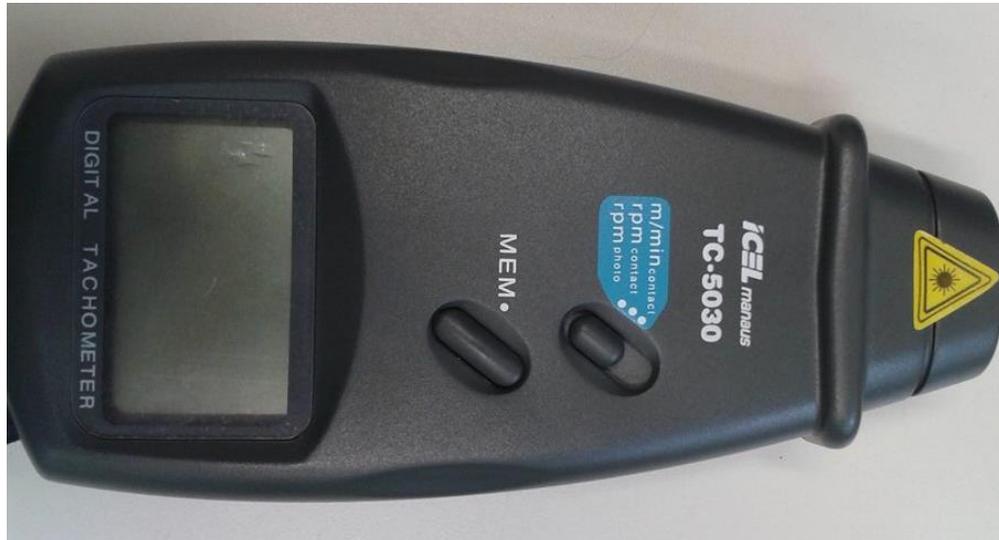


FIGURA 3.4 – Tacômetro digital TC-5030.

A aquisição dos sinais vibratórios foi realizada utilizando um acelerômetro fabricado por Brüel & Kjaer, modelo *Delta Tron* 4514-B-001 e série 51988. Seus dados de fabricante são apresentados na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Dados do fabricante do acelerômetro *Delta Tron* 4514-B-001 (BRÜEL & KJAER, 2014).

Tipo	Piezoelétrico
Sensibilidade	10,37 mV/g
Temperatura	-51 °C à +100 °C
Frequência de ressonância	32 KHz
Faixa de frequência	1 a 10 KHz (±10%)

A Figura 3.5 mostra o sensor *Delta Tron* 4514-B-001 utilizado na pesquisa.



FIGURA 3.5 – Acelerômetro *Delta Tron* 4514-B-001 (BRÜEL & KJAER, 2014).

A aquisição dos dados provenientes do acelerômetro foi realizada por uma placa NI USB-9233, fabricada pela *National Instruments*, acoplada por um transportador de dados NI USB-9162. O módulo de aquisição de dados fornece uma interface USB para quatro canais de entradas analógicas de 24 *bits* com sinal condicionado integrado. A placa NI USB-9233 possui internamente um filtro rejeita-faixas que atenua significativamente todos os sinais acima da frequência de rejeição, cujo principal objetivo é para evitar *aliasing*. A Figura 3.6 mostra o conjunto módulo e transportador de dados.

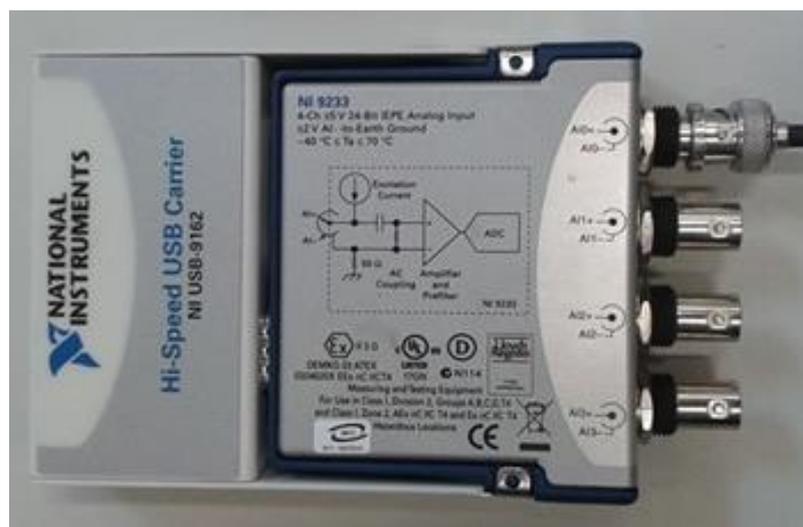


FIGURA 3.6 – Conjunto módulo de aquisição NI USB-9233 e transportador de dados NI USB-9162.

A Tabela 3.4 apresenta os dados específicos de fabricante.

Tabela 3.4 – Dados do fabricante do módulo NI USB-9233 (NATIONAL INSTRUMENTS, 2007).

Tipo	Piezoelétrico
Canais	4 (<i>analog</i>)
Tensão de entrada	$\pm 5 V$
Resolução	24 <i>bits</i>
Conversor	A/C (<i>Delta-Sigma</i>)
Taxa de Aquisição	2 KHz à 50 KHz

Para a medição da rugosidade foi utilizado um rugosímetro da marca *Mitutoyo* modelo *Surftest SJ 201*. Configurado para 3 medições em um comprimento de amostragem (*cut off*) igual a 0,25 mm. A Figura 3.7 mostra o rugosímetro utilizado nos ensaios.



FIGURA 3.7 – Rugosímetro *Surftest SJ 201*.

3.2 Procedimento experimental

Os corpos de prova foram fabricados nas mesmas condições iniciais para garantir uma padronização em todos os ensaios. O corte de cada peça foi realizado em uma máquina serra de fita utilizando fluídos de corte para que as modificações na microestrutura do aço fossem mínimas. Para obter uma superfície uniforme foi realizado o desbaste por fresamento em todas as peças, como pode ser visto na Figura 3.8.

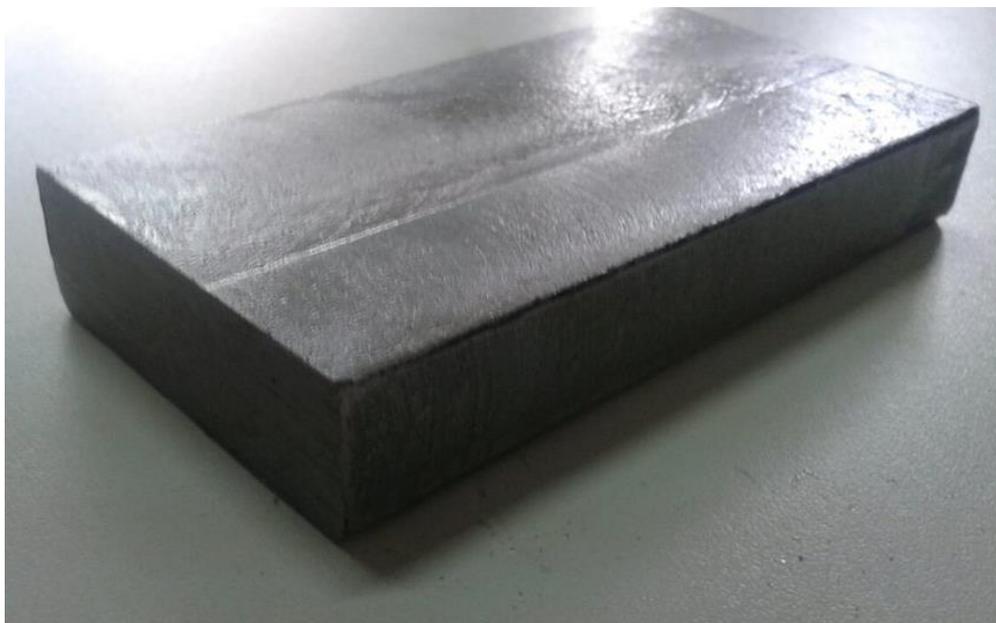


FIGURA 3.8 – Corpo de prova utilizado na realização dos ensaios.

