

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

**INFLUÊNCIA DAS CONDIÇÕES DE CORTE DO  
FRESAMENTO DO AÇO BAIXA LIGA ABNT 4140 NOS  
SINAIS VIBRACIONAIS E DE EMISSÃO ACÚSTICA**

**Luís Henrique Andrade Maia**

**Belo Horizonte**  
**2009**

# **Livros Grátis**

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

**Luís Henrique Andrade Maia**

**INFLUÊNCIA DAS CONDIÇÕES DE CORTE DO  
FRESAMENTO DO AÇO BAIXA LIGA ABNT 4140 NOS  
SINAIS VIBRACIONAIS E DE EMISSÃO ACÚSTICA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica

**Orientador: Prof. Dr. Jánes Landre Júnior**

**Co-orientador: Prof. Dr. Wisley Falco Sales**

**Belo Horizonte  
2009**

FICHA CATALOGRÁFICA

Elaborada pela Biblioteca da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais

M217i Maia, Luís Henrique Andrade  
Influência das condições de corte do fresamento do aço baixa liga ABNT-4140 nos sinais vibracionais e de emissão acústica / Luís Henrique Andrade Maia. Belo Horizonte, 2009.  
198f. : il.

Orientador: Jánes Landre Júnior  
Dissertação (Mestrado) - Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

1. Usinagem. 2. Ferramentas para cortar metais. 3. Aspereza de superfície 4. Vibração. 5. Ultra-som. I Landre Júnior, Jánes. II Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. III.Título.

CDU: 621.7

**Luís Henrique Andrade Maia**

**INFLUÊNCIA DAS CONDIÇÕES DE CORTE DO FRESAMENTO DO AÇO BAIXA  
LIGA ABNT 4140 NOS SINAIS VIBRACIONAIS E DE EMISSÃO ACÚSTICA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica

---

**Jánes Landre Júnior (Orientador) – PUC Minas**

---

**Ernani Sales Palma – PUC Minas**

---

**Álison Rocha Machado – UFU**

**Belo Horizonte, 14 de abril de 2009.**

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por tudo, certamente sem Ele não teria chegado até aqui.

Agradeço aos meus pais, Orlando e Sônia, pelo amor, ensinamentos, princípios, confiança, carinho, preocupação, apoio irrestrito e acima de tudo, por fazer de meus sonhos os deles. À minha irmã e amiga Patrícia pela cumplicidade, força, amor, paciência, apoio, carinho, convívio e os conselhos. Aos meus familiares, principalmente à tia “Mãezé” pelo carinho e ensinamentos e as constantes preocupações comigo.

Ao amigo e orientador Prof. Dr. Jânes Landre Júnior pela valiosa orientação e conselhos ao longo do curso, a presteza, paciência, oportunidades e por aceitar a orientação com o estudo em andamento. Ao também amigo e co-orientador Prof. Dr. Wisley Falco Sales, pela confiança, pelo compromisso, pela presteza, pelas oportunidades, por despertar em mim a paixão pela pesquisa, pelos conselhos valiosíssimos e acima de tudo, pelo presente do tema proposto que me deixou sempre motivado e, claro, a grandiosa orientação mesmo distante.

Aos técnicos e amigos do laboratório de manufatura da PUC, Vinícius, Pedro, Leandro e principalmente ao Carlos pela presteza e paciência com os testes. À secretária e amiga do programa de pós-graduação, Valéria, pela preocupação, carinho, dedicação e conselhos perante os assuntos relacionados ao curso, à bolsa e, acima de tudo, momento de vida. Às também amigas Letícia e Leslie pelo ótimo convívio e pelo apoio relacionado ao curso. Às secretárias do IPUC, Cristina e Antonieta pelo carinho. E também à Lu e Ivani pelo carinho e convívio.

Ao Prof. Dr. Mário Fabiano Alves pela ajuda na eliminação de ruídos do sistema. Aos colegas e também amigos Athos Obvioslo e Paulo Martins pela ajuda na elaboração de resultados e nos testes realizados. Aos demais colegas pela convivência saudável e conselhos

durante esse período de vida. Ao Vítor pela elaboração do programa de aquisição. Ao Jomar pelo auxílio, convívio e conselhos no sistema de aquisição de dados.

A todos meus amigos pela força, por entenderem minhas ausências e pela perseverança em me tirarem de casa em certos momentos, principalmente ao Eduardo, Fábio, Heitor, Hudson e meu primo Rodrigo pelos momentos de lazer.

Ainda ao Eduardo, Hudson e demais moradores, por me abrigarem em seu apartamento enquanto reformava o meu.

E a todos os demais que de uma forma ou de outra contribuíram para a realização e conclusão dessa etapa da minha vida.

*“Nunca ande por caminhos já traçados, pois eles conduzem até onde outros já foram.”*  
**Alexander Graham Bell**

*“Comece por fazer o necessário, depois o que é possível e de repente estará a fazer o impossível.”*  
**São Francisco de Assis**

## RESUMO

A economia de mercado vigente, em que as empresas buscam o máximo rendimento por seus investimentos, tem um papel cada vez maior nas decisões por pesquisas na área de fabricação. Levando em conta este cenário, se propôs um estudo sobre monitoramento indireto do fresamento utilizando de sinais vibracionais e de emissão acústica para avaliar características de corte do aço baixa-liga ABNT 4140. Para tanto, fez-se a captação dos sinais vibracionais e de emissão acústica combinando as seguintes condições de corte: velocidade de corte ( $v_c$ ) de 50, 150 e 250 m/min; profundidade de corte ( $a_p$ ) de 0,25 e 1,25 mm e avanço por dente ( $f_z$ ) de 0,05 e 0,12 mm/rev, sentido de corte concordante e discordante, na condição a seco. Após a captura os sinais foram tratados e confrontados com o desgaste de flanco da ferramenta e rugosidade da peça usinada. Utilizou-se nestes testes uma fresa de 80 mm de diâmetro com seis insertos intercambiáveis. Os insertos utilizados para a realização dos experimentos foram de metal duro triplamente revestidos com TiCN,  $Al_2O_3$  e TiN. Com o objetivo de ajudar na discussão dos resultados, foi feita uma análise modal numérica do sistema envolvendo o mandril de fixação da ferramenta e a própria ferramenta e também da peça usando um software específico para isso. Ao final notou-se que os sinais vibracionais e de EA variam durante o corte, tendendo a crescer conforme o desgaste da ferramenta e aumento gradativo da rugosidade da peça, não sendo isso uma regra para todo o experimento.

*Palavras-chave: Emissão Acústica, Desgaste de Ferramenta, Vibrações Mecânicas, Fresamento, Aço ABNT 4140, Acabamento de superfície.*

## ABSTRACT

The market economy system where the companies look for the maximum productivity for its investments has a relevant function on the decision for the researches in manufacturing area. Take into account this scenario, it was proposed a study for indirect monitoring the milling process using signals of vibrations and acoustic emission for evaluating the cutting phenomena's of the ABNT 4140 steel. For this, make the acquisition of the signals of vibration and acoustic emission (AE) was performed in the following cutting conditions: cutting speed ( $v_c$ ) of 50, 150 e 250m/min, depth of cut ( $a_p$ ) of 0,25 and 1,25mm and feed per tooth ( $f_z$ ) of 0,05 and 0,12mm/rev, in up-milling and down-milling, in dry conditions. After the acquisitions, the signals were treated and confronted with the flank wear of the tool and workpiece roughness. Trials were performed with a milling tool of 80mm of diameter with six interchangeable inserts. They were of cemented carbide coated by TiCN, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. and TiN. To help the discussion of the results, a modal numerical analysis of the system, involving the tool-fixture, the tool-holder and also workpiece, using a specific software was carried out. At the end of the tests it was observed that the signals of vibrations and of AE change in the cut and this signals tend to increase with tool wear and workpiece surface roughness, but this is not a general rule throughout the experiment.

*Key-words: Acoustic Emission, Tool Wear, Mechanical Vibrations, Milling, ABNT 4140 steel, Surface Roughness.*

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIMBOLOS E SIGLAS

$\alpha$	Raízes da equação diferencial
$\varphi$	Ângulo de fase
$\zeta$	Razão de amortecimento
$\phi$	Ângulo de cisalhamento (°)
$\Delta T$	Constante de tempo
$A$	Número de aresta no corte
$a_e$	Penetração de trabalho (mm)
$a_p$	Profundidade de corte (mm)
$a_f$	Penetração de avanço (mm)
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AE	“Acoustic emission” (emissão acústica)
AISI	“American Iron and Steel Institute” (Instituto Americano de Ferro e Aço)
$Al_2O_3$	Óxido de alumínio (alumina)
APC	Aresta Postiça de Corte
$C$	Constante de amortecimento
CBN	Nitreto Cúbico de Boro
$c_c$	Coeficiente de amortecimento crítico
Cv	Cavalo vapor
CVD	“Chemical Vapor Deposition” (Deposição Química de Vapor)
$D$	Diâmetro
EA	Emissão acústica
$f_n$	Número de insertos em corte em 0,5 segundos

$F$	Força
$F$	Avanço por rotação (mm/rev)
$f_t$	Frequência de trabalho da fresa (Hz)
$f_z$	Avanço por dente (mm/rev)
FFT	“Fast Fourier Transform” (transformada rápida de Fourier)
$h_D$	Espessura de corte
HSS	“High Speed Steel” (Aço Rápido)
ISO	“International Organization of standardization” (Organização Internacional de Padronização)
$k$	Rigidez da mola
$K$	Kurtosis
KB	Largura da cratera
Kf	Distância frontal da cratera
Km	Distância do centro da cratera
Kt	Profundidade da cratera
$L$	Percurso de medição (mm)
$l_m$	Linha média
$m$	Massa
$M_2$	Momento de segunda ordem da distribuição
$M_3$	Momento de terceira ordem da distribuição
$M_4$	Momento de quarta ordem da distribuição
MOCVD	Metallo-organic vapor deposition (deposição metalorganica de vapor)
$n$	Rotação (rpm)
$N_T$	Número de insertos na fresa
NBR	Norma Brasileira

P	Classe de material de ferramenta
PCBN	Nitreto cúbico de Boro Policristalino
PVD	“Physical Vapor Deposition” (Deposição Física de Vapor)
$R_a$	Rugosidade média ( $\mu\text{m}$ )
$R_q$	Rugosidade média quadrática ( $\mu\text{m}$ )
$R_t$	Rugosidade total ( $\mu\text{m}$ )
$R^2$	Coefficiente de determinação da regressão
RAM	“Random Access Memory” (Memória de Acesso Aleatória)
rev	Revolução
RMS	“Root Mean Square” (raiz média quadrática)
RPM	Rotações por minuto
$SK$	Skewness
SAE	“Society of Automotive Engineering” (Sociedade de Engenharia Automotiva)
STFT	“Short-time Fourier Transform” (Transformada de Fourier em janelas)
$t$	Tempo
TiC	Carboneto de Titânio
TiN	Nitreto de Titânio
TiCN	Carbonitreto de Titânio
Threshold	Valor pré-determinado
$v_c$	Velocidade de corte (m/min)
$V(t)$	Função do sinal
$VB_B$	Desgaste de flanco
$VB_{B\text{max}}$	Desgaste de flanco máximo
$V_{\text{RMS}}$	Tensão RMS

$x$	Deslocamento
$x_0$	Deslocamento inicial
$\bar{X}$	Amplitude média
$x_i$	Amplitude
$\dot{x}_0$	Velocidade inicial
$x(t)$	Deslocamento em função do tempo
$\ddot{x}$	Aceleração
$y(x)$	Altura medida (mm)
WC	Carboneto de Tungstênio

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>15</b>
1.1 JUSTIFICATIVAS.....	17
1.2 OBJETIVOS .....	18
1.2.1 Geral.....	18
1.1.1 Específicos.....	18
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>20</b>
2.1 FRESAMENTO.....	20
2.1.1 Métodos de Fresamento .....	22
2.1.1.1 <i>Fresamento Tangencial</i> .....	23
2.1.1.2 <i>Fresamento Frontal</i> .....	23
2.1.1.3 <i>Fresamento Discordante</i> .....	24
2.1.1.4 <i>Fresamento Concordante</i> .....	25
2.3 MATERIAIS DE FERRAMENTAS DE CORTE.....	26
2.4 REVESTIMENTO DE FERRAMENTAS DE METAL DURO .....	29
2.4.1 Nitreto de Titânio (TiN) .....	30
2.4.2 Carboneto de Titânio (TiC).....	31
2.4.3 Carbonitreto de Titânio (TiCN).....	31
2.4.4 Óxido de Alumínio (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ).....	31
2.5 DESGASTE DE FERRAMENTA .....	32
2.5.1 Tipos de Desgaste.....	32
2.5.2 Evolução do Desgaste de Ferramenta .....	35
2.5.3 Mecanismos de Desgaste de Ferramenta.....	37
2.6 FENÔMENOS DE CORTE NA USINAGEM.....	38
2.6.1 Aresta Postiça de Corte (APC) .....	38
2.7 AÇOS UTILIZADOS NA FABRICAÇÃO DE COMPONENTES USINADOS.....	39
2.7.1 Aços-Carbono.....	39
2.7.1.1 <i>Aços-Liga</i> .....	40
2.7.1.1.1 <i>Aço-Liga 4140</i> .....	41
2.8 QUALIDADE SUPERFICIAL EM PEÇAS USINADAS .....	42
2.8.1 Textura Superficial .....	42
2.8.2 Medição da Textura Superficial.....	43
2.8.3 Integridade Superficial da Peça.....	44
2.9 EMISSÃO ACÚSTICA .....	45
2.10 VIBRAÇÕES .....	55
2.10.1 Vibrações Livres.....	57
2.10.2 Vibrações Forçadas .....	61
2.10.3 Trepidação .....	63
<b>3 METODOLOGIA</b> .....	<b>66</b>
3.1 MAQUINA-FERRAMENTA E PARAMETROS DE CORTE UTILIZADOS.....	67
3.2 FERRAMENTA E INSERTOS .....	68
3.3 CORPOS DE PROVA .....	69
3.4 EQUIPAMENTOS DE MONITORAÇÃO .....	70
3.5 MEDIÇÃO DE RUGOSIDADE E DESGASTE DE FLANCO .....	73
3.6 SIMULAÇÃO NUMÉRICA COMPUTACIONAL.....	74

<b>3.7 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS .....</b>	<b>74</b>
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>76</b>
<b>4.1 MODELAGEM NUMÉRICA DO CONJUNTO MANDRIL-FRESA E DA PEÇA ..</b>	<b>76</b>
<b>4.2 AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO NÚMERO DE INSERTOS DA FERRAMENTA DE CORTE NOS SINAIS .....</b>	<b>82</b>
<b>4.2.1 Sinais de Emissão Acústica .....</b>	<b>82</b>
<b>4.2.2 Sinais de Vibrações .....</b>	<b>92</b>
<b>4.3 AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE CORTE NOS SINAIS .....</b>	<b>106</b>
<b>4.3.1 Sinais de Emissão Acústica .....</b>	<b>106</b>
<b>4.3.2 Sinais de Vibrações .....</b>	<b>109</b>
<b>4.3.2.1 Sinais do eixo-árvore (coordenada y) .....</b>	<b>109</b>
<b>4.3.2.3 Sinais do corpo de prova (coordenada y) .....</b>	<b>111</b>
<b>4.4 AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA VIDA DE FERRAMENTA NOS SINAIS E NA RUGOSIDADE DA PEÇA .....</b>	<b>113</b>
<b>4.4.1 Sinais de Emissão Acústica .....</b>	<b>113</b>
<b>4.4.2 Sinais de Vibrações .....</b>	<b>128</b>
<b>4.4.2.1 Sinais do eixo-árvore (coordenada y) .....</b>	<b>128</b>
<b>4.4.2.2 Sinais do corpo de prova (coordenada x, y e z) .....</b>	<b>140</b>
<b>4.4.3 Rugosidade da Peça .....</b>	<b>159</b>
<b>5 CONCLUSÕES .....</b>	<b>172</b>
<b>6 PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>174</b>
<b>7 BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>175</b>
<b>ANEXO 1.....</b>	<b>182</b>
<b>APÊNDICE A .....</b>	<b>183</b>

# 1 INTRODUÇÃO

A usinagem é um processo de fabricação que tem por objetivo conferir forma, dimensões e acabamento em um material bruto por meio da ação de uma ferramenta pela remoção controlada do cavaco (FERRARESI, 1977; KÖENIG, 1981).

Utilizando destes conceitos, o homem, desde a época da pedra lascada, vem a desenvolver a usinagem, sem que tivesse noção disso. Naquela época, o enfoque era a peça e não o processo de fabricação em si.

Com a evolução dos processos produtivos e, claro, com inserção crescente da filosofia do capitalismo e da revolução industrial, a visão passou a focar também o processo de fabricação.

A usinagem é a responsável pela fabricação de grande parte dos utensílios, equipamentos e bens que são utilizados hoje em dia. Com os avanços tecnológicos advindos de materiais de ferramenta, equipamentos e técnicas de usinagem, atualmente pode-se usar uma vasta gama de materiais cada vez mais rápido e com um mínimo de capital envolvido.

Atualmente para que um produto seja competitivo no mercado, ele tem que ser o melhor produto com o menor investimento. Baseadas nisto, cada vez mais as indústrias investem grandes capitais em avanços tecnológicos para que se tornem cada vez mais competitivas. As pesquisas em novos materiais e revestimentos têm proporcionado a utilização de ferramentas de corte cada vez mais eficientes, com possibilidade de grandes remoções de material, em altíssimas velocidades. Também vale destacar que máquinas têm ganhado inúmeras modificações tecnológicas, como o uso do comando numérico computadorizado, motores de alta velocidade e baixo consumo de energia e aumento de

rigidez estrutural. Acabamentos superficiais com rugosidades cada vez menores e integridades superficiais favoráveis ao processo/peça são conseguidos com a combinação de parâmetros de corte como velocidade de corte, avanços e profundidades e também a utilização de vários processos de fabricação.

Mas com os avanços tecnológicos veio também a preocupação ambiental, que cresceu quase que na mesma proporção. O destino dos rejeitos de fabricação e também a quantidade de energia gasta pelos processos são cada dia mais evidenciados.

Em uma época de periódica escassez de energia e a preocupação atual sobre a degradação do meio ambiente, o conhecimento do processo que se utiliza se torna cada vez mais importante. Com ele se pode prever custos, tentar diminuir gastos e propor melhorias no processo.

O processo de fresamento é hoje um dos processos mais utilizados na usinagem de aços. Indústrias de diferentes ramos empregam esta técnica para fazer diferentes peças.

O enfoque deste trabalho é o monitoramento do processo de fresamento por meio dos sinais vibracionais e de emissão acústica. Avaliar características provenientes deste processo sobre diversas condições de corte e também a relação entre estas características e a vida da ferramenta.

## 1.1 JUSTIFICATIVAS

O processo de fresamento é um dos mais complexos sobre o ponto de vista de aspectos de corte, além de ser um dos processos mais usados por indústrias. Por isso, entender estes aspectos é de grande importância no âmbito fabril atual. O entendimento visa a fazer uma seleção econômica tanto de material quanto de processo, o que leva à diminuição de custos tanto no processo em si quanto em rejeitos.

Aliado a isto, há no mercado uma grande demanda por estudos e monitoramento não destrutivos em peças e ferramentas, para que se possa fazer testes no ambiente fabril sem prejudicar a linha de fabricação. Os métodos mais comuns de monitoração não destrutiva de ferramenta são a análise de sinais vibracionais e de emissão acústica e o conhecimento dessas técnicas é de aplicação imediata no processo de manufatura mundial, já que uma grande parte dos custos associados à manufatura está ligada ao ferramental.

Hoje, a associação tanto da emissão acústica como de vibrações e ambas com o processo de fabricação está “engatinhando”. Muito se tem estudado sobre eles, mas a aplicação efetiva é mínima. Primeiro porque o ambiente fabril não é um laboratório, onde existem poucos equipamentos dedicados e, segundo, porque nesses dois métodos muitos parâmetros estão envolvidos na qualidade do monitoramento.

Por último, o uso do aço ABNT 4140 por vários segmentos da indústria encoraja estudos tribológicos para entender a relação entre parâmetros de corte, estado da ferramenta e condições de corte na qualidade da superfície da peça.

## 1.2 OBJETIVOS

Os objetivos foram divididos em geral e específicos como se segue.

### 1.2.1 Geral

Avaliar através dos sinais de emissão acústica e de vibrações mecânicas no corte concordante e discordante do fresamento do aço baixa liga ABNT 4140, a qualidade da superfície usinada, o desgaste de ferramenta e relacioná-los com os parâmetros de corte.

### 1.1.1 Específicos

- Determinação da adequação dos sistemas de monitoração ao processo proposto;
- Avaliar a influência do número de arestas de corte nos sinais;
- Analisar a influência dos parâmetros de corte (velocidade  $v_c$ , profundidade  $a_p$ , e avanço por dente  $f_z$ ) nos sinais monitorados;
- Verificar a qualidade da superfície em testes de vida de ferramenta nos diversos parâmetros de corte analisados;

O presente trabalho está estruturado da seguinte forma: no Capítulo 2, uma breve descrição sobre a revisão bibliográfica dos temas pertinentes ao trabalho; no Capítulo 3 a metodologia aplicada; no Capítulo 4 os resultados e discutidos de acordo com a metodologia

usada; no Capítulo 5 as conclusões e discussões; no Capítulo 6 as propostas para trabalhos futuros e no Capítulo 7 a bibliografia consultada.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Neste capítulo se faz um breve estudo sobre os assuntos mais relevantes de modo a dar um pequeno conhecimento sobre as áreas abordadas no trabalho. Dessa maneira começa-se por um estudo sobre aspectos relacionados à usinagem, como o processo de fresamento, materiais de ferramenta, materiais usinados, passando pelo desgaste de ferramenta, qualidade superficial. Em seguida descreve-se a teoria dinâmica e de emissão acústica e termina com suas aplicabilidades na usinagem.

### **2.1 FRESAMENTO**

Entende-se por fresamento, o processo de usinagem na qual o material é removido por meio do movimento de múltiplas arestas de corte disposta simetricamente em torno de um eixo, sendo que cada aresta remove uma pequena parcela de material da peça por meio da rotação da fresa em torno do eixo e por meio do movimento de avanço, geralmente imposto pela peça. Segundo a NBR-6175 (1971), fresamento é um processo destinado à obtenção de uma superfície qualquer com o auxílio de ferramenta, geralmente multicortante. Para tanto, a ferramenta gira e a peça ou a ferramenta se deslocam em uma trajetória qualquer.

Este processo de usinagem apresenta uma alta versatilidade, já que tanto a ferramenta de corte quanto a peça podem ter movimentos, obtendo assim corte em todas as direções.

O fresamento também é o responsável pela obtenção de superfícies planas e de não revolução.

Segundo Souza Júnior (2001), as principais diferenças entre o fresamento e outros processos de usinagem são:

- Corte alternado do dente de corte da fresa, entrando e saindo da peça, ou seja, durante um giro ela apresenta um ciclo ativo (efetivamente em corte) e outro inativo (movimento sem corte).
- Por apresentar este ciclo, o tamanho de seus cavacos é curto, pois cada inserto da ferramenta mantém um contato curto com a peça.
- A variação da espessura do cavaco, para cada inserto da ferramenta, uma vez que o avanço se dá pela peça o que faz com que a massa de entrada de corte da ferramenta seja diferente da massa de saída.

Por ser um corte interrompido no qual pode-se dispor de diversas ferramentas para se fazer a operação, o fresamento apresenta um grau de complexidade muito maior em relação ao torneamento, apresentando deste modo mais fatores que influenciam no corte que esse último.

As condições de corte que se utiliza no fresamento são os principais responsáveis por se obter um bom acabamento superficial, aumentar a vida da ferramenta, assim como evitar erros de forma e preservar a máquina.

Segundo Souza Júnior (2001), as condições de corte que influenciarão diretamente a qualidade da peça são:

- Velocidade de corte ( $v_c$  em m/min): é a velocidade tangencial com que o diâmetro externo da fresa percorre a peça de trabalho, sendo que este diâmetro é a medida entre as arestas de cortes opostas linearmente.
- Velocidade de avanço da mesa ( $s'$  em mm/min): é a relação entre a distância percorrida a cada minuto de peça em relação à ferramenta.

- Avanço por rotação ( $f$  em mm/rev\* $z$ ): é a distância percorrida pela peça (mesa de trabalho) para cada rotação da fresa.
- Avanço por dente ( $f_z$  em mm/rev): é a distância percorrida pela mesa de trabalho para cada rotação da mesa dividido pelo número de dentes da fresa.
- Profundidade de corte ( $a_p$  em mm): é a largura de penetração da ferramenta da peça, medido numa direção perpendicular ao plano de trabalho, ou seja, é a profundidade com que a ferramenta de corte cortará a peça.
- Penetração de trabalho ( $a_e$  em mm): é a penetração da ferramenta em relação à peça, medido no plano de trabalho e numa direção perpendicular à direção de avanço.
- Penetração de avanço ( $a_f$  em mm): é a penetração da ferramenta medida no plano de trabalho e na direção de avanço

Além desses parâmetros existe ainda a altura do corpo de prova e sua devida fixação na mesa.

### **2.1.1 Métodos de Fresamento**

O fresamento pode ser classificado segundo os seguintes critérios (Tabela 1 - DINIZ et al., 2001; KÖENIG, 1981; STEMMER, 1992):

**Tabela 1: Critérios de classificação do fresamento. (HIOKI, 2006 – Adaptado).**

Forma da ferramenta e cinemática	Plano
	Circular
	Geração
	Forma perfil
Sentido de rotação e avanço da peça	Concordante
	Discordante
Disposição da aresta ativa	Tangencial
	Frontal (arestas secundárias)

#### ***2.1.1.1 Fresamento Tangencial***

O fresamento tangencial se caracteriza por uma operação na qual os dentes ativos se encontram localizados na superfície cilíndrica da ferramenta. A superfície funcional de engenharia gerada por este tipo de fresamento se encontra paralela ao eixo da ferramenta. As fresas que fazem este tipo de corte são chamadas de fresas cilíndricas ou tangenciais (Fig. 1).

#### ***2.1.1.2 Fresamento Frontal***

O fresamento frontal é caracterizado como sendo aquele no qual os dentes ativos da fresa estão na superfície frontal da ferramenta. A superfície gerada por este tipo de fresamento se encontra perpendicular ao eixo da ferramenta. Fresas que fazem este tipo de corte são conhecidas como fresa de topo ou frontais (Fig. 1).

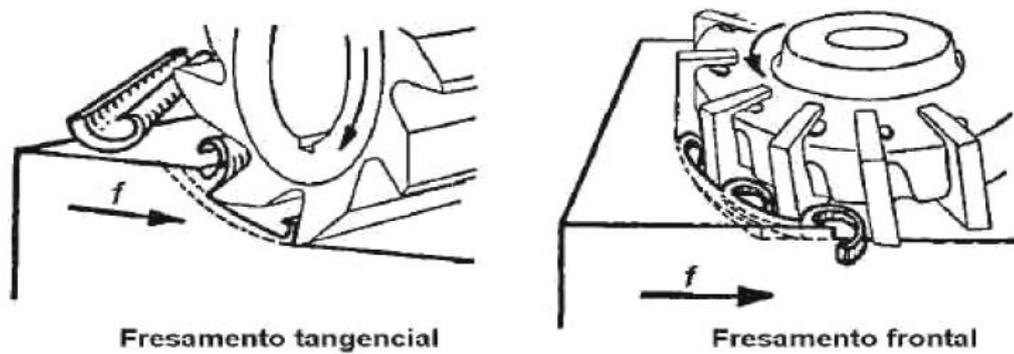


Figura 1: O fresamento tangencial e o fresamento frontal.

### 2.1.1.3 Fresamento Discordante

Tanto o fresamento tangencial quanto o fresamento frontal pode ser concordante ou discordante. O corte discordante se caracteriza pelo fato de que o ângulo de direção de avanço ( $\varphi$ ) inicia-se com o valor zero e chega ao valor máximo no fim do passe da aresta de corte. No corte discordante, o sentido do movimento de avanço é contrário ao sentido do movimento rotatório da fresa.

No fresamento discordante (Fig. 2) a espessura de corte  $h_D$  aumenta progressivamente de zero até um valor máximo (DINIZ et al., 2001). No início do corte, momento em que ferramenta toca a peça, essa é forçada para dentro da peça, originando um excessivo atrito, o que faz com que haja deformação plástica neste local ao invés da formação de cavaco propriamente dita, e altas temperaturas. Por ser um corte intermitente, a aresta de corte pode encontrar nessa região uma superfície encruada pelo passe da aresta anterior, o que favorece bastante o aumento do desgaste da ferramenta. Vencidos estes impasses, o corte começa a retirar material da peça e, no começo desta operação, a componente vertical da força de usinagem tende a afastar a ferramenta da peça e empurra a peça contra a mesa da máquina,

enquanto que no final da operação de um dente, a aresta tende a retirar a peça da mesa (DINIZ et al., 2001). Esse fenômeno associado com o avanço por dente faz com que gerem vibrações.

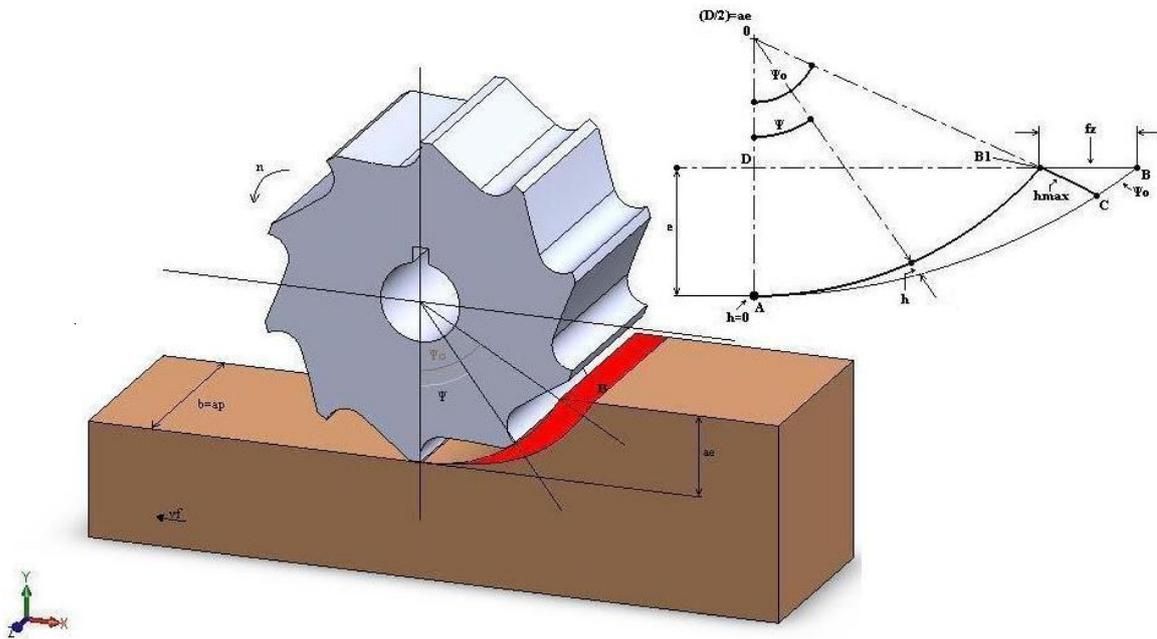


Figura 2: O fresamento discordante.

#### 2.1.1.4 Fresamento Concordante

O corte concordante se caracteriza pelo ângulo ( $\phi$ ) se iniciar com um valor máximo e decrescer até zero no fim do corte de uma aresta (Fig. 3). No corte concordante o movimento de avanço da mesa apresenta o mesmo sentido que o movimento rotatório da ferramenta.

Neste tipo de fresamento, a componente vertical de usinagem apresenta a mesma direção em todo o corte, ou seja, empurrando a peça em direção à mesa. Isto diminui vários inconvenientes em relação ao corte discordante.

Existem ainda alguns inconvenientes neste tipo de usinagem. Como o início do corte se dá arrancando a máxima seção transversal de corte, muita força é dispensada no início do corte, fato que é altamente ampliado em usinagem de materiais duros, o que pode favorecer

quebras e diminuição da vida da ferramenta. Outro problema advém do fato de que a força de avanço ocorre sempre no mesmo sentido do deslocamento. Como a força resultante sobre a fresa varia em módulo, a força resultante sobre o fuso variará em módulo e direção fazendo com que ocorram vibrações.

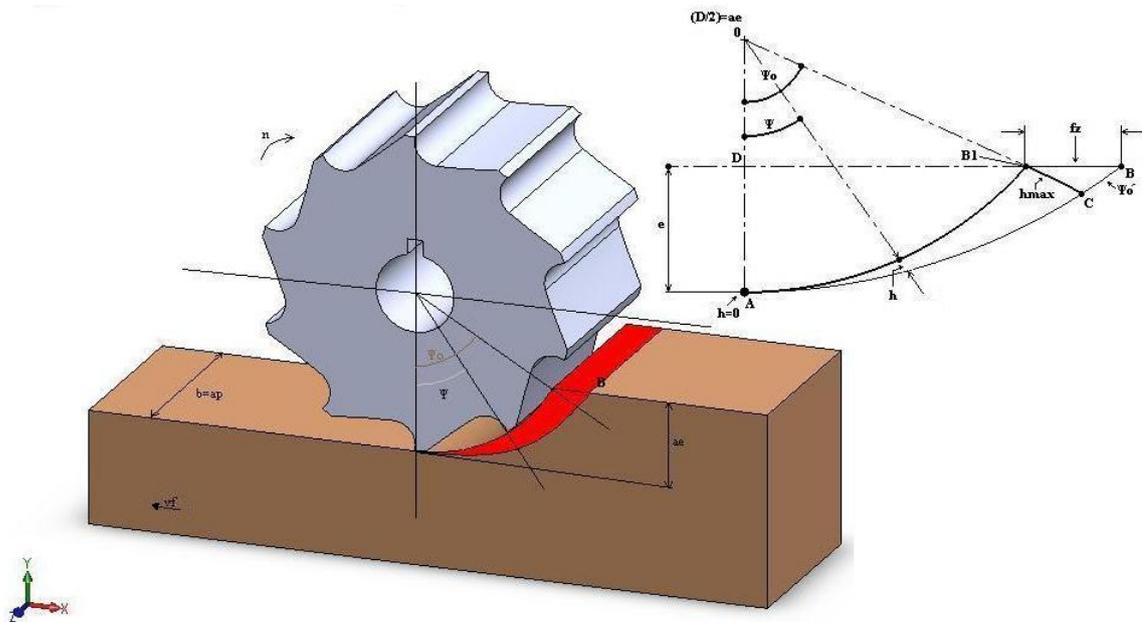


Figura 3: O fresamento concordante.

### 2.3 MATERIAIS DE FERRAMENTAS DE CORTE

Os materiais de ferramentas foram os principais precursores para que houvesse a explosão industrial dos tempos de hoje.

Na usinagem, os materiais de ferramentas mais usados são o aço rápido e o metal duro.

O aço rápido é na verdade, ligas Fe-C com elementos ligantes para adicionar certas características a ele, como dureza a alta temperatura, maior tenacidade e maior resistência ao desgaste. São aços que tem entre 0,6 e 1,3% de C e elevado teor de elementos formadores de

carbonetos como W, Mo, V, Cr, entre outros. Também conhecido como HSS (*High Speed Steel*), o aço rápido ganhou este nome pelo fato de na época de sua invenção ele tornar possível usinar a velocidades relativamente altas para a época.

O uso generalizado deste material para ferramenta advém do fato de apresentar um custo relativamente baixo e apresentar uma boa tenacidade. Aliando estas características com um revestimento, faz com este material tenha uma grande aplicabilidade nas indústrias nos dias de hoje.

Outro material muito importante é o metal duro. É constituído por meio da metalurgia do pó e alia propriedades importantes a ferramenta. Também conhecido como carboneto de tungstênio sinterizado, seus constituintes são intimamente misturados na forma de pós e submetidos a um processamento que compreende prensagem, sinterização, retificação, etc., resultando em um produto completamente consolidado, com resistência mecânica, dureza e tenacidade adequada ao emprego em ferramentas de corte (FERRARESI, 1977).

O grande sucesso do metal duro é o fato dele possuir a combinação de resistência ao desgaste, resistência mecânica e tenacidade em altos níveis além de custos relativamente baixos (Santos e Sales, 2007).

Este material foi inventado pelos alemães na década de 1920, onde se conseguiu produzir carboneto de tungstênio (WC) pela primeira vez.

Segundo Ferraresi (1977), o metal duro é formado basicamente por dois constituintes: Um carboneto extremamente duro e de alta resistência ao desgaste, geralmente o carboneto de tungstênio sozinho ou acompanhado de outros carbonetos, como o de titânio, o de tântalo ou o de nióbio. Esses constituintes são os responsáveis por conferirem ao produto final alta dureza tanto à temperatura ambiente quanto a altas temperaturas e também resistência ao desgaste. Também usa-se um elemento aglomerante ou ligador que dá liga às partículas duras dos

carbonetos, sendo ela a responsável pela tenacidade da ferramenta. Usa-se geralmente o cobalto para esta função.

Segundo Yan et al. (2009), o metal duro é uma liga complexa obtida pela sinterização de partículas de carbonetos dos grupos de metais IV, V ou VI (Ti, Zr, Hf, V, Nb, Ta, Cr, Mo, W) usando como aglomerante o grupo de metais VIII (Fe, Co, Ni). Esses carbonetos têm uma alta resistência a oxidação, alto ponto de fusão e alta dureza. Atualmente existe a possibilidade de obter diversos tipos de metais duro combinando nove tipos de carbonetos e três metais aglomerantes. Esses tipos de metais duros são separados por classes que os separam por propriedades adquiridas por essas combinações.

Além desses dois materiais que são os mais utilizados hoje em dia na usinagem existem ainda os cermets que ainda é um metal duro, mas geralmente são classificados separados. Geralmente usam o TiN, TiC e Ni como aglomerante. Esse nome se deu ao fato de terem duas fases, uma metálica e outra cerâmica. Da união das palavras cerâmica e metal surgiu cermet. São indicadas a usinagem só de metais ferrosos devido à grande presença de Ti que tem grande afinidade com os metais não-ferrosos. Por seu baixo coeficiente de choque térmico tem uma aplicação limitada no torneamento de acabamento para materiais ferrosos.

Existem ainda as cerâmicas que são feitas por meio da metalurgia do pó. Geralmente seus principais constituintes são óxidos e essas ferramentas tem uma grande dureza a altas temperaturas. Suportam altas velocidades de corte e não conduzem muito calor.

Além desses ainda existe o diamante que é o material mais duro que se tem conhecimento na natureza. Seu uso se dá em metais não-ferrosos principalmente em ligas de alumínio e alumínio-silício, cobre e suas ligas, carbetos de tungstênio e sinterizados, além de cerâmicos concretos e plásticos reforçados com fibras.

Por último ainda existem o CBN que é o nitreto cúbico de boro. O CBN é o material mais duro depois do diamante. O CBN é o monocrystal enquanto que o PCBN é o policristal.

Tem como características, elevada dureza e uma tenacidade semelhante às cerâmicas. Seu uso está relacionado à usinagem de aços temperados, ferro fundido cinzento, ferro fundido branco, sinterizados, ligas para revestimento de alta resistência e superligas como as de titânio e níquel.

Mais detalhes sobre estes materiais podem ser encontrados em Ferraresi (1977), Santos e Sales (2007) e Cheng (2009).

## 2.4 REVESTIMENTO DE FERRAMENTAS DE METAL DURO

O uso do revestimento é dado quando se quer aliar características múltiplas às ferramentas de corte, como tenacidade no núcleo e boa resistência ao desgaste na superfície. O principal motivo para se revestir uma ferramenta de corte é aumentar a sua vida. A maioria das ferramentas de corte revestidas que tem por sua base o metal duro e é constituída de camadas que lhe conferem propriedades adicionais. Os principais materiais de revestimento estão expostos na Fig. 4.

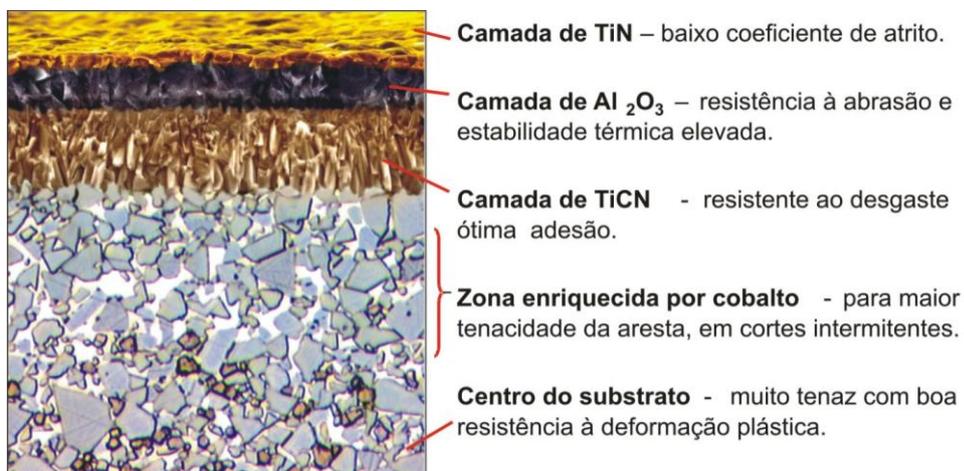


Figura 4: Composição de uma ferramenta de metal duro com múltiplos revestimentos (HIOKI, 2006; SANDVIK, 2004).

### 2.4.1 Nitreto de Titânio (TiN)

Um dos revestimentos mais usados hoje é o nitreto de titânio (TiN), por sua efetividade e baixo custo relativo. Segundo Zhang e Zhu (1993), estudos demonstram que a vida de ferramenta com o revestimento de TiN aumenta em mais de 1000% em alguns casos, enquanto que os custos de revestimento é algo geralmente em torno de 20 a 30% do preço da ferramenta base (ZHANG e ZHU. 1993).

O composto TiN apresenta-se um dourado fosco, sendo ele refratário, com baixa densidade e alto ponto de fusão.

As principais vantagens do revestimento com TiN são a de uma excelente adesão ao substrato, alta inércia química para com os materiais ferrosos, a maior entre os revestimentos de metal duro, resistência a altas temperaturas, alta dureza (aproximadamente 2400 HV) o que reduz o desgaste abrasivo, um baixo coeficiente de atrito com muitos materiais de peças o que aumenta a lubricidade e a qualidade do acabamento da superfície usinada, além de reduzir a potência necessária (ZHANG e ZHU, 1993).

Existem vários modos de se fazer o revestimento de ferramentas, entre eles o processo chamado CVD (chemical vapor deposition), o PVD (physical vapor deposition) e o MOCVD (metal-organic vapor deposition). O processo CVD apesar de ser mais barato que os outros dois, há o inconveniente da temperatura em que se precisa atingir para haver a deposição do TiN no substrato, algo em torno de 850°C a 1100°C, sendo que no MOCVD esta temperatura gira em torno de 500°C e no PVD entre 400°C e 600°C.

### **2.4.2 Carboneto de Titânio (TiC)**

O carboneto de titânio possui a propriedade de alta resistência ao desgaste por abrasão. Possui uma afinidade química com o metal duro muito grande, por este motivo, geralmente ele é a camada mais próxima ao substrato ou em certos casos é o único revestimento da ferramenta.

Sua dureza é de 3000 HV, um das maiores entre os materiais de revestimentos do metal duro. Apresenta baixa afinidade química entre ele e a peça, dificultando o desgaste por adesão e a formação de aresta postiça de corte (APC). Apresenta também baixo coeficiente de dilatação térmica.

### **2.4.3 Carbonitreto de Titânio (TiCN)**

O carbonitreto de titânio tem propriedades similares ao TiC, mas com um coeficiente de atrito menor.

### **2.4.4 Óxido de Alumínio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)**

O óxido de alumínio é utilizado como uma das camadas mais externas do revestimento “sanduíche” do metal duro. Possui alta afinidade físico-química com o mesmo. Para aumentar

sua adesão geralmente a aplicam por cima do TiC. É um excelente isolante térmico, possui alta resistência ao desgaste por abrasão, além de alta resistência a ataques químicos e à oxidação. Tem uma boa inércia química com os aços em geral. É a principal responsável pela baixa tendência de formação do desgaste de cratera das ferramentas de metal duro revestidas. Por outro lado, apresenta pequena resistência a choques térmicos e mecânicos.

## **2.5 DESGASTE DE FERRAMENTA**

Desgaste e falha da ferramenta são problemas críticos na usinagem, que não somente prejudica a produção, mas também diminui a qualidade final do produto. A falha da ferramenta interrompe o processo de usinagem e aumenta o tempo de preparação do processo (*setup*). O desgaste e a falha da ferramenta têm influência na qualidade da superfície e nas dimensões da peça.

### **2.5.1 Tipos de Desgaste**

O desgaste/falha da ferramenta pode ser agrupado em duas categorias: falha prematura da ferramenta e desgaste progressivo da ferramenta. A Fig. 5 mostra alguns tipos de falhas e desgastes que usualmente ocorrem na ferramenta de corte.

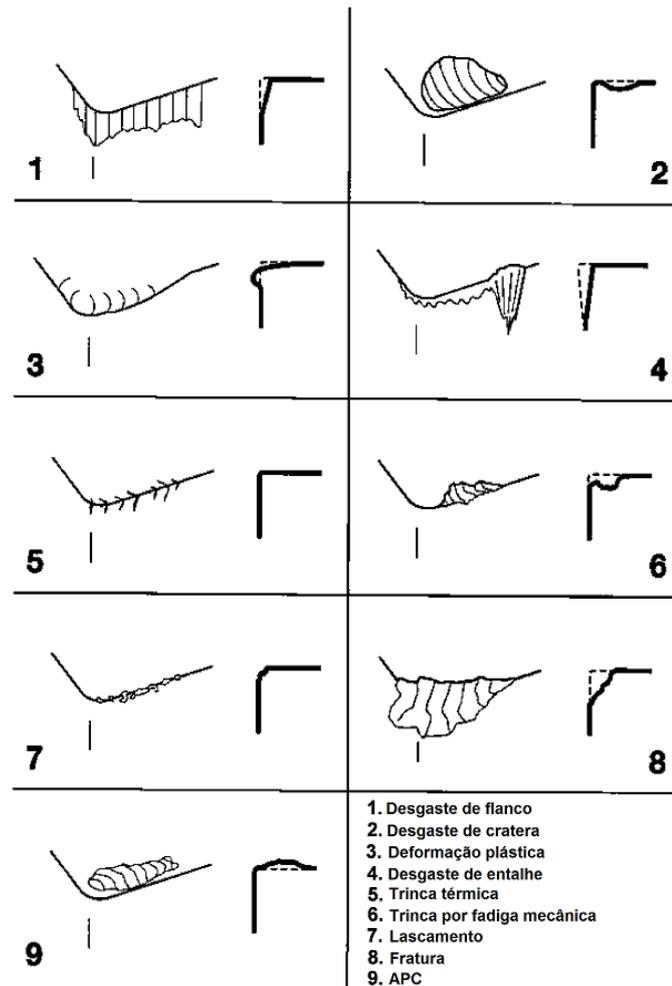


Figura 5: Tipos de desgaste em ferramentas de corte (DAVIM, 2008 – adaptado).

Normalmente o desgaste da ferramenta é um processo contínuo e gradual. As principais zonas de desgaste são a de cratera e a de flanco. A de cratera corresponde à saída de cavaco da ferramenta e a de flanco corresponde à zona de contato entre a ferramenta e a peça. Como a zona do desgaste de flanco é uma região de constante contato com a peça e que com o aumento dela também se aumenta a região de corte da ferramenta piorando seu corte, ela é a mais utilizada para se avaliar vida de ferramenta.

O desgaste de flanco e de cratera são, segundo Davim (2008), as mais importantes formas de desgaste de ferramenta. De acordo com a norma ISO 3685: 1993, para medição do desgaste, a aresta de corte é dividida em quatro regiões, como mostra a Fig. 6:

A região C é a parte curva da aresta de corte da extremidade da ferramenta;

A região B é a parte seguinte da aresta de corte após a região C;

A região A é a parte mais distante do desgaste da aresta de corte com um comprimento ou largura  $b$ ;

A região N é a maior área de contato intrínseco entre a ferramenta e a peça e vai além da aresta de corte por aproximadamente 1-2 mm. O desgaste presente nesta zona é do tipo de entalhe.

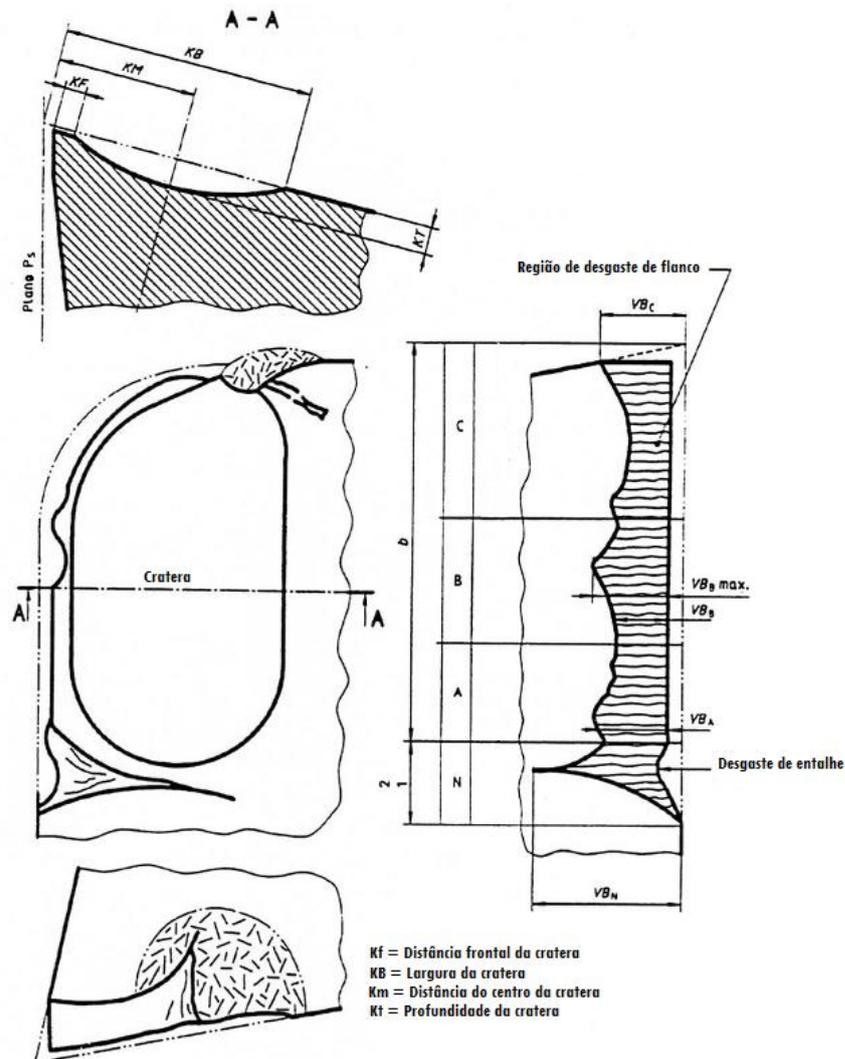


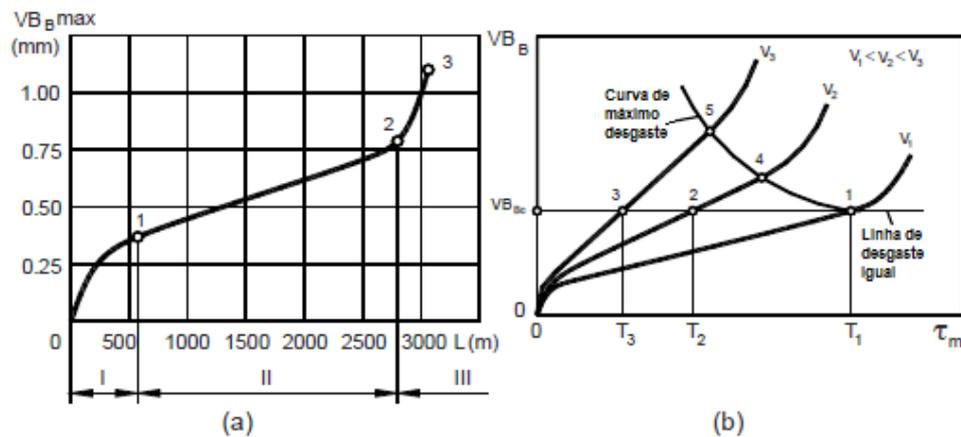
Figura 6: Geometria do desgaste de ferramenta progressivo (ISO 3685, 1993).

A largura do desgaste de flanco  $VB_B$  pode ser medida na região B no plano da aresta de corte passando uma perpendicular ao maior desgaste de corte. A profundidade da cratera ( $KT$ ) pode ser medida como a máxima distância entre o inferior da cratera e a superfície original na

região B. Esses desgastes geralmente são medidos por microscópio com resolução menor que 0,01mm.

### **2.5.2 Evolução do Desgaste de Ferramenta**

A evolução do desgaste de ferramenta é mostrada em forma de gráfico e caracteriza-se pela relação entre o desgaste de flanco da ferramenta em detrimento do tempo (Fig. 7). Segundo Davim (2008), a curva de desgaste de ferramenta normalmente apresenta três regiões distintas. A primeira região (região I na Fig. 7(a)) é a região de desgaste primário ou inicial, isso se deve ao elevado desgaste de camadas da ferramenta devido a um período de adaptação em que ela passa. Essa região apresenta a característica de apresentar uma elevada taxa de desgaste, ou seja, grande aumento do desgaste de flanco em um curto espaço de tempo. A segunda região (região II na Fig. 7(a)) é a região de acomodação da ferramenta. Essa é a região propriamente dita de operação da ferramenta. A terceira região (região III na Fig. 7(a)) é conhecida como região de desgaste acentuado ou terciária. Acelerado desgaste de ferramenta nessa região geralmente vem acompanhado de altas forças de corte, severas vibrações da ferramenta e altas temperaturas. Essa é uma região em que se deve evitar trabalhar.



**Figura 7: Curvas de desgaste: (a) Curva de desgaste normal, (b) evolução da região do desgaste de flanco  $VB_B$  como uma função do tempo de corte para diferentes velocidades de corte (DAVIM, 2008 – adaptado).**

Segundo Davim (2008), o primeiro parâmetro que é levado em consideração no desgaste da ferramenta é a velocidade de corte. Portanto ele demonstra a evolução do desgaste em diferentes velocidades de corte mantendo os outros parâmetros constantes (Fig. 7(b)). Tomando como base a reta  $VB_{BC}$  que representa o ponto em que as ferramentas apresentam o mesmo desgaste, nota-se que a ferramenta com velocidade de corte  $v_1$  precisa de mais tempo para apresentar o mesmo desgaste de  $v_2$  e  $v_3$ . Mas, vale ressaltar que esse tempo avaliado por ele não é um parâmetro apropriado para um ambiente fabril, uma vez que com o aumento da velocidade de corte diminui-se o tempo de trabalho e isso é o que realmente interessa à indústria.

O critério recomendado pela ISO 3685: 1993 define que o efetivo fim de vida da ferramenta para o metal duro, aço rápido e cerâmica são:

*Metal duro:*

- $VB_B = 0,3\text{mm}$  ou;
- $VB_{B \text{ MAX}} = 0,6\text{mm}$  se o flanco apresenta desgaste irregular ou;
- $KT = 0,6 + 0,3f$ , onde  $f$  é o avanço.

*Aço rápido e cerâmica:*

- Falha catastrófica;
- $VB_B = 0,3\text{mm}$  se o flanco é regular na região B ou;
- $VB_{B_{MAX}} = 0,6\text{mm}$  se o flanco apresenta desgaste irregular.

### 2.5.3 Mecanismos de Desgaste de Ferramenta

De uma forma geral os mecanismos que causam desgaste de ferramenta são resumidos na Fig. 8, como: (1) abrasão, (2) difusão, (3) oxidação, (4) fadiga e (5) adesão (DAVIM, 2008). Hutchings (1992) conceitua e explica os fundamentos de desgaste e atrito e Santos e Sales (2007) explicam muito bem os fundamentos e as ocorrências destes mecanismos de desgaste na usinagem.

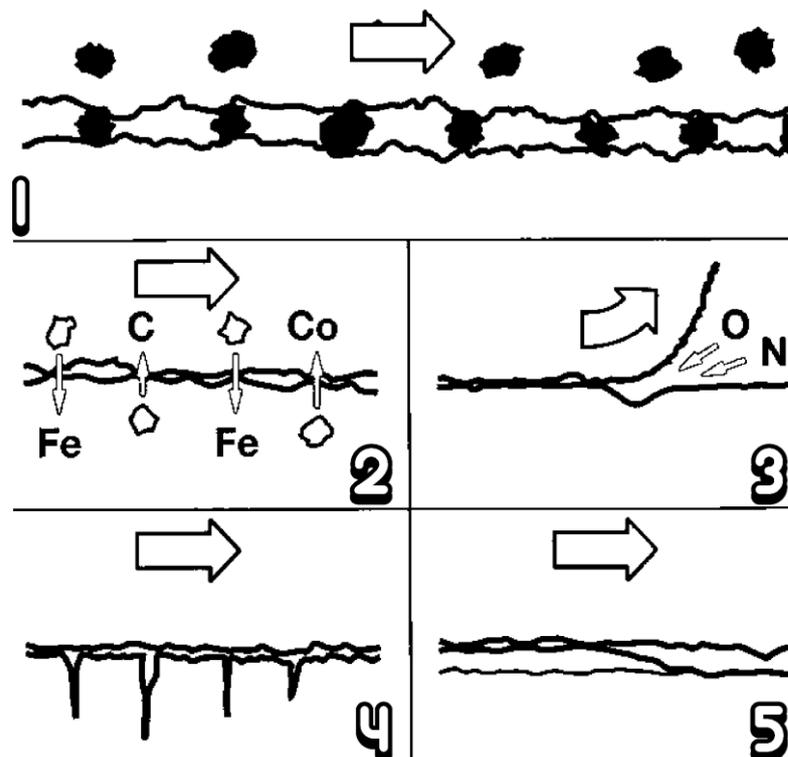


Figura 8: Principais mecanismos de desgaste (DAVIM, 2008).

## **2.6 FENÔMENOS DE CORTE NA USINAGEM**

### **2.6.1 Aresta Postiça de Corte (APC)**

A aresta postiça de corte (APC) é uma projeção de material da peça usinada que se deposita na ferramenta por meio de uma fração de material encruado. Trent e Wright (2001) a definem como sendo a primeira camada de material que se une a ferramenta por meio de ligações atômicas e encrua-se. Aumenta-se assim o seu limite de escoamento e as tensões de cisalhamento são insuficientes para quebrar estas ligações. As deformações então continuam nas camadas adjacentes, mais afastadas da interface, até que elas também são suficientemente encruadas. Pela repetição do processo, uma sucessão de camadas forma a APC.

Segundo Santos e Sales (2007) a formação da aresta postiça de corte se dá a baixas velocidades de corte e essa não pode aumentar indefinidamente, quando chega a um certo valor, no qual a tensão é suficiente para mudar a tensão de cisalhamento primária, que estava acima da aresta postiça de corte, para dentro da peça, parte de sua estrutura quebra e é arrastada entre as superfícies da peça e a de folga da ferramenta. Esse fenômeno ocorre diversas vezes e é o responsável pelo acabamento ruim em baixas velocidades de corte.

## 2.7 AÇOS UTILIZADOS NA FABRICAÇÃO DE COMPONENTES USINADOS

### 2.7.1 Aços-Carbono

Os aços-carbono constituem um dos grupos mais importantes de materiais metálicos, uma vez que são os mais utilizados na fabricação de máquinas, equipamentos, estruturas, veículos entre outros.

Os aços são ligas ferro-carbono, com os teores de carbono variando de 0,008% a 2,06% e com elementos residuais decorrentes do processo de fabricação (BRESCIANI FILHO, 1991).

É difícil obter um aço livre de outros elementos. No processo de beneficiamento do aço-carbono, elementos residuais são obtidos. O silício é um dos componentes que pode estar presente normalmente em teores de até 0,60% dependentes do processo de desoxidação adotado na produção do aço. O manganês é outro componente que aparece nos aços, geralmente abaixo de 1,65%. O teor de enxofre em aços é de no máximo de 0,050% e o de fósforo é de 0,040%, com exceção em alguns aços de fácil usinagem que contêm mais desses elementos. Esses aços ainda podem conter ainda uma pequena percentagem de chumbo em sua composição (de 0,15 a 0,35%).

Uma das principais classificações dos aços-carbono se dá pelo teor de carbono contido nele. Aços de baixo carbono são os aços que contêm em sua composição uma percentagem de carbono menor que 0,25%. Enquanto que os aços de médio carbono contêm uma faixa de 0,25% a 0,50% de carbono em sua estrutura. Os aços de alto carbono são aqueles que contêm

uma percentagem maior que 0,50% de carbono sendo que uma percentagem maior que 2,06% de carbono a liga ferro-carbono passa a se denominar ferro fundido.

O sistema mais comum de se nomear o aço se originou em entidades americanas como a AISI (American Iron and Steel Institute) e a SAE (Society of Automotive Engineering). A norma brasileira que nomeia os aços é a NB-82.

Nos aços-carbono sua nomenclatura é dada por meio de 4 dígitos, em função de sua composição química. O primeiro número é sempre 1 para indicar que é um aço-carbono, o segundo número varia entre 0, 1, 2, 3 e 5, dependendo da composição química do aço e os dois últimos números representam a percentagem de carbono multiplicada por cem.

#### **2.7.1.1 Aços-Liga**

Aços-liga são os aços que contêm, segundo a norma ABNT NB-82, elementos de liga nas seguintes proporções estimadas: mais do que 1,65% Mn, ou 0,60% Cu ou 0,60% Si; ou ainda até 3,99% de alumínio ou cromo e ainda Co, Nb, Mo, Ni, Ti, W, V, e Zr ou outro elemento.

Os elementos de liga alteram a microestrutura desses aços por tratamento térmico, de uma forma muito mais abrangente e variada de como ocorre nos aços-carbono.

Nestes aços a nomenclatura AISI-SAE, que é semelhante à ABNT-NB82, ocorre da seguinte forma:

De 4 dígitos onde os dois últimos correspondem à percentagem de carbono multiplicado por cem;

O primeiro dígito indica se: 1 aço-carbono; 2 aço níquel; 3 aço cromo-níquel.

O segundo dígito, quando em aços de composição simples, indica o teor (em %) do elemento de liga predominante.

