

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS**

**CAMPUS DIVINÓPOLIS**

**GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECATRÔNICA**

**ANÁLISE ENTRE A VIBRAÇÃO MECÂNICA E O DESGASTE DA  
FERRAMENTA NO TORNEAMENTO**

**LUCAS MOREIRA ROSSI**

**DIVINÓPOLIS  
2014**

**LUCAS MOREIRA ROSSI**

**ANÁLISE ENTRE A VIBRAÇÃO MECÂNICA E O DESGASTE DA  
FERRAMENTA NO TORNEAMENTO**

Relatório final de Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Mecatrônica do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais para obtenção do grau de Engenheiro Mecatrônico.

Orientador: Wagner Custódio Oliveira

DIVINÓPOLIS  
2014



**Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais**  
**CEFET-MG / Campus Divinópolis**  
**Curso de Engenharia Mecatrônica**

Monografia intitulada “ANÁLISE ENTRE A VIBRAÇÃO MECÂNICA E O DESGASTE DA FERRAMENTA NO TORNEAMENTO”, de autoria do graduando Lucas Moreira Rossi, aprovada pela banca examinadora constituída pelos seguintes professores:

---

Prof. Dr. Wagner Custódio Oliveira - CEFET-MG / Campus Divinópolis - Orientador

---

Prof. Dr. Rônei Sandro Vieira - CEFET-MG / Campus Divinópolis

---

Prof. Me. Juliano de Barros Veloso e Lima - CEFET-MG / Campus Divinópolis

---

Prof. Dr. Valter Junior de Souza Leite  
Coordenador do Curso de Engenharia Mecatrônica  
CEFET-MG / Campus Divinópolis

Divinópolis - Março de 2014

Dedico este trabalho à minha família, pelo amor irrestrito.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, por sua presença, luz e força que sempre me abençoa e capacita para tudo aquilo a que Ele me destina.

A minha família, pelo apoio, carinho e compreensão.

Ao meu orientador, professor Dr. Wagner Custódio Oliveira, pela disponibilidade, gentileza e orientações.

Ao professor Me. Cláudio Parreira Lopes, pelas oportunas instruções e gentileza as que tornaram possível a realização deste estudo.

Ao professor Me. Christian Herrera pela disponibilidade, gentileza, observações e contribuições. E por compartilhar os conhecimentos da área de instrumentação.

A Banca Examinadora pela disponibilidade, gentileza, observações e aportes apresentados ao trabalho.

Aos meus colegas, Nelson de Figueiredo Barroso, André Palhares Magalhães e Giordano Francis Vieira meu parceiro de iniciação científica. Obrigado pelos inesquecíveis momentos, ajuda e informações compartilhadas.

E a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste estudo.

## RESUMO

ROSSI, L. M. **Análise entre a vibração mecânica e o desgaste da ferramenta no torneamento**. 2013, 93f. Trabalho de Conclusão de Curso. Engenharia Mecatrônica. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – Campus Divinópolis.

O presente estudo propôs como objetivo realizar uma análise entre os parâmetros de usinagem com o desgaste da ferramenta e a vibração mecânica utilizando o cepstrum de potência. Como procedimentos metodológicos, descreveram-se os métodos realizados para preparar os corpos de prova, as dimensões e tipo de material, a instrumentação utilizada para coletar os dados, os equipamentos e as ferramentas para usinagem e o método de análise utilizado para estabelecer a relação dos parâmetros de corte, com a vibração e o desgaste da ferramenta. Para alcançar os resultados, buscou-se identificar o sinal de vibração, realizar uma análise gráfica dos parâmetros de corte com a média da amplitude do cepstrum de potência, realizar uma análise estatística dos dados, uma análise gráfica dos parâmetros de corte com a média do desgaste, outra análise estatística dos dados para o desgaste para, então, apresentar a relação da vibração versus desgaste da ferramenta. Como parâmetros de usinagem utilizaram-se velocidade de corte, avanço e profundidade de corte. Por contraste estatístico, os resultados apontam que o desgaste é influenciado pelos parâmetros de corte. O nível de desgaste da ferramenta apresentou aumento, esse aumento pode ser percebido na mesma ordem em que acontece o desgaste. Na análise pelo cepstrum, a vibração é influenciada pela rotação e pela profundidade de corte. Pela análise gráfica observou-se que o aumento do avanço tende a diminuir a vibração, e aumenta para uma velocidade de corte maior. Conclui-se que, de modo geral, não houve possibilidade de observar correlações capazes de confirmar os efeitos da vibração no desgaste. Essa questão pode ser esclarecida pelo fato de que o componente periódico dos sinais de vibração sofre maior influência de outras fontes geradoras de vibração, do que do próprio nível de desgaste da pastilha. Na relação da vibração, a resposta não se desvendou crescente ou decrescente, e, aparentemente os dados apresentaram-se apenas oscilantes em uma faixa, enquanto o desgaste se evidenciou crescente e ao mesmo tempo foi influenciado pelos parâmetros de corte.

**Palavras-chaves:** Cepstrum. Desgaste da ferramenta. Torneamento. Vibração mecânica.

## ABSTRACT

This present study has the purpose to analyze the relation between machining parameter and the wear of the turning inserts and the mechanical vibration using the power cepstrum. With the methodological procedures were described the performance to prepare the samples, the size and kind of material, the instrumentation used during to data collect, the equipments and tools for machining and the method of analysis used to establish the relation between cutting parameters on turning inserts wear and mechanical vibration. To find the results, searched to identify the signal vibration, make a graphical analysis of cutting parameters with the average amplitude of the power cepstrum, make a statistical analysis of the data, a graphical analysis of cutting parameters with the average wear, other statistical data analysis, and then show the relationship between vibration and tool wear. Like machining parameters were used cutting, feed and depth of cut. According to the statistics, the results shows that wear are influenced by the cutting parameters. The wear insert levels had increases, and this increase was noticed in the same order that happens the thinning. In the cepstrum analysis, the vibration it is influenced by the speed and depth of cut. For the depth-value of 1.0mm, the graphical analysis showed that an increase in advance decreases the vibration, and increases cutting speed. Therefore, in general way, there was not possibility of observing one relationship able to confirm the effects of vibration on the wear. This is justified by the fact that the periodic component signal gets a bigger influence on other sources of vibration generators than the wear inserts itself. In respect of vibration, the response did not appear ascending or descending. Apparently, the data presented just oscillating in a band, while wear was increased and influenced by the cut parameters.

**Keys-Words:** Cepstrum. Mechanical vibration. Turning. Wear insert.

# LISTA DE ACRÔNIMOS

## 1 LETRAS LATINAS

$Y_{ij}$	Observação do i-ésimo tratamento na j-ésima unidade experimental
A	Divisão da aresta principal de corte
A1	Porta de entrada analógica
$A_p$	Profundidade de corte [mm]
$A_{p1}$	Profundidade de corte 1 [mm]
$A_{p2}$	Profundidade de corte 2 [mm]
B	Divisão da aresta principal de corte
b	Número de bits
C	Divisão da aresta principal de corte
$C_m$	Capacitância Série do piezoelétrico [F]
$C_p$	Capacitância intrínseca do piezoelétrico [F]
DIC	Delineamento inteiramente casualizado
EA	Emissão acústica
En1	Ensaio 1
En2	Ensaio 2
En3	Ensaio 3
f	Avanço por rotação [mm/rot]
F1	Avanço 1 [mm/rot]
F2	Avanço 2 [mm/rot]
$F_L$	Força Externa Aplicada no Piezoelétrico [N]
$F_T$	Faixa de tensão
$H_0$	Hipótese de nulidade

H <sub>1</sub>	Hipótese de não nulidade
I	i-ésimo
IV	Instrumentação virtual
J	j-ésimo
L <sub>c</sub>	Percurso de corte
L <sub>f</sub>	Percurso de avanço
L <sub>m</sub>	Indutância Série do Piezoelétrico [L]
N	Divisão da aresta principal de corte
n	Rotação por minuto
Re	Resolução
R <sub>m</sub>	Resistência Série do Piezoelétrico[Ω]
R <sub>p</sub>	Resistência de Perdas do Piezoelétrico [Ω]
S <sub>qa</sub>	Sensibilidade especificada em carga
S <sub>va</sub>	Sensibilidade especificada em tensão
T <sub>f</sub>	Tempo de vida da ferramenta
T	Tempo de amostragem
U <sub>L</sub>	Tensão Série do Piezoelétrico [V]
U <sub>P</sub>	Tensão Elétrica nos Terminais do Piezoelétrico [V]
V <sub>c</sub>	Velocidade de corte [m/min]
VC1	Velocidade de corte 1[m/min]
VC2	Velocidade de corte 2[m/min]
X <sub>c</sub>	Sinal analógico
X <sub>s</sub>	Sinal amostrado
c(τ)	Cepstrum de potência

## 2 LETRAS GREGAS

$\alpha$	Nível de significância
$\mu$	Média geral estatística
$t_i$	Efeito do i-ésimo tratamento
$e_{ij}$	Erro associado ao i-ésimo tratamento da j-ésima unidade experimental

## 3 ABREVIações

A/D	Conversão analógico digital
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
$Al_2O_3$	Óxido de alumínio
ANOVA	Análise de variância
CVD	Chemical vapor deposition (deposição química em fase vapor)
DIC	Delineamento inteiramente casualizado
F(calc.)	Valor calculado para distribuição de Fisher
F(tab.)	Valor tabelado para distribuição de Fisher
GL	Grau de Liberdade
Hz	Hertz
ISO	International Organization for Standardization
QMRes	Quadrado médio dos resíduos
QMTrat	Quadrado médio dos tratamentos
rpm	Rotações por Minuto
Sig.	Significância de Fisher

SSRES	Soma dos quadrados dos resíduos
SSTOTAL	Soma dos quadrados totais
SSTRAT	Soma dos quadrados dos tratamentos
TiC	Carboneto de titânio
TiCN	Carbonitreto de titânio
TiN	Nitreto de Titânio
USB	Universal Serial Bus (Porta Serial Universal)

## LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 - Região medida.....	25
Figura 3.2 - Corte ortogonal em material defeituoso.....	28
Figura 3.2.1 Sistema de vibração livre com um grau de liberdade.....	28
Figura 3.3 - Força atuando sobre o material.....	29
Figura 3.3.1 - Força recebida sobre o material piezoelétrico.....	29
Figura 3.4 - Modelo elétrico piezoelétrico.....	29
Figura 3.5 - Sistema de aquisição de sinais.....	31
Figura 3.6 - Processo de conversão digitalizador do sinal.....	31
Figura 3.7.1 - Efeitos da amostragem a $f_s$ , sem aliasing.....	33
Figura 3.7.2 - Efeitos da amostragem a $f_s$ , com aliasing.....	33
Figura 3.8 - Power Cepstrum.....	34
Figura 3.9 - Sinal no domínio do tempo/ cepstrum de potência correspondente.....	35
Figura 4.1 - Representação das dimensões da pastilha: $s = 4,76\text{mm}$ , $d = 5,16\text{mm}$ , $r=0,8\text{mm}$ , $L=8,7\text{mm}$ e $I.C = 12,7\text{mm}$ .....	41
Figura 4.2 - Torno Romi.....	41
Figura 4.3 - Acelerômetro Piezoelétrico.....	43
Figura 4.4 - Módulo de Aquisição de Sinais modelo NI 9233.....	43
Figura 4.5 - Processo de corte na barra laminada com lubrificação.....	45
Figura 4.6 - Modelo dos corpos de provas - pré-usinagem.....	46
Figura 4.7 - Montagem do Microscópio Óptico USB.....	48
Figura 4.8- Modelo virtual do sistema de aquisição.....	49

Figura 4.9 - Montagem do sistema de medição com notebook executando programa de aquisição.....	50
Figura 4.10 - Painel Frontal - Tela para leitura e gravação dos dados.....	50
Figura 4.11 - Instrumentação virtual para aquisição de dados.....	50
Figura 5.1 - Sinal de vibração em amplitude e após processamento do Cepstrum, condições de usinagem, Ap1 F1 e VC2.....	55
Figura 5.2 - Sinal de vibração com picos periódicos – Ensaio 22, terceiro desbaste.....	57
Figura 5.3 - Desgaste de Flanco para as condições Ap1, F2 e VC1.....	64

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 5.1 - Comportamento da vibração para as condições de usinagem - primeiro desbaste - média dos resultados.....	58
Gráfico 5.2 - Comportamento da vibração para as condições de usinagem - Segundo desbaste - Média dos resultados.....	59
Gráfico 5.3 - Comportamento da vibração para as condições de usinagem - Terceiro desbaste - Média dos resultados.....	60
Gráfico 5.4 - Comportamento do desgaste da ferramenta para as condições de usinagem - primeiro desbaste - média dos resultados.....	63
Gráfico 5.5 - Comportamento do desgaste da ferramenta para as condições de usinagem – Segundo desbaste - Média dos resultados.....	64
Gráfico 5.6 - Comportamento do desgaste da ferramenta para as condições de usinagem – Terceiro desbaste - Média dos resultados.....	65
Gráfico 5.7 - Relação da vibração x Desgaste da ferramenta para Ap1.....	67
Gráfico 5.8 - Relação da vibração x desgaste da ferramenta para Ap2.....	68

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - ANOVA para análise de um experimento baseado no DIC.....	38
Tabela 4.1 - Condições de corte da ferramenta WNMG080408DF.....	40
Tabela 4.2 - Parâmetros de usinagem.....	42
Tabela 4.3 - Especificações do acelerômetro.....	43
Tabela 4.4 - Especificação do modelo NI 9233.....	44
Tabela 4.5 - Condições da máquina para cada ensaio.....	46
Tabela 4.6 - Condições de corte utilizadas.....	47
Tabela 5.1 - Análise cepstral do sinal de vibração/ condições de usinagem.....	56
Tabela 5.2 - Resultado da ANOVA para a vibração.....	61
Tabela 5.3 - Desgaste da ferramenta/ condições de usinagem.....	62
Tabela 5.4 - Resultado da ANOVA para o parâmetro desgaste.....	66

# SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	17
<b>2 REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	20
<b>3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	22
3.1 Ferramenta de corte e metal duro.....	22
3.2 Determinação da ferramenta.....	23
3.3 Revestimento para ferramenta.....	24
3.4 Desgaste e avaria da ferramenta.....	26
3.5 Vida da ferramenta.....	27
3.6 Medição do sinal de vibração.....	33
3.7 Cepstrum de potência.....	36
3.8 Análise de variância.....	40
<b>4 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	40
4.1 Materiais e equipamentos.....	40
4.2 Processo de usinagem: procedimento experimental.....	45
4.3 Processamento de dados.....	51
<b>5 RESULTADOS</b> .....	54
5.1 Sinal de vibração.....	54
5.2 Análise gráfica dos parâmetros de corte com a média da amplitude do cepstrum de potência.....	58
5.2.1 Análise de variância.....	60
5.3 Desgaste da ferramenta.....	62
5.4 Análise gráfica dos parâmetros de corte com a média do desgaste.....	63
5.4.1 Análise de variância dos dados gerais do desgaste.....	65
5.5 Relação da vibração x desgaste da ferramenta.....	67
<b>6 CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	69
<b>7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b> .....	70
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	71
<b>ANEXO A</b> .....	76
<b>ANEXO B</b> .....	77
<b>ANEXO C</b> .....	88

# 1 INTRODUÇÃO

A usinagem é um processo cujo objetivo consiste em atribuir forma, dimensão e acabamento às peças por meio da remoção de cavacos. Os cavacos são porções de materiais removidos de uma peça mediante uma ferramenta de corte (FERRARESI, 1977).

A fabricação de peças por usinagem é utilizada na indústria de todo o mundo. E, o torneamento, por sua vez, representa um processo largamente utilizado. Quando realizada em larga escala, a usinagem de peças implica na otimização dos processos que objetiva aumentar a produção e melhorar a qualidade do produto, de modo a reduzir os custos (FERRARESI, 2009; STÉFANO *et al.*, 1977).

Mas, o monitoramento do desgaste da pastilha de corte na indústria é um procedimento complexo. Sem a utilização de recursos adequados o operador não tem a possibilidade de saber seguramente o momento de troca da ferramenta. Além do mais, a avaliação “*off-line*” requer a retirada da ferramenta de corte da máquina, prática esta que implica na parada da produção. A verificação do desgaste se complica quando o processo de torneamento é automatizado. Assim, um dos maiores desafios da indústria é conseguir uma forma simples de realizar o monitoramento.

Pires e Diniz (1996) realizaram um estudo em uma fábrica de usinagem média e pesada e constataram que cerca de 68% das arestas de pastilhas de torneamento utilizadas eram trocadas antes do momento adequado. Por meio da utilização de amperímetro e o acesso visual da pastilha de corte, em que se media a corrente elétrica, os operadores foram treinados para correlacionar o desgaste da ferramenta com o aumento da corrente. A porcentagem de arestas desperdiçadas caiu para 16,6%.

Compete ressaltar que, em casos de operações de desbaste, os valores de tolerância do desgaste são altos, por medida de segurança, o operador costuma trocar a ferramenta bem antes do desgaste se aproximar da quebra. Já nas operações de acabamento, é mais fácil detectar o desgaste, quando os valores da rugosidade da peça produzida, diferem dos padrões (DINIZ *et al.*, 2006).

Nesse sentido, diferentes campos de pesquisa podem ser utilizados para realizar o monitoramento “*on-line*” do desgaste em processo, estes perpassam pela medição da vibração, temperatura, força exercida contra a peça e pela potência de alimentação elétrica. O monitoramento da usinagem de forma síncrona com a fabricação possibilita o acompanhamento da qualidade do processo sem interrupção do trabalho, de maneira a contribuir para o aumento da produtividade e o controle de qualidade.

Dentre as técnicas de monitoramento “online”, a análise da vibração mecânica medida durante a usinagem tem sido pesquisada e aplicada. A sua utilização volta-se para a estimativa do desgaste da ferramenta de corte, bem como para a avaliação do parâmetro de rugosidade superficial da peça fabricada (SICK, 2002; GUIMARÃES *et al.*, 2011).

O objetivo deste trabalho consistiu em realizar uma análise entre os parâmetros de usinagem com o desgaste da ferramenta e a vibração mecânica utilizando o cepstrum de potência.

Mais especificamente buscou-se identificar o sinal de vibração, realizar uma análise gráfica dos parâmetros de corte com a média da amplitude do cepstrum de potência e fazer uma análise de variância dos dados. Em seguida, buscou-se realizar uma análise gráfica dos parâmetros de corte com a média do desgaste, e demonstrar uma análise de variância dos dados. Por fim, buscou-se a apresentar a relação da vibração *versus* desgaste da ferramenta.

O tema que se propõe é importante, primeiramente por saber que a qualidade e a redução de custos e o não desperdício de materiais podem ser alcançados por meio da utilização de processos adequados. Assim, a busca desses atributos tem despertado grande interesse nos pesquisadores que vem empreendendo pesquisas para alcançar um monitoramento competente para os processos de usinagem. Diante disso, compreende-se ser o tema sugerido relevante.

Também, por se tratar de um trabalho acadêmico, tem-se a oportunidade de compreender como se estabelece a relação entre a teoria e a prática, podendo construir um olhar mais crítico acerca do assunto.

Depois, por perceber que a busca por tecnologias e informações competentes a garantir produtividade com qualidade, a um menor custo, é uma

realidade para as indústrias modernas. Assim, nota-se a oportunidade de empreender um tema que pode atender às exigências e expectativas do setor industrial. Podendo este estudo ser importante, não só para o seu autor, mas também para as indústrias que vierem a se interessar pelo experimento.

Por fim, pensou-se que a atualidade encontra-se mais do nunca na era da informação, das descobertas, e este estudo pode contribuir para a área de conhecimento empreendida. Pois, sabe-se que este tema, é pouco explorado e pode ser um importante objeto de estudo para a especialidade em questão.

O presente estudo obedece à seguinte organização:

Na Primeira seção, aborda-se sobre a contextualização do tema, os objetivos geral e específicos e a justificativa proposta para o estudo.

Na Segunda seção, apresenta-se a Revisão de Literatura, em que se divulgam alguns estudos que propõem uma discussão referente a diferentes experiências acerca do tema proposto.

Na Terceira seção, apresenta-se uma Fundamentação Teórica, em que se discorrem conceitos e características pertinentes a assuntos importantes para se compreender a pesquisa proposta, como ferramenta de corte, determinação, revestimento, desgaste, avaria e vida da ferramenta. Bem como, descreve-se sobre a medição do sinal de vibração, cepstrum de potência e análise de variância.

Na Quarta seção, expõem-se os Materiais e Métodos e os procedimentos utilizados para alcançar o objetivo proposto para o estudo.

Quinta seção: divulgam-se os Resultados Experimentais obtidos com a pesquisa aplicada.

Sexta seção: apresentam-se as Considerações Finais.

Sétima seção: expõem-se as Referências utilizadas para confeccionar a estrutura teórica proposta para o estudo.

Oitava seção: dedica-se a apresentar os Anexos.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

Nesta seção apresenta-se uma Revisão de Literatura, em que se divulgam alguns estudos que propõem uma discussão relativa a diferentes experiências acerca do assunto em questão.

Primeiramente, cita-se Guimarães *et al.* (2011) que realizaram um trabalho cujo objetivo foi analisar a relação entre o acabamento de eixos de aço carbono com a vibração mecânica. Os autores propuseram a utilização do cepstrum de potência com a finalidade de verificar alguma fonte de modulação. O experimento foi realizado no torneamento, de modo a variar os parâmetros de usinagem. Os autores concluem que a amplitude da vibração tende a diminuir com o aumento do avanço, e a rugosidade tende a aumentar de forma mais acentuada para menores valores de rotação.

Sick (2002) investigou a razão pela qual há dificuldade em se desenvolver sistemas de controle adequados. Foram consultadas 138 publicações referentes aos monitoramentos “*on-line*” e indiretos pela utilização de redes neurais. Esclarece-se que supervisionar o desgaste de uma ferramenta é a atividade mais difícil no monitoramento de condição da ferramenta para processos de corte de metais.

Baseado em uma obtenção sucessiva de sinais, com os sistemas de multi-sensores, há possibilidade de se avaliar ou qualificar determinados parâmetros de desgaste mediante as redes neurais. Contudo, o desenvolvimento de sistemas de monitoramento de desgaste de ferramentas ainda pode ser considerado como uma tentativa em curso. Possíveis direções para futuras pesquisas nesta área já estavam sendo apontadas (SICK, 2002).

Souto *et al.* (2004) examinaram o comportamento do coeficiente RMS do sinal de emissão acústica (EA) quando são gerados diferentes perfis de rugosidades no torneamento. Comparam-se o perfil de rugosidade da peça ao perfil de EA adquirido da seção longitudinal correlativo durante a usinagem. Para os experimentos, foi usinada uma barra cilíndrica de aço ABNT 1045, por meio de ferramenta de metal duro ISO P35 revestida. Os resultados evidenciam que a tendência do nível de EA foi a de aumentar com o aumento da rugosidade, havendo, portanto, uma correspondência entre o espaço do perfil de emissão acústica e o perfil de rugosidade correspondente à peça.

Em sua tese de Doutorado, Souto (2007) investigou melhor a técnica para monitorar o desgaste de flanco em pastilhas de metal duro revestido com nitreto de titânio por meio da emissão acústica. Foi utilizado um equipamento da Sensis (DM 42) para a obtenção do sinal de emissão acústica no decorrer do fresamento frontal de um aço microligado perlítico de forja (Din 38MnS6), e uma fresa com especificação R245 125Q40-12M, de 125 mm de diâmetro.

O método foi realizado por meio da ferramenta estatística boxplot. Os parâmetros selecionados foram utilizados para treinar e autenticar uma Rede Neural Probabilística, que teve o papel de distinguir e qualificar os estágios de desgaste da ferramenta. Os indicadores de acerto nas classificações da rede sugerem que a emissão acústica proporcione bons resultados para reconhecer estados de desgaste das ferramentas na operação de fresamento (SOUTO, 2007).

Pigari (1995) em sua tese de mestrado investigou a influência do desgaste da ferramenta no sinal de emissão acústica no processo de torneamento. Verificou-se também a relação do sinal para operações de acabamento e desbaste, comparando os tipos de medições da magnitude do sinal. Os resultados mostraram uma queda do sinal para as operações de desbaste e um aumento para acabamento quando a ferramenta se aproxima da troca. Nos ensaios, com correção, a influência do desgaste frontal no sinal se fez notar e a magnitude avaliada aumentou. O monitoramento da vida da ferramenta foi realizado de forma indireta, adotando como critério os valores medidos da rugosidade da peça usinada.

### 3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta seção apresenta-se a Fundamentação Teórica preparada para o estudo, em que se discorrem conceitos e características relacionados a temas relevantes para se compreender a pesquisa proposta, como ferramenta de corte, determinação, revestimento, desgaste, avaria e vida da ferramenta. Descreve-se ainda sobre a medição do sinal de vibração, cepstrum de potência e análise de variância.

#### 3.1 Ferramenta de corte de metal duro

O metal duro é o material mais utilizado na fabricação de ferramentas de corte. É feito por meio de partículas duras, combinadas com um ou mais metais do grupo do ferro (ferro, níquel ou cobalto). As partículas duras são carbonetos de tungstênio, metal de maior ponto de fusão, sendo combinado com outros carbonetos como titânio, tântalo e nióbio (STEMMER, 2005; DINIZ *et al.*, 2006).