A ordem das configurações das variáveis independentes de fresamento foi definida por sorteio de forma a garantir que apresentassem caráter aleatório. Com isso, os parâmetros de rotação e profundidade de corte foram configurados a cada novo experimento.

O ajuste da rotação de eixo da fresadora foi feito utilizando-se o tacômetro digital e uma fita reflexiva fixada no corpo do porta-ferramentas. Em decorrência, a cada revolução do eixo, o feixe de laser foi refletido ao tacômetro permitindo a contagem precisa das voltas realizadas pelo porta-ferramentas.

A fixação do corpo de prova na mesa da máquina fresadora foi realizada utilizando-se uma morsa de precisão. Foram utilizados calços para acertar a posição de altura da peça em relação à morsa.

Antes de realizar um ensaio foi trocada a pastilha de corte. A configuração da máquina foi feita elevando-se a mesa da fresadora até que a peça tocasse levemente a ferramenta de corte, de forma que a pastilha riscasse superficialmente o corpo de prova, com o objetivo de se obter uma referência de posicionamento do conjunto. Utilizando-se o painel digital foi definida essa configuração como posição inicial. O ajuste de profundidade de corte foi realizado tendo base esse ponto como zero e com a máquina fresadora desligada. O avanço da mesa foi ajustado observando-se os valores mostrados pelo painel digital da fresadora. A Figura 3.9 mostra a operação de fresamento de um experimento aleatório realizado nesta pesquisa.



FIGURA 3.9 – Imagem capturada durante um ensaio.

O método de fresamento utilizado foi o movimento combinado entre a peça e a ferramenta. Ou seja, a fresa teve seu eixo dentro do campo de corte da peça. Portanto, metade do corte com movimento concordante e outra em discordante. Como o fresamento utilizado na pesquisa é o fresamento frontal, esse tipo de movimento combinado ocorre. A largura de corte (a_e) nesse caso tem a mesma dimensão da fresa, portanto, 39 mm. Não foram utilizados fluídos de corte durante o processo.

A aquisição dos sinais vibratórios foi realizada de forma simultânea ao processo de usinagem. O acelerômetro foi posicionado na direção vertical, distante da ferramenta 600 mm para evitar qualquer contato com cavacos, ou seja, interferências no sinal amostrado. Os sinais medidos correspondem ao eixo X. O acelerômetro foi acoplado a placa NI USB-9233, que por sua vez foi conectada a um

notebook para realizar a aquisição. O *software* instalado no computador para ser a interface entre processo e operador foi o *LabVIEW*, versão 2009, produzido pela *National Instruments*. A instrumentação virtual criada em *LabVIEW* para a aquisição de dado é mostrada na Figura 3.10

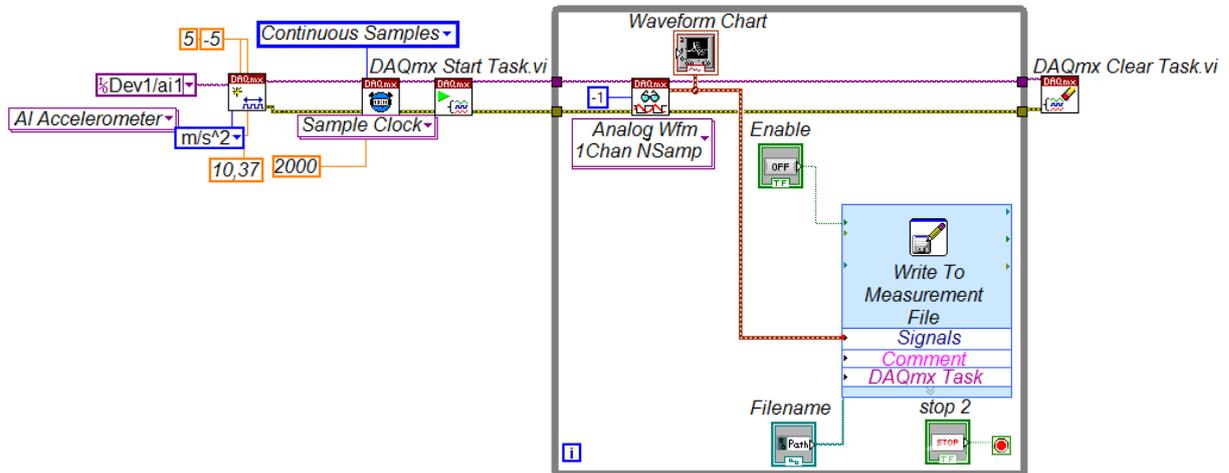


FIGURA 3.10 – Instrumentação virtual para a aquisição de dados (ROSSI, 2014).

O programa recebe os dados de vibração digitalizados pela placa de aquisição após uma conversão A/D com uma aquisição de 2.000 pontos por segundo. O bloco *DAQmx* age como interconexão entre o dispositivo de medição e instrumentação virtual. O canal de comunicação correspondente à entrada analógica foi definido como a porta A1. A sensibilidade do sensor utilizado é uma conversão do sinal elétrico em amplitude de vibração com uma relação de 10,37 mV/ms⁻². O fornecimento de corrente do sensor foi definido em 0,4 mA, e sua tensão de saída em ±5 V (ROSSI, 2014).

O bloco *DAQmx Start Task* inicia as tarefas. O bloco *DAQmxClear* limpa a tarefa depois da interrupção. O bloco *Waveform Chart* indica o sinal da vibração no osciloscópio na faixa de amplitude de -1 V a 1 V, estimado por meio de testes. O bloco *Enable* inicia a gravação de dados e grava um arquivo com as informações recebidas. O bloco *Stop* interrompe a tarefa em *loop* do grupo de componentes que estão dentro do bloco cinza (*While Loop*) (ROSSI, 2014).

A rugosidade superficial das peças após o fresamento foi medida utilizando-se o rugosímetro *Surftest SJ 201*. Foram medidos os parâmetros R_a , R_y , R_z e R_q . O procedimento de medição ocorreu conforme instruções recomendadas em seu manual de instruções. Para tal, o equipamento foi colocado em nível com a

superfície da chapa, assim a haste do rugosímetro percorreu um caminho paralelo ao topo fresado da peça. Foram realizadas três medições em cada peça, sendo a primeira no início, a segunda no meio e a terceira em seu fim. Com isso, foi possível encontrar uma média que represente a rugosidade média de cada corpo de prova.

A análise *cepstral* foi realizada com os dados adquiridos do sinal de vibração para um tempo de 4 s, considerando uma faixa de tempo correspondente à metade do tempo de usinagem, respeitando assim os critérios de amostragem determinados com base na frequência de *Nyquist*. Essa análise foi realizada em um programa utilizando o *software Matlab* versão 2011.