Existem também a classificação no primeiro dígito que vai de 4 a 9 saltando o número 7. Esta classificação leva em conta os elementos de liga que compõem o aço.

Os aços-liga têm suas propriedades mecânicas geralmente atingidas por meio de tratamentos térmicos. Sendo assim propriedades como temperabilidade, além é claro de soldabilidade e usinabilidade, que são propriedades que levam em conta a facilidade de fabricação, devem ser levadas em conta.

#### **2.7.1.1.1 Aço-Liga 4140**

O aço ABNT 4140 é um aço que tem uma grande representatividade na indústria mecânica.

É um aço que apresenta em sua composição química de 0,38 a 0,43% de carbono, além de alguns elementos de liga:

Mn: de 0,75 a 1%

P: máximo de 0,040%

S: máximo de 0,040%

Cr: de 0,80 a 1,10%

Mo: de 0,15 a 0,25%

Si: de 0,20 a 0,35%

O aço ABNT 4140 tem como principais características: boa resistência mecânica, média usinabilidade, baixa soldabilidade e temperabilidade relativamente alta. Ele é

largamente utilizado para fabricação de eixos, pinos, bielas, entre outros, na indústria automobilística, agrícola e de máquinas e equipamentos em geral.

## **2.8 QUALIDADE SUPERFICIAL EM PEÇAS USINADAS**

Devido ao mecanismo de retirada de material utilizado nos processos convencionais de usinagem, o cisalhamento e as vibrações impostas e geradas pelo processo e equipamento, fazem com que a peça apresente uma superfície irregular. Esses erros afetam o grau de qualidade de superfície da peça.

### **2.8.1 Textura Superficial**

Uma superfície por mais bem acabada e trabalhada para que se tente deixá-la plana, apresenta irregularidades. Isso se deve ao processo de fabricação.

A textura superficial da peça segundo Santos e Sales (2007) se divide em dois níveis de irregularidades: as ondulações e a rugosidade. A rugosidade se distingue da ondulação pelo espaçamento, que neste último é maior. A ondulação pode ser comparada com as dunas de areia do deserto e a rugosidade como as ondas formadas nelas.

A rugosidade na usinagem ocorre devido ao processo de corte em si e está intrinsecamente associado à geometria da ferramenta utilizada. Já a ondulação é uma medida

de textura superficial que supera a rugosidade. Ela está associada a fatores como a máquina-ferramenta, a deflexão da peça, vibrações, batimentos, entre outros (SMITH, 2008).

### **2.8.2 Medição da Textura Superficial**

A medição da textura superficial da peça é um mecanismo muito utilizado hoje para padronização de linhas de fabricação. A textura está intrinsecamente relacionada com o modo de fabricação que a peça passou. Qualquer alteração na ferramenta e nos modos vibracionais da máquina tem reflexo instantâneo na textura superficial da peça.

Uma das técnicas de medição mais utilizadas hoje em dia é a utilização do perfilômetro de contato (*stylus*) para se avaliar a rugosidade e a ondulação de superfícies usinadas. Suas vantagens advêm do método ser de conhecimento bastante difundido, aplicável a diferentes materiais e do custo e suas desvantagens estão no fato de que o apalpador pode deformar elástica e plasticamente o material da peça medido e também o tempo para medição.

Existem diversos parâmetros de medição tanto da rugosidade quanto da ondulação. A utilização deles se deve a finalidade da peça e quão metuculoso se quer o estudo da superfície.

A rugosidade ou perfil linear é hoje um dos mecanismos mais utilizados para se fazer medições e controles das superfícies usinadas na indústria. Segundo Rossi (2008), como os valores dos parâmetros de rugosidade escolhidos são valores numéricos provenientes de integrações ou de operações matemáticas simples de perfis amostrais das superfícies, estão sujeitas a diversos erros de medição e interpretação, mas mesmo assim, extremamente úteis na comparação de superfícies.

Um dos parâmetros mais antigos ainda em uso nos dias de hoje é a rugosidade média ( $R_a$ ). Seu uso é atribuído à facilidade de se obtê-la devido à simplicidade de sua formulação. Sua definição pode ser expressa como o desvio médio de um perfil de sua linha média. Segundo Rossi (2008), a rugosidade média pode ser definida como a distância média de um perfil desde sua linha média, sobre um comprimento medido. A formulação matemática é expressa da seguinte forma:

$$R_a = \frac{1}{l_m} \int_0^{l_m} |y(x)| dx \quad (2.1)$$

Outro parâmetro utilizado é a rugosidade média quadrática (RMS) ( $R_q$ ). Ele é dado pela formulação matemática:

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{L} \int_0^L y^2(x) dx} \quad (2.2)$$

onde L é o percurso de medição. Este parâmetro vale aproximadamente 1,25 vezes o valor de  $R_a$ .

Outro parâmetro de rugosidade também utilizado é a rugosidade total ( $R_t$ ). É dado pela distância do pico mais alto e o vale mais profundo no comprimento considerado. Pode ser um bom indicador da ocorrência de falhas no processo de fabricação.

### 2.8.3 Integridade Superficial da Peça

Além da rugosidade, ondulação e outros parâmetros de medições de textura superficial, a qualidade de superfície usinada também abrange aspectos relativos à subsuperfícies, como tensões residuais na peça, encruamento da superfície usinada, formação

da camada branca, que não foram contempladas neste estudo. Davim (2008) e Smith (2008), em suas obras, tratam muito bem dessa parte.

## 2.9 EMISSÃO ACÚSTICA

O uso do monitoramento por meio de sinais de emissões acústicas na usinagem começou com Grabec e Leskovac (1977), quando analisaram o som emitido no corte de uma liga de alumínio e descobriram que o espectro de frequência audível era discreto, enquanto que o da faixa ultra-sônica, que depois veio a ser conhecida como emissão acústica, era contínua.

Emissão acústica é a propagação de uma onda vibracional na rede dos materiais cristalinos, devido ao rearranjo da estrutura interna do material (Willians, 1968). Quando ocorre uma deformação no material (modificado por corte, atrito, trinca entre outras) ocorre um desarranjo da estrutura do material que tende a rearranjá-los, esses rearranjos geram ondas vibracionais que deslocam a velocidade do som, daí o nome de emissão acústica. Estes sinais são captados por meio de um sensor piezoelétrico que transformam sinais mecânicos em sinais elétricos.

Segundo Li (2002), emissão acústica é uma onda de som ou, mais propriamente, uma onda de tensão que viaja por meio do material como resultado de alguma repentina liberação de tensões de energia.

Sales et al. (2009) afirmaram que na usinagem, a emissão acústica é dependente de mecanismos de discordâncias básicas, como movimentos de discordâncias, deslizamentos de grãos, maclação e coalescência de vazios. Ainda segundo Sales et al. (2009), a liberação de sinais de emissão acústica sobre estas circunstâncias pode ser atribuída ao tamanho de grão,

densidade de deslocamento e a distribuição de partículas de segunda fase em materiais cristalinos durante o processo de deformação.

Os sinais de emissão acústica classificam-se em dois tipos: o sinal contínuo e o sinal de pico ou transiente (SOUTO, 2007; BLUM e INASAKI, 1990; MATSUMOTO e DINIZ, 1997). O sinal transiente segundo Souto (2007) é caracterizado por um pico de grande amplitude, mas de pequena duração, enquanto que o sinal contínuo tem amplitude relativamente menor, mas com uma longa duração (Fig. 9). Na usinagem, o sinal contínuo se caracteriza pelas deformações plásticas de materiais dúcteis, enquanto que o sinal transiente é característico da propagação de trincas e impactos de cavaco.

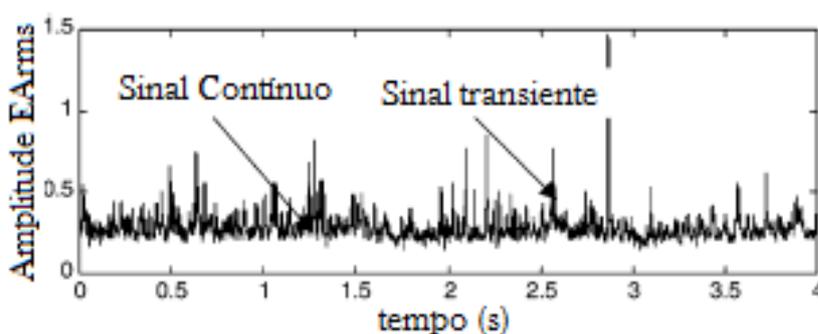


Figura 9: Caracterização de um sinal de EA (Li, 2002 – Adaptado).

Na Fig. 9 a amplitude do sinal de emissão acústica (AE) foi representada em termos de RMS (do inglês, root mean square, que é a raiz quadrática média do sinal). Segundo Hellier et al. (2003), a amplitude do sinal de emissão acústica está diretamente ligado a nova superfície formada pelo cisalhamento da superfície usinada.

A faixa de frequência de um sinal de emissão acústica está acima da faixa audível pelo ouvido humano (20 Hz a 20 kHz). Não há um consenso sobre qual a banda da faixa de frequência de emissão acústica, mas estudos práticos levam a crer que está entre 10 kHz a 1000 kHz. Essa faixa é beneficiada pela ausência das principais vibrações mecânicas e ruídos impostos pelo sistema usinado.

A iteração ferramenta-peça gera um sinal de emissão acústica característico que aumenta sua amplitude devido a diversos aspectos.

Ultimamente, a análise de emissões acústicas é uma ferramenta de grande importância para detecção de falhas em equipamentos, estudos de fenômenos, desgaste de ferramentas entre outros. Uma das principais vantagens do uso dela como ferramenta advém do fato de ser um ensaio não destrutivo, e que pode facilmente ser aplicado em um sistema, sem ter que fazer grandes adaptações nele.

Segundo Souto (2007), no fresamento, os sinais de pico são gerados por quebra de cavaco, quebra ou lascamento repentino da ferramenta, e também pela entrada e saída do ciclo ativo da ferramenta. Portanto, segundo Souto (2007) e Lan e Dornfeld (1984), fatores de quebra repentina como citado anteriormente são facilmente identificáveis pelo monitoramento dos sinais de emissão acústica devido à repentina aparição de pico na hora da quebra e a mudança no sinal após essa quebra. Mas para o monitoramento do desgaste de ferramenta, a avaliação dos sinais de emissão acústica já não é tão simples, uma vez que os sinais contínuos são os que sofrem variação em todo o seu conjunto. Ainda seguindo essa linha, Maia et al. (2009) estudando o desgaste de ferramenta no fresamento de aço de baixa liga por meio dos sinais de emissão acústica só conseguiram quantificar o desgaste de flanco analisando a tensão RMS ( $V_{RMS}$ ), uma vez que os sinais tanto no domínio do tempo, quanto no domínio da frequência eram muito parecidos do começo ao fim de vida da ferramenta.

Mas existem problemas no uso dessa técnica. A principal está no poder de processamento que se necessita para fazer a aquisição dos sinais. Para captar um fenômeno qualquer que tenha uma frequência máxima característica de 600kHz, segundo o teorema de Nyquist (SHIN e HAMMOND, 2008), para que consiga captar tal frequência precisa-se de uma taxa de amostragem de pelo menos o dobro dessa frequência, ou seja, 1,2MHz, o que em um segundo de aquisição ocupa um milhão e duzentos mil pontos armazenados. E como as

freqüências máximas comumente captadas para representar tal processo estão em torno dos 300kHz a 500kHz, para um curto período de aquisição de sinais, demandam de grande espaço de memória física para salvar estes dados.

Um dos usos mais comum do fenômeno de emissão acústica como parâmetro de controle na usinagem é o controle de desgaste de ferramentas. Segundo Li (2002), emissão acústica é um dos métodos de monitoração indireta mais efetiva para o monitoramento do desgaste de ferramentas.

Segundo Cisneros (2006), o processo que é capaz de produzir mudanças na estrutura interna do material, o trabalho de deformação plástica no processo de corte é uma fonte de EA. Ainda, segundo Cisneros (2006), na liberação de energia de deformação aplicada são produzidas ondas elásticas no material, as quais causam deslocamentos na superfície que podem ser adquiridas como sinal de EA.

Segundo Dolinsek e Kopac (1999), EA refere-se à propagação de ondas acima de 20 kHz, gerada pela zona de corte.

Existem dois tipos de análises de sinais de emissão acústica. O primeiro faz-se uso dos sinais no domínio do tempo e utiliza de ferramentas estatísticas para se fazer a análise dos sinais e o segundo utiliza dos sinais do domínio da freqüência.

Os métodos usuais de processamento de sinais no domínio do tempo são basicamente (SOUTO, 2007; PIGARI, 1995):

Tensão RMS ( $V_{RMS}$ ): é a raiz quadrada média da tensão do sinal. Avalia a magnitude do sinal, ou seja, a verdadeira energia contida no sinal. Essa técnica é bastante utilizada, uma vez que não demanda muito estudo para se fazer a avaliação do sinal. O valor RMS do sinal pode ser expresso pela equação 2.3 que se segue (DORNFELD, 1989):

$$V_{RMS} = \left( \frac{1}{\Delta T} \int_0^{\Delta T} V^2(t) dt \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.3)$$

onde:

$\Delta T$  = constante de tempo;

$V(t)$  = função do sinal.

Número total de picos: dado um valor pré-estabelecido (*threshold*), quantifica o número de picos que ultrapassa esse valor. Para isto utiliza-se de um contador que trabalha do começo ao fim do processo de aquisição (SOUTO, 2007; BEATTIE, 1983). É um método bastante utilizado para monitorar propagação de trincas em vasos de pressões.

Taxa do número de picos: é uma variação do número total de picos. É definido como sendo a contagem do número de vezes que o sinal ultrapassa um valor pré-determinado (*threshold*) dentro de um certo intervalo de tempo, usualmente entre 0,1 segundo a uma hora (SOUTO, 2007; BEATTIE, 1983).

Taxa de cruzamento do zero: é a mesma definição da taxa de números de picos, mas com o *threshold* definido como zero (SOUTO, 2007).

Desvio padrão: mede a dispersão dos dados em relação à média aritmética.

*Skewness*: parâmetro que mede a simetria da função densidade de probabilidade em torno da média. É definida como sendo o momento normalizado de terceira ordem da amplitude cuja fórmula é dada pela equação 2.4:

$$SK = \frac{M_3}{M_2^{3/2}} = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=0}^n (x_i - \bar{x})^3}{\left[ \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n (x_i - \bar{x})^2 \right]^{3/2}} \quad (2.4)$$

onde:

$M_2$  = momento de segunda ordem da distribuição;

$M_3$  = momento de terceira ordem da distribuição.

Por definição, encontrar uma *Skewness* negativa significa que a maior parte dos dados encontra-se à esquerda da média enquanto que uma *Skewness* positiva indica que a maior parte dos dados se encontra à direita da média.

*Kurtosis*: parâmetro de medida de dispersão que caracteriza o “achatamento” da curva da função de distribuição. Dados com uma *Kurtosis* igual a 3 indica que a função de distribuição apresenta o mesmo achatamento que uma distribuição normal. Dados com uma *Kurtosis* maior que 3 indica que a função de distribuição destes dados apresentam-se afuniladas em relação à distribuição normal, ou seja com grande predominância de altos picos que se afastam da média aritmética. Do mesmo modo, dados com uma *Kurtosis* menores que 3 indica que a função distribuição destes dados apresentam-se “achatadas” em relação à distribuição normal, ou seja, com grande predominância de vales profundos que se afastam da média. *Kurtosis* é definida como sendo o momento normalizado de quarta ordem da distribuição de amplitude e seu cálculo é dado pela fórmula 2.5, que se segue (SOUTO, 2007):

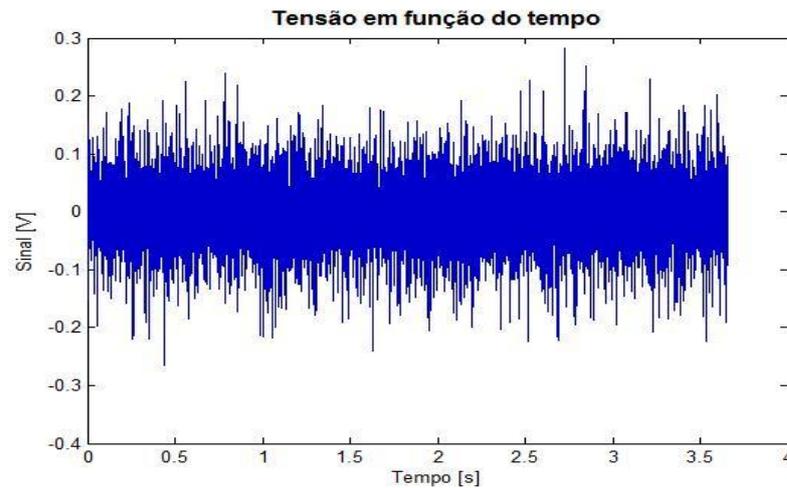
$$K = \frac{M_4}{(M_2)^2} = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^4}{\left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right]^2} \quad (2.5)$$

onde:

$M_2$  = momento de segunda ordem da distribuição;

$M_4$  = momento de quarta ordem da distribuição.

Mas devido à faixa de frequência avaliada nos sinais de emissão acústica é difícil reconhecer o sinal emitido por qualquer fenômeno no domínio do tempo (HAILI et al., 2003). A Fig. 10 ilustra o sinal no domínio do tempo. Uma das técnicas mais utilizadas para se avaliar os sinais fora do domínio do tempo é avaliar o espectro de frequência dos sinais. Dentro da avaliação do espectro de frequência, a técnica mais difundida é transformada rápida de Fourier (FFT, do inglês *Fast Fourier Transform*), o que dá o sinal da emissão acústica no domínio da frequência. A hipótese suposta para se utilizar da FFT é que os sinais são estacionários ou invariantes no tempo.



**Figura 10: Exemplo de um sinal de EA no domínio do tempo.**

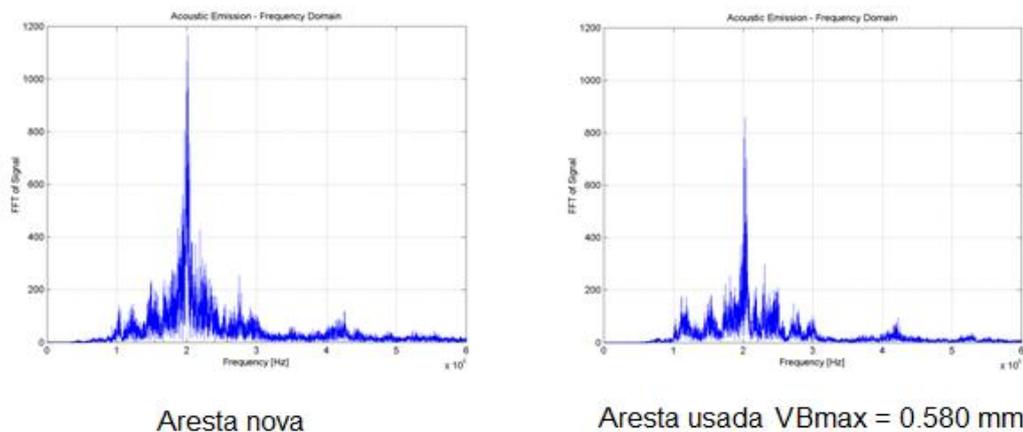
Segundo Li (2002), um sinal com energia limitada,  $f(t)$  pode ser decomposto pela transformada de Fourier, utilizando das equações:

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} F(\omega) e^{-i\omega t} dt \quad (2.6)$$

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) e^{-i\omega t} dt \quad (2.7)$$

$f(t)$  e  $F(\omega)$  são conhecidas como o par de transformada de Fourier. A equação (2.6) contende que  $f(t)$  pode ser decomposta em um conjunto com harmônicos iguais a  $e^{-i\omega t}$  e o peso dos coeficientes  $F(\omega)$  representam a amplitude dos harmônicos em  $f(t)$ .  $F(\omega)$  é independente do tempo e representa a formação da frequência de um processo aleatório, assumindo que eles são estacionários e invariantes no tempo.

A análise do espectro da frequência é muito utilizada para o monitoramento do desgaste de ferramenta e da qualidade de superfície da peça. Sales et al. (2009), torneando peças de liga de titânio encontrou que a faixa de frequência em que se percebem maiores variações nas amplitudes dos picos é de 120 kHz a 280 kHz (Fig. 11).



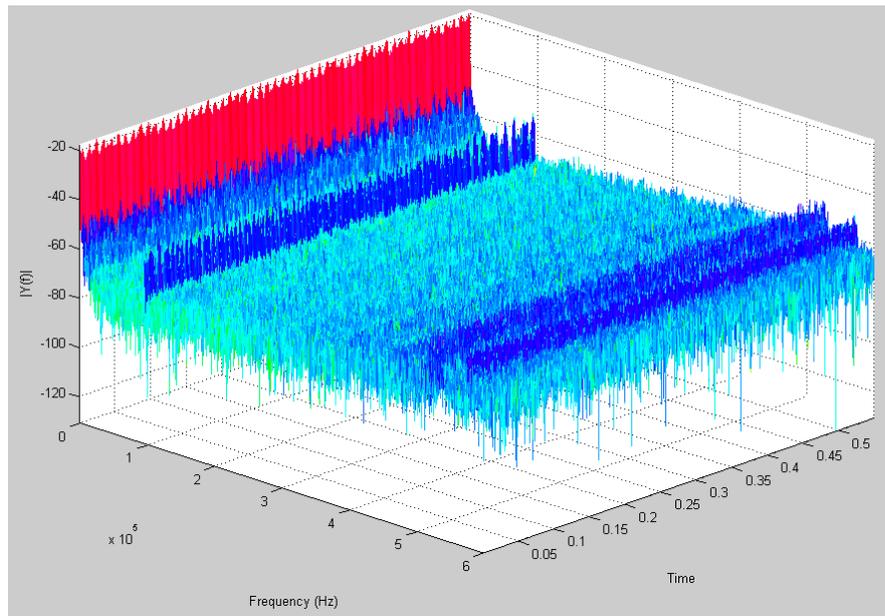
**Figura 11: Sinais de EA expressos no domínio da frequência (SALES et al, 2009 – adaptado).**

Marinescu e Axinte (2008) em seus estudos disseram que no fresamento, devido às múltiplas origens de emissão de ondas de tensão, os sinais de emissão acústica são geralmente caracterizados como sinais não estacionários e de múltiplas frequências, assim uma simples análise usando a FFT não é oportuno para um eficiente uso no monitoramento do processo. Assim, o uso de representações em tempo-frequência mostra-se mais apropriado para descrever a interação comportamental entre os sinais de emissão acústica gerados em operações de usinagem com múltiplas arestas cortantes simultaneamente.

A transformada de Fourier em janelas (STFT – do inglês “Short-time Fourier Transform”) é uma técnica muito usada para determinar as frequências e as fases de uma seção local de um sinal variante no tempo. Ela foi proposta por Gabor e coloca o sinal em função de duas dimensões, tempo e frequência.

Existem dois tipos de STFT, o em tempo contínuo e o em tempo discreto. Neste trabalho, se utilizou do STFT em tempo discreto.

A técnica consiste em captar o sinal em uma taxa de amostragem qualquer, e então os dados são quebrados em “pedaços” (estes geralmente são sobrepostos um ao outro). Cada pedaço é feito então a transformada de Fourier e o resultado complexo é adicionado a uma matriz, que guarda a magnitude e a fase de cada ponto em frequência e tempo. Na Fig. 12, vê-se um gráfico oriundo de uma STFT exemplificando o método.



**Figura 12: STFT dos sinais de EA coletados a uma taxa de 1,2MHz por 0,5s.**

Segundo Souto (2007), muitas pesquisas foram realizadas adquirindo sinais de emissão acústica utilizando de um filtro RMS devido à facilidade de processamento. Mas este sinal não é aconselhável ao uso do monitoramento uma vez que omite muitas informações oriundas do processo de corte. Além disso, nos sinais adquiridos pelos sensores de emissão acústica estão susceptíveis a distorções provocadas por ecos, ressonâncias e acoplamentos de frequências indesejadas.

Diversos estudos e também alguns manuais de sistemas de aquisição de sinais de emissão acústica orientam para o correto uso e colocação dos sensores na peça a ser monitorada. Uma dessas orientações está no uso de um meio acoplador que facilite a transferência das ondas vibracionais até o sensor de emissão acústica. O meio mais utilizado pelas diversas pesquisas estudadas e também pelo manual de operação é a vaselina. O uso dela em pré-testes mostrou-se de grande auxílio para amplificar os sinais analisados.

O posicionamento do sensor em relação ao monitoramento tem grande influência nos sinais adquiridos por ele. No torneamento, onde a peça rotaciona, é impossível fixar um sensor piezelétrico ativo, então sua fixação deve ser feita na ferramenta, o mais longe possível, uma vez que devido a alguns testes experimentais realizados pelo autor, descobriu-

se que dependendo da velocidade de corte utilizada, o sensor apresenta grande variação de resultados, o que de uma forma pode ser explicado pelo choque de cavacos com o sensor. No fresamento, o sensor deve ser posicionado na peça em uma posição o mais distante possível da ferramenta, pois devido ao tamanho da ferramenta, quando a fresa, durante o corte, está muito próxima ao sensor, o sinal cresce repentinamente e logo decresce novamente, podendo gerar erros. Na furação, o sensor deve ser posicionado na posição transversal ao sentido do furo e deve-se evitar o contato de cavacos, que prejudicam o sinal.

Sobre os ruídos oriundos da aquisição dos sinais deve-se atenuá-los ou se possível eliminá-los. Em todas as aquisições de sinais, ruídos magnéticos, de fase na rede elétrica, brancos oriundos de aquecimento de circuitos elétricos e mecânicos no caso de vibrações e emissão acústica estão presentes. Para a eliminação e atenuação dos ruídos magnéticos e de fase, deve-se tomar cuidado com posicionamento do equipamento e fazer um aterramento eficiente da rede elétrica e dos equipamentos, para ruídos de baixa frequência (até 1kHz). Para ruídos eletromagnéticos de alta frequência (acima de 1MHz), a utilização de um filtro passa-baixa é de grande valia na solução. Ruído branco oriundo do circuito elétrico formado é o mais difícil de ser eliminado. Pode-se tentar minimizá-lo utilizando um filtro supressor. Para a eliminação de ruídos mecânicos, que geralmente apresentam frequências inferiores a 100kHz a utilização de um filtro passa-alta soluciona este problema. Aqui vale uma ressalva; os ruídos mecânicos na usinagem são os de maiores amplitudes e sua atenuação ou eliminação deve ocorrer em primeiro lugar, uma vez que qualquer amplificação do sinal amplifica e muito este ruído.

## 2.10 VIBRAÇÕES

Vibração é definida como sendo o movimento dinâmico em torno de sua posição estática (SOUTO, 2007). Para que haja vibração é necessário que o corpo seja capaz de armazenar energia cinética, tenha certa elasticidade e sofra um excitação externa. Como todos os corpos apresentam estas características é praticamente impossível evitar que as vibrações ocorram.

Na usinagem, as vibrações estão presentes em todos os processos e convivem, de uma maneira geral, bem com o processo em si. Segundo Polli (2005), o máximo nível de vibrações tolerável, ou seja sua máxima amplitude, depende da sua aplicação. Processos de desbaste, por exemplo, a preocupação está em qual nível de amplitude se tem o maior tempo de vida de ferramenta, enquanto que em processos de acabamento, o nível de amplitude deve ser caracterizado para que haja o melhor acabamento superficial e precisão dimensional na peça usinada.

Vibrações em máquinas e ferramentas são uma preocupante variável que pode prejudicar toda a produtividade na indústria de usinagem. Vibrações excessivas comprometem a qualidade da superfície usinada, diminui a vida da ferramenta, acelera o seu lascamento e ainda pode danificar rolamentos do eixo-árvore e ainda aumentar o consumo de energia da máquina (KING, 1985).

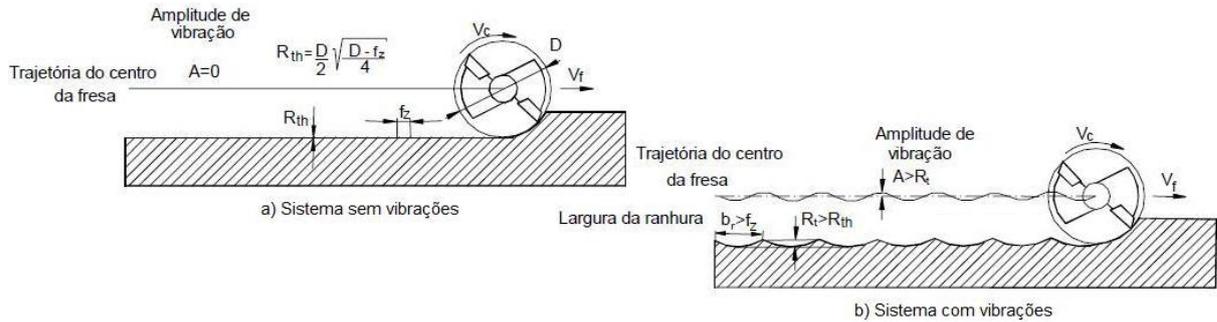
Uma das causas dessas vibrações pode ser atribuída à excentricidade. Excentricidade pode ser atribuída a alguma falha de fixação dos insertos, que pode gerar uma diferença de raio na fresa. A excentricidade altera as forças médias e os picos máximos e mínimos do perfil instantâneo de forças de diversas maneiras, dependendo das condições de corte, da geometria do corte e da natureza e intensidade da excentricidade (SCHOROETER et al., 2001).

Pelo fato das fresas em sua maioria estarem fixas por sua parte superior, por imprimirem altas velocidades e por apresentarem falta de rigidez, surgem deflexões causadas pelas forças de usinagem. Segundo Deonísio (2004), a inclinação da ferramenta de corte causada pela deflexão gera diferentes espessuras de cavaco no sentido axial, um problema que segundo ele, pode ser ainda mais grave conforme aumente a profundidade de corte axial ( $a_p$ ).

Porém, a deflexão da ferramenta tem a propriedade de atenuar os efeitos da excentricidade. Neste caso, segundo Deonísio (2004), a espessura do cavaco removida por uma aresta cortante será maior que a teórica, conseqüentemente as forças de corte serão também maiores. Caso aconteça que a espessura do cavaco seja menor que a teórica, o inverso será esperado.

Na usinagem, as vibrações são conseqüências das variações cíclicas nos componentes dinâmicos das forças de corte (DIMLA e LISTER, 2000). Normalmente, estas vibrações começam como pequenas trepidações (*chatter*), responsáveis pelo aspecto ondulado na superfície usinada e também por irregularidades na espessura do cavaco e, posteriormente, progride para a vibração propriamente dita (SOUTO, 2007).

Existe uma relação entre as vibrações durante o processo e o acabamento da superfície usinada. Em um trabalho isento de vibrações, o movimento relativo entre a ferramenta e a peça é dado pela combinação do avanço e da velocidade (POLLI, 2005). Ainda segundo Polli (2005), a rugosidade cinemática pode ser calculada em função do diâmetro da ferramenta e do avanço por dente (Fig. 13a). Mas como isso é impossível de se conseguir, entram em jogo as vibrações da ferramenta, que faz com que seja imposta uma componente na direção normal a de avanço que confere a peça usinada uma piora na qualidade da superfície usinada do ponto de vista de rugosidade (Fig. 13b).



**Figura 13:** Trajetória da ferramenta em um processo sem (a) e com vibrações (b).

Diversas são as fontes que levam a vibrações no processo de usinagem. Para que haja vibrações, precisa de no mínimo uma fonte. As principais vibrações na usinagem são: vibrações externas a máquina-ferramenta, vibrações geradas pela própria usinagem, descontinuidade da peça e da composição da peça, corte interrompido e vibrações causadas pela máquina-ferramenta.

Grande quantidade das vibrações livres, forçadas e auto-excitadas estão normalmente presente nas máquinas-ferramentas.

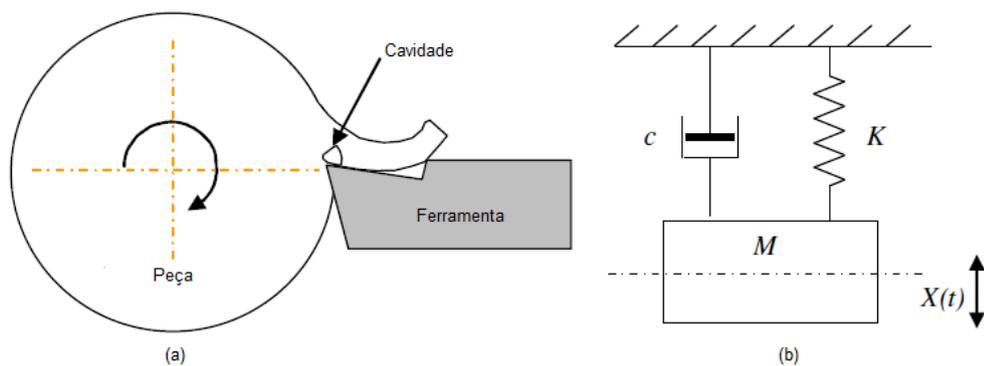
Vibrações em máquinas-ferramentas baseada na origem da energia externa, podem ser classificadas como vibrações livres, forçadas e auto-excitadas. A seguir mostram-se os princípios básicos dos tipos de vibrações.

### 2.10.1 Vibrações Livres

Quando se aplica uma energia externa de pequena duração inicia-se então uma vibração livre do corpo excitado pela energia. Na ausência de forças não conservativas, as vibrações livres são sustentadas pela energia conservativa armazenada pelas propriedades do material e são periódicas.

As vibrações em máquinas-ferramentas sobre excitações pulsadas podem ser reconhecidas como vibrações livres. Diversas são as fontes que originam vibrações livres na usinagem. Entre essas podem-se citar: forças de corte no fresamento quando usinando uma peça; força de inércia contrária ao movimento das partes móveis da máquina-ferramenta; transmissão de vibrações do piso e fundações; imperfeições de materiais entre outras.

Supondo um corte ortogonal, no qual exista na peça uma descontinuidade. Sobre o ponto de vista da ferramenta, quando ela passa pela descontinuidade, pode ser simplificado como uma vibração livre com um grau de liberdade. A Fig. 14 ilustra em “a”, o corte ortogonal com a descontinuidade da peça e em “b”, a representação esquemática do sistema de vibração livre com um grau de liberdade.



**Figura 14: a) Corte ortogonal em um material defeituoso b) Sistema de vibração livre com um grau de liberdade.**

Considere primeiro o caso de um sistema livre não amortecido. A equação diferencial que representa esse sistema é:

$$M\ddot{x} + Kx = 0 \quad (2.8)$$

Onde  $M$  e  $K$  são a massa e a rigidez da mola que são determinados durante a derivação da equação diferencial. A equação 2.8 está sujeita a seguintes condições iniciais:

$$x(0) = x_0$$

$$\dot{x}(0) = \dot{x}_0$$

Para essas condições, a equação 2.8 tem a seguinte solução:

$$x(t) = x_0 \cos \bar{\omega}_n t + \frac{\dot{x}_0}{\bar{\omega}_n} \sin \bar{\omega}_n t \quad (2.9)$$

Onde  $x$  é o deslocamento em função do tempo  $t$ :

$x_0$  é o deslocamento inicial da massa e,

$$\bar{\omega}_n = \sqrt{\frac{K}{M}} \text{ é a frequência natural não amortecida.}$$

Nesta etapa efetua-se um aumento da complexidade do sistema aplicando um elemento de amortecimento ao sistema massa-mola. Aqui somente o amortecimento viscoso é levado em consideração. A fórmula geral da equação diferencial que demonstra o deslocamento do sistema de vibrações livres amortecidas é:

$$M\ddot{x} + c\dot{x} + Kx = 0 \quad (2.10)$$

Onde  $c$  é a constante de amortecimento do sistema. Dividindo a equação 2.10 por  $M$  resulta:

$$\ddot{x} + \frac{c}{M}\dot{x} + \frac{K}{M}x = 0 \quad (2.11)$$

A solução geral da equação é obtida assumindo que:

$$x(t) = Be^{\alpha t} \quad (2.12)$$

A substituição de 2.12 na equação 2.11 obtém-se a seguinte equação do segundo grau para  $\alpha$ :

$$\alpha^2 + \frac{c}{M}\alpha + \frac{K}{M} = 0 \quad (2.13)$$

A fórmula quadrática é usada para obter as raízes da equação 2.13:

$$\alpha_{1,2} = -\frac{c}{2M} \pm \sqrt{\left(\frac{c}{2M}\right)^2 - \frac{K}{M}} \quad (2.14)$$

A forma matemática da solução da equação 2.11 e a física interação do sistema depende do discriminante da equação 2.14. O caso quando o discriminante é zero é um caso especial em que só ocorre sobre certas combinações de parâmetros. Quando isso ocorre, o

sistema é conhecido como sendo criticamente amortecido. Para valores fixos de  $K$  e  $M$ , o valor de  $c$  que causa amortecimento crítico é chamado de coeficiente de amortecimento crítico,  $c_c$  e é dado pela fórmula:

$$c_c = 2\sqrt{KM} \quad (2.15)$$

A não dimensional razão de amortecimento,  $\zeta$ , definida como a razão do valor atual de  $c$ , para o coeficiente de amortecimento crítico é:

$$\zeta = \frac{c}{c_c} = \frac{c}{2\sqrt{KM}} \quad (2.16)$$

A razão de amortecimento é uma propriedade inerente dos parâmetros do sistema.

Usando as equações 2.15 e 2.16, reescreve-se a equação 2.14 em termos de  $\zeta$  e  $\varpi_n$  como:

$$\alpha_{1,2} = -\zeta\varpi_n \pm \varpi_n\sqrt{\zeta^2 - 1} \quad (2.17)$$

Assim, a solução geral para a equação 2.17 é:

$$x(t) = e^{-\zeta\varpi_n t} (C_1 e^{\varpi_n\sqrt{\zeta^2-1}t} + C_2 e^{-\varpi_n\sqrt{\zeta^2-1}t}) \quad (2.18)$$

Onde  $C_1$  e  $C_2$  são constantes arbitrárias de integração. Da equação 2.11, fica evidente que a natureza do movimento depende do valor de  $\zeta$ ; assim a equação 2.11 se torna:

$$\ddot{x} + 2\zeta\varpi_n\dot{x} + \varpi_n^2 x = 0 \quad (2.18)$$

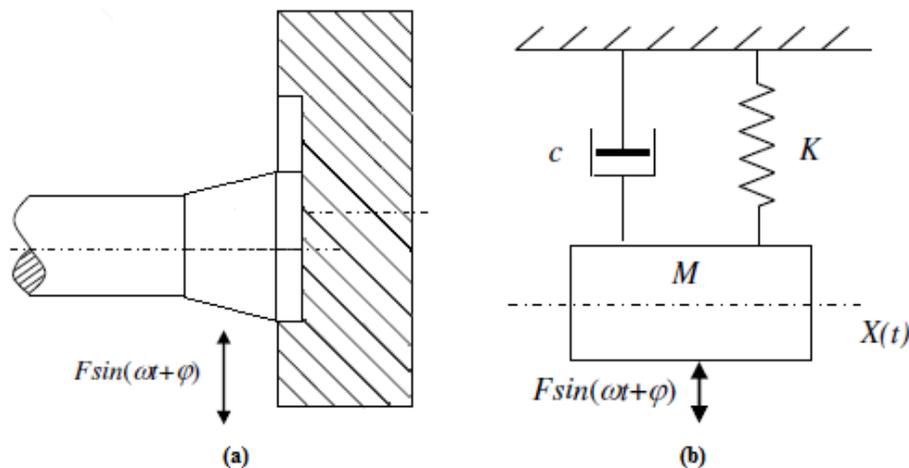
Essa é a forma padrão da equação diferencial que governa as vibrações livres amortecidas.

As diferentes condições de amortecimento (crítico, sub-amortecido e sobre-amortecido) podem ser encontradas de forma detalhada em bibliografias específicas como as de Benaroya (2004) e de Rao (2003).

### 2.10.2 Vibrações Forçadas

Se as vibrações ocorrem durante a presença de uma fonte de energia externa elas são chamadas de vibrações forçadas. A interação do sistema nas vibrações forçadas é dependente do tipo de excitação externa. Vários são os tipos de forças externas, como a harmônica, periódica mas não harmônica, degrau, impulso, força arbitrária entre outras. Se a excitação é periódica, as vibrações forçadas do sistema linear também são periódicas.

Considere um fresamento como mostrado na Fig. 15a em que a fresa esteja desbalanceada. O resultado é uma força que segue uma forma harmônica do tipo  $F \sin(\omega t + \varphi)$ . Essa força irá vibrar a fresa em relação à peça e resultará em uma vibração forçada.



**Figura 15:** Um processo de fresamento de cavidades em (a) e um sistema de vibrações forçadas com um grau de liberdade em (b).

Considere um sistema massa-mola não-amortecido submetido a uma força harmônica (Fig. 15b). A equação diferencial para vibrações forçadas amortecidas sujeitas a uma excitação de força harmônica é:

$$\ddot{x} + \bar{\omega}_n^2 x = \frac{F}{M} \sin(\omega t + \varphi) \quad (2.19)$$

Se a frequência de excitação  $\omega$  não for igual à frequência natural  $\omega_n$ , usa-se a seguinte equação para obter a solução particular da equação 2.19:

$$x_p(t) = \frac{F}{M(\omega_n^2 - \omega^2)} \text{sen}(\omega t + \varphi) \quad (2.20)$$

Adiciona-se a solução homogênea à solução particular com as condições iniciais aplicadas o que resulta em:

$$x(t) = \left[ x_0 - \frac{F \text{sen} \varphi}{M(\omega_n^2 - \omega^2)} \right] \cos(\omega_n t) + \frac{1}{\omega_n} \left[ \dot{x}_0 - \frac{F \omega \cos \varphi}{M(\omega_n^2 - \omega^2)} \right] \text{sen}(\omega_n t) + \frac{F}{M(\omega_n^2 - \omega^2)} \text{sen}(\omega t + \varphi) \quad (2.21)$$

Em um sistema de vibrações forçadas amortecidas com uma excitação harmônica a forma básica da equação diferencial é:

$$\ddot{x} + 2\zeta\omega_n\dot{x} + \omega_n^2 x = \frac{F}{M} \text{sen}(\omega t + \varphi) \quad (2.22)$$

A solução particular para a equação 2.22 é:

$$x_p(t) = \frac{F}{M[(\omega_n^2 - \omega^2) + (2\zeta\omega\omega_n)^2]} [-2\zeta\omega\omega_n \cos(\omega t + \varphi) + (\omega_n^2 - \omega^2) \text{sen}(\omega t + \varphi)] \quad (2.23)$$

A equação 2.23 pode ser reescrita pela forma alternativa que é:

$$x_p(t) = A \text{sen}(\omega t + \varphi - \phi) \quad (2.24)$$

$$\text{Onde } A = \frac{F}{M\sqrt{(\omega_n^2 - \omega^2)^2 + (2\zeta\omega\omega_n)^2}} \text{ e } \phi = \tan^{-1} \left( \frac{2\zeta\omega\omega_n}{\omega_n^2 - \omega^2} \right).$$

$A$  é a amplitude da resposta forçada e  $\phi$  é o ângulo de fase entre a resposta e a excitação.

Vibrações forçadas em máquinas-ferramentas podem ser geradas por duas maneiras de fontes de energia, que são internas e externas fontes de vibrações. Fontes externas de vibrações, como ondas sísmicas originária de alguma perturbação do solo devido a alguma outra máquina, geralmente são transferidas a estrutura das máquinas-ferramentas por meio da base da máquina. O desenvolvimento e uso de um efetivo isolador de vibrações é uma boa

maneira para eliminar ou minimizar as vibrações forçadas causadas pelas fontes de vibrações externas. Muitas fontes de vibrações internas causam vibrações forçadas em máquinas-ferramentas. Pode-se citar como exemplo, um eixo-árvore em alta rotação desbalanceado, uma força de impacto do processo de usinagem e a força de inércia causada pela componente do movimento de reação, entre outras (CHENG, 2009).

### 2.10.3 Trepidação

Aliadas as vibrações forçadas e livres estão também as trepidações (*chatters*) que são, um dos maiores responsáveis pelo acabamento pobre na superfície das peças.

Segundo Altintas (2000), as vibrações geradas pelas trepidações (*chatter*) da ferramenta resultam de um mecanismo auto-excitado na geração da espessura do cavaco durante a operação de usinagem. Dependendo da mudança de fase entre as duas sucessivas ondas, a máxima espessura do cavaco pode crescer exponencialmente até que a frequência de oscilação das trepidações (*chatter*), que é fechada, não seja mais igual ao modo estrutural dominante no sistema. O crescimento das vibrações aumenta as forças de corte e pode lascrar a ferramenta e produzir um acabamento pobre de superfície. As vibrações de trepidação auto-excitadas podem ser causadas pelo modo de acoplamento ou por regeneração da espessura do cavaco (TOBIAS e FISHWICK, 1958). O modo de trepidação de acoplamento ocorre quando existem vibrações em duas direções no plano de corte. O fenômeno de regeneração resulta da diferença de fase entre as ondas de vibração passadas em ambos os lados do cavaco e ocorre antes do modo de acoplamento na maioria das usinagens.

Existem basicamente três formas de trepidações auto-excitadas. A primeira é dependente da velocidade ou trepidação tipo Arnold. Esse tipo de batimento ocorre por uma dependência entre a variação de força e a velocidade de corte ( $v_c$ ). A segunda forma é conhecida como a trepidação regenerativa, que ocorre quando uma superfície ondulada encontrada logo após o passe da ferramenta é removida durante o passe posterior, causando uma prejudicial variação da força de corte. A terceira forma de batimento é conhecida como o modo de acoplamento e ocorre quando forças que atuam em uma direção na estrutura da máquina-ferramenta causam movimentos em outras direções e vice e versa. Isso resulta em simultâneas vibrações em duas direções acopladas (CHENG, 2009).

Segundo Cheng (2009), muitos das trepidações que ocorrem na prática em operações de usinagem são as trepidações regenerativas, embora outras trepidações sejam comuns em alguns casos.

Identificando a ocorrência de batimentos no sistema máquina-ferramenta, uma série de técnicas são propostas para reduzir as trepidações. Segundo Cheng (2009), alguns métodos podem reduzir as trepidações tanto no desenvolvimento quanto na produção. Entre eles estão:

- Seleção de parâmetros ótimos de corte;
- Seleção de geometria ótima de ferramenta;
- Aumento da rigidez e amortecimento do sistema máquina-ferramenta;
- Uso de um isolador de vibrações, se necessário;
- Alteração da velocidade de corte durante o processo de usinagem;
- Uso de diferentes técnicas de aplicação de fluidos de corte.

Exposto as principais origens de vibrações na usinagem, cabe dizer quão representativo é cada causa no processo como um todo. Luo et. al (2005), criaram uma tabela (Tab. 2) na qual numeram as principais instabilidades, com suas causas, localização, características e possíveis eliminações.

**Tabela 2: A classificação da instabilidade na usinagem (LUO et al., 2005 – Modificado).**

Instabilidade na Usinagem							
	Trepidações			Vibrações livres e aleatórias			Vibrações forçadas
	Regenerativa (dominante)	De contato	Modo de acoplamento	Dependente da ferramenta	Dependente da peça	Dependente do ambiente	Dependente da componente da máquina-ferramenta
Localização	Entre a aresta de corte e a peça	Flanco da ferramenta e a peça; cavaco-superfície de saída da ferramenta	Na direção da força de corte e na direção da força de avanço	Flanco da ferramenta e a peça; cavaco-superfície de saída da ferramenta	Zona de Corte	Em todo o processo de corte	Em todo o processo de corte
Causas	Sobreposição de corte	Fricção na superfície de flanco e na superfície de saída	Atrito na superfície de saída e na superfície de folga; variação na espessura do cavaco; oscilação no ângulo de cisalhamento	Desgaste de ferramenta e quebra	Material amolecendo e endurecendo; grãos duros e outras superfícies falhas	Distúrbios ambientais	Componente do movimento desbalanceado, como o eixo-árvore
Características	Vibrações auto-excitadas; aspecto ondulado na superfície usinada	Vibrações auto-excitadas; amplitude depende do amortecimento do sistema	Vibrações de modo de acoplamento; vibrações simultâneas em duas direções	Aleatória e caótica; depende das condições de corte	Aleatória e caótica; depende das propriedades do material e de seu tratamento térmico	Aleatória e caótica; depende do ambiente de trabalho	Vibrações forçadas
Método de eliminação	Selecionar correta profundidade de corte e rotação do eixo-árvore de acordo com gráficos de estabilidade regenerativa	Selecionar corretos ângulos de folga e de saída	Mudar o avanço da ferramenta; selecionar corretas variáveis de corte	Selecionar materiais de ferramenta de alta qualidade e corretos parâmetros de corte	Selecionar correta ferramenta de corte e corretos parâmetros de corte	Se necessário, isolar a máquina-ferramenta	Correto balanceamento dos componentes da máquina-ferramenta

### 3 METODOLOGIA

Neste capítulo serão mostrados todos os equipamentos utilizados para a realização dos experimentos assim como seus ajustes e também os parâmetros e as condições de corte avaliados.

Para um entendimento completo segue um fluxograma (Fig. 16) de toda a metodologia utilizada nos testes.

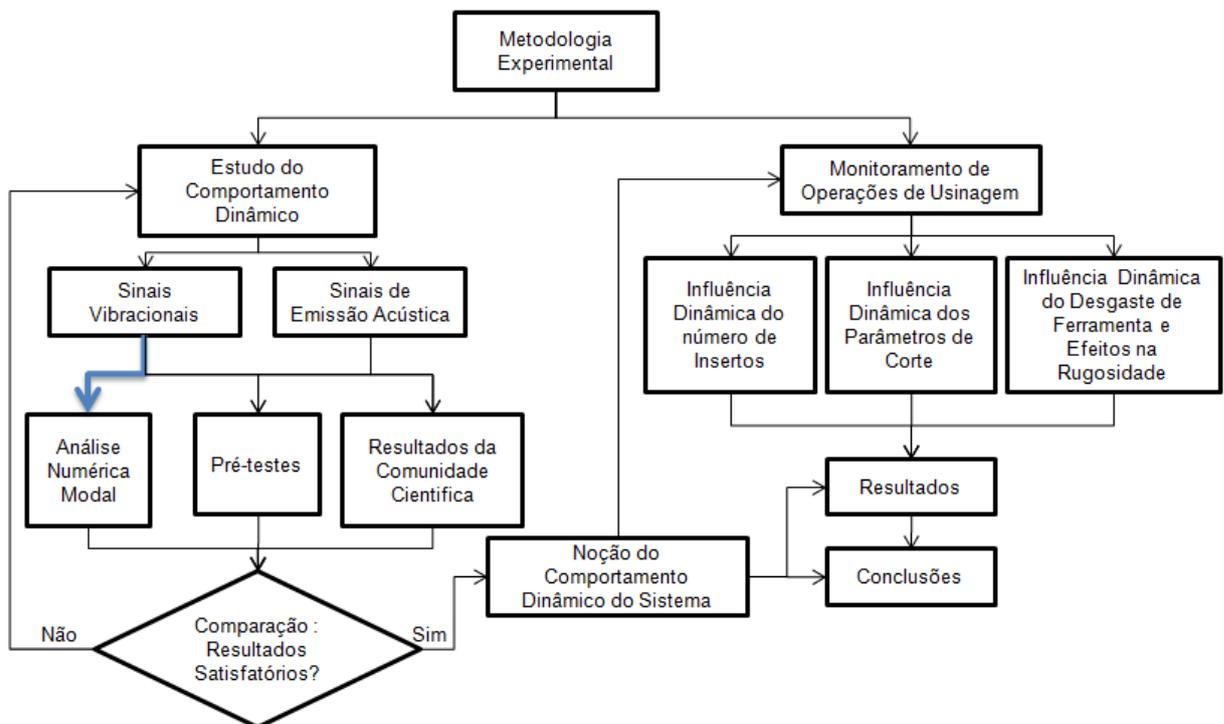


Figura 16: Fluxograma da metodologia utilizada.

### 3.1 MÁQUINA-FERRAMENTA E PARÂMETROS DE CORTE UTILIZADOS

Para a realização dos testes utilizou-se um centro de usinagem CNC ROMI Discovery 560, com comando numérico Siemens modelo Sinumerik 810 D, que apresenta uma potência máxima de 12,5cv e uma faixa de velocidade do eixo-árvore de 7 a 10000rpm. A Fig. 17 mostra o centro de usinagem ROMI e a Tab. 3 apresenta suas principais características.



Figura 17: Centro de usinagem ROMI Discovery 560 (com a referência dos eixos coordenados).

Tabela 3: Principais especificações técnicas do centro de usinagem ROMI.

Cone da árvore	ISO 40
Faixa de velocidade	7 a 10000rpm
Avanço rápido (eixos X/Y)	30m/min
Avanço rápido (eixo Z)	20m/min
Curso da mesa superior (eixo X)	560mm
Curso da mesa inferior (eixo Y)	406mm
Curso do cabeçote (eixo Z)	508mm
Número de ferramentas	22
Motor principal CA (30 min)	12,5cv / 9kW

Os parâmetros de corte utilizados na realização dos testes foram: velocidade de corte ( $v_c$ ) de 50, 150 e 250m/min; profundidade de corte ( $a_p$ ) de 1,25mm; avanço por dente de ( $f_z$ ) de 0,05 e 0,12mm/rev; penetração de trabalho ( $a_e$ ) de 40mm e sentido de corte concordante e discordante, usinando a seco.

### 3.2 FERRAMENTA E INSERTOS

Na execução dos experimentos utilizou-se uma fresa frontal de 80mm de diâmetro nominal com seis insertos intercambiáveis, da marca Sandvik, modelo Coromill 245 de especificação R245-080Q27-12M mostrada na Fig. 18.



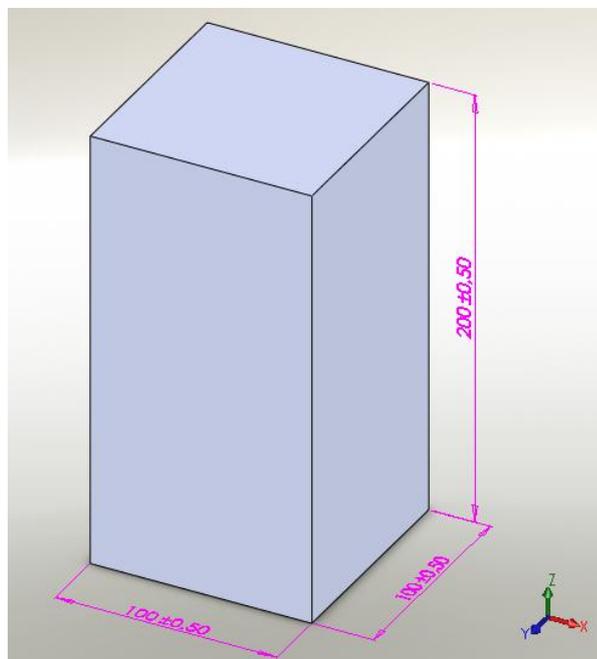
**Figura 18: Fresa Sandvik com seis insertos utilizados nos testes.**

Os insertos utilizados foram de metal duro classe P, com revestimento [TiCN + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(TiN)], de geometria quadrangular, com raio de ponta de 1,5mm, fabricada pela Sandvik com a seguinte especificação do fabricante: R245-12T3M-PM 4235.

O uso dos insertos se deu devido ao material usinado, uma vez que o seu fabricante recomenda o uso em aços de baixa liga.

### 3.3 CORPOS DE PROVA

Os corpos de prova adotados para a realização do experimento foram barras de dimensões 100x100x200mm, como mostrado na Fig. 19. Eles foram usinados desbastando o eixo z até que os corpos de prova alcançassem uma altura de aproximadamente 60mm.



**Figura 19: Corpo de prova e suas dimensões.**

O aço no qual foi confeccionado os corpos de prova é o ABNT 4140 cuja dureza foi previamente avaliada e encontrou-se um valor médio de 210 HV. É utilizado largamente na

fabricação de eixos, pinos, bielas, entre outros, principalmente na indústria automobilística, de máquinas e equipamentos em geral.

O certificado de composição química do aço encontra-se no anexo 1.

### **3.4 EQUIPAMENTOS DE MONITORAÇÃO**

Para realizar a monitoração dos sinais de emissão acústica no fresamento, utilizou-se um sensor de emissão acústica ativo da marca Sensis, que é basicamente um acelerômetro multiaxial. Esse sensor é conectado a um condicionador de sinais também Sensis modelo DM42 (Fig. 20) regulado da seguinte forma: ganho de entrada de 1; ganho de sinal de 3; redução de ruído de 1; sem portas de saída dos comparadores 1 e 2; filtro passa-alta de 10kHz, uma vez que segundo a teoria da emissão acústica o que caracteriza seus sinais são frequências acima de 10kHz; constante de tempo de 1.

Para a eliminação de ruídos oriundos de cabeamento inadequado buscou-se consultoria junto a professores do programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da PUC Minas, e decidiu-se substituir o bloco conector e os cabos de interligação entre o computador e o condicionador de sinais por um único cabo coaxial blindado feito exclusivamente para este propósito.

Para a captura dos sinais utilizou-se um computador com processador Pentium D de 2,66GHz com 2GB de memória RAM e 200GB de memória física com uma placa de aquisição de dados National Instruments modelos PCI-6251, com um software de captura desenvolvido na plataforma LABVIEW 5.1. Todo o tratamento dos dados foi feito em um software desenvolvido em MATLAB.

Foram feitas as capturas utilizando uma taxa de aquisição de 1,2MHz, que é a taxa máxima de aquisição conseguida pela placa NI, mas a leitura dos sinais se limitaram a até 300kHz obedecendo ao teorema de Nyquist com folga e garantindo assim a qualidade dos sinais adquiridos. O tempo de aquisição dos dados foi de apenas 0,5 segundo de modo a não sobrecarregar tanto a memória RAM quanto a memória física do computador.



**Figura 20: Condicionadores de sinais de emissão acústica Sensis DM42 (esquerda) e de vibrações mecânicas Kistler 5134 (direita).**

Para a monitoração dos sinais vibracionais foi utilizado quatro acelerômetros uniaxiais da marca Kistler. Um acelerômetro foi posicionado no eixo-árvore do centro de usinagem de forma a capturar as vibrações relativas ao movimento longitudinal do eixo definido aqui por eixo coordenado y. Os outros três acelerômetros foram posicionados no corpo de prova: um captava as vibrações relativas ao movimento transversal (eixo coordenado x), outro captava as vibrações relativas ao movimento longitudinal (eixo coordenado y) e o último captava as vibrações relativas ao movimento superficial (eixo coordenado z). Essas coordenadas podem ser vistas no centro de usinagem pela Fig. 17.

Os acelerômetros foram conectados a um condicionador de sinais da marca Kistler modelo 5134 (Fig. 20) que foi configurado da seguinte forma: ganho de 1 em todos os quatro canais, filtro passa-baixa de 10kHz em todos os quatro canais, uma vez que acima de 14kHz os acelerômetros entravam em ressonância que geraria erros e também pelo fato que a faixa de 0 a 10kHz está presente todas as características vibracionais que se queria monitorar; e o BIAS desligado.

Assim como no sistema de emissão acústica, para a eliminação de ruídos oriundos de cabeamento inadequado, substituiu-se o bloco conector, os cabos de interligação entre o computador e o condicionador de sinais por cabos coaxiais blindados feitos exclusivamente para este propósito.

Para a captura dos sinais utilizou-se um computador com processador Pentium IV de 3.4GHz com 2GB de memória RAM e 120GB de memória física com uma placa de aquisição de dados National Instruments modelo PCI-MIO-16E-1, com um software de captura desenvolvido na plataforma LABVIEW 5.1. O tratamento dos dados foi feito em um software desenvolvido em MATLAB.

A taxa de aquisição utilizada para fazer as capturas foi de 15kHz e aqui se utilizou da tática de não gerar arquivos maiores que 3MB, o que com essa taxa de aquisição dava aproximadamente 3 segundos. Observando também o teorema de Nyquist e análises feitas em pré-testes que mostravam que os sinais provenientes do processo de usinagem não ultrapassavam 500Hz, limitaram as análises feitas no presente trabalho até 700Hz.

A Fig. 21 detalha o *layout* de todo o sistema de aquisição feito no trabalho através de diagrama de blocos.

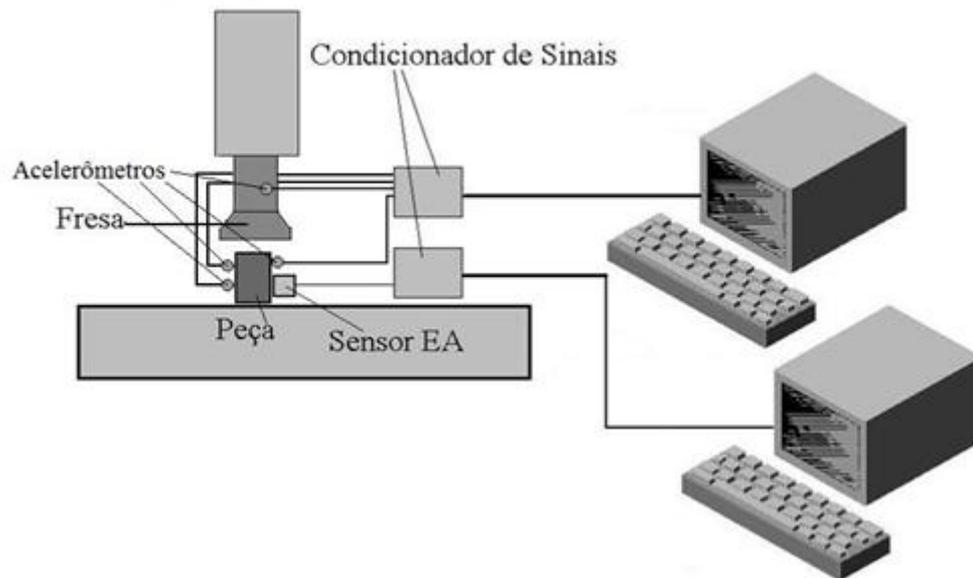


Figura 21: Diagrama de blocos representando todo o sistema de aquisição de sinais.

### 3.5 MEDIÇÃO DE RUGOSIDADE E DESGASTE DE FLANCO

Para a medição de rugosidade usou-se um perfilômetro de contato da marca Taylor Hobson modelo Surtronic 3+ com um *cut-off* de 0,8mm. Para cada passe da ferramenta foram feitas quatro medidas, duas em cada sentido de corte da ferramenta.

Para o monitoramento do desgaste de flanco dos insertos utilizou-se um microscópio ótico com aproximação de quinze vezes da marca Mitutoyo modelo Toolmaker's Microscope TM 15 com cabeçote micrométrico de resolução mínima de 1 $\mu$ m.