A combinação dos constituintes é obtida pelos processos de produção referente ao pó metálico, mistura, compressão, sinterização e controle físico final do material sintetizado. O resultado é um produto denso que oferece à ferramenta a dureza e a tenacidade necessárias às operações de usinagem (FERRARESI, 1977; DINIZ *et al.*, 2006).

Em ferramentas de corte, a usinagem exige altas durezas e capacidade de resistência ao choque, característica encontrada no metal duro (DINIZ *et al.*, 2006).

#### 3.2 Determinação da ferramenta

A seleção do material para a ferramenta de corte para realizar uma usinagem envolve fatores como: material a ser usinado, natureza da operação,

condição da máquina operatriz, forma e dimensões da própria ferramenta, custo da ferramenta e lubrificação (FERRARESI, 1977).

Os materiais utilizados no ambiente industrial podem ser agrupados em ordem crescente e envolvem aspectos como dureza, temperatura e resistência ao desgaste por abrasão, ou seja: aços rápidos, aços rápidos com cobertura, metal duro, metal duro com cobertura, material cerâmico, nitreto de boro cúbico e diamante (DINIZ *et al.*, 2006).

O metal duro é aplicado na maioria das operações de usinagem das principais ligas metálicas, desde o latão mole, até o ferro fundido branco, além de grande variedade de substâncias não-metálicas (FERRARESI, 1977).

### 3.3 Revestimento para ferramenta

A deposição de revestimentos em ferramentas de corte tem como principal objetivo aumentar a sua vida, dando a ela características como dureza sem diminuir a tenacidade no núcleo e aumento da resistência ao desgaste na camada superior. Os efeitos positivos são o aumento da velocidade de corte o que resulta em uma maior produtividade e a redução nos esforços de corte, resultando em menor potência consumida no processo de usinagem (DINIZ *et al.*, 2006).

Os materiais mais utilizados para a cobertura são o carboneto de titânio ( $TiC$ ), óxido de alumínio ( $Al_2O_3$ ), nitreto de titânio ( $TiN$ ) e carbonitreto de titânio ( $TiCN$ ). Esses materiais oferecem uma barreira térmica entre o material da peça e o substrato da ferramenta devido à baixa condutividade térmica (DINIZ *et al.*, 2006).

Conforme Pigari (1995), a utilização de pastilhas com revestimento permite conjugar processos que exigem da ferramenta características de tenacidade com resistência ao desgaste e também dureza a quente, enquanto o núcleo permanece com as características de seu material. Ferramentas revestidas com  $TiN$  permitem a usinagem de diferentes materiais devido às suas características de dureza e tenacidade. O  $TiCN$  possui uma estrutura de multicamadas que pode evitar que trincas, formadas na superfície, se propaguem até o substrato. Este autor ainda conta que o trabalho realizado por Schintlmeister, Pacher e Raine (1978) mostrou

que a utilização de ferramentas revestidas pode reduzir as forças de corte de 10% a 30% dependendo do componente, reduzindo grandemente a vibração.

### 3.4 Desgaste e avaria da ferramenta

O desgaste na ferramenta é uma consequência comum realizada em todo o processo de usinagem, em que, as forças de corte, vibrações do sistema e atrito, são fatores que levam a ferramenta ao fim de vida. O descarte da ferramenta pode ocorrer devido ao desgaste excessivo que pode aumentar gradativamente ou devido à quebra, lascamento ou trinca que ocorrem espontaneamente durante o processo (DINIZ *et al.*, 2006).

Os principais tipos de desgaste são o frontal e o de cratera. O desgaste frontal ou de flanco que é o mais comum, ocorre na superfície de folga da ferramenta, causado pelo contato entre peça e ferramenta. Esse tipo de desgaste modifica totalmente a forma da aresta de corte original e piora o acabamento da peça usinada. As possíveis causas são: velocidade de corte alta, resistência ao desgaste insuficiente, abrasão e aresta postiça de corte. O desgaste de cratera ocorre na superfície de saída, causado pelo contato entre ferramenta e cavaco. Em alguns processos de usinagem esse tipo pode não ocorrer devido ao acabamento da pastilha (DINIZ *et al.*, 2006).

Em ferramentas de metal duro que utilizam cobertura, o desgaste de cratera, em geral, é muito pequeno ou inexistente. Já o desgaste de flanco cresce mas de forma lenta, devido à alta resistência da camada de cobertura da pastilha, até atingir valores  $V_b$  da ordem de 0,3mm a 0,4mm. Nessa faixa, a cobertura já está quase que totalmente consumida pelo desgaste, então o corte passa a ser realizado pelo substrato e cresce rapidamente, chegando a valores de 0,8 a 1,0mm, em um tempo muito curto, devendo ser substituída a ferramenta (DINIZ *et al.*, 2006).

A avaria leva inesperadamente ao descarte da ferramenta. São mais comuns em processos de exigência extrema ou escolha incorreta da pastilha para determinados parâmetros de corte e materiais a serem usinados. A quebra é um tipo de avaria em que ocorre a ruptura da ponta ou da aresta cortante da pastilha.

Origina-se por um raio de ponta e ângulo de cunha pequeno, material quebradiço da peça, carga e dureza excessivas e corte interrompido. A avaria pode danificar a aresta, toda a pastilha e a própria peça (FERRARESI, 1977; DINIZ *et al.*, 2006).

As trincas são outro tipo de avaria. Formam-se principalmente em pastilhas com pouca tenacidade. São causadas pela variação brusca da temperatura, dos esforços mecânicos ou por serem soldadas no porta-ferramenta. Ocorre devido à diferença do coeficiente de dilatação que faz a pastilha dilatar e deformar desigualmente (FERRARESI, 1977).

Para medição do desgaste, deve-se padronizar a região da aresta principal de corte da ferramenta, que é dividida em quatro regiões, em acordo com a Norma ISO-3685/93: C, B, A e N, conforme Figura 3.1 (LOPES, 2013).

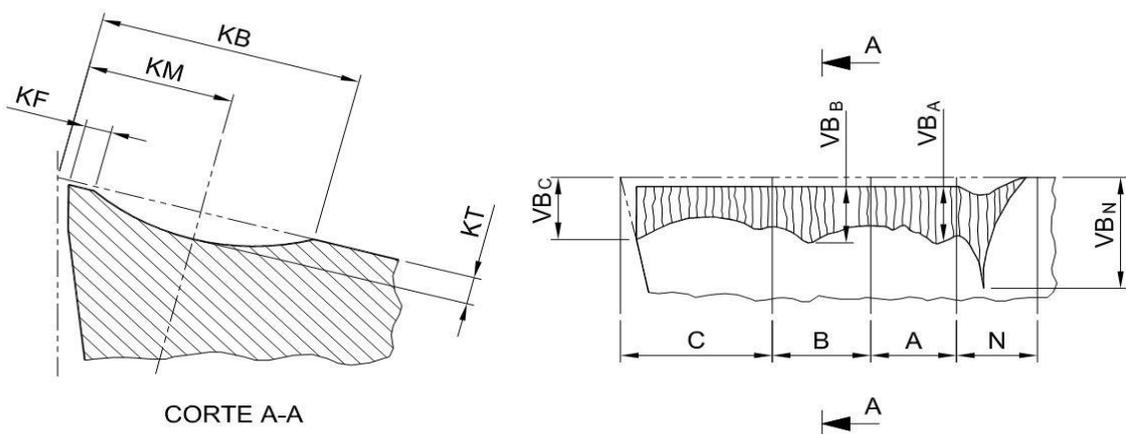


Figura 3.1 - Região medida  
Fonte: Lopes (2013).

A região C é a parte curvada da aresta de corte no canto da ferramenta, a região B é a parte reta da borda de corte, a região A é parte mais distante da aresta de corte e a região N estende-se para além da aresta de corte (ÁLVAREZ, 2013; MAIA, 2009).

O desgaste em B é medido com base na média de desgaste, caso ocorra de forma uniforme, ou pelo valor máximo. Também se pode medir o desgaste na região A, também por largura média ou valor máximo (GUTIÉRREZ, s.d.)

### 3.5 Vida da ferramenta

A vida da ferramenta pode ser definida como o seu tempo efetivo de trabalho, até que a capacidade de corte perca a eficiência. Após o seu tempo de vida, a ferramenta deve ser substituída (FERRARESI, 1977; DINIZ *et al.*, 2006).

A ferramenta deve ser retirada da máquina quando os níveis de desgaste atingirem proporções elevadas, levando a possível quebra da aresta de corte, bem como quando não é mais possível obter tolerâncias no acabamento devido ao desgaste da superfície de folga, quando a ferramenta perde o fio de corte devido a temperaturas elevadas da aresta de corte em ferramentas de aço rápido e quando a máquina exige mais potência para usinar devido aos desgastes elevados (DINIZ *et al.*, 2006).

A Norma ISO 3685/93 recomenda alguns valores que estabelecem o final de vida da ferramenta independentemente do material, ou seja: desgaste de flanco médio e desgaste de flanco máximo (0,6mm).

O percurso de corte ( $L_c$ ) em quilômetro é em função do tempo de vida da ferramenta ( $T_f$ ) em minutos, podendo ser estabelecido pela Equação 3.1:

$$L_c = \frac{V_c \cdot T_f}{1000} [Km] \quad (3.1)$$

O percurso de avanço ( $L_f$ ) em função do tempo de vida é expresso pela Equação 3.2 (DINIZ *et al.*, 2006).

$$l_f = f \cdot n \cdot T_f [mm] \quad (3.2)$$

Taylor descreveu em 1907 pela primeira vez a vida da ferramenta de forma determinística pela Equação 3.3 (PIGARI, 1995).

$$T_f = K \cdot V_c^{-x} \quad (3.3)$$

K, e x são constantes determinadas experimentalmente, que dependem do material usinado e dos parâmetros de corte.

De acordo com Souto (2007), outras formas práticas utilizadas nas indústrias para expressar o final de vida da ferramenta podem ser: tempo efetivo de trabalho, percurso de corte, percurso de avanço, volume de material removido, número de peças produzidas, rugosidade da superfície gerada e vibração do sistema máquina-ferramenta, ferramenta e peça.

Os mecanismos de desgaste da ferramenta sofrem intervenções das propriedades dos materiais. A dureza afeta a abrasão mecânica e a composição química afeta o desgaste por difusão e por oxidação (PIGARI, 1995).

### 3.6 Medição do sinal de vibração

A vibração é o movimento de um sistema mecânico em torno de sua posição estática. Para que o sistema vibre, é necessário que ele sofra excitação externa e tenha capacidade de armazenar energia cinética e potencial. A vibração ocorre geralmente pelos efeitos de tolerância de fabricação, folga da máquina e atrito entre a peça de usinagem (SOUTO, 2007).

As vibrações são periódicas e sustentadas pela energia conservativa armazenada pelas propriedades do material. Na usinagem, as vibrações são consequências das variações cíclicas nos componentes dinâmicos das forças de corte (DIMLA; LISTER, 2000 *apud* MAIA, 2009).

É difícil quantificar o componente de excitação da vibração em virtude da incerteza para definir os parâmetros de inércia, rigidez e amortecimento. A força de excitação apresenta uma característica periódica, frequência básica e de engrenamento, tendo ainda uma relação harmônica com o número de dentes e a rotação da máquina (BARRETO, 2003; BRAUN, 1986<sup>1</sup>).

A Figura 3.2 ilustra a relação da vibração.

---

<sup>1</sup>Braun, S., 1986, **Mechanical Signature Analysis: Theory and Applications**, Ed. Academic Press. *apud* GUIMARÃES, 2008.

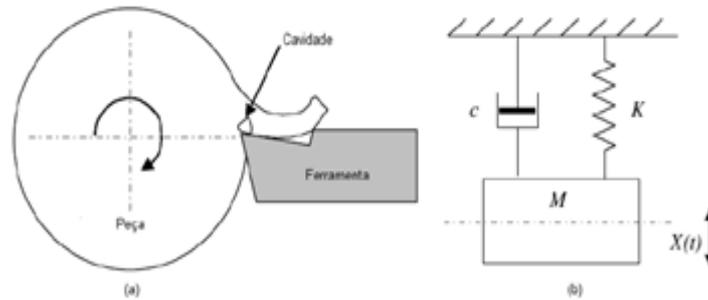


Figura 3.2. Corte ortogonal em material defeituoso.  
 Figura 3.2.1 Sistema de vibração livre com um grau de liberdade.  
 Fonte: Maia (2009).

Onde  $M$  é a massa,  $K$  a rigidez e  $C$  o amortecimento viscoso (MAIA, 2009):

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = 0 \quad (3.4)$$

A Equação Diferencial 3.4 descreve de forma geral o deslocamento do sistema, de modo a apresentar a vibração. O movimento é demonstrado pela Figura 3.2, que sob o ponto de vista da ferramenta, passa pela descontinuidade da peça.

Para medição da vibração, os sensores do tipo piezoelétricos são considerados os melhores para tal função, sendo o mais utilizado. Isso se deve ao fato de não possuírem parte móvel, operar em alta faixa e trabalhar em condições de temperatura adversas (FLORA, 2005; SILVA, 2012).

O dispositivo piezoelétrico quando é mecanicamente tencionado proporciona uma carga elétrica proporcional à força aplicada. Também, há funcionalidade recíproca, pois as vibrações são produzidas na medida em que recebem carga elétrica (FLORA, 2005; SILVA, 2012).

O fenômeno da piezoelectricidade tem como principio a geração de uma carga elétrica na superfície de um material quando ele é deformado. Dessa forma, converte-se energia mecânica em energia elétrica. O material geralmente é o titanite de bário e titanite de zircônio (ITM, 2013).

A Figura 3.3 mostra uma força atuando sobre o material. O material piezoelétrico age como uma massa mola entre a massa sísmica e a base do sensor, Figura 3.3.1. A força recebida sobre o material piezoelétrico é igual ao produto da

massa sísmica pela aceleração. Como essa massa é constante, a carga elétrica produzida é proporcional à aceleração. Em consequência, a saída do acelerômetro é proporcional à aceleração da base na qual foi instalado (FLORA, 2005)

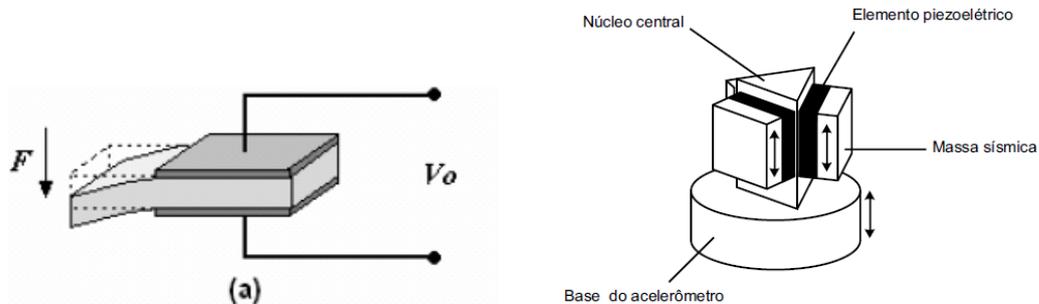


Figura 3.3: Força atuando sobre o material.

Fonte: ITM (2013),

Figura 3.3.1 -Força recebida sobre o material piezoelétrico.

Fonte: Flora (2005).

Na Figura 3.4, tem-se o modelo elétrico definido para o acelerômetro piezoelétrico. Trata-se de um circuito RLC que é o mais utilizado. Mas, muitos estudos têm sido realizados para encontrar o melhor modelo (MOIA, 2004).

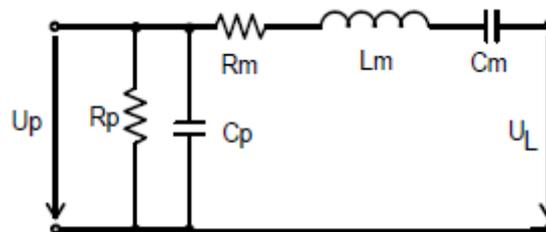


Figura 3.4 - Modelo elétrico piezoelétrico.

Fonte: Moia (2004)

No circuito, o elemento piezoelétrico age como um capacitor representado por  $C_p$ .  $L_m$  (indutância),  $C_m$  (capacitância) e  $R_m$  (resistência). Representam respectivamente a flexibilidade, a massa e as perdas por atrito no sistema piezoelétrico (MOIA, 2004).

O modelo pode ser entendido pelo armazenamento de energia através de um campo elétrico em  $C_p$ . As perdas de energia neste campo são representadas por  $R_p$ . A energia armazenada depende principalmente da tensão aplicada em  $U_p$ , que

representa os terminais do piezoelétrico e pode ser tanto fonte de carga ou fonte de tensão, dependendo da aplicação como sensor ou atuador. A tensão  $U_L$  representa uma força externa  $F_L$  aplicada ao material piezoelétrico, como um sistema oscilante. O modelo pode ser simplificado desconsiderando-se  $R_p$ ,  $L_m$  e  $C_m$  (MOIA, 2004).

A saída do sensor é medida de acordo com a sua sensibilidade, que é uma especificação técnica do fabricante. E pode variar de um sensor para outro devido às características da capacitância do material. A sensibilidade especificada em  $S_{qa}$ , é expressa em termos de carga, pC por unidade de aceleração (Equação 3.5) (FLORA, 2005).

$$S_{qa} = \frac{pC}{m/s^2} = \frac{pC_{eficaz}}{(m/s^2)_{eficaz}} = \frac{pC_{pico}}{(m/s^2)_{pico}} = \frac{q_a}{a} \quad (3.5)$$

Já em termos de tensão, especifica-se por  $S_{va}$ , expresso em mV por unidade de aceleração (Equação 3.6).

$$S_{va} = \frac{mV}{m/s^2} = \frac{mV_{eficaz}}{(m/s^2)_{eficaz}} = \frac{mV_{pico}}{(m/s^2)_{pico}} = \frac{v_a}{a} \quad (3.6)$$

A utilização de sensores de vibração permite obter informações do estado da máquina, analisando o sinal da vibração em amplitude e as frequências características (SOUTO, 2007).

A análise do sinal de vibração pode ocorrer por meio de diversas técnicas que permitem obter informações sobre possíveis defeitos, como: o monitoramento que mede o valor RMS (raiz média quadrada) do sinal, descrita como nível Global. O Fator de Crítica (FC) que estabelece a análise da relação entre o valor de pico ( $V_p$ ) e o valor RMS, a análise espectral que apresenta as frequências investigadas, a técnica do envelope que faz uma comparação entre o nível inicial, ou seja, compara uma peça nova com uma peça gasta ou com problema e a análise cepstral que detecta a periodicidade num espectro (SILVA, 2012).

Os dados para análise são obtidos por meio de uma manipulação dos sinais através de um sistema de aquisição, cuja composição é composta especificamente de: sensores/transdutores, condicionador de sinais, placa de aquisição e computador, Figura 3.5.

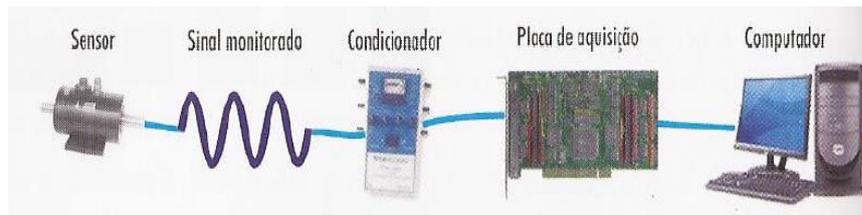


Figura 3.5: Sistema de aquisição de sinais.  
Fonte: Silva (2012)

Segundo Sumathi; Surekha (2007), um sistema de instrumentação virtual - IV's, é um *software* que é desenvolvido pelo utilizador e realiza uma medição computadorizada, de maneira a controlar dispositivos de aquisição de sinais externos e exibir dados dos resultados em um computador de mesa. No geral, o *software* é capaz de mudar as formas básicas de atuação do instrumento e permitir que o usuário modifique a função em uma ampla gama de aplicações.

O condicionador de sinais tem a função de realizar tratamento adequado do sinal detectado nos sensores para se adequar a conversão analógica digital. Podem ser como fonte de alimentação dos sensores, amplificadores, isoladores e multiplexagem. Na placa de aquisição, os dados são convertidos em A/D, passando da grandeza elétrica para uma representação numérica. Uma vez que foi obtida a informação em formato digital, ela pode ser processada pelo computador, convertida, comparada, armazenada e aplicado um método de análise do sinal adquirido (SUMATHI; SUREKHA, 2007).

O processo de conversão, que digitaliza o sinal, é composto por um filtro *anti-aliasing*, um amostrador e um circuito que transforma o valor analógico para o valor correspondente numérico (A/D), para assim enviar o valor a um microprocessador. A Figura 3.6 mostra este sistema (FERNANDES, 2011).

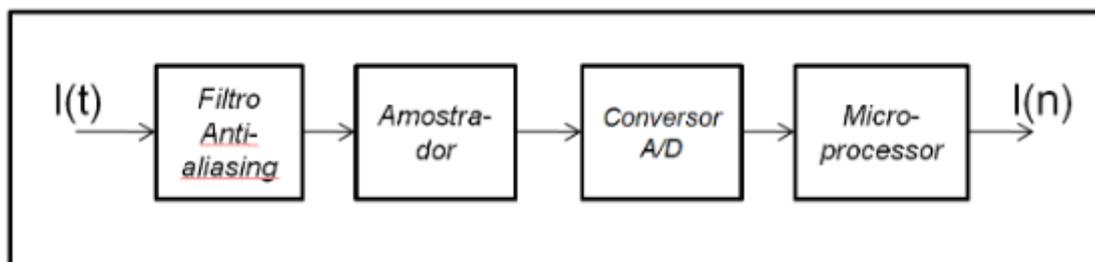


Figura 3.6 - Processo de conversão digitalizadora do sinal.  
Fonte: Fernandes(2007).

O amostrador é um circuito que mantém o valor do sinal analógico e a tensão elétrica durante a conversão para digital. Esse circuito normalmente encontra-se integrado ao conversor A/D. No circuito responsável pela amostragem, antes dos sinais de entrada serem amostrados, estes devem ser aplicados a um filtro passa-baixa, a fim de que todas as frequências acima da frequência de Nyquist sejam atenuadas. O propósito da utilização deste filtro é evitar a ocorrência do efeito *aliasing* durante a aquisição, desta ação decorre o nome filtro anti-aliasing (COTRIM, 2003).

O processo de amostragem ideal pode ser apresentado pela Equação 3.7:

$$X_c[n] = X_c(nT), -\infty < n < \infty \quad (3.7)$$

Onde T período de amostragem, corresponde ao intervalo de tempo entre as amostras discretizadas a partir do sinal contínuo no tempo.

Para Fernandes (2011), a partir da Equação 3.7, pode-se aplicar a transformada de Fourier contínua no tempo para calcular o espectro de frequência do sinal. Utiliza-se o modelo em que o sinal amostrado de  $X_c(t)$  é formado pelo sinal  $X_s(t)$ , pode-se deduzir a expressão anterior em:

$$X_S(j\Omega) = \frac{1}{T} \sum_{n=-\infty}^{\infty} X_c(j(\Omega - n\Omega_T)) \quad (3.8)$$

Onde  $\Omega_T = 2\pi/T$  é a frequência de amostragem, sendo proporcional ao inverso do intervalo de tempo entre as amostras  $X_c[n]$ . Pela análise da função de  $X_S(j\Omega)$ , verifica-se que o espectro do sinal amostrado é uma função periódica em relação a  $\Omega$  com um período igual a  $\Omega_T$ .

Na Figura 3.7.1, mostra-se o exemplo do espectro  $X_S$  de 0 a  $F_S$ . Para se realizar uma aquisição bem sucedida, deve-se respeitar o teorema de Nyquist. Este teorema estabelece que o sinal amostrado a uma taxa  $F_S$ , não deve conter componentes de frequência maior ou igual a  $F_S/2$ . O efeito, caso contrário, distorce o sinal digitalizado, impedindo a sua reconstrução, sendo este o efeito *aliasing* (KARL, 1984; FERNANDES, 2011).

O *aliasing* ocorre devido à periodicidade do espectro  $X_s$ , frequências acima de  $F_s/2$  aparecem como frequências abaixo desta. A Figura 3.7b mostra esse efeito, em que uma frequência alta  $F_2$  interfere no sinal digitalizado na frequência  $F_1$ .

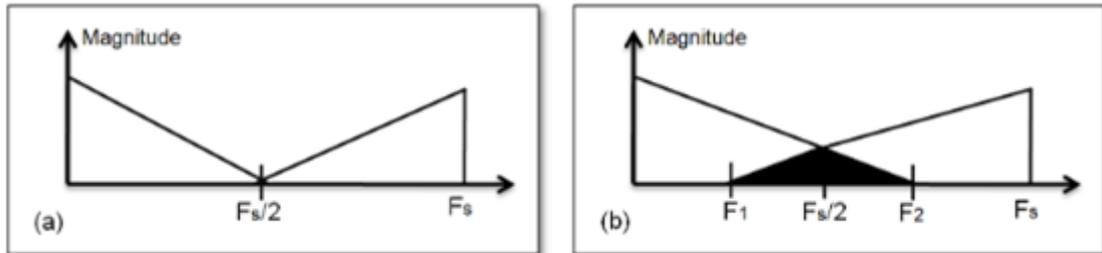


Figura 3.7.1 - Efeitos da amostragem a  $F_s$ , sem *aliasing*

Figura 3.7.2 - Efeitos da amostragem a  $F_s$ , com *aliasing*

Fonte: Fernandes (2011).