A Figura 3.11 mostra um exemplo, escolhido de forma aleatória dentre os ensaios realizados, do *Cepstrum* em relação ao sinal de vibração adquirido durante o fresamento. Todos os gráficos que mostram o sinal do *cepstrum* de potência em relação ao sinal de vibração são apresentados nas Figuras B.1 à B.12, presentes no Anexo B.

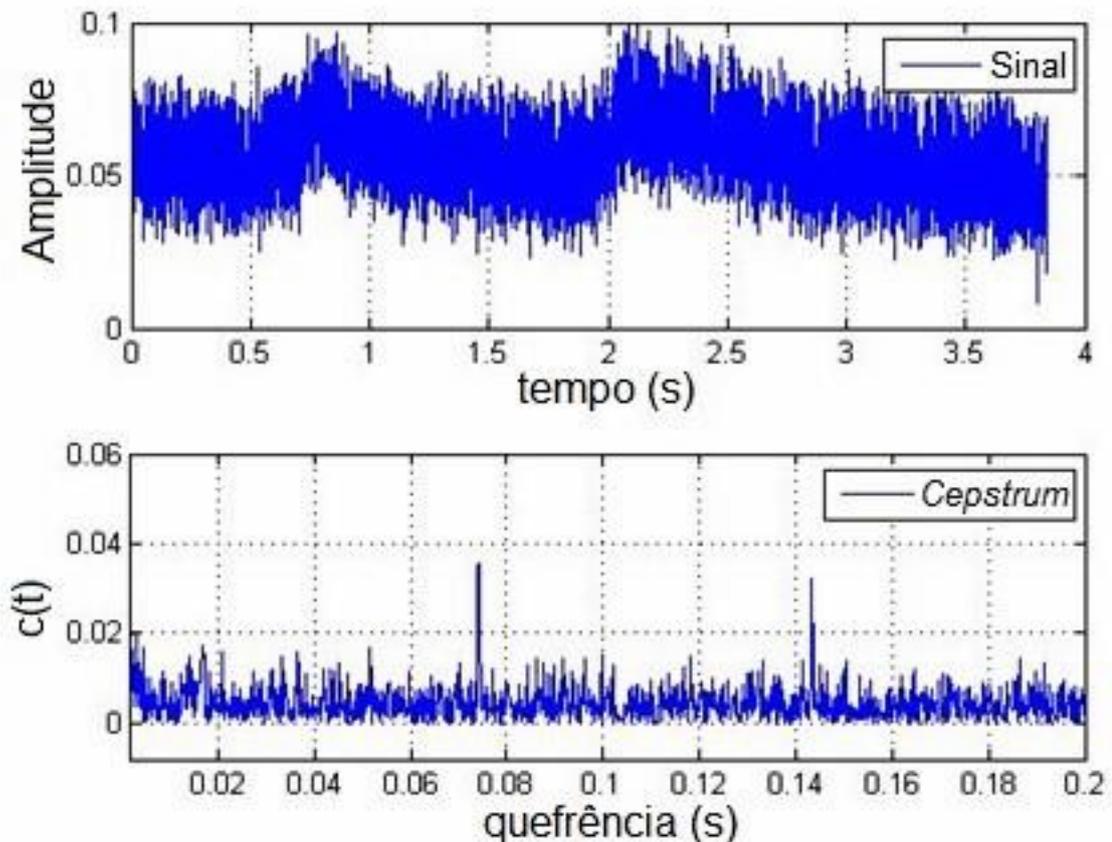


FIGURA 3.11 – *Cepstrum* (gráfico inferior) em relação ao sinal de vibração adquirido (gráfico superior) em um ensaio aleatório.

A análise do *Cepstrum* de potência foi realizada através do ponto máximo na região de quefrência, observando se os valores de amplitude do sinal de vibração estavam coerentes com os valores médios esperados no intervalo escolhido. Nos casos onde não ocorreram, conforme procedimentos de controle, foram escolhidas regiões mais delimitadas do sinal no domínio do tempo, distintas das anteriores. Valores incoerentes de amplitude foram associados às vibrações transientes decorrentes da aplicação dos procedimentos de controle.

4 ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS

A análise estatística é primordial na leitura dos resultados obtidos em quaisquer experimentos. Para este trabalho, foi proposta a análise de variância da rugosidade dos ensaios realizados. A rugosidade é caracteristicamente um aspecto que pode apresentar grandes amplitudes em seus valores medidos. Portanto, a conclusão acerca da qualidade de usinagem analisada através da rugosidade poderá não ser precisa, se não forem utilizadas ferramentas de análise estatística apropriadas.

Para a análise de variância (ANOVA), primeiramente foi feito um teste de significância: o teste F da estatística de *Fisher*. Segundo Anjos (2012), este teste compara a quantidade de variância sistemática nos dados com a quantidade de variância não-sistemática. Ou seja, determina se os conjuntos de dados diferem significativamente entre si. Neste caso, o objetivo da análise é verificar a diferença de rugosidade nas peças obtidas através de usinagem sob variação de parâmetros, como rotação e profundidade de corte.

Os dados foram agrupados em 4 tratamentos com 9 repetições cada. Os tratamentos são as diferentes combinações de profundidade de corte e rotação utilizados nos ensaios. As repetições são a quantidade de dados coletados (número de medições realizadas) para cada tratamento. A análise foi feita separadamente, para cada uma das rugosidades analisadas: R_a , R_y , R_z e R_q .

As Tabelas 4.1 à 4.4 apresentam os dados medidos de rugosidade (em μm), agrupados de acordo com a rotação e a profundidade de corte. O somatório de todos os valores é exibido na coluna total. Todos os valores de rugosidade medidos são apresentados nas Tabelas A.1 à A.12, presentes no Anexo A.

Tabela 4.1 – Dados de rugosidade R_a .

Rotação = 650 rpm - $a_p = 0,3$ mm			
1,560	2,080	1,690	TOTAL
2,730	1,020	1,300	16,780
2,590	2,140	1,670	
Rotação = 650 rpm - $a_p = 0,6$ mm			
1,970	1,100	1,200	TOTAL
1,200	3,190	1,240	14,910
1,200	2,160	1,650	
Rotação = 460 rpm - $a_p = 0,3$ mm			
2,060	3,660	2,760	TOTAL
2,300	2,780	1,680	19,310
0,830	1,880	1,360	
Rotação = 460 rpm - $a_p = 0,6$ mm			
1,630	1,020	1,290	TOTAL
2,040	1,540	1,530	13,750
1,450	1,500	1,750	

Tabela 4.2 – Dados de rugosidade R_y .

Rotação = 650 rpm - $a_p = 0,3$ mm			
9,960	17,610	12,400	TOTAL
13,390	7,190	9,570	116,170
18,910	18,440	8,700	
Rotação = 650 rpm - $a_p = 0,6$ mm			
13,590	8,020	8,040	TOTAL
8,040	23,590	8,880	111,160
9,390	18,550	13,060	
Rotação = 460 rpm - $a_p = 0,3$ mm			
16,960	26,270	24,200	TOTAL
17,130	22,970	13,940	153,360
6,620	16,230	9,040	
Rotação = 460 rpm - $a_p = 0,6$ mm			
12,680	7,400	9,190	TOTAL
14,720	10,500	12,180	96,310
9,580	9,730	10,330	

Tabela 4.3 – Dados de rugosidade R_z .