### **3.6 SIMULAÇÃO NUMÉRICA COMPUTACIONAL**

Fez-se também a análise modal do conjunto fresa-mandril e do corpo de prova a ser usinado através de um programa de elementos finitos. As peças foram, primeiro desenhadas em um programa CAD, neste caso o SOLIDWORKS, e depois analisadas em HYPERWORKS. Para se fazer a análise modal dos corpos propostos, utilizou-se o software HYPERMESH como pré-processador, o RADIOSS como processador e o HYPERVIEW como pós-processador.

### **3.7 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS**

Em todo o teste, como se usava uma penetração de trabalho de 40mm e a largura da peça era de 100mm, iniciava-se o corte com o sentido concordante, logo depois retornava com a fresa efetuando o sentido discordante e no fim desta operação, trocava-se as arestas por outras de sacrifício e efetuava o último passe gerando assim a superfície completa.

Os testes se dividiram em duas etapas. A primeira avaliou-se a influência do número de insertos no corte. Para isto fez-se a usinagem com um inserto, dois, quatro e seis insertos, sendo que este é o número de arestas cortantes da fresa, sempre equidistantes para minimizar a ação do desbalanceamento. Utilizou-se apenas insertos novos nos seguintes parâmetros de corte: velocidade de corte de 50, 150 e 250m/min com profundidade de corte de 1,25mm, avanço por dente de 0,05mm/rev e uma penetração de trabalho de 40mm. Não foram feitos testes com o avanço por dente de 0,12mm/rev, pois em pré-testes os insertos quebravam

devido à alta solicitação com esse avanço. Adquiriu-se os sinais vibracionais e de emissão acústica nos dois sentidos de corte de cada sentido de corte e se avaliou a evolução dos sinais. Para efeito de minimizar erros fez-se essas aquisições de sinais somente enquanto todo o raio da fresa estava usinando a peça, portanto foram desprezadas a entrada e a saída da ferramenta da peça.

Na segunda etapa, fez-se as usinagens analisando o comportamento dos sinais vibracionais e de emissão acústica no fresamento concordante e discordante com a fresa com seis insertos novos, nos seguintes parâmetros de corte: velocidade de corte de 50, 150 e 250m/min, profundidade de corte de 0,25 e 1,25mm, avanço por dente de 0,05 e 0,12mm/rev, fazendo o faceamento com a metade do diâmetro da fresa ( $a_e = 40\text{mm}$ ) em cada sentido de corte na peça usinada. Após o primeiro passe fez-se, além das aquisições dos sinais, a medição da rugosidade e do desgaste de flanco da ferramenta. Assim como na primeira parte, para efeito de minimizar erros foram feitas essas aquisições de sinais somente enquanto todo o raio da fresa estava usinando a peça, portanto foram desprezados a entrada e a saída da ferramenta da peça.

Após isso, continuou-se usinando o corpo de prova e medindo todos os parâmetros ditos anteriormente a cada dez passes até que o desgaste de flanco ( $VB_B$ ) atingisse 0,3mm ou uma hora de teste, o que acontecesse primeiro. Repetiu-se essa metodologia para todos os parâmetros de corte dito no tópico 3.1 deste capítulo.

## **4 RESULTADOS E DISCUSSÕES**

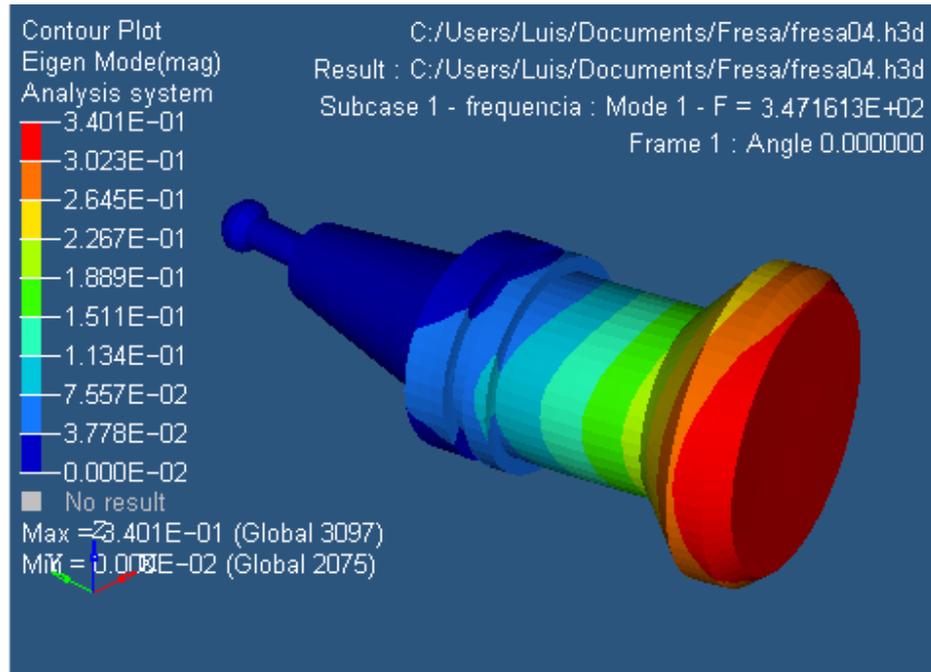
Este capítulo apresentará os resultados obtidos nos testes experimentais demonstrados no capítulo anterior e as devidas discussões sobre eles. Por uma medida didática a separação dos resultados se dará da seguinte forma:

- Modelagem numérica do mandril com a fresa e da peça;
- Avaliação da influência do número de insertos da ferramenta de corte nos sinais;
- Avaliação da influência dos parâmetros de corte nos sinais;
- Avaliação de vida de ferramenta, sua influência nos sinais e na rugosidade da peça;

### **4.1 MODELAGEM NUMÉRICA DO CONJUNTO MANDRIL-FRESA E DA PEÇA**

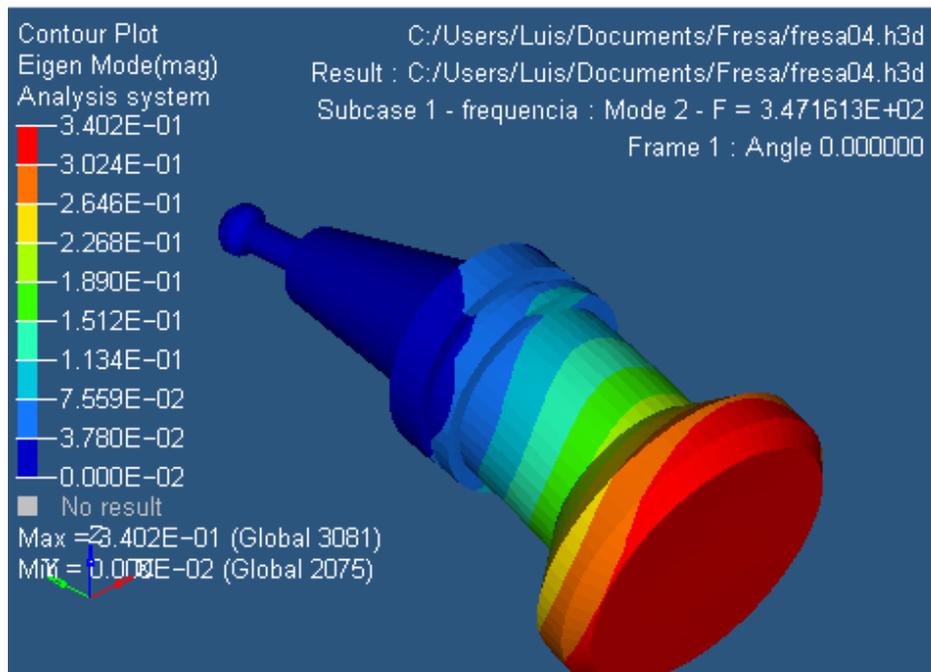
Para o cálculo das frequências naturais do conjunto mandril-fresa eliminarem-se os cortes onde se localizam as arestas de corte e também considerou o conjunto como peça única de aço ABNT 4340 temperado, por motivos de facilidade na elaboração do desenho. A seguir segue os quatro primeiros modos de frequência em que o conjunto é excitado.

Avaliando a Fig. 22, que mostra o primeiro modo de vibração do conjunto mandril-fresa, nota-se que a frequência em que isso ocorre é a 347,613Hz e que o maior deslocamento é de 0,3401mm.



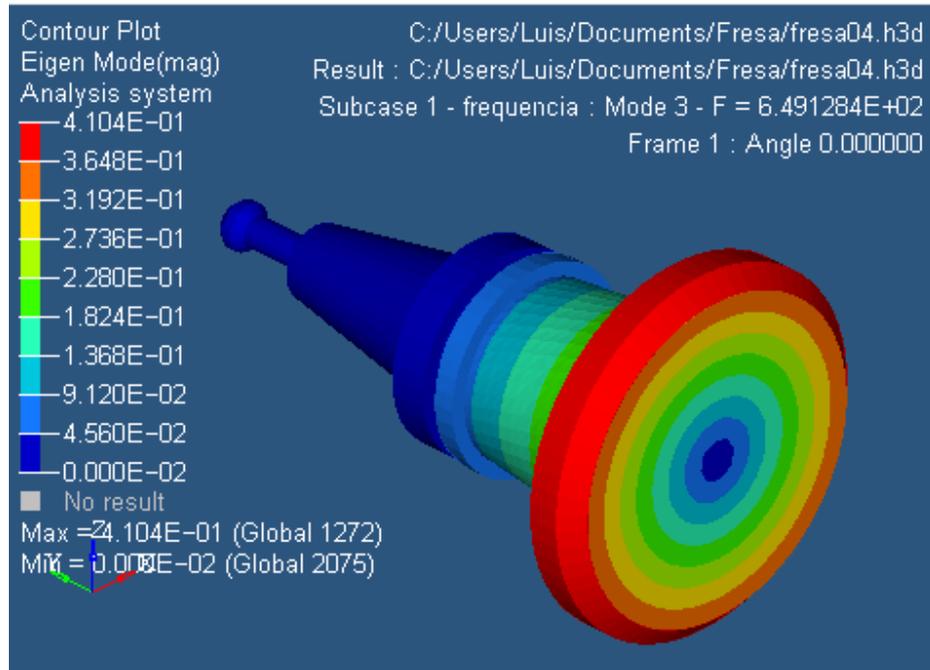
**Figura 22: Primeiro modo de vibração do conjunto mandril-fresa.**

Analisando a Fig. 23, que mostra o segundo modo de vibração do conjunto mandril-fresa, mostra que a frequência em que o conjunto é excitado a 347,1613Hz e que o maior deslocamento imposto por esse modo é de 0,3402mm.



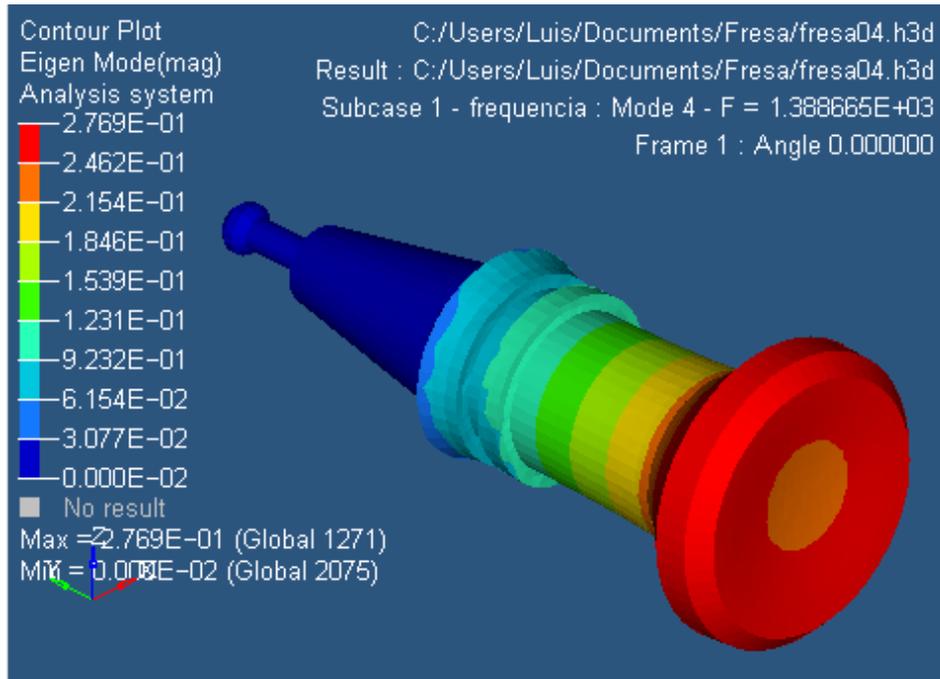
**Figura 23: Segundo modo de vibração do conjunto mandril-fresa.**

Analisando a Fig. 24, que mostra o terceiro modo de vibração do conjunto mandril-fresa, nota-se que a frequência em que esse modo é excitado é de 649,1284Hz e que o maior deslocamento imposto é de 0,4104mm.



**Figura 24: Terceiro modo de vibração do conjunto mandril-fresa.**

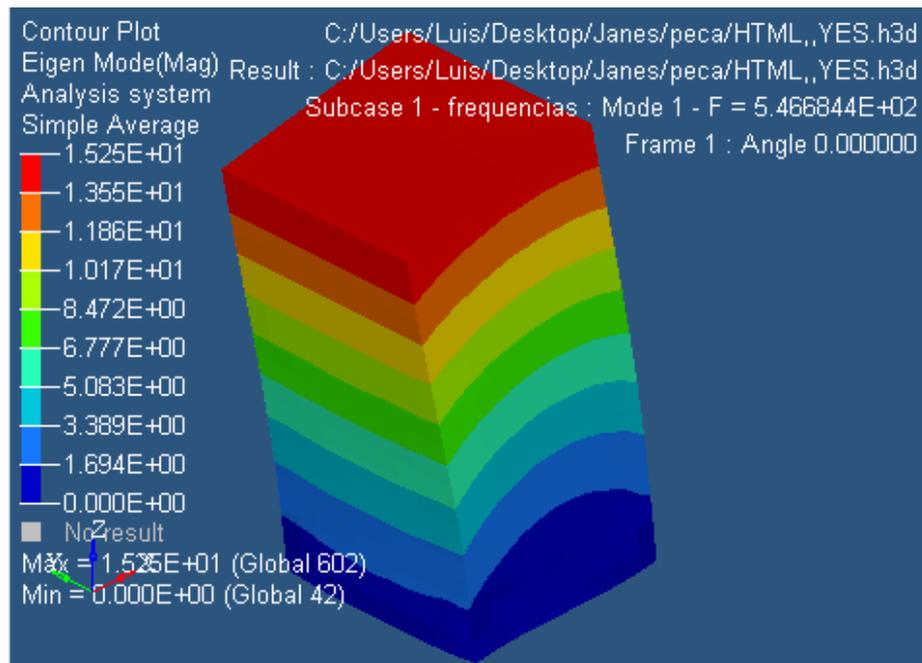
Avaliando agora a Fig. 25, que mostra o quarto modo de vibração do conjunto mandril-fresa, nota-se que a frequência que o conjunto é excitado é 1388,665Hz e o maior deslocamento imposto é de 0,2769mm.



**Figura 25: Quarto modo de vibração do conjunto mandril-fresa.**

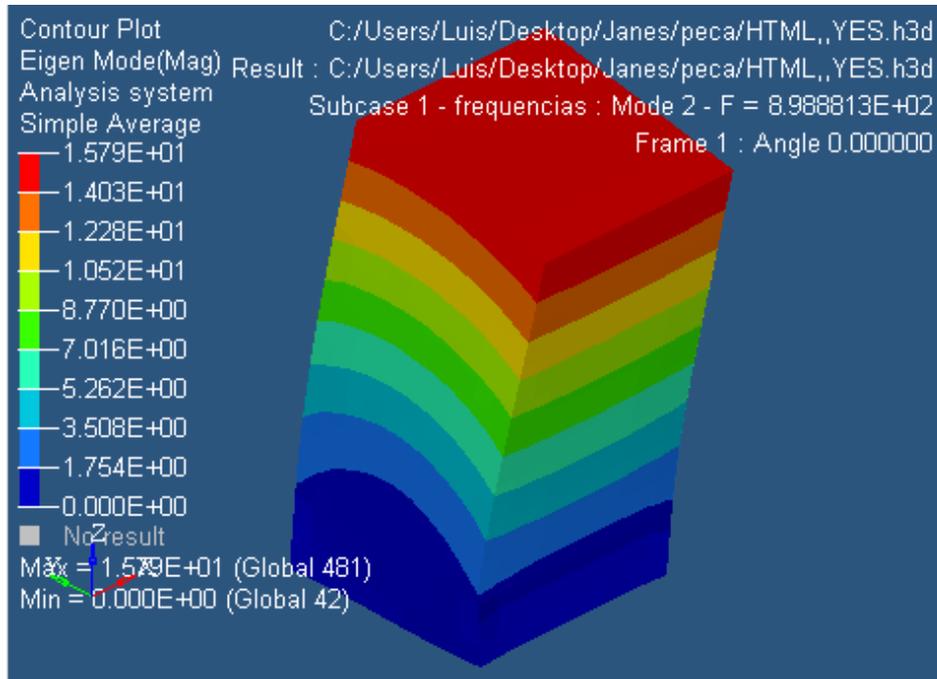
Os quatro modos de vibrações da peça a ser usinada que é de aço normalizado ABNT 4140 são considerados a seguir.

Avaliando a Fig. 26, que mostra o primeiro modo de vibração da peça, nota-se que a frequência em que isso ocorre é a 546,684Hz e que o maior deslocamento é de 15,25mm.



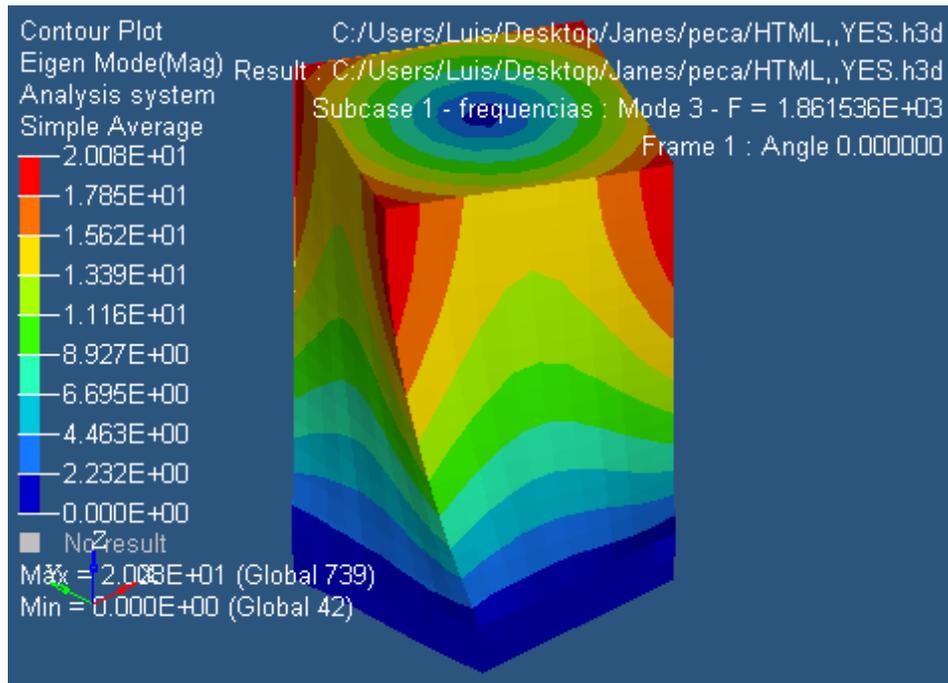
**Figura 26: Primeiro modo de vibração do corpo de prova.**

Analisando a Fig. 27, que mostra o segundo modo de vibração da peça, nota-se que a frequência em que ela é excitada é de 898,881Hz e que o maior deslocamento imposto por esse modo é de 15,79mm.



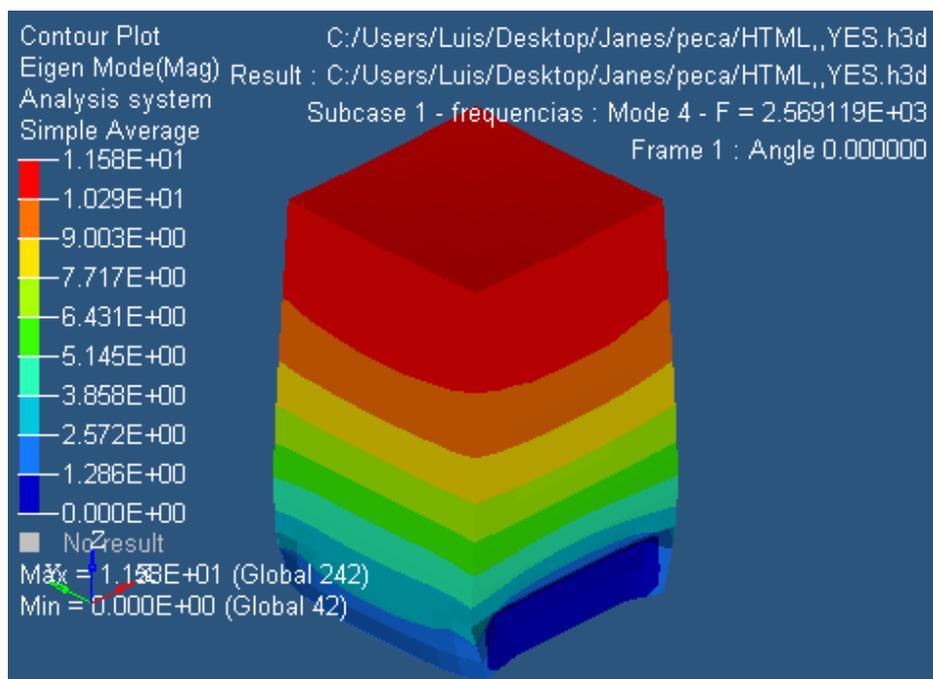
**Figura 27: Segundo modo de vibração do corpo de prova.**

Analisando a Fig. 28, que mostra o terceiro modo de vibração da peça, nota-se que a frequência em que esse modo é excitado é de 1861,536Hz e que o maior deslocamento imposto é de 20mm.



**Figura 28: Terceiro modo de vibração do corpo de prova.**

Avaliando agora a Fig. 29, que mostra o quarto modo de vibração da peça, nota-se que a frequência que ela é excitada é de 2569,119Hz e o maior deslocamento imposto é de 11,58mm.



**Figura 29: Quarto modo de vibração do corpo de prova.**

Abaixo segue uma tabela (Tab. 4) resumindo os modos de vibrações do conjunto mandril-fresa e do corpo de prova.

**Tabela 4: Modos de vibração do conjunto mandril-fresa e do corpo de prova.**

<b>Modo de vibração</b>	<b>Frequência natural (Hz)</b>
Primeiro modo do conjunto mandril-fresa	347,613Hz
Segundo modo do conjunto mandril-fresa	347,613Hz
Terceiro modo do conjunto mandril-fresa	649,1284Hz
Quarto modo do conjunto mandril-fresa	1388,665Hz
Primeiro modo do corpo de prova	546,684Hz
Segundo modo do corpo de prova	898,881Hz
Terceiro modo do corpo de prova	1861,536Hz
Quarto modo do corpo de prova	2569,119Hz

## **4.2 AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO NÚMERO DE INSERTOS DA FERRAMENTA DE CORTE NOS SINAIS**

### **4.2.1 Sinais de Emissão Acústica**

Nesta primeira parte dos testes, o objetivo foi saber qual o grau de acuidade dos sinais de emissão acústica e de vibrações eram capazes de captar.

Avaliando a Fig. 30, que é a STFT (do inglês Short-time Fourier Transform) do sinal de emissão acústica captado pela usinagem do corpo de prova com um inserto de corte a uma velocidade de corte de 50m/min, uma profundidade de corte de 1,25mm e um avanço por dente de 0,05mm/rev, nota-se que o sinal do corte discordante apresenta a caracterização exata da saída da ferramenta do corte, uma vez que no corte discordante a maior seção de corte é obtida no final do passe do inserto pela peça. Já o corte concordante não demonstrou o

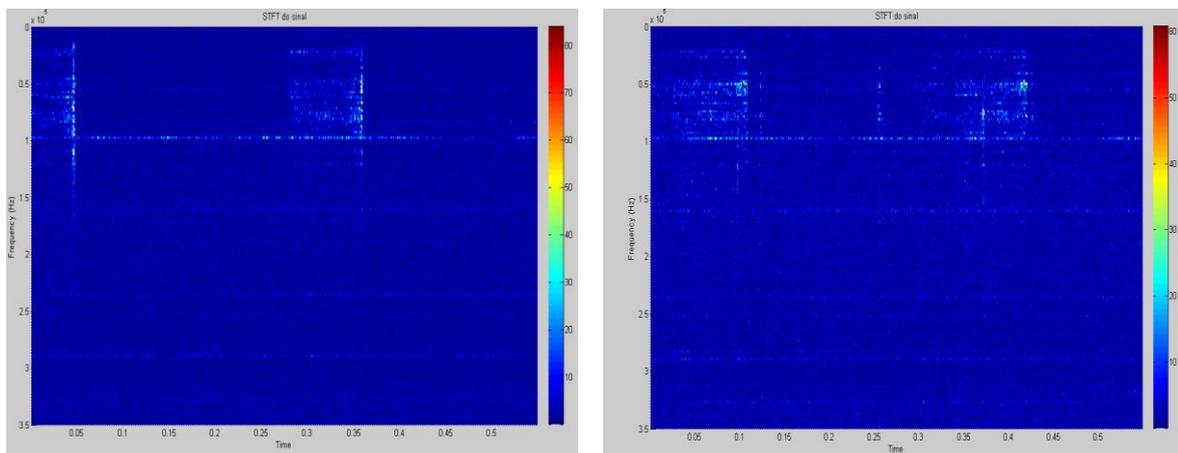
ponto exato de início do corte, o que o caracteriza. Aqui vale observar também que o corte discordante além de excitar uma maior faixa de frequência (de 23kHz a 150kHz) suas amplitudes foram maiores, como pode ser observado pela barra de cores.

Fazendo o cálculo de quantas vezes o inserto corta a peça em meio segundo, achou-se o valor de 1,65 voltas, que é explicado pela fórmula abaixo:

$$f = a * \frac{n}{60} * 0,5 \quad (4.1)$$

sendo  $n$  a rotação da fresa em rpm e  $a$  o número de arestas no corte.

Assim, pode-se contar em ambos os gráficos um passe inteiro e uma parte de outro, caracterizando a excitação formada pelos passes.



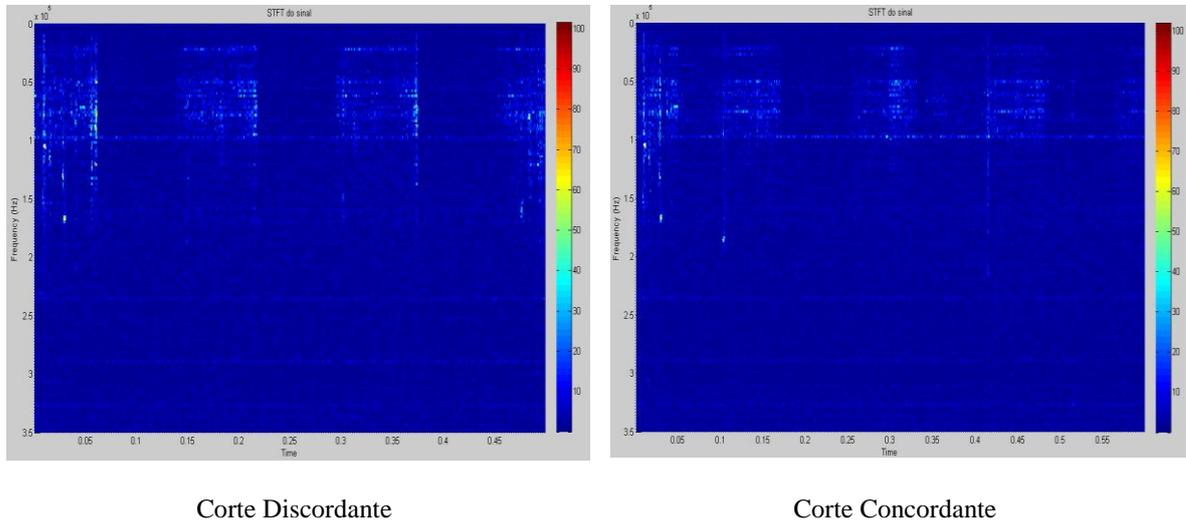
Corte Discordante

Corte Concordante

**Figura 30: STFT do sinal de emissão acústica com um inserto de corte na velocidade de corte de 50m/min.**

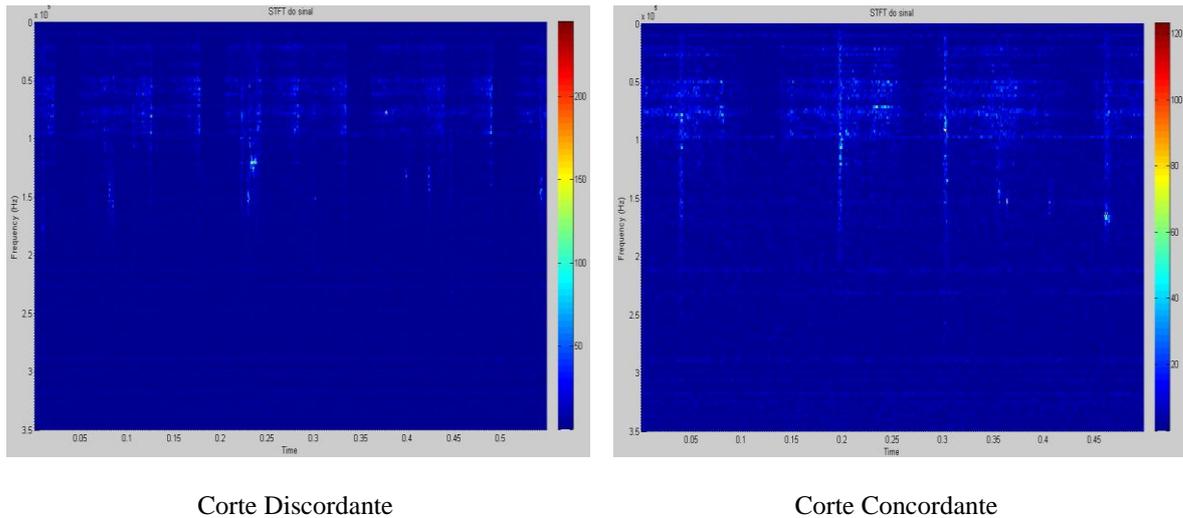
Avaliando a STFT do sinal de emissão acústica obtida na usinagem utilizando dois insertos contrapostos na velocidade de corte de 50 m/min (Fig. 31), vê-se que, assim como na figura anterior (Fig. 30), o fim do corte no sentido discordante está bem caracterizado. No sentido de corte concordante nota-se a aparição de uma faixa de excitação nos dois passes da mesma aresta, quando a mesma entra para efetuar o corte, isso se deve ao desbalanceamento das ferramentas em relação à altura delas. Nota-se que as amplitudes e as faixas de frequências (10kHz a 180kHz) dos dois sentidos de corte são muito parecidas, mas

no corte discordante ocorre uma maior área com altas amplitudes, além de maiores valores pontuais. Além disso, aplicando a fórmula 4.1, acha-se um valor 3,31, o que pode ser visto nos dois gráficos.



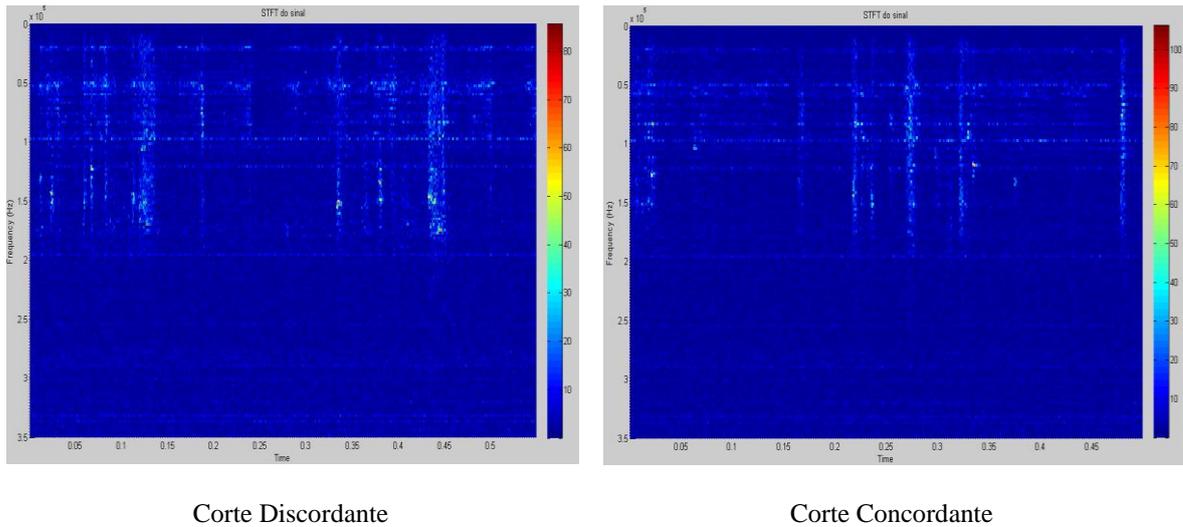
**Figura 31: STFT do sinal de emissão acústica com dois insertos de corte na velocidade de corte de 50m/min.**

Analisando, agora, a Fig. 32, que mostra a STFT do sinal de emissão acústica de corte oriundo da fresa com quatro insertos contrapostos na velocidade de corte de 50m/min, nota-se que os sinais do corte discordante apresentam uma amplitude maior que os do concordante. Pode-se notar também que a excitação dos insertos começam a se unir e já não se consegue mais distinguir tão claramente os 6,63 cortes ocorridos em 0,5 segundo. Isso ocorreu devido ao total de insertos na fresa ser seis e do modo como foi analisado agora (quatro insertos), em uma pequena faixa de tempo a peça fica sem ser usinada e desse modo sem excitação, que nos gráficos tem um tom azul mais escuro. Também notam-se mais faixas temporais de excitações em uma grande faixa de frequência além das encontradas pela entrada e saída da ferramenta no corte em ambos os sentidos.



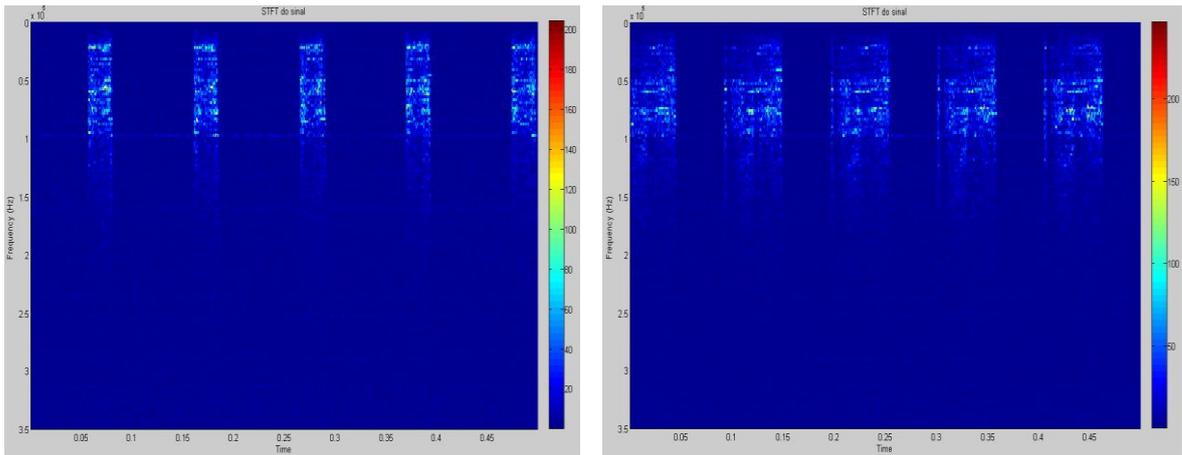
**Figura 32: STFT do sinal de emissão acústica com quatro insertos de corte na velocidade de corte de 50m/min.**

Avaliando a Fig. 33, que representa a STFT do corte com seis insertos na velocidade de corte de 50m/min, nota-se o aparecimento de excitações mais fortes que outros. Isso se dá pelo fato dos insertos da fresa não ter sido balanceados tendo alturas diferentes. Aqui também apareceu uma característica atípica, onde o sinal do sentido concordante apresentou maior amplitude que o do sentido discordante. Como nos gráficos com quatro insertos as frequências características começam a se unirem (23kHz, 50kHz e 100kHz), isso se deve ao fato de que a energia do corte da aresta anterior ainda está se deslocando na peça quando a outra aresta já inicia o outro corte, excitando novamente a peça e despejando mais energia nela. Sabe-se que assim como a FFT, que considera o tempo como estacionário, a STFT (que nada mais é que uma FFT que considera “janelas” de tempo) pode ser relacionada diretamente com a energia dispensada no processo, uma vez que quanto maior é a energia do processo, maiores serão as amplitudes da FFT e conseqüentemente maiores serão as amplitudes da STFT.



**Figura 33: STFT do sinal de emissão acústica com seis insertos de corte na velocidade de corte de 50m/min.**

Analisando agora a STFT dos sinais de emissão acústica produzidos pela usinagem com a velocidade de corte de 150m/min utilizando uma aresta de corte (Fig. 34), notam-se cinco cortes em ambos os sentidos de corte, isso é exatamente a quantidade de arestas passadas em meio segundo nessa velocidade de corte. Com o aumento da velocidade de corte nota-se que as frequências próximas de 23kHz, 50kHz, 75kHz e 100kHz apresentam maiores amplitudes em ambos os sinais. Vê-se que a amplitude dos sinais do corte concordante são maiores e excitados por mais tempo que os do corte discordante. Ainda pela Fig. 34 observa-se claramente o momento de entrada da ferramenta no corte concordante, que é onde ele se depara com a maior área de material a retirar.

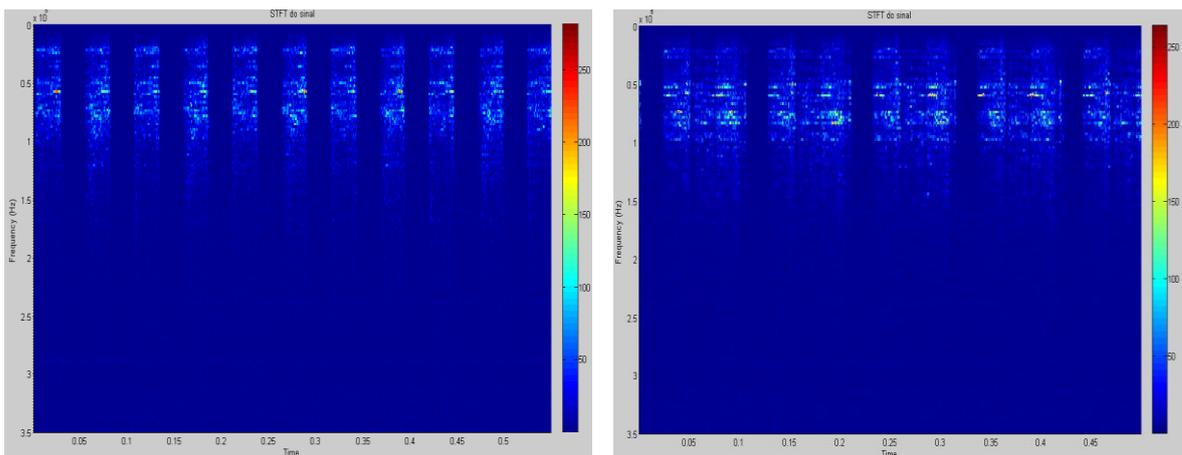


Corte Discordante

Corte Concordante

**Figura 34: STFT do sinal de emissão acústica com um inserto de corte na velocidade de corte de 150m/min.**

Avaliando a Fig. 35, que é a STFT dos sinais produzidos pelo fresamento com duas arestas de corte com velocidade de corte de 150m/min, nota-se que os sinais do corte no sentido discordante apresentam maiores amplitudes, como pode ser visto por meio da aba de cores. Vê-se também que, assim como nos gráficos produzidos pelo corte com apenas uma aresta cortante, o sinal do corte concordante é excitado por um período de tempo maior, chegando neste caso até a unir os sinais das duas arestas cortantes.

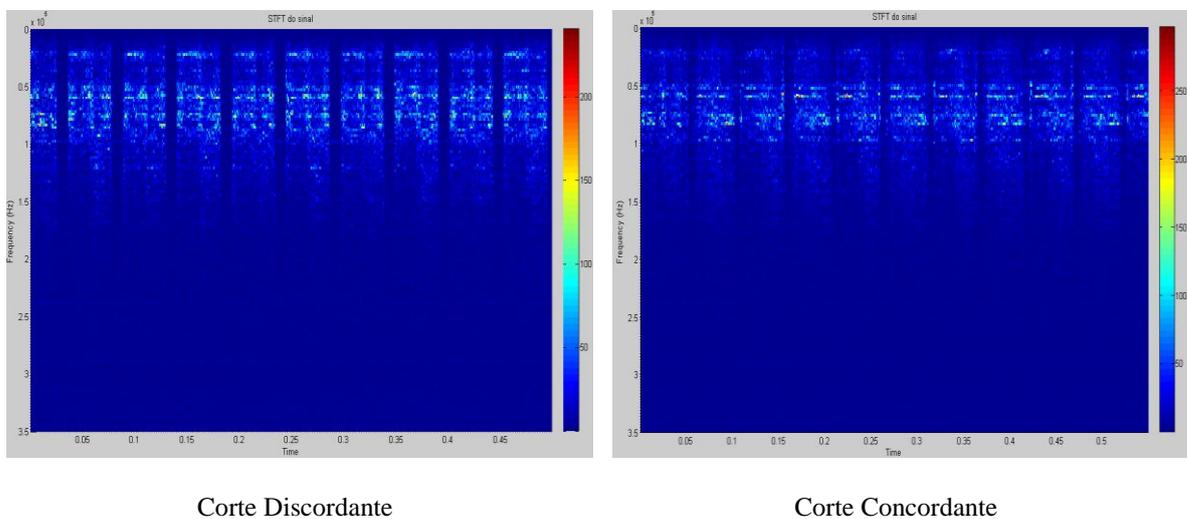


Corte Discordante

Corte Concordante

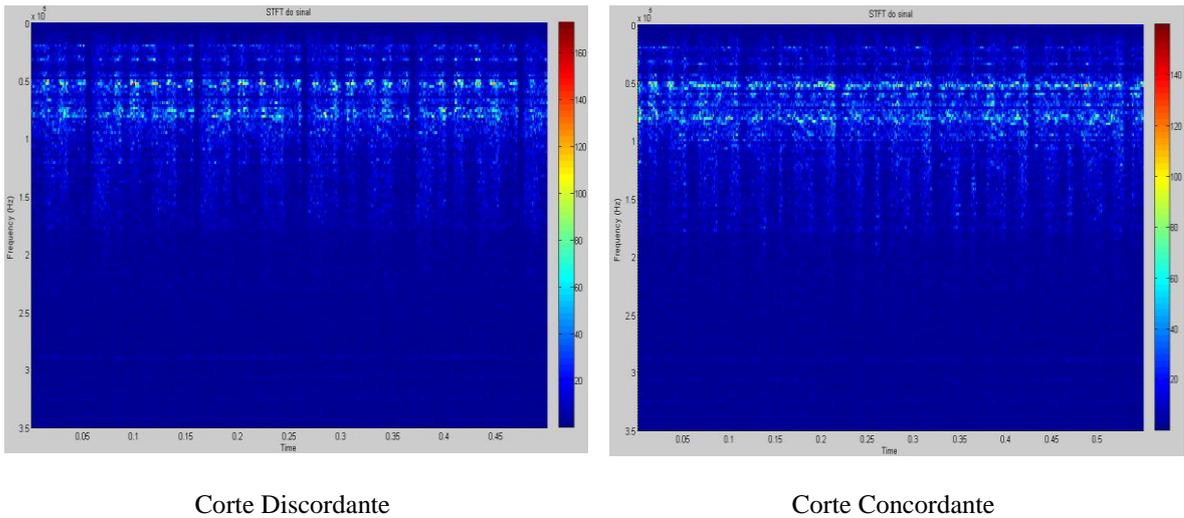
**Figura 35: STFT do sinal de emissão acústica com dois insertos de corte na velocidade de corte de 150m/min.**

Analisando a Fig. 36, que é a STFT do sinal produzido com quatro insertos na velocidade de corte de 150m/min, nota-se assim como na Fig. 35, os sinais dos insertos se unem tanto no sentido de corte discordante como no sentido de corte concordante. Analisando o corte discordante, nota-se claramente a presença de dois excitamentos simultâneos e um repouso e assim sucessivamente. Isto ocorreu devido à disposição dos insertos na ferramenta. No corte utilizando quatro arestas, observou a não presença de um maior tempo de excitação do corte concordante em relação ao corte discordante.



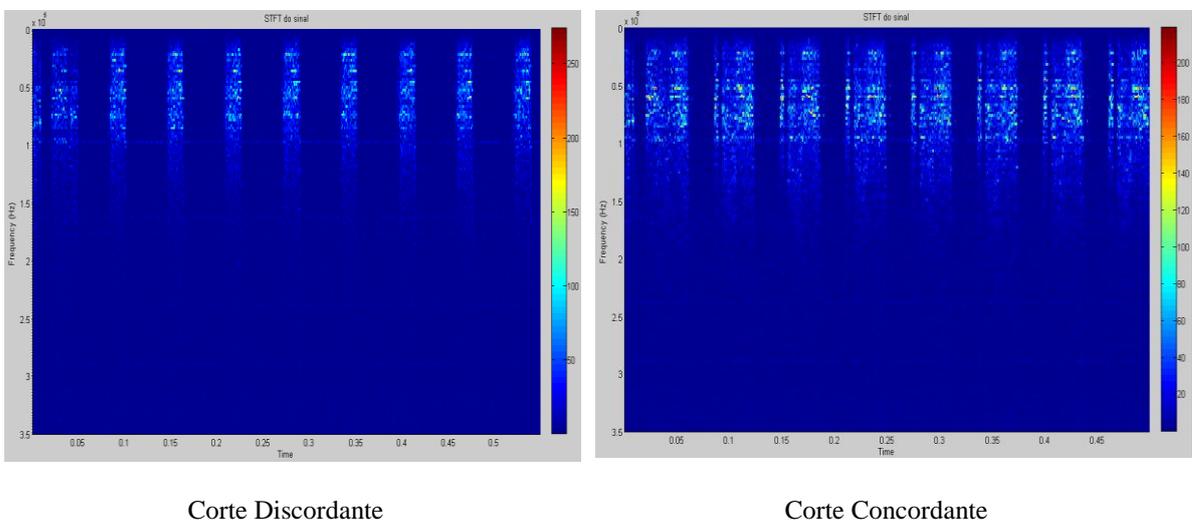
**Figura 36: STFT do sinal de emissão acústica com quatro insertos de corte na velocidade de corte de 150m/min.**

Avaliando a Fig. 37 que demonstra o corte oriundo do fresamento com seis insertos de corte com uma velocidade de corte de 150m/min, nota-se que no corte discordante, os sinais apresentam maior amplitude. Vê-se principalmente no corte discordante, que é o que apresenta um sinal mais curto ao longo do tempo, que os insertos da fresa não estão balanceados gerando “buracos” de milésimos de segundos no qual não existe excitação dos sinais. Também nota-se que as frequências mais excitadas no corte do aço ABNT 4140 são as de 23kHz, 50kHz e 75kHz nessa velocidade de corte.



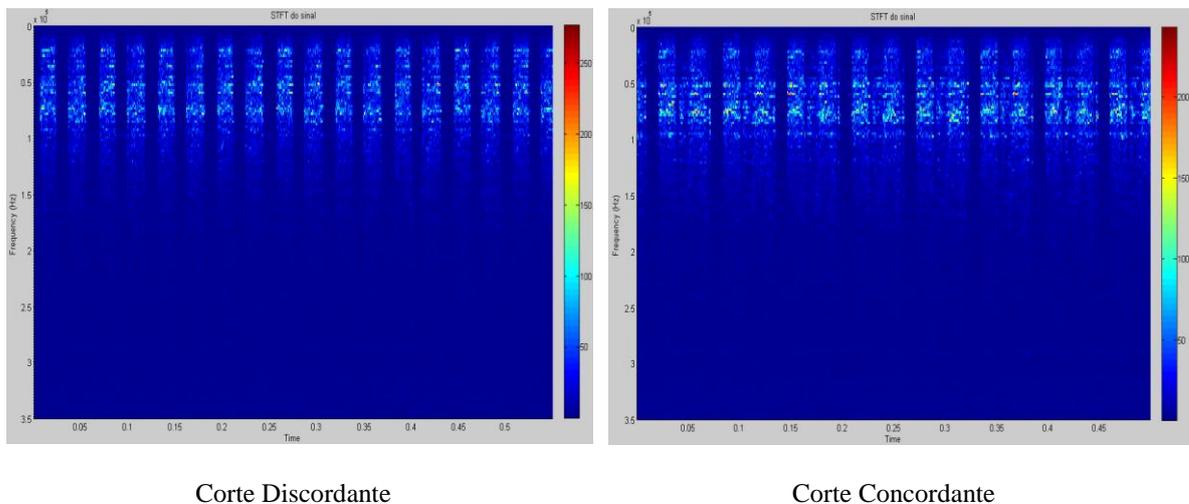
**Figura 37: STFT do sinal de emissão acústica com seis insertos de corte na velocidade de corte de 150m/min.**

Pode-se avaliar visualizando a Fig. 38, que demonstra a STFT do sinal produzido no fresamento com um inserto de corte na velocidade de 250m/min, que assim como nas outras velocidades de corte, o sinal produzido pelo sentido de corte concordante é excitado por mais tempo que no corte discordante. Vê-se também que as amplitudes dos sinais no corte discordante são maiores que no corte concordante. Também nota-se que as frequências de maiores amplitudes são as de 23kHz, 50kHz e 75kHz, o que leva a crer que essas frequências são as frequências de excitação do aço ABNT 4140. Nota-se também claramente a entrada da ferramenta no corte concordante, que gera um pico de excitação em várias frequências.



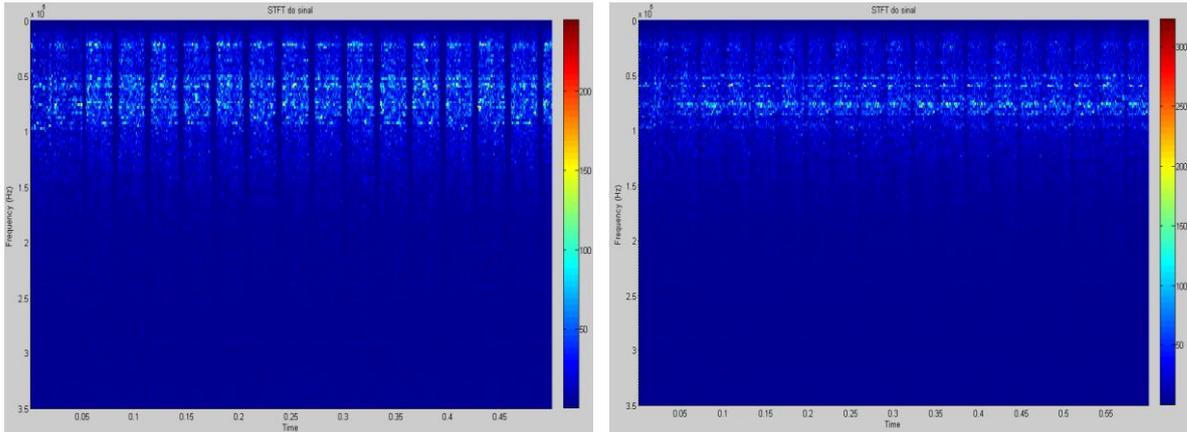
**Figura 38: STFT do sinal de emissão acústica com um inserto de corte na velocidade de corte de 250m/min.**

Analisando a Fig. 39, que demonstra a STFT do sinal de emissão acústica no fresamento do aço utilizando dois insertos, nota-se que assim como nas outras velocidades de corte, os sinais do sentido de corte concordante excitam por mais tempo e, como nos outros com dois insertos, o sinal de um inserto se une ao de outro. Aqui também, como nos outros sinais monitorados, os sinais do corte discordante têm amplitudes maiores que o corte concordante.



**Figura 39: STFT do sinal de emissão acústica com dois insertos de corte na velocidade de corte de 250m/min.**

Analisando a Fig. 40, que é a STFT do sinal do fresamento do aço com quatro insertos, nota-se que os sinais do sentido de corte concordante, assim como nas outras velocidades de corte, apresentam os excitamentos por mais tempo, chegando a unir o sinal de um inserto com o próximo. Aqui aconteceu um fato interessante que os sinais do corte concordante apresentaram alguns picos com alta amplitude, deixando os sinais maiores que o corte discordante, fato que pode ser explicado pelo choque de cavaco com o sensor.

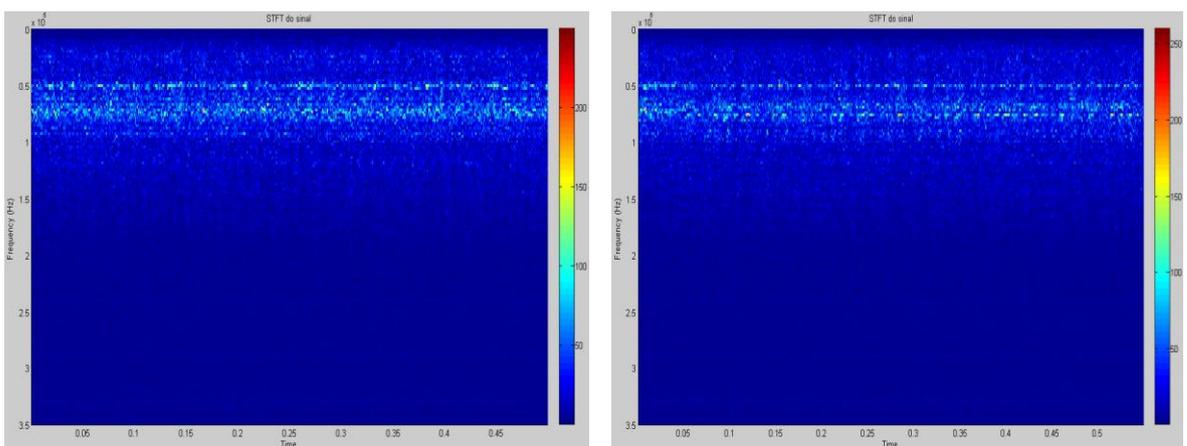


Corte Discordante

Corte Concordante

**Figura 40: STFT do sinal de emissão acústica com quatro insertos de corte na velocidade de corte de 250m/min.**

Avaliando a Fig. 41, que demonstra a STFT do sinal do fresamento obtido com seis insertos, nota-se que em ambos os sentidos de corte já não dá mais para identificar o excitação de cada inserto ao longo do tempo, isso dada a alta velocidade de corte ocorre que duas arestas estão simultaneamente em corte, fazendo com que os sinais se juntem. Neste corte, nota-se também que a amplitude dos sinais são praticamente a mesma, ocorrendo alguns picos de maior amplitude no concordante, que pode ser explicado pelo fato de cavacos atingirem o sensor.



Corte Discordante

Corte Concordante

**Figura 41: STFT do sinal de emissão acústica com seis insertos de corte na velocidade de corte de 250m/min.**

Fazendo a análise do experimento, variando o número de insertos no corte, notou-se que, no sentido de corte concordante, os sinais são excitados por mais tempo que o corte discordante. Também pode-se dizer que as amplitudes dos sinais do corte discordante apresentaram-se maiores que as do corte concordante em sua maior parte, isso se deve ao fato de o corte concordante apresentar maiores temperaturas de corte (TOH, 2005) o que facilita o corte e assim diminui a amplitude dos sinais. Notou-se também que aumentando o número de insertos, os sinais de cada inserto tendem a se unirem, uma vez que a peça é excitada quase que em todo o passe da fresa. Pode-se notar que as frequências de maiores amplitudes nos cortes foram de 23kHz, 50kHz, 75kHz e 100kHz, levando a crer que essas são as frequências de excitação do aço ABNT 4140.

#### 4.2.2 Sinais de Vibrações

Analisando a Fig. 42, que demonstra os gráficos de tensão em função da frequência do acelerômetro localizado no eixo-árvore na coordenada y capturados com a uma velocidade de corte de 50m/min variando o número de insertos cortantes, nota-se que as principais frequências excitadas são os harmônicos da frequência de trabalho da fresa ( $f_t$  nos gráficos), que é dada pela fórmula abaixo:

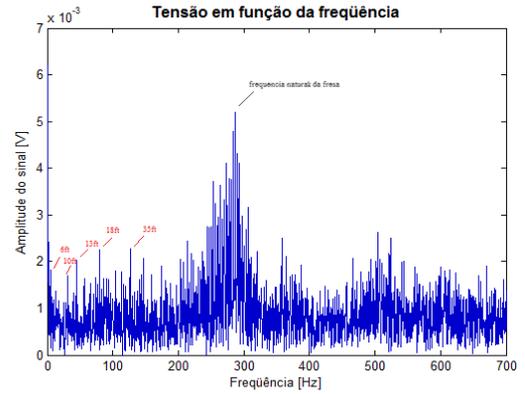
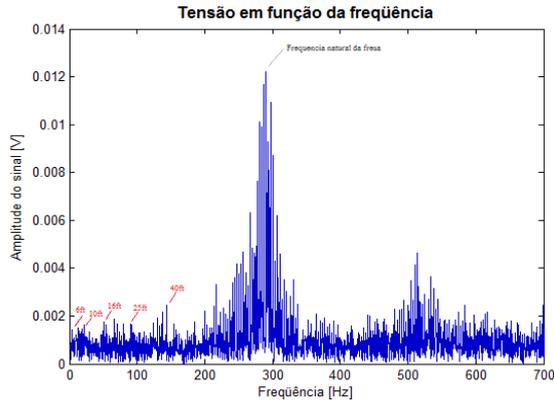
$$f_t = \frac{n * N_T}{60} \text{ (Hz)} \quad (4.2)$$

onde  $n$  é a rotação do eixo-árvore e  $N_T$  é o número de insertos presentes na fresa (ORHAN et al.,2007).

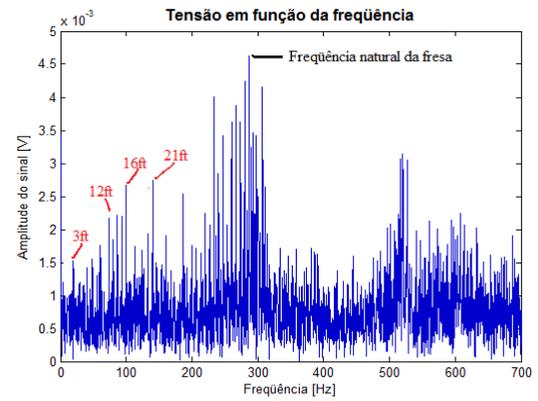
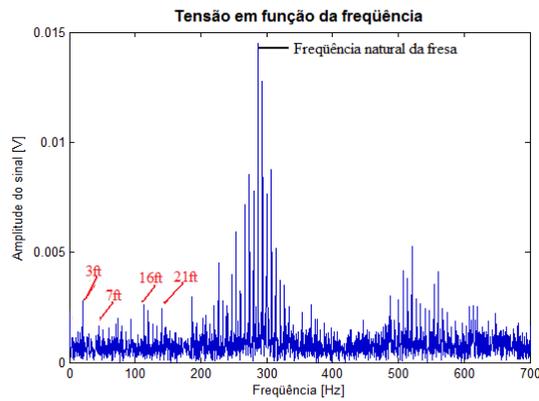
Vê-se também que próximo a 287Hz a amplitude do sinal de ambos os sentidos de corte aumenta. Isso se dá devido à frequência natural da fresa, que calculada por meio do

método de elementos finitos deu 347,12Hz, se acople com os harmônicos da frequência de trabalho próximos a essa frequência fazendo com que eles obtenham maior energia. Também vê-se que os sinais do sentido de corte concordante apresentam menores amplitudes que o do corte discordante, excetuando os sinais com seis insertos em que nota-se as amplitudes dos dois sentidos praticamente iguais não podendo definir qual é maior a olho nu.

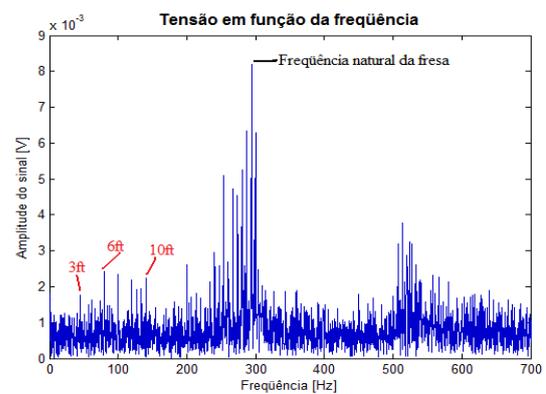
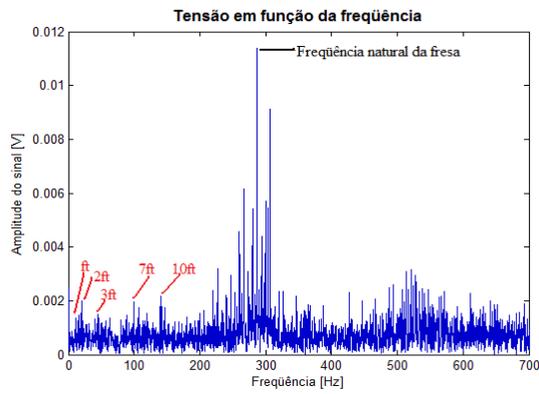
As escalas dos gráficos vibracionais na coordenada y não estão em uma escala padrão, uma vez que estes sinais variam bastante sua amplitude devido ao sentido de corte e a solicitação. Optou-se então por demonstrá-los em escalas diferentes de modo a contemplar a magnitude de todo o sinal.