### 3.7 Cepstrum de potência

A análise cepstral tem origem em 1963 por Bogert *et al.* e foi idealizada para melhorar o método de auto correlação em sistemas de detecção sísmica. O nome deriva do fato de o cepstrum ser um espectro do espectro. O power cepstrum é uma técnica heurística e é baseada na determinação do tempo de chegada do eco de um sinal composto (CHILDERS, 1977).

A técnica do cepstrum de potência (power cepstrum) encontra o cepstrum a partir do espectro de potência, enquanto que outras técnicas, como o cepstrum complexo, consideram além da magnitude do sinal também a fase em que mais informações são preservadas (GAUCINISKI, 2009).

Tem como aplicação detectar defeitos em engrenamento, processar voz como reconhecimento de fala e problemas na laringe, processar informações sísmicas, de modo a identificar variações geológicas, e processar sinais de sonar. Pode ser aplicado na vibração, para extrair as fontes de modulação em amplitude associada com o período de rotação do eixo-árvore (GUIMARÃES *et al.*, 2011).

A operação matemática do cepstrum consiste em extrair na forma logarítmica a Transformada de Fourier do espectro do sinal. A Equação 3.9 define

esta técnica de análise de sinais (BRAUN, 1986).<sup>2</sup>

$$c(\tau) = \mathfrak{F}^{-1}\{\ln |S(f)|^2\} \quad (3.9)$$

Onde  $c(\tau)$  é o cepstrum de potência do sinal,  $\tau$  denota deslocamento no tempo em s, conhecido como *quefrequency*,  $f$  é a frequência em hertz,  $\mathfrak{F}$  é o operador da transformada de Fourier e  $|S(f)|^2$  é função densidade espectral de potência do sinal.

A relação das unidades que o cepstrum associa pode ser comparada esquematicamente no Quadro 3.1:

Frequência = quefrequency	Fase = saphe
Amplitude = gamnitude	Filtragem = lifftering
Harmônico = rahmonic	Período = repiod

No espectro, a *quefrequency* informa em unidade de tempo, a periodicidade observada. Um valor alto de *quefrequency* representa um pequeno espaçamento entre os períodos de repetição. E baixa *quefrequency* indica uma lentidão no padrão de repetição. Essa característica faz do cepstrum um excelente analisador de espectro (BRAUN, 1986).

Em termos de implementação como algoritmo, o power cepstrum pode ser representado como mostra a Figura 3.8 (VENTURA, 2011)

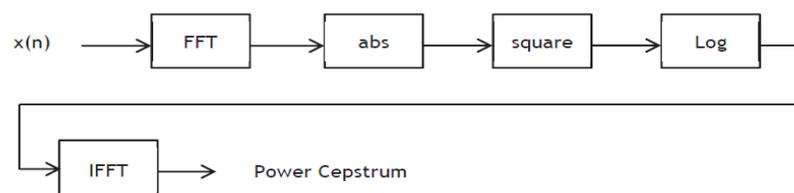


Figura 3.8- Power Cepstrum.  
Fonte: Ventura (2011).

<sup>2</sup>Braun, S., 1986, **Mechanical Signature Analysis: Theory and Applications**, Ed. Academic Press.apud GUIMARÃES, 2008.

A conversão logarítmica do espectro do sinal enfatiza a estrutura harmônica do espectro e reduz a influência dos vários caminhos entre a fonte do sinal e o ponto de medição deste (BARRETO, 2003). Essa escala acaba por atenuar um ruído no sinal que não é correlacionado com as vibrações periódicas provenientes da usinagem (GUIMARÃES, *et al.*, 2011).

Por ser uma média das médias das componentes de uma família de bandas laterais, o componente cepstral é pouco afetado por modificações decorrentes do posicionamento de um acelerômetro (DUARTE, 1999 *apud* BARRETO, 2003).

O espectro característico das modulações de amplitude e frequência tende a se mostrar muito ricos em informações, porém não demonstra as frequências claramente como no cepstrum (BARRETO, 2003).

A Figura 3.9 mostra um sinal no domínio do tempo e os picos  $c(\tau)$  com as correspondentes *quefrequency*. No primeiro pico registra-se o período de algum padrão que se repete no sinal (GUIMARÃES *et al.*, 2008).

À medida que aumenta o período de repetição, as amplitudes moduladas das bandas laterais diminuem. Essa relação do aumento de *quefrequency* diminui exponencialmente  $c(\tau)$  (BRAUN, 1986 *apud* GUIMARÃES, 2008).

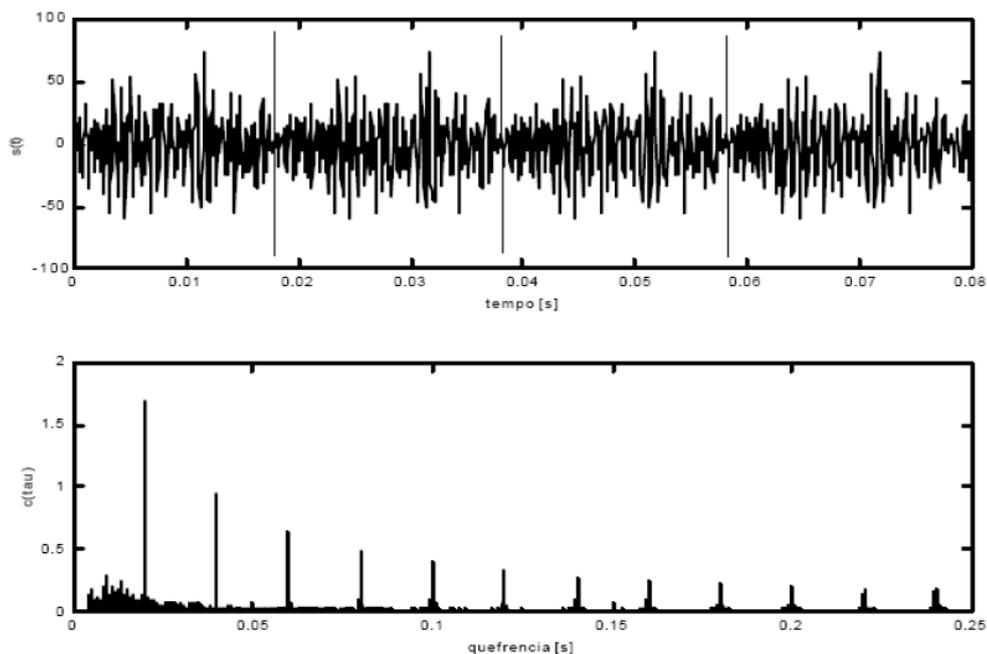


Figura 3.9 - Sinal no domínio do tempo e o cepstrum de potência correspondente.  
Fonte: Guimarães et al. (2008).

### 3.8 Análise de variância

A análise de variância (ANOVA) constitui um conjunto de técnicas estatísticas que visa fundamentalmente, verificar se existe influência significativa dos fatores em uma variável dependente, que é a resposta. Esses fatores ou tratamentos são variáveis nas quais se realizam alterações, a fim de verificar as possíveis alterações sofridas na variável resposta com um grau de confiança conhecido (MONTGOMERY, 2008; CAETANO, 2013; WERKEMA, 1996 *apud* USEVICIUS, 2004; USEVICIUS, 2004).

A avaliação da ANOVA é realizada de forma que a diferença entre o amostras avaliada em seus respectivos níveis sejam pequenas em relação ao erro. Isso para concluir se existe alguma diferença significativa na resposta (BREYFOGLE, 1999<sup>3</sup>; USEVINICIUS, 2004).

Em um experimento, tratamentos são vistos como variáveis independentes, podendo ter vários níveis, que são responsáveis por uma ou mais variável de resposta. Quando os tratamentos são estruturados de forma que são escolhidos pelo pesquisador, tem-se o modelo de efeito fixo, caso sejam sorteados, o modelo é de efeito aleatório. O planejamento de como os tratamentos são designados aos experimentos definem o delineamento experimental. São exemplos destes: planejamento aleatorizado por blocos, os quadrados latinos e os quadrados greco-latinos (LOPES, 2011).

Os procedimentos para a realização de um experimento variam de acordo com a área, porém todo experimento deve conter no mínimo os princípios básicos da repetição e da casualização (CARNEIRO; RIBEIRO JÚNIOR; SANTOS, 2009).

Princípio da repetição: consiste em aplicar um mesmo tratamento no experimento.

Princípio da casualização: consiste em distribuir ao acaso os tratamentos à unidade experimental, evita-se que um tratamento seja favorecido por controle do pesquisador. Dessa forma, as variáveis que contribuem para o erro são convertidas em variáveis aleatórias.

---

<sup>3</sup> BREYFOGLE III, Forrest W. **Implementing Six Sigma**. New York John Wiley & Sons, 1999. *apud*. Usevicus, 2004.

No delineamento inteiramente casualizado (DIC), os tratamentos são distribuídos inteiramente ao acaso nas unidades do experimento. Para os dados obtidos de um experimento instalado segundo o DIC, tem-se um modelo estatístico (CARNEIRO; RIBEIRO JÚNIOR; SANTOS, 2009). Conforme Caetano (2013), um modelo matemático por ser descrito conforme a Equação 3.10:

$$Y_{ij} = \mu + t_i + e_{ij} \quad i = 1, \dots, i \quad j = 1, \dots, j \quad (3.10)$$

Onde  $Y_{ij}$  é o valor obtido da variável resposta para o  $i$ -ésimo tratamento em sua  $j$ -ésima repetição,  $\mu$  é a média dos possíveis valores da variável dependente  $t_i$ , dado na Equação 3.11, é o efeito do tratamento  $i$  em  $Y_{ij}$ , sendo:

$$t_i = \mu_i - \mu \quad (3.11)$$

$e_{ij}$  é o erro do experimento que está associado ao valor  $Y_{ij}$

$$e_i = Y_{ij} - \mu_i \quad (3.12)$$

Segundo Lopes (2013), no interesse de testar a ocorrência entre as médias dos tratamentos, utilizam-se as hipóteses da Equação 3.13 e Equação 3.14:

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_i \quad (3.13)$$

$$H_1: \mu_1 \neq \mu_i, \text{ para pelo menos um par } (i, i'), \text{ com } i \neq i' \quad (3.14)$$

Caso todas as hipóteses nulas sejam verdadeiras, todas as médias dos tratamentos serão iguais a  $\mu$ .  $H_0$  propõe-se que qualquer diferença observada entre as amostras ocorram casualmente, como mero erro do resultado.

A análise de variância se baseia em decompor a variação existente entre todas as observações, variação devido à diferença entre os efeitos dos tratamentos e na variação devido ao acaso, que se encontra relacionada ao erro experimental.

Essa variação é medida pela soma dos quadrados, em que a fórmula geral é dada pela Equação 3.15:

$$SSTotal = \sum_{i=1}^1 \sum_{j=1}^1 y_{ij}^2 - c \quad (3.15)$$

Sendo c:

$$c = \frac{(\sum_{i=1}^i \sum_{j=1}^j y_{ij})^2}{ij} \quad (3.16)$$

$$SSTrat = \frac{\sum_{i=1}^1 y_i^2}{j} - c \quad (3.17)$$

A soma dos quadrados do erro experimental é dada pela Equação 3.18:

$$SSRes = SSTotal - SSTrat \quad (3.18)$$

A Tabela 3.1 mostra o quadro da ANOVA para análise de um experimento baseado no DIC, sendo o número de repetições iguais para todos os tratamentos (CARNEIRO; RIBEIRO JÚNIOR; SANTOS, 2009).

Tabela 3.1 - ANOVA para análise de um experimento baseado no DIC

FV	GL	SQ	QM	F	F(tab.); $\alpha$
Tratamentos	(I-1)	SQTrat	$\frac{SQTrat}{I - 1}$	$\frac{QMTrat}{QMRes}$	[(I-1); I(J-1)]
Resíduo	I(J-1)	SQRes	$\frac{SQRes}{I(j - 1)}$		
Total	IJ - 1	SQTotal			

Fonte: Carneiro; Ribeiro Júnior e Santos (2009).

Para concluir se existe influência nos tratamentos, deve-se comparar o valor F, que é obtido pelo quociente do QMTrat com o QMRes, com o valor de F(tab). Esse valor é obtido na tabela de distribuição da variável F, da estatística de Fisher, de acordo com o nível de significância  $\alpha$  do teste, graus de liberdade do tratamento e também do resíduo (CARNEIRO; RIBEIRO JÚNIOR; SANTOS, 2009).

Se o valor de F calculado,  $F(\text{calc.})$ , é maior que  $F(\text{tab.})$ , a hipótese de nulidade  $H_0$  é rejeitada, ou seja, os tratamentos têm efeitos diferenciados para o nível de significância em que o teste foi realizado. Se o valor de  $F(\text{calc})$  for menor, então não há evidências significativas entre os tratamentos (CARNEIRO; RIBEIRO JÚNIOR; SANTOS, 2009; LOPES, 2013).

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção apresentam-se os procedimentos metodológicos usados para o estudo, com o objetivo de realizar uma análise entre os parâmetros de usinagem com o desgaste da ferramenta e a vibração mecânica utilizando o cepstrum de potência.

Para alcançar o objetivo proposto, descrevem-se os procedimentos realizados para preparar os corpos de prova, as dimensões e tipo de material, a instrumentação utilizada para coletar os dados, os equipamentos e as ferramentas para usinagem.

### 4.1 Materiais e equipamentos

Como material, utilizou-se o aço-carbono ABNT 1020 (barra laminada), com diâmetro igual a 38,1mm (“um ½”).

A ferramenta de corte ou pastilha utilizada na usinagem foi metal duro com grau de cobertura YBC251, com camadas de *Tem*,  $Al_2O_3$  *itens* revestidas por CVD.

Outras especificações do fabricante da pastilha foram à recomendação dos parâmetros de corte como velocidade, avanço e profundidade de corte, conforme mostrado na Tabela 4.1.

Tabela4.1 -Condições de corte da ferramenta WNMG080408-DF.

Parâmetros	Min.	Max.
Velocidade de corte (m/min)	160	440
Avanço (mm/rot)	0,05	0,35
Ap (mm)	0,3	2

Fonte: ZCC-CT (2009).

A geometria da pastilha utilizada foi a ISO WNMG080408, trigon, em formato negativo (Figura 4.1).

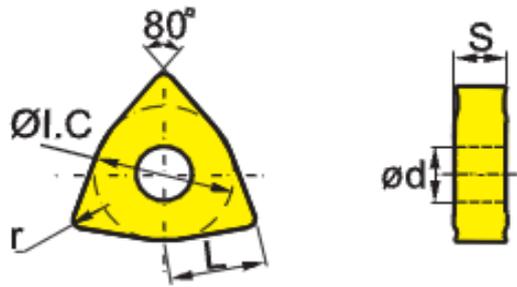


Figura 4.1- Representação das dimensões da pastilha:  $s = 4,76\text{mm}$ ,  $d = 5,16\text{mm}$ ,  $r=0,8\text{mm}$ ,  $L=8,7\text{mm}$  e  $I.C = 12,7\text{mm}$

Fonte: ZCC-CT (2009).

Como porta ferramenta, utilizou-se um modelo MWLNR 2020 K08, com aperto mediante parafuso.

O torno utilizado na usinagem é do fabricante Romi, modelo Tormax 20A, conforme a Figura 4.2.



Figura 4.2 - Torno Romi  
Fonte: Autor do estudo (2014)

Para realizar a usinagem na faixa de velocidade de corte recomendada pelo fabricante para o material, a rotação necessária para alcançar certa velocidade em

uma peça com diâmetro de 38,1mm é de 1337 rpm (mínima) e 3677 rpm (máxima). A rotação é calculada pela Equação 4.1.

$$V_c = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{1000} \left[ \frac{m}{min} \right] \quad (4.1)$$

Onde d é o diâmetro inicial da peça usinada e na rotação.

Por se tratar de velocidades altas para a máquina utilizada, o experimento foi realizado para condições de trabalho não recomendadas pelo fabricante. Assim, trabalhou-se fora da faixa sugerida, de modo a permitir que as rotações de trabalho na máquina atingissem 630rpm e 1000rpm.

As velocidades de corte utilizadas foram 73m/min e 116 m/min, referentes ao diâmetro de 37mm que foi obtido após uma pré-usinagem dos corpos de prova. As variáveis independentes adotadas no processo foram à velocidade de corte, avanço e profundidade de corte.

A Tabela 4.2 demonstra os níveis das variáveis utilizadas para realização dos ensaios.

Tabela 4.2- Parâmetros de usinagem

Fator de controle:	Unidade	Nível 1	Nível 2
Profundidade de corte	mm	1,0	1.5
Velocidade de corte (Vc)	mm/rot	73	116
Avanço	m/min	0,057	0,166

Fonte: Dados da pesquisa, 2014.

Os sensores utilizados para a medição dos sinais de vibração são do fabricante Bruel & Kjaer (s.d) modelo 4514-B-001. Tais sensores não necessitam de fonte de modulação, ou seja, não requer fonte de alimentação. Conecta-se o sinal da saída diretamente ao medidor de sinais, de modo que o sensor possibilite a conversão do movimento da vibração em tensão elétrica.



Figura 4.3 - Acelerômetro Piezoelétrico  
Fonte: Bruel; Kjaer (s.d).

Tabela 4.3 – Especificações do Acelerômetro

FABRICANTE	BRUEL & KAJER (s.d.)
Modelo	4514-B-001
Tipo	Piezoelétrico
Sensibilidade	10,37mVq/g
Temperatura	-51 °C a +100 °C
Frequência de Ressonância	32KHz
Faixa de Frequência	1 a 10000Hz (+-10%)

Fonte: Bruel; Kjaer (s.d).

Apresentam-se os equipamentos utilizados para a aquisição do sinal de vibração na Figura 4.3.



Figura 4.4 – Módulo de aquisição de sinais modelo NI 9233.  
Fonte: Disponível em: <<http://sine.ni.com/psp/app/doc/p/id/psp-30/lang/pt>>. Acesso em: 01 fev. 2014.

A obtenção de dados foi realizada por meio de uma placa da National Instruments, modelo USB-9233.

Tabela 4.4 - Especificação do modelo NI 9233

Fabricante	National Instruments
Modelo	USB NI 9233
Canais	4 (analog)
Conversor	ADC (Delta-Sigma)
Resolução	24 bits
Taxa de aquisição	2KHz – 50KHz
Tensão de entrada	±5

Fonte: Disponível em: < <http://sine.ni.com/psp/app/doc/p/id/psp-30/lang/pt>>. Acesso em: 01 fev. 2014.

O dispositivo utilizado para realizar a aquisição do sinal da vibração, apresenta uma resolução de 24 bits para uma faixa de amplitude do sinal de entrada.

Por meio da Equação 4.2, pode-se calcular o valor mínimo,  $R_e$ , para a faixa de tensão, em  $F_T$  analisada. Onde  $b$  é o número de bits.

$$R_e = \frac{F_T}{2^b} \quad (4.2)$$

O dispositivo possui modulação Delta-Sigma, de modo a realizar a conversão A/D, valendo-se do *feedback* de erro. Fato que melhora a fidelidade dos dados em sinais digitais de alta resolução.

Para realizar a medição do desgaste da pastilha de corte, a imagem de análise foi capturada por um microscópio via USB Veho, modelo VMS-004D, conectado ao *software* Micro Measure.

### 4.3 Processo de usinagem: procedimento experimental

Os ensaios de torneamento foram realizados no Laboratório de Mecânica do CEFET-MG - *Campus* Divinópolis.

Para realizar a preparação dos corpos de provas, inicialmente a barra laminada foi cortada por uma máquina serra de fita horizontal com fluido refrigerante em tarugos com 150mm de comprimento. O corte por meio deste processo tende a evitar possíveis alterações na microestrutura do material e por consequência também nas propriedades mecânica, alterações estas que podem ser provocadas pelo aquecimento do material. A Figura 4.5 mostra a máquina usada.



Figura 4.5 - Processo de corte na barra laminada com lubrificação  
Fonte: Autor do estudo (2014)

Os corpos de provas foram submetidos a uma pré-usinagem para eliminar carepas e possíveis falhas e defeitos superficiais do processo de fundição. Foram desbastados para um diâmetro de 37mm. Os parâmetros de usinagem adotados para desbaste foram o avanço ( $f$ ) de 0,057 (mm/volta) e a velocidade de corte de 73m/min, mantidas como padrão. A profundidade de corte de 1,1mm foi definida de acordo com a dimensão inicial de cada corpo de prova e com a especificação da Tabela 4.1 para se obter um diâmetro de 37mm.



Figura 4.6 – Modelo dos corpos de provas – pré-usinagem.  
Fonte: Autor do estudo (2014).

O critério para definição da ordem de cada ensaio foi definido por sorteio, de forma que as variáveis estudadas e o erro apresentassem caráter aleatório.

A Tabela 4.5 demonstra os parâmetros de corte referente a cada ensaio.

Tabela 4.5 - Condições da máquina para cada ensaio

Ensaio	Rotação (rpm)	Avanço (mm/min)	Profundidade de corte
1	630	0,166	1,0
2	1000	0,057	1,5
3	630	0,166	1,0
4	630	0,057	1,0
5	1000	0,166	1,5
6	1000	0,166	1,0
7	1000	0,057	1,0
8	630	0,057	1,5
9	630	0,057	1,5
10	630	0,057	1,5
11	1000	0,166	1,5
12	630	0,057	1,0
13	1000	0,057	1,5
14	630	0,166	1,5
15	630	0,057	1,0
16	630	0,166	1,5
17	1000	0,057	1,0

*Continua Tabela 4.5*

18	1000	0,057	1,5
19	1000	0,166	1,0
20	1000	0,166	1,5
21	630	0,166	1,0
22	630	0,166	1,5
23	1000	0,166	1,0
24	1000	0,057	1,0

Fonte: Autor do estudo (2014).

Baseado no critério da análise de variância para comparar três tipos de réplicas em um experimento, tem-se um total de  $2 \times 2 \times 2 \times 3 = 24$  ensaios. O experimento apresentou 8 tipos de condições, que foram definidos pela combinação dos parâmetros de corte.

A Tabela 4.6 evidencia as variáveis de cada nível do tratamento parâmetro do objeto de estudo em análise. Cada tratamento foi repetido três vezes. Cabe ressaltar que para uma profundidade de corte de 1mm, a redução do diâmetro na peça, fez com que a velocidade de corte caísse em 2,7% no segundo corte e 5,4% no terceiro. Já na situação com  $A_p=1,5$ , a redução foi de 4% no segundo desbaste e 8% no terceiro desbaste

Tabela 4.6 - Condições de corte utilizadas

Experimento	Profundidade de corte (mm)	Avanço (mm/min)	Velocidade de corte(m/mim)
1	1,0	0,057	73
2	1,0	0,057	116
3	1,0	0,166	73
4	1,0	0,166	116
5	1,5	0,057	73
6	1,5	0,057	116
7	1,5	0,166	73
8	1,5	0,166	116

Fonte: Autor do estudo (2014).

A partir da enumeração da Tabela 4.5, os ensaios foram realizados na sequência que se descreve. Em todos os ensaios o comprimento de desbaste foi de 90mm, para cada ensaio foi utilizado um corpo de prova semelhante e realizado três desbastes.

Os ensaios foram realizados por meio de ferramentas novas. Cada pastilha utilizada apresenta seis arestas de corte, sendo uma para cada ensaio, objetivando que o corte de cada amostra encontrasse condições semelhantes.

Em cada ensaio foi realizado o acompanhamento do desgaste da ferramenta e a medição do sinal da vibração.

Para acompanhar o desgaste da ferramenta ou verificar possíveis avarias, a pastilha de corte foi retirada do porta ferramenta e fixada no suporte conforme Figura 4.7. Este suporte permite uma posição justa da pastilha, de forma que o microscópio foque na aresta de corte analisada, após a calibração, lembrando-se que a distância focal não poderia ser alterada. Para tratamento das imagens coletadas, utilizou-se o *software* ImageJ versão 1.47.



Figura 4.7 - Montagem do microscópio óptico USB.  
Fonte: Autor do estudo (2014).

Os sinais de vibração gerados pelo torneamento foram coletados no intervalo de cada desbaste. Percebe-se este intervalo, por meio da entrada da ferramenta na superfície do tarugo, até o momento em que antecede a retirada da pastilha de corte da superfície, sendo este, o final do processo de usinagem.

Para realizar o monitoramento dos sinais vibracionais, o acelerômetro foi posicionado no carro porta-ferramenta, na mesma direção do carro ferramenta (GUIMARÃES *et al.*, 2011). A Figura 4.8 apresenta o sistema utilizado para aquisição do sinal no experimento.