Rotação = 650 rpm - $a_p = 0,3$ mm			
9,270	14,880	10,930	TOTAL
12,550	6,730	8,120	95,930
13,630	11,540	8,280	
Rotação = 650 rpm - $a_p = 0,6$ mm			
10,770	6,970	7,470	TOTAL
7,470	14,170	8,010	86,420
8,050	12,260	11,250	
Rotação = 460 rpm - $a_p = 0,3$ mm			
13,060	21,540	19,990	TOTAL
16,210	19,140	12,280	128,390
6,060	11,450	8,660	
Rotação = 460 rpm - $a_p = 0,6$ mm			
10,230	6,970	8,320	TOTAL
12,400	9,140	10,920	86,260
9,030	9,000	10,250	

Tabela 4.4 – Dados de rugosidade R_q .

Rotação = 650 rpm - $a_p = 0,3$ mm			
1,860	2,630	2,070	TOTAL
3,180	1,260	1,590	20,710
3,220	2,940	1,960	
Rotação = 650 rpm - $a_p = 0,6$ mm			
2,550	1,350	1,470	TOTAL
1,470	4,330	1,510	19,340
1,510	2,910	2,240	
Rotação = 460 rpm - $a_p = 0,3$ mm			
2,630	4,420	3,560	TOTAL
2,870	3,550	2,160	24,400
1,050	2,490	1,670	
Rotação = 460 rpm - $a_p = 0,6$ mm			
2,110	1,270	1,600	TOTAL
2,520	1,840	1,980	17,090
1,820	1,850	2,100	

Para o teste F foi considerado o valor tabelado ao nível de 5% de significância (probabilidade de erro), com isso foi obtido um nível de confiança de 95%. Consultando-se em uma tabela de distribuição *Fisher-Snedecor*, com graus de liberdade 3 e 32, o valor encontrado foi $F_{(3,32)} = 4,15$.

De acordo com Anjos (2012), caso o valor calculado de F seja maior que o valor tabelado, a hipótese de nulidade (H_0) será rejeitada, ou seja, existem evidências de diferenças significativas entre pelo menos um par de médias dos tratamentos, ao nível α de significância escolhido. Quando a hipótese de nulidade (H_0) não é rejeitada, indica que não existem evidências de diferenças significativas entre tratamentos, ao nível α de significância escolhido.

Portanto, a hipótese de nulidade afirma que as variações na profundidade de corte ou na rotação não interferem na rugosidade da peça, enquanto que a hipótese alternativa diz que influenciam.

As Tabelas 4.5 à 4.8 apresentam as tabelas ANOVA para cada uma das rugosidades abordadas. As tabelas foram organizadas de acordo com os valores calculados e tabelados de F, os tratamentos, e as somas dos quadrados dos dados.

Tabela 4.5 – ANOVA para rugosidade R_a .

ANOVA					
R_a	GL	SOMA DOS QUADRADOS	QUADRADO MÉDIO	F (CALC.)	F (TAB.)
TRATAMENTO n	1	0,05	0,05	0,13	4,15
TRATAMENTO a_p	1	1,53	1,53	3,84	4,15
TRATAMENTO n x a_p	1	0,38	0,38	0,95	4,15
RESÍDUOS	32	12,79	0,40	-	-
TOTAL	35	14,75	-	-	-

Tabela 4.6 – ANOVA para rugosidade R_y .

ANOVA					
R_y	GL	SOMA DOS QUADRADOS	QUADRADO MÉDIO	F (CALC.)	F (TAB.)
TRATAMENTO n	1	13,86	13,86	0,56	4,15
TRATAMENTO a_p	1	106,98	106,98	4,30	4,15
TRATAMENTO n x a_p	1	75,23	75,23	3,03	4,15
RESÍDUOS	32	795,28	24,85	-	-
TOTAL	35	991,35	-	-	-

Tabela 4.7 – ANOVA para rugosidade R_z .

ANOVA					
R_z	GL	SOMA DOS QUADRADOS	QUADRADO MÉDIO	F (CALC.)	F (TAB.)
TRATAMENTO n	1	28,98	28,98	2,59	4,15
TRATAMENTO a_p	1	74,07	74,07	6,61	4,15
TRATAMENTO n x a_p	1	29,56	29,56	2,64	4,15
RESÍDUOS	32	358,67	11,21	-	-
TOTAL	35	491,28	-	-	-

Tabela 4.8 – ANOVA para rugosidade R_q .

ANOVA					
R_q	GL	SOMA DOS QUADRADOS	QUADRADO MÉDIO	F (CALC.)	F (TAB.)
TRATAMENTO n	1	0,06	0,06	0,09	4,15
TRATAMENTO a_p	1	2,09	2,09	3,11	4,15
TRATAMENTO n x a_p	1	0,98	0,98	1,46	4,15
RESÍDUOS	32	21,52	0,67	-	-
TOTAL	35	24,65	-	-	-

Analisando as Tabelas 4.5 à 4.8, verifica-se que em 2 casos o teste F encontrou um valor superior ao valor tabelado. A rotação e a profundidade de corte não influenciaram os valores das rugosidades R_a e R_q , pois os resultados calculados de F são valores inferiores aos valores tabelados de F. Portanto, para esses dois casos, foi aceita a hipótese inicial de nulidade (H_0) que diz que não existem diferenças entre os tratamentos.

Ao verificar as Tabelas 4.7 e 4.8, é possível constatar que para os tratamentos de profundidade de corte, os valores de F calculado foram maiores que os valores de F tabelado. Os tratamentos de rotação apresentaram valores de F calculado menores que os valores tabelados. Desse modo, para o tratamento de rotação aceita-se a hipótese inicial de nulidade (H_0). Para o tratamento a_p rejeita-se H_0 e admite-se a hipótese alternativa (H_1) como verdadeira. Portanto, existem diferenças entre os tratamentos das peças.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Tabela 5.1 mostra os valores médios obtidos para os parâmetros de rugosidade medidos.

TABELA 5.1 – Valores médios de rugosidade.

Rotação (rpm)	a_p (mm)	R_a (μm)	R_y (μm)	R_z (μm)	R_q (μm)
650	0,300	1,864	12,908	10,659	2,301
650	0,600	1,657	12,351	9,602	2,149
460	0,300	2,146	17,040	14,266	2,711
460	0,600	1,528	10,701	9,584	1,899

Conforme esperado, em média os valores de R_a são os mais baixos. Isso ocorre por ser calculado como uma média de todos os picos e vales encontrados na superfície, encobrindo assim algum possível risco, por exemplo. Conforme esperado o parâmetro R_y apresentou os valores mais elevados, pois é calculado com base nos maiores valores de picos e vales. O parâmetro R_z é calculado com base na média das 5 maiores diferenças entre picos e vales, por isso também apresenta valores elevados. Por fim, conforme esperado o parâmetro R_q também demonstrou valores considerados menores em relação aos outros parâmetros por se tratar de uma raiz quadrática média. Como não apresentou um valor muito discrepante, pode-se dizer que o acabamento superficial foi satisfatório, pois se houvesse alguma irregularidade com grande influência, ela seria destacada por causa do R_q , que utiliza as amplitudes de picos e vales elevados ao quadrado.

Pelos valores apresentados na Tabela 5.1, para a rotação de 460 rpm e profundidade de corte de 0,30 mm, pode-se dizer que ocorreu um algum problema no acabamento, pois, R_y apresenta um valor de 17,040 μm , que é aproximadamente 32% maior que 12,908 μm obtido para o R_y com rotação igual a 650 rpm e profundidade de corte de 0,30 mm. O acabamento provavelmente apresentou um risco causado por um impacto mais forte entre ferramenta de corte e corpo de prova. Essa imperfeição porém não influenciou nos parâmetros que utilizam médias.