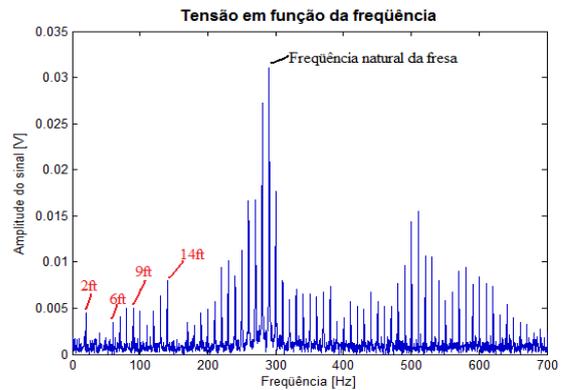
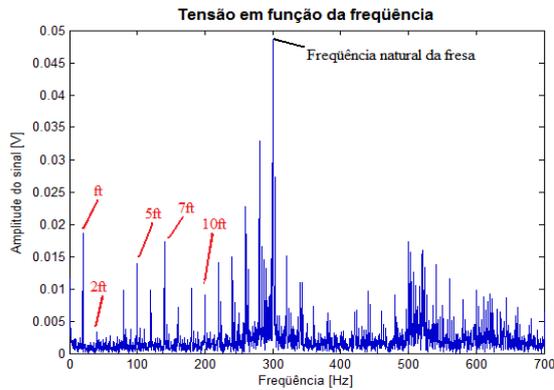
1 inserto



2 insertos



4 insertos



6 insertos

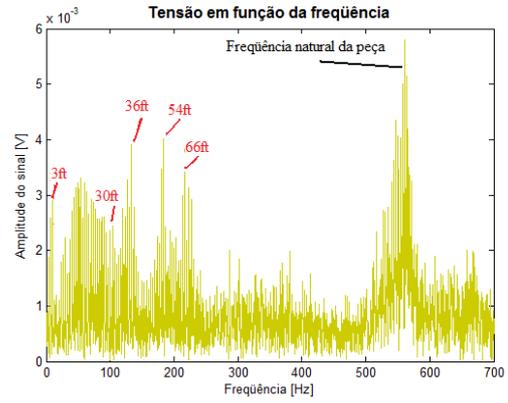
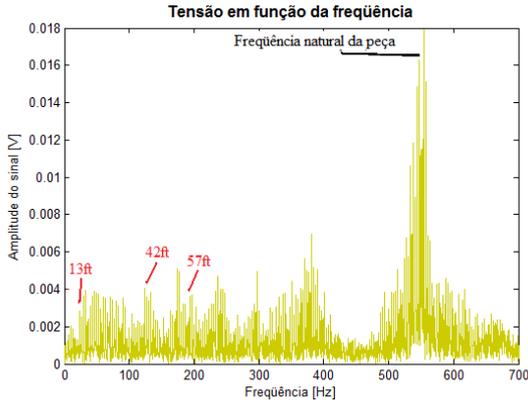
Corte Discordante

Corte Concordante

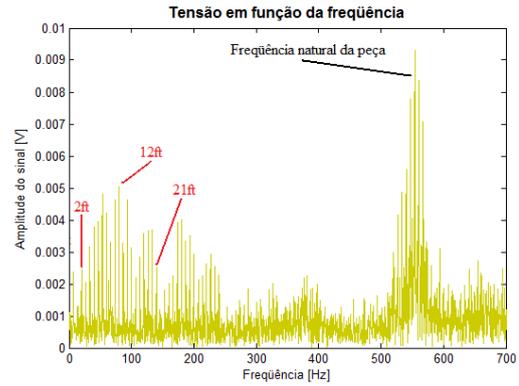
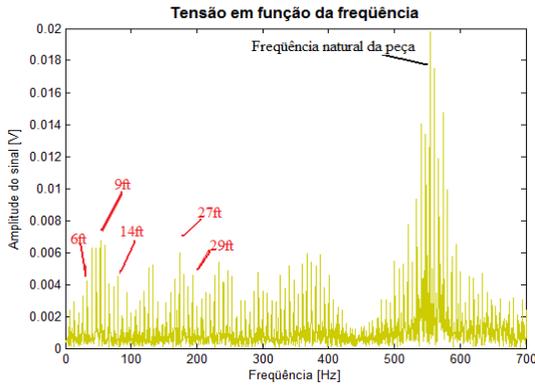
Figura 42: Espectro de frequência dos sinais de vibrações do eixo-árvore (coordenada y) variando o número de insertos na usinagem com velocidade de corte ( $v_c$ ) de 50m/min.

Analisando a Fig. 43, demonstra os espectros de frequência dos sinais da peça (coordenada y) na usinagem com velocidade de corte de 50m/min variando o número de insertos, nota-se que as frequências excitadas na peça são a frequência de trabalho da fresa e seus harmônicos (mostrada nos gráficos pela sigla ft). Picos na faixa de 550Hz mostram também a frequência natural da peça usinada. Nota-se também que o corte discordante gera maiores vibrações na peça, uma vez que suas amplitudes são maiores nas mesmas frequências comparadas ao corte concordante.

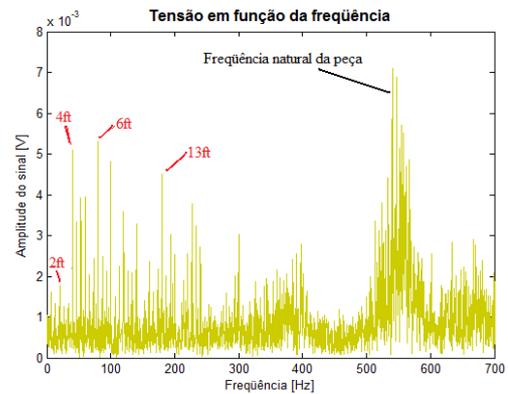
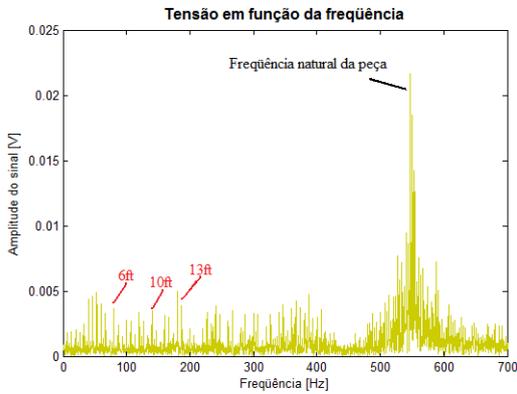
Analisando os últimos gráficos da Fig. 43, que demonstra os espectros de frequência da usinagem captada na peça (coordenada y) com seis insertos cortantes, nota-se que as frequências excitadas são a frequência de trabalho (19,92Hz) e seus harmônicos e também a frequência natural da peça. , que neste caso teve sua amplitude maior que a própria frequência natural, que pode ser explicado pelo fato da peça estar sendo excitada por uma máquina cíclica. Vale ressaltar que devido ao corpo de prova ter sua altura variável, a sua frequência natural também irá alterar. No caso deste ensaio, como o corpo de prova tinha uma altura de 232mm, sua frequência natural diminuiu. Nota-se também que as amplitudes são praticamente as mesmas em ambos os sentidos de corte.



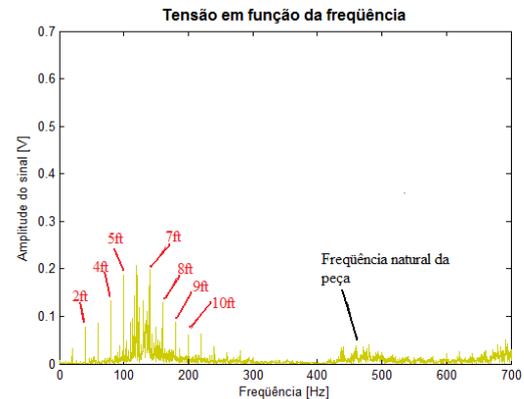
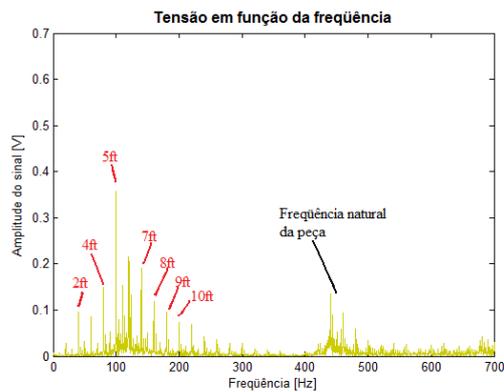
**1 inserto**



**2 insertos**



**4 insertos**



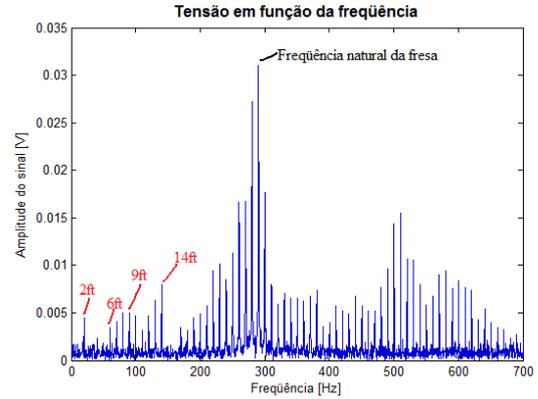
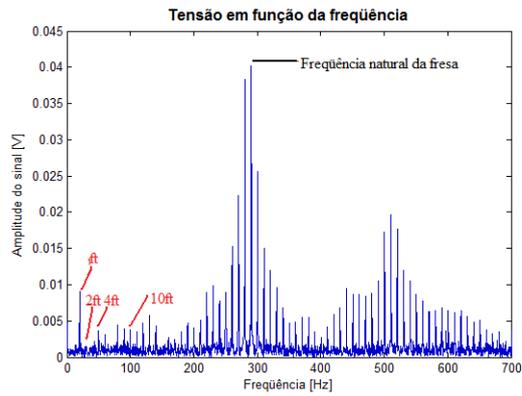
**6 insertos**

**Corte Discordante**

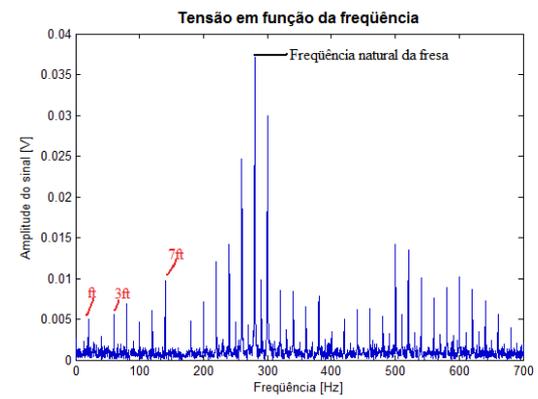
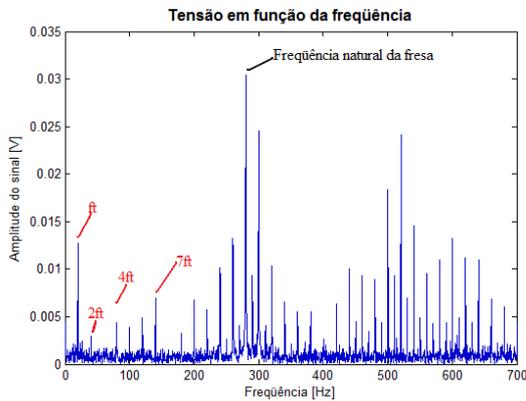
**Corte Concordante**

**Figura 43: Espectro de frequência dos sinais de vibrações da peça (coordenada y) na usinagem com velocidade de corte ( $v_c$ ) de 50m/min.**

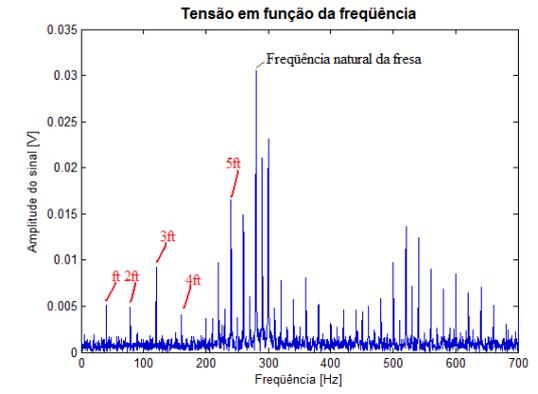
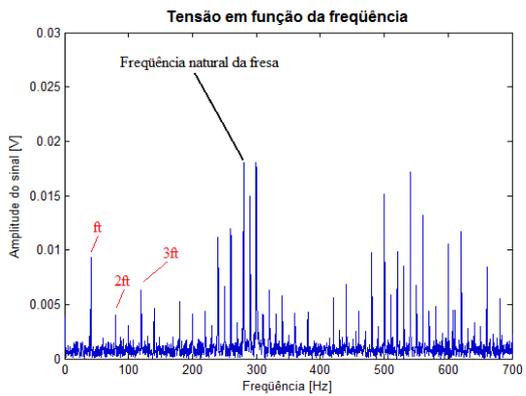
Analisando a Fig. 44, que demonstra os espectros de frequência dos sinais do eixo-árvore (coordenada y) na usinagem com velocidade de corte de 150m/min variando o número de insertos, mostra que os sinais oriundos do corte discordante apresentam maior amplitude que os do corte concordante. Vê-se também que as frequências excitadas são a frequência de trabalho da fresa e seus harmônicos e a frequência natural do conjunto mandril-fresa (287Hz). Analisando os gráficos com quatro insertos da Fig. 44, nota-se que o corte concordante apresentou maior amplitude que o corte discordante destoando do resto dos testes.



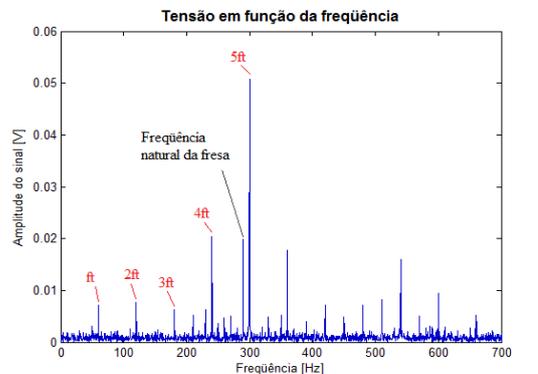
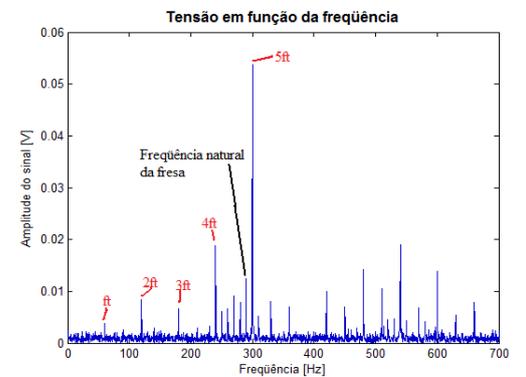
1 inserto



2 insertos



4 insertos



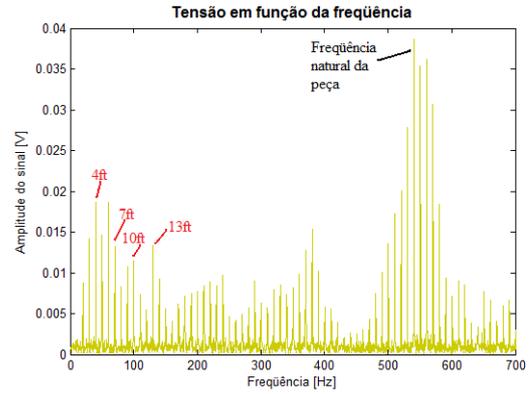
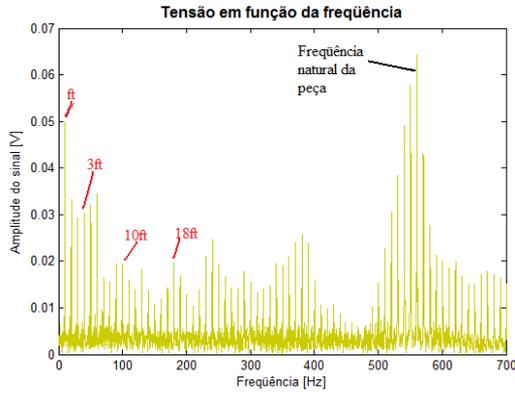
6 insertos

Corte Discordante

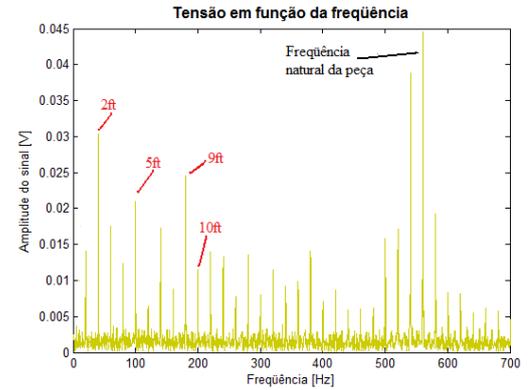
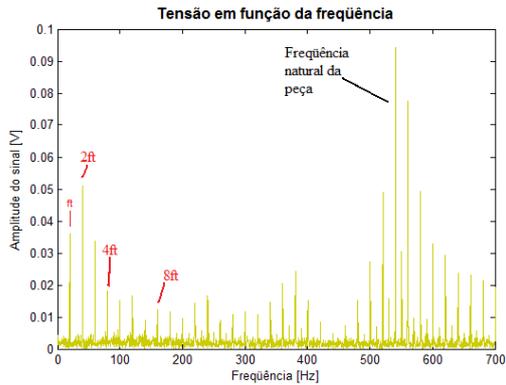
Corte Concordante

Figura 44: Espectro de frequência dos sinais de vibrações do eixo-árvore (coordenada y) variando o número de insertos na usinagem com velocidade de corte ( $v_c$ ) de 150m/min.

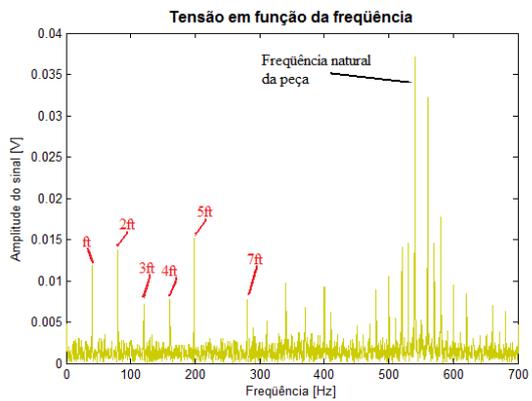
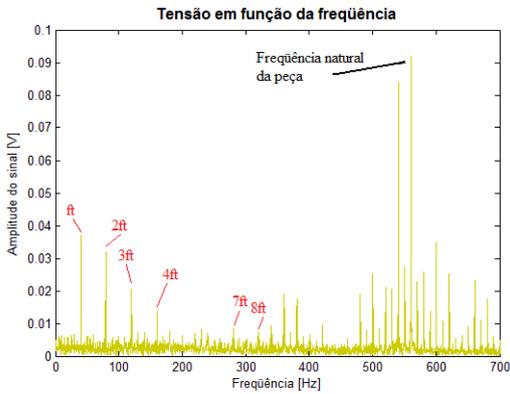
Avaliando a Fig. 45, que demonstra os espectros de frequência da usinagem captada na peça (coordenada y) na velocidade de corte de 150m/min variando o número de insertos cortantes, assim como nos outros canais (Figs. IX e X do apêndice A), nota-se que as frequências excitadas são a frequência de trabalho da fresa e seus harmônicos. Nota-se também que as frequências próximas de 540Hz, que é a frequência natural do corpo de prova, se acoplam com os harmônicos da frequência de trabalho fazendo aumentar as amplitudes nessa faixa. Vê-se que as amplitudes do corte discordante são maiores que o corte concordante.



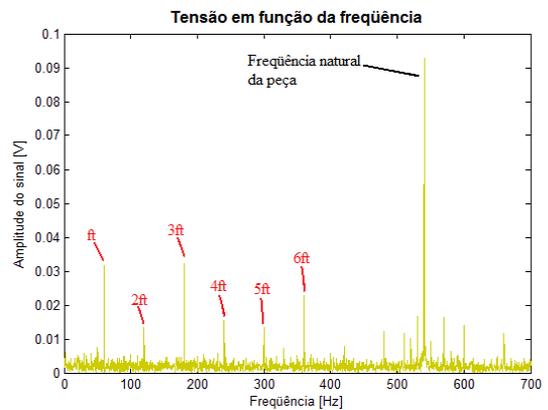
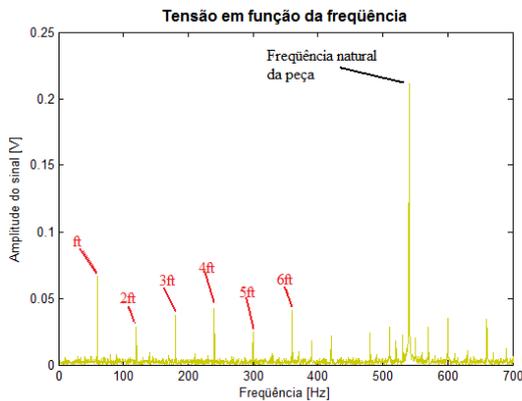
**1 inserto**



**2 insertos**



**4 insertos**



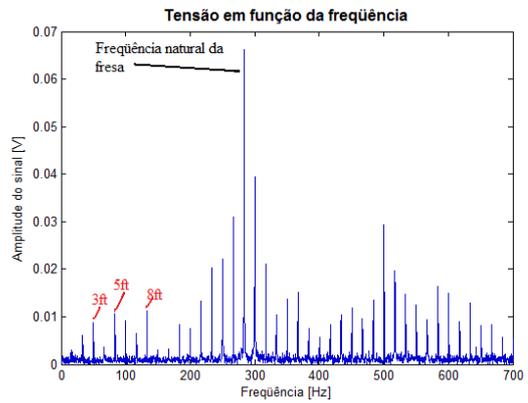
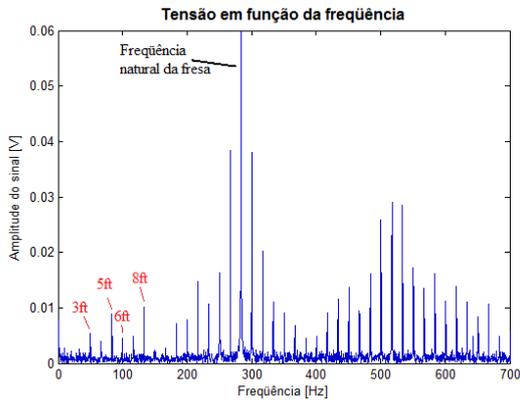
**6 insertos**

**Corte Discordante**

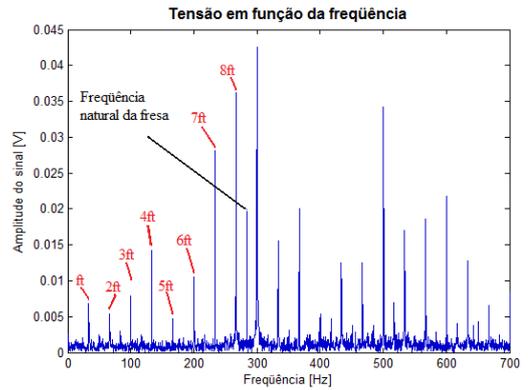
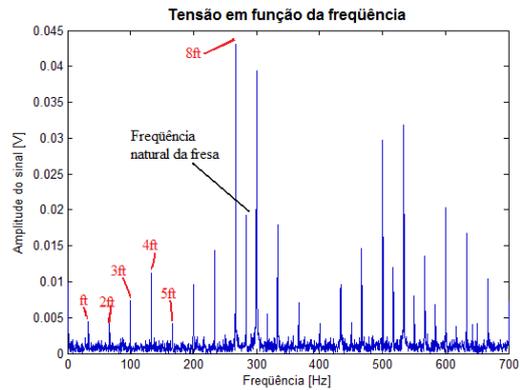
**Corte Concordante**

**Figura 45: Espectro de frequência dos sinais de vibrações da peça (coordenada y) na usinagem com velocidade de corte ( $v_c$ ) de 150m/min.**

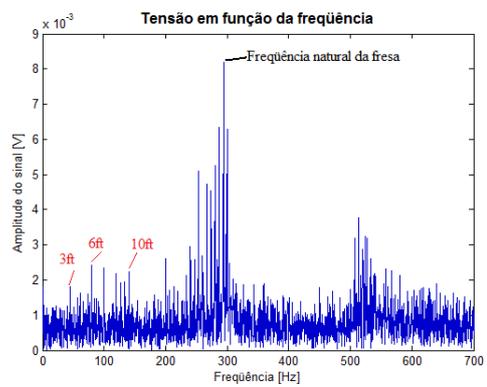
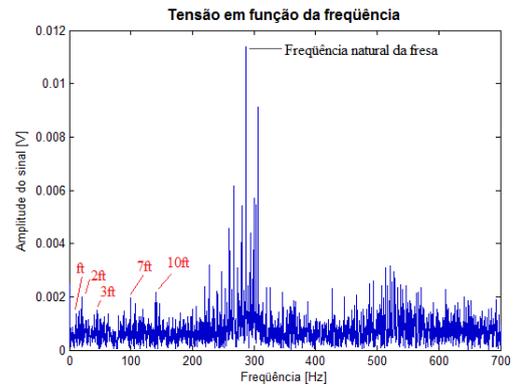
Analisando a Fig. 46, que demonstra os espectros de frequência dos sinais do eixo-árvore (coordenada y) na usinagem com velocidade de corte de 250m/min variando o número de insertos, vê-se que as frequências excitadas são a frequência de trabalho da fresa e seus harmônicos e a frequência natural do conjunto mandril-fresa (287Hz). Nesse ensaio nota-se que nos dois sentidos de corte as amplitudes dos sinais foram quase que os mesmos.



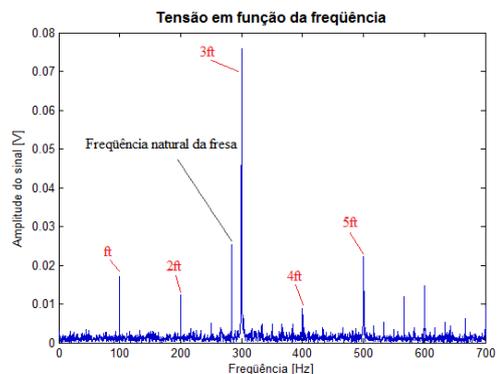
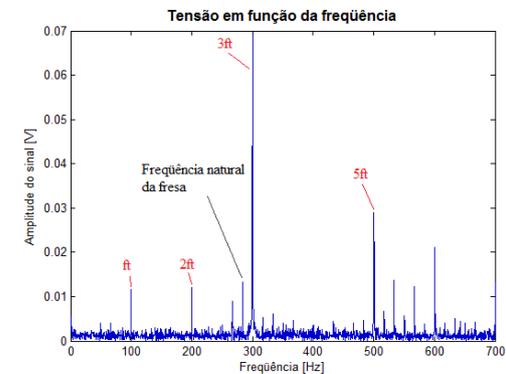
1 inserto



2 insertos



4 insertos



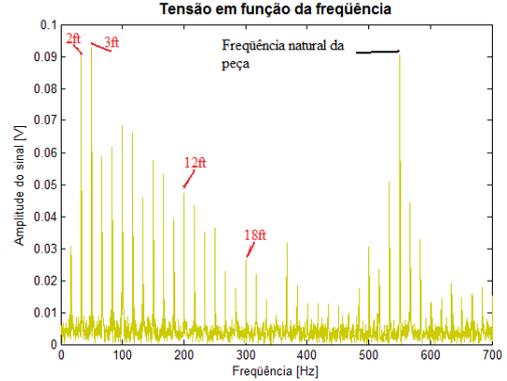
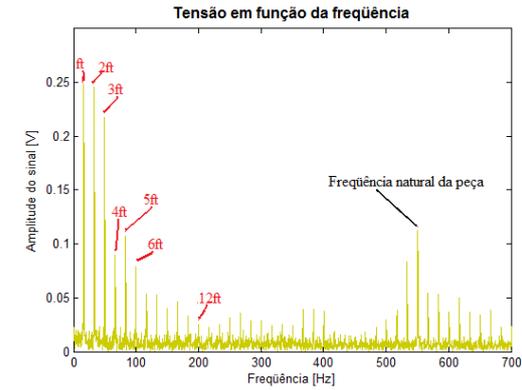
6 insertos

Corte Discordante

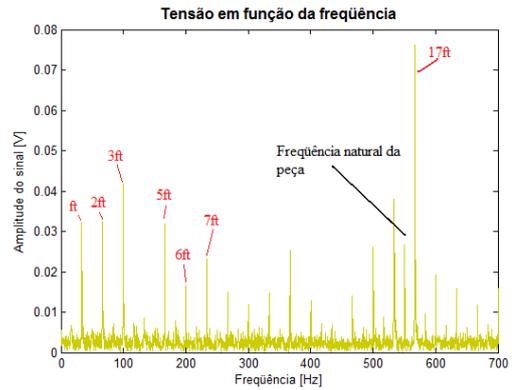
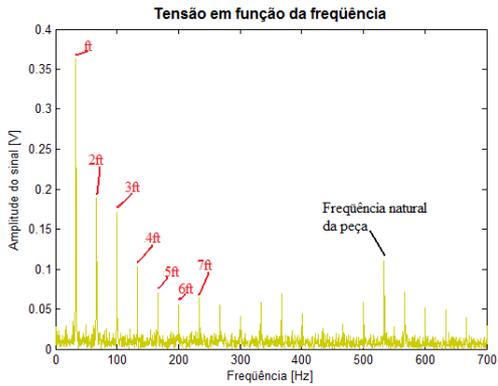
Corte Concordante

Figura 46: Espectro de frequência dos sinais de vibrações do eixo-árvore (coordenada y) variando o número de insertos na usinagem com velocidade de corte ( $v_c$ ) de 250m/min.

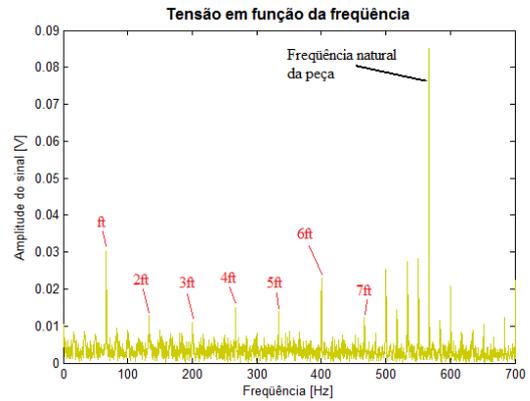
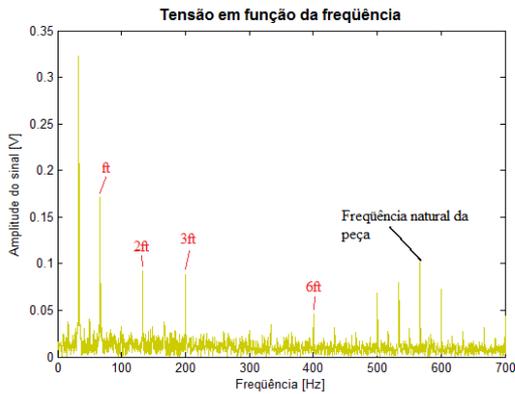
Avaliando a Fig. 47, que mostra os espectros de frequência dos sinais capturados na peça (coordenada y) na usinagem com velocidade de corte de 250m/min variando o número de insertos, nota-se que as frequências excitadas são a frequência de trabalho da fresa e seus harmônicos. Nota-se também que as frequências próximas de 540Hz, que é a frequência natural do corpo de prova, se acoplam com os harmônicos da frequência de trabalho fazendo aumentar as amplitudes nessa faixa. Analisando os sinais vê-se que os do sentido de corte discordante é maior que o sentido de corte concordante.



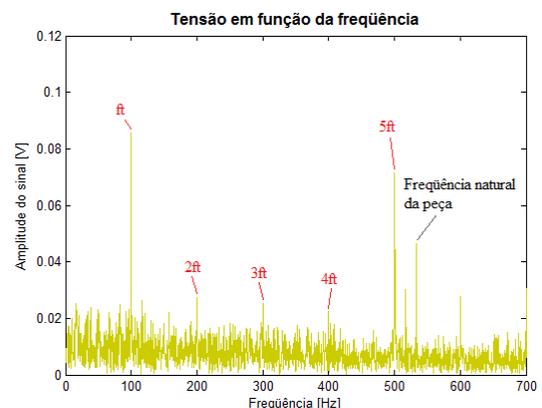
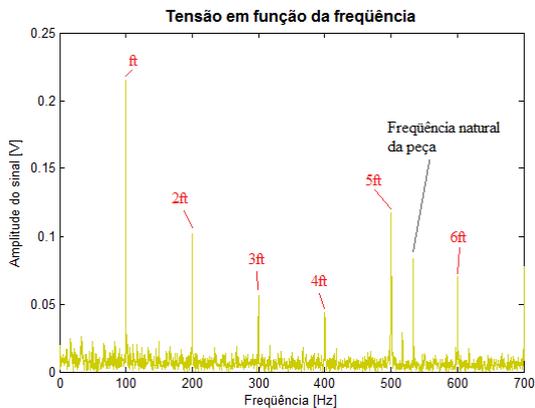
1 inserto



2 insertos



4 insertos



6 insertos

**Corte Discordante**

**Corte Concordante**

**Figura 47: Espectro de frequência dos sinais de vibrações da peça (coordenada y) na usinagem com velocidade de corte ( $v_c$ ) de 150m/min.**

Por meio da avaliação dos espectros de frequência dos sinais vibracionais obtidos na usinagem variando as velocidades de corte e os números de insertos, notou-se que as frequências características em todos os sinais foram as frequências naturais da peça e da fresa, além da frequência de trabalho e seus harmônicos. Isso se repetiu em todas as coordenadas monitoradas o que pode ser visto no apêndice A, nas Figs. I a XXIV, corroborando para a afirmação.

Toh (2005), fresando AISI H13, nos sentidos de corte concordante e discordante monitorando a temperatura de saída do cavaco por infravermelho detectou que o corte concordante apresenta maiores temperaturas na superfície do cavaco que o corte discordante e que ainda a temperatura da superfície do cavaco aumenta com o aumento do desgaste de flanco.

Baseado nisso, notou-se que os sinais do corte concordante foram menores para a maioria dos sinais adquiridos levando a crer que o aumento da temperatura afirmada por Toh (2005) fez com que facilitasse o corte, diminuindo a amplitude dos sinais.

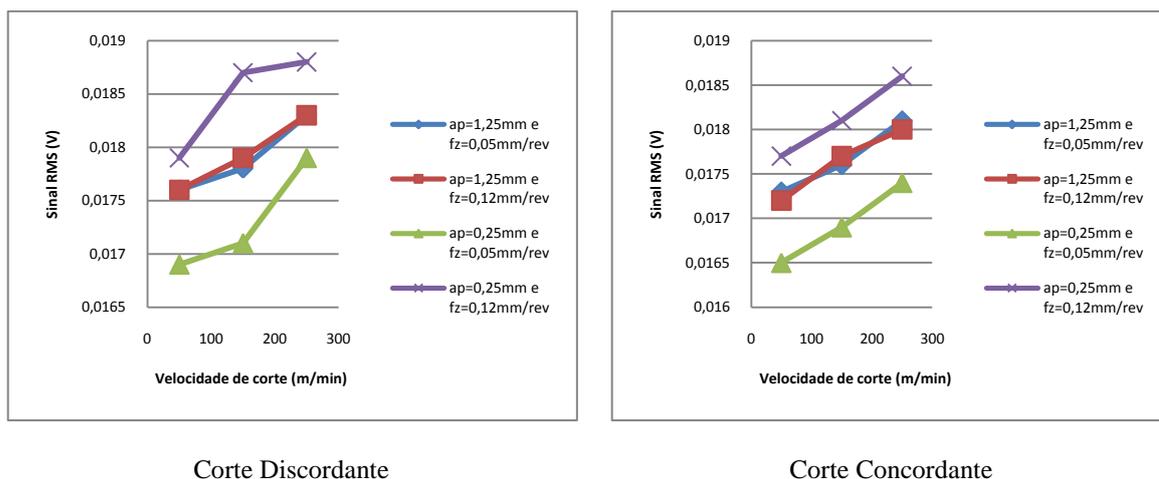
Verificou-se nos testes que os sinais tanto de emissão acústica quanto de vibrações mecânicas aumentam as amplitudes com o aumento da velocidade de corte e do número de insertos. O aumento da velocidade de corte assim como o aumento do número de insertos cresce as solicitações e isso influi diretamente nas amplitudes dos sinais de ambos os sistemas.

### **4.3 AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE CORTE NOS SINAIS**

Realiza-se, agora, a avaliação dos parâmetros de corte nos sinais tanto de emissão acústica quanto de vibrações. A partir deste ponto do trabalho todos os testes foram feitos com seis insertos na fresa. Optou-se aqui por demonstrar a influência dos sinais por meio de sua RMS (do inglês Root Mean Square) que dá a magnitude do sinal e assim uma visão da influência dos parâmetros nele.

#### **4.3.1 Sinais de Emissão Acústica**

Analisando a Fig. 48, pode-se ver que os sinais RMS do experimento crescem à medida que a velocidade de corte também cresce em ambos os sentidos de corte. Isso pode ser explicado pelo fato de que quanto maior é a velocidade de corte, aumentam-se as taxas de deformações elasto-plásticas e de remoção de material, conseqüentemente aumenta-se a liberação de energia devido aos rearranjos cristalinos na estrutura atômica do material e aumentando o sinal de emissão acústica. Vê-se também que os sinais do corte discordante é maior que os do corte concordante em todos os parâmetros avaliados.



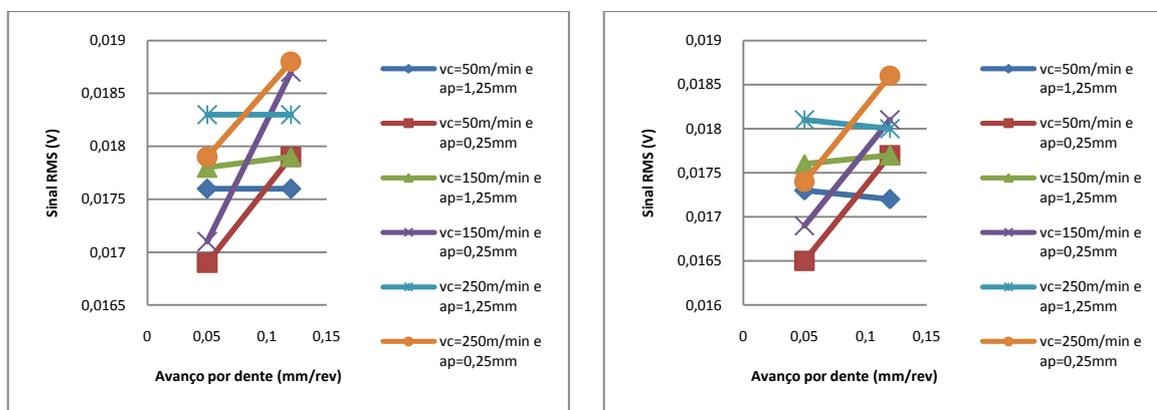
**Figura 48: RMS dos sinais em função da velocidade de corte ( $v_c$ ).**

Analisando agora a Fig. 49, nota-se que os sinais de emissão acústica (RMS) nos dois sentidos de corte crescem com o aumento do avanço, para todas as condições de corte analisadas, o que já era de se esperar, uma vez que com o aumento do avanço por dente, mais material é retirado e assim maior energia se desprende do sistema, originando maior sinal. Nota-se também que os sinais do sentido de corte discordante é maior para todos os parâmetros que os sinais do sentido de corte concordante.

Vê-se ainda que os sinais mantêm-se quase que constantes na velocidade de corte 50 m/min com uma profundidade de corte de 1,25 mm para ambos os sentidos, sendo que no corte discordante ele o é e no corte concordante o sinal decresce com o aumento do avanço. Isso pode ser explicado pela formação da aresta postiça de corte que pode ter facilitado o corte no avanço por dente maior, mantendo o sinal constante.

Observa-se ainda os sinais constantes na velocidade de corte de 250 m/min com uma profundidade de corte de 1,25 mm no sentido de corte discordante e o decréscimo dos sinais no corte concordante com esses mesmos parâmetros. A esta velocidade não se tem mais a aresta postiça de corte o que leva a crer que o “amolecimento” do material usinado favoreceu o corte e manteve constante o sinal. Tönshoff et al. (2000) usinando aço endurecido, concluíram que aumentando a temperatura na interface ferramenta-peça além do aumento do

desgaste de flanco da ferramenta, faz com que se gere um amortecimento do sinal de emissão acústica, fenômeno este que eles chamam de “*dumping effect*”.

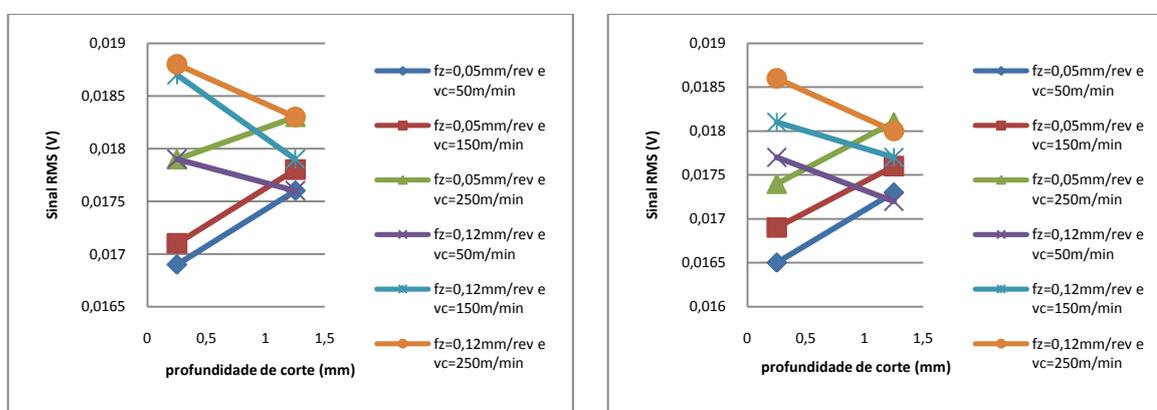


Corte Discordante

Corte Concordante

**Figura 49: RMS dos sinais em função do avanço por dente ( $f_z$ ).**

Avaliando o sinal RMS em função da profundidade de corte (Fig. 50), nota-se que os sinais capturados com o avanço por dente de 0,05 mm/rev aumentaram, quando se aumentou a profundidade de corte em ambos os sentidos de corte, o que já era esperado, pelo aumento da energia gerada. Os sinais oriundos do avanço por dente de 0,12 mm/rev diminuíram quando se aumentou a profundidade de corte, também para ambos os sentidos de corte. Isso pode ser explicado pelo aumento da temperatura na interface de corte o que levou a um corte mais “macio” e conseqüentemente o efeito de amortecimento superou os demais (Tönshoff *et al.*, 2000) e fez com que produzisse menor sinal.



Corte Discordante

Corte Concordante

**Figura 50: RMS dos sinais em função da profundidade de corte ( $a_p$ ).**

### 4.3.2 Sinais de Vibrações

A seguir realiza-se a avaliação dos parâmetros de corte em função dos sinais oriundos do monitoramento vibracional.

#### 4.3.2.1 Sinais do eixo-árvore (coordenada y)

Avaliando a Fig. 51 vê-se que os sinais RMS cresceram à medida que a velocidade aumentou para todos os parâmetros avaliados. Isso pode ser explicado pelo fato que o aumento da velocidade aumenta a frequência de excitação do sistema ferramenta-peça o que faz com que a RMS também cresça. Vê-se também que em todos os parâmetros avaliados os sinais do corte discordante tiveram amplitudes maiores que as do corte concordante.

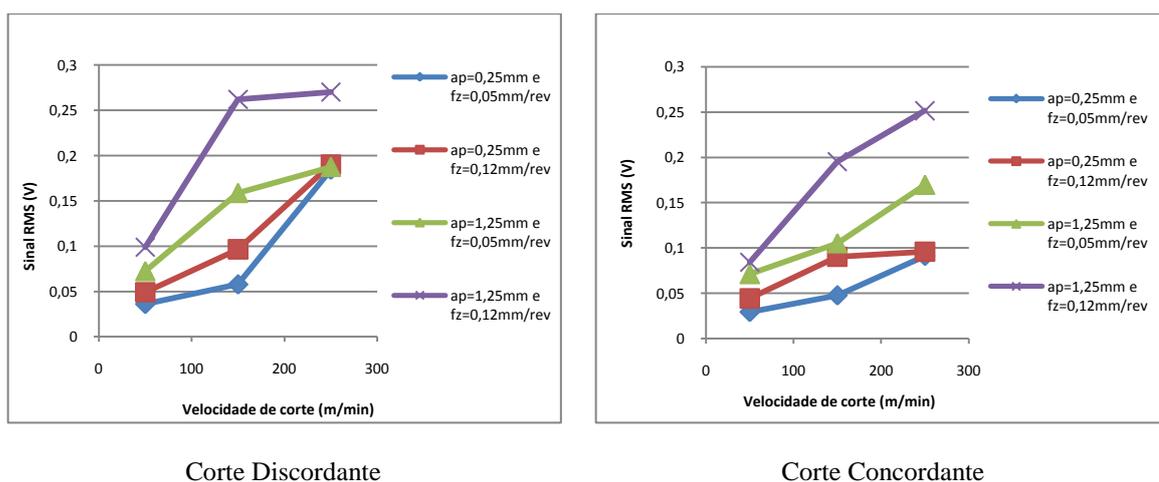
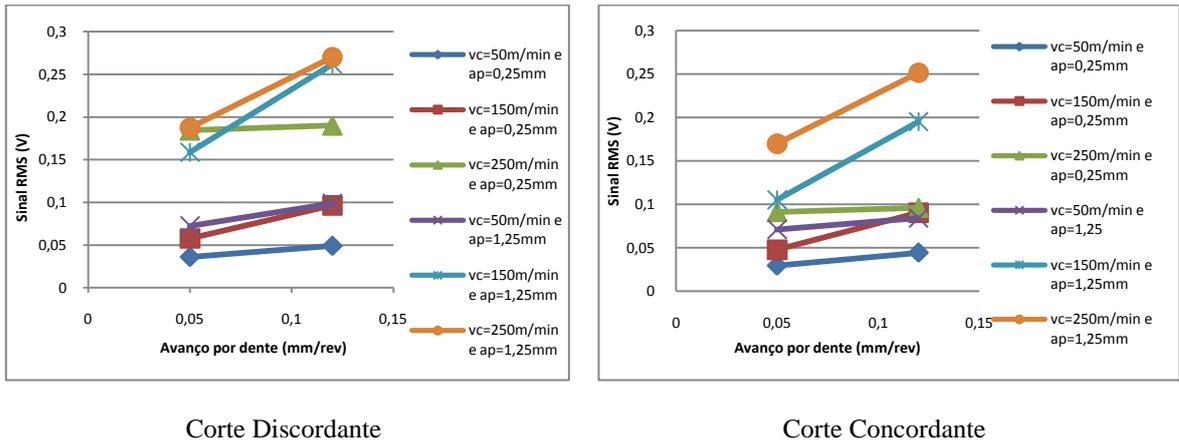


Figura 51: RMS dos sinais em função da velocidade de corte ( $v_c$ ).

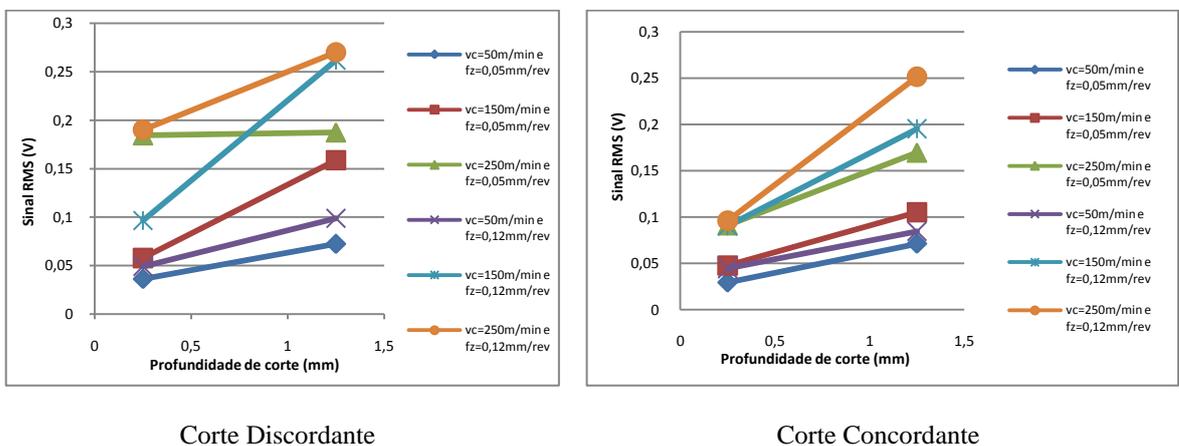
Analisando a Fig. 52, pode-se notar que o sinal vibracional (RMS) cresce a medida que os avanços crescem. O percentual de crescimento depende das demais condições de corte

( $v_c$  e  $a_p$ ). O crescimento do sinal aumentando o avanço por dente já era esperado uma vez que o sistema é mais solicitado em virtude da maior quantidade de material retirado, o que gera maior vibração. Nota-se também que os sinais são maiores no corte discordante que no corte concordante.



**Figura 52: RMS dos sinais em função do avanço por dente ( $f_z$ ).**

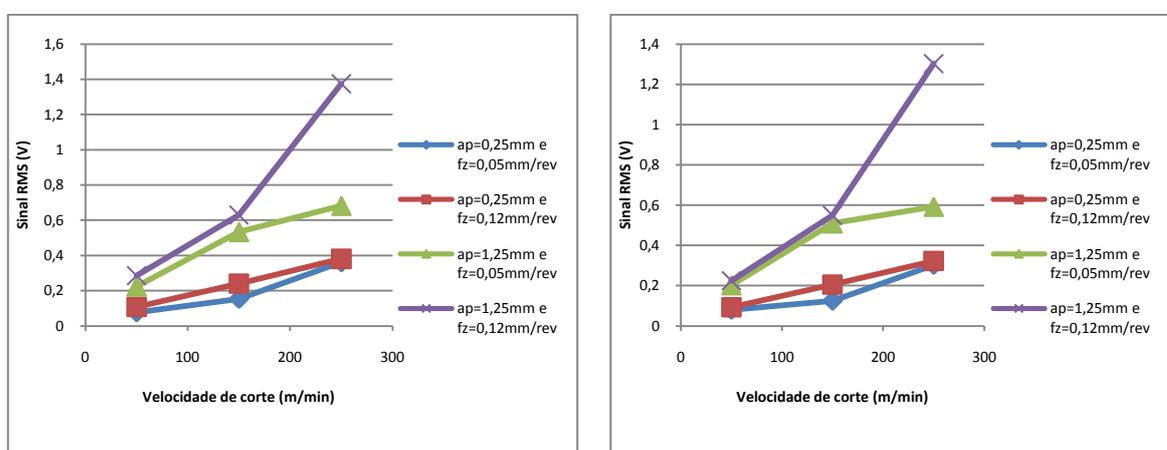
Avaliando o sinal RMS em função da profundidade de corte (Fig. 53), vê-se que assim como a figura anterior que avaliava o sinal RMS em função do avanço por dente, a RMS cresce à medida que se aumenta a profundidade de corte para todo os parâmetros avaliados. Isso pode ser explicado pelo fato de que aumentando a profundidade de corte aumenta a seção do cavaco o que aumenta a força de corte e conseqüentemente aumenta os sinais vibracionais. Assim como nos outros parâmetros avaliados vê-se, aqui, que os sinais do sentido de corte discordante são maiores que os do sentido de corte concordante.



**Figura 53: RMS dos sinais em função da profundidade de corte ( $a_p$ ).**

### 4.3.2.3 Sinais do corpo de prova (coordenada y)

Avaliando a Fig. 54 nota-se que os sinais RMS cresceram à medida que a velocidade aumentou para todos os parâmetros avaliados. Isso era esperado, pois, como já foi dito antes, o aumento da velocidade aumenta a frequência de excitação do sistema ferramenta-peça fazendo com que a RMS também cresça. Aqui como nos outros se nota que os sinais do corte discordante apresentam maior amplitude que os do corte concordante.

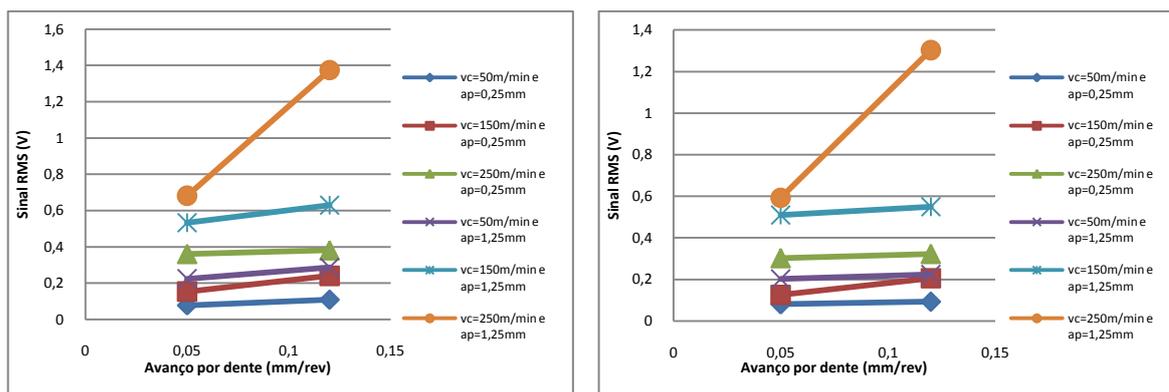


Corte Discordante

Corte Concordante

**Figura 54: RMS dos sinais em função da velocidade de corte ( $v_c$ ).**

Avaliando a Fig. 55, percebe-se que, assim como na figura anterior, a RMS dos sinais cresceu com o aumento do avanço por dente. Isso se deve ao fato que o sistema é mais sobrecarregado devido ao aumento de material retirado, o que gera maior vibração. Aqui como nos outros gráficos vê-se que os sinais do corte discordante são maiores que os do corte concordante.

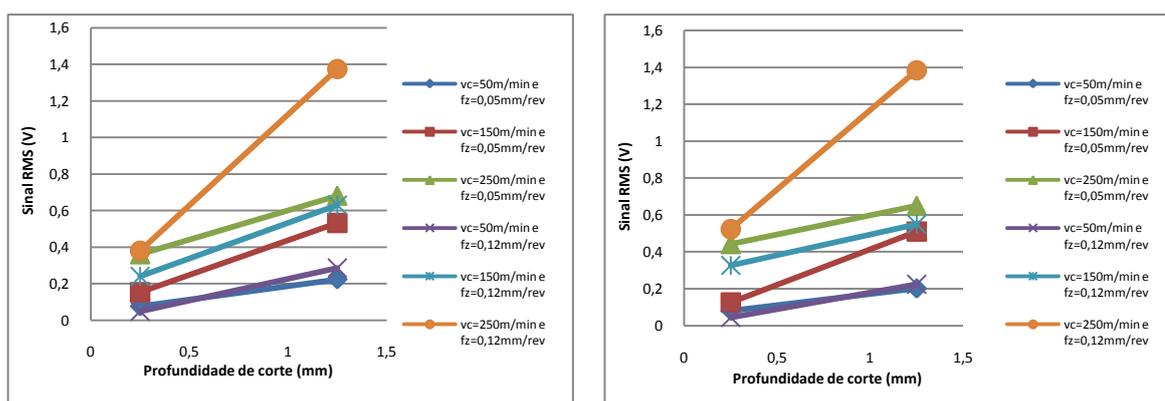


Corte Discordante

Corte Concordante

**Figura 55: RMS dos sinais em função do avanço por dente ( $f_z$ ).**

Do mesmo modo que ocorreu na figura anterior, o sinal RMS em função da profundidade de corte (Fig. 56) cresceu à medida que se aumentou a profundidade de corte para todos os parâmetros avaliados. A explicação se dá pelo fato de que aumentando a profundidade de corte aumenta a seção do cavaco o que aumenta a força de corte e conseqüentemente aumenta os sinais vibracionais. Aqui ocorreu um fato curioso. Os sinais em ambos os sentidos de corte deram praticamente iguais, não havendo diferenças entre as amplitudes.



Corte Discordante

Corte Concordante

**Figura 56: RMS dos sinais em função da profundidade de corte ( $a_p$ ).**

Avaliando a RMS dos sinais vibracionais e de emissão acústica em função de todos os parâmetros de corte notou-se que com o aumento destes os sinais também aumentaram para quase a totalidade dos testes, o que já era esperado devido ao aumento de esforços no

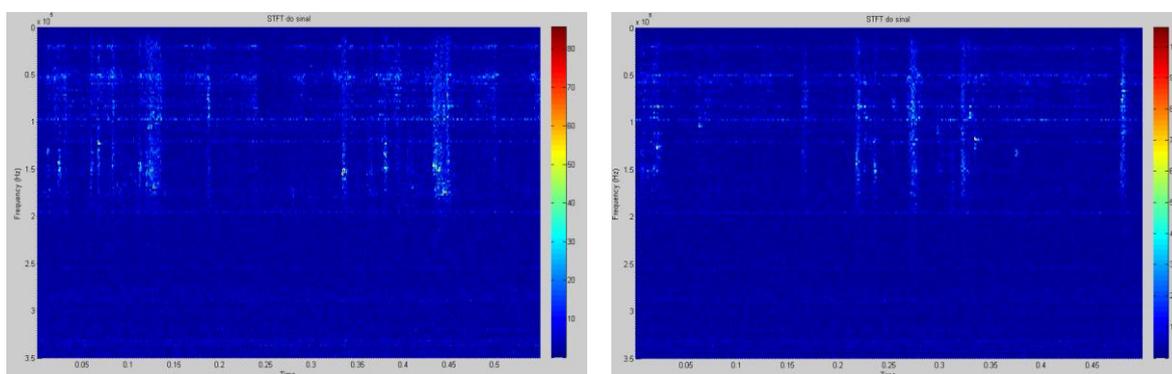
processo. Constatou-se também que os sinais do corte discordante foram maiores para praticamente todos os testes, se comparado com o corte concordante.

#### 4.4 AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA VIDA DE FERRAMENTA NOS SINAIS E NA RUGOSIDADE DA PEÇA

##### 4.4.1 Sinais de Emissão Acústica

Primeiramente mostrar-se-á a evolução da STFT com o desgaste das arestas de corte e logo depois se fará a RMS do sinal de EA de todo o desgaste da ferramenta.

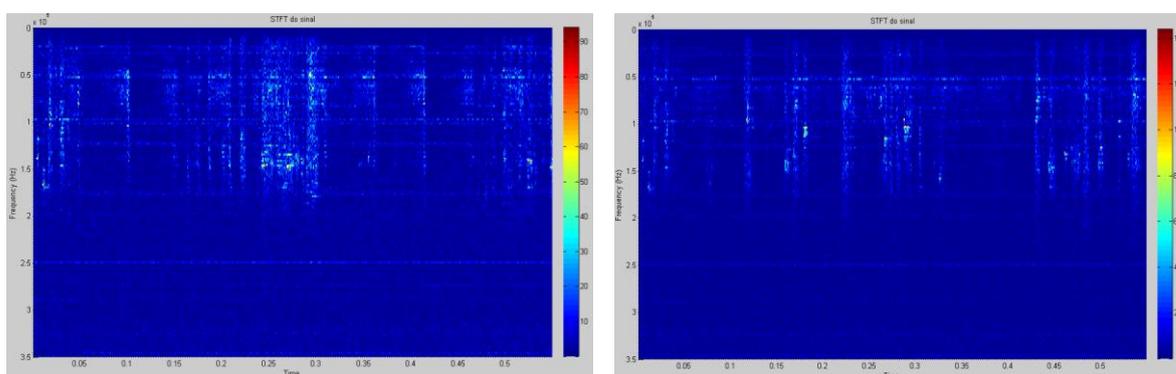
Analisando a Fig. 57 nota-se que apesar das amplitudes do corte concordante terem sido maiores, a frequência de excitação do corte discordante foi maior concentrando os maiores picos de seu sinal nas frequências de 130kHz a 180kHz enquanto que no corte concordante os maiores picos se concentraram entre 75kHz e 150kHz.



Corte Discordante

Corte Concordante

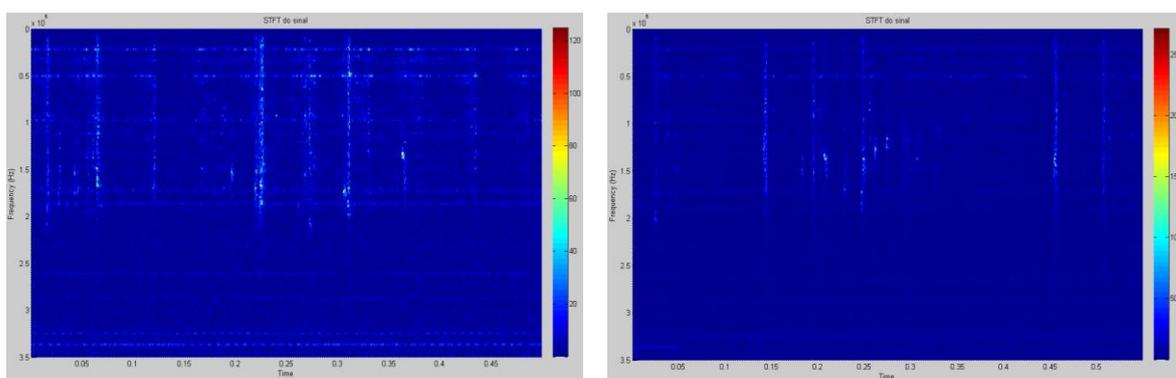
**Figura 57: STFT dos sinais de EA com velocidade de corte de 50m/min, avanço de corte de 0,05mm/rev e profundidade de corte de 1,25mm no primeiro passe da ferramenta ( $VB_B = 0,026\text{mm}$ ).**



Corte Discordante

Corte Concordante

**Figura 58: STFT dos sinais de EA com velocidade de corte de 50m/min, avanço de corte de 0,05mm/rev e profundidade de corte de 1,25mm no vigésimo passe da ferramenta ( $VB_B = 0,054\text{mm}$ ).**



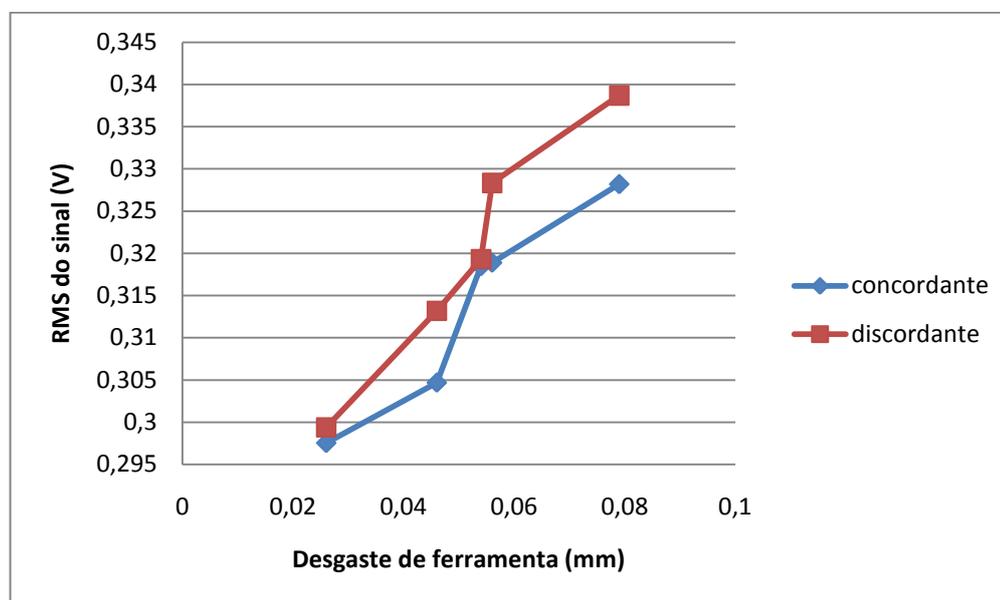
Corte Discordante

Corte Concordante

**Figura 59: STFT dos sinais de EA com velocidade de corte de 50m/min, avanço de corte de 0,05mm/rev e profundidade de corte de 1,25mm no trigésimo sexto passe da ferramenta ( $VB_B = 0,079\text{mm}$ ).**

Avaliando as Figs. 57, 58 e 59 nota-se que a evolução do desgaste se dá principalmente pelo aumento da amplitude nos gráficos. O deslocamento de picos de frequência também foi visualizado comparando a evolução dos cortes, mas por se tratar de um corte em baixa velocidade que existe a predominância da aparição da aresta postiça de corte (APC) (TRENT e WRIGHT, 2001), não se pode afirmar que isso se deve propriamente ao desgaste ou se é interferência da APC nos sinais.