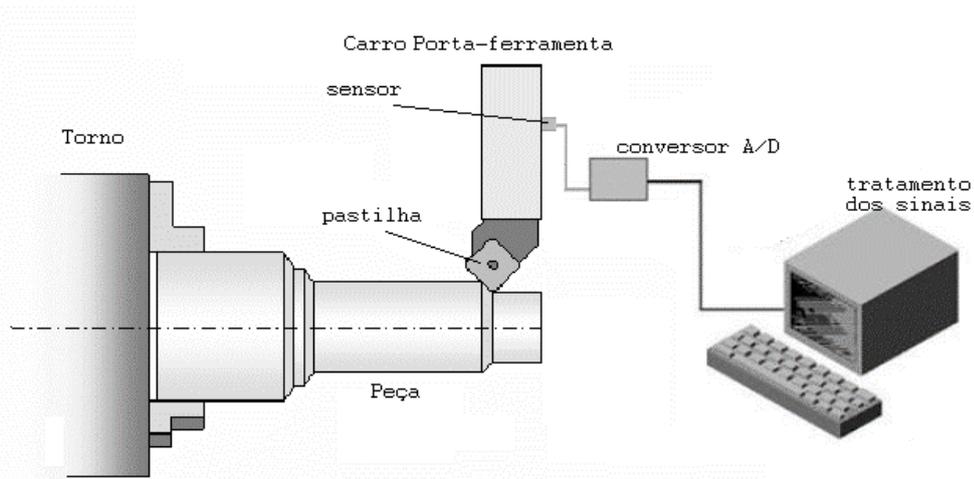


Figura 4.8 - Modelo virtual do sistema de aquisição.  
Fonte: Solto *et al.* (2004) modelo adaptado pelo autor.

O acelerômetro foi conectado ao condicionador de sinais por cabo blindado. Este cabo tem por finalidade, remover ruídos capazes de comprometer os dados obtidos. Durante os testes iniciais, foi possível verificar essa relação, quando se utilizou um cabo que não apresentava condições devidamente normais.

Para coletar os dados, utilizou-se um notebook que foi conectado a placa de aquisição da National Instruments modelo USB-9233. No condicionamento dos sinais vibracionais, foi realizada a amplificação e a aplicação do filtro “*anti-aliasing*”. A taxa de aquisição foi definida para não alocar grande quantidade de memória.

Observou-se ainda o critério do teorema de Nyquist, limitando a frequência de amostragem mínima, de forma a analisar os sinais gerados pela rotação de 1000 rpm. Ressalta-se que, Jiang *et al.* (1987) utilizaram uma faixa de frequência de 0 a 1kHz para identificar os estágios do desgaste da ferramenta em uma análise espectral (PIGARI, 1995; SOUTO, 2007).

Por meio da interface gráfica do programa de aquisição, mostrado na Figura 4.9 e Figura 4.10, foi realizado o acompanhamento de gravação dos dados em tempo real. Na Figura 4.9 é observado no osciloscópio, que está na tela do computador, o sinal referente à vibração. Os dados adquiridos contêm informações do tempo e da amplitude da vibração e foram gravados para posterior tratamento.

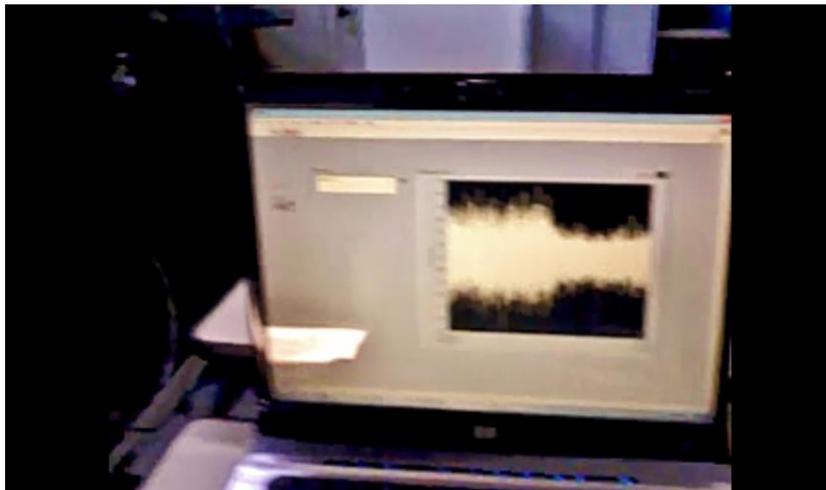


Figura 4.9 - Montagem do sistema de medição com notebook executando programa de aquisição  
Fonte: Autor do estudo (2014).

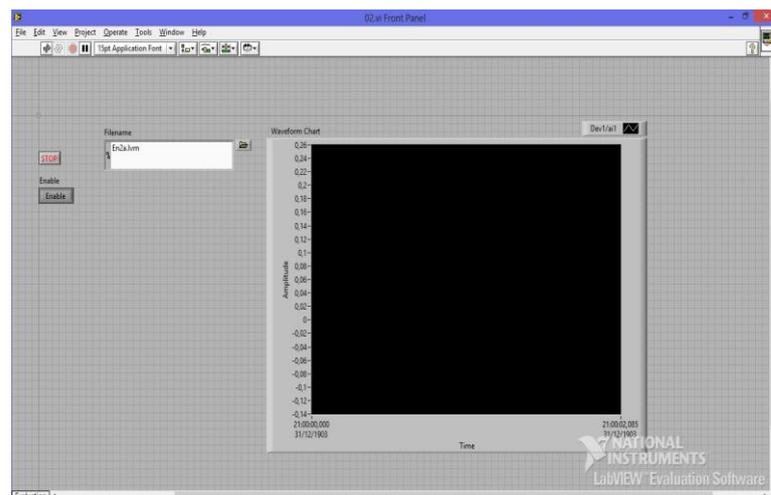


Figura 4.10 - Painel Frontal - Tela para leitura e gravação dos dados.  
Fonte: Autor do estudo (2014).

### 4.3 Processamento de dados

Para capturar e armazenar os dados utilizou-se a plataforma virtual desenvolvida em Labview. O desenvolvimento foi realizado de modo a utilizar a linguagem de programação gráfica da *National Instruments*. O ambiente de programação foi desenvolvido para fácil utilização, com o objetivo de atender as necessidades de engenheiros e cientistas (VIEIRA, 2011). Além disso, são interativos e possibilitam a conexão com diversos *hardwares* e outros *softwares*. O programa realizado em Labview (VI) é composto por um conjunto de instruções que realizam manipulação e fluxo de dados e por uma interface com entrada e saída.

Basicamente, a instrumentação virtual é utilizada em dois ambientes, quais sejam: 1. Diagrama de blocos: contém o código fonte construído de forma gráfica e que define o funcionamento do programa. 2. Painel frontal: realiza a interface com o usuário (LABVIEW, 2002; RODRIGUES, 2009).

Os blocos são instrumentos virtuais e para receber instruções do usuário encontram-se vinculados aos instrumentos de interface gráfica.

Na Figura 4.11 demonstra-se o diagrama de blocos VI.

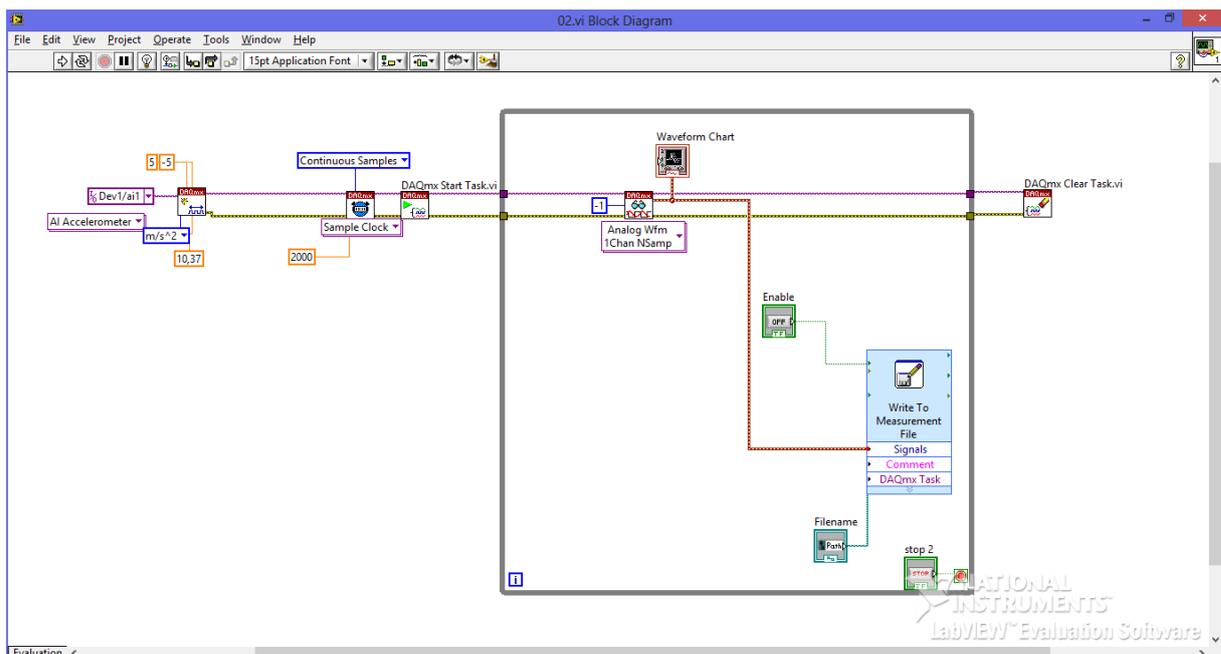


Figura 4.11 - Instrumentação virtual para aquisição de dados.  
Fonte: Autor do estudo (2014).

Recebe-se o sinal de dados no programa já digitalizado pela placa de aquisição, a conversão A/D foi realizada com uma aquisição de 2.000 pontos por segundo. Os blocos DAQmx realizam a interface entre o dispositivo de medição de dados e a instrumentação virtual.

O primeiro bloco, no canto superior esquerdo do diagrama, (Figura 4.10), foi adicionado para realizar a ponte de recebimento dos dados. Neste bloco, definiu-se o canal de comunicação correspondente à entrada analógica, porta A1, a sensibilidade do sensor utilizado (especificada pelo fabricante). Neste bloco, o sinal digital de grandeza elétrica é convertido em amplitude de vibração com uma relação de  $10,37 \text{ mV/ms}^{-2}$  (BRÜEL; KJAER).

Outras funções definidas para o sensor foi o fornecimento de corrente, no valor de 0,4 mA e a amplitude de saída do sensor, de  $\pm 5 \text{ V}$ . Com a faixa de amplitude e uma resolução da placa de aquisição em 24 bits, o valor de resolução, de acordo com a Equação 4.2, é na ordem de  $0,6 \cdot 10^{-6} \text{ V}$ , relativamente precisa.

Realiza-se a ligação com os outros blocos por meio de ligações representadas em roxo (Figura 4.10). Essa comunicação serve para a troca e sincronismo das tarefas. Enquanto a linha amarela (Figura 4.11) refere-se ao erro.

O segundo bloco foi utilizado para definir a frequência amostral e uma amostragem contínua. Por padrão, o valor de -1 evidencia a leitura de todas as amostras na memória. Inicia-se a tarefa pelo bloco DAQmx Start Task, enquanto o DAQmxClear, tem a função de limpar a tarefa depois da interrupção.

No quarto bloco, os dados das amostras são lidas, nas quais especifica-se o tipo de amostra, analógica. Na criação do painel frontal, utilizaram-se os blocos *Waveform Chart* para indicar o sinal da vibração no osciloscópio na faixa de amplitude de -2 V a 2 V, estimado por meio de testes. Enable para iniciar a gravação de dados, sendo posteriormente salvo pelo nome definido no filename. E, stop, para interromper a tarefa em loop dos blocos que estão dentro da linha cinza, denominada *While Loop*.

As imagens capturadas pelo microscópio óptico eletrônico foram posteriormente analisadas pelo *software* ImageJ. O programa possui a ferramenta Straight, a qual foi utilizada para estimar o desgaste na aresta de corte, de modo a inserir o valor da calibração em mm/pixel. O objetivo da ferramenta *Straight* é medir o número de pixel entre dois pontos. As imagens alcançadas no programa

encontram-se em anexo (ANEXO B). Os dados obtidos foram posteriormente analisados.

O programa conta ainda com o recurso FindMaxima, cuja função é indicar o centro de componentes associados espalhados pela imagem. A rotulação de componentes associados é uma técnica para realizar o reconhecimento de padrões, em que agrupam-se pixel semelhantes. Encontra-se uma aplicabilidade na topografia, neste caso, parte-se do princípio de que um gradiente maior representa uma diferente elevação.

Para realizar o tratamento dos dados, foi utilizado o algoritmo de programação desenvolvido no Matlab. Com a utilização do algoritmo computacional, obteve-se o cepstrum de potência de cada amostra. Os dados foram processados para um tempo de aquisição de 8s, referente a um período relacionado ao fim do processo de usinagem.

## 5 RESULTADOS

Esta seção dedica-se a apresentar e a analisar as relações dos parâmetros de corte com a vibração mecânica. O instrumento de análise para o sinal de vibração foi o cepstrum de potência. Para analisar o desgaste da ferramenta de corte com os parâmetros de usinagem utilizaram-se os dados obtidos nas imagens ampliadas da aresta de corte. Foram estimados os desgastes de cada usinagem, cujos valores foram utilizados para analisar os parâmetros de usinagem e a correlação com o sinal de vibração.

Para alcançar os objetivos propostos, buscou-se primeiramente identificar o sinal de vibração para realizar uma análise gráfica dos parâmetros de corte com a média da amplitude do cepstrum de potência após a análise de variância dos dados. Em seguida, buscou-se realizar uma análise gráfica dos parâmetros de corte com a média do desgaste e uma análise de variância dos dados. Por fim, apresentou-se a relação da vibração *versus* desgaste da ferramenta.

### 5.1 Sinal de vibração

Por meio dos resultados obtidos foi gerado um gráfico das médias do sinal de vibração em função dos parâmetros de corte. O código de programação (ANEXO A) e as 72 figuras de cada amostra processada (ANEXO B) demonstram a amplitude do sinal da vibração, no que tange ao tempo e a amplitude cepstral relacionado à *quefreny*.

Mediante a impressão dos dados no programa, observou-se no cepstrum, que o sinal evidenciou picos de amplitude em aproximadamente 0,09s e 0,06s. Estas são as quefrências do espectro, relacionadas à frequência de rotação do eixo árvore para ensaios realizados a rotação de 630rpm e 1000rpm. Correspondem ainda ao período de uma volta completa da peça. As amplitudes do cepstrum representam a densidade de energia do padrão vibratório gerado por alguma fonte de modulação proveniente do torneamento (GUIMARAES *et al.*, 2011).

As amplitudes cepstrais foram obtidas por meio dos gráficos gerados. Com a ferramenta “*Cursor Data*” do Matlab, os respectivos valores alcançados foram utilizados na análise de resultado.

A Figura 5.1 demonstra o resultado para um dos ensaios, do cepstrum de potência, em que se trabalhou com as variáveis independentes,  $A_p = 1,0\text{mm}$   $V_c = 116\text{ m/min}$  e  $f = 0,057\text{mm/rot}$ . O gráfico cepstral do sinal de vibração mostra um pico de  $0,044\text{ mV}^2$  em aproximadamente  $0,06\text{ s}$ , que está relacionado a frequência de rotação do eixo-árvore para  $1000\text{ rpm}$ .

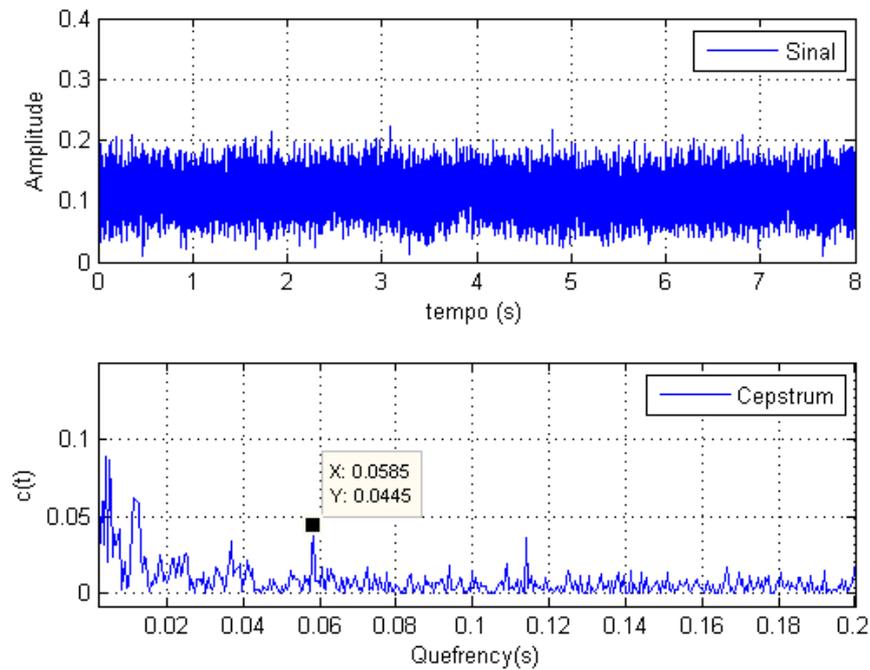


Figura 5.1 - Sinal de vibração em amplitude e após processamento do Cepstrum, condições de usinagem,  $A_p$  F1 e VC2.

Fonte: Autor do estudo (2014).

O mesmo procedimento foi utilizado para obter os dados de todos os ensaios.

A Tabela 5.1 mostra os resultados obtidos por meio dos 24 ensaios. Apresentam-se os resultados da análise cepstral do sinal de vibração conforme a repetição de cada tratamento, sendo En1, En2 e En3. Em cada tratamento,

evidencia-se o resultado para cada desbaste efetuado, sendo este parâmetro utilizado para investigar a relação do sinal de vibração com o desgaste.

TABELA 5.1 – Resultado da amplitude em densidade de energia ( $mV^2$ ) do padrão vibratório de acordo com as condições de usinagem.

		VC1	VC1	VC1	VC2	VC2	VC2	
		En1	En2	En3	En1	En2	En3	Desbaste
Ap1	F1	0,032	0,033	0,049	0,032	0,036	0,040	1º
		0,043	0,038	0,030	0,038	0,036	0,055	2º
		0,042	0,040	0,023	0,046	0,044	0,039	3º
	F2	0,032	0,027	0,028	0,029	0,032	0,031	1º
		0,030	0,050	0,022	0,033	0,032	0,030	2º
		0,035	0,027	0,032	0,046	0,028	0,031	3º
Ap2	F1	0,036	0,052	0,040	0,057	0,058	0,041	1º
		0,046	0,048	0,047	0,049	0,043	0,044	2º
		0,048	0,049	0,053	0,051	0,063	0,050	3º
	F2	0,039	0,052	0,044	0,085	0,083	0,058	1º
		0,034	0,039	0,046	0,048	0,046	0,048	2º
		0,034	0,042	0,050	0,051	0,060	0,058	3º

Fonte: Autor do estudo (2014).

Durante o experimento foram observados alguns possíveis fatores contribuintes para aumento do erro experimental. Algumas observações foram feitas nos ensaios 15, 22 e 23.

No ensaio 15, sob condições de corte Ap1, VC1 e F1, no terceiro desbaste, houve um desbalanceamento no sistema de medição causado pelo choque do cavaco com o fio do instrumento de medição. Neste momento, foi observado um pico de decaimento no sinal do osciloscópio virtual, o que pode ter sido a causa da queda no valor da amplitude. Esse tipo de erro na medição é caracterizado no campo da instrumentação industrial como uma entrada modificada, em que a relação da entrada e saída é alterada pelo distúrbio (DOEBELIN, 2003).

No ensaio 22, sob as condições Ap2, VC1 e F2, durante o segundo e o terceiro desbaste, formou-se um cavaco do tipo fita, o qual se acumulou na peça usinada. Ao analisar o gráfico da figura 5.2, nota-se um padrão periódico diferente das condições normais, e, em relação à análise cepstral, o pico de amplitude

corresponde a rotação do eixo-árvore foi de aproximadamente  $0,05\text{mV}^2$ . O material removido, ao se movimentar na rotação de trabalho do torno, pode ter causado o erro de medição. Esse erro refere-se ao efeito de uma entrada interferência, cuja magnitude é independente da amplitude desejada, ocorrendo um erro na variável analisada (DOEBELIN, 2003).

A ocorrência de possível interferência, também foi observada para o segundo desbaste do ensaio 23. Na Tabela 5.1, o pico de amplitude para as condições de Ap1, VC1 e F1, para R3, é de  $0,055\text{ mV}^2$ .

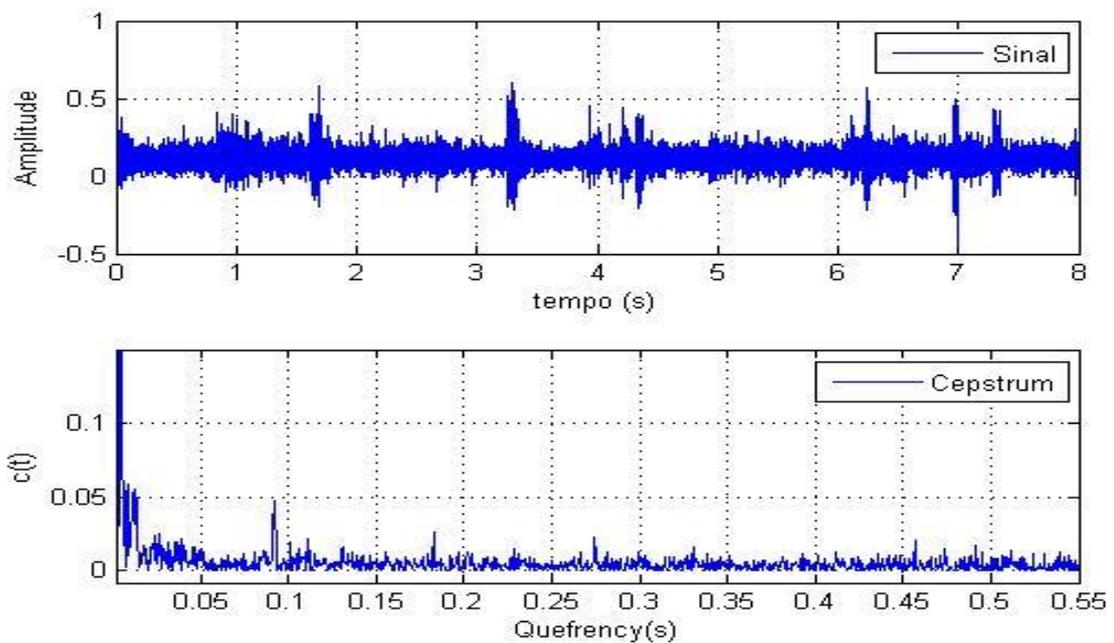


Figura 5.2 - Sinal de vibração com picos periódicos – Ensaio 22, terceiro desbaste  
Fonte: Autor do estudo (2014).

## 5.2 Análise gráfica dos parâmetros de corte com a média da amplitude do cepstrum de potência

Com o objetivo de realizar a análise gráfica dos parâmetros de corte com a média da amplitude do cepstrum e potência, primeiramente os dados foram agrupados para análise em cada desbaste. Assim, com base na média de cada experimento foi gerado um gráfico para análise. A seguir, são mostrados três gráficos referentes a cada desbaste.

De acordo com o Gráfico 5.1, pode-se constatar um crescimento da vibração com o aumento de  $A_p$ , mantendo-se o mesmo avanço. Observa-se que quanto maior a velocidade de corte, maior se torna a vibração. Esse aumento é mais acentuado para o caso de  $A_p=1,5$  do que  $A_p=1,0$ , uma vez que a sensibilidade a oscilações do sistema se torna maior (TRENT, 1991<sup>4</sup>, 2012; SILVA, 2012).

Ao comparar o avanço com a mesma velocidade de corte e  $A_p=1,0$ , nota-se que o aumento do avanço diminui a vibração, assim como foi demonstrado por Guimarães *et al.* (2011). Isso se deve à passagem mais rápida da ferramenta de corte, fato que provoca maior espaçamento entre as marcas de avanço.

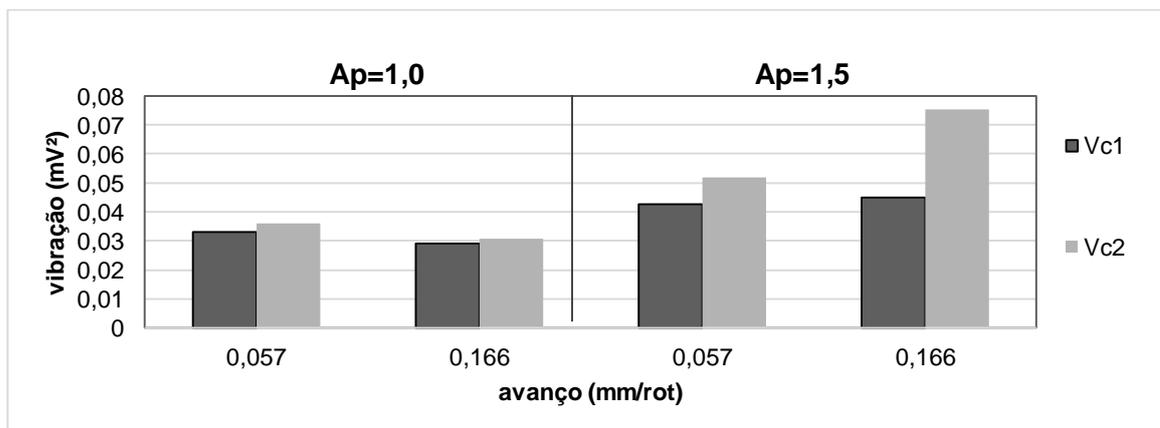


Gráfico 5.1 - Comportamento da vibração para as condições de usinagem - primeiro desbaste - média dos resultados.

Fonte: Autor do estudo (2014).