Ainda analisando a Tabela 5.1, ao aumentar a profundidade de corte para todos os parâmetros mantendo constante a rotação houve uma diminuição dos valores de rugosidade.

Ao manter a profundidade de corte constante em 0,30 mm e aumentar a rotação foram obtidos menores valores de rugosidade em todos os parâmetros. Porém, ao conservar a profundidade de corte constante em 0,60 mm e elevar a rotação de 460 rpm para 650 rpm ocorreu um aumento na rugosidade em todos os parâmetros. Esse resultado pode ter ocorrido por ter se mantido o mesmo valor de velocidade de avanço (v_f) para valores diferentes de rotação. Conforme Equação 2.3, a rotação da fresadora influencia diretamente na velocidade de avanço, assim, ao se utilizar valores de rotação desiguais, foram empregados diferentes valores de avanço por dente (f_z), indicando que as distâncias percorridas pela ferramenta durante uma rotação completa foram diferentes para os parâmetros, gerando acabamentos distintos.

A Tabela 5.2 resume as mudanças causadas com as variações de parâmetros impostas ao sistema.

TABELA 5.2 – Comparação entre os valores médios de rugosidades e vibração.

Parâmetro	Rugosidade (μm)				<i>Cepstrum</i> de potência (mV^2)
	R_a	R_y	R_z	R_q	C(t)
Rotação da fresa de 460 para 650 rpm	0,076	1,241	1,794	0,080	-0,001
Profundidade de corte de 0,3 para 0,6 mm	0,413	3,448	2,869	0,482	0,000

A Tabela 5.2 mostra uma comparação entre os valores médios das rugosidades R_a , R_y , R_z e R_q , e também a variação da amplitude do sinal tratado utilizando o *Cepstrum* de potência para cada parâmetro variado no fresamento. Ao realizar uma análise dos dados é possível perceber que a profundidade de corte influencia de forma mais significativa o acabamento no fresamento de topo, isso pode ser dito, pois, a diferença entre antes e depois de variar o parâmetro para todos os valores de rugosidade foi maior para a variação da profundidade em relação à rotação.

Os picos de vibração correlacionados com as rotações 460 rpm e 650 rpm não apresentaram vibração significativa. Em contrapartida, foram identificados picos com padrões periódicos de 0,074 s e 0,1432 s, ou seja, amplitudes relativamente altas geradas por fontes de modulações nas frequências de 13,5 Hz e 6,8 Hz, respectivamente.

Neste caso, os sinais de vibração de interesse para a análise são os sinais de vibração provenientes da variação dos parâmetros de corte. No entanto, os sinais analisados se mostraram irrelevantes quando comparados aos outros sinais do padrão periódico de 13,5 Hz e 6,8 Hz. As vibrações com amplitudes periódicas de 0,09 s e 0,13 s, referentes respectivamente às rotações de 650 rpm e 460 rpm, apresentaram ter como fonte de modulação a vibração natural da fresadora.

Ainda analisando a Tabela 5.2 é perceptível que as mudanças nos parâmetros de corte da máquina fresadora não causaram mudanças na vibração mecânica do sistema, visto que, o aumento da rotação gerou uma mudança que pode ser considerada insignificante no valor do *Cepstrum*. O aumento da profundidade de corte também não causou modificação do valor médio do *Cepstrum* nas três primeiras casas decimais.

6 CONCLUSÕES

Após realizar uma comparação entre os efeitos médios provocados nas rugosidades R_a , R_y , R_z e R_q geradas no processo de fresamento de topo em uma peça de aço carbono e a vibração mecânica gerada durante o procedimento, com as variáveis independentes sendo a rotação de eixo na máquina fresadora e a profundidade de corte, foram obtidas as seguintes conclusões:

- Houve uniformidade no acabamento de acordo com a comparação entre os valores de R_z e R_y , que apresentaram valores próximos.

- De acordo com a análise de variância, para um nível de confiança de 95%, os parâmetros de rotação e profundidade de corte não interferiram nos valores de R_a e R_q , ou seja, os tratamentos foram realizados de maneira semelhante.

- Conforme a análise de variância, o parâmetro de profundidade de corte interferiu nos valores de R_y e R_z , ou seja, deve existir pelo menos um contraste significativo entre as médias de tratamentos, com relação ao crescimento médio apontando para uma disparidade entre os procedimentos.

- Os picos dos sinais de vibração correlacionados com as rotações 460 rpm e 650 rpm não apresentaram resultados consideráveis sobre a rugosidade da peça, não podendo ser considerados significantes do ponto de vista da vibração. Portanto a vibração não influenciou no acabamento final de maneira satisfatória.

- O fato de não ter usado um valor fixo de avanço por dente (f_z) gerou condições de ensaios diferentes, podendo ser uma das causas que apontam que houve diferença entre os tratamentos.

- Os valores escolhidos para os parâmetros de rotação e profundidade de corte, e suas variações, não resultaram alterações na vibração e no acabamento das amostras usinadas.

- Por fim, pode-se afirmar que os melhores parâmetros a serem utilizados nesse processo são a rotação de 650 rpm e a profundidade de corte de 0,6 mm, pois apesar de não permitir a obtenção dos menores valores de rugosidade, o tempo decorrido durante a fabricação da peça foi o menor dentre todos os testes devido a maior retirada de material e maior velocidade de corte, gerando economia de recursos e uma maior produtividade.

6.1 Trabalhos Futuros

Sugere-se em trabalhos futuros, testar outros níveis dos parâmetros avaliados, além de testar novos parâmetros como avanço por dente e número de pastilhas.

Sugere-se encontrar a fonte de erro na medição vibração e corrigi-lo de forma a encontrar a real influência da vibração sobre o acabamento superficial descrito na literatura. Isso pode ser feito refazendo os ensaios conforme os métodos descritos nesta pesquisa e utilizando os mesmos tipos de materiais.

REFERÊNCIAS

- ABNT. **NBR 6175 TB/83: Processos mecânicos de usinagem**, Rio de Janeiro, 1971.
- ABNT. **NBR 6162: Movimentos e Relações Geométricas na Usinagem dos Metais**, Rio de Janeiro, 1989.
- ABNT. **NBR ISO 4287: Especificações geométricas do produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil - Termos, definições e parâmetros da rugosidade**, Rio de Janeiro, 2002.
- ANJOS, Adilson. **Análise de Variância**. Apostila do Curso de Estatística UFPR, Paraná, 2012
- ÅSTRÖM, K.J., WITTENMARK, B. **Computer-Controlled Systems: Theory and Design**, 3ª Ed., Editora Prentice Hall, Upper Saddle River, 1996.
- BRAUN, S. **Mechanical Signature Analysis: theory and applications**, Editora Academic Press, Londres, 1986, 385p.
- BRÜEL & KJAER. **DeltaTron® Accelerometers**: Types 4513, 4513-001, 4513-002, 4513-B, 4513-B-001 and 4513-B-002. Catálogo de dados. Disponível em: <<http://www.bksv.com/doc/bf0209.pdf>>. Acesso em 26 nov. 2014.
- CHENG, K. **Machining Dynamics: Fundamentals, Applications and Practices**, Editora Springer, Londres, 2009, 328p.
- CHILDERS, D.G., SKINNER, D.P., KEMERAIT, R.C. **The Cepstrum: A Guide to Processing**, Proceedings of the IEEE, Vol. 65, Nº 10, 1977, pp. 1428–1443.
- DEBMAQ. **Distribuidora de máquinas-ferramenta, corte e injetoras**. Disponível em: <http://www.debmaq.com.br/site/upload/produtos/687_FVF-2500.jpg>. Acesso em 20 out. 2014.
- DINIZ, A.E., MARCONDES, F.C., COPPINI, N.L. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**, 5ª Ed., Artliber Editora, São Paulo, 2006, 255p.
- DIMLA, D.E. **Sensor signals for tool-wear monitoring in metal cutting operations – A review of methods**, International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 40, 8ª Ed., 2000, pp. 1073-1098.
- DUARTE, M.A.V., MEOLA, T., SOUSA, M.M., Da SILVA, M.B. **Monitoramento do processo de furação em uma fresadora CNC utilizando sinais de vibração mecânica**, 2º COBEF, Uberlândia, 2003.
- FACCIO, I. **Investigações sobre o acabamento superficial de usinagens com altíssima velocidade de corte**, Dissertação de Mestrado, USP, São Paulo, 2003.