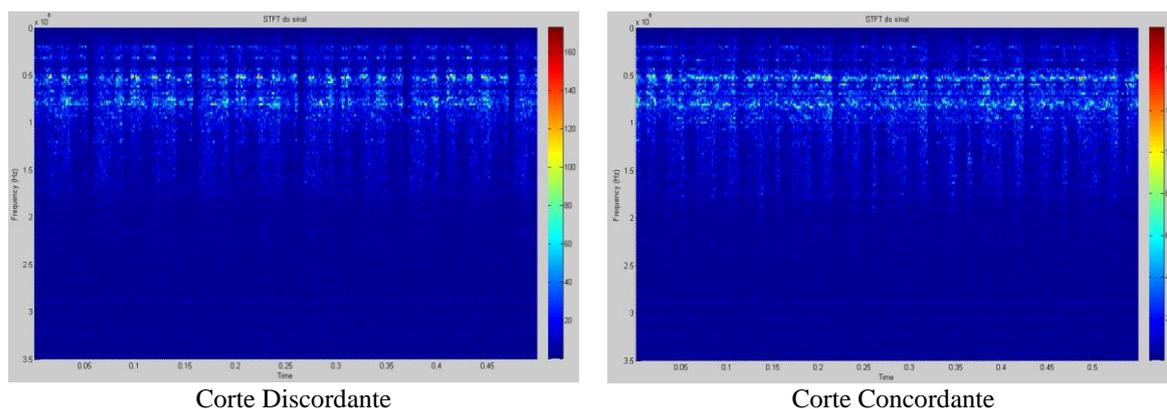
Avaliando a Gráf. 1 nota-se que a RMS do sinal de EA do corte concordante foi menor para todo o experimento em relação ao corte discordante. Vê-se também um crescimento acentuado do sinal em relação ao desgaste.



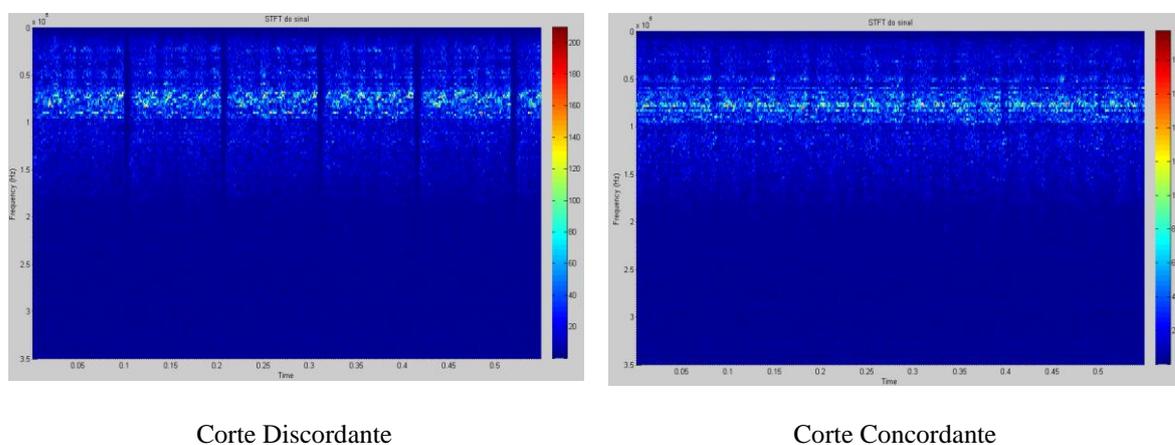
**Gráfico 1: RMS do sinal de EA em função do desgaste de flanco da ferramenta no fresamento a 50m/min com avanço por dente de 0,05mm/rev e profundidade de corte de 1,25mm.**

Avaliando agora a Fig. 60 que demonstra a STFT dos sinais de emissão acústica para o fresamento com uma velocidade de corte de 150m/min e um avanço por dente de 0,05mm/rev nota-se que os sinais do corte discordante apresentam maiores amplitudes que o corte concordante. Vê-se que as maiores frequências excitadas são as de 50kHz e 75kHz. No corte concordante vê-se que os sinais são excitados por todo o período de coleta dos dados, o que não se repete no corte discordante.

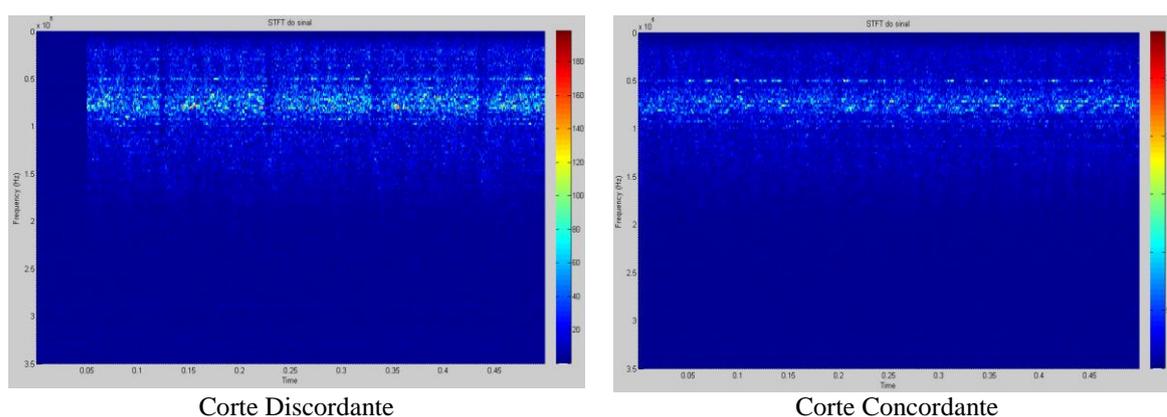
Ainda avaliando a Fig. 60 vê-se que em altas frequências, o sinal é bastante irregular ao longo do tempo, fato que é amenizado com o decorrer do desgaste da ferramenta como pode ser observado pelas Figs. 61 e 62.



**Figura 60:** STFT dos sinais de EA com velocidade de corte de 150m/min, avanço de corte de 0,05mm/rev e profundidade de corte de 1,25mm no primeiro passe da ferramenta ( $VB_B = 0,048$  mm).

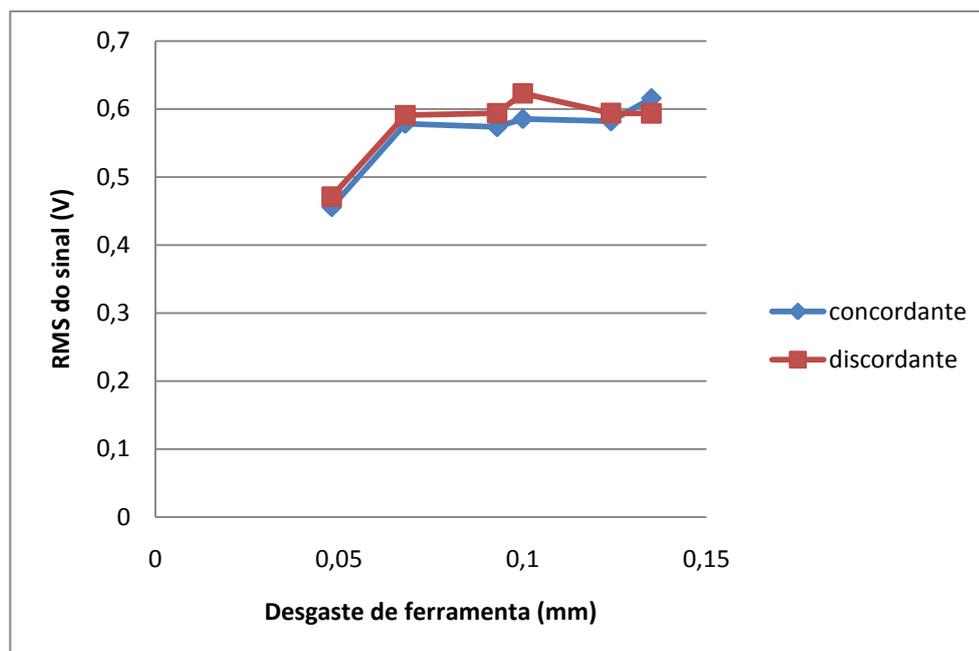


**Figura 61:** STFT dos sinais de EA com velocidade de corte de 150m/min, avanço de corte de 0,05mm/rev e profundidade de corte de 1,25mm no vigésimo passe da ferramenta ( $VB_B = 0,093$ mm).



**Figura 62:** STFT dos sinais de EA com velocidade de corte de 150m/min, avanço de corte de 0,05mm/rev e profundidade de corte de 1,25mm no quinquagésimo passe da ferramenta ( $VB_B = 0,135$ mm).

Avaliando o Gráf. 2 nota-se que a amplitude dos sinais do corte discordante foi maior para toda a evolução do desgaste excetuando no quinquagésimo passe.



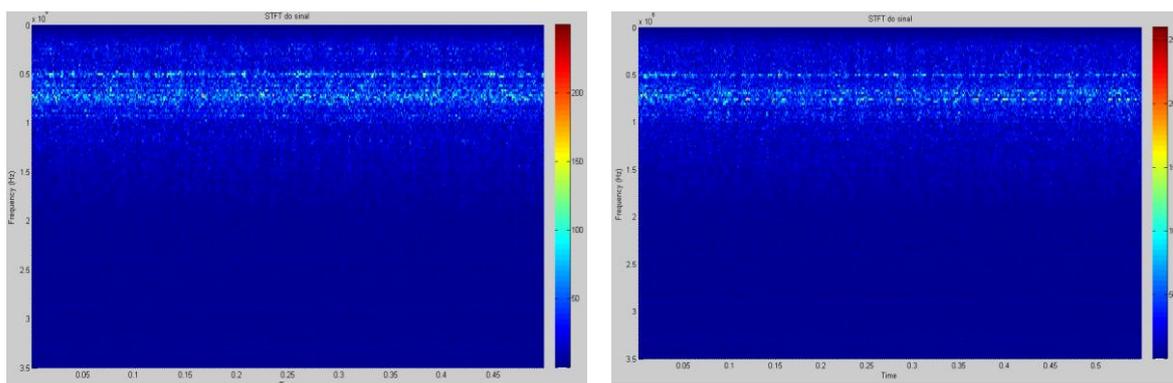
**Gráfico 2: RMS do sinal de EA em função do desgaste de flanco da ferramenta no fresamento a 150m/min com avanço por dente de 0,05mm/rev e profundidade de corte de 1,25mm.**

Avaliando ainda o Gráf. 2 nota-se que a RMS dos sinais, assim como nos outros, do corte discordante foi maior que o do corte concordante excetuando o último passe que o corte concordante gerou uma RMS maior, talvez por um erro na aquisição. Nota-se ainda que a curva se comporta como a curva característica de vida de ferramenta, na qual há num primeiro momento um grande desgaste e depois ele continua de uma forma mais lenta e isso se reflete na RMS do sinal.

Analisando a Fig. 63, que apresenta as STFT dos sinais para a velocidade de corte de 250m/min, nota-se que os sinais do corte discordante apresentam maiores amplitudes que o do corte concordante. Também vê-se que as frequências mais excitadas são 50kHz e 75kHz que supõe-se ser ou a frequência natural de excitação da peça ou algum harmônico, já que elas apareceram em todos os testes realizados.

Avaliando as Figs. 63, 64 e 65 nota-se que, como dito anteriormente, as frequências mais excitadas são 50kHz e 75kHz. Também nota-se que quando o corte discordante não apresentava as maiores amplitudes pontuais ele tinha mais picos distribuídos, o que implica

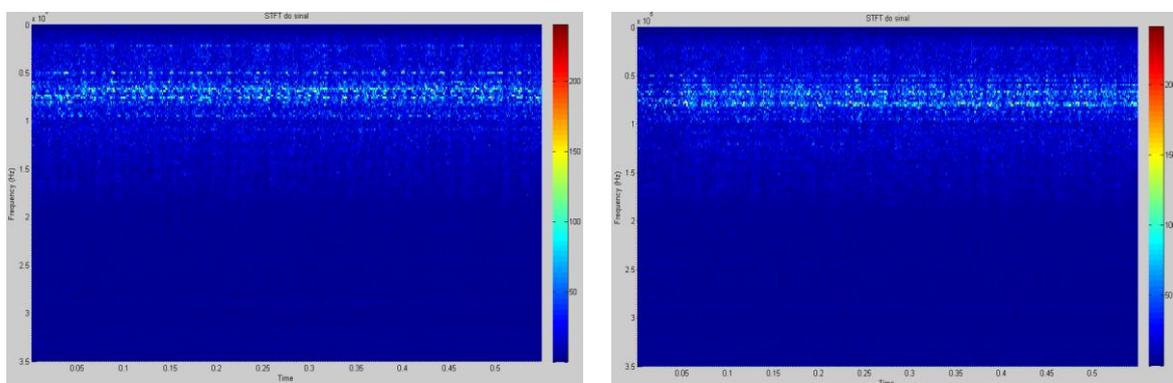
em um maior sinal. Outro detalhe importante é que em alta velocidade, como a de 250m/min os sinais com o decorrer do desgaste são muito parecidos, fato que pode ser explicado pela compensação que se dá entre a temperatura da interface que facilita o corte com o desgaste da ferramenta que prejudica o corte. Essa compensação faz com que os sinais se tornem muito parecidos e mascare o desgaste da ferramenta utilizando a técnica de STFT.



Corte Discordante

Corte Concordante

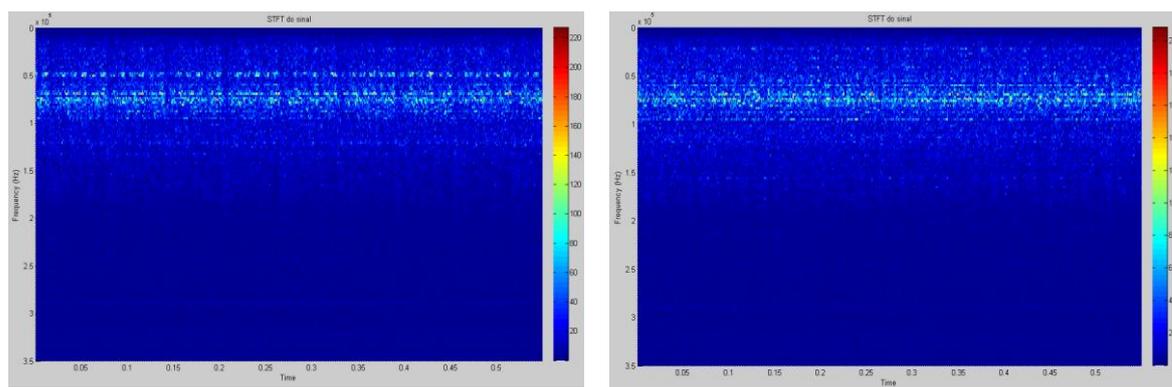
**Figura 63: STFT dos sinais de EA com velocidade de corte de 250m/min, avanço de corte de 0,05mm/rev e profundidade de corte de 1,25mm no primeiro passe da ferramenta ( $VB_B = 0,081\text{mm}$ ).**



Corte Discordante

Corte Concordante

**Figura 64: STFT dos sinais de EA com velocidade de corte de 250m/min, avanço de corte de 0,05mm/rev e profundidade de corte de 1,25mm no quadragésimo passe da ferramenta ( $VB_B = 0,134\text{mm}$ ).**



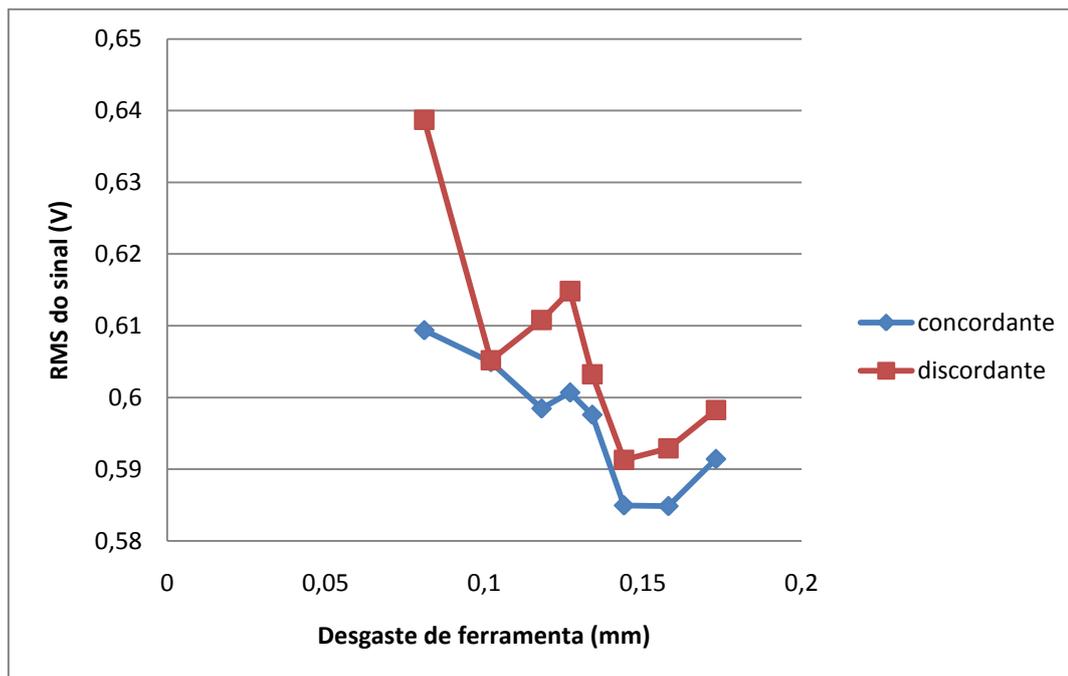
Corte Discordante

Corte Concordante

**Figura 65: STFT dos sinais de EA com velocidade de corte de 250m/min, avanço de corte de 0,05mm/rev e profundidade de corte de 1,25mm no septuagésimo passe da ferramenta ( $VB_B = 0,173\text{mm}$ ).**

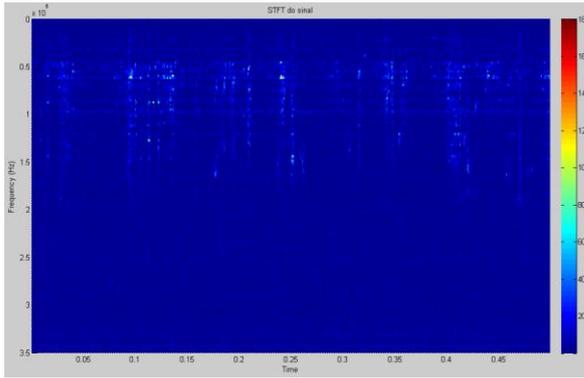
Avaliando as Figs. 63, 64 e 65 nota-se que, como dito anteriormente, as frequências mais excitadas são 50kHz e 75kHz. Também nota-se que quando o corte discordante não apresentava as maiores amplitudes pontuais ele tinha mais picos distribuídos, o que implica em um maior sinal. Outro detalhe importante é que em alta velocidade, como a de 250m/min os sinais com o decorrer do desgaste são muito parecidos, fato que pode ser explicado pela compensação que se dá entre a temperatura da interface que facilita o corte com o desgaste da ferramenta que prejudica o corte. Essa compensação faz com que os sinais se tornem muito parecidos e mascare o desgaste da ferramenta utilizando a técnica de STFT.

Analisando o Gráf. 3 nota-se que, como dito em todo o trabalho, o corte discordante apresentou maiores sinais que o corte concordante. Aqui, como é uma velocidade de corte relativamente alta, nota-se o efeito de amortecimento do sinal proposto por Tönshoff et al. (2000), que fez com que o sinal caísse devido ao aumento da temperatura na interface, facilitando o corte.

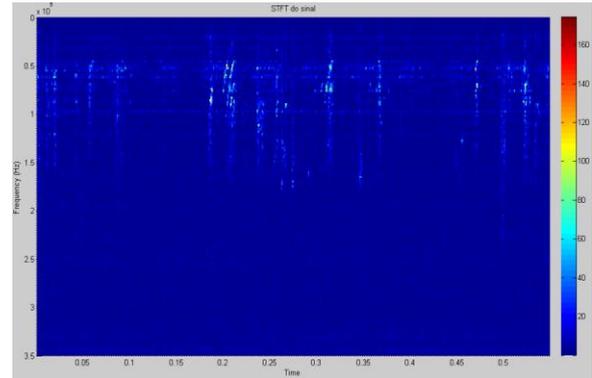


**Gráfico 3: RMS do sinal de EA em função do desgaste de flanco da ferramenta no fresamento a 250m/min com avanço por dente de 0,05mm/rev e profundidade de corte de 1,25mm.**

Avaliando a Fig. 66, nota-se que no primeiro passe da ferramenta a amplitude dos sinais de emissão acústica é bem alta e vê-se claramente o passe de cada aresta de corte. Nota-se na Fig. 67 que a amplitude do sinal reduz bastante em relação a figura anterior. Vê-se ainda que devido ao baixo sinal, não se consegue ver claramente os passes no corte concordante. Visualizando a Fig. 68 nota-se que o sinal ganha novamente energia e se consegue ver novamente o passe das arestas no corte. Aqui aparece um fato interessante no corte concordante, onde em um passe da aresta o sistema se excitou em uma grande faixa de frequência (de 10kHz a 225kHz), o que presume-se ser algum fenômeno envolvido com a APC.

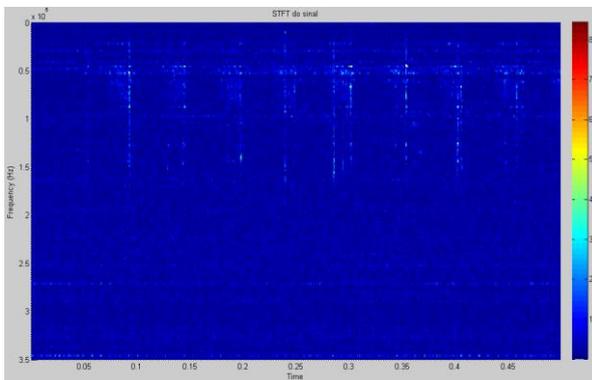


Corte Discordante

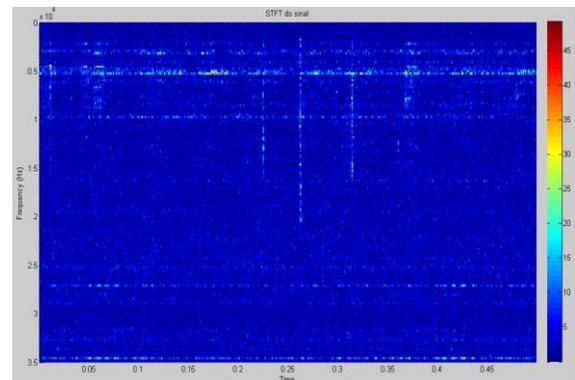


Corte Concordante

**Figura 66:** STFT dos sinais de EA com velocidade de corte de 50m/min, avanço de corte de 0,12mm/rev e profundidade de corte de 1,25mm no primeiro passe da ferramenta ( $VB_B = 0,098\text{mm}$ ).

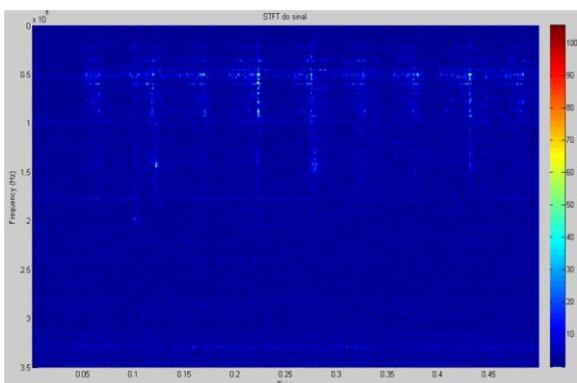


Corte Discordante

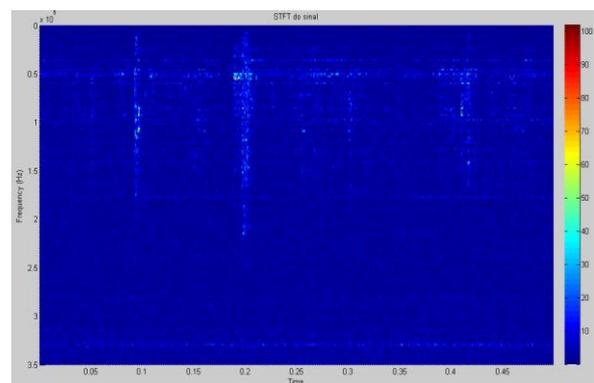


Corte Concordante

**Figura 67:** STFT dos sinais de EA com velocidade de corte de 50m/min, avanço de corte de 0,12mm/rev e profundidade de corte de 1,25mm no vigésimo passe da ferramenta ( $VB_B = 0,149\text{mm}$ ).



Corte Discordante

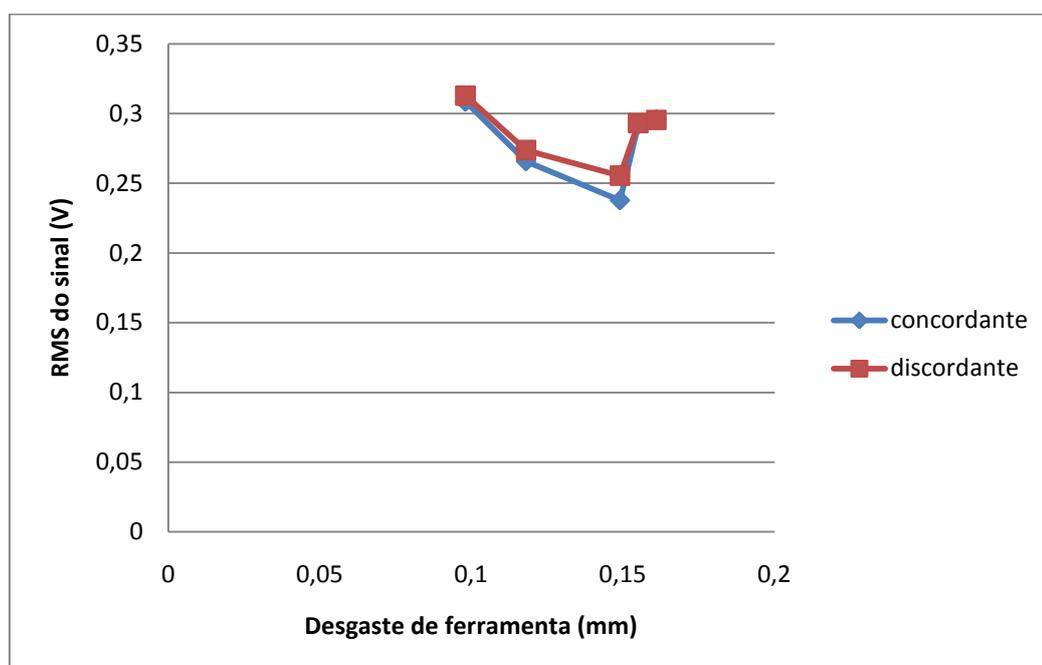


Corte Concordante

**Figura 68:** STFT dos sinais de EA com velocidade de corte de 50m/min, avanço de corte de 0,12mm/rev e profundidade de corte de 1,25mm no trigésimo sexto passe da ferramenta ( $VB_B = 0,161\text{mm}$ ).

Avaliando ainda as Figs. 66, 67 e 68 vêem-se que o corte discordante apresentou maior amplitude de sinais que o corte concordante, comprovando que o corte discordante precisa de mais energia para ser efetuado uma vez que ele desprende mais energia no sistema de monitoramento.

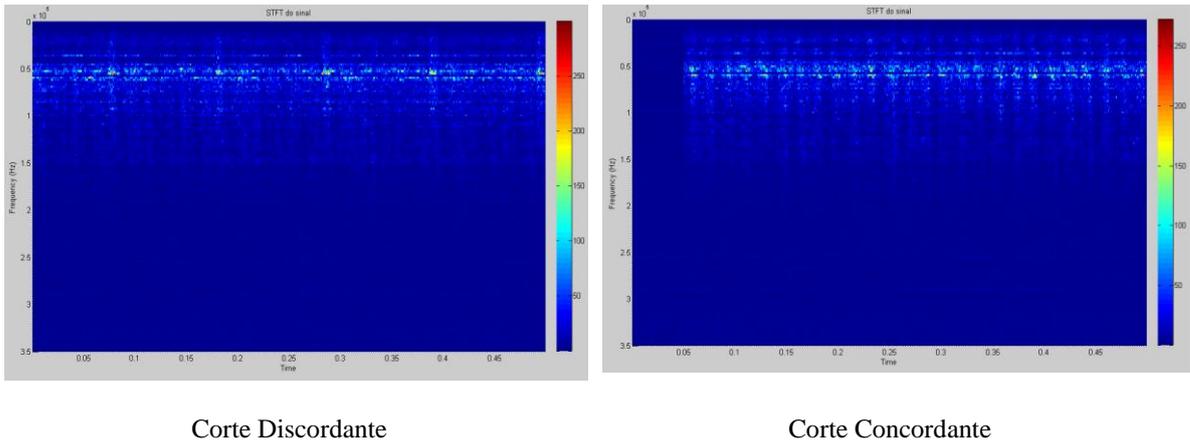
Analisando o Gráf. 4 nota-se que a amplitude dos sinais (RMS) foram maiores no corte discordante que no corte concordante, como em todos os demais testes feitos. Nota-se também o “dumping effect” ou efeito de amortecimento dito por Tönshoff et al. (2000), devido ao alto avanço por dente, que faz com que a temperatura na interface cavaco-ferramenta aumente e facilite assim o corte diminuindo a amplitude do sinal.



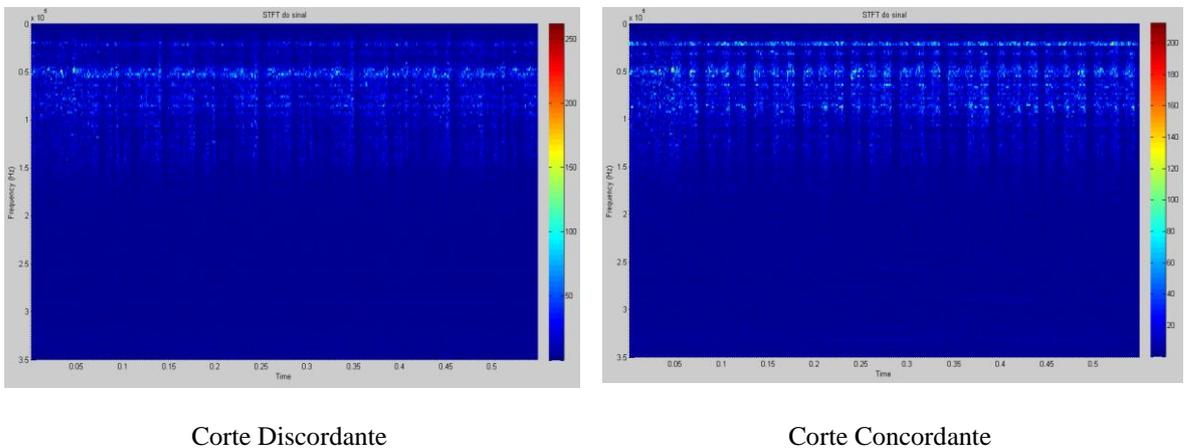
**Gráfico 4: RMS do sinal de EA em função do desgaste de flanco da ferramenta no fresamento a 50m/min com avanço por dente de 0,12mm/rev e profundidade de corte de 1,25mm.**

Analisando as Figs. 69, 70 e 71 nota-se que a amplitude dos sinais do corte discordante foi maior em todas as figuras que a do corte concordante. Também nota-se o efeito de amortecimento nos sinais do corte concordante. Nota-se também que com um avanço por dente alto os sinais de ambos os sentidos de corte se tornam muito parecidos não podendo mais diferenciá-los a olho nu, como no avanço por dente de 0,05mm/rev. Vê-se

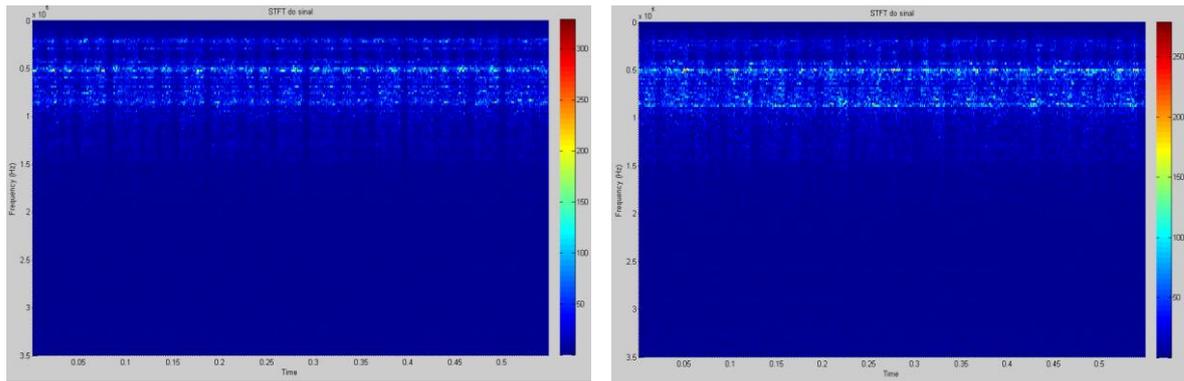
também que as frequências de maiores picos são as de 50kHz na Fig. 86, de 25kHz, 50 kHz e 75kHz na Fig. 87 e 50kHz e 75kHz na Fig. 88, que imagina-se ser a frequência de excitação (50kHz) do aço ABNT 4140, seu sub-harmônico (25kHz) e seu harmônico (75kHz).



**Figura 69: STFT dos sinais de EA com velocidade de corte de 150m/min, avanço de corte de 0,12mm/rev no e profundidade de corte de 1,25mm primeiro passe da ferramenta ( $VB_B = 0,047$ mm).**



**Figura 70: STFT dos sinais de EA com velocidade de corte de 150m/min, avanço de corte de 0,12mm/rev no e profundidade de corte de 1,25mm quinquagésimo passe da ferramenta ( $VB_B = 0,177$ mm).**

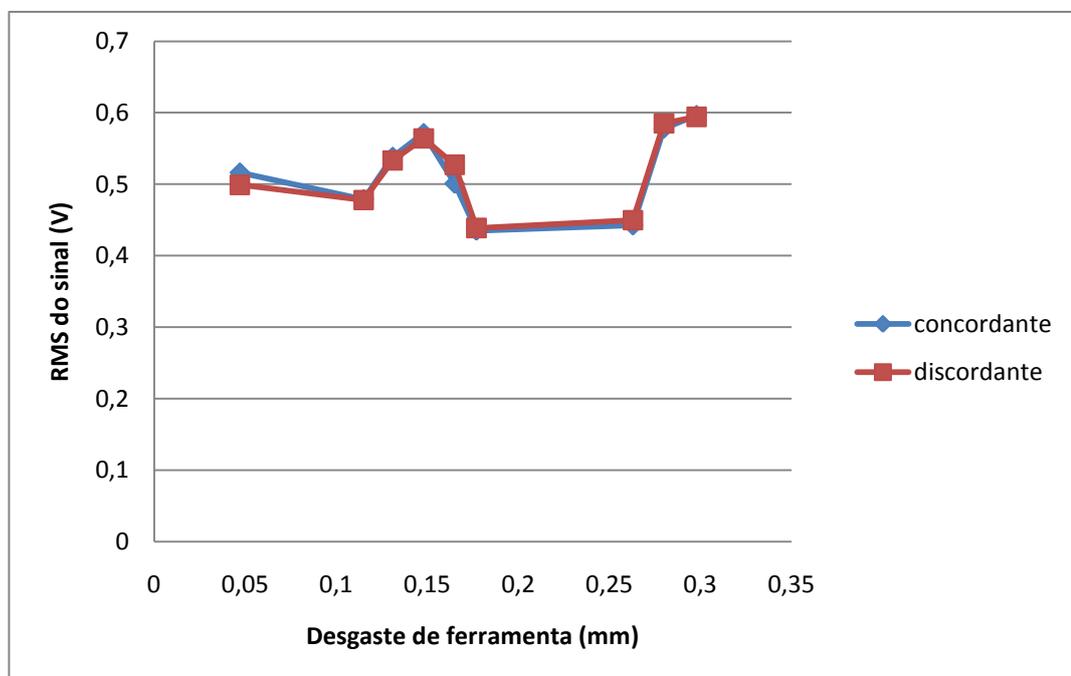


Corte Discordante

Corte Concordante

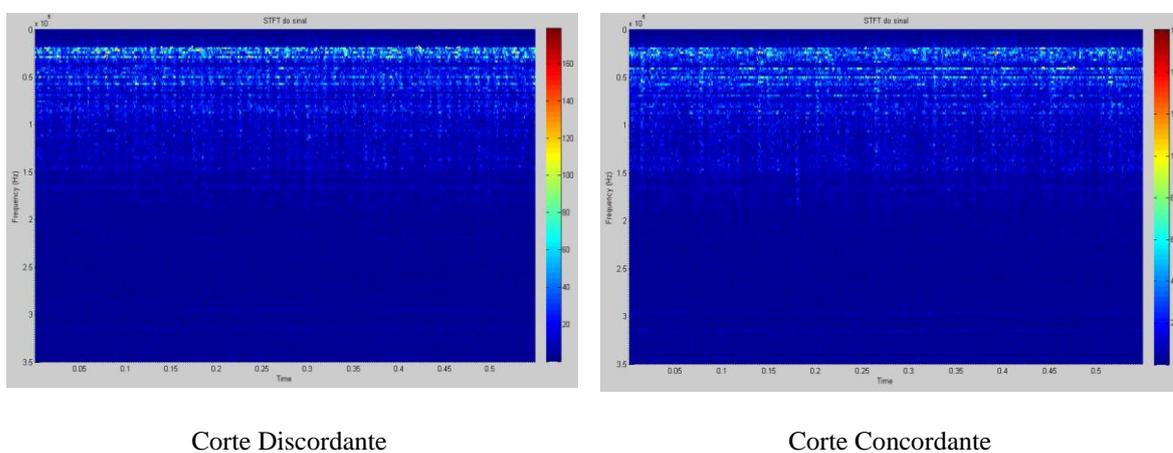
**Figura 71: STFT dos sinais de EA com velocidade de corte de 150m/min, avanço de corte de 0,12mm/rev no e profundidade de corte de 1,25mm octogésimo passe da ferramenta ( $VB_B = 0,298\text{mm}$ ).**

Avaliando o Gráf. 5, vê-se que os sinais de ambos os sentidos de corte são muito parecidos entre si, como já dito anteriormente. Vê-se apesar da pequena diferença, os sinais do corte discordante ainda apresentam uma maior amplitude em relação ao corte concordante. Nota-se também o efeito de amortecimento que reduz a RMS do sinal em ambos os sentidos e logo depois retoma a valores bem próximos dos anteriores ao efeito.

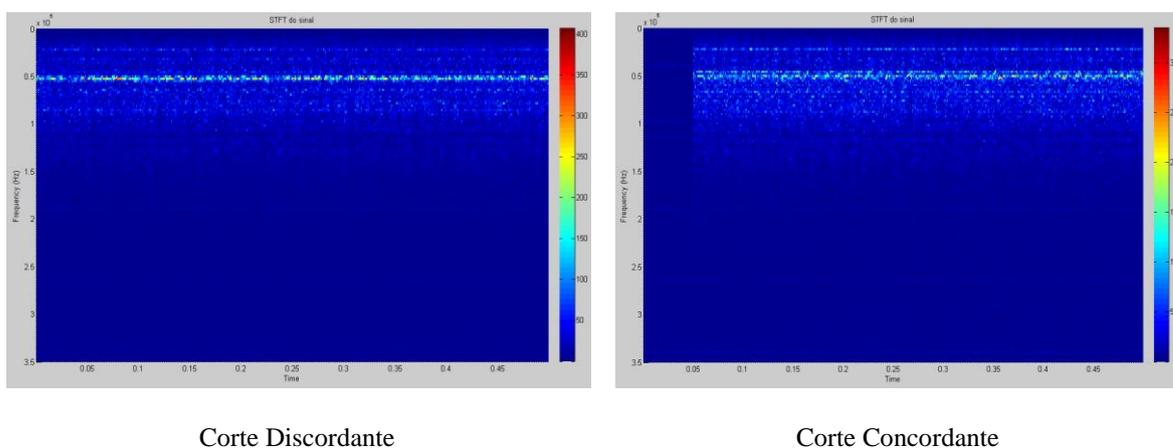


**Gráfico 5: RMS do sinal em função do desgaste de flanco da ferramenta no fresamento a 150m/min com avanço por dente de 0,12mm/rev e profundidade de corte de 1,25mm.**

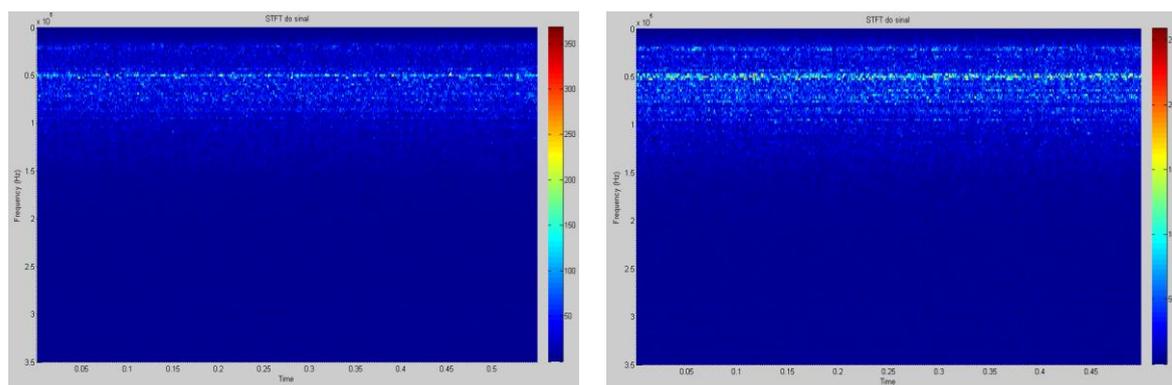
Avaliando a Figs. 72, 73 e 74, nota-se o “dumping effect” agindo. Os sinais de ambos os sentidos sofrem um crescimento de amplitude da Fig. 73 em relação a Fig. 72 e depois sofrem uma redução (Fig. 74 em relação a Fig. 73). Nota-se também que as frequências mais excitadas sofrem uma “afunilada”. Na Fig. 72 nota-se uma faixa de 25kHz a 50kHz sendo excitada e com o decorrer do desgaste (Figs. 73 e 74) a frequência de 50kHz se mantém com alto excitação, fato não ocorrido com a frequência de 25kHz. Mais uma vez, vê-se que os sinais do corte discordante apresentam maiores amplitudes que o corte concordante corroborando que o corte discordante dispensa mais energia que o corte concordante.



**Figura 72:** STFT dos sinais de EA com velocidade de corte de 250m/min, avanço de corte de 0,12mm/rev e profundidade de corte de 1,25mm no primeiro passe da ferramenta ( $VB_B = 0,072\text{mm}$ ).



**Figura 73:** STFT dos sinais de EA com velocidade de corte de 250m/min, avanço de corte de 0,12mm/rev e profundidade de corte de 1,25mm no sexagésimo passe da ferramenta ( $VB_B = 0,185\text{mm}$ ).

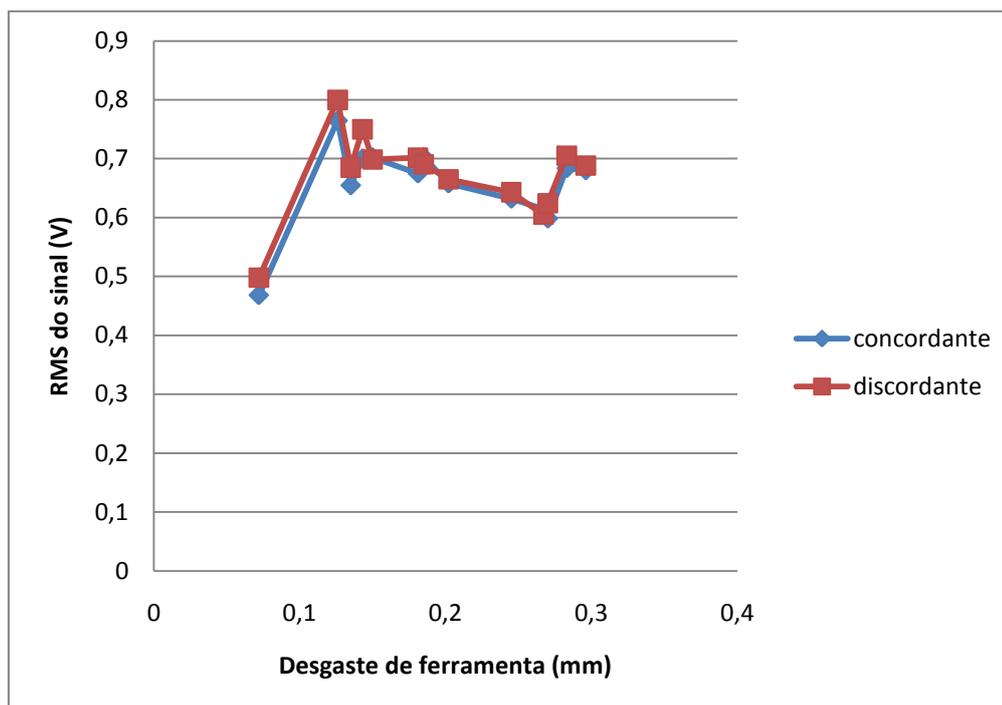


Corte Discordante

Corte Concordante

**Figura 74: STFT dos sinais de EA com velocidade de corte de 250m/min, avanço de corte de 0,12mm/rev e profundidade de corte de 1,25mm no centésimo vigésimo passe da ferramenta ( $VB_B = 0,296$ mm).**

Analisando o Gráf. 6, vê-se que os sinais dos dois sentidos de corte apresentam-se muito parecidos entre si. Nota-se ainda que o corte discordante apresenta uma maior amplitude dos sinais que o corte concordante como em todo o resto do experimento. Também vê-se por meio da RMS que o sinal de ambos os sentidos de corte sofre um crescimento inicial com o aumento do desgaste da ferramenta e depois começa a decrescer com o aumento do desgaste e logo em seguida cresce novamente mostrando o efeito de amortecimento proposto por Tönshoff et al. (2000).



**Gráfico 6: RMS do sinal em função do desgaste de flanco da ferramenta no fresamento a 250m/min com avanço por dente de 0,05mm/rev e profundidade de corte de 1,25mm.**

Notou-se que para todas as STFTs de emissão acústica nos testes de vida de ferramenta, os sinais do corte discordante foram mais fortes ou em amplitudes pontuais ou em conjunto de amplitudes traçando áreas mais firmes nos gráficos que o corte concordante, ou mesmo ambos, o que pode ser evidenciado através das RMS em função do desgaste de ferramenta. Notou-se também que os sinais são fortemente influenciados pelo aumento da temperatura na interface cavaco-ferramenta ( $v_c$  maiores que 50 m/min) fazendo com que esses oscilem caindo com o aumento da temperatura e cresça com a diminuição da temperatura (efeito de amortecimento) (TÖNSHOFF et al., 2000).

#### 4.4.2 Sinais de Vibrações

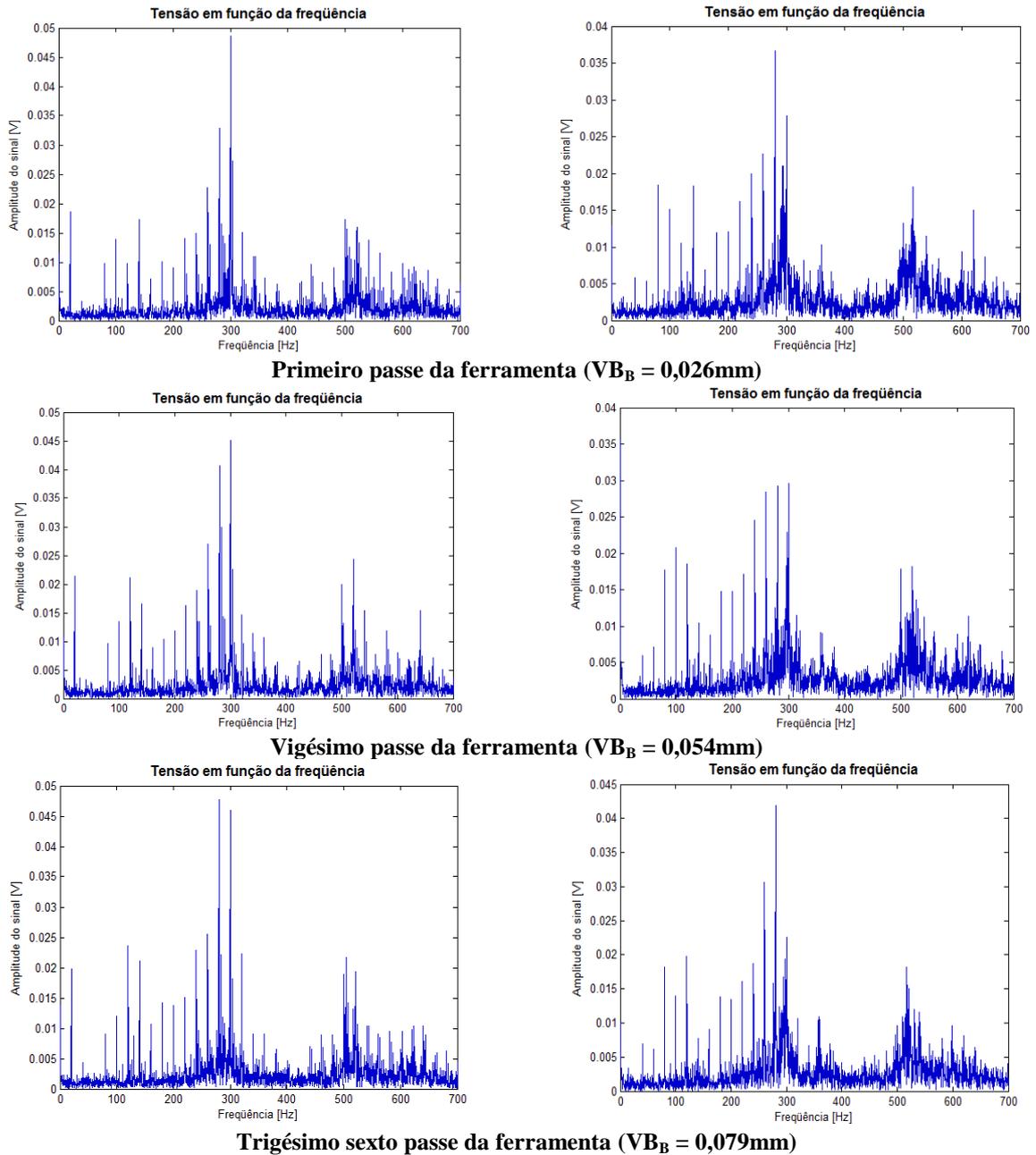
Avalia-se, agora, os sinais vibracionais com o decorrer da vida da ferramenta para ambos os sentidos de corte.

##### 4.4.2.1 Sinais do eixo-árvore (coordenada y)

Primeiramente mostrar-se-á a evolução da FFT (Fast Fourier Transform) com o desgaste das arestas de corte e logo depois far-se-á a RMS de todo o desgaste da ferramenta.

Analisando a Fig. 75, nota-se que as frequências excitadas são a frequência de trabalho da fresa e também a frequência natural do conjunto mandril-fresa como já foi falado anteriormente. Vê-se também que a amplitude do corte discordante foi maior que o do corte concordante.

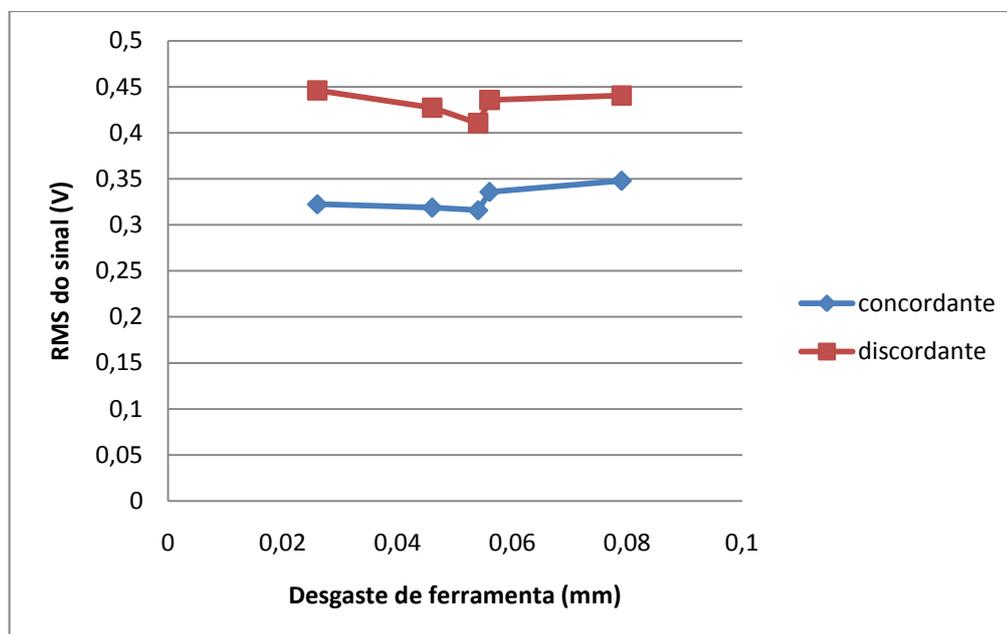
Avaliando ainda a Fig. 75 nota-se que de um modo geral, os sinais do primeiro passe são muito parecidos com os do último passe, justificando o que Maia et al (2009) constatou. De uma forma geral isso procede, uma vez que a diferença de esforços é muito pequena principalmente a essa velocidade de corte, onde a APC pode compensar o desgaste de ferramenta provocando esses sinais praticamente idênticos. Nota-se também que o corte discordante apresentou maiores amplitudes que o corte concordante.

**Corte Discordante****Corte Concordante**

**Figura 75:** Espectro de freqüência dos sinais de vibrações do eixo-árvore (coordenada y) na usinagem com velocidade de corte ( $v_c$ ) de 50m/min, avanço de corte de 0,05mm/rev e profundidade de corte de 1,25mm.

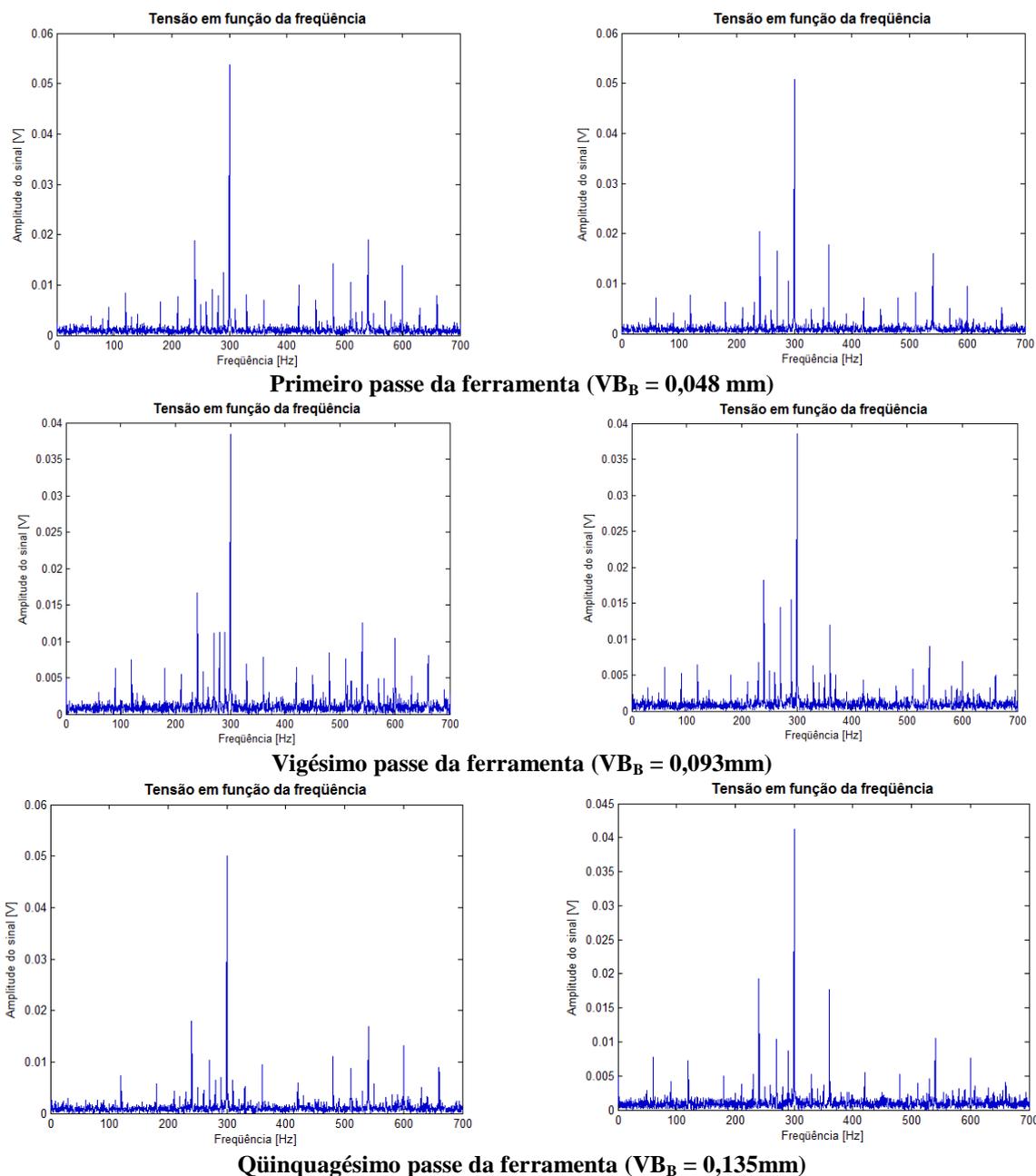
Avaliando o Gráf. 7 nota-se que a RMS do corte concordante foi menor para todo o experimento em relação ao corte discordante. O gráfico foi muito parecido com a RMS do sinal de emissão acústica em relação ao desgaste de ferramenta. Vê-se que o sinal sofre uma caída nas primeiras três medições e logo depois sofre um crescimento. Isto pode ter sido

resultado de alguma coleta coincidente com quando a APC facilita o corte e isso resultou na diminuição do sinal.



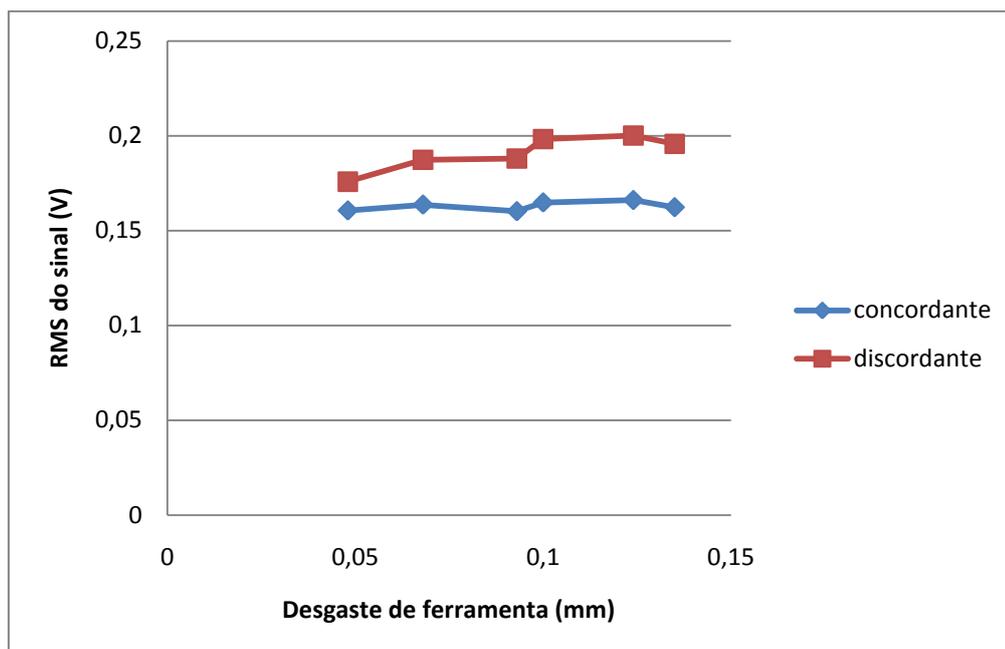
**Gráfico 7: RMS do sinal em função do desgaste de flanco da ferramenta no fresamento a 50m/min com avanço por dente de 0,05mm/rev e profundidade de corte de 1,25mm.**

Avaliando a Fig. 76 vê-se que os sinais são muito parecidos entre si. Nota-se que de uma forma geral, os sinais do corte discordantes são maiores que o do corte concordante e que os sinais têm a tendência a diminuir sua amplitude, uma vez que, como já foi dito, com a diminuição da altura o corpo de prova fica mais estável o que diminui sensivelmente a vibração.