<sup>4</sup>TRENT, E.M. "Metal Cutting", 2 nd edition, Butterworths, 1991, ISBN 0-408-10856- apud Rocha; Barcellos; Sales, 2001.

Ao comparar o grupo para  $A_p=1,5$ , de modo a manter o mesmo valor para a velocidade de corte, observa-se que não houve diferença significativa da vibração para  $V_c1$  constante, com a variação do avanço. Enquanto que para  $V_c2$ , houve um aumento de 30%.

Na análise comparativa entre  $A_p=1,0$  e  $A_p=1,5$ , observa-se uma relação em conjunto entre a profundidade de corte e o avanço. Com aumento da profundidade de corte, gera-se um aumento das áreas dos planos de cisalhamento primário e secundário, que tem por consequência um aumento dos componentes das forças de usinagem e dos níveis de vibração (ROCHA; BARCELLOS; SALES, 2001).

No caso específico há um balanço entre a aresta de corte e a máquina operatriz as pequenas alterações tornaram-se altamente sensíveis nos níveis de vibração devido ao aumento da profundidade de corte (TRENT, 1991; SILVA, 2012).

No Gráfico 5.2, referente ao segundo desbaste, o avanço interferiu na diminuição da vibração, como no primeiro desbaste, para o grupo com  $A_p=1,0$ . Ao analisar a interferência da velocidade de corte, mantendo-se fixo  $A_p=1,0$  e  $f=0,166$ , notou-se que praticamente não houve alteração significativa, diminuição esta igual a 6,8%.

Na relação do parâmetro  $A_p=1,5$ , ao comparar o avanço, a mudança foi significativa para  $V_c1$ , fato observado para  $A_p=1,0$ , enquanto que para  $V_c2$  a variação foi de um aumento de menos de 3%.

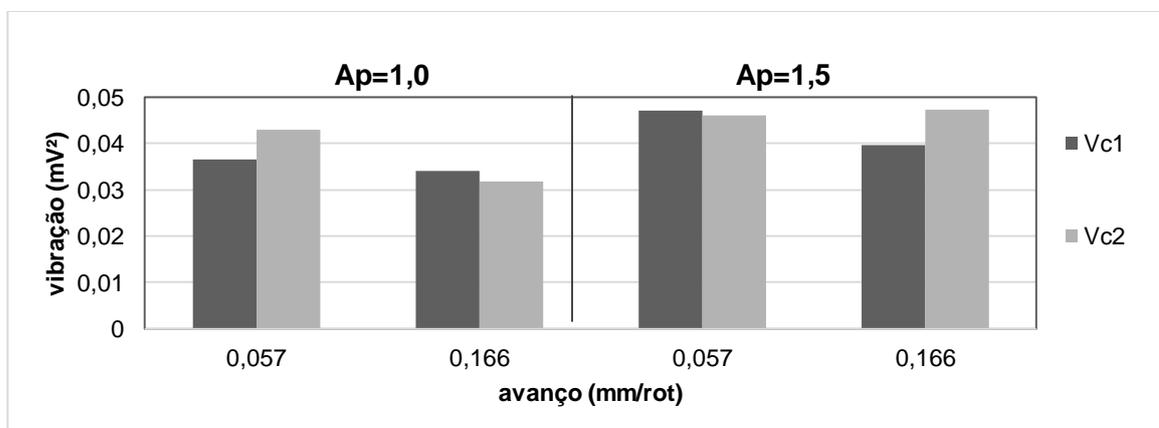


Gráfico 5.2 - Comportamento da vibração para as condições de usinagem - Segundo desbaste - Média dos resultados  
Fonte: Autor do estudo (2014).

Ainda para uma análise gráfica dos resultados, no caso do terceiro desbaste, gráfico 5.3. Na relação de interação entre profundidade de corte e avanço, para  $A_p=1,5$  e  $V_c2$ , nota-se que não houve mudança significativa na vibração com aumento do avanço, sendo de apenas 3,6%, como no caso do segundo desbaste. No caso da variação de  $VC1$ , na medida em que o avanço aumenta, há uma diminuição da vibração em 16%.

Na relação de influência das variáveis de corte para o grupo  $A_p=1,0$ , o comportamento do primeiro e segundo desbaste é observado para o terceiro. No entanto, ao analisar a influência dos parâmetros de corte para  $A_p=1,5$ , com o aumento do avanço, mantendo-se fixo  $V_c2$ , houve um aumento da vibração.

Já no caso da comparação para  $VC1$  fixo, houve uma diminuição no segundo e no terceiro desbaste. Nesses casos, nota-se uma possível influência na vibração, devido à interação da profundidade, avanço e velocidade de corte. Uma vez que para uma profundidade de corte maior, esta influenciou no grau em que as outras variáveis exerceram influência na vibração.

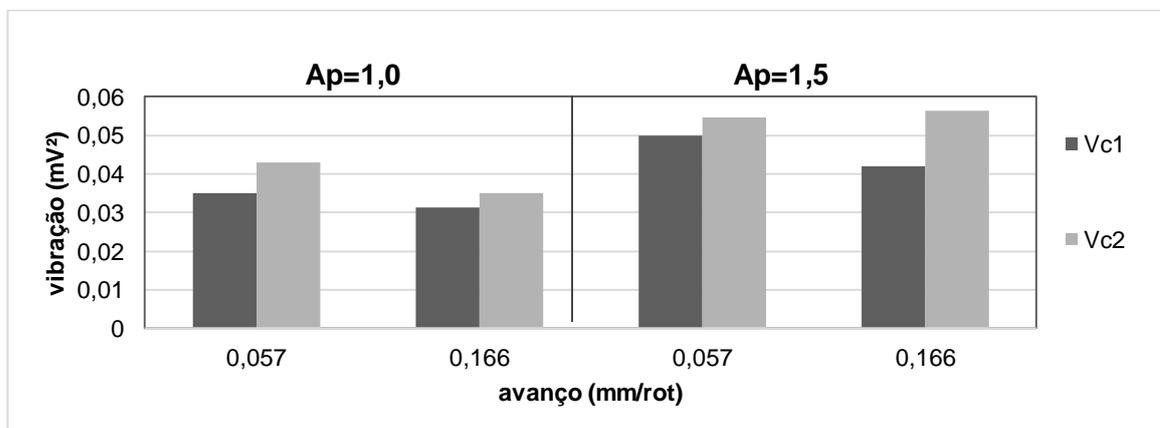


Gráfico 5.3 - Comportamento da vibração para as condições de usinagem - Terceiro desbaste - Média dos resultados

Fonte: Autor do estudo (2014).

### 5.2.1 Análise de Variância

Nesta subseção, apresenta-se uma análise de variância dos dados. Na Tabela 5.2, demonstram-se os resultados obtidos pela ANOVA. Utilizou-se o modelo de efeito fixo para avaliar a influência na vibração.

Os valores apresentados foram obtidos com auxílio do *software* Minitab a partir dos valores mostrados na tabela 5.1.

Tabela 5.2 - Resultados da ANOVA para a vibração

Vibração	SQT	GL	Média	F(calc.)	Sig.	Influência
Ap	,004	1	,004	67,809	,000	Sim
f	8,668E-5	1	8,668E-5	1,559	,218	Não
Desbaste	,000	2	6,629E-5	1,192	,312	Não
Vc	,001	1	,001	14,270	,000	Sim
Ap * f	,000	1	,000	6,637	,013	Sim
Ap * Desbaste	,000	2	,000	3,834	,029	Sim
Ap * Vc	,000	1	,000	5,546	,023	Sim
f * Desbaste	,000	2	,000	2,051	,140	Não
f * Vc	,000	1	,000	2,161	,148	Não
Desbaste * Vc	,000	2	8,726E-5	1,570	,219	Não
Ap * f * Desbaste	,000	2	,000	2,446	,097	Não
Ap * f * Vc	,000	1	,000	5,398	,024	Sim
Ap * Desbaste * Vc	,000	2	,000	2,823	,069	Não
f * Desbaste * Vc	,000	2	5,954E-5	1,071	,351	Não
Ap* f* Desbaste*Vc	3,083E-6	2	1,542E-6	,028	,973	Não
Error	,003	48	5,560E-5			
Total	,140	72				

Fonte: Autor do estudo (*software* Minitab) (2014).

De acordo com os dados da Tabela 5.2, e conforme observado nos Gráfico 5.1, Gráfico 5.2 e Gráfico 5.3 e discutidos, para os casos com  $Ap=1,5$ , houve uma interação de ambos os parâmetros, Ap, f e Vc. A Tabela 5.2 ainda evidencia a interação do Ap em conjunto com: o desbaste, o Vc e o f. Apesar do desbaste e de f

não apresentarem diferenças significativas elas se interagem com  $A_p$ , mostrando sofrerem influência do mesmo.

Pode-se constar pelo resultado da ANOVA, que a amplitude do cepstrum encontra-se relacionada com a rotação e a profundidade de corte para um índice de confiança de 95%. Desta forma, foi verificado que a vibração mecânica é influenciada pela rotação e pela profundidade de corte, assim como constataram Santos; Sales (2004) e Guimarães (2011).

Ainda por meio da Tabela 5.2 pode-se observar que o avanço não influenciou significativamente na vibração para um índice de confiança de 95%. Isso não quer dizer que o avanço não influencia, mas, quando os cálculos são realizados para todas as amostras, sob o ponto de vista estatístico não se observa a influência. Uma vez que os dados para  $A_p=1,0$  e  $A_p=1,5$  apresentaram relações diferentes.

### 5.3 Desgaste da ferramenta

A Tabela 5.3 apresenta os dados referentes ao desgaste estimado da pastilha. O desgaste analisado foi o de flanco, ou frontal, padronizando-se a medição na região A da pastilha de corte.

Tabela 5.3 Dados referentes ao desgaste (mm) da ferramenta de acordo com as condições de usinagem

		V <sub>c1</sub>	VC1	VC1	VC2	VC2	VC2	
		En1	En2	En3	En1	En2	En3	Desbaste
A <sub>p1</sub>	F1	0,018	0	0	0	0,068	0	1º
		0,033	0,048	0,049	0,051	0,086	0,065	2º
		0,056	0,067	0,054	0,069	0,093	0,069	3º
	F2	0,087	0	0,037	0,048	0,072	0,043	1º
		0,101	0,119	0,078	0,109	0,085	0,103	2º
		0,118	0,132	0,11	0,207	0,123	0,144	3º
A <sub>p2</sub>	F1	0,049	0,059	0,038	0	0,09	0,110	1º
		0,072	0,146	0,081	0,06	0,153	0,134	2º
		0,124	0,152	0,149	0,172	0,170	0,168	3º
	F2	0,093	0,078	0,068	0,087	0,109	0,125	1º
		0,119	0,113	0,135	0,145	0,134	0,167	2º
		0,167	0,170	0,184	0,198	0,159	0,194	3º

Fonte: Autor do estudo (2014).

No experimento, devido à velocidade de corte trabalhada ser baixa, tem-se a possibilidade da ocorrência da aresta postiça de corte. No entanto não foram realizadas análises laboratoriais para verificar a ocorrência nos ensaios.

De acordo com Ferraresi (1977), o APC ocorre para velocidades baixas, uma vez que de acordo com o fabricante, a velocidade utilizada foi abaixo do recomendado. O APC tende a modificar o comportamento de desgaste da peça (DINIZ, 2003).

#### 5.4 Análise gráfica dos parâmetros de corte com a média do desgaste

O Gráfico 5.4 demonstra o valor médio do desgaste após o primeiro corte. Observa-se que a velocidade de corte exerceu uma maior influência para determinadas condições do avanço e da profundidade de corte.

A variação do avanço e da profundidade, por sua vez, também proporcionaram alterações no desgaste. A profundidade de corte apresentou grande influência no desgaste. Isto se deve ao contato maior da área de usinagem que conseqüentemente aumenta as forças dos componentes de usinagem e também da vibração (ROCHA; BARCELLOS; SALES, 2001).

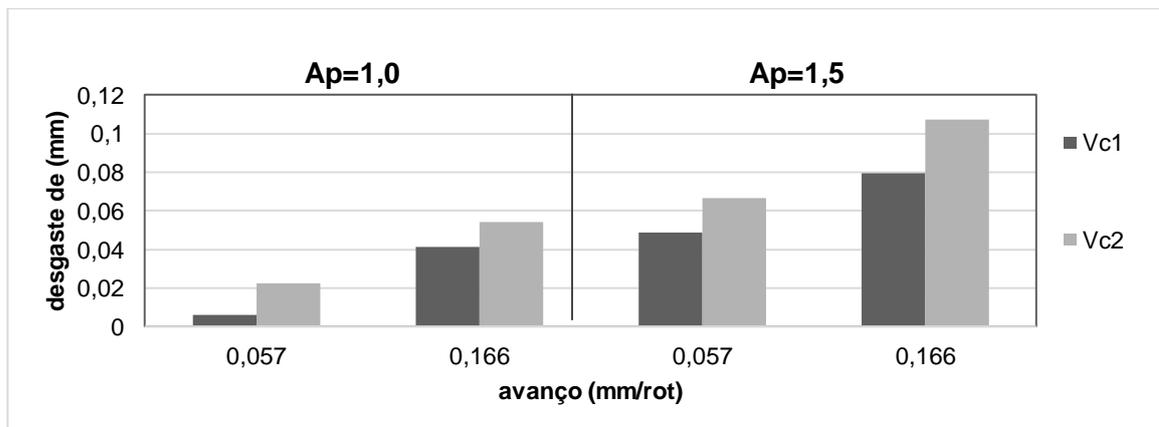


Gráfico 5.4 - Comportamento do desgaste da ferramenta para as condições de usinagem - primeiro desbaste - média dos resultados  
Fonte: Autor do estudo (2014).

No Gráfico 5.5 a seguir, não se verifica mudança significativa em relação ao segundo caso. Sendo este, para os valores de  $A_p=1,0$  e  $f=0,166$  fixos.

Ao analisar a tabela 5.3, nota-se que para as condições de corte  $A_p1$ ,  $F2$  e  $VC1$ , o  $En2$  apresentou altos valores em comparação com  $En1$  e  $En3$  este desgaste pode ser verificado na Figura 5.3.

Ainda no gráfico, em comparação com outras condições de corte, observa-se um aumento do desgaste com o aumento dos parâmetros de corte.



Figura 5.3 - Desgaste de Flanco para as condições  $A_p1$ ,  $F2$  e  $VC1$ .  
Fonte: Autor do estudo (2014).

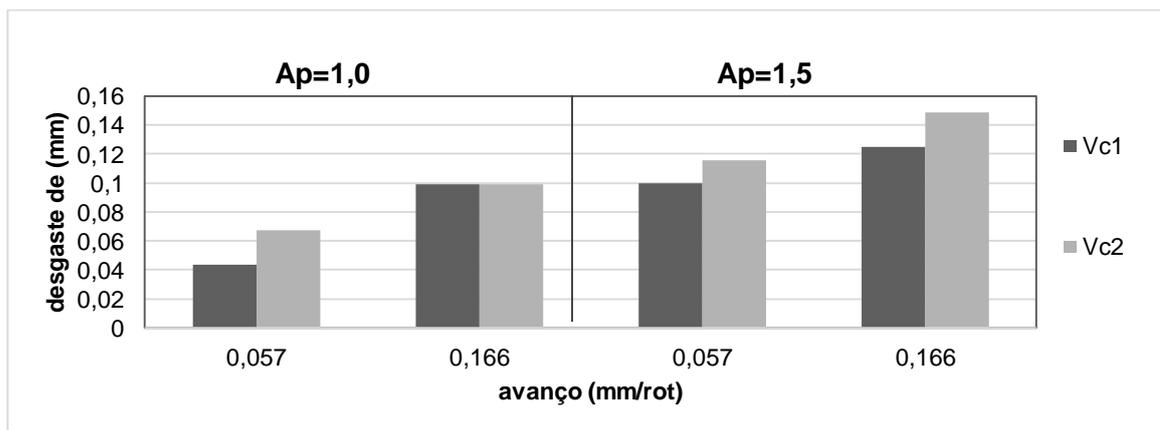


Gráfico 5.5 - Comportamento do desgaste da ferramenta para as condições de usinagem – Segundo desbaste - Média dos resultados.  
Fonte: Autor do estudo (2014).

Ao comparar os dados graficamente, constata-se que o mesmo comportamento do desgaste foi verificado para o terceiro desbaste, porém com valores maiores devido ao grau de uso (Gráfico 5.6).

Nos casos observados, nota-se que mantendo-se o mesmo avanço, o maior desgaste da ferramenta foi obtido com o aumento da velocidade de corte. Na comparação entre  $f=0,05$  e  $f=0,166$ , observa-se que quanto maior o avanço, maior será o desgaste para a mesma faixa de velocidade de corte. Essa relação também é mantida tanto para  $A_p=1,0$ , quanto para  $A_p=1,5$ .

As análises realizadas para os três desgastes têm o mesmo significado de relação. Notou-se que cada parâmetro de corte contribuiu para um aumento do desgaste, porém em nível diferente de interferência.

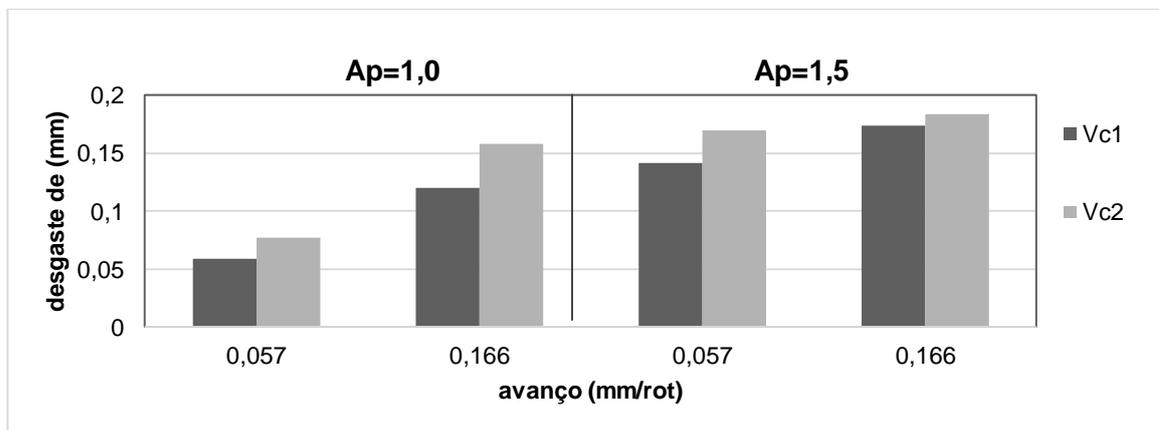


Gráfico 5.6 - Comportamento do desgaste da ferramenta para as condições de usinagem – Terceiro desbaste - Média dos resultados.  
Fonte: Autor do estudo (2014).

#### 5.4.1 Análise de variância dos dados gerais do desgaste

A Tabela 5.4 apresenta os resultados da ANOVA para um nível de confiança de 95%. Utilizou-se o modelo de efeito fixo para avaliar a influência de cada variável independente tendo como resultado o desgaste.

Ao analisar a Tabela 5.4 observa-se que os parâmetros velocidade de corte, profundidade e avanço exerceram influência no desgaste, assim como o fator desbaste, uma vez que  $Sig.<0,05$ . Fundamentado por meio da ANOVA, pode-se

constatar que os parâmetros influenciaram no desgaste da ferramenta e na ordem de desbaste.

Em termos de produtividade, quanto menor as variáveis do processo, menor é o gasto da aresta de corte. No entanto a vida de uma ferramenta pode diminuir quando a velocidade de corte for muito baixa.

Tabela 5.4 - Resultados da ANOVA para o parâmetro desgaste

Desgaste	SQT	GL	Média	F(calc.)	Sig.	Influência
Ap	,047	1	,047	68,843	,000	Sim
f	,028	1	,028	40,847	,000	Sim
Vc	,007	1	,007	9,968	,003	Sim
Desbaste	,081	2	,041	59,719	,000	Sim
Ap * f	,002	1	,002	2,718	,106	Não
Ap * Desbaste	,001	2	,001	1,070	,351	Não
Ap * Vc	2,568E-5	1	2,568E-5	,038	,847	Não
f * Desbaste	,001	2	,000	,390	,679	Não
f * Vc	1,012E-5	1	1,012E-5	,015	,903	Não
Desbaste * Vc	,000	2	9,017E-5	,132	,876	Não
Ap * f * Desbaste	,002	2	,001	1,444	,246	Não
Ap * f * Vc	6,125E-6	1	6,125E-6	,009	,925	Não
Ap * Desbaste * Vc	,000	2	,000	,208	,813	Não
f * Desbaste * Vc	,000	2	5,150E-5	,076	,927	Não
Ap * f * Desbaste * Vc	,001	2	,001	,735	,485	Não
Error	,033	48	,001			
Total	,868	72				

Fonte: Autor do estudo (*software* Minitab) (2014).

Na análise da profundidade de corte nota-se que quanto maior o Ap maior é o nível de desgaste. Este resultado pode estar relacionado com os aumentos das áreas dos planos de cisalhamento primário e secundário da ferramenta de corte.

### 5.5 Relação da vibração x desgaste da ferramenta

Os Gráficos 5.8 e 5.9 relacionam os parâmetros de corte, velocidade de corte e avanço, com a vibração mecânica e o desgaste da ferramenta.

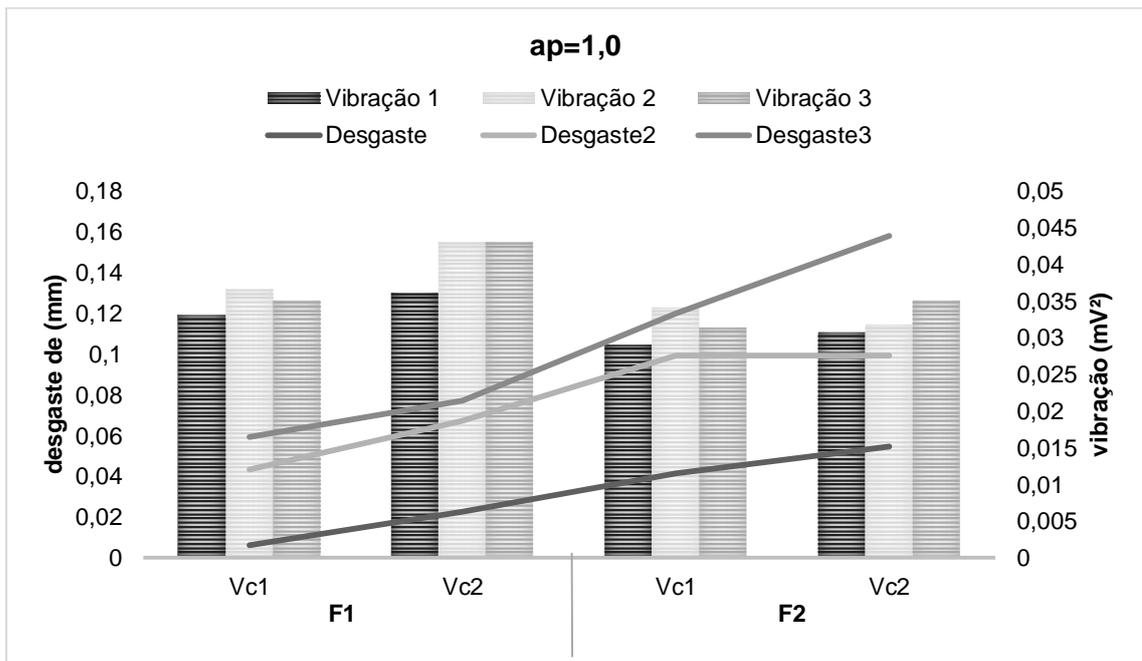


Gráfico 5.7 - Relação da vibração x Desgaste da ferramenta para Ap1  
Fonte: Autor do estudo (2014).

Genericamente não é possível observar correlações capazes de demonstrar os efeitos da vibração no desgaste. O que pode ser explicado pelo fato de que o componente periódico dos sinais de vibração é mais influenciado pelos elementos alternativos da máquina do que pelo desgaste.

Pode-se observar nas respostas do gráfico de Ap=1,0 e Ap=1,5 que cada tipo de linha do desgaste apresenta valores crescentes. Essa tendência é vista na mesma ordem em que ocorre o desbaste. A diferença entre cada valor correspondente pode ser entendida como o quanto o desgaste aumentou. Na relação da vibração, a resposta não se mostrou crescente ou decrescente. Aparentemente, os dados apenas oscilaram em uma faixa.