FERNANDES, P.G.G. **Filtro Anti-aliasing para Sistema de Aquisição Sincronizada Implementado em FPGA**, Dissertação de Mestrado, UFRJ/COPPE, Rio de Janeiro, 2011, 103p.

GUIMARÃES, T.A., COSTA, E.S., GONÇALVES, C.H.S. **Correlação Entre a Rugosidade e a Vibração de Canais Fresados na Liga de Alumínio ASTM-6351 T6 Usando o Cepstrum de Potência**, Anais do CONEM, Salvador, 2008.

KRABBE, D.F.M. **Otimização do fresamento do aço inoxidável aeronáutico 15–5 PH**. Dissertação de Mestrado, UNICAMP, Campinas, 2006.

LEITE, V.J.S. **Encontro 2: Introdução (continuação)**, Material didático da disciplina Controle Digital, CEFET-MG, Divinópolis, 2013. Slide.

MACHADO, A.R., COELHO, R.T, ABRÃO, A.M., SILVA, M.B. **Teoria da Usinagem dos Materiais**, 1ª Ed., Editora: Edgard Blücher LTDA, São Paulo, 2009.

MITUTOYO. **Manual de utilização rugosímetro SJ201**, Nº 99MBB079A. Disponível em: <<http://www.mitutoyo.com.br/site/download/manuais.html>>. Acesso em 26 nov. 2014.

NATIONAL INSTRUMENTS. **User guide and specifications ni usb-9233**, Catálogo de dados, 2007

NEPOMUCENO, L.X. **Técnicas de manutenção preditiva V.1**, 3ª Ed., Editora Edgard Blücher LTDA, São Paulo, 1989, 501p.

NUNES, L.T. **Análise estatística da influência dos parâmetros de corte na rugosidade no torneamento do aço microligado DIN 38MnSiVS5**, Dissertação de Mestrado, UFU, Uberlândia, 2011.

OGATA, K. **Discrete-Time Control Systems**, 2ª Ed., Editora: Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1995, 768p.

PHILLIPS, C.L., NAGLE, H.T. **Digital Control System Analysis and Design**, 3ª Ed., Editora Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1995, 681p.

PIRES, B.J. **Estudo das forças, vibrações e desgaste das ferramentas no fresamento da liga de titânio Ti-6Al-4V**, Dissertação de Mestrado, UNICAMP, Campinas, 2011.

REBRAC. **Rugosidade – Parâmetros**, 2014. Disponível em: <<http://www.rebrac.com.br/downloads/RUGOSIDADE%20-conceitos-.pdf>>. Acesso em: 20 jul. 2014.

ROSA, L.C. **Acabamento de Superfícies – Rugosidade Superficial**, Apostila, UNESP, Sorocaba, 2005.

ROSSI, L.M. **Análise entre a vibração mecânica e o desgaste da ferramenta no torneamento.** Trabalho de Conclusão de Curso, CEFET-MG, Divinópolis, 2014.

SANDVIK. **Sandvik Coromant, O processo de fresamento.** 2014. Disponível em: <http://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/milling/getting_started/general_guidelines>. Acesso em: 18 out. 2014.

SANDVIK. **Sandvik Coromant, O processo de fresamento.** 2015. Disponível em: <http://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/milling/getting_started/general_guidelines>. Acesso em: 23 mai. 2015.

SANTOS, A.L.B., RIBEIRO, C.R., DUARTE, M.A.V., SOUSA, M.M. **Análise Qualitativa para o Estudo da Influência da Vibração no Desgaste da Ferramenta de Corte em um Processo de Fresamento Frontal,** Anais do CONEM, Natal, 2000.

SANTOS, A.L.B. **Metodologia via redes neurais para a estimativa da rugosidade e do desgaste de ferramentas de corte no processo de fresamento frontal,** Tese de Doutorado, UFU, Uberlândia, 2001.

SANTOS, L.A. **Modelagem da área de corte no fresamento de rosca cônica API,** UFRJ, Rio de Janeiro 2013.

SICK, B. **On Line and Indirect Tool Wear Monitoring in Turning With Artificial Neural Networks: A Review of More Than a Decade of Research,** Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 16, 2002.

SILVA, R.H.L. **Monitoramento do Desgaste de Ferramentas no Fresamento de Topo Através dos Sinais de Potência e Emissão Acústica e Redes Neurais,** Dissertação de Mestrado, UFU, Uberlândia, 2010, 114p.

SOUSA, M.M. **Utilizando a Vibração Mecânica para Monitorar o Desgaste das Ferramentas de Corte e o Acabamento Superficial no Processo de Fresamento,** Tese de Doutorado, UFU, Uberlândia, 1998.

USINAGEM, Tudo Sobre. **Fresamento: Métodos de fresagem.** Disponível em: <<http://s3.amazonaws.com/magoo/ABAAAARMgAD-18.png>>. Acesso em 21 nov. 2014.

ZCCCT. **Zhuzhou Cemented Carbide Cutting Tools Co. Ltd.** Disponível em: <<http://www.zccct.com/en/procinserts.jsp?gradeid=2472193&medel=APMT100308P/PDE-DM>>. Acesso em 16 nov. 2014.

ANEXO A

MEDIÇÕES DE RUGOSIDADE

TABELA A.1 – Valores de rugosidade ensaio 1.

ENSAIO 1					
Rotação = 650 rpm - a_p = 0,3 mm					
Amostra	1	2	3	Média	Desvio Padrão (μm)
R_a (μm)	1,560	2,080	1,690	1,777	0,271
RPM (μm)	9,960	17,610	12,400	13,323	3,908
R_z (μm)	9,270	14,880	10,930	11,693	2,882
R_q (μm)	1,860	2,630	2,070	2,187	0,398

TABELA A.2 – Valores de rugosidade ensaio 2.

ENSAIO 2					
Rotação = 650 rpm - a_p = 0,3 mm					
Amostra	1	2	3	Média	Desvio Padrão (μm)
R_a (μm)	2,730	1,020	1,300	1,683	0,917
R_y (μm)	13,390	7,190	9,570	10,050	3,128
R_z (μm)	12,550	6,730	8,120	9,133	3,039
R_q (μm)	3,180	1,260	1,590	2,010	1,027

TABELA A.3 – Valores de rugosidade ensaio 3.