**Corte Discordante****Corte Concordante**

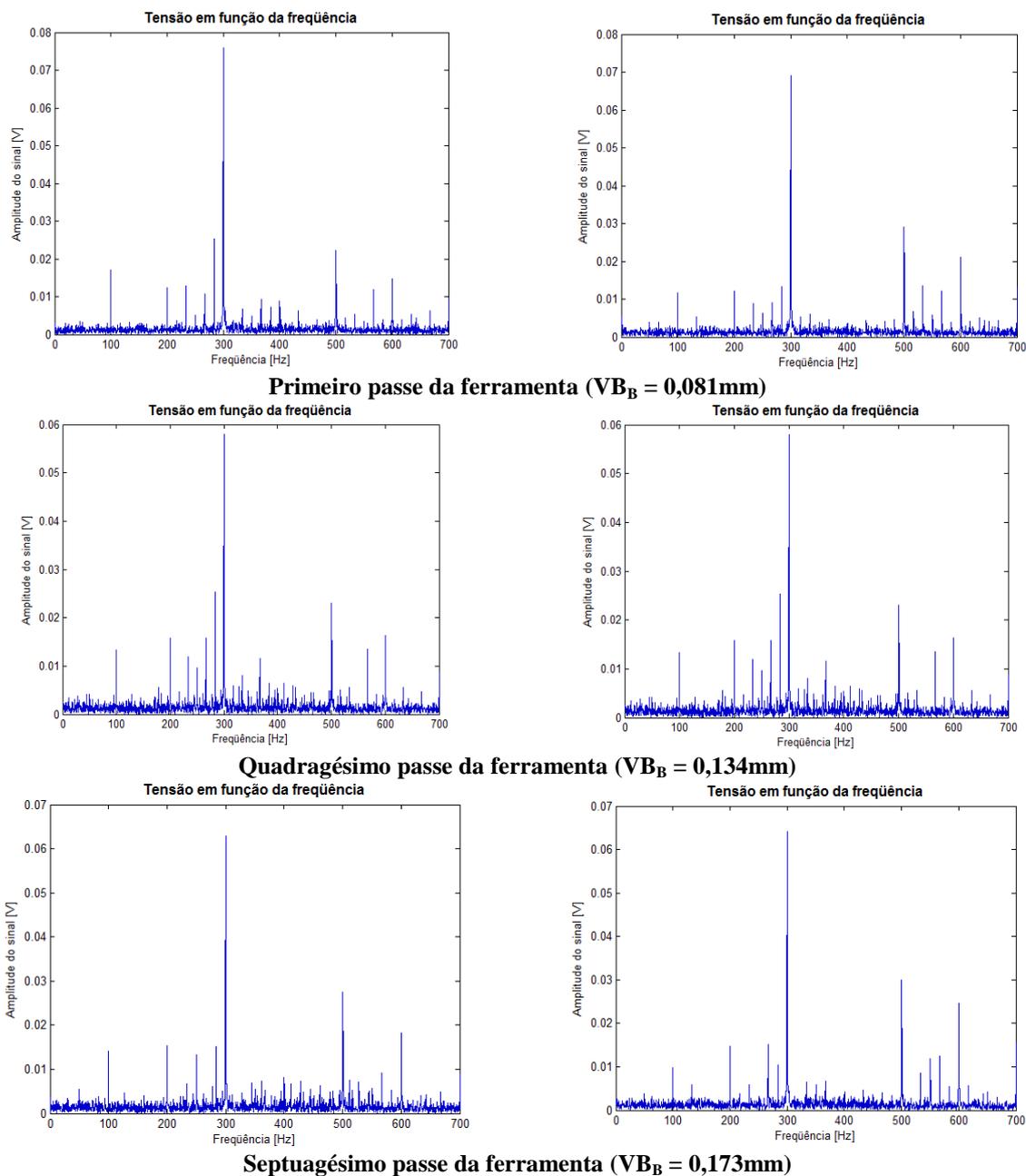
**Figura 76: Espectro de frequência dos sinais de vibrações do eixo-árvore (coordenada y) na usinagem com velocidade de corte ( $v_c$ ) de 150m/min, avanço de corte de 0,05mm/rev e profundidade de corte de 1,25mm.**

Avaliando o Gráf. 8 nota-se que a RMS dos sinais, assim como nos outros, do corte discordante foi maior que o do corte concordante. Vê-se também que o sinal cresce até o quadragésimo passe e depois cai no ultimo (quinquagésimo passe). A peça foi trocada após o vigésimo passe (terceiro ponto no gráfico) que demonstra que o crescimento do sinal até este ponto se deu somente pelo desgaste da ferramenta e o crescimento após ele também.



**Gráfico 8: RMS do sinal em função do desgaste de flanco da ferramenta no fresamento a 150m/min com avanço por dente de 0,05mm/rev e profundidade de corte de 1,25mm.**

Avaliando a Fig. 77 nota-se que, como dito anteriormente, as frequências mais excitadas são a frequência de trabalho da fresa e a frequência natural do conjunto mandril-fresa. Também nota-se que quando o corte discordante não apresentava as maiores amplitudes pontuais ele tinha mais picos distribuídos, o que implica em um maior sinal. Os sinais como já dito anteriormente são muito parecidos entre si, tanto no começo quanto no fim dos testes de desgastes.

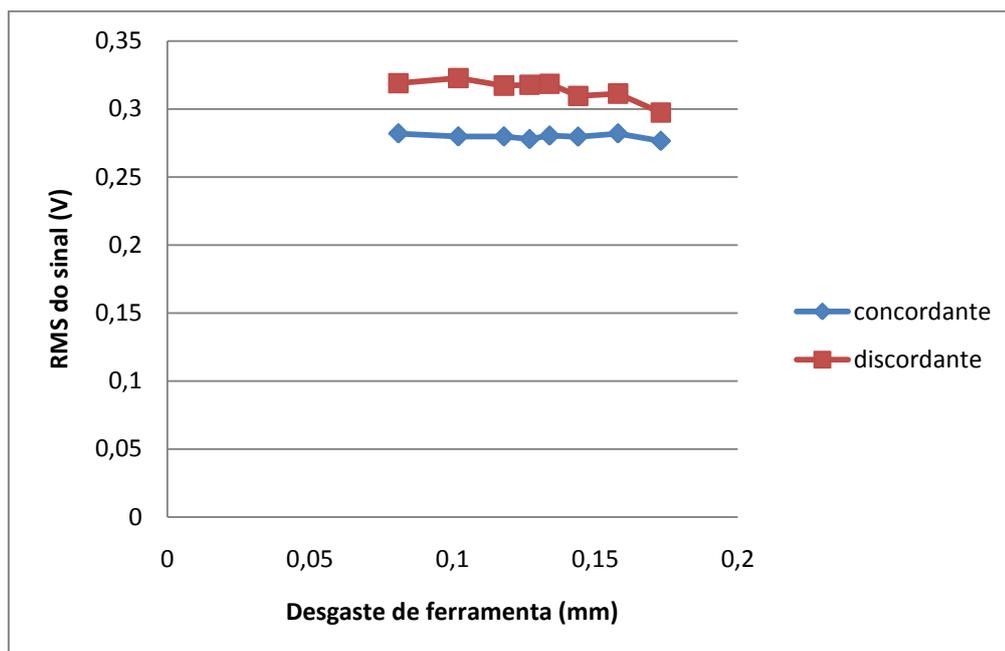


#### Corte Discordante

#### Corte Concordante

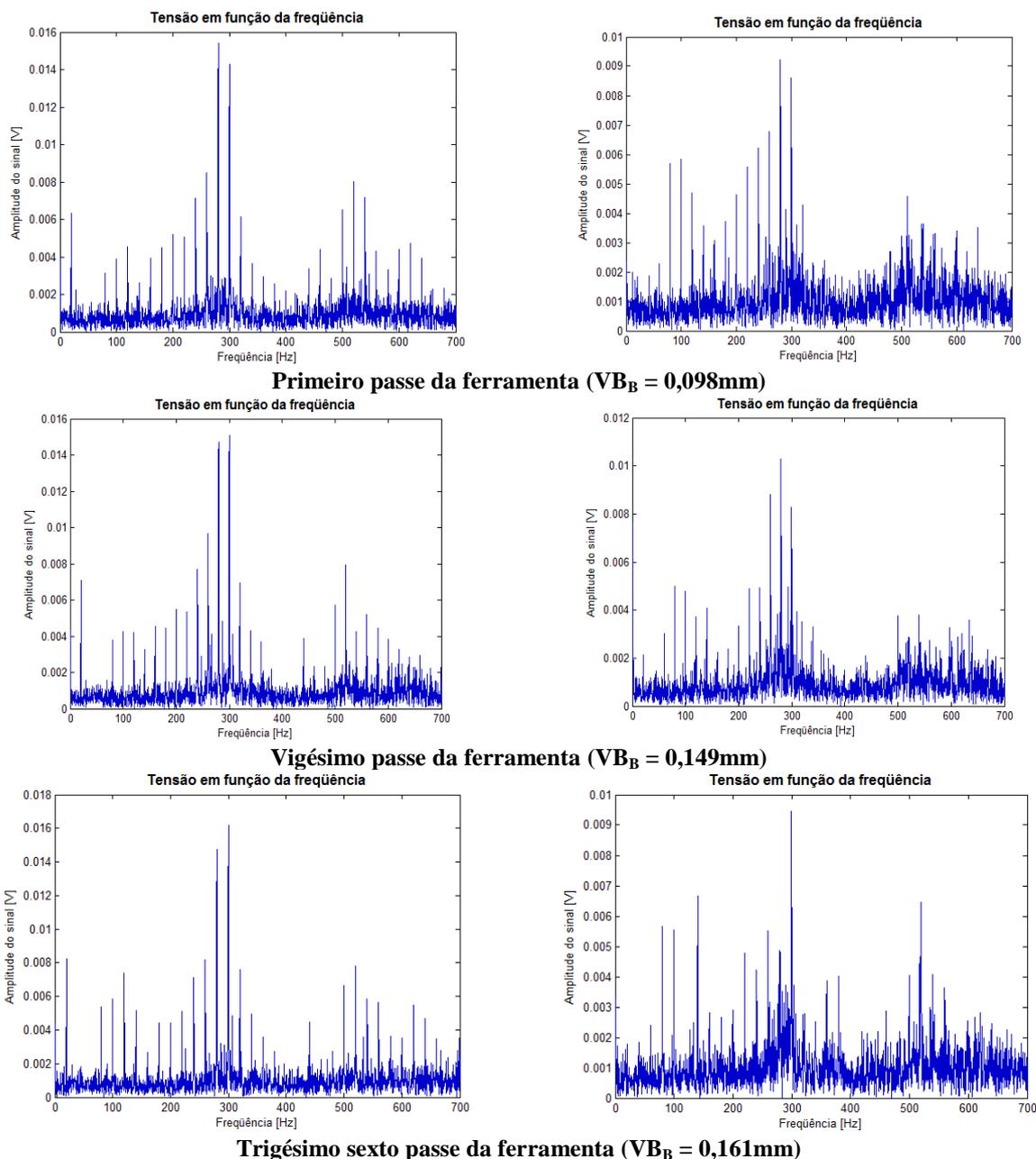
**Figura 77: Espectro de frequência dos sinais de vibrações do eixo-árvore (coordenada y) na usinagem com velocidade de corte ( $v_c$ ) de 250m/min, avanço de corte de 0,05mm/rev e profundidade de corte de 1,25mm.**

Analisando o Gráf. 9 nota-se que o corte discordante apresentou maiores sinais que o corte concordante. Aqui, com a diminuição da altura da peça, a amplitude dos sinais também diminuiu, fato este causado pelo aumento da estabilidade do corpo de prova causada pela diminuição da altura.



**Gráfico 9: RMS do sinal em função do desgaste de flanco da ferramenta no fresamento a 250m/min com avanço por dente de 0,05mm/rev e profundidade de corte de 1,25mm.**

Avaliando a Fig. 78, vê-se que o corte discordante apresentou maior amplitude de sinais que o corte concordante, comprovando que o corte discordante precisa de mais energia para ser efetuado uma vez que ele desprende mais energia no sistema de monitoramento. Também mais uma vez, nota-se que os sinais são muito parecidos entre si, tanto no começo quanto no fim dos ensaios de vida de ferramenta.



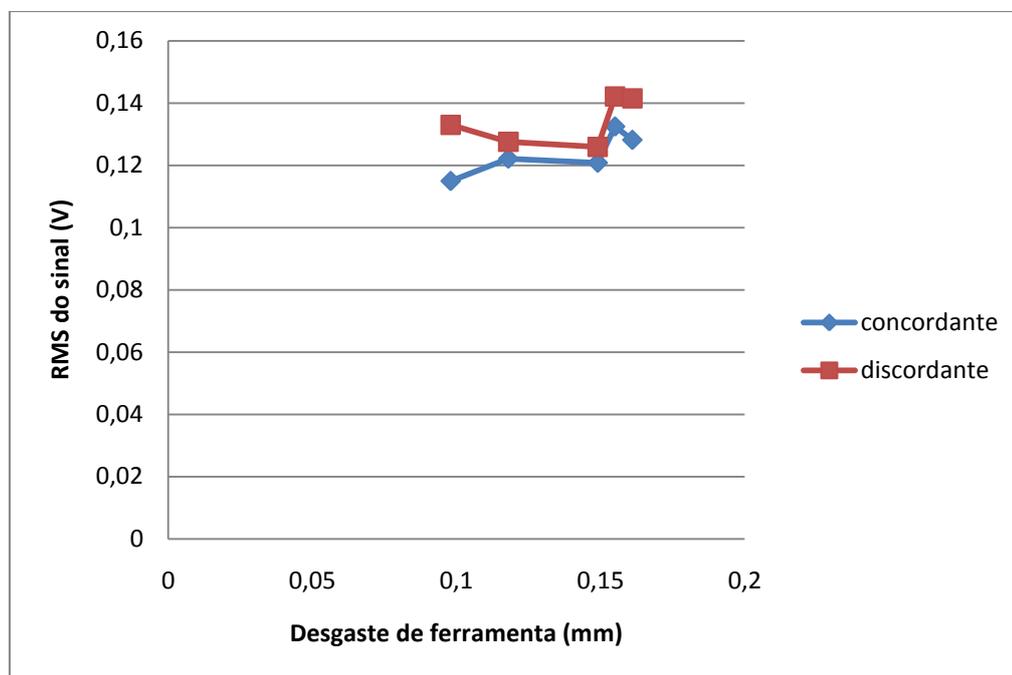
**Corte Discordante**

**Corte Concordante**

**Figura 78:** Espectro de frequência dos sinais de vibrações do eixo-árvore (coordenada y) na usinagem com velocidade de corte ( $v_c$ ) de 50m/min, avanço de corte de 0,12mm/rev e profundidade de corte de 1,25mm.

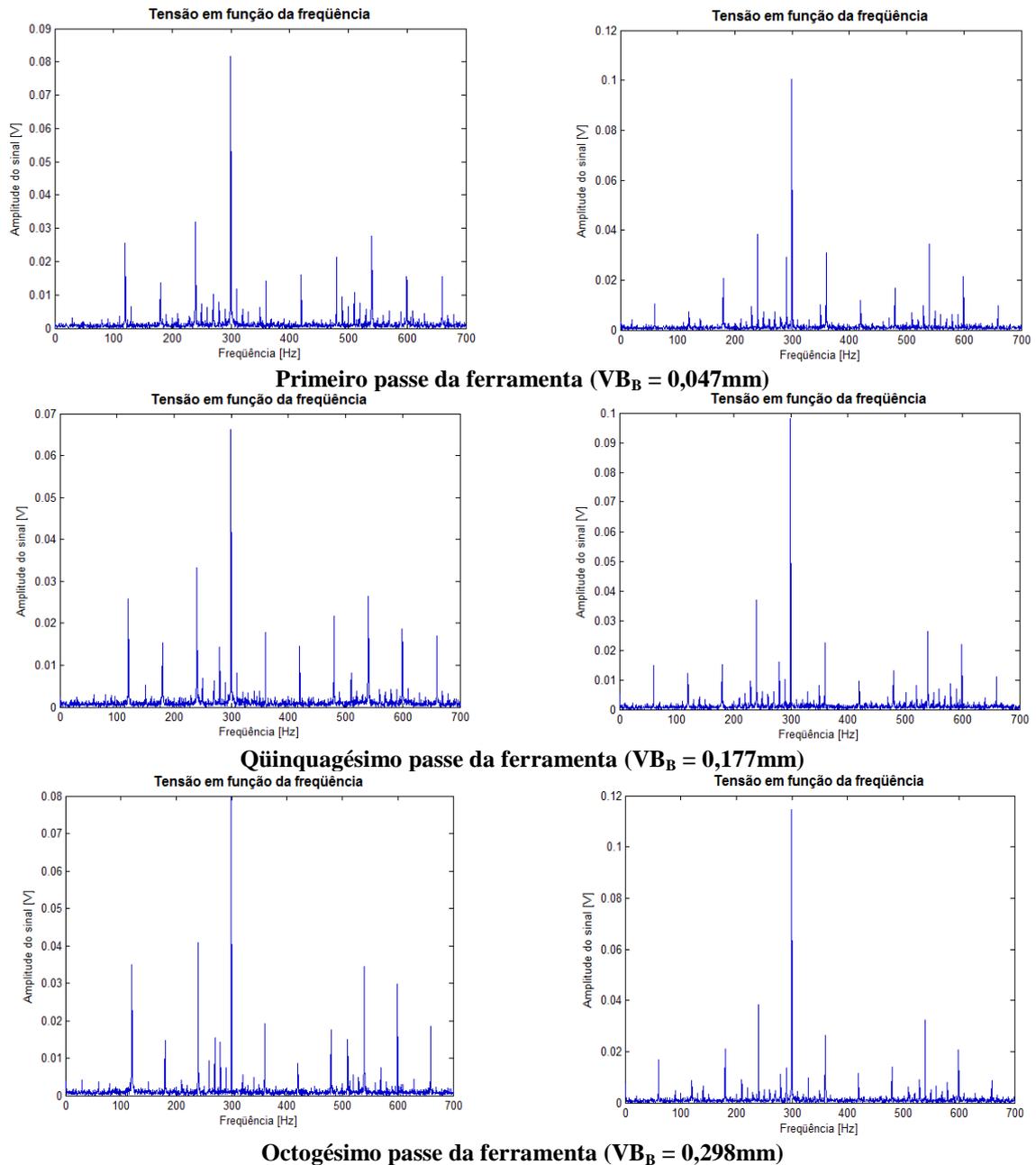
Analisando o Gráf. 10, nota-se que a amplitude dos sinais (RMS) foram maiores no corte discordante que no corte concordante, como em todos os demais testes feitos. Nota-se também que o sinal cresceu à medida que o desgaste da ferramenta aumentou, excetuando na primeira medição do corte discordante que teve um sinal maior que na segunda medição. Isso

pode ter ocorrido pelo fato do chamado assentamento da ferramenta, que ocorre quando uma ferramenta nova é colocada no corte e ela está “adaptando” suas arestas ao corte.



**Gráfico 10: RMS do sinal em função do desgaste de flanco da ferramenta no fresamento a 50m/min com avanço por dente de 0,12mm/rev e profundidade de corte de 1,25mm.**

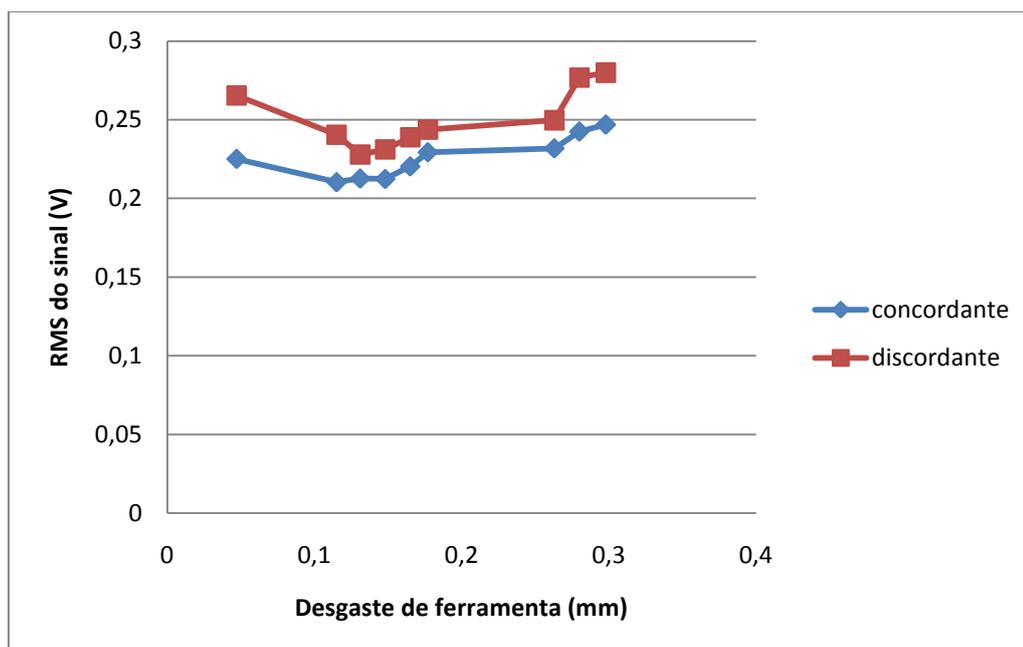
Analisando a Fig. 79 nota-se que apesar do pico na faixa de 300Hz (frequência natural do conjunto mandril-fresa) ter sido mais alto para o corte concordante, os demais picos (frequência de trabalho e seus harmônicos) foram maiores para o corte discordante o que se pode dizer que retrata a maior energia dispensada a este corte. Também nota-se que os sinais são muito parecidos entre si durante a evolução do desgaste.

**Corte Discordante****Corte Concordante**

**Figura 79: Espectro de frequência dos sinais de vibrações do eixo-árvore (coordenada y) na usinagem com velocidade de corte ( $v_c$ ) de 150m/min, avanço de corte de 0,12mm/rev e profundidade de corte de 1,25mm.**

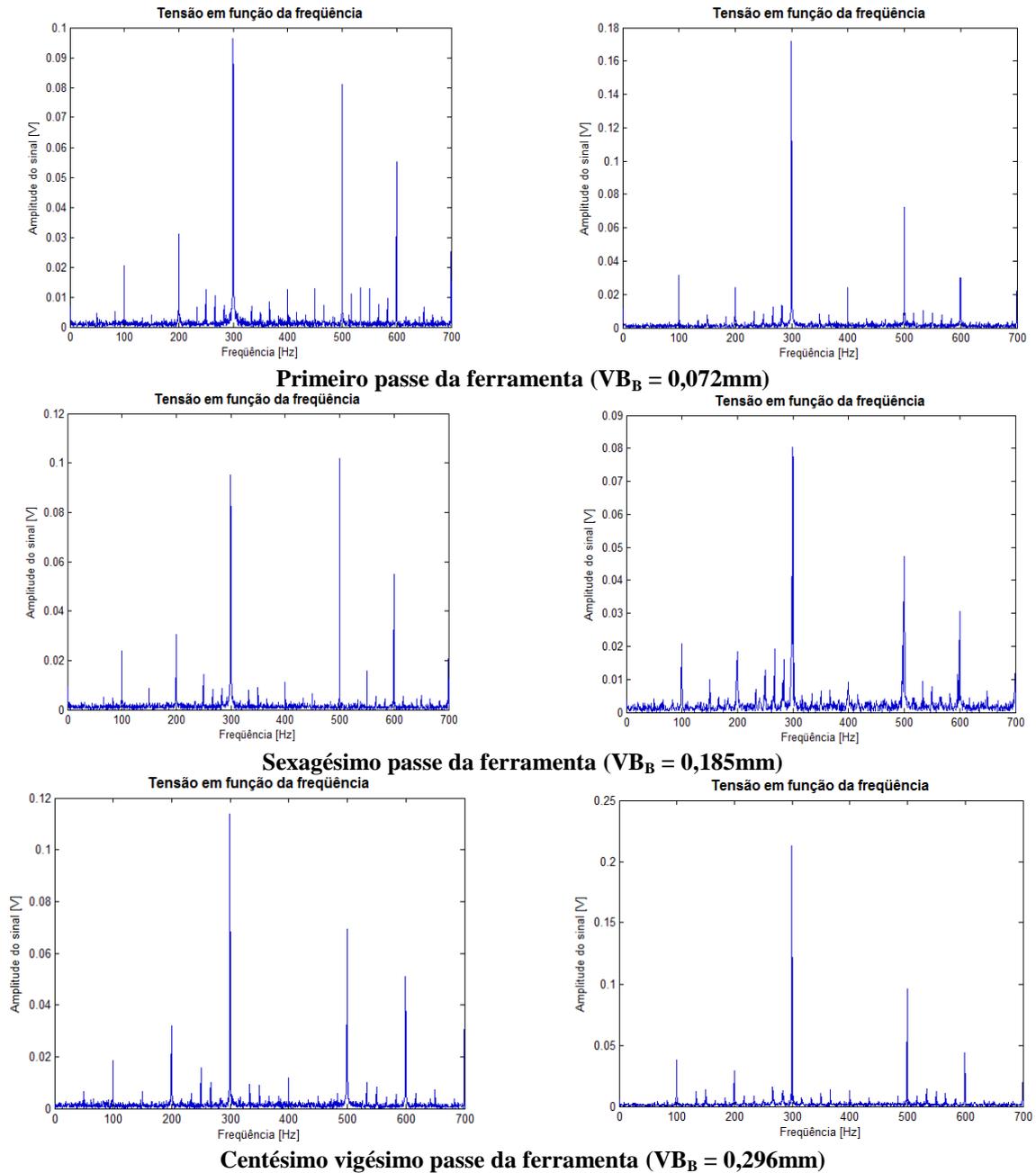
Avaliando o Gráf. 11, vê-se que os sinais de ambos os sentidos de corte são muito parecidos entre si, como já dito anteriormente. Vê-se que os sinais do corte discordante ainda apresentam uma maior amplitude em relação ao corte concordante. Nota-se também que os sinais de ambos os sentidos caem e logo depois crescem novamente. A redução do sinal pode ser explicada pelo fato da altura da peça estar diminuindo o que torna a peça mais estável e

menos susceptível a grandes vibrações e também o aumento da temperatura na interface cavaco-ferramenta que faz com que o corte seja facilitado, reduzindo esforços e conseqüentemente, reduzindo vibrações. O crescimento logo após essa redução pode ser explicada pelo próprio desgaste da ferramenta que começa a aumentar os esforços e assim aumenta a vibração.



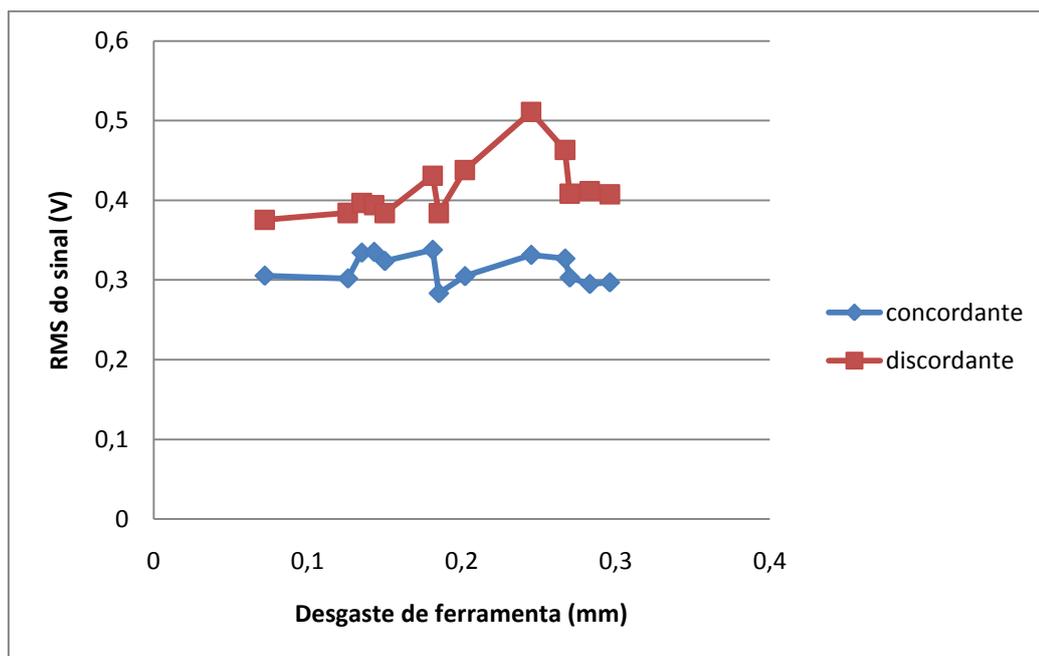
**Gráfico 11: RMS do sinal em função do desgaste de flanco da ferramenta no fresamento a 150m/min com avanço por dente de 0,12mm/rev e profundidade de corte de 1,25mm.**

Avaliando a Fig. 80, nota-se que os sinais são muito parecidos entre si. Vê-se que as frequências mais excitadas são a frequência natural do conjunto mandril-fresa, a frequência de trabalho da fresa e seus harmônicos. Nota-se que de um modo geral os sinais do corte concordante foram maiores que os sinais do corte discordante, isso analisando a olho nu, o que contraria o que foi afirmado em todo o trabalho até aqui.

**Corte Discordante****Corte Concordante**

**Figura 80:** Espectro de frequência dos sinais de vibrações do eixo-árvore (coordenada y) na usinagem com velocidade de corte ( $v_c$ ) de 250m/min, avanço de corte de 0,12mm/rev e profundidade de corte de 1,25mm.

Analisando o Gráf. 12, nota-se que o corte discordante apresenta uma maior amplitude dos sinais que o corte concordante como em todo o experimento. Também vê-se por meio da RMS que, de um modo geral, ambos os sinais ascendem até a nona medição (octogésimo passe) e logo após sofre uma queda, que pode ser atribuída a altura da peça e a temperatura na interface cavaco-ferramenta.



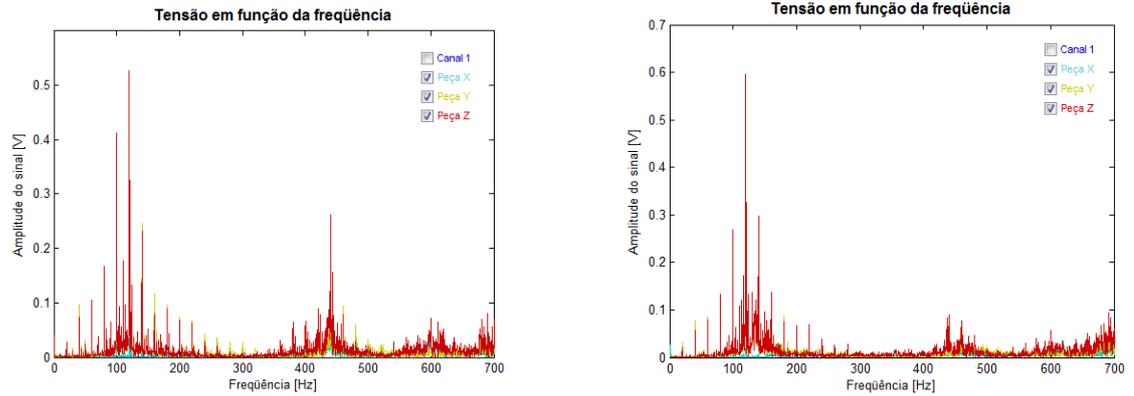
**Gráfico 12: RMS do sinal em função do desgaste de flanco da ferramenta no fresamento a 250m/min com avanço por dente de 0,12mm/rev e profundidade de corte de 1,25mm.**

#### 4.4.2.2 Sinais do corpo de prova (coordenada x, y e z)

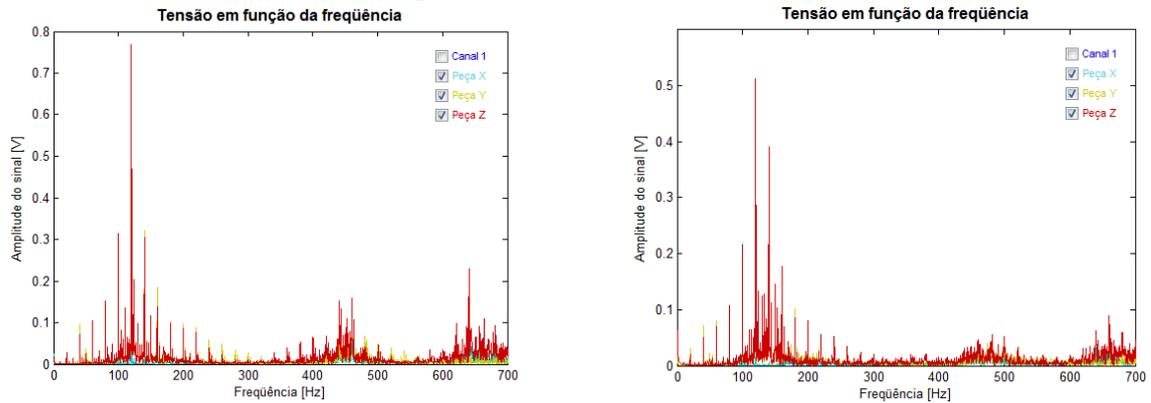
Primeiramente mostrar-se-á a evolução da FFT para as coordenadas x, y e z do corpo de prova em conjunto com o desgaste das arestas de corte, já que a excitação é gerada por uma única fonte em um mesmo corpo, e logo depois se fará a RMS do desgaste da ferramenta na coordenada y que explica bem as características de todas as outras.

Analisando a Fig. 81, nota-se que as frequências excitadas são, assim como na análise do eixo-árvore, a frequência de trabalho da fresa e também a frequência natural do corpo de prova. Vê-se também que o corte concordante gerou um pico com amplitude maior (120Hz), mas no conjunto, o corte discordante apresentou maiores amplitudes, que caracteriza o que até agora foi encontrado neste estudo.

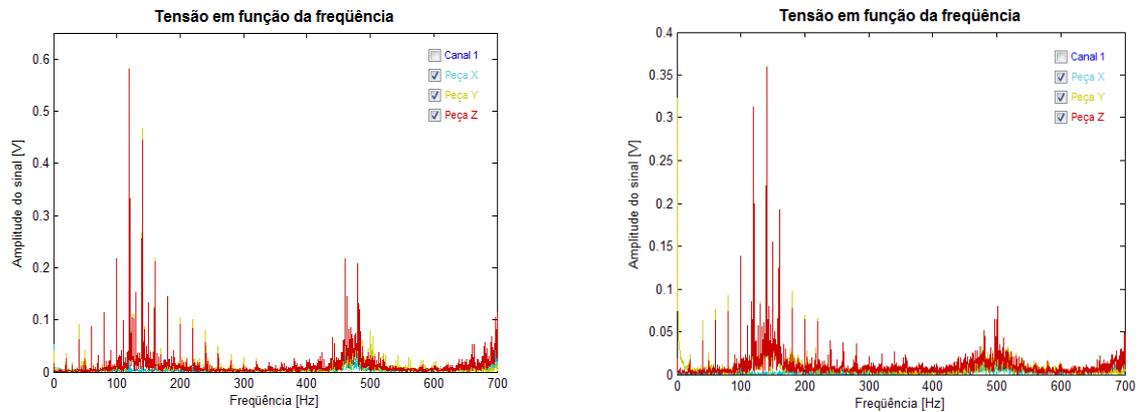
Avaliando ainda a Fig. 81, nota-se que de um modo geral, os sinais do primeiro passe são muito parecidos com os do último passe, como já foi falado nos sinais do eixo-árvore. Nota-se que os sinais do acelerômetro captado no eixo da coordenada z foram os que apresentaram maiores amplitudes, seguido pelos sinais do acelerômetro do eixo coordenado y. Isso já era esperado uma vez que são essas as coordenadas que a peça tem menos restrições, já que a coordenada x a peça está presa pela morsa que inibe o movimento e, conseqüentemente, as vibrações. As maiores amplitudes encontradas no eixo z está ligada a trepidação (*chatter*) provocado pela ferramenta que faz com que o passe anterior interfira no próximo corte.



**Primeiro passe da ferramenta ( $VB_B = 0,026\text{mm}$ )**



**Vigésimo passe da ferramenta ( $VB_B = 0,054\text{mm}$ )**



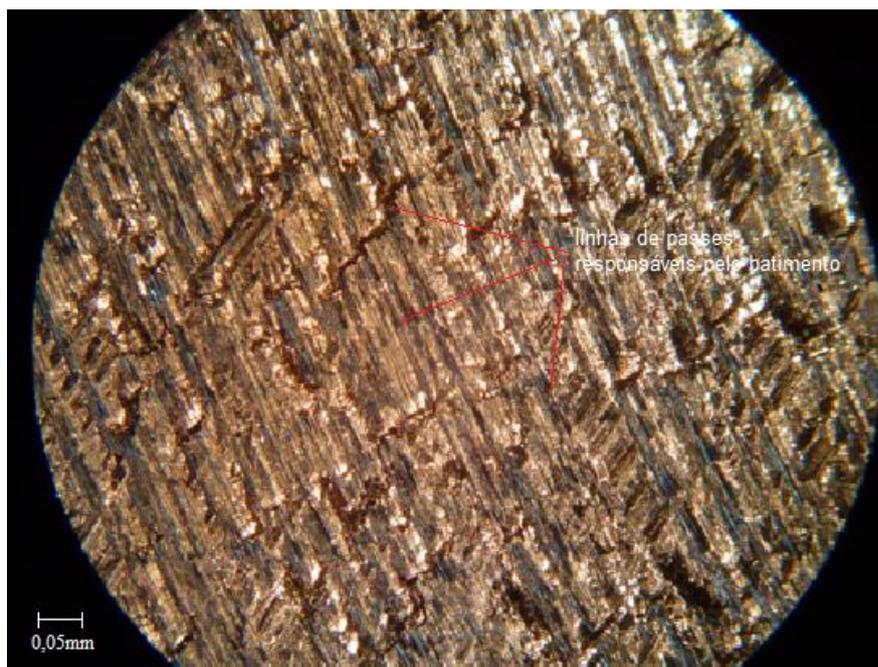
**Trigésimo sexto passe da ferramenta ( $VB_B = 0,079\text{mm}$ )**

**Corte Discordante**

**Corte Concordante**

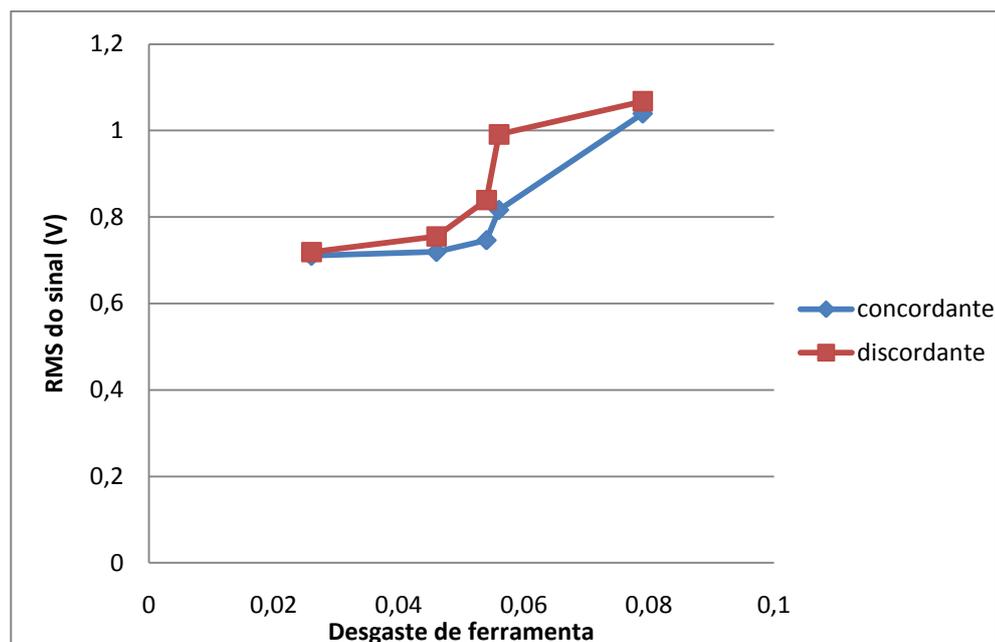
**Figura 82: Espectro de frequência dos sinais de vibrações da peça na usinagem com velocidade de corte ( $v_c$ ) de 50m/min, avanço de corte de 0,05mm/rev e profundidade de corte de 1,25mm.**

A Fig. 83 mostra claramente as linhas de passe da ferramenta responsável por esse fenômeno no corte.



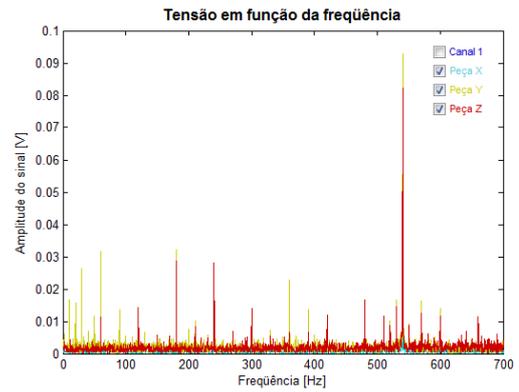
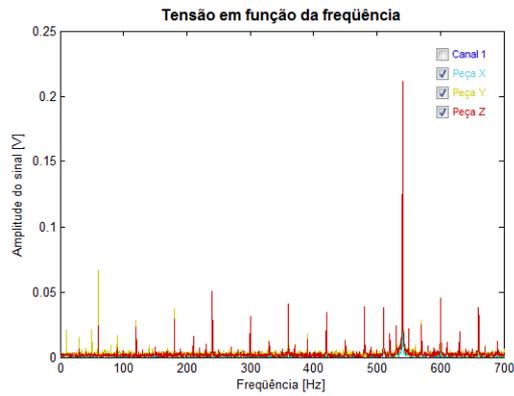
**Figura 3: Fotografia com microscópio óptico da superfície usinada a 50m/min com avanço por dente de 0,05mm/rev e profundidade de corte de 1,25mm.**

Avaliando o Gráf. 13, vê-se que os sinais do corte concordante foram sempre menores que os do corte discordante. Nota-se, também, que as RMS da coordenada x (Gráf. I do apêndice A) foram as menores das três e que as da coordenada z as maiores (Gráf. II do apêndice A), evidenciando o já falado efeito *chatter*. Vê-se, também, que o sinal cresce em todos os gráficos com o aumento do desgaste de ferramenta.

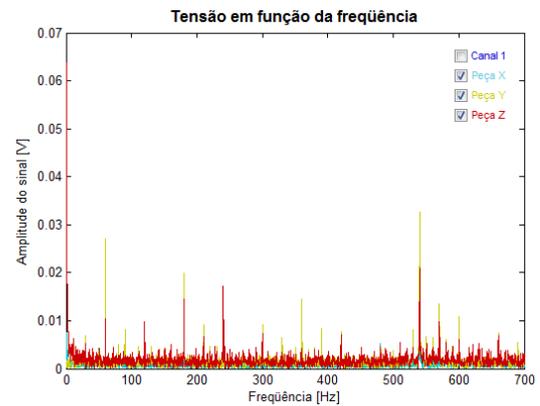
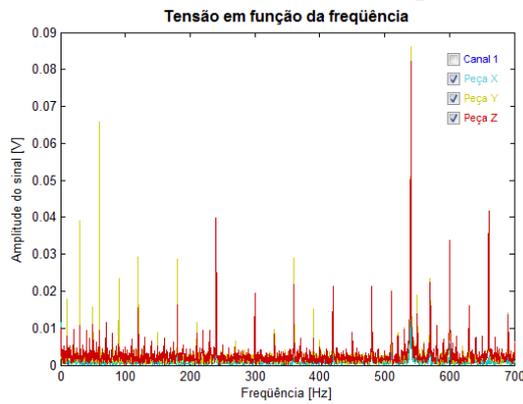


**Gráfico 13: RMS do sinal em função do desgaste de flanco da ferramenta na coordenada y no fresamento a 50m/min com avanço por dente de 0,05mm/rev e profundidade de corte de 1,25mm.**

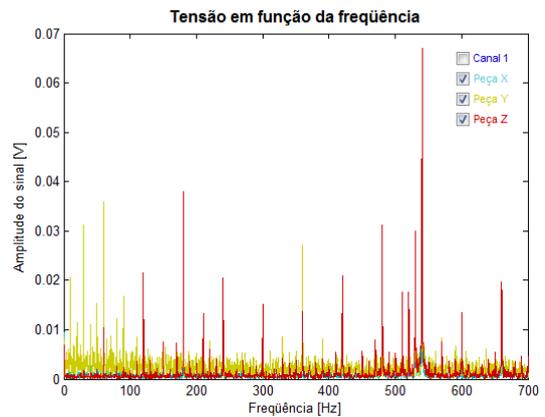
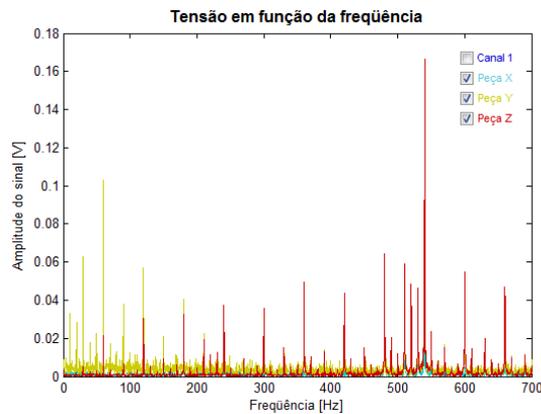
Avaliando a Fig. 84, vê-se que mais uma vez os sinais são muito parecidos entre si. Nota-se que, de uma forma geral, os sinais do corte discordantes são maiores que o do corte concordante e que os sinais têm a tendência a diminuir sua amplitude, uma vez que, como já foi dito, com a diminuição da altura o corpo de prova fica mais estável o que diminui sensivelmente a vibração. As frequências excitadas, mais uma vez, são a frequência natural da peça (que não é constante, pois a peça varia sua altura), a frequência de trabalho da fresa e seus harmônicos. Vê-se também que os sinais da coordenada y ficam maiores que os da coordenada z, o que ainda resulta no fenômeno de *chatter* regenerativo (ALTINTAS, 2000) como mostra a Fig. 85, mas amenizado em relação ao encontrado anteriormente.



**Primeiro passe da ferramenta ( $VB_B = 0,048\text{mm}$ )**



**Vigésimo passe da ferramenta ( $VB_B = 0,093\text{mm}$ )**



**Quinquagésimo passe da ferramenta ( $VB_B = 0,135\text{mm}$ )**

**Corte Discordante**

**Corte Concordante**

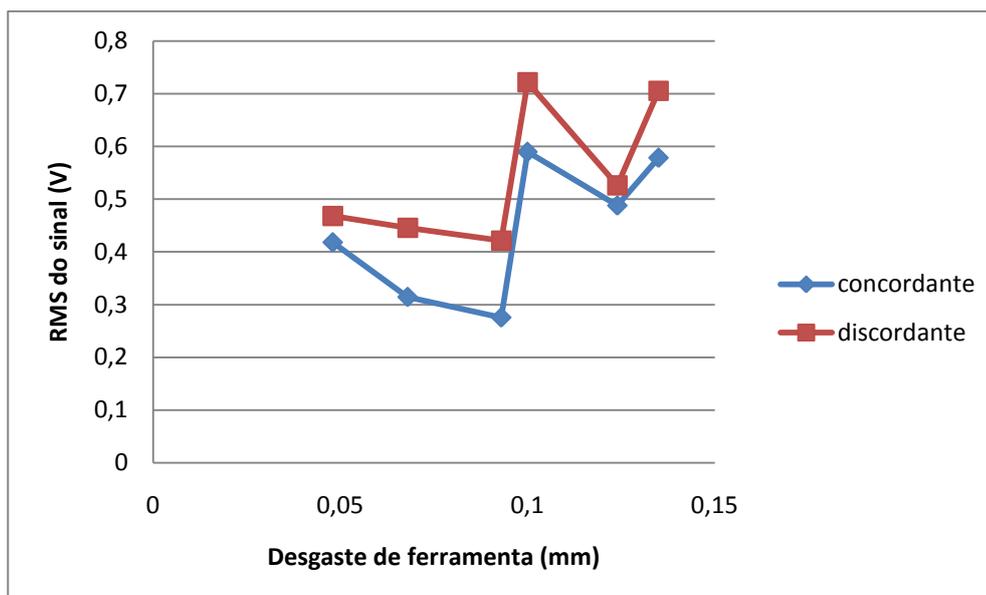
**Figura 84: Espectro de frequência dos sinais de vibrações da peça na usinagem com velocidade de corte ( $v_c$ ) de 150m/min, avanço de corte de 0,05mm/rev e profundidade de corte de 1,25mm.**



**Figura 85: Fotografia com microscópio óptico da superfície usinada a 150m/min com avanço por dente de 0,05mm/rev e profundidade de corte de 1,25mm.**

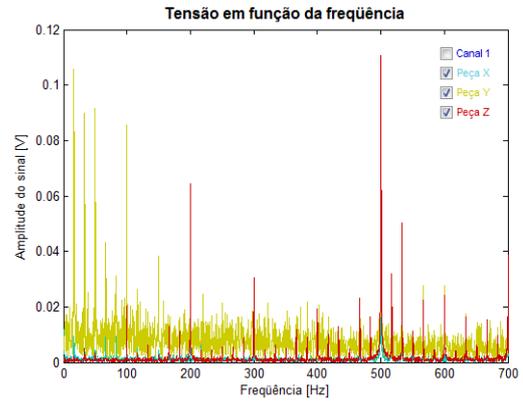
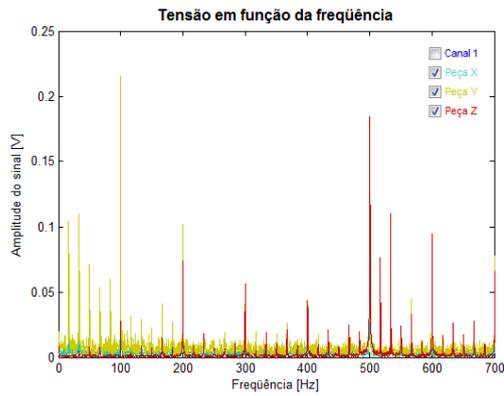
Avaliando o Gráf. 14, nota-se que a RMS dos sinais, assim como nos outros, do corte discordante foi maior que o do corte concordante. Vê-se que após a terceira medição, os sinais sofreram alguma variação. Isso ocorreu pelo fato de ter trocado a peça.

Comparando o Gráf. 14 com os Gráfs. III e IV do apêndice A, vê-se que os sinais da coordenada x foram mais uma vez as menores e que as outras duas foram equivalentes o que explica as linhas mais suaves da Fig. 85.

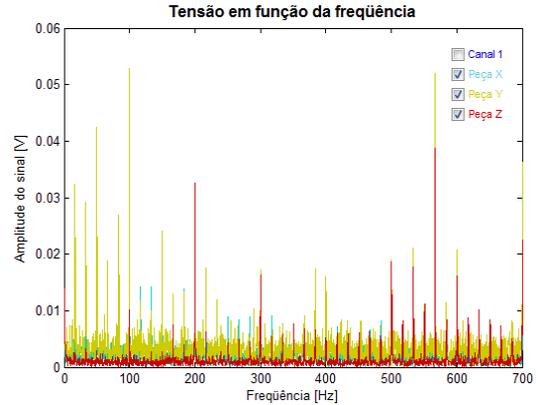
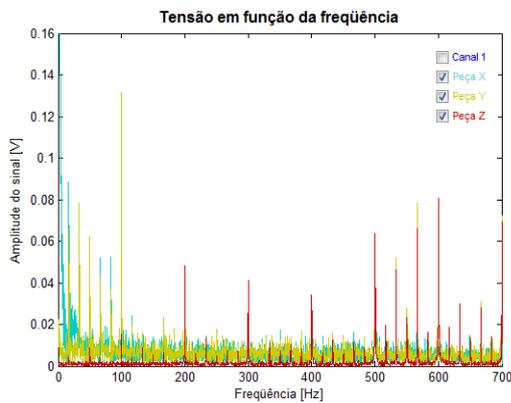


**Gráfico 14: RMS do sinal em função do desgaste de flanco da ferramenta na coordenada y no fresamento a 150m/min com avanço por dente de 0,05mm/rev e profundidade de corte de 1,25mm.**

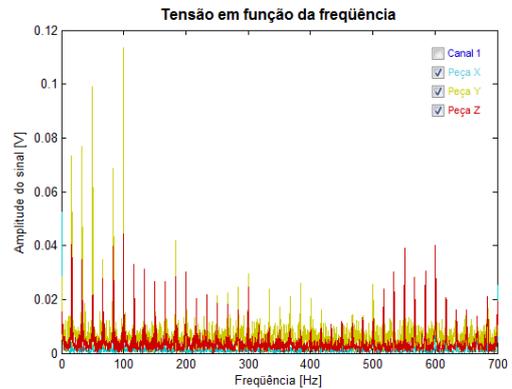
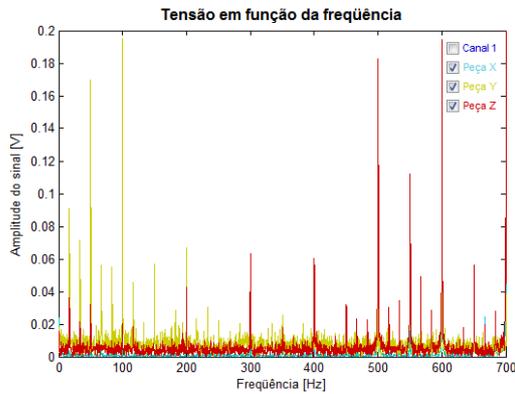
Nota-se que os sinais dos acelerômetros captando o eixo coordenado y e o eixo coordenado z foram os que apresentaram maiores amplitudes (Fig. 86). Como já dito, esses deveriam ser os que apresentam maiores amplitudes por causa das restrições impostas a coordenada z. Como a velocidade é alta, faz com que a força de corte também a seja e com isso faz com que o modo de vibração que excita a coordenada x apareça como pode ser visto na Fig. 86. As maiores amplitudes encontradas no eixo y diminuí sensivelmente a profundidade das linhas de passe que caracterizam a trepidação como mostra a Fig. 87.



**Primeiro passe da ferramenta ( $VB_B = 0,081\text{mm}$ )**



**Quadragésimo passe da ferramenta ( $VB_B = 0,134\text{mm}$ )**



**Septuagésimo passe da ferramenta ( $VB_B = 0,173\text{mm}$ )**

**Corte Discordante**

**Corte Concordante**

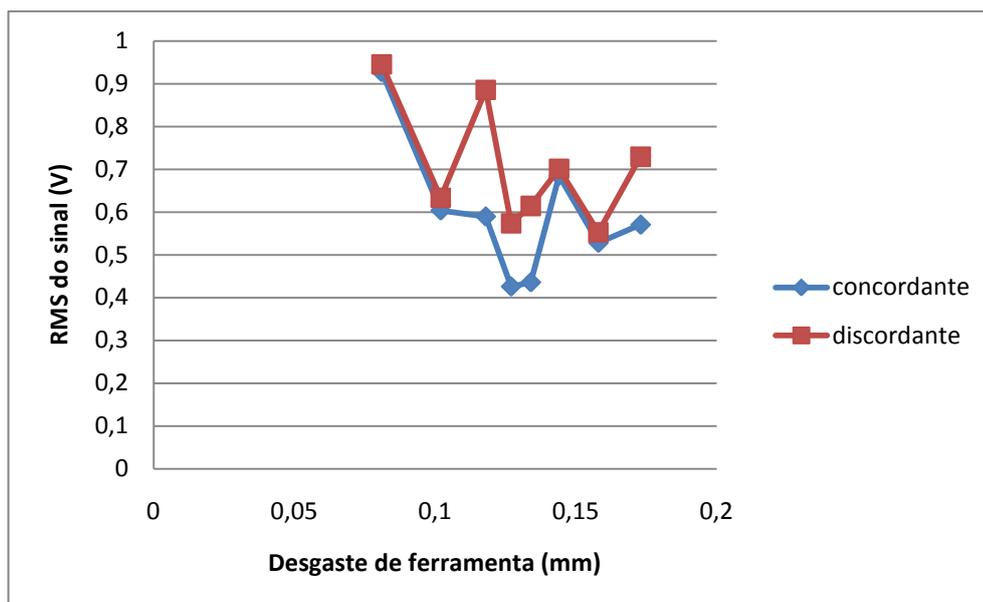
**Figura 86: Espectro de frequência dos sinais de vibrações da peça na usinagem com velocidade de corte ( $v_c$ ) de 250m/min, avanço de corte de 0,05mm/rev e profundidade de corte de 1,25mm.**



**Figura 87: Fotografia com microscópio óptico da superfície usinada a 250m/min com avanço por dente de 0,05mm/rev e profundidade de corte de 1,25mm.**

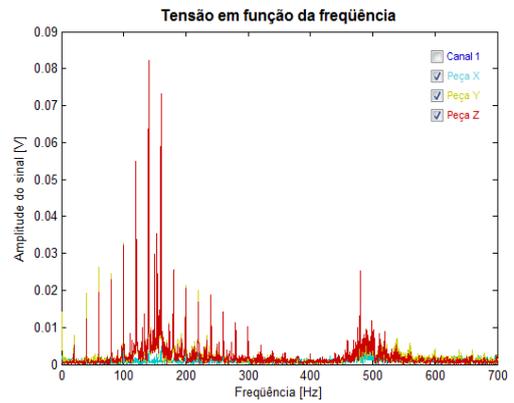
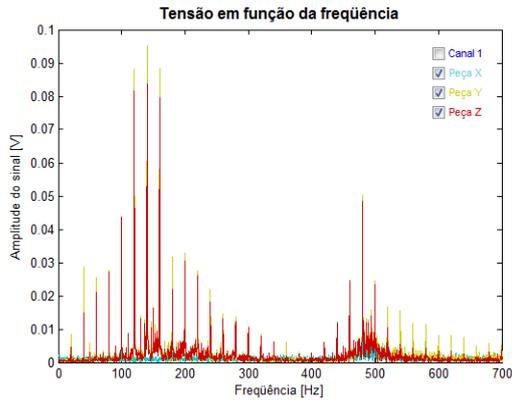
Analisando o Gráf. 15, nota-se que o corte discordante apresentou maiores sinais que o corte concordante. Eles oscilaram bastante durante todo o teste de vida. Isso se deu devido a conflito entre a diminuição de esforços imposta pela diminuição da altura da peça e o aumento de esforços imposta pelo desgaste de ferramenta. Esse conflito gera um balanço e é este balanço que é captado pelos sinais.

Comparando o Gráf. 15 com os Gráfs. V e VI do apêndice A, nota-se que todos os sinais cresceram com o aumento do desgaste, exceto os sinais do acelerômetro que capta a coordenada x. Os sinais captados na coordenada x (Gráf. V) é a que mais se aproxima dos sinais do eixo-árvore (Gráf. 9) que cresceram (devido à influência do desgaste da ferramenta) até certo momento e depois diminuíram (devido à influência da diminuição da altura da peça).

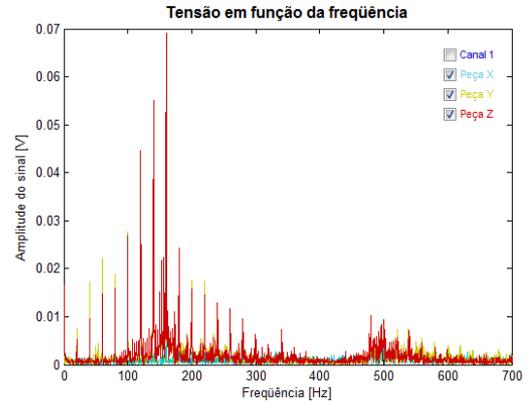
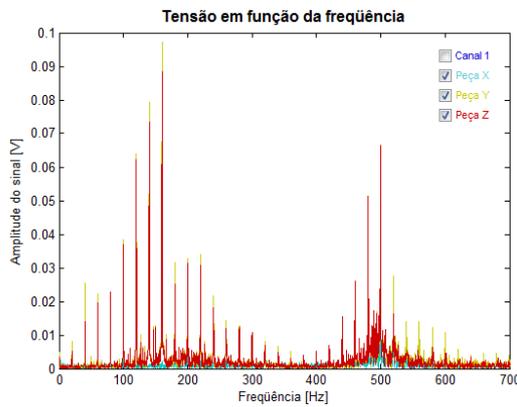


**Gráfico 15: RMS do sinal em função do desgaste de flanco da ferramenta na coordenada y no fresamento a 250m/min com avanço por dente de 0,05mm/rev e profundidade de corte de 1,25mm.**

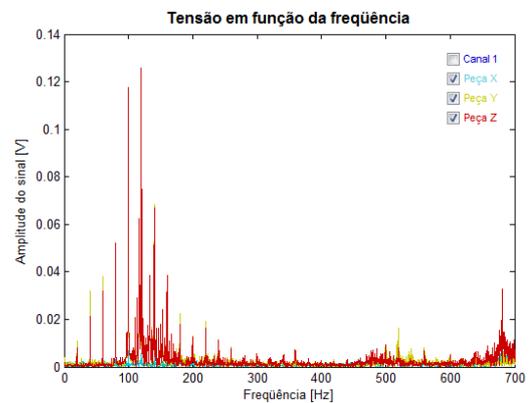
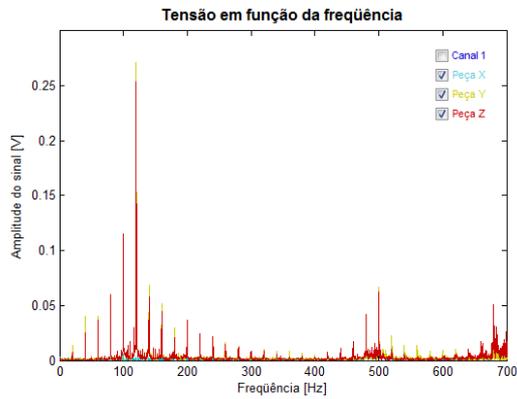
Avaliando as Fig. 88, vê-se que o corte discordante apresentou maior amplitude de sinais que o corte concordante, comprovando que o corte discordante precisa de mais energia para ser efetuado uma vez que ele desprende mais energia no sistema de monitoramento. Também novamente, nota-se que os sinais são muito parecidos entre si tanto no começo quanto no fim dos ensaios de vida de ferramenta. Vê-se também que os sinais no fim dos testes tiveram um acentuado crescimento na amplitude. Como nos sinais adquiridos na velocidade de corte de 250m/min no eixo z, novamente demonstra-se que foram menores que os do eixo y o que fez com que as linhas de passe característicos da trepidação tivessem uma menor profundidade que comparando com o corte com a velocidade de 50m/min e o avanço por dente de 0,05mm/rev (Fig. 89).



**Primeiro passe da ferramenta ( $VB_B = 0,098\text{mm}$ )**



**Vigésimo passe da ferramenta ( $VB_B = 0,149\text{mm}$ )**

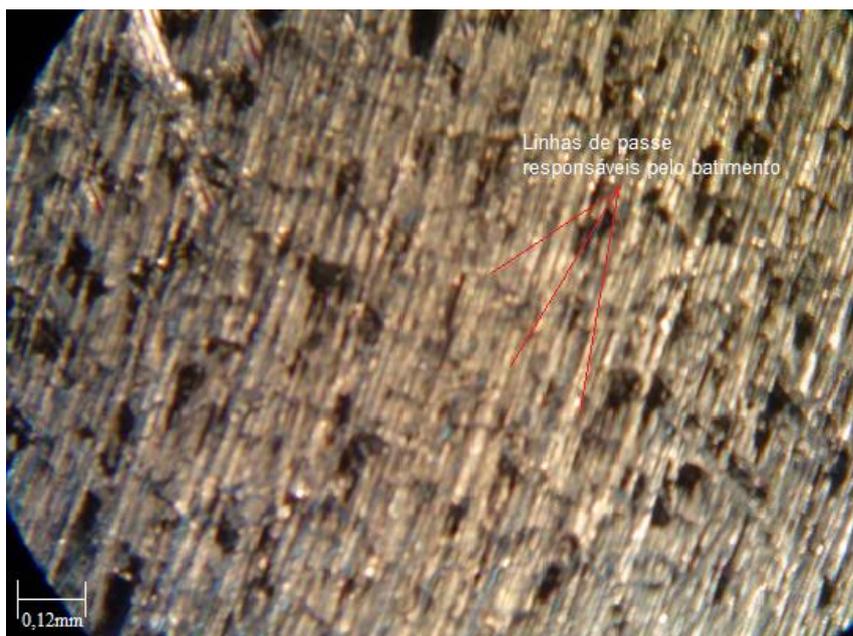


**Trigésimo sexto passe da ferramenta ( $VB_B = 0,161\text{mm}$ )**

**Corte Discordante**

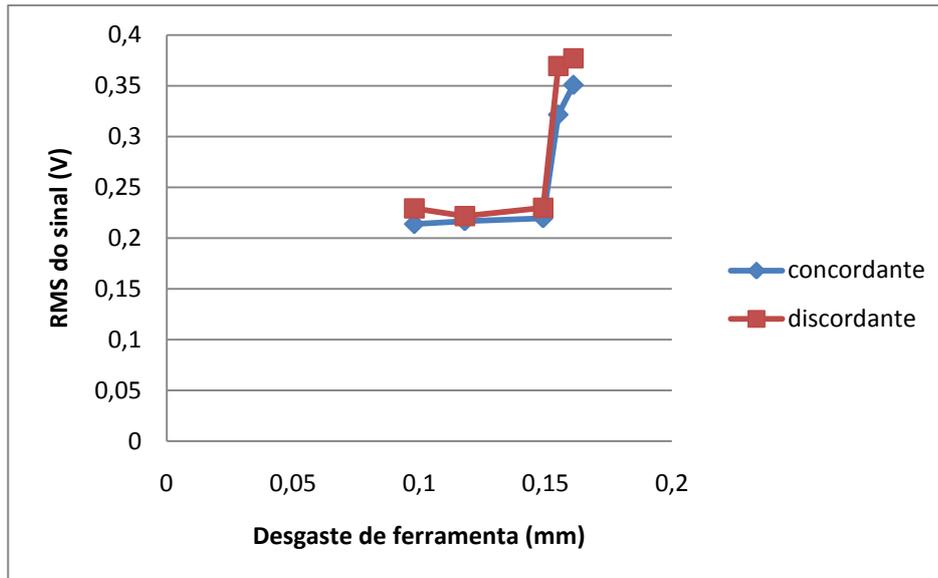
**Corte Concordante**

**Figura 88: Espectro de frequência dos sinais de vibrações da peça na usinagem com velocidade de corte ( $v_c$ ) de 50m/min, avanço de corte de 0,12mm/rev e profundidade de corte de 1,25mm.**



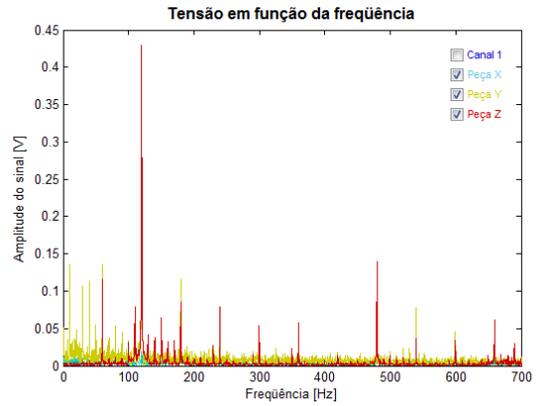
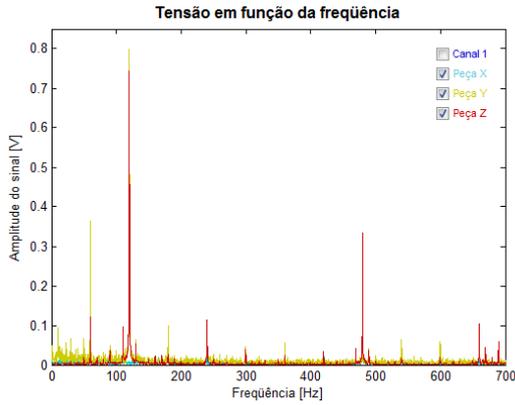
**Figura 89: Fotografia com microscópio óptico da superfície usinada a 50m/min com avanço por dente de 0,12mm/rev e profundidade de corte de 1,25mm.**

Analisando os Gráfs. 16, nota-se que a amplitude dos sinais (RMS) foram maiores no corte discordante que no corte concordante, como em todos os demais testes feitos. Nota-se que o sinal cresceu à medida que o desgaste da ferramenta e aumentou bastante para todos os eixos coordenados (Gráfs. VII e VIII do apêndice A), o que ocorreu devido a troca do corpo de prova, sendo que os sinais do acelerômetro localizado no eixo z foi o que melhor acompanhou o desgaste entre os três.

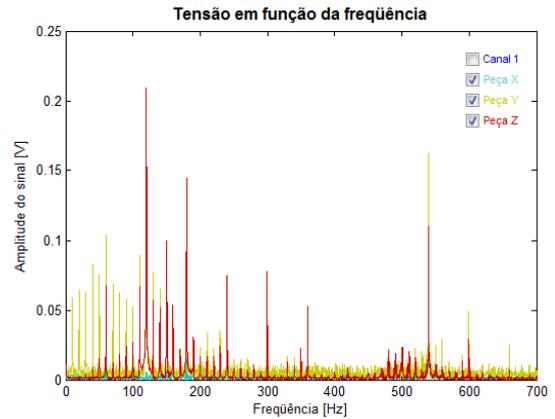
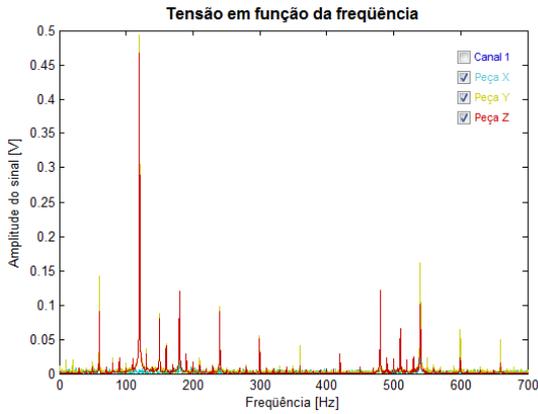


**Gráfico 16: RMS do sinal em função do desgaste de flanco da ferramenta na coordenada y no fresamento a 50m/min com avanço por dente de 0,12mm/rev e profundidade de corte de 1,25mm.**

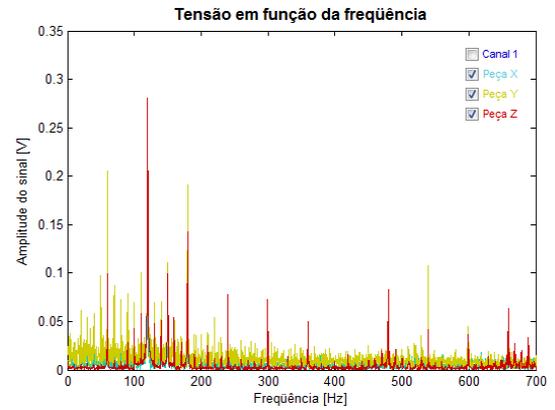
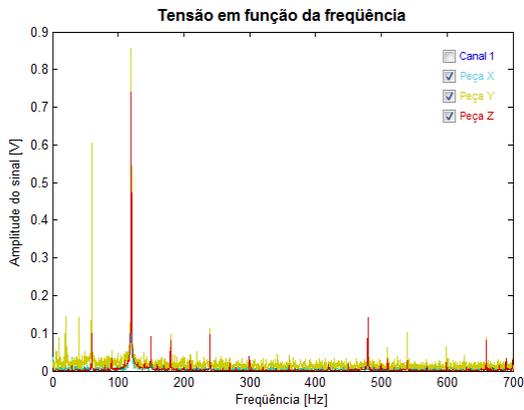
Analisando a Fig. 90 nota-se que os sinais do corte concordante foram maiores para todos os espectros analisados que os do corte discordante. Observa-se que os sinais do eixo y aumentam durante a evolução do desgaste. Vê-se que os sinais do eixo coordenado y são maiores que o do eixo z, gerando assim menores linhas de passe (Fig. 91).



**Primeiro passe da ferramenta ( $VB_B = 0,047\text{mm}$ )**



**Quinquagésimo passe da ferramenta ( $VB_B = 0,177\text{mm}$ )**

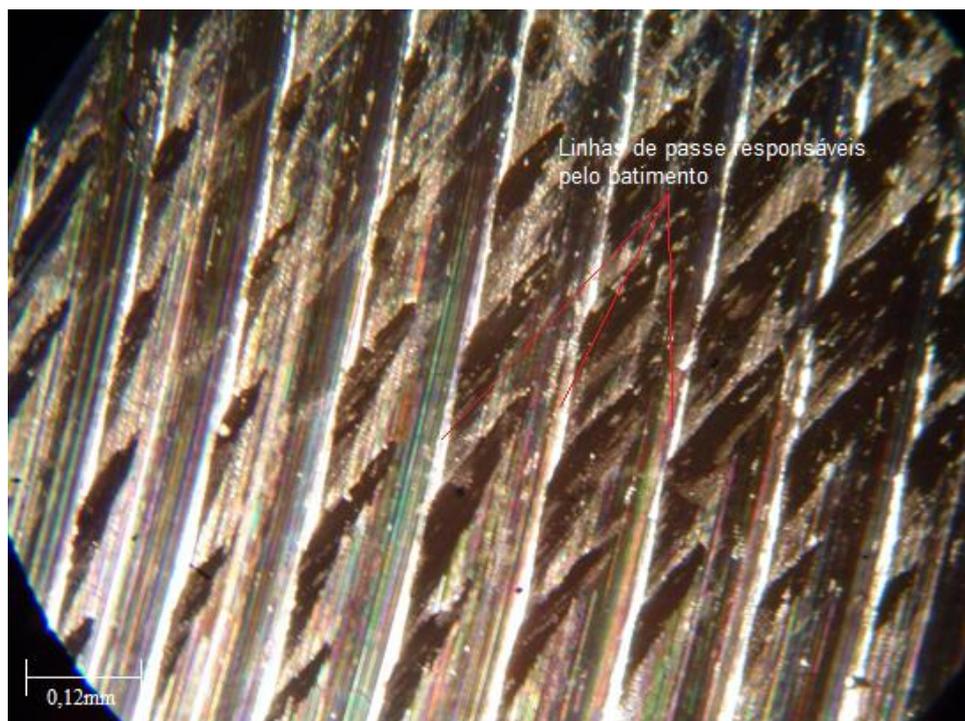


**Octogésimo passe da ferramenta ( $VB_B = 0,298\text{mm}$ )**

**Corte Discordante**

**Corte Concordante**

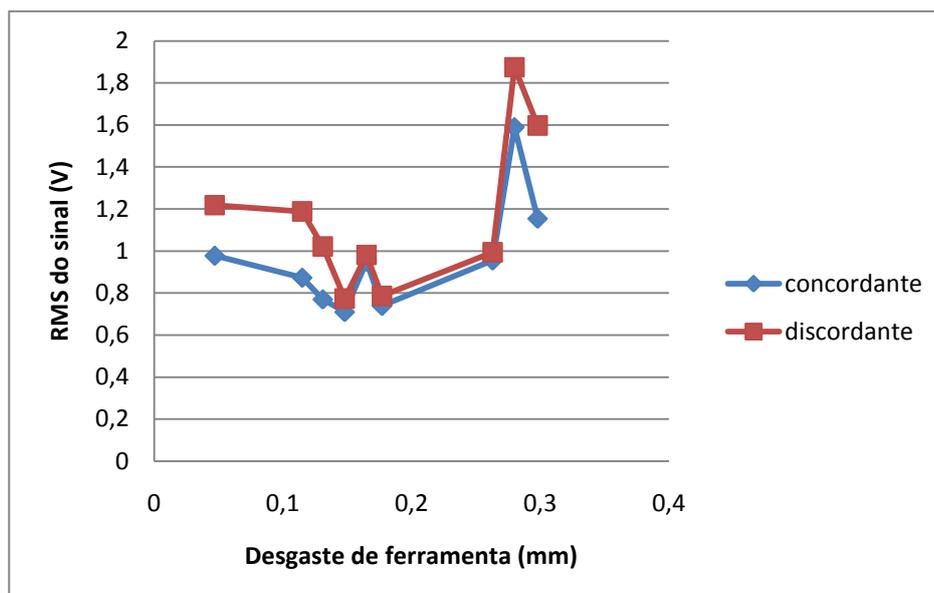
**Figura 90: Espectro de frequência dos sinais de vibrações da peça na usinagem com velocidade de corte ( $v_c$ ) de 150m/min, avanço de corte de 0,12mm/rev e profundidade de corte de 1,25mm.**



**Figura 91: Fotografia com microscópio óptico da superfície usinada a 150m/min com avanço por dente de 0,12mm/rev e profundidade de corte de 1,25mm.**

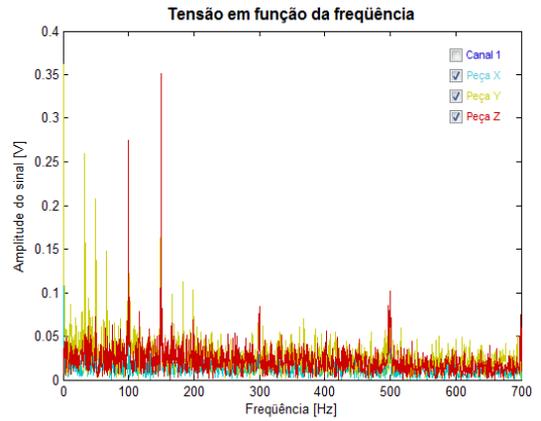
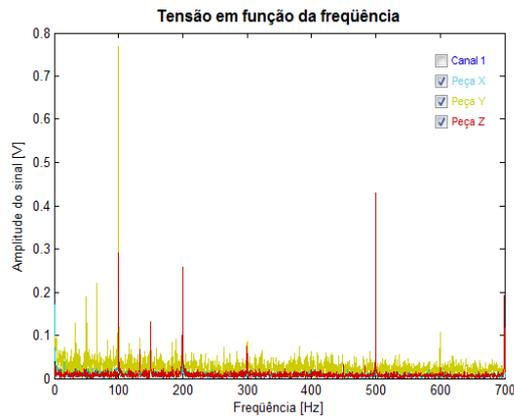
Avaliando o Gráf. 17, vê-se que os sinais de ambos os sentidos de corte são muito parecidos entre si como já dito anteriormente. Vê-se que os sinais do corte discordante ainda apresentam uma maior amplitude em relação ao corte concordante.

Comparando o Graf. 17 com os Gráfs. IX e X do apêndice A, observa-se que os sinais de todos os eixos caem e em seguida crescem novamente. A redução do sinal pode ser explicada pelo fato da altura da peça estar diminuindo o que torna a peça mais estável e menos susceptível a grandes vibrações e também o aumento da temperatura na interface cavaco-ferramenta que faz com que o corte seja facilitado, reduzindo esforços e, conseqüentemente, reduzindo vibrações. O crescimento logo após essa redução pode ser explicada pelo próprio desgaste da ferramenta que começa a aumentar os esforços e assim aumenta a vibração assim como ocorreu no eixo-árvore.

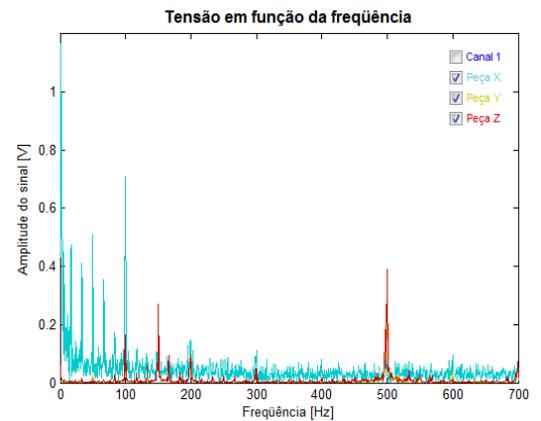
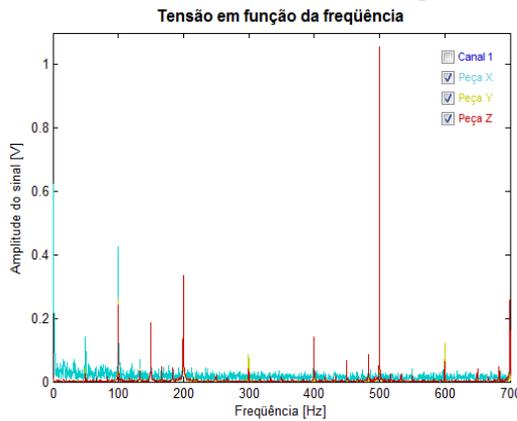


**Gráfico 17: RMS do sinal em função do desgaste de flanco da ferramenta na coordenada y no fresamento a 150m/min com avanço por dente de 0,12mm/rev e profundidade de corte de 1,25mm.**

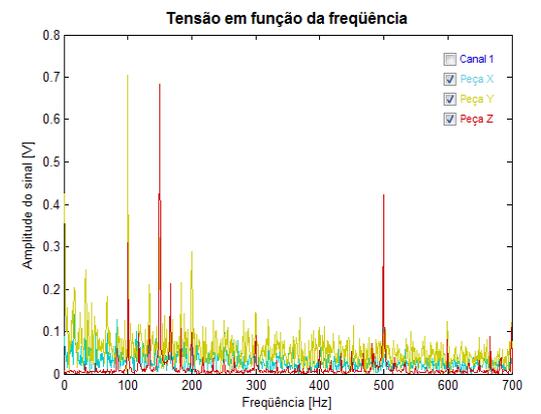
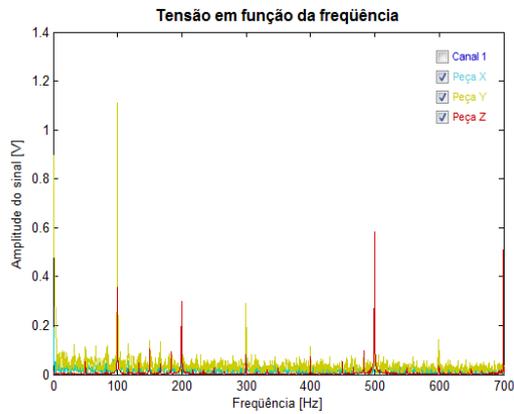
Avaliando a Fig. 92, nota-se que esse foi o corte que mais forças atuaram e também o mais severo. Nota-se a não predominância de um eixo coordenado nas amplitudes dos sinais. No corte discordante começa os testes com sinais altos do eixo y, no meio os outros eixos o mascaram um pouco e por fim o eixo y retoma os altos sinais. Vê-se que as frequências mais excitadas são a frequência natural da peça, a frequência de trabalho da fresa e seus harmônicos. Nota-se que de um modo geral os sinais do corte discordante foram maiores que os sinais do corte concordante, como em quase a totalidade do trabalho. Como os sinais do eixo z oscilaram bastante, a trepidação regenerativa também o foi. A Fig. 93 mostra um momento em que as linhas formaram um batimento relativamente alto, ou seja, um sinal com o eixo z de grandes amplitudes.



**Primeiro passe da ferramenta ( $VB_B = 0,072\text{mm}$ )**



**Sexagésimo passe da ferramenta ( $VB_B = 0,185\text{mm}$ )**

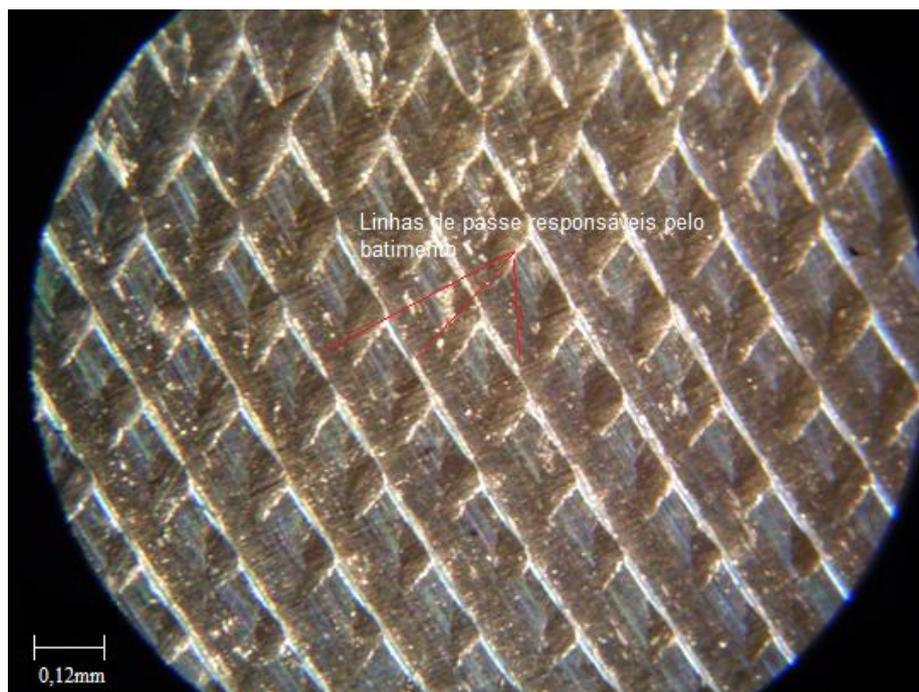


**Octogésimo passe da ferramenta ( $VB_B = 0,298\text{mm}$ )**

**Corte Discordante**

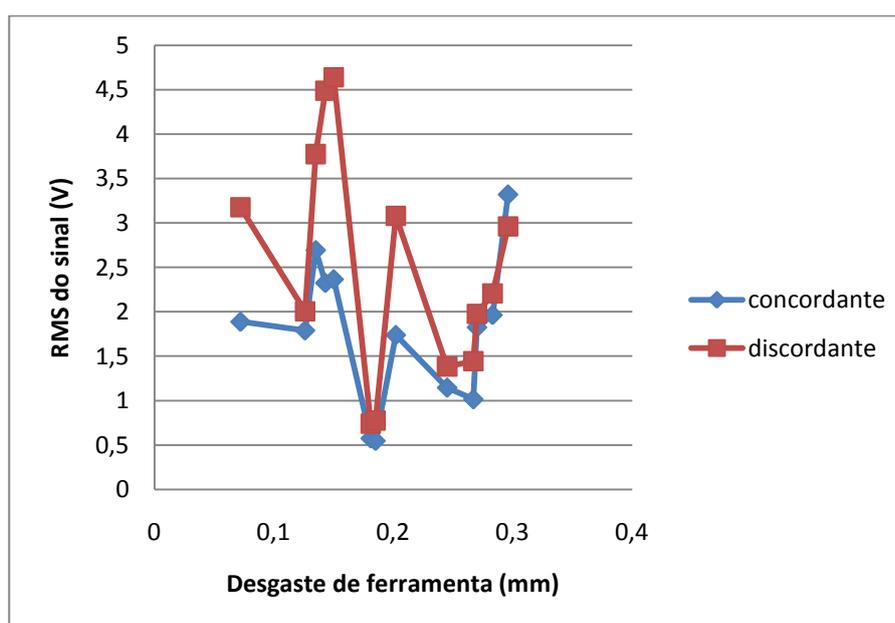
**Corte Concordante**

**Figura 92: Espectro de frequência dos sinais de vibrações da peça na usinagem com velocidade de corte ( $v_c$ ) de 250m/min, avanço de corte de 0,12mm/rev e profundidade de corte de 1,25mm.**



**Figura 93:** Fotografia com microscópio óptico da superfície usinada a 250m/min com avanço por dente de 0,12mm/rev e profundidade de corte de 1,25mm.

Analisando o Gráf. 18, nota-se que o corte discordante apresenta uma maior amplitude dos sinais que o corte concordante para quase a totalidade do teste, como em todo o experimento. Também comprova, pela oscilação dos sinais de ambos os sentidos de corte, o que já havia dito anteriormente que esse era o corte que exigia mais esforços.



**Gráfico 18:** RMS do sinal em função do desgaste de flanco da ferramenta na coordenada y no fresamento a 250m/min com avanço por dente de 0,12mm/rev e profundidade de corte de 1,25mm.

Avaliando os sinais oriundos dos testes de vida de ferramenta, nota-se que os sinais do eixo coordenado y é o mais solicitado, uma vez que este era o eixo em que a peça tinha liberdade para se movimentar. Também nota-se que o eixo coordenado z é o responsável por medir a trepidação da peça e assim ver seu acabamento superficial.

#### **4.4.3 Rugosidade da Peça**

Analisando a Fig. 94 que mostra as rugosidades em relação ao desgaste de ferramenta para a usinagem com velocidade de corte de 50m/min, avanço por dente de 0,05mm/rev e uma profundidade de corte de 1,25mm, nota-se que assim como os sinais vibracionais e de emissão acústica, a rugosidade média é maior para o corte discordante que para o corte concordante. Vê-se também que o sinal sofre um crescimento inicial e no fim do teste ele diminui. Isso pode ser explicado pelo fato da APC (TRENT e WRIGHT, 2001) ter facilitado o corte e, conseqüentemente melhorado o acabamento diminuindo assim a rugosidade.

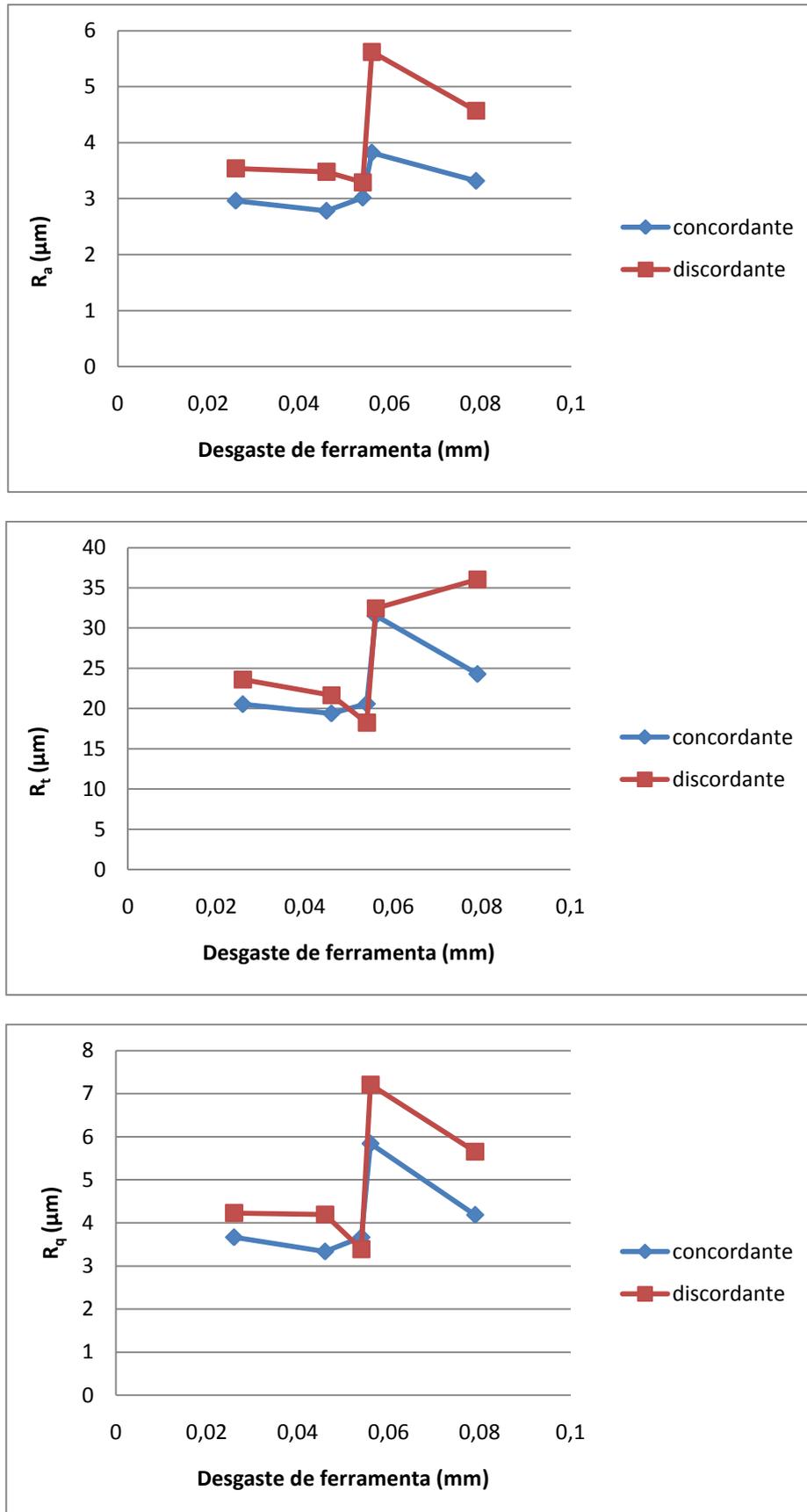


Figura 94: Rugosidades em função do desgaste de flanco no fresamento a 50m/min com avanço por dente de 0,05mm/rev e profundidade de corte de 1,25mm.

Avaliando a Fig. 95, vê-se que de um modo geral a rugosidade cresceu para ambos os sentidos de corte, levando a crer que a rugosidade tem muito a ver com a vibração do sistema. Como na maioria dos aspectos analisados até aqui, o corte discordante apresentou rugosidades maiores que a as do corte concordante. As rugosidades também cresceram com o aumento do desgaste da ferramenta, o que também era esperado.

Analisando ainda a Fig. 95, nota-se uma rugosidade total ( $R_t$ ) alta no início do teste no corte concordante que pode ser explicada pelo assentamento da ferramenta de corte.

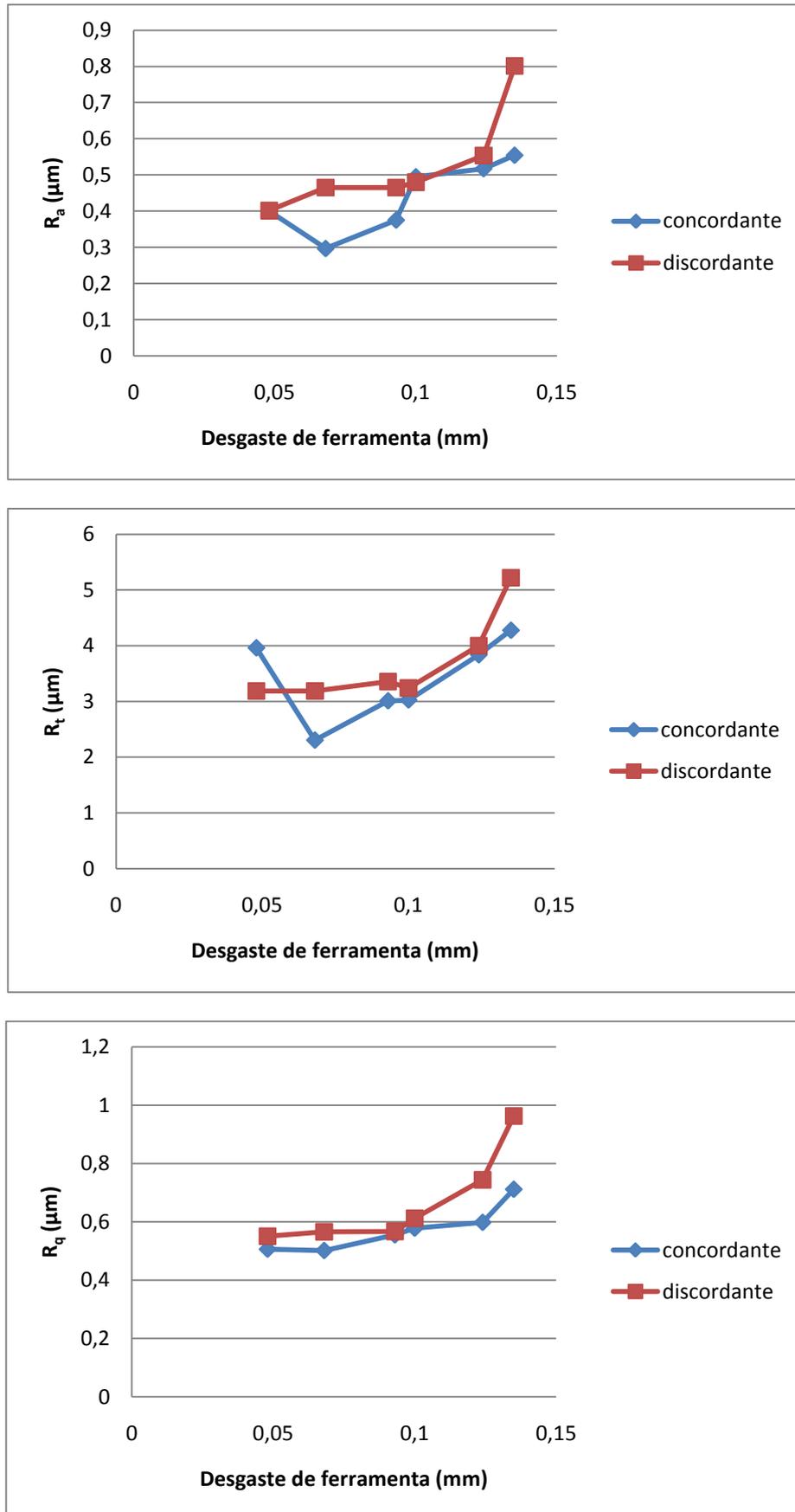


Figura 95: Rugosidades em função do desgaste de flanco no fresamento a 150m/min com avanço por dente de 0,05mm/rev e profundidade de corte de 1,25mm.

Avaliando a Fig. 96, vê-se que as rugosidades cresceram para ambos os sentidos de corte com o aumento do desgaste da ferramenta. Como nos outros, as rugosidades do corte discordante foram maiores que as do corte concordante. Nota-se ainda que, como no caso anterior, a rugosidade total ( $R_t$ ) é alta no início do teste no corte discordante que também pode ser explicada pelo assentamento da ferramenta de corte.

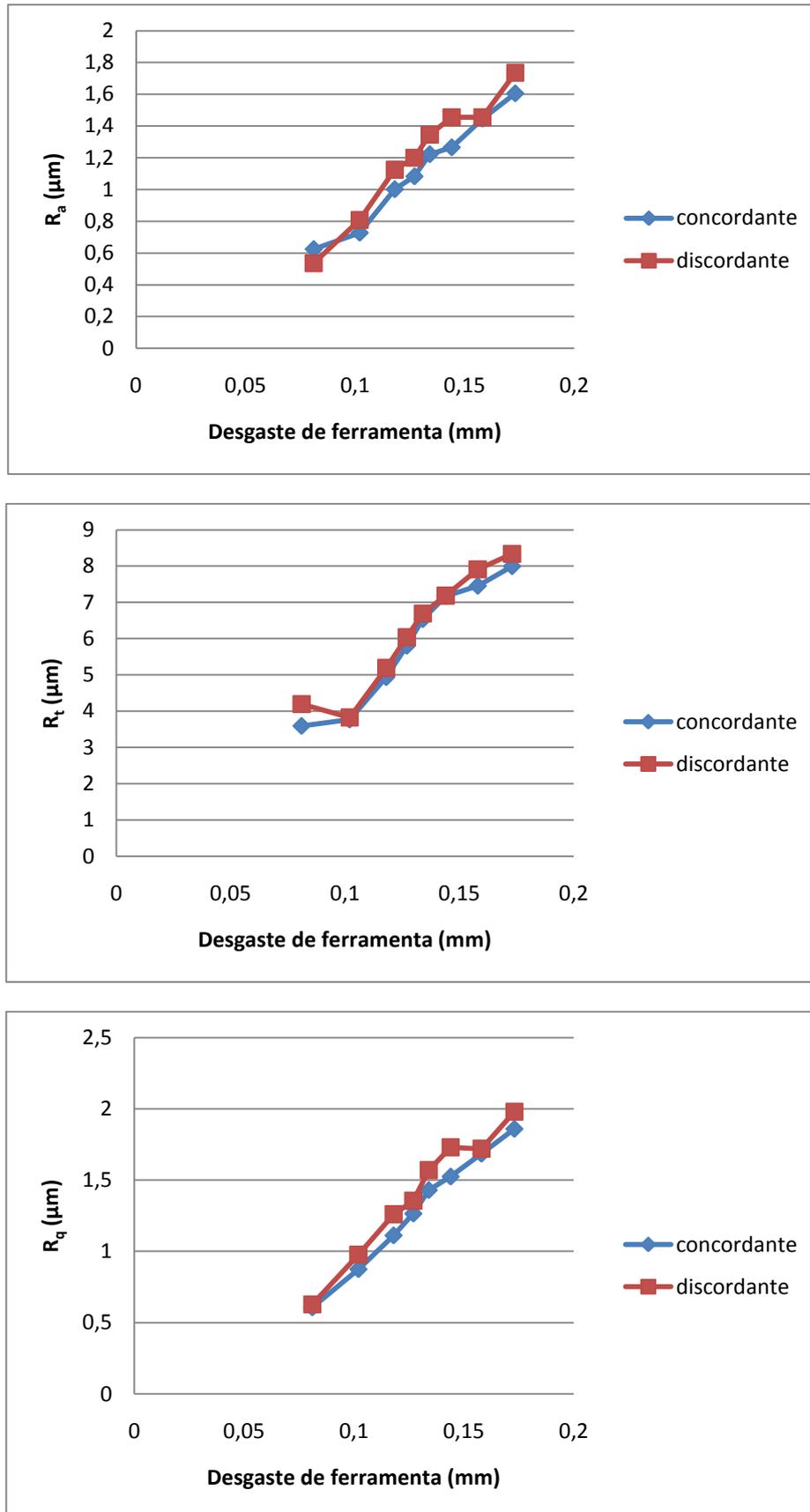


Figura 96: Rugosidades em função do desgaste de flanco no fresamento a 250m/min com avanço por dente de 0,05mm/rev e profundidade de corte de 1,25mm.

Analisando a Fig. 97, nota-se que as rugosidades foram maiores para o corte discordante que para o corte concordante. Observa-se que as rugosidades cresceram à medida que o desgaste aumentou em ambos os sentidos. Nota-se também que a rugosidade média ( $R_a$ ) no corte discordante sofre um crescimento inicial e no fim do teste ele diminui. Isso pode ser explicado pelo fato da APC ter facilitado o corte e, conseqüentemente, melhorando o acabamento diminuindo assim a rugosidade média.

Analisando ainda a Fig. 97, como na rugosidade média, só que agora no corte concordante, a rugosidade total ( $R_q$ ) no corte concordante no final do teste diminuiu dando também a entender que a APC facilitou o corte fazendo com que a rugosidade superficial melhorasse.

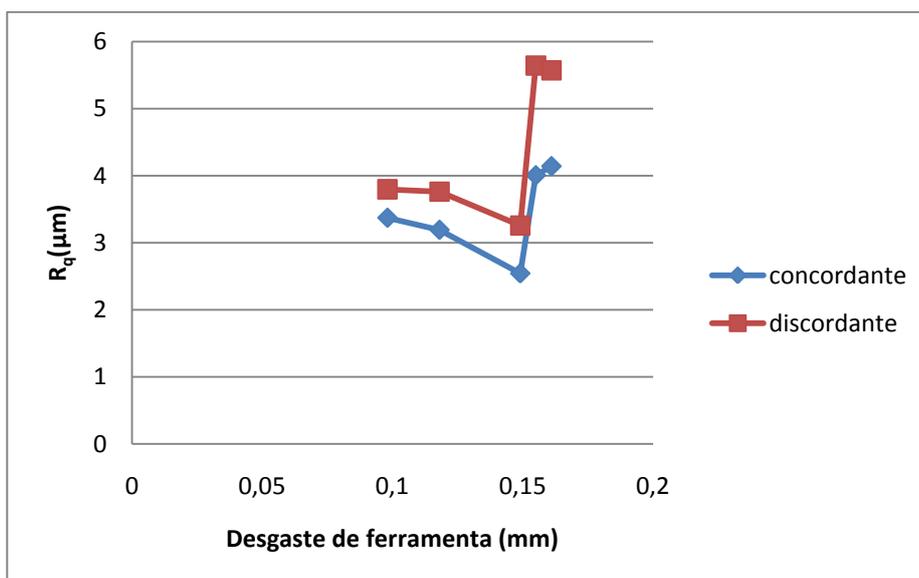
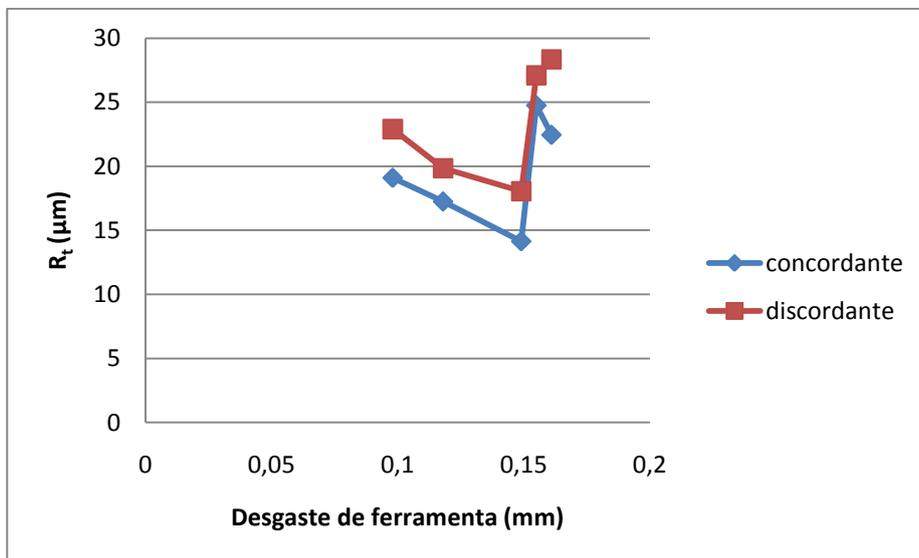
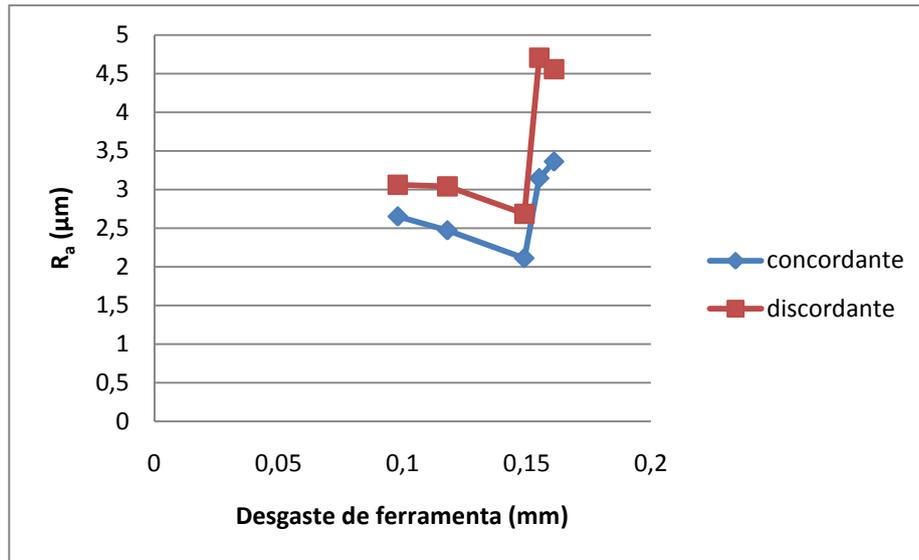


Figura 97: Rugosidades em função do desgaste de flanco no fresamento a 50m/min com avanço por dente de 0,12mm/rev e profundidade de corte de 1,25mm.

Analisando a Fig. 98, nota-se que o corte discordante apresentou maiores rugosidades que as do corte concordante. As rugosidades também cresceram com o aumento do desgaste da ferramenta, o que também era esperado.

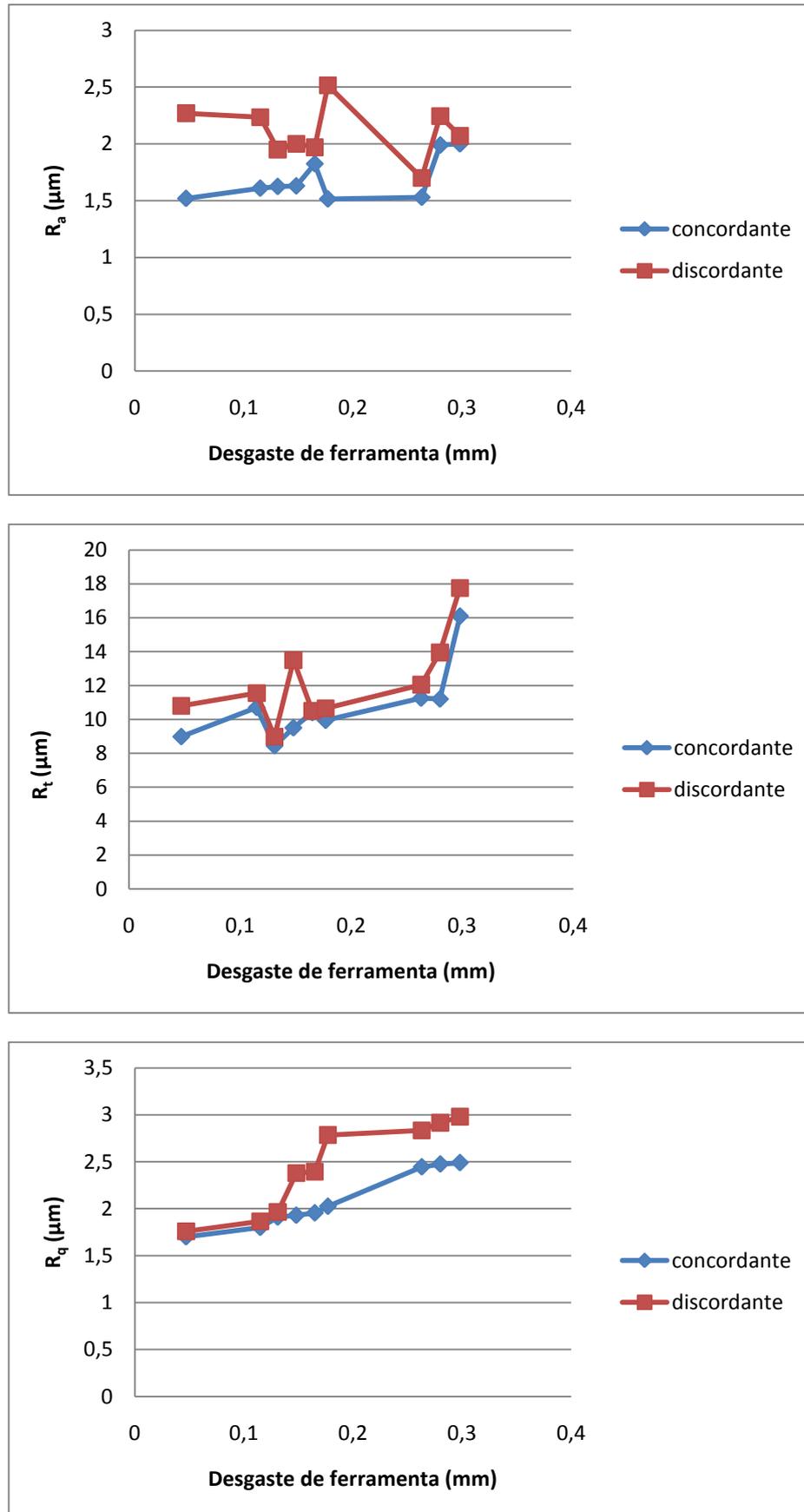


Figura 98: Rugosidades em função do desgaste de flanco no fresamento a 150m/min com avanço por dente de 0,12mm/rev e profundidade de corte de 1,25mm.

Avaliando a Fig. 99, como o corte com essas condições é um corte muito agressivo, vê-se que as rugosidades mantiveram em uma faixa para ambos os sentidos de corte com o aumento do desgaste da ferramenta, o que de certa forma é um bom resultado, uma vez que demonstrou que a ferramenta responde bem ao desgaste conseguindo fazer peças dentro de uma certa tolerância, larga, é claro. Como nos outros, as rugosidades do corte discordante foram maiores que as do corte concordante.

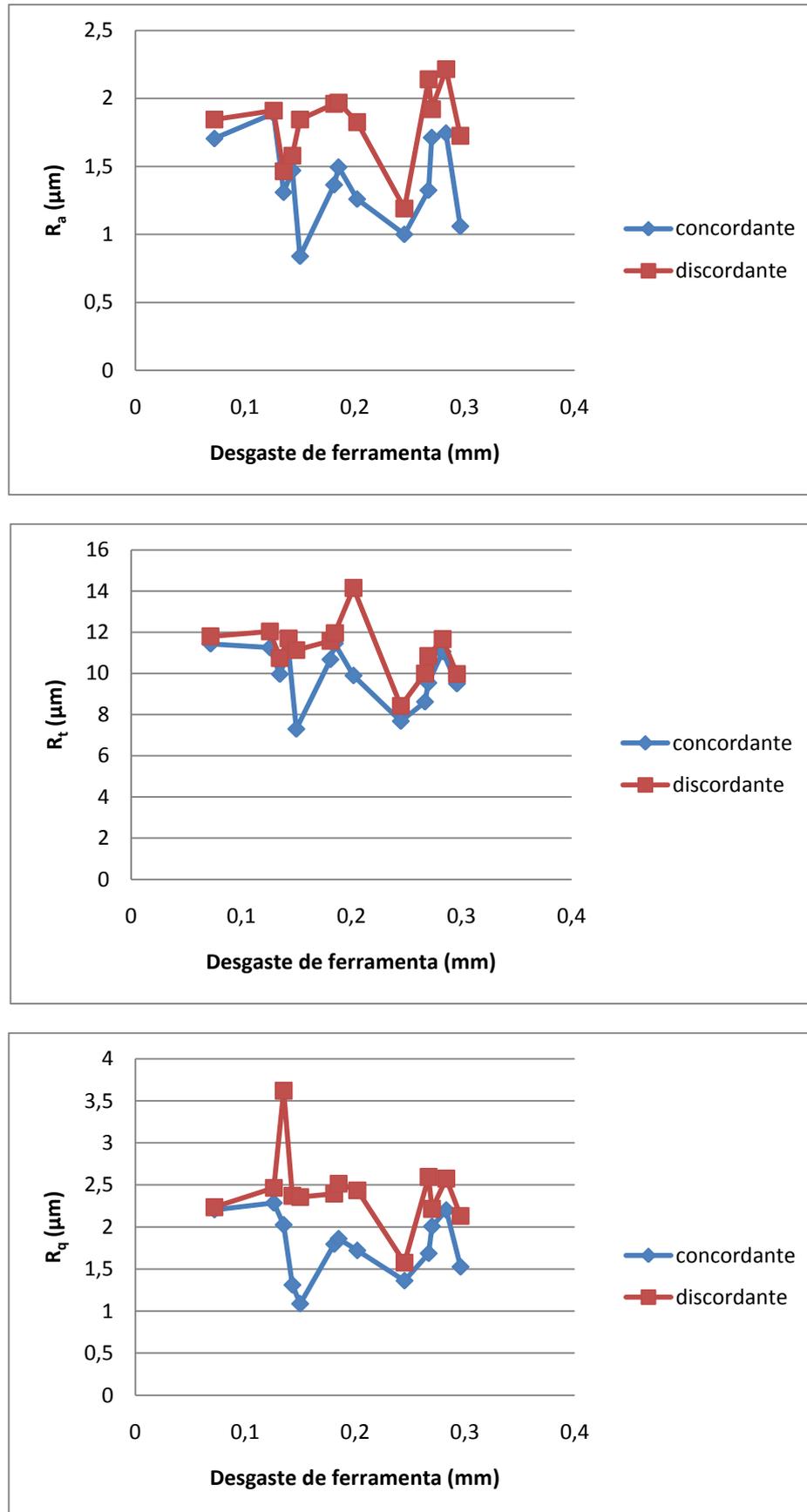


Figura 99: Rugosidades em função do desgaste de flanco no fresamento a 250m/min com avanço por dente de 0,12mm/rev e profundidade de corte de 1,25mm.

Avaliando os gráficos de rugosidade em relação ao desgaste de ferramenta, viu-se que as rugosidades do corte discordante foram maiores que as do corte concordante para quase a totalidade dos testes. Notou-se também que a rugosidade nem sempre aumenta com o aumento do desgaste de flanco, isto se deu além do fato do assentamento da aresta de corte, também pela diminuição da altura da peça durante os testes. Isso fez com que o sistema ficasse mais estável diminuindo a rugosidade.

Então o que influi na rugosidade da peça positivamente neste estudo é a diminuição da altura da peça que atenua as vibrações, o aumento da temperatura na interface cavaco-ferramenta que diminui esforços e em um primeiro momento o assentamento da aresta de corte nova. Já, negativamente, interfere a progressão do desgaste da ferramenta.

## 5 CONCLUSÕES

Baseado nos objetivos propostos no começo do trabalho, utilizando da metodologia desenvolvida e dos resultados e discussões encontrados chegaram-se as seguintes conclusões.

Sobre os processos de monitoração:

- Notou-se que ambos os processos mostram ser capazes de captar sinais oriundos de diversas características do fresamento.
- O sistema de monitoração por sinais de emissão acústica demonstrou ter grande sensibilidade de captar aspectos microscópicos, como foi o caso do efeito de amortecimento que veio a comprovar a literatura sobre o assunto.
- Já os sinais vibracionais mostraram, sobre o ponto de vista macroscópicos, características ocorridas no corte, principalmente na conjuntura de esforços aplicados ao corte.
- Os sistemas de monitoração foram capazes de captar a diferença de esforços provocados pelo sentido de corte.

Sobre a influência do número de insertos nos sinais:

- O sistema vibracional demonstrou-se capaz de captar a variação do número de insertos, fato que pôde ser observado nos gráficos pelas frequências de trabalho da fresa.
- O sistema de emissão acústica também foi capaz de captar a variação do número de insertos demonstrado através das ondas de frequência ao longo do tempo na STFT.

Sobre a influência dos parâmetros de corte nos sinais:

- Os sinais vibracionais captaram a variação de esforços oriundos da variação dos parâmetros de corte. Isto se deu devido ao fato de que qualquer variação nos esforços faz com que varie a solicitação da peça e isso foi captado com eficiência pelo sistema.

Sobre os testes de vida de ferramenta na rugosidade da peça:

- Notou-se que o desgaste de flanco não é a única variável que influencia a rugosidade da peça, sendo que em muitos casos o tamanho do corpo de prova e a dinâmica da peça no corte influem muito mais que o próprio desgaste.

Sobre a aplicação industrial dos experimentos:

- Os dois métodos precisam ser melhor estudados para a aplicação efetiva em chão de fábrica.
- Baseado no presente trabalho indica-se o método de emissão acústica ao uso em chão de fábrica, uma vez que os sinais se vêem livre das principais causas de interferências.

## 6 PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Como propostas para trabalhos futuros seguem-se:

- Aplicação de fluido de corte (MQF) no fresamento a fim de determinar qual a sua influência nos sinais de emissão acústica e vibrações;
- Balanceamento da fresa e comparação dos sinais do presente trabalho com sinais obtidos com a fresa balanceada;
- Estudo metalúrgico do material usinado e sua verdadeira influência nos sinais, principalmente os de emissão acústica;
- Comparação dos testes práticos com modelos matemáticos computacionais.

## 7 BIBLIOGRAFIA

ALTINTAS, Y.; **Manufacturing Automation: Metal Cutting Mechanics, Machine Tools Vibrations and CNC Design**. 1. Ed. New York: Cambridge University Press, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR-6175: **Processos Mecânicos de Usinagem**. Rio de Janeiro: 1971. 19p.

BEATTIE, A.G.; Acoustic Emission: Principles and Instrumentation. **Journal of Acoustic Emission**. Volume 2, Number ½, 1983.

BENAROYA, H.; **Mechanical Vibration – Analysis, Uncertainties, and Control**. New York: Marcel Dekker, 2004.

BLUM, T.; INASAKI, I. A Study on Acoustic Emission from the Orthogonal Cutting Process. **Journal of Engineering for Industry**. Vol. 112, pp. 203-211, 1990.

BRESCHIANI FILHO, E.; **Seleção de Materiais Metálicos**. 3. Ed., Campinas, SP: Ed. da UNICAMP, 1991.

CISNEROS, C. A. F.; **Uma Contribuição à Instrumentação para o Monitoramento do Processo de Fresamento de Topo**. 2006. 157p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – USP, São Paulo.

CHENG, K.; **Machining Dynamics**: Fundamentals, Applications and Practices. 1. Ed. London: Springer, 2009.

DAVIM, J. P.; **Machining**: Fundamentals and Recents Advances. 1. Ed. London: Springer, 2008.

DEONISIO, C. C. C.; **Estudo do Fresamento do Aço D2 Endurecido em Altas Velocidades de Corte**. 2004. 248p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – UNICAMP, Campinas.

DIMLA, D. E.; LISTER, P. M. On-line metal cutting tool condition monitoring I: force and vibration analysis. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**. V. 40, pp. 739-768. 2000.

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L.; **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**. 4. Ed., São Paulo: Artliber, 2001.

DOLINSEK, S.; KOPAC, J.; Acoustic Emission Signals for Tool Wear Identification. **Wear**. Vol. 225-229, pp. 295-303, 1999.

DORNFELD, D.A. Monitoring of the Cutting Process by Means of AE Sensor. **Proceedings of the 3rd International Machine Tool Engineering Conference**. 1988.

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

GRABEC, P; LESKOVAR, P.; Acoustic emission of a cutting process, **Ultrasonics**. Vol. 15, pp. 17–20. 1977.

HAILI, W.; HUA, S.; MING, C.; DEJIN, H.; On-line Tool Breakage Monitoring in Turning. **Journal of Materials Processing Technology**. Vol. 139, pp. 237-242. 2003.

HELLIER, C.; **Handbook of Nondestructive Evaluation**. 1. Ed. Nova York: McGraw-Hill, 2003.

HIOKI, D.; **Influência dos Parâmetros de Corte do Fresamento HSM sobre o Desempenho Tribológico do Aço AISI H13 Endurecido**. 2006. 233p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – USP, São Paulo.

HUTCHINGS, I. M.; **Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials**. 1. Ed. Londres: Arnold, 1992.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION ISO 3685: **Tool-life Testing with Single-point Turning Tools**. Geneva: 1993. 48p.

KING, R. I.; **Handbook of High Speed Machining Technology**. Chapman and Hall, 1985.

KÖENIG, W.; **Tecnologia da fabricação**: Tornear, fresar e furar, v.1, Achen: 1981.

LAN, M.S.; DORNFELD, D.A. In-Process Tool Fracture Detection. Trans. ASME, **J. Eng. Ind.** Vol.106, pp. 111-118, 1984.

LI, X. A Brief Review: Acoustic Emission Method for Tool Wear Monitoring during Turning. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**. Vol.42, pp. 157-165. 2002.

LUO, X. K.; CHENG, K.; LUO, X. C.; LIU, X. W. A simulated investigation on machining instability and dynamic surface generation. **International Journal of Advanced Manufacture Technology**. Vol.26, pp. 718–725. 2005

MAIA, L. H. A.; LANDRE JUNIOR, J.; BECKER, M.; SALES, W. S.; Avaliação Do Desgaste De Ferramenta Em Diferentes Condições De Corte No Fresamento De Aço Baixa-Liga Por Meio De Sinais De Emissão Acústica. In: **5º COBEF**, Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, Belo Horizonte, MG, Brasil, 2009.

MARINESCU, I.; AXINTE, D. A.; A critical analysis of effectiveness of acoustic emission signals to detect tool and workpiece malfunctions in milling operations. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**. 2008.

MATSUMOTO, H.; DINIZ, A. E. Torneamento de Aço Endurecido Monitorado por Emissão Acústica e Corrente do Motor. In: **14ª COBEM**, Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, Bauru, SP, Brasil, 1997.

ORHAN, S.; ER, A. O.; CAMUŞCU, N.; ASLAN, E.; Tool wear evaluation by vibration analysis during end milling of AISI D3 cold work tool steel with 35 HRC hardness. **NDT&E International**. Vol. 40, pp. 121-127. 2007.

PIGARI, A.C.; **Monitoramento do Desgaste de Ferramenta no Processo de Torneamento Usando Emissão Acústica**. 1995, 130 p, Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – UNICAMP, Campinas, SP.

POLLI, M. L.; **Análise da Estabilidade Dinâmica do Processo de Fresamento a Altas Velocidades de Corte**. 2005, 214 p, Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – UFSC, Florianópolis, SC.

RAO, S. S.; **Mechanical Vibrations**. New Jersey: Prentice Hall, 2003.

ROSSI, G. C.; **Estudo das Forças de Corte no Processo de Fresamento de Bordas de Chapas Utilizadas para a Fabricação de Tubos de Aço com Costura**. 2008. 135p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – USP, São Paulo.

SANDVIK, **Novas ferramentas Sandvik Coromant**. Suplemento do catálogo de ferramentas rotativas e do catálogo de ferramentas para torneamento. Suécia, 2004.

SANTOS, S. C.; SALES, W. F. **Aspectos Tribológicos da Usinagem dos Metais**. 1. Ed. São Paulo: Artliber, 2007.

SALES, W. F.; BONNEY, J.; EZUGWU, E. O.; FADARE, D. A.; Influence of Cutting Parameters on Acoustic Emission Signal when High Speed Turning of the Ti-6Al-4V Alloy . In Press 2009.

SCHROETER, R. B., WEINGAERTNER, W. L., MACEDO, S. E. M., Análise de Forças no Fresamento de Topo Reto. **Máquinas e Metais**, p. 130-139, ago. 2001.

SHIN, K.; HAMMOND, J. K.; **Fundamentals of Signal Processing for Sound and Vibration Engineers**. 1. Ed., West Sussex: John Wiley & Sons Ltd., 2008.

SMITH, G. T.; **Cutting Tools Technology: Industrial Handbook**. 1. Ed., London: Springer, 2008.

SOUTO, U. B.; **Monitoramento do Desgaste de Ferramenta no Processo de Fresamento via Emissão Acústica**. 2007. 198p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – UFU, Uberlândia.

SOUZA JÚNIOR, A. M.; **Estudos da Utilização de PCBN e Cerâmica Mista no Fresamento de Blocos de Motores de Ferro Fundido Cinzento**. 2001. 142p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – PUCMINAS, Belo Horizonte.

STEMMER, G. E.; **Ferramentas de corte II**. 341p. Florianópolis: UFSC, 1992.

TOBIAS, S. A.; FISHWICK, W.; A Theory of Regenerative Chatter. **The Engineer** – London, 1958.

TOH, C. K.; “Comparison of chip surface temperature between up and down milling orientations in high speed rough milling of hardened steel”, **Journal of Materials Processing Technology**, 167, pp. 110-118, 2005.

TÖNSHOFF, H.K.; JUNG, M.; MÄNUEL, S.; RIETZ, W.; 2000, “Using acoustic emission signals for monitoring of production processes”, **Ultrasonics**, 37, pp. 681-686.

TRENT, E. M.; WRIGHT, P. K., **Metal Cutting**, 5. Ed., Butterworths-Heinemann Ltd., 2001.

WILLIAM, S. F.; **Principles of Material Science and Engineering**. Toronto: McGraw Hill, 1996.

WILLIAMS, J. A., The Action of the Lubricants in Metal Cutting. **Journal Mechanical Engineering Science**. 7 Mech Vol. 19, n. 5, pp. 202-212, 1977.

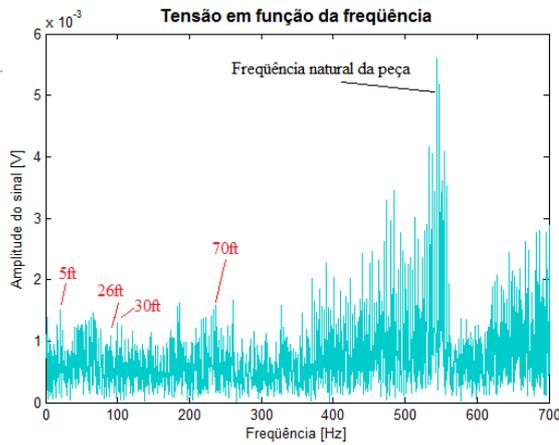
YAN, J.; MURAKAMI, Y.; DAVIM, J. P.; Tool Design, Tool Wear and Tool Life. In: CHENG, K.; **Machining Dynamics: Fundamentals, Applications and Practices**. 1. Ed. London: Springer, 2009. Cap. 5, p. 117-150.

ZHANG, S.; ZHU, W.; TiN Coating of Tool Steels: A Review. **Journal of Materials Processing Technology**. v. 39. p-165-177. 1993.

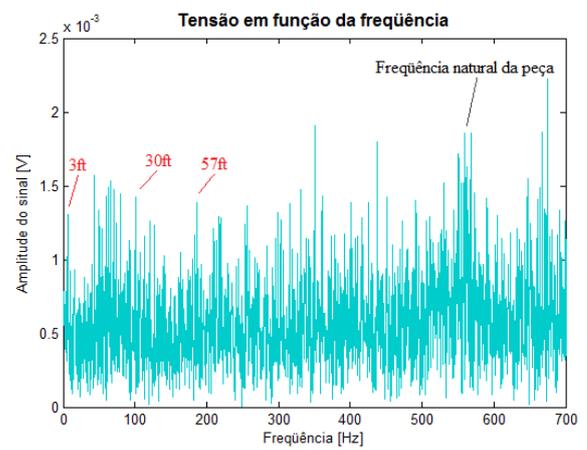
## ANEXO 1

	<b>RELATÓRIO</b> <b>LABORATÓRIO METALÚRGICO</b>		RSL 014		
			Folha: 1/1		
UNIDADE SOLICITANTE	RAMAL	SOLICITANTE			
Engenharia de aplicação	5186	Paulo S. M			
<b>IDENTIFICAÇÃO DAS AMOSTRAS:</b> 01 Corpo de prova material SAE 4140.					
<b>SOLICITAÇÃO DO CLIENTE:</b> verificar a composição química do corpo de prova.					
<b>MOTIVO:</b> verificação da composição para identificação do material.					
<b>DOCUMENTOS DE REFERÊNCIA:</b>					
<b>ANÁLISE DOS RESULTADOS:</b>					
Elementos (%)	C	Si	Mn	Cr	Mo
Faixa	0,37 / 0,45	0,15 / 0,35	0,70 / 1,00	0,80 / 1,10	0,15 / 0,25
Encontrado	0,45	0,21	0,83	0,90	0,21
<p>A composição química encontra-se em conformidade com as especificações previstas para o material SAE 4140.</p>					
Márcio Lima	22/01/08	Paulo Fernandes			
EXECUTADO POR:	DATA	ANALISADO POR:	VISTO		

## APÊNDICE A

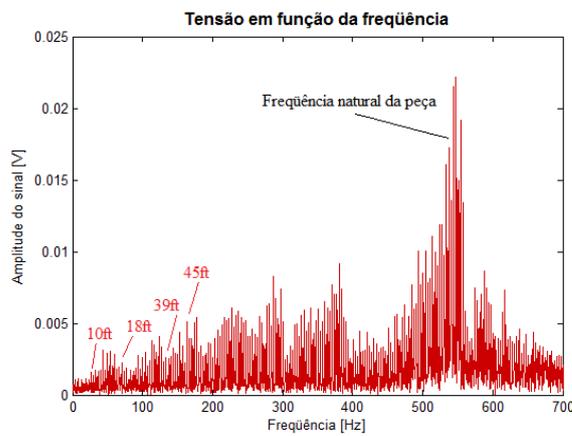


Corte Discordante

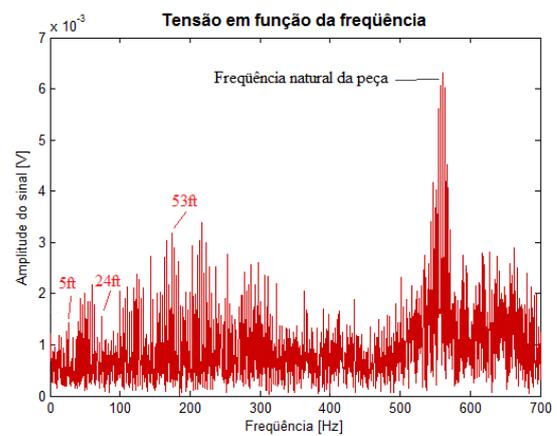


Corte Concordante

**Figura I: Espectro de frequência dos sinais de vibrações da peça (coordenada x) na usinagem com um inserto de corte na velocidade de corte ( $v_c$ ) de 50m/min.**

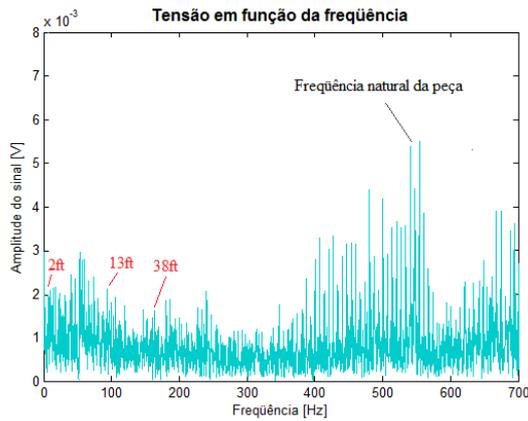


Corte Discordante

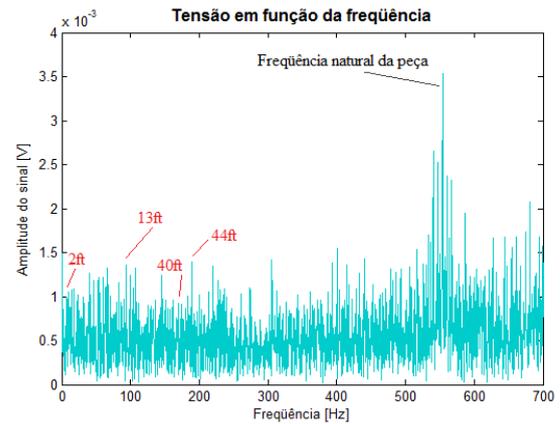


Corte Concordante

**Figura II: Espectro de frequência dos sinais de vibrações da peça (coordenada z) na usinagem com um inserto de corte na velocidade de corte ( $v_c$ ) de 50m/min.**

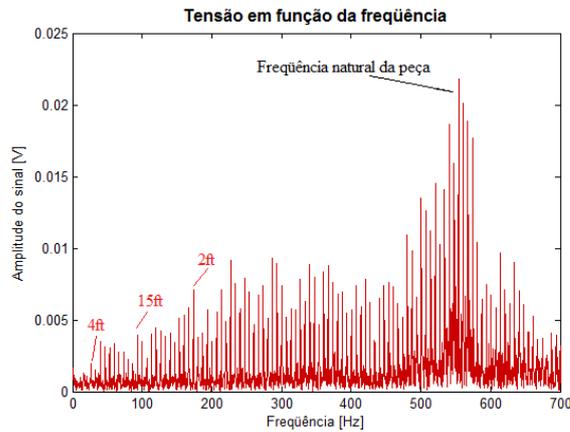


Corte Discordante

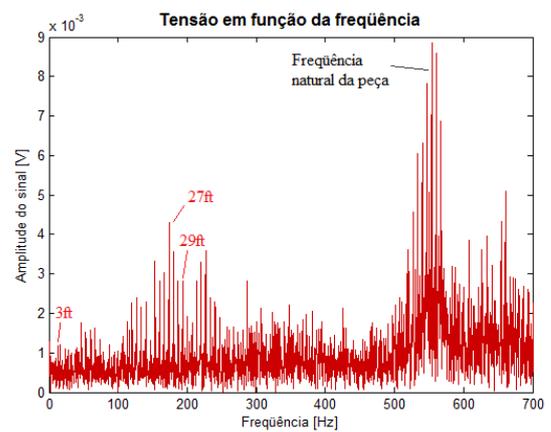


Corte Concordante

**Figura III: Espectro de frequência dos sinais de vibrações da peça (coordenada x) na usinagem com dois insertos de corte na velocidade de corte ( $v_c$ ) de 50m/min.**

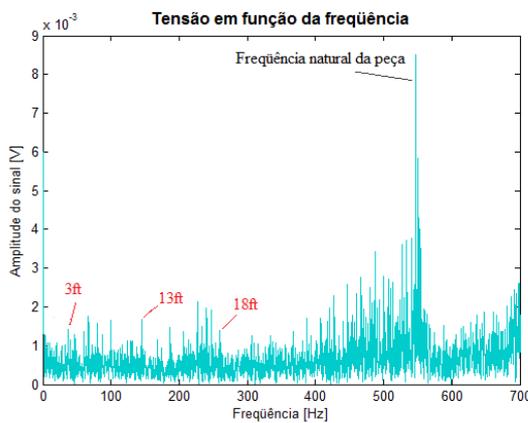


Corte Discordante

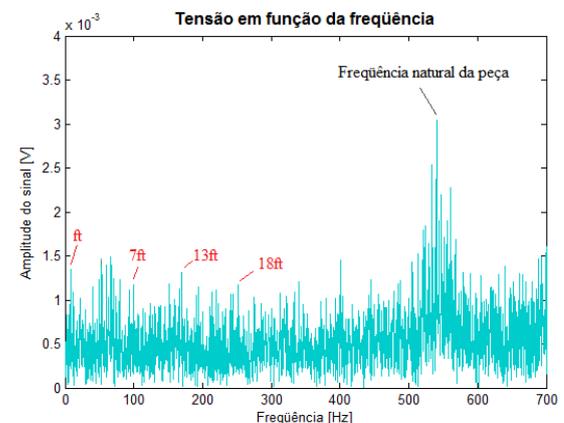


Corte Concordante

**Figura IV: Espectro de frequência dos sinais de vibrações da peça (coordenada z) na usinagem com dois insertos de corte na velocidade de corte ( $v_c$ ) de 50m/min.**

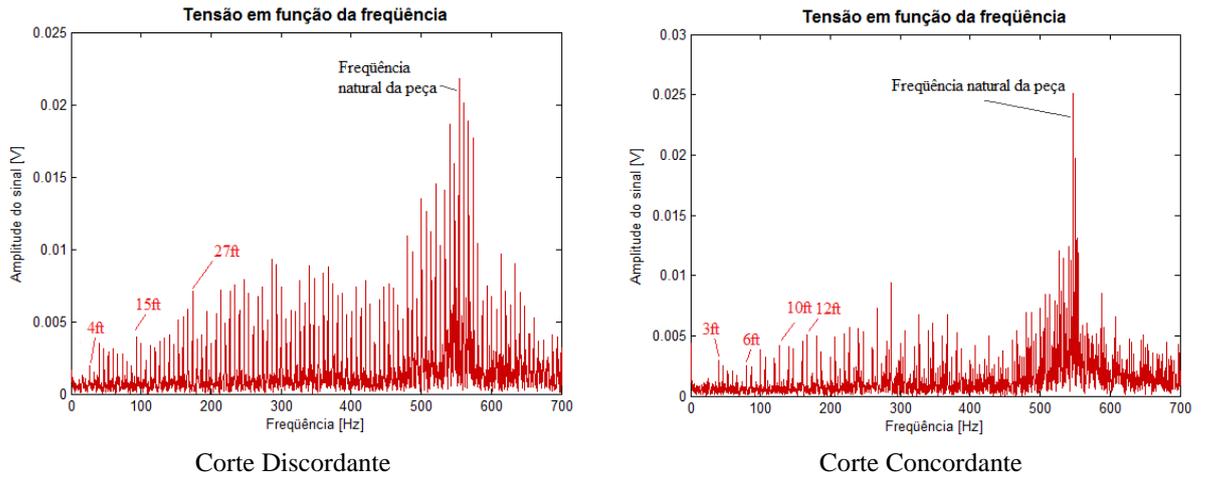


Corte Discordante

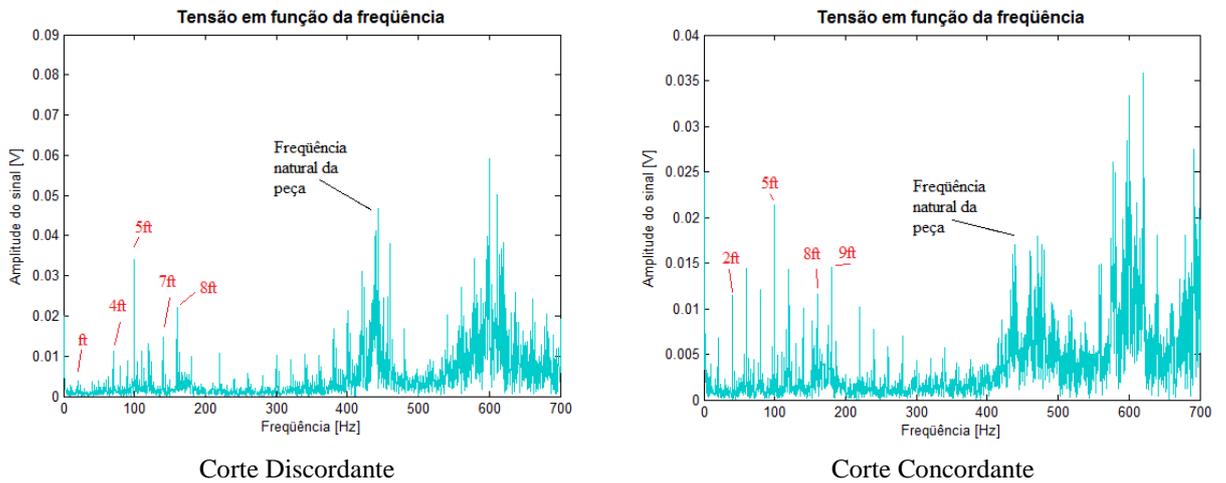


Corte Concordante

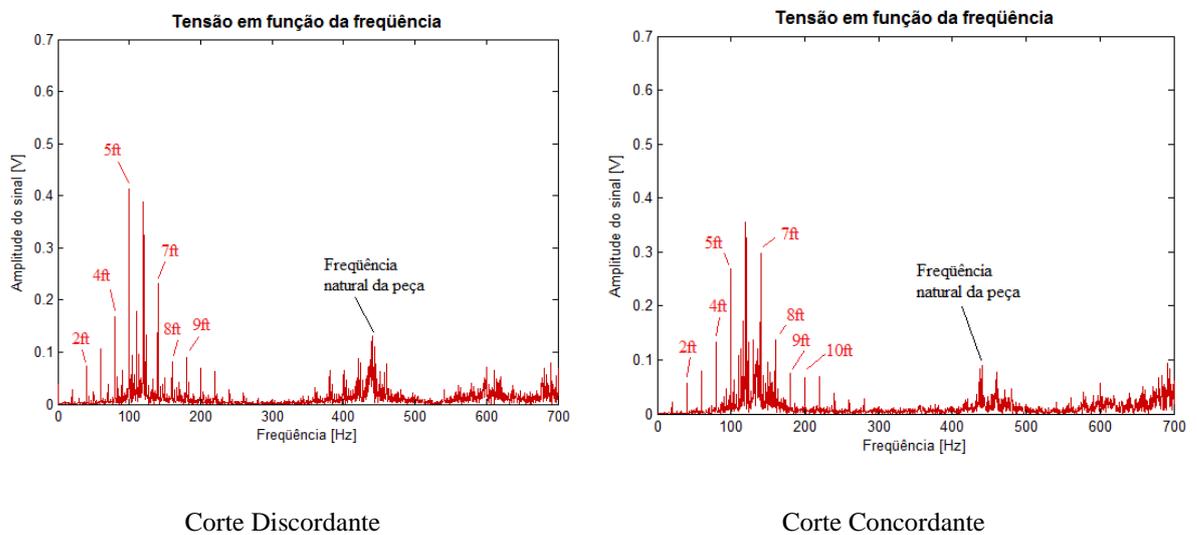
**Figura V: Espectro de frequência dos sinais de vibrações da peça (coordenada x) na usinagem com quatro insertos de corte na velocidade de corte ( $v_c$ ) de 50m/min.**



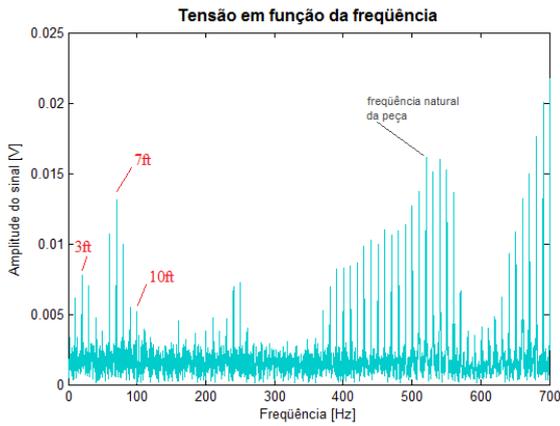
**Figura VI: Espectro de frequência dos sinais de vibrações da peça (coordenada z) na usinagem com quatro insertos de corte na velocidade de corte ( $v_c$ ) de 50m/min.**



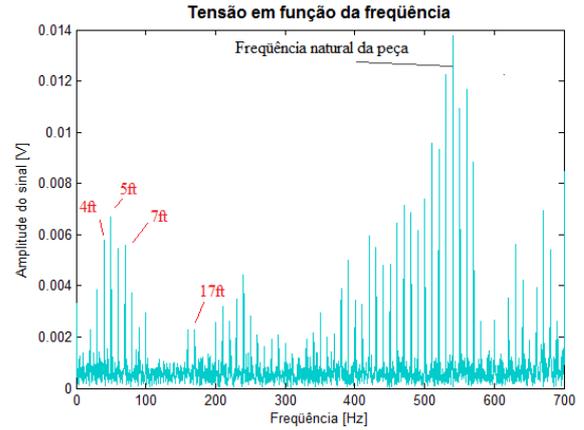
**Figura VII: Espectro de frequência dos sinais de vibrações da peça (coordenada x) na usinagem com seis insertos de corte na velocidade de corte ( $v_c$ ) de 50m/min.**



**Figura VIII: Espectro de frequência dos sinais de vibrações da peça (coordenada z) na usinagem com seis insertos de corte na velocidade de corte ( $v_c$ ) de 50m/min.**

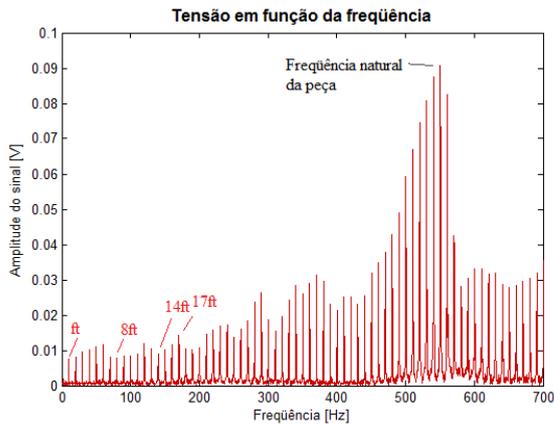


Corte Discordante

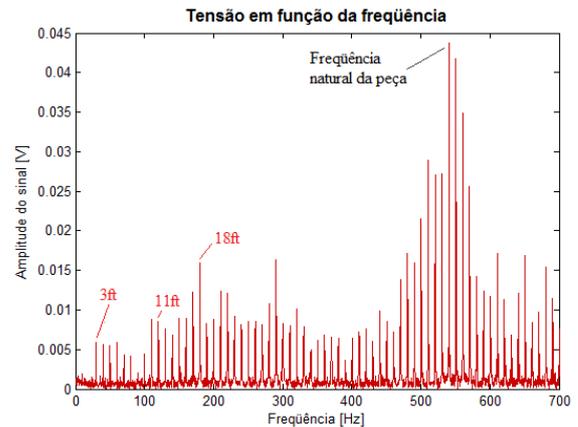


Corte Concordante

**Figura IX: Espectro de frequência dos sinais de vibrações da peça (coordenada x) na usinagem com um inserto de corte na velocidade de corte ( $v_c$ ) de 150m/min.**

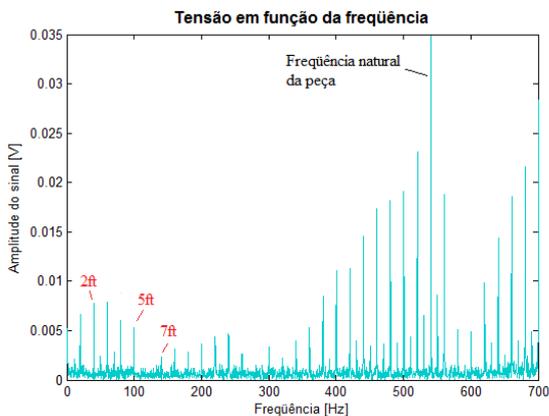


Corte Discordante

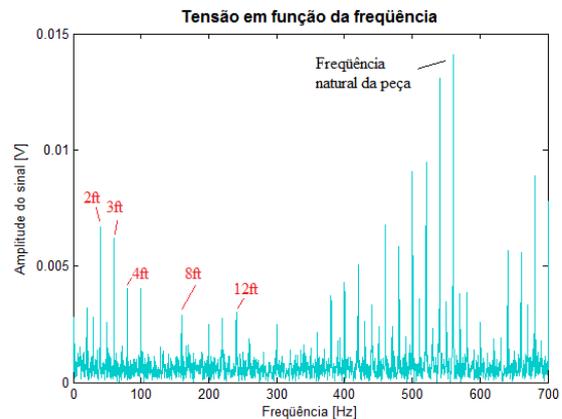


Corte Concordante

**Figura X: Espectro de frequência dos sinais de vibrações da peça (coordenada z) na usinagem com um inserto de corte na velocidade de corte ( $v_c$ ) de 150m/min.**

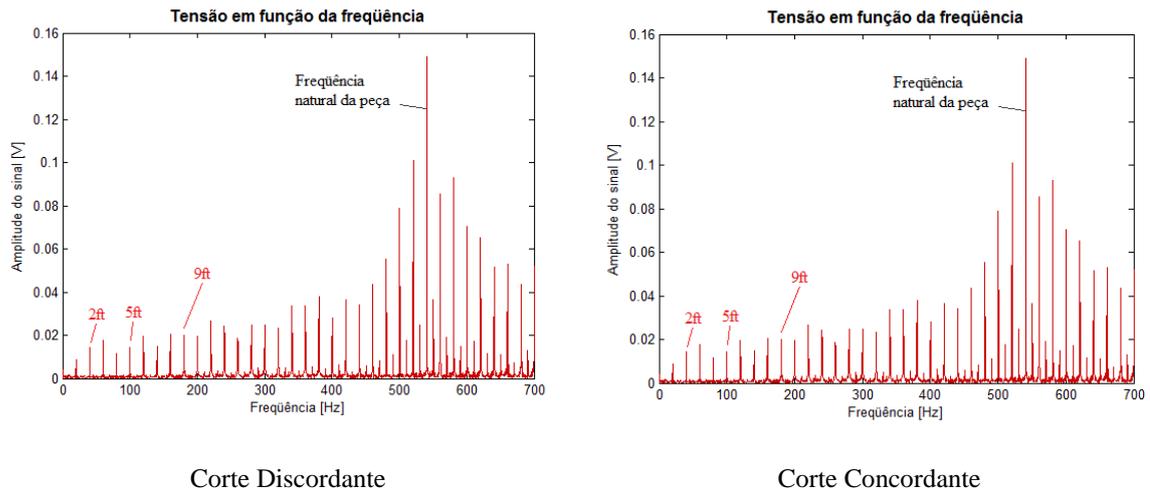


Corte Discordante

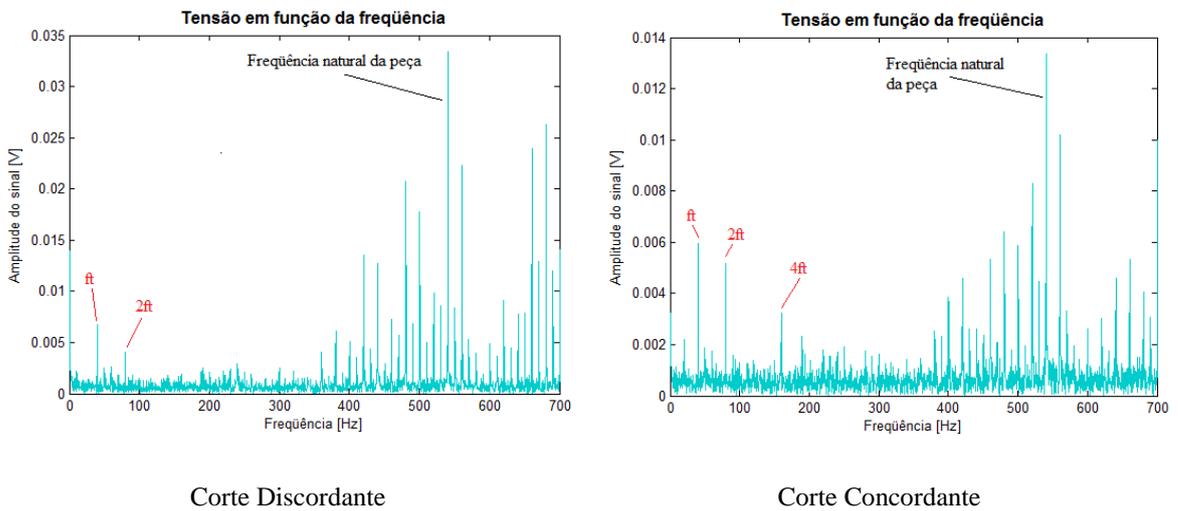


Corte Concordante

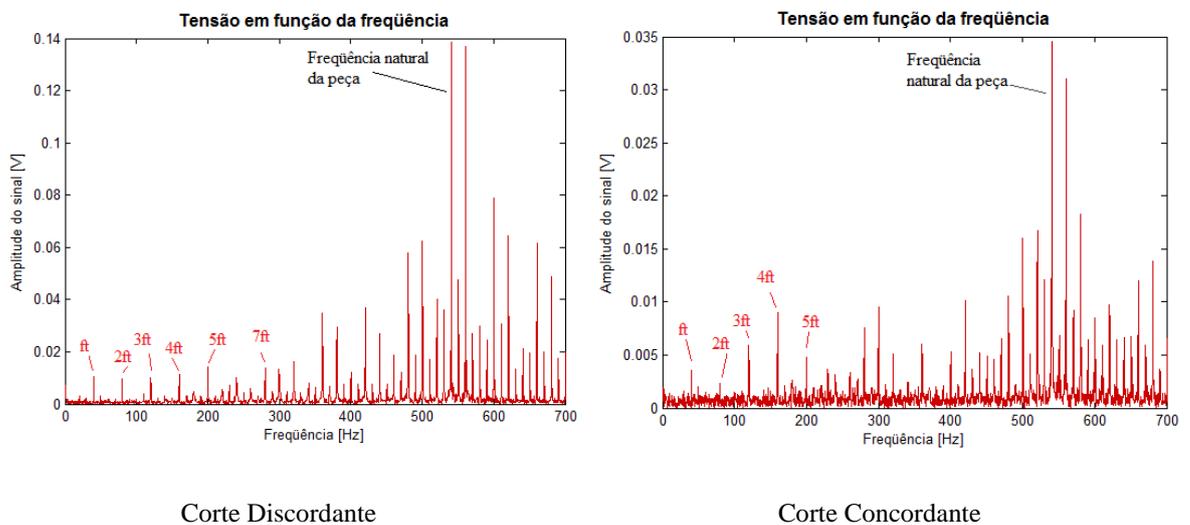
**Figura XI: Espectro de frequência dos sinais de vibrações da peça (coordenada x) na usinagem com dois insertos de corte na velocidade de corte ( $v_c$ ) de 150m/min.**



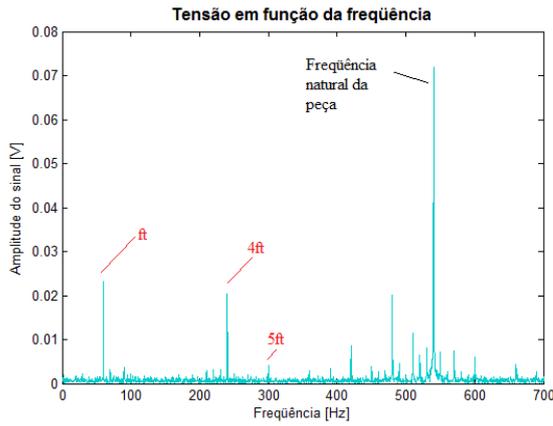
**Figura XII:** Espectro de frequência dos sinais de vibrações da peça (coordenada z) na usinagem com dois insertos de corte na velocidade de corte ( $v_c$ ) de 150m/min.



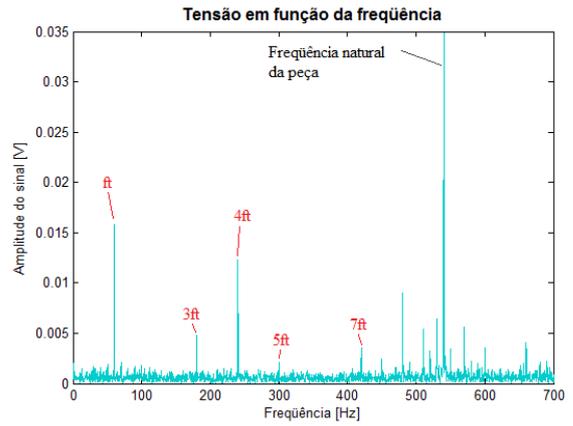
**Figura XIII:** Espectro de frequência dos sinais de vibrações da peça (coordenada x) na usinagem com quatro insertos de corte na velocidade de corte ( $v_c$ ) de 150m/min.



**Figura XIV:** Espectro de frequência dos sinais de vibrações da peça (coordenada z) na usinagem com quatro insertos de corte na velocidade de corte ( $v_c$ ) de 150m/min.

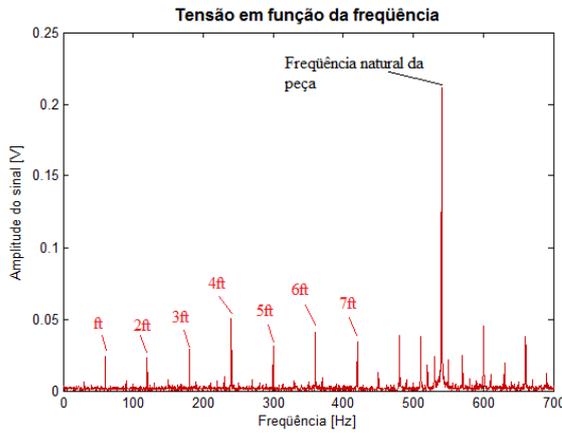


Corte Discordante

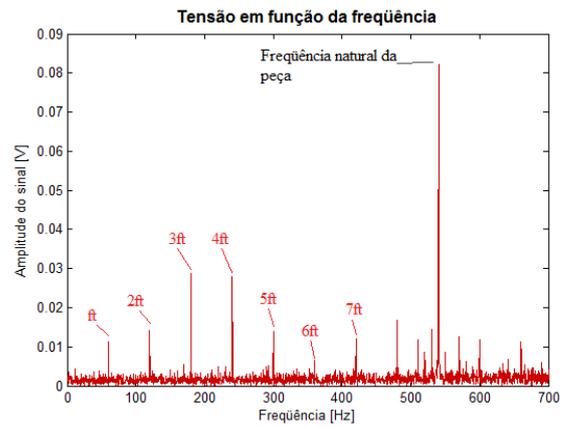


Corte Concordante

**Figura XV:** Espectro de frequência dos sinais de vibrações da peça (coordenada x) na usinagem com seis insertos de corte na velocidade de corte ( $v_c$ ) de 150m/min.

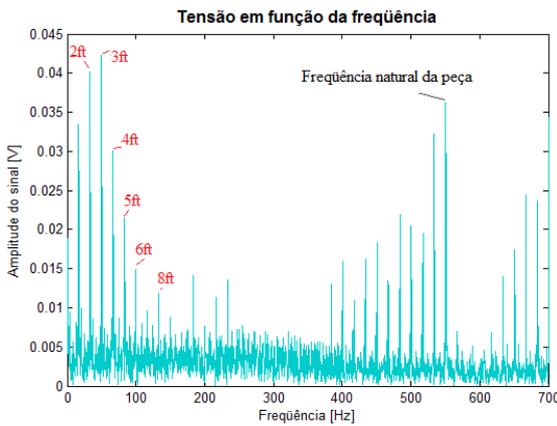


Corte Discordante

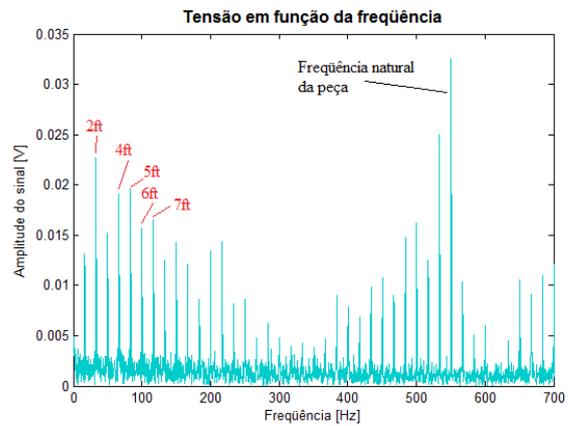


Corte Concordante

**Figura XVI:** Espectro de frequência dos sinais de vibrações da peça (coordenada z) na usinagem com seis insertos de corte na velocidade de corte ( $v_c$ ) de 150m/min.

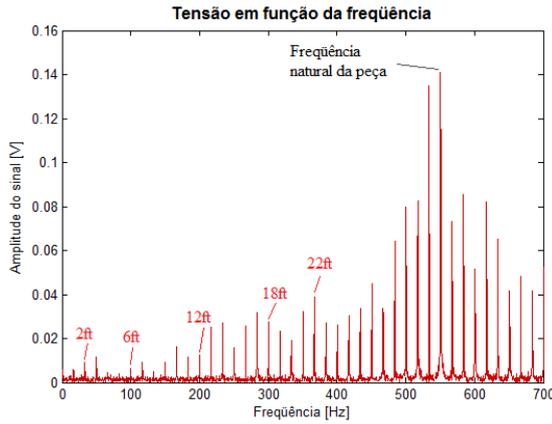


Corte Discordante

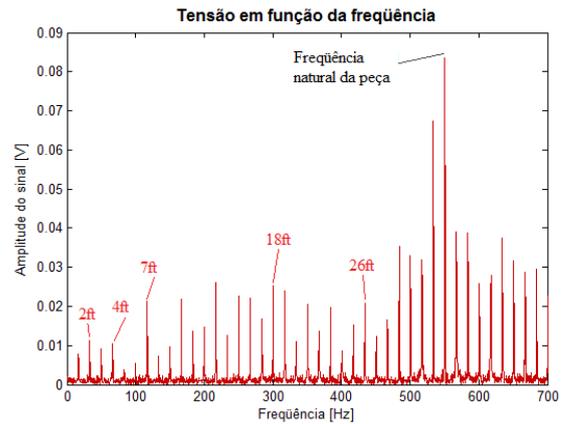


Corte Concordante

**Figura XVII:** Espectro de frequência dos sinais de vibrações da peça (coordenada x) na usinagem com um inserto de corte na velocidade de corte ( $v_c$ ) de 250m/min.

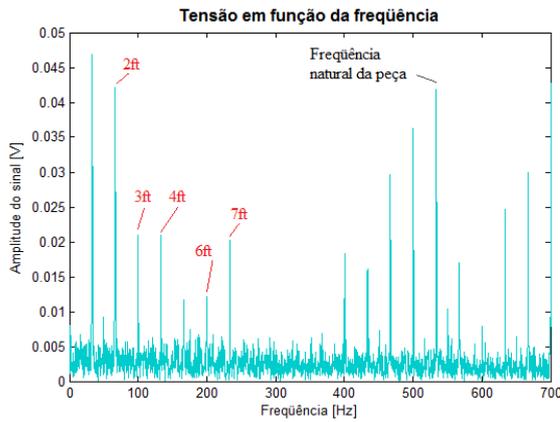


Corte Discordante

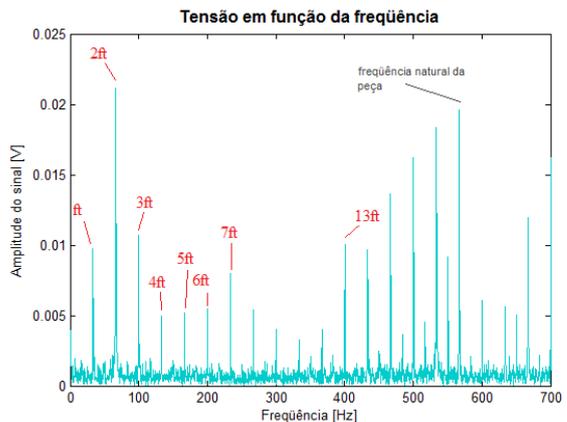


Corte Concordante

**Figura XVIII:** Espectro de frequência dos sinais de vibrações da peça (coordenada z) na usinagem com um inserto de corte na velocidade de corte ( $v_c$ ) de 250m/min.

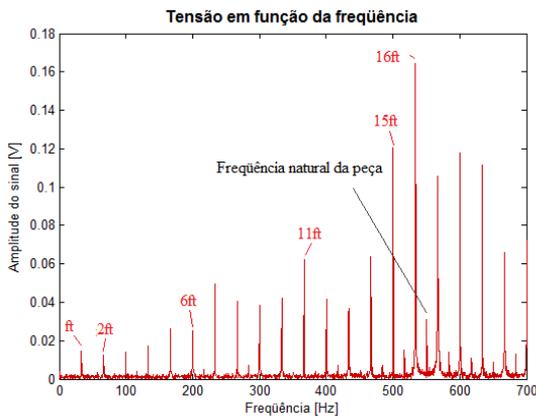


Corte Discordante

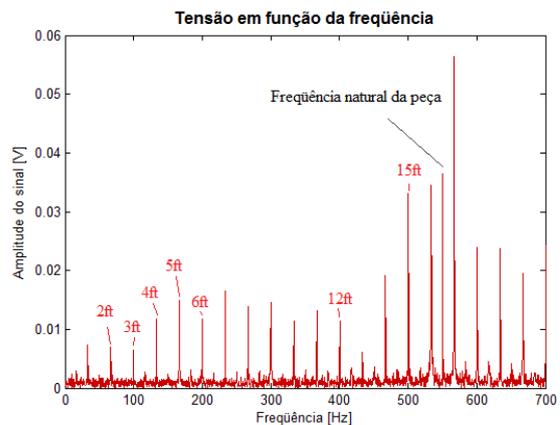


Corte Concordante

**Figura XIX:** Espectro de frequência dos sinais de vibrações da peça (coordenada x) na usinagem com dois insertos de corte na velocidade de corte ( $v_c$ ) de 250m/min.

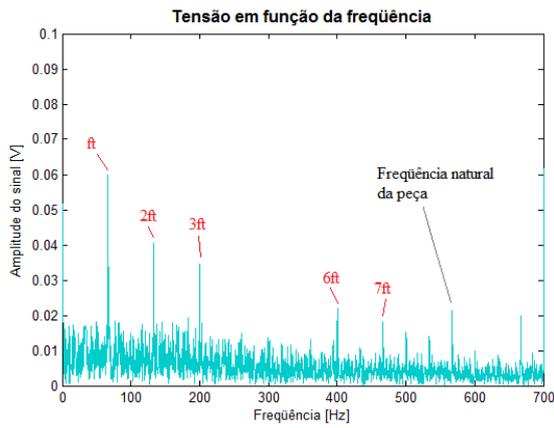


Corte Discordante

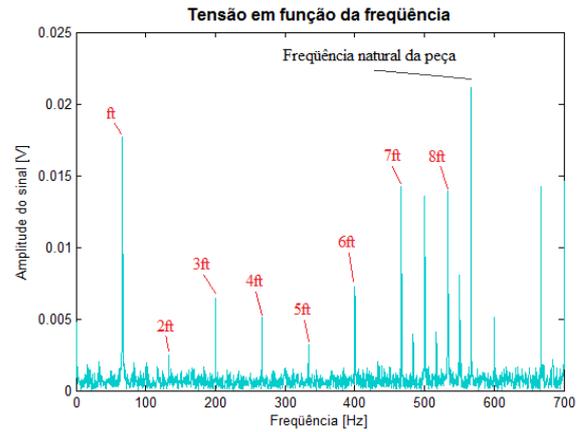


Corte Concordante

**Figura XX:** Espectro de frequência dos sinais de vibrações da peça (coordenada z) na usinagem com dois insertos de corte na velocidade de corte ( $v_c$ ) de 250m/min.

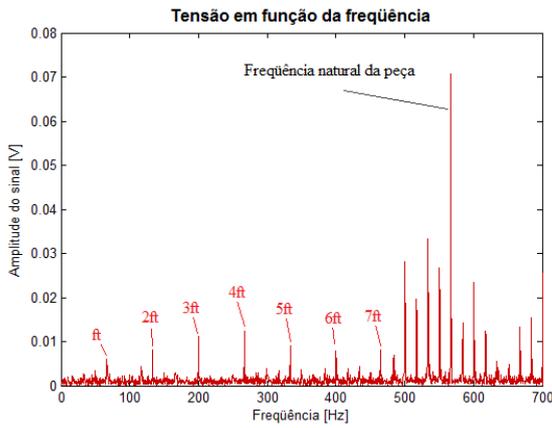


Corte Discordante

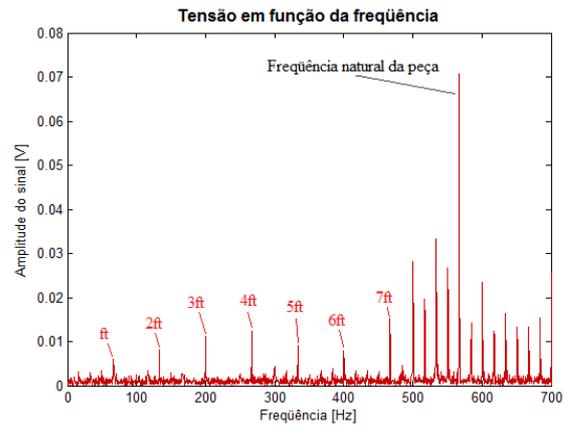


Corte Concordante

**Figura XXI:** Espectro de frequência dos sinais de vibrações da peça (coordenada x) na usinagem com quatro insertos de corte na velocidade de corte ( $v_c$ ) de 250m/min.

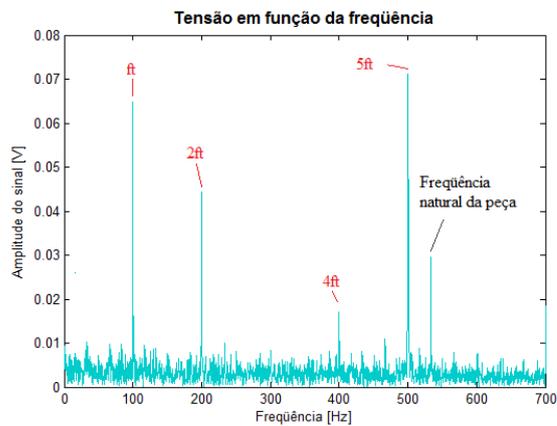


Corte Discordante

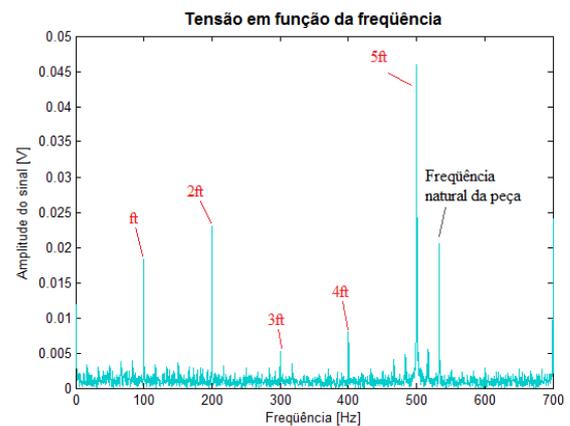


Corte Concordante

**Figura XXII:** Espectro de frequência dos sinais de vibrações da peça (coordenada z) na usinagem com quatro insertos de corte na velocidade de corte ( $v_c$ ) de 250m/min.

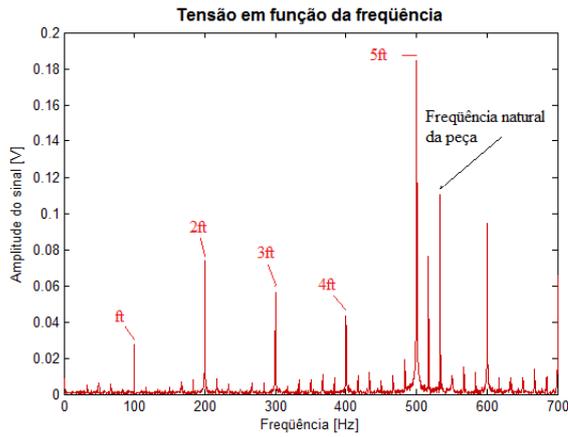


Corte Discordante

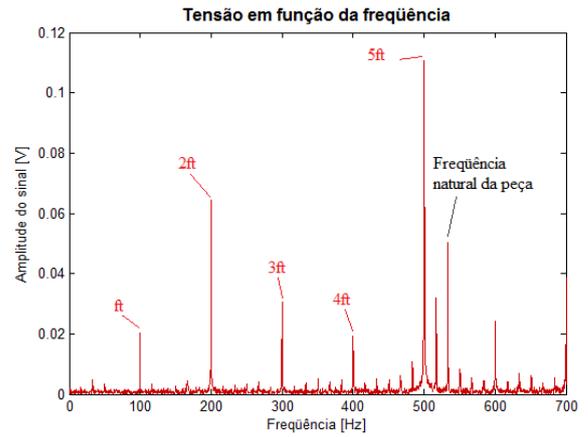


Corte Concordante

**Figura XXIII:** Espectro de frequência dos sinais de vibrações da peça (coordenada x) na usinagem com seis insertos de corte na velocidade de corte ( $v_c$ ) de 250m/min.

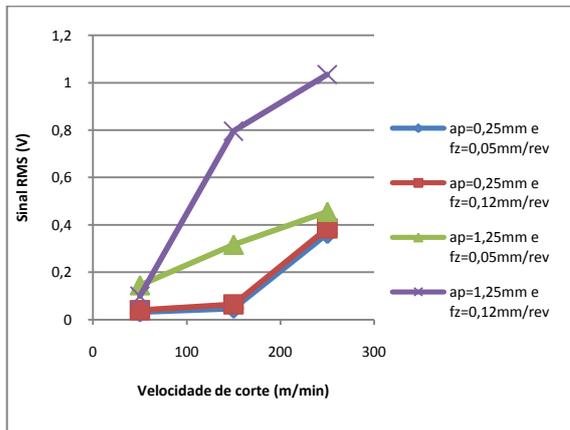


Corte Discordante

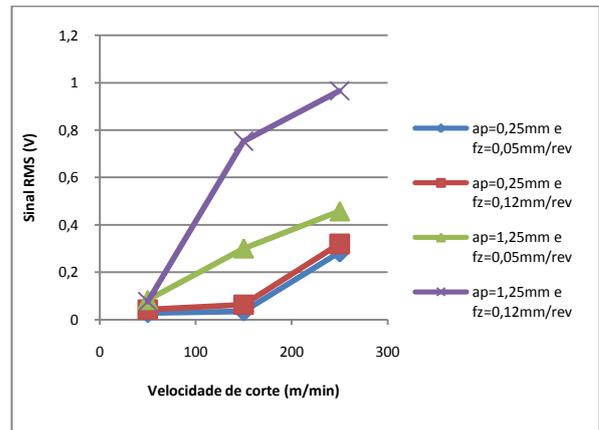


Corte Concordante

**Figura XXIV: Espectro de frequência dos sinais de vibrações da peça (coordenada z) na usinagem com seis insertos de corte na velocidade de corte ( $v_c$ ) de 250m/min.**

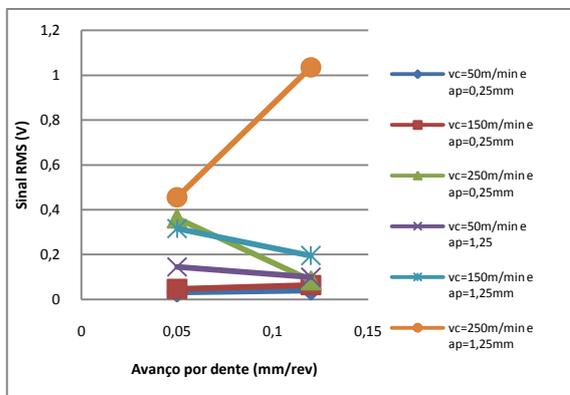


Corte Discordante

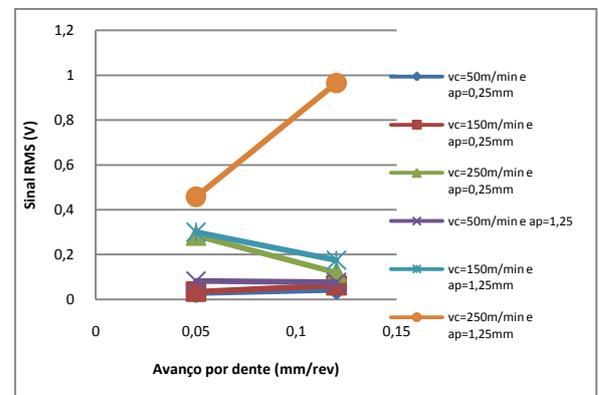


Corte Concordante

**Figura XXV: RMS dos sinais em função da velocidade de corte ( $v_c$ ).**

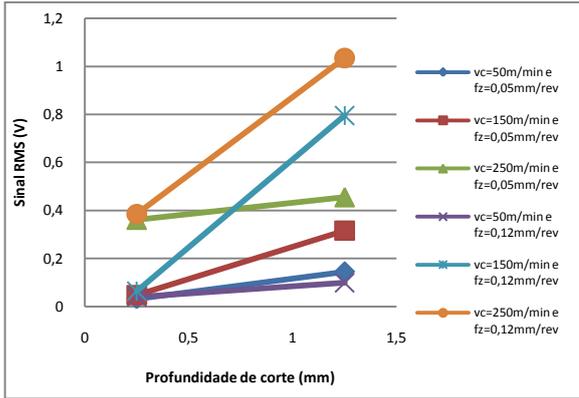


Corte Discordante

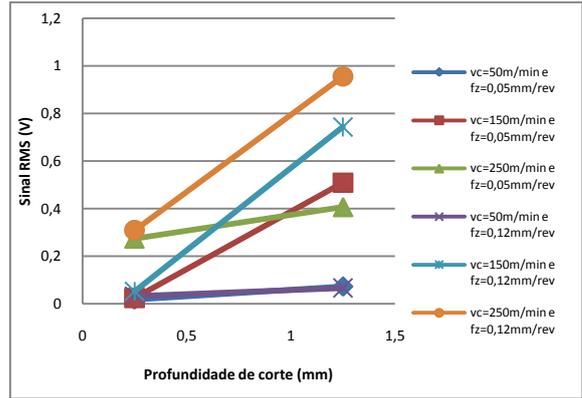


Corte Concordante

**Figura XXVI: RMS dos sinais em função do avanço por dente ( $f_z$ ).**

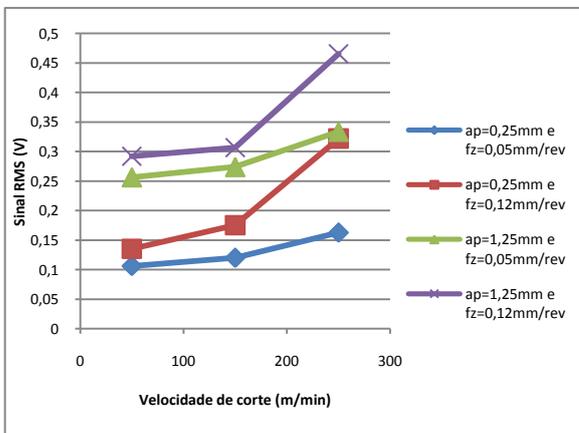


Corte Discordante

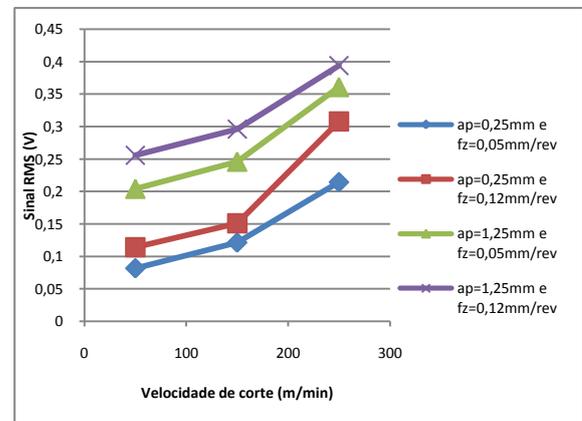


Corte Concordante

Figura XXVII: RMS dos sinais em função da profundidade de corte ( $a_p$ ).

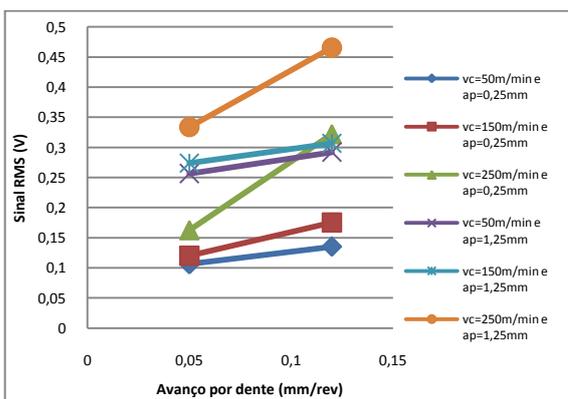


Corte Discordante

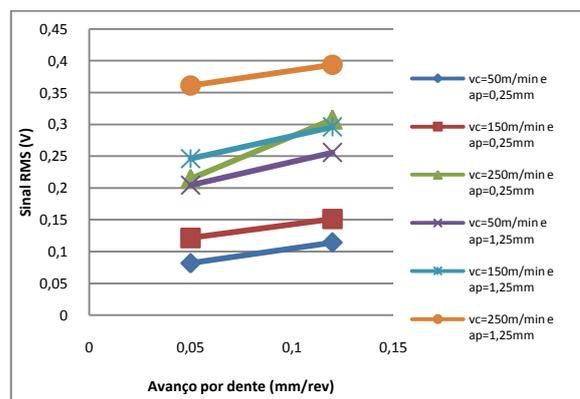


Corte Concordante

Figura XXVIII: RMS dos sinais em função da velocidade de corte ( $v_c$ ).

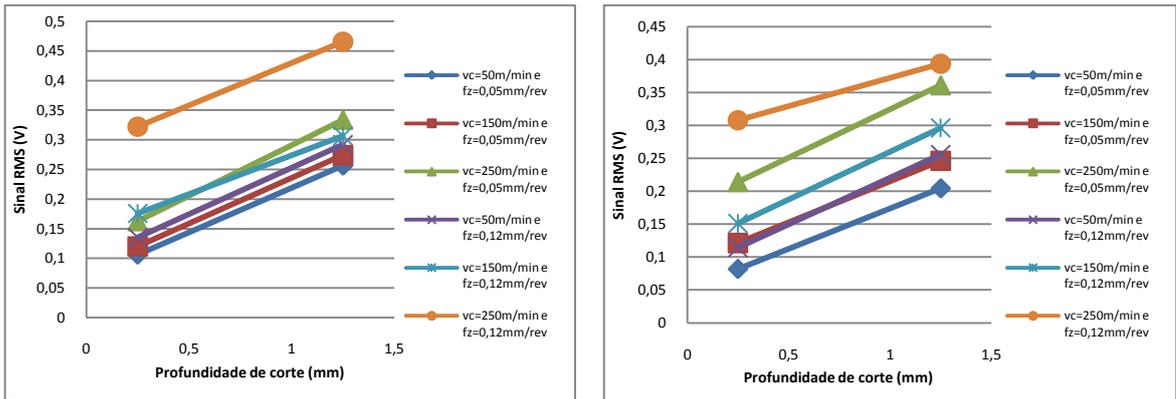


Corte Discordante



Corte Concordante

Figura XXIX: RMS dos sinais em função do avanço por dente ( $f_z$ ).



Corte Discordante

Corte Concordante

Figura XXX: RMS dos sinais em função da profundidade de corte ( $a_p$ ).

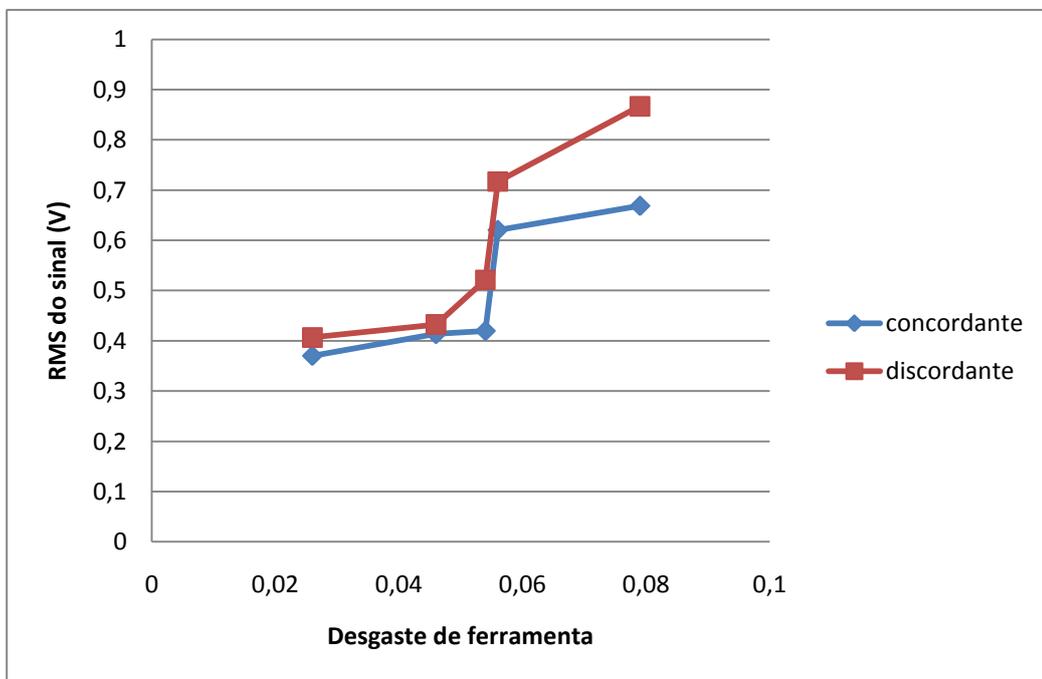