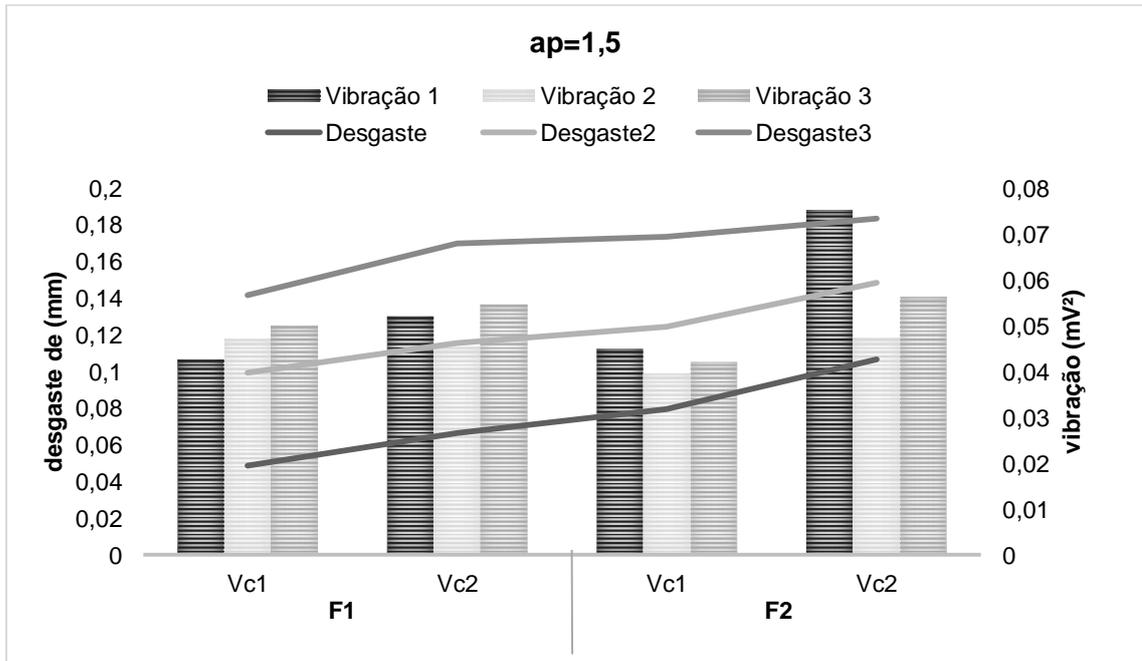


Gráfico 5.8 - Relação da vibração x desgaste da ferramenta para Ap2.  
 Fonte: Autor do estudo (2014).

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo buscou alcançar o seu objetivo que consistiu em realizar uma análise entre os parâmetros de usinagem com o desgaste da ferramenta e a vibração mecânica utilizando o cepstrum de potência, dentre os achados pode-se concluir que:

- Genericamente não houve possibilidade de observar correlações capazes de demonstrar os efeitos da vibração no desgaste. Realidade que pode ser explicada pelo fato de que o componente periódico dos sinais de vibração é mais influenciado pelos elementos rotativos alternativos da máquina. Essas fontes de geração do sinal de vibração exerceram maiores influências se comparadas com o que a variação do desgaste possa causar.

- Pode-se constatar estatisticamente que o desgaste é influenciado pelos parâmetros de corte: avanço, velocidade de corte e profundidade de corte.

- A vibração apresentou um comportamento diferente ao variar a profundidade de corte. Ao analisar graficamente, notou-se para Ap1, que o aumento do avanço diminui a vibração do sinal. Ao aumentar a profundidade de corte, observou-se um aumento na sensibilidade do sinal, e, como resposta obtiveram-se altas variações no nível de energia do padrão de vibração. Constatou-se de forma estatística que, a vibração é influenciada pela profundidade de corte e pela velocidade de corte.

## 7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS:

- Utilizar outras técnicas de análise de sinais. Como por exemplo, a técnica do envelope combinada com a análise cepstral. E, ao investigar, buscar além de uma diferença na modulação em amplitude a diferença no espectro de frequência. Adotando como uma das variáveis independentes uma pastilha gasta e outra nova.

- Realizar o experimento para maiores níveis de profundidade de corte, a fim de investigar, além da influência desta, o seu comportamento com maiores detalhes.

- Realizar medições da rugosidade superficial da peça usinada. Comparar os resultados com a vibração e o desgaste. Utilizar na comparação, os vários tipos de parâmetros de rugosidade.

- Utilizar outras técnicas de monitoramento “online” como, por exemplo, à análise de potência do motor da máquina e comparar com os sinais de vibração. Fazer uso também de dispositivos sem fios, como sensores wireless.

- Utilizar equipamentos de microscopia EDS para verificar possíveis defeitos internos no material da ferramenta. Comparar os sinais obtidos com ferramentas defeituosas. Verificar também com o equipamento, a ocorrência de APC.

- Estudar a viabilidade do uso de visão computacional para analisar o desgaste da ferramenta de forma direta, evitando-se, assim, a retirada da pastilha do porta ferramenta, de modo a automatizar o processo de medição. Bem como, para obter maiores dados além daqueles pertinentes à vibração e a potência do motor.

## REFERÊNCIAS

ÁLVAREZ, José Díaz. **Análisis numérico y experimental del desgaste de herramienta e integridad superficial em los procesos de torneado de inconel 718**. Departamento de Ingeniería Mecánica, Leganés, Junio, 2013

BARRETO, R. A. **Definição de Parâmetros de Vibração e Ruído para Aceitação de Câmbios Automotivos em Linhas de Montagem**. Dissertação (Mestrado). Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis – SC – Brasil, 2003. 135p.

BRÜEL; KJAER. **Deltatron accelerometers**: product data. Product Data, DeltaTron®Accelerometers (s.d.).

CAETANO, Edmundo do Rosário Rodrigues. **Análise de variância utilizando modelos autor regressivos em experimentos com dependência espacial**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Lavras, Lavras: UFLA, 2013. 115 p.

CARNEIRO, Antonio Policarpo Souza; RIBEIRO JÚNIOR, José Ivo; SANTOS, Nerilson Terra Santos. **EST220** – Estatística Experimental. Universidade Federal de Viçosa Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas. Departamento de Estatística, Viçosa – Minas Gerais, 2009.

COTRIM, Evandro Daniel Calderaro. **Projeto e integração de um sistema de amostragem de tensão e de corrente para aplicações em sistemas de medição de grandezas elétricas**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI, Itajubá, MG, 2003.100 p.

CHILDERS, Donald D. (et al.) **The Cepstrum**: A Guide to Processing. Proceedings of the IEEE, v. 65, n. 10, October 1977.

DINIZ, A. D., MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L.: **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**, 5ªed., São Paulo, Artliber Editora, 2006.

FLORA, Leandro Della. **Controle de aceleração de uma máquina de vibração eletrodinâmica**. Dissertação (mestrado) Engenharia Elétrica. Controle de processos. Universidade Federal de Santa Maria-UFSM, Santa Maria-RS, 2005. 98p.  
DOEBELIN, Ernest O. **Measurement systems**: application and design. (McGraw-Hill series in mechanical and industrial engineering) Includes index, 2004

FERNANDES, Paulo Gentil Gibson. **Filtro Anti-aliasing para Sistema de Aquisição Sincronizada Implementado em FPGA/ Paulo Gentil Gibson.** Dissertação (mestrado). Programa de Engenharia Elétrica Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2011. 103 p.

FERRARESI, D. **Fundamentos da Usinagem dos Metais.** Ed. Edgard Blücher Ltda., v. 1, São Paulo, 1977.

\_\_\_\_\_. **Fundamentos da Usinagem dos Metais,** São Paulo, Ed. Edgard BlucherLtda, 13<sup>a</sup> reimpressão, 2009.

GAUCINISKI, Juliano. **Estudo das transformadas wavelets para utilização em reconhecimento e classificação de comandos de voz.** Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Sistemas e Processos Industriais – Controle e Otimização de Processos Industriais, Universidade de Santa Cruz do Sul – UNISC, Santa Cruz do Sul, 2009. 88p.

GUIMARÃES, T.A., OLIVEIRA W.C.; ALVES F.F. (et al.) **Uma análise da vibração mecânica e a rugosidade de eixos no torneamento usando o cepstrum de potência.** Anais do COBEF, Caxias do Sul-RS, Brasil, 2011.

GUIMARÃES, Tobias Anderson; COSTA, Eder Silva; GONÇALVES, Carlos Henrique Saldanha. Correlação entre a rugosidade e a vibração de canais fresados na liga de alumínio astm-6351 t6 usando o cepstrum de potência. **V CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA.** 25 a 28 de agosto de 2008.Salvador. Bahia, Brasil.

GUTIÉRREZ, Enrique Alegre. Evaluación de la superficie de desgaste de plaquitas de corte mediante imagen digital, (s.d.).

INSTRUMENTAÇÃO E TÉCNICAS DE MEDIDAS – ITM. **Versão 1 – Instrumentação e Técnicas de Medidas (ITM). Com base nas notas de aula de COB783, Hardware and Housekeeping Techniques, Circuit Board Layout Techniques e Noise Reduction Techniques in Electronic Systems,** 2013. Apostila.

KARL, J. Aström; BJÖRN, Wittenmark. **Computer Controlled Systems: Theory and Design** (Prentice-Hall information and system sciences series). Jan 6, 1984.

LABVIEW. PSI.2315 – Laboratório de Eletricidade I. **Instrumentação Virtual**, 2002. Disponível em: <[http://portal.fsc.ufsc.br/~zoldan/labview/instv\\_2p\\_2002.pdf](http://portal.fsc.ufsc.br/~zoldan/labview/instv_2p_2002.pdf)> Acesso em: 20 jan. 2014.

LOPES, Cláudio Parreira. **Análise do desgaste de ferramentas no fresamento de engrenagens cônicas de grandes dimensões fundidas em aço ABNT 4140**. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de São João Del Rei. Departamento de Engenharia Mecânica, 2013. 77f.

MAIA, Luís Henrique Andrade. **Influência das condições de corte do fresamento do aço baixa liga ABNT 4140 nos sinais vibracionais e de emissão acústica**. Dissertação (mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, 2009. 199p.

MOIA, Joabel. **Amplificador comutado para um atuador piezoelétrico**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de pós-graduação. Engenharia Elétrica, Florianópolis – SC, 2004. 146p.

MONTGOMERY, Douglas C. **Design and Analysis of Experiments**. 7<sup>a</sup> ed. Hoboken, John Wiley & Sons: 2008. 656p. apud (CAETANO, 2013)

PIRES E DINIZ (1996). In: DINIZ, A. D., MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L.: **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**, 5<sup>a</sup>ed.. São Paulo, Artliber Editora, 2006.

PIGARI, A. C.; **Monitoramento do desgaste da ferramenta no processo de torneamento usando emissão acústica**, Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Campinas, Campinas, 1995.

ROCHA, Cláudio Araújo. BARCELLOS, Clovis Sperb de; SALES, Wisley Falco. **Efeito dos parâmetros de corte na usinagem das sedes de válvulas de motores de combustão interna utilizando ferramentas de CBN**. Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais – PUC Minas, Belo Horizonte, MG, Brasil. 1<sup>o</sup> CONGRESSO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO. 02 a 04 de abril de 2001. Curitiba-Paraná, Brasil.

RODRIGUES, Vitor Manuel Sousa. **Sistema de Interrogação de Sensores Bioquímicos**. Relatório final do Projecto Final de Curso Universidade da Madeira. Centro de Ciências Exactas e da Engenharia, INESC, Porto, Novembro, 2009. 146p.

SANTOS, S. C., Sales, W. F.; **Fundamentos da Usinagem dos Materiais**, PUC-Minas, 2004.

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, p. 487-546, 2002.

SILVA, Bruna Tavares Vieira da. **Bancada para análise de vibração: Análise de falhas em máquinas rotativas**. Dissertação (Mestrado) Engenharia Mecânica na área de automação. Departamento de Engenharia Mecânica. Engenharia Mecânica Universidade de Taubaté. Taubaté - SP. 2012. 69p.

SOUTO, U. B.; **Monitoramento do desgaste de ferramenta no processo de fresamento via emissão acústica**, Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2007.

STÉFANO, et al. In: FERRARESI, D. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**. Ed. Edgard Blücher Ltda., v. 1, São Paulo, 1977.

SUMATHI, S; SUREKHA, P. **LabVIEW based Advanced Instrumentation**. Systems. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2007.

STEMMER, C. E.; **Ferramentas de Corte**, Florianópolis, Ed. UFSJ, 2005.

USEVICIUS, Luis Antonio. **Implantação da metodologia seis sigma e aplicação da técnica estatística projeto de experimentos na resolução de problemas e otimização de processos de fabricação**. Dissertação (Mestrado). Profissionalizante em Engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul Escola de Engenharia, Porto Alegre, 2004.

VENTURA, José Alexandre Pinto dos Santos. **Biofeedback da Voz Cantada**. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Biofeedback da Voz Cantada. Dissertação (Mestrado). Engenharia Electrotécnica e de Computadores. Major Telecomunicações. Porto. 27 de Junho de 2011. 182p.

VIEIRA, Carlos Henrique. **Automação de bancada didática para realização de ensaios em motores de indução**. Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial. Curso de pós-graduação em automação industrial automação de bancada didática para realização de ensaios em motores de indução. Trabalho de Conclusão de Curso, Jaraguá do Sul – SC, 2011. 182p.

ZCC-CT. **Catálogo de Ferramentas**. 2009. Disponível em: <<http://www.zccct.com/en/products.jsp>>. Acessado em 16 jul, 2013.  
Site consultado:

Disponível em: <<http://sine.ni.com/psp/app/doc/p/id/psp-30/lang/pt>>. Acesso em: 01 fev. 2014.

## ANEXO A - Código para análise do Cepstrum de Potência

```

clc
clearall
closeall

%Agrupando dados da aquisição, ensaio_1
fori=1:3
load(sprintf('d%i.mat',i));
sinal(i,:)=data(:,2);
tempo(i,:)=data(:,1);
end
%Plotando Gráfico do sinal
for i=1:3
figure
figura(i)=plot(tempo(i,:),sinal(i),'b-.');
legend('sinal')
set(figura(i),'LineWidth',1.2,'LineStyle','-','Marker','.', 'MarkerSize',4)
xlabel('Tempo(s)');
ylabel('Sinal de Vibração')
title('Vibração')
grid
end
%Análise pelo Cepstrum
in=length(sinal(i,:))-16000-1; %8 segundos de análise
for i=1:3
sinalA(i,:)=sinal(i,in:end);
tempoFa=tempo(i,in:end);
tempoF(i,:)=tempoFa-tempoFa(1); %zerando tempo
ceps(i,:)=ifft(log(abs(fft(sinalA(i,:))))); %Cepstrum
end

%%
%Plotando gráfico

fori=1:3
figure
subplot(2,1,1)
figura1=plot(tempo(i,:),sinal(i,:))
legend('Sinal')
set(figura1,'LineWidth',1.2,'LineStyle','-','Marker','.', 'MarkerSize',4)
xlabel('tempo (s)')
ylabel('Amplitude')
gridon
subplot(2,1,2)
figura2=plot(tempoF(i,:),abs(ceps(i,:)))
legend('Cepstrum')
set(figura2,'LineWidth',1.2,'LineStyle','-','Marker','.', 'MarkerSize',4)
xlabel('Quefrecy (s)')
ylabel('c(t)')
gridon
end

```

## ANEXO B - SINAL DE VIBRAÇÃO E GRÁFICO CEPSTRAL

Neste anexo é mostrado o gráfico referente a cada ensaio e sua respectiva ordem de desgaste. Na respectiva figura, é mostrado a amplitude ( $mV^2$ ) do sinal de vibração e amplitude do cepstrum.

### TRATAMENTO 1

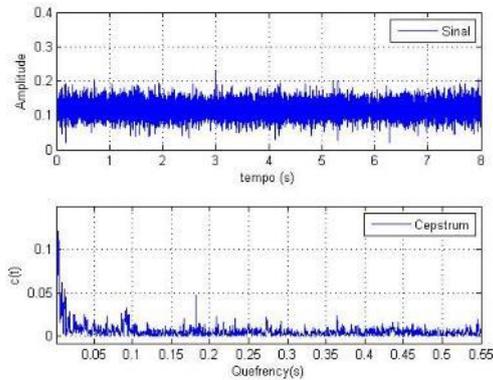


Figura 1 – Ensaio 4 – 1º desgaste

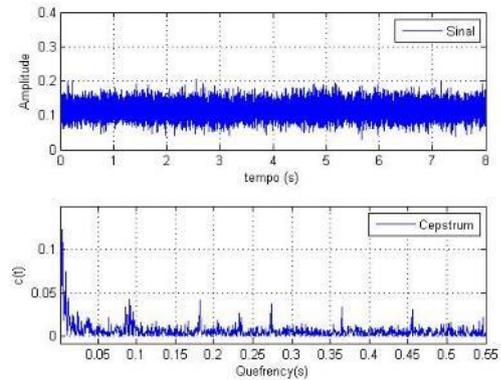


Figura 2 – Ensaio 4 – 2º desgaste

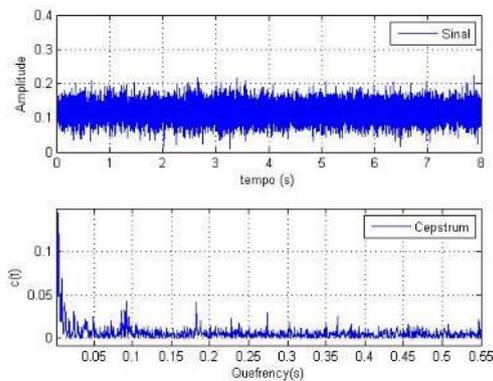


Figura 3 – Ensaio 4 – 3º desgaste

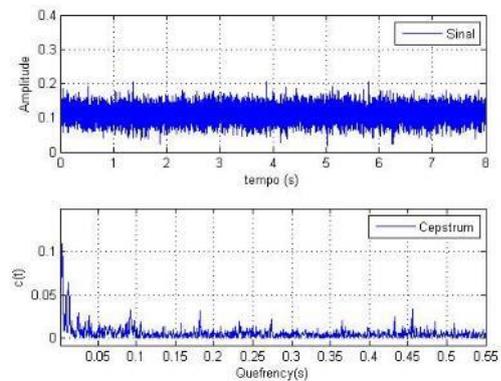


Figura 4 – Ensaio 12 – 1º desgaste

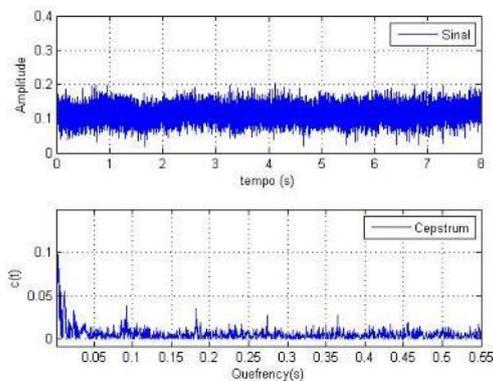


Figura 5 – Ensaio 12 – 2º desgaste

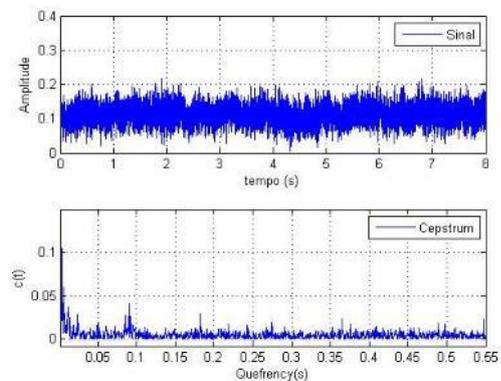


Figura 6 – Ensaio 12 – 3º desgaste

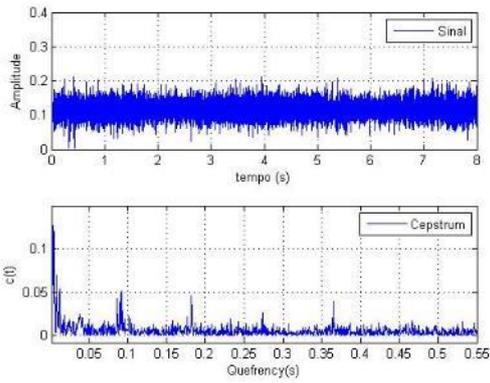


Figura 7 – Ensaio 15 – 1º debaste

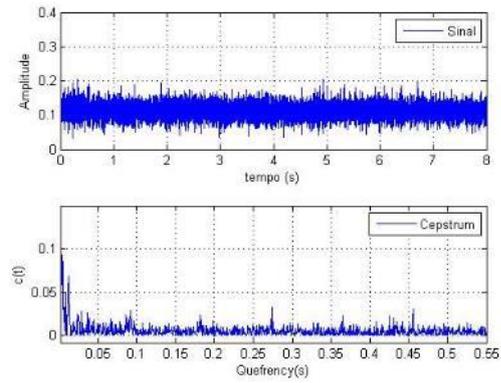


Figura 8 – Ensaio 15 – 2º debaste

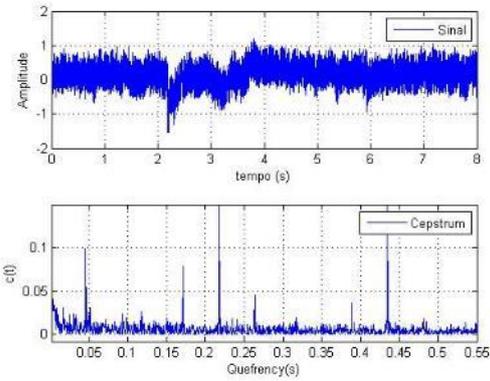


Figura 9 – Ensaio 15 – 3º debaste

TRATAMENTO 2

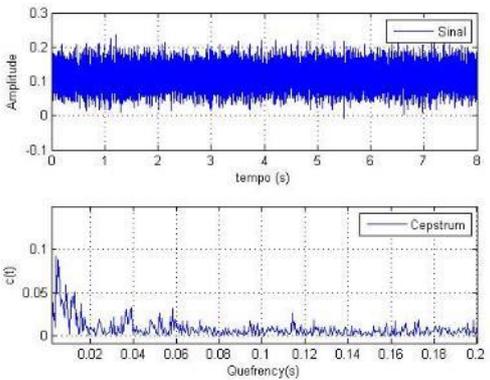


Figura 10 – Ensaio 7 – 1º debaste

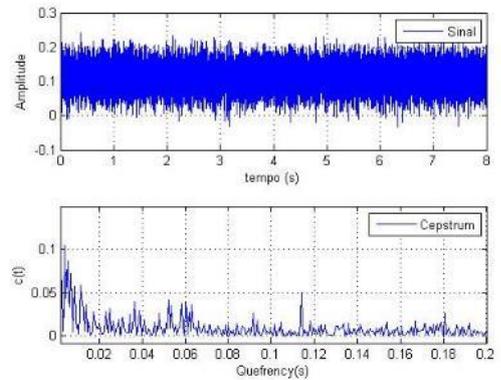


Figura 11 – Ensaio 7 – 2º debaste

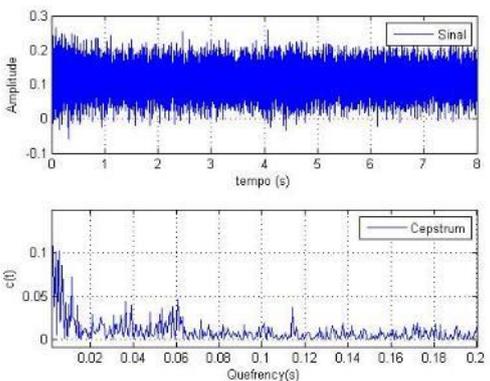


Figura 12 – Ensaio 7 – 3º debaste

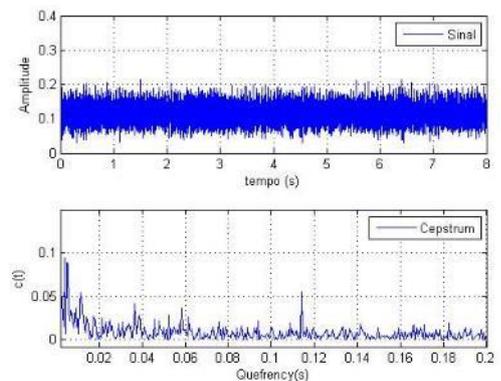


Figura 13 – Ensaio 17 – 1º debaste

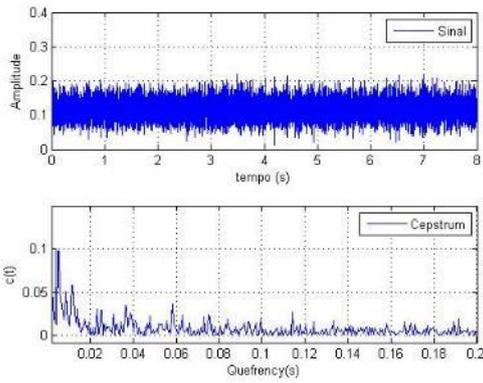


Figura 14 – Ensaio 17 – 2º desbaste

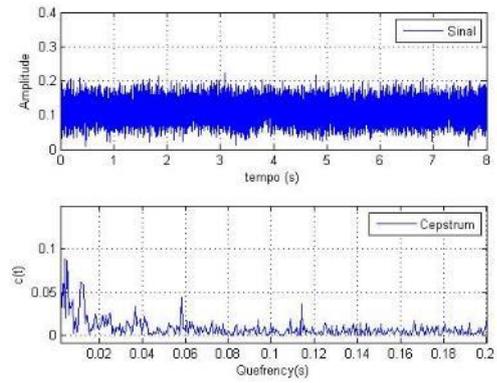


Figura 15 – Ensaio 17 – 3º desbaste

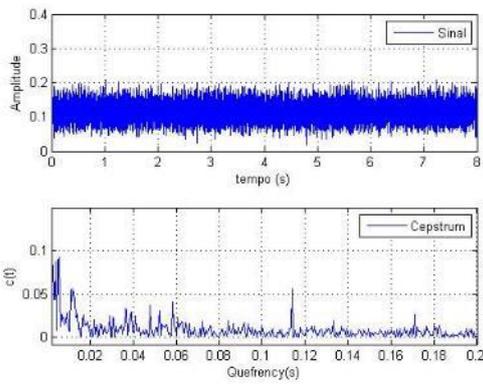


Figura 16 – Ensaio 24 – 1º desbaste

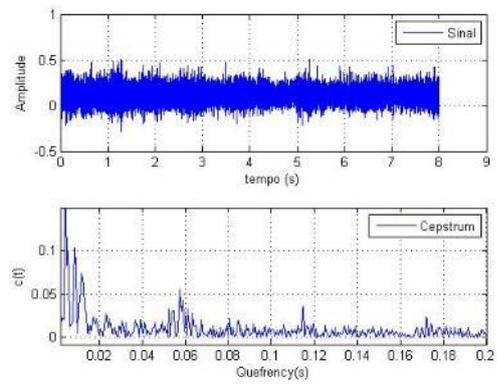


Figura 17 – Ensaio 24 – 2º desbaste

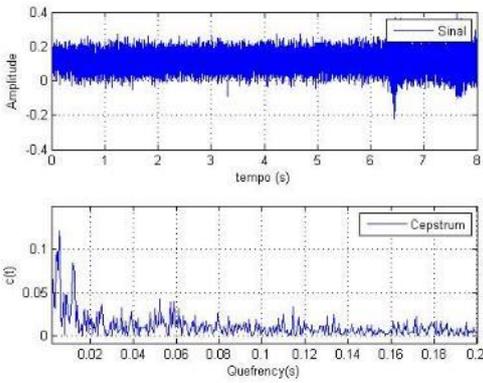


Figura 18 – Ensaio 24 – 3º desbaste

TRATAMENTO 3:

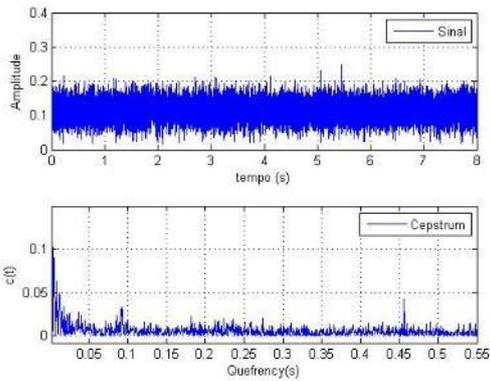


Figura 19 – Ensaio 1 – 1º desbaste

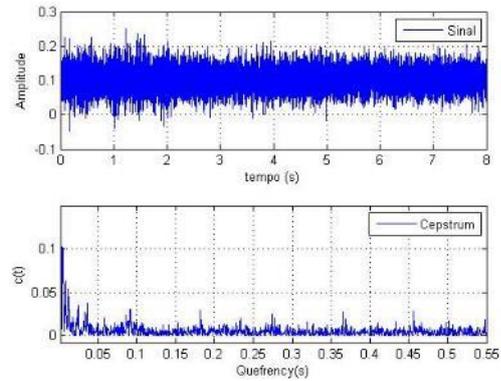
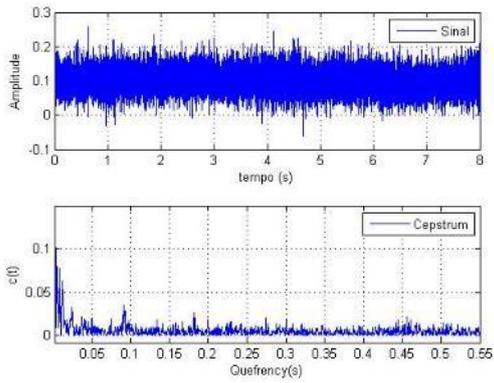
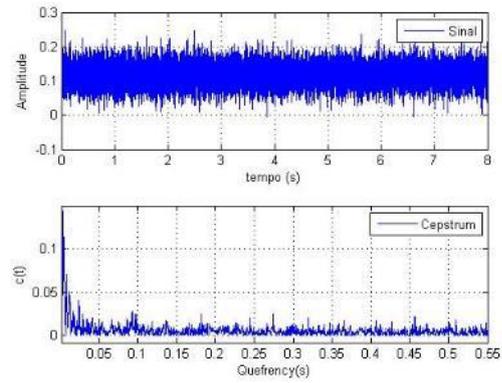
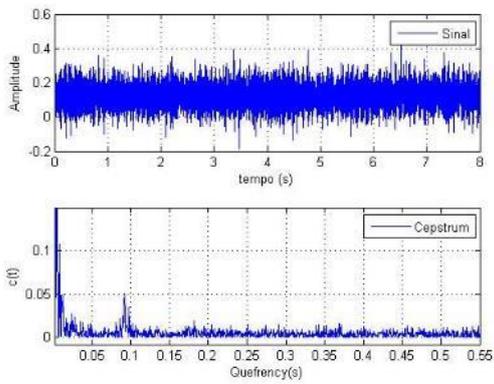
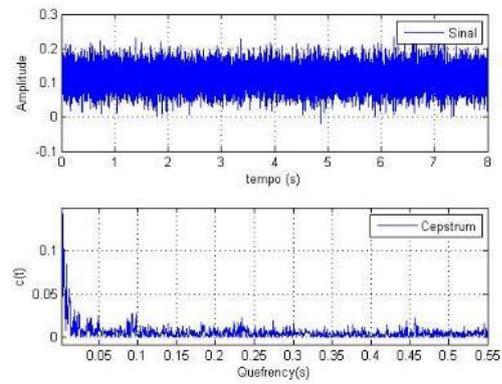
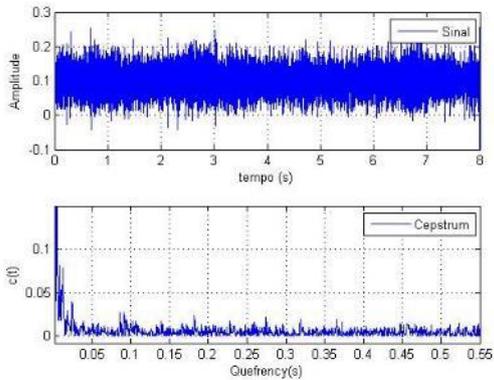
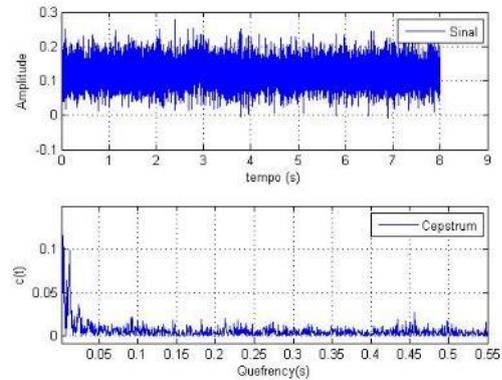
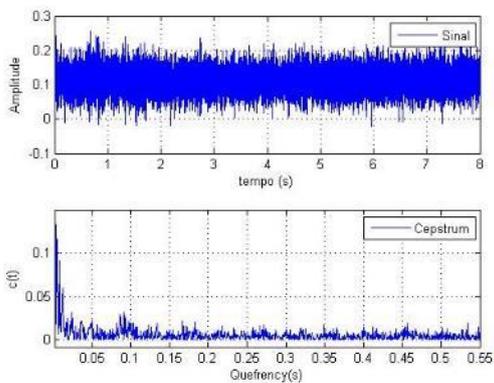


Figura 20 – Ensaio 1 – 2º desbaste

Figura 21 – Ensaio 1 – 3<sup>o</sup> desbasteFigura 22 – Ensaio 3 – 1<sup>o</sup> desbasteFigura 23 – Ensaio 3 – 2<sup>o</sup> desbasteFigura 24 – Ensaio 3 – 3<sup>o</sup> desbasteFigura 25 – Ensaio 21 – 1<sup>o</sup> desbasteFigura 26 – Ensaio 21 – 2<sup>o</sup> desbasteFigura 27 – Ensaio 21 – 3<sup>o</sup> desbaste

TRATAMENTO 4:

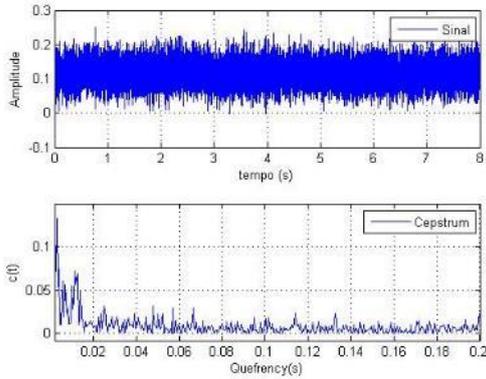


Figura 28 – Ensaio 6 – 1º desbaste

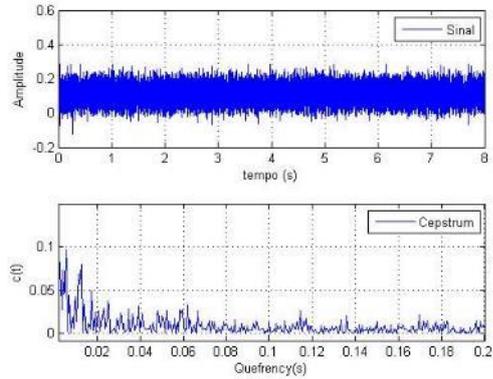


Figura 29 – Ensaio 6 – 2º desbaste

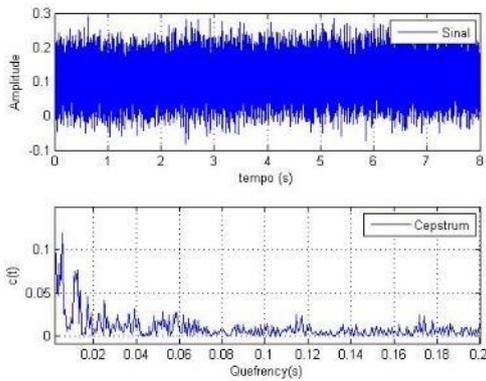


Figura 30 – Ensaio 6 – 3º desbaste

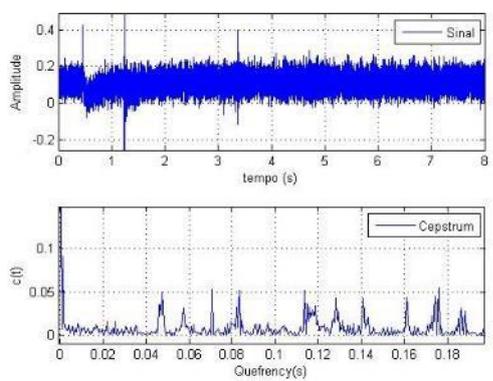


Figura 31 – Ensaio 19 – 1º desbaste

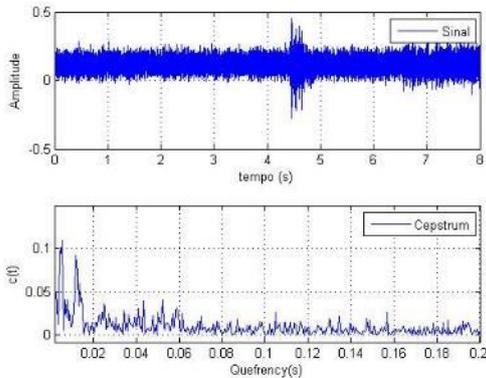


Figura 32 – Ensaio 19 – 2º desbaste

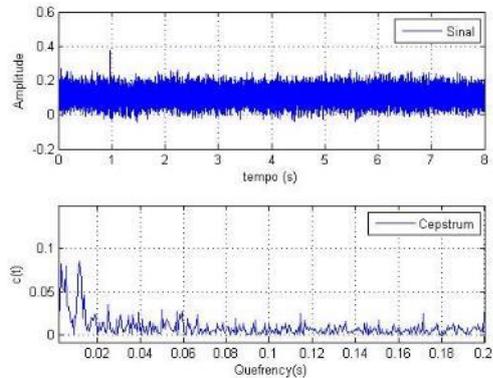


Figura 33 – Ensaio 19 – 3º desbaste

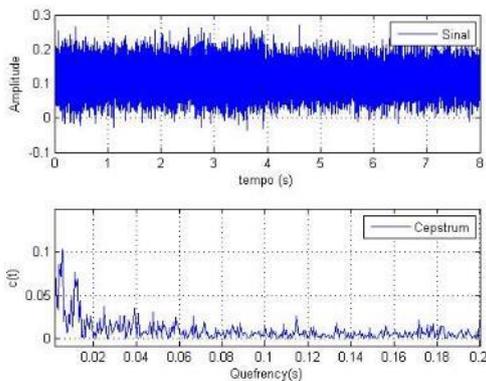


Figura 34 – Ensaio 23 – 1º desbaste

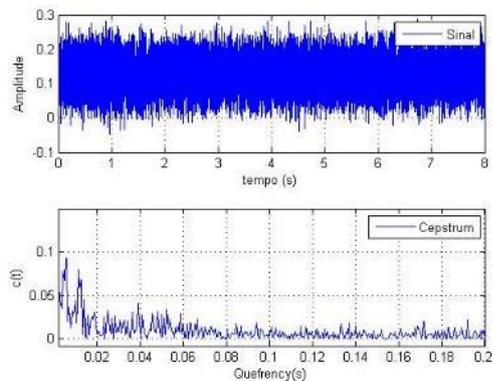


Figura 35 – Ensaio 23 – 2º desbaste

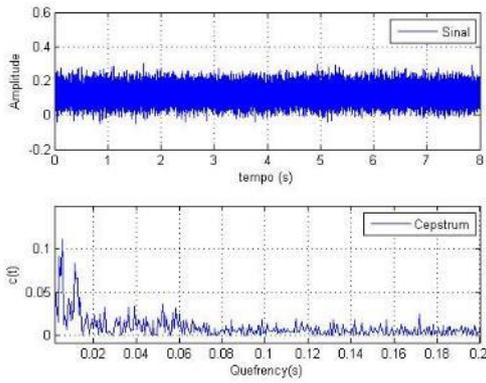


Figura 36 – Ensaio 23 – 3º desbaste

TRATAMENTO 5:

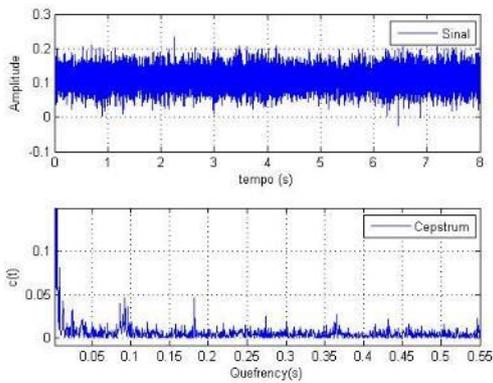


Figura 37 – Ensaio 8 – 1º desbaste

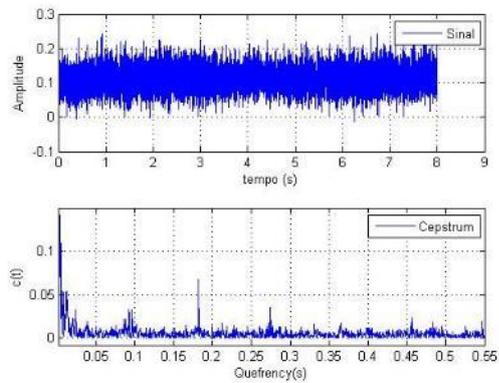


Figura 38 – Ensaio 8 – 2º desbaste

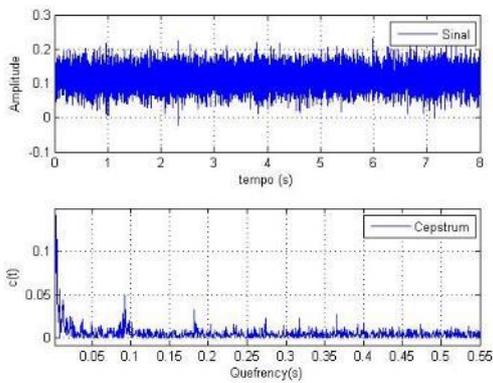


Figura 39 – Ensaio 8 – 3º desbaste

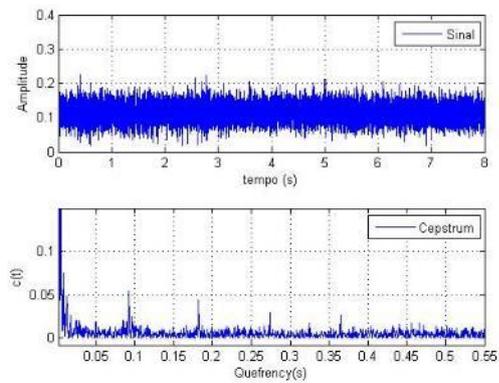


Figura 40 – Ensaio 9 – 1º desbaste

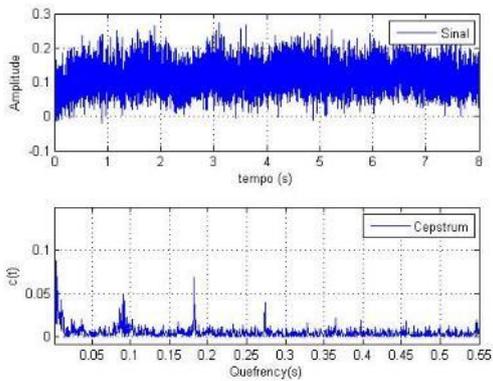


Figura 41 – Ensaio 9 – 2º desbaste

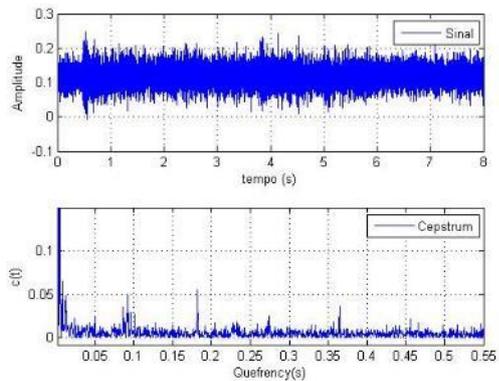


Figura 42 – Ensaio 9 – 3º desbaste

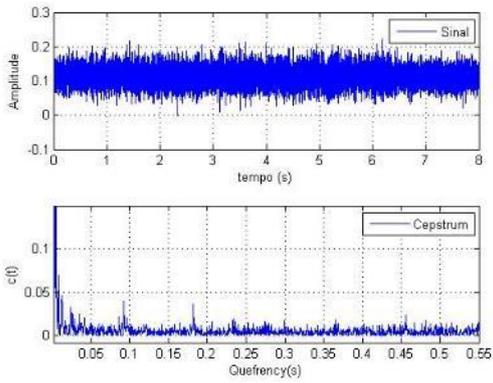


Figura 43 – Ensaio 10 – 1º desbaste

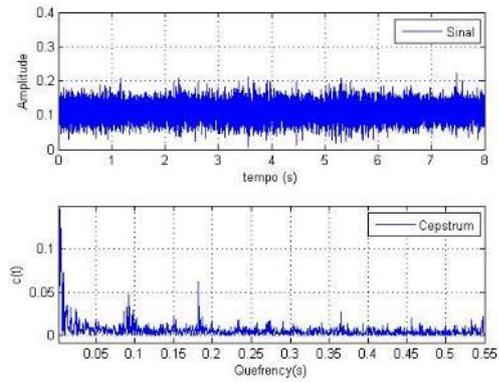


Figura 44 – Ensaio 10 – 2º desbaste

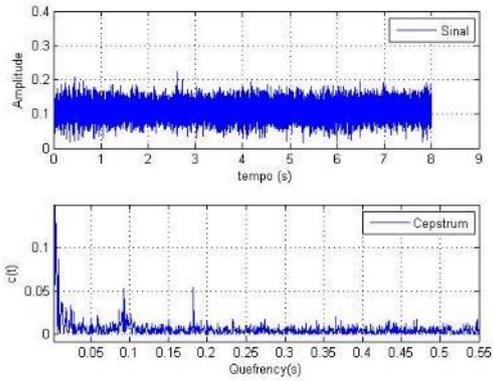


Figura 45 – Ensaio 10 – 3º desbaste

TRATAMENTO 6:

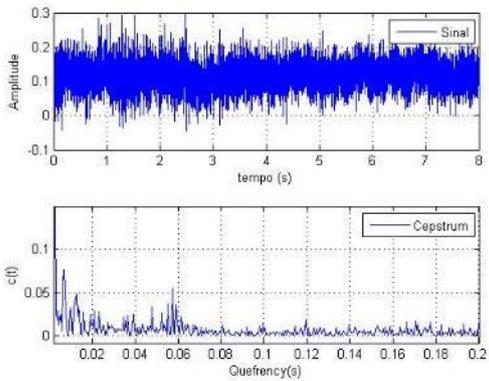


Figura 46 – Ensaio 2 – 1º desbaste

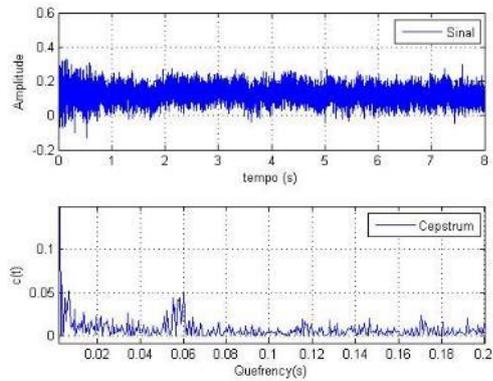


Figura 47 – Ensaio 2 – 2º desbaste

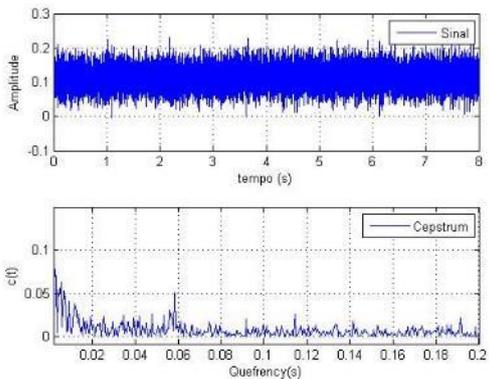


Figura 48 – Ensaio 2 – 3º desbaste

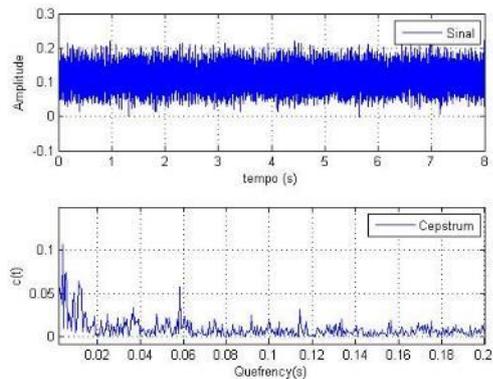


Figura 49 – Ensaio 13 – 1º desbaste

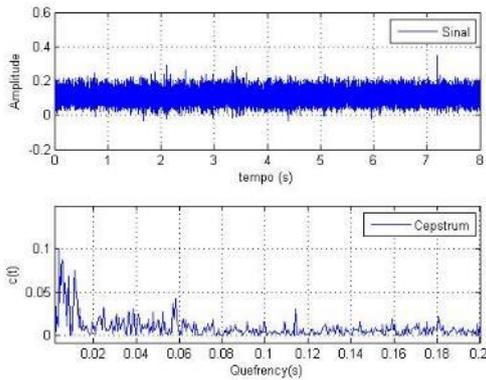


Figura 50 – Ensaio 13 – 2º desbaste

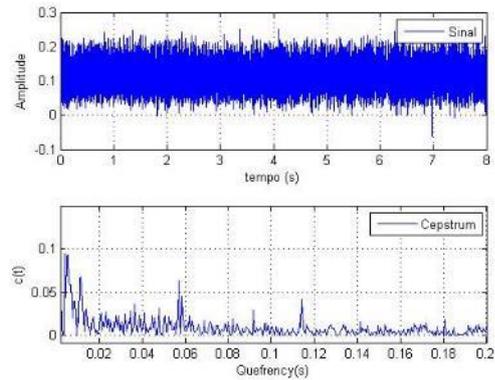


Figura 51 – Ensaio 13 – 3º desbaste

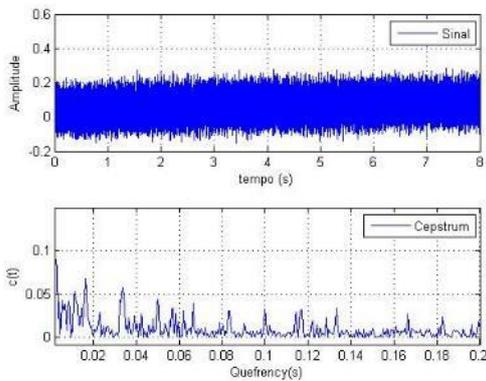


Figura 52 – Ensaio 18 – 1º desbaste

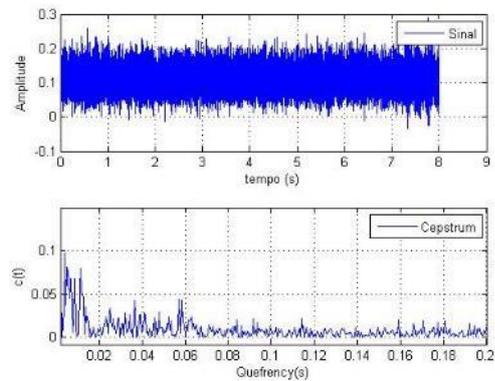


Figura 53 – Ensaio 18 – 2º desbaste

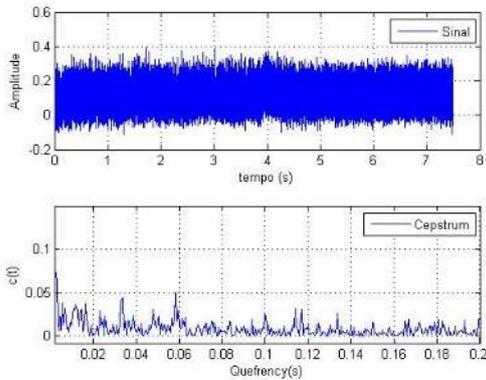


Figura 54 – Ensaio 18 – 3º desbaste

TRATAMENTO 7:

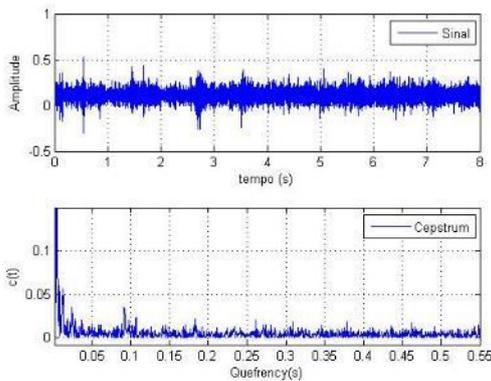


Figura 55 – Ensaio 14 – 3º desbaste

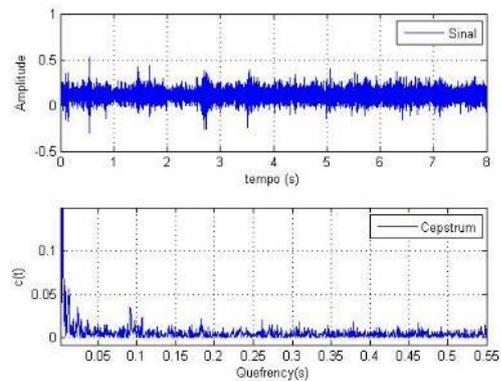


Figura 56 – Ensaio 14 – 3º desbaste

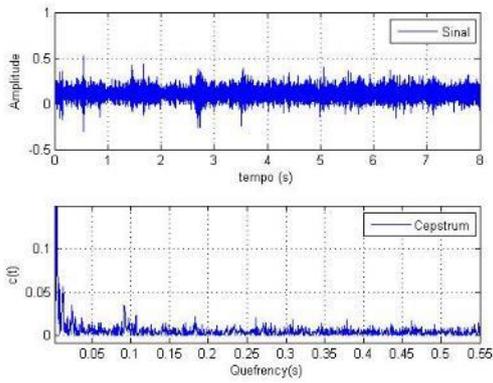


Figura 57 – Ensaio 14 – 3º desbaste

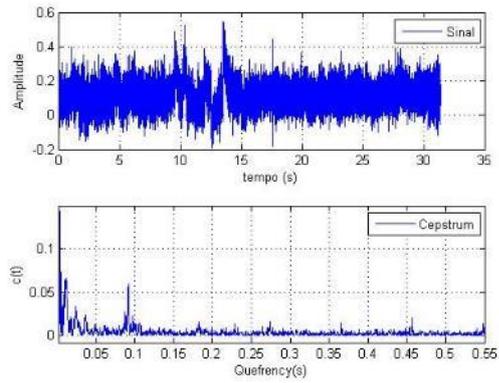


Figura 58 – Ensaio 16 – 1º desbaste

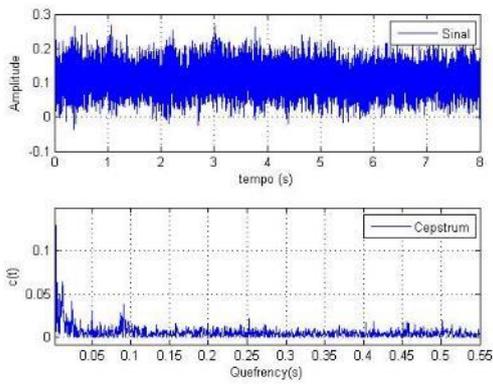


Figura 59 – Ensaio 16 – 2º desbaste

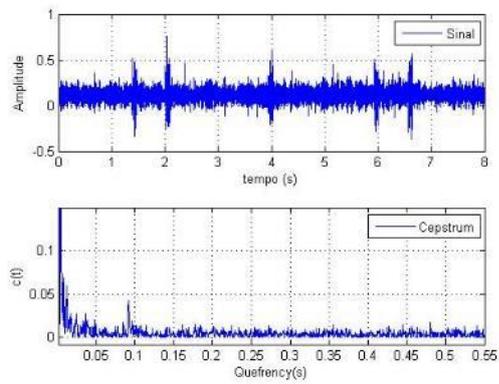


Figura 60 – Ensaio 16 – 3º desbaste

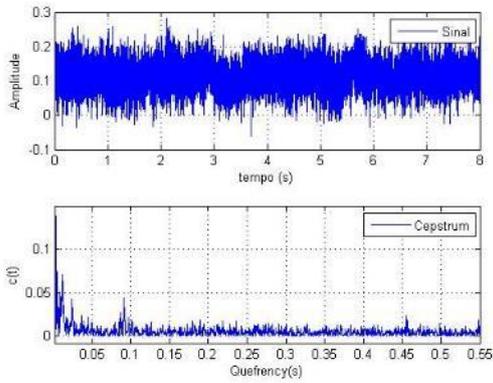


Figura 61 – Ensaio 22 – 1º desbaste

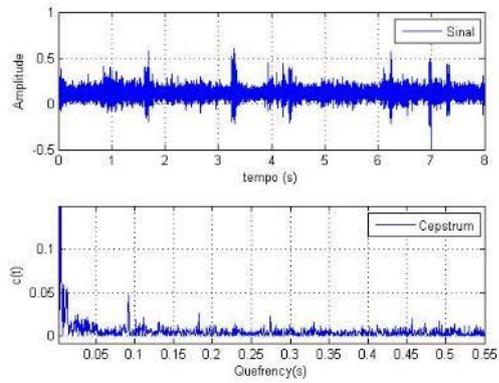


Figura 62 – Ensaio 22 – 2º desbaste

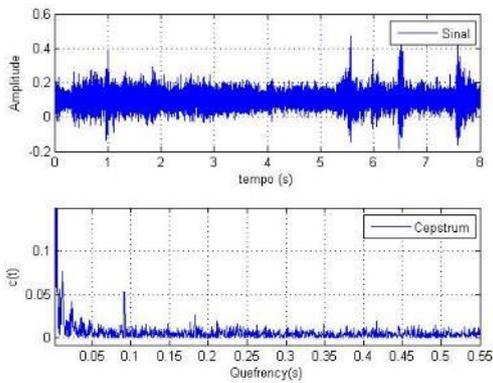


Figura 63 – Ensaio 22 – 3º desbaste

TRATAMENTO 8:

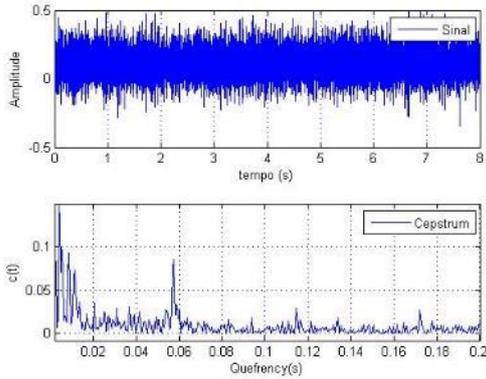


Figura 64 – Ensaio 5 – 1º desbaste

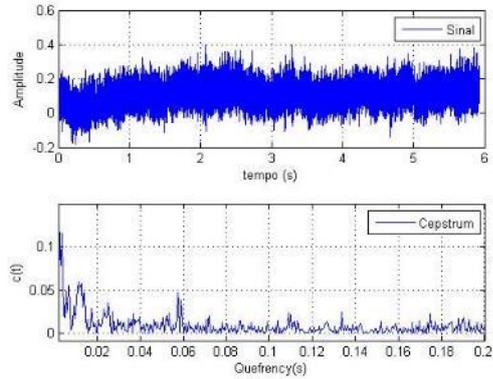


Figura 65 – Ensaio 5 – 2º desbaste

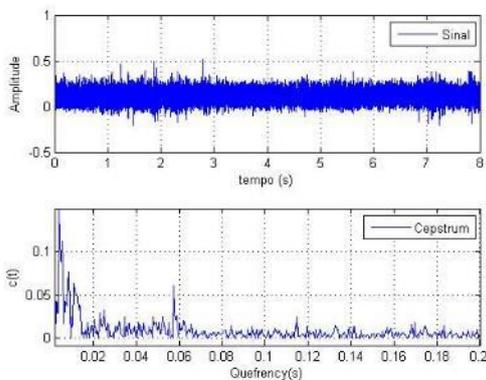


Figura 66 – Ensaio 5 – 3º desbaste

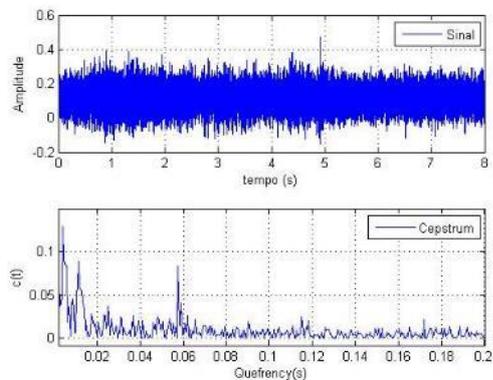


Figura 67 – Ensaio 11 – 1º desbaste

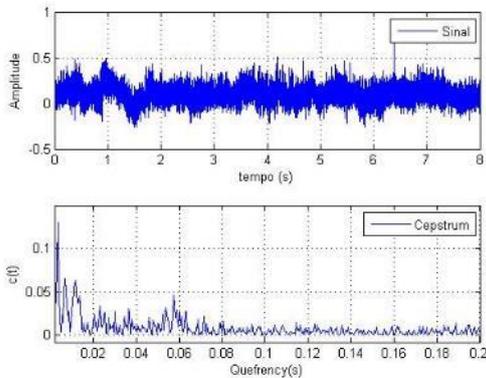


Figura 68 – Ensaio 11 – 2º desbaste

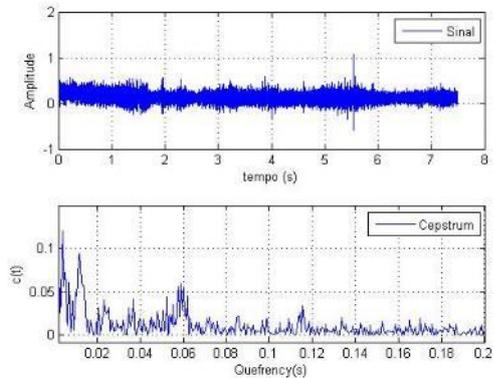


Figura 69 – Ensaio 11 – 3º desbaste

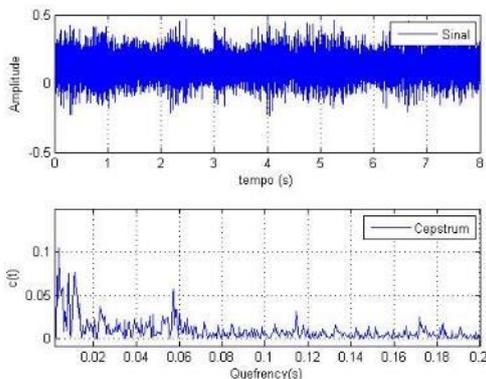


Figura 70 – Ensaio 20 – 1º desbaste

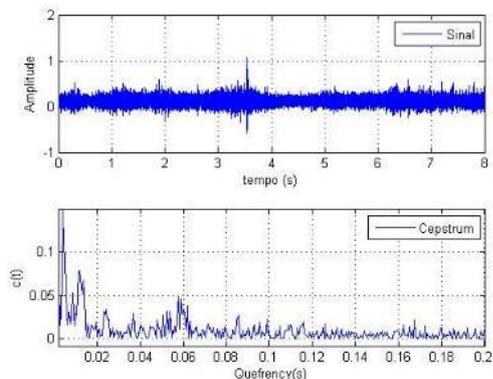


Figura 71 – Ensaio 20 – 2º desbaste

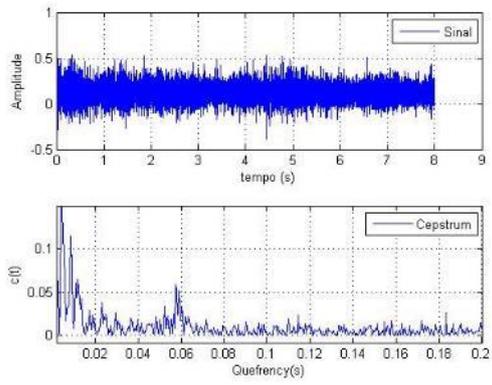


Figura 72 – Ensaio 20 – 3º desbaste

## ANEXO C – ARESTA DE CORTE DA PASTILHA

O respectivo anexo apresenta as imagens obtidas através do microscópio ótico para estimar o desgaste. Em cada figura, é mostrado o decorrer do desgaste da pastilha no respectivo ensaio ao qual foi submetida.

### TRATAMENTO 1:



Figura 1 – Ensaio 4- Medição do desgaste - Sequencia de desbaste (1º 2º e 3º)

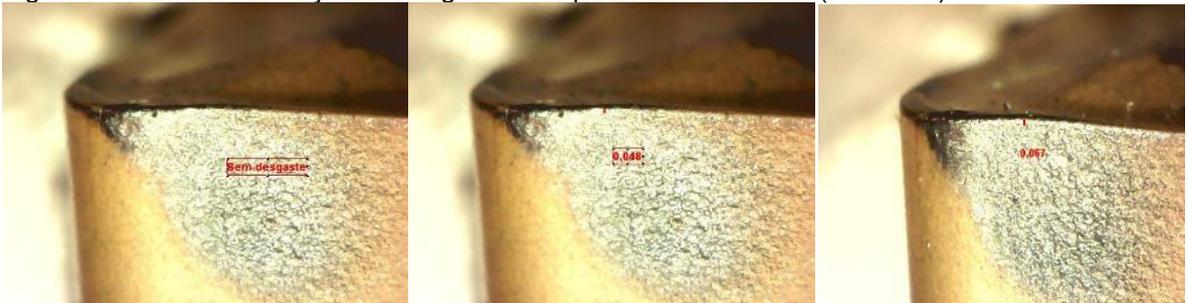


Figura 2 – Ensaio 12 - Medição do desgaste - Sequencia de desbaste (1º 2º e 3º)



Figura 3 – Ensaio 15 - Medição do desgaste - Sequencia de desbaste (1º 2º e 3º)

## TRATAMENTO 2:



Figura 4 – Ensaio 7 - Medição do desgaste - Sequencia de desbaste (1º 2º e 3º)



Figura 5 – Ensaio 17 - Medição do desgaste - Sequencia de desbaste (1º 2º e 3º)



Figura 6 – Ensaio 24 - Medição do desgaste - Sequencia de desbaste (1º 2º e 3º)

## TRATAMENTO 3:

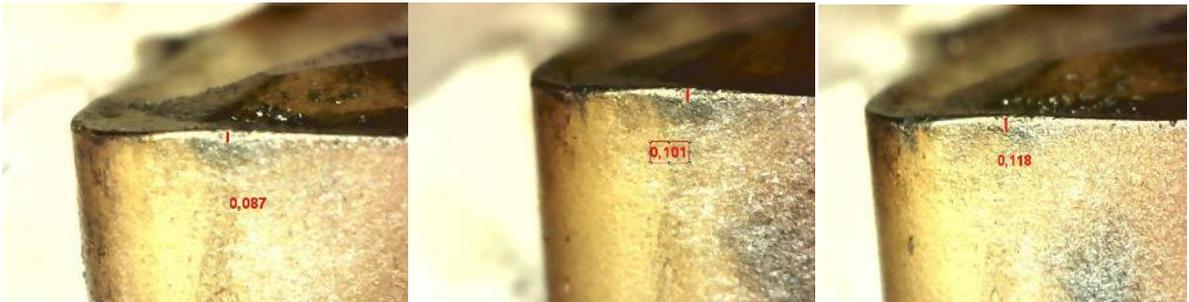


Figura 7 – Ensaio 1 - Medição do desgaste - Sequencia de desbaste (1º 2º e 3º)

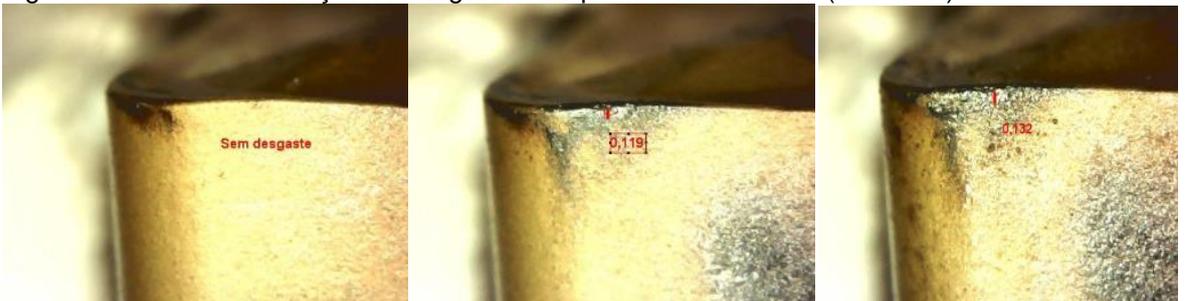


Figura 8 – Ensaio 3 - Medição do desgaste - Sequencia de desbaste (1º 2º e 3º)

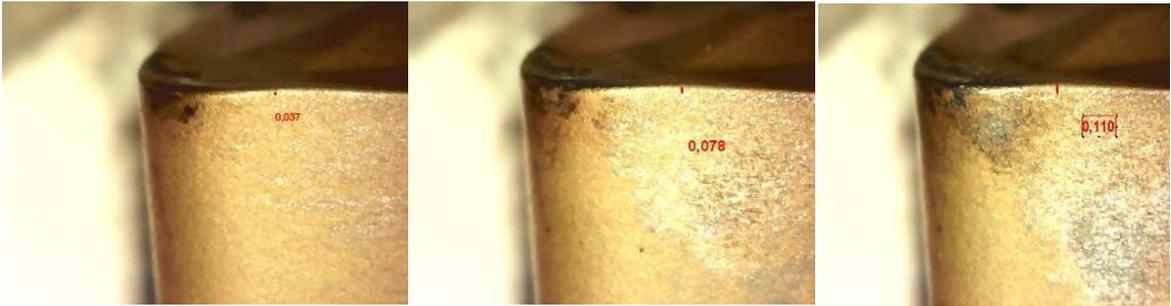


Figura 9 – Ensaio 21 - Medição do desgaste - Sequencia de desbaste (1º 2º e 3º)

TRATAMENTO 4:

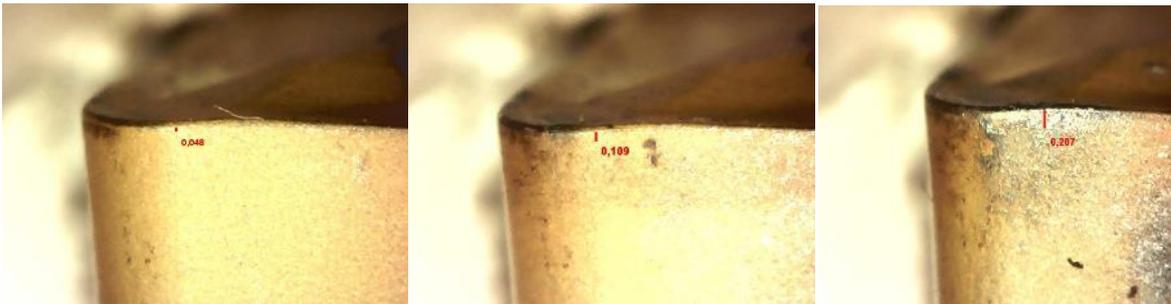


Figura 10 – Ensaio 6 - Medição do desgaste - Sequencia de desbaste (1º 2º e 3º)

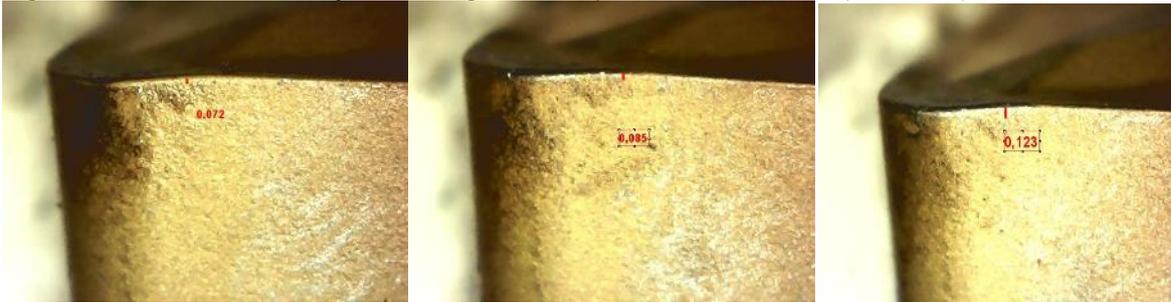


Figura 11 – Ensaio 19 - Medição do desgaste - Sequencia de desbaste (1º 2º e 3º)



Figura 12 – Ensaio 23 - Medição do desgaste - Sequencia de desbaste (1º 2º e 3º)

## TRATAMENTO 5:

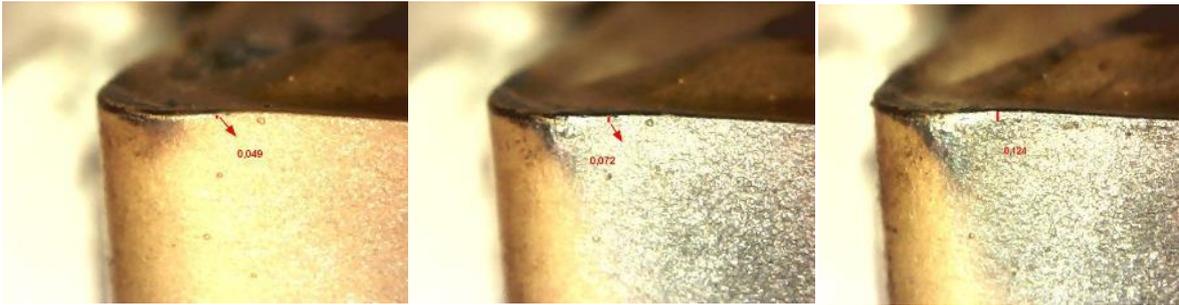


Figura 13 – Ensaio 8 - Medição do desgaste - Sequencia de desgaste (1º 2º e 3º)



Figura 14 – Ensaio 9 - Medição do desgaste - Sequencia de desgaste (1º 2º e 3º)



Figura 15 – Ensaio 10 - Medição do desgaste - Sequencia de desgaste (1º 2º e 3º)

## TRATAMENTO 6:



Figura 16– Ensaio 2 - Medição do desgaste - Sequencia de desgaste (1º 2º e 3º)

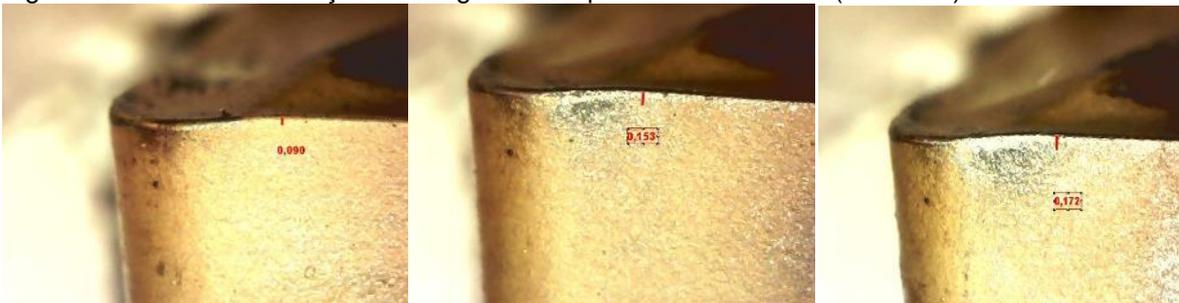


Figura 17– Ensaio 13 - Medição do desgaste - Sequencia de desgaste (1º 2º e 3º)



Figura 18– Ensaio 18 - Medição do desgaste - Sequencia de desbaste (1º 2º e 3º)

TRATAMENTO 7:



Figura 19– Ensaio 14 - Medição do desgaste - Sequencia de desbaste (1º 2º e 3º)



Figura 20– Ensaio 16 - Medição do desgaste - Sequencia de desbaste (1º 2º e 3º)



Figura 21– Ensaio 22 - Medição do desgaste - Sequencia de desbaste (1º 2º e 3º)

## TRATAMENTO 8



Figura 22 – Ensaio 5 - Medição do desgaste - Sequencia de desbaste (1º 2º e 3º)



Figura 23 – Ensaio 11 - Medição do desgaste - Sequencia de desbaste (1º 2º e 3º)



Figura 24 – Ensaio 20 - Medição do desgaste - Sequencia de desbaste (1º 2º e 3º)