ENSAIO 3					
Rotação = 650 rpm - a_p = 0,3 mm					
Amostra	1	2	3	Média	Desvio Padrão (μm)
R_a (μm)	2,590	2,140	1,670	2,133	0,460
R_y (μm)	18,910	18,440	8,700	15,350	5,764
R_z (μm)	13,630	11,540	8,280	11,150	2,696
R_q (μm)	3,220	2,940	1,960	2,707	0,662

TABELA A.4 – Valores de rugosidade ensaio 4.

ENSAIO 4					
Rotação = 650 rpm - a_p = 0,6 mm					
Amostra	1	2	3	Média	Desvio Padrão (μm)
R_a (μm)	1,970	1,100	1,200	1,423	0,476
R_y (μm)	13,590	8,020	8,040	9,883	3,210
R_z (μm)	10,770	6,970	7,470	8,403	2,065
R_q (μm)	2,550	1,350	1,470	1,790	0,661

TABELA A.5 – Valores de rugosidade ensaio 5.

ENSAIO 5					
Rotação = 650 rpm - $a_p = 0,6$ mm					
Amostra	1	2	3	Média	Desvio Padrão (μm)
R_a (μm)	1,200	3,190	1,240	1,877	1,138
R_y (μm)	8,040	23,590	8,880	13,503	8,745
R_z (μm)	7,470	14,170	8,010	9,883	3,722
R_q (μm)	1,470	4,330	1,510	2,437	1,640

TABELA A.6 – Valores de rugosidade ensaio 6.

ENSAIO 6					
Rotação = 650 rpm - $a_p = 0,6$ mm					
Amostra	1	2	3	Média	Desvio Padrão (μm)
R_a (μm)	1,200	2,160	1,650	1,670	0,480
R_y (μm)	9,390	18,550	13,060	13,667	4,610
R_z (μm)	8,050	12,260	11,250	10,520	2,198
R_q (μm)	1,510	2,910	2,240	2,220	0,700

TABELA A.7 – Valores de rugosidade ensaio 7.

ENSAIO 7					
Rotação = 460 rpm - $a_p = 0,3$ mm					
Amostra	1	2	3	Média	Desvio Padrão (μm)
R_a (μm)	2,060	3,660	2,760	2,827	0,802
R_y (μm)	16,960	26,270	24,200	22,477	4,888
R_z (μm)	13,060	21,540	19,990	18,197	4,515
R_q (μm)	2,630	4,420	3,560	3,537	0,895

TABELA A.8 – Valores de rugosidade ensaio 8.

ENSAIO 8					
Rotação = 460 rpm - $a_p = 0,3$ mm					
Amostra	1	2	3	Média	Desvio Padrão (μm)
R_a (μm)	2,300	2,780	1,680	2,253	0,551
R_y (μm)	17,130	22,970	13,940	18,013	4,579
R_z (μm)	16,210	19,140	12,280	15,877	3,442
R_q (μm)	2,870	3,550	2,160	2,860	0,695

TABELA A.9 – Valores de rugosidade ensaio 9.

ENSAIO 9					
Rotação = 460 rpm - a_p = 0,3 mm					
Amostra	1	2	3	Média	Desvio Padrão (μm)
R_a (μm)	0,830	1,880	1,360	1,357	0,525
R_y (μm)	6,620	16,230	9,040	10,630	4,998
R_z (μm)	6,060	11,450	8,660	8,723	2,696
R_q (μm)	1,050	2,490	1,670	1,737	0,722

TABELA A.10 – Valores de rugosidade ensaio 10.

ENSAIO 10					
Rotação = 460 rpm - a_p = 0,6 mm					
Amostra	1	2	3	Média	Desvio Padrão (μm)
R_a (μm)	1,630	1,020	1,290	1,313	0,306
R_y (μm)	12,680	7,400	9,190	9,757	2,685
R_z (μm)	10,230	6,970	8,320	8,507	1,638
R_q (μm)	2,110	1,270	1,600	1,660	0,423

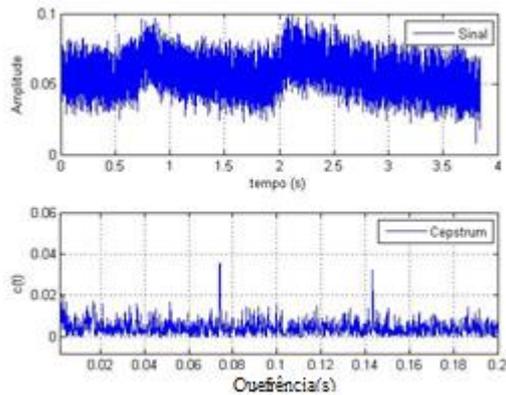
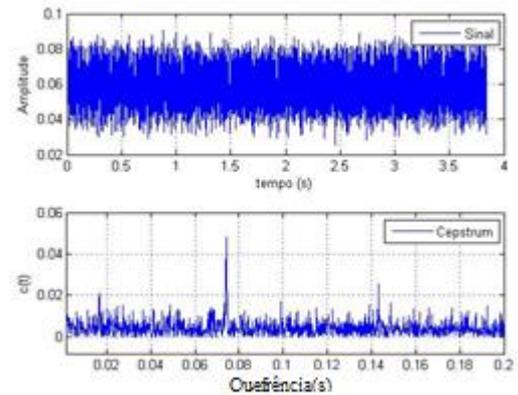
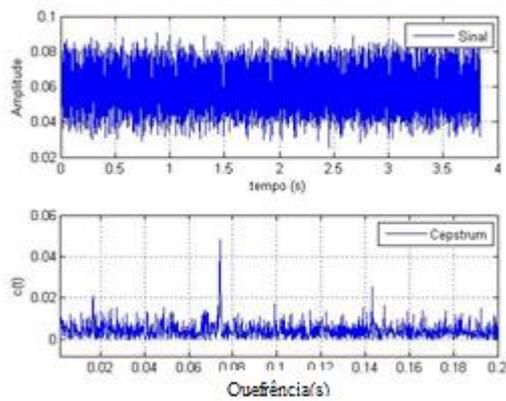
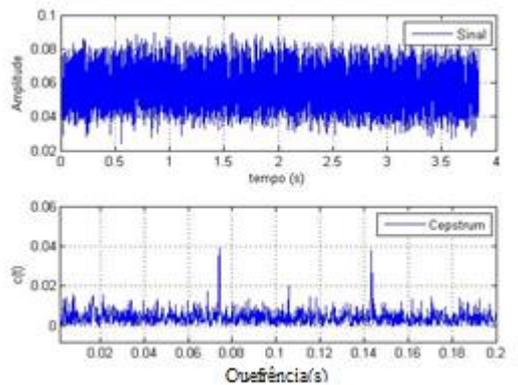
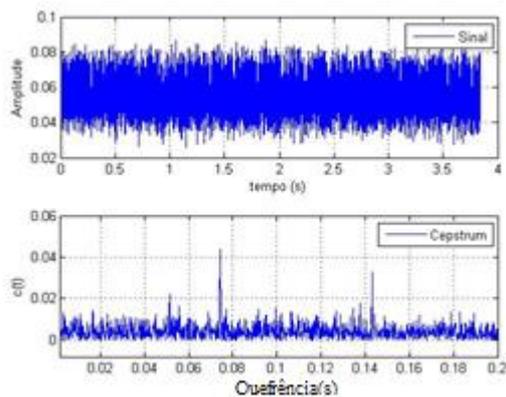
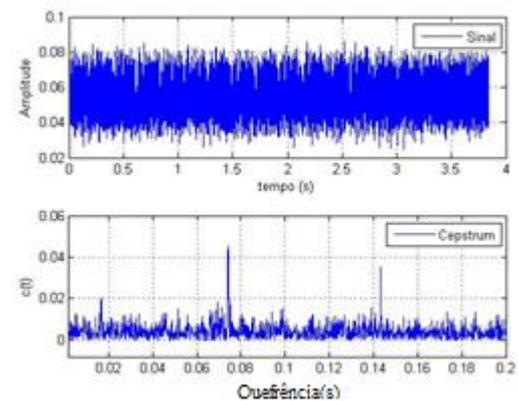
TABELA A.11 – Valores de rugosidade ensaio 11.

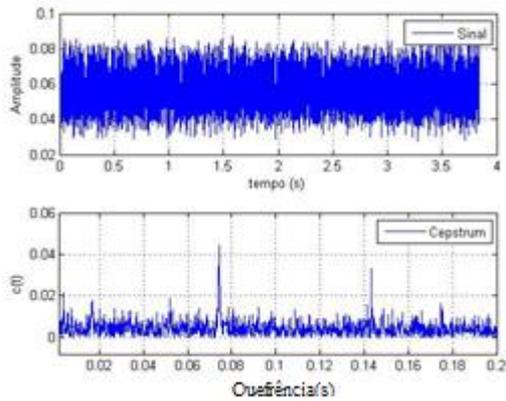
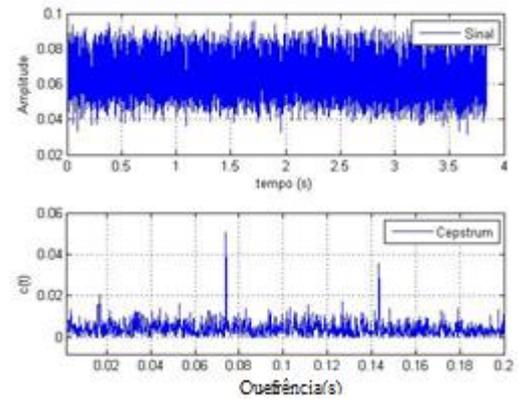
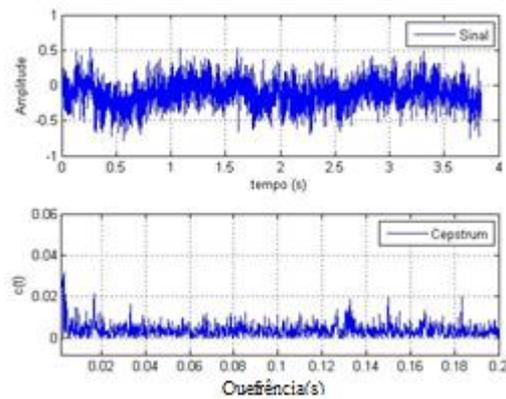
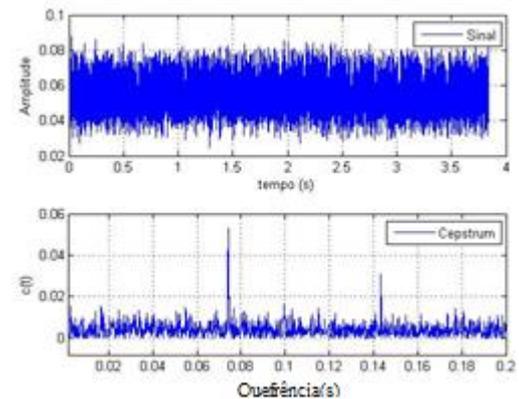
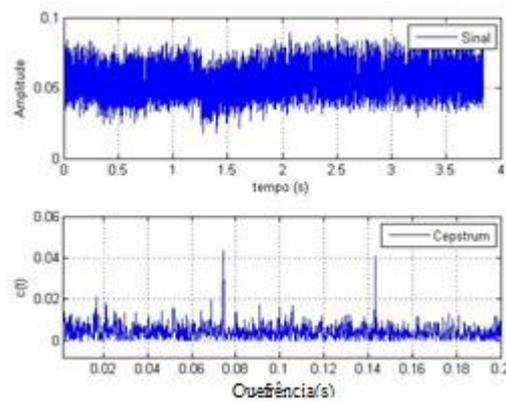
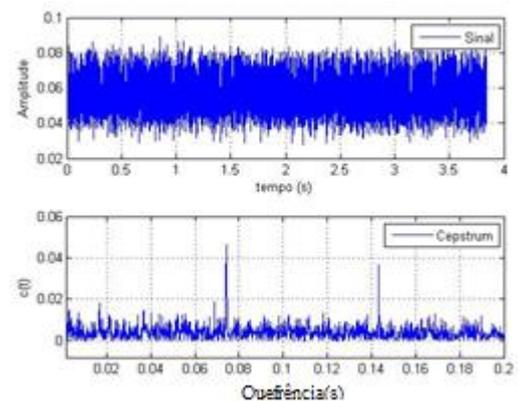
ENSAIO 11					
Rotação = 460 rpm - a_p = 0,6 mm					
Amostra	1	2	3	Média	Desvio Padrão (μm)
R_a (μm)	2,040	1,540	1,530	1,703	0,292
R_y (μm)	14,720	10,500	12,180	12,467	2,125
R_z (μm)	12,400	9,140	10,920	10,820	1,632
R_q (μm)	2,520	1,840	1,980	2,113	0,359

TABELA A.12 – Valores de rugosidade ensaio 12.

ENSAIO 12					
Rotação = 460 rpm - a_p = 0,6 mm					
Amostra	1	2	3	Média	Desvio Padrão (μm)
R_a (μm)	1,450	1,500	1,750	1,567	0,161
R_y (μm)	9,580	9,730	10,330	9,880	0,397
R_z (μm)	9,030	9,000	10,250	9,427	0,713
R_q (μm)	1,820	1,850	2,100	1,923	0,154

ANEXO B

SINAIS DE VIBRAÇÃO E GRÁFICO *CEPSTRAL*FIGURA B.1 – Ensaio 1 ($n = 650$ rpm, $a_p = 0,3$ mm)FIGURA B.2 – Ensaio 2 ($n = 650$ rpm, $a_p = 0,3$ mm)FIGURA B.3 – Ensaio 3 ($n = 650$ rpm, $a_p = 0,3$ mm)FIGURA B.4 – Ensaio 2 ($n = 650$ rpm, $a_p = 0,6$ mm)FIGURA B.5 – Ensaio 5 ($n = 650$ rpm, $a_p = 0,6$ mm)FIGURA B.6 – Ensaio 6 ($n = 650$ rpm, $a_p = 0,6$ mm)

FIGURA B.7 – Ensaio 7 ($n = 460$ rpm, $a_p = 0,3$ mm)FIGURA B.8 – Ensaio 8 ($n = 460$ rpm, $a_p = 0,3$ mm)FIGURA B.9 – Ensaio 9 ($n = 460$ rpm, $a_p = 0,3$ mm)FIGURA B.10 – Ensaio 10 ($n = 460$ rpm, $a_p = 0,6$ mm)FIGURA B.11 – Ensaio 11 ($n = 460$ rpm, $a_p = 0,6$ mm)FIGURA B.12 – Ensaio 12 ($n = 460$ rpm, $a_p = 0,6$ mm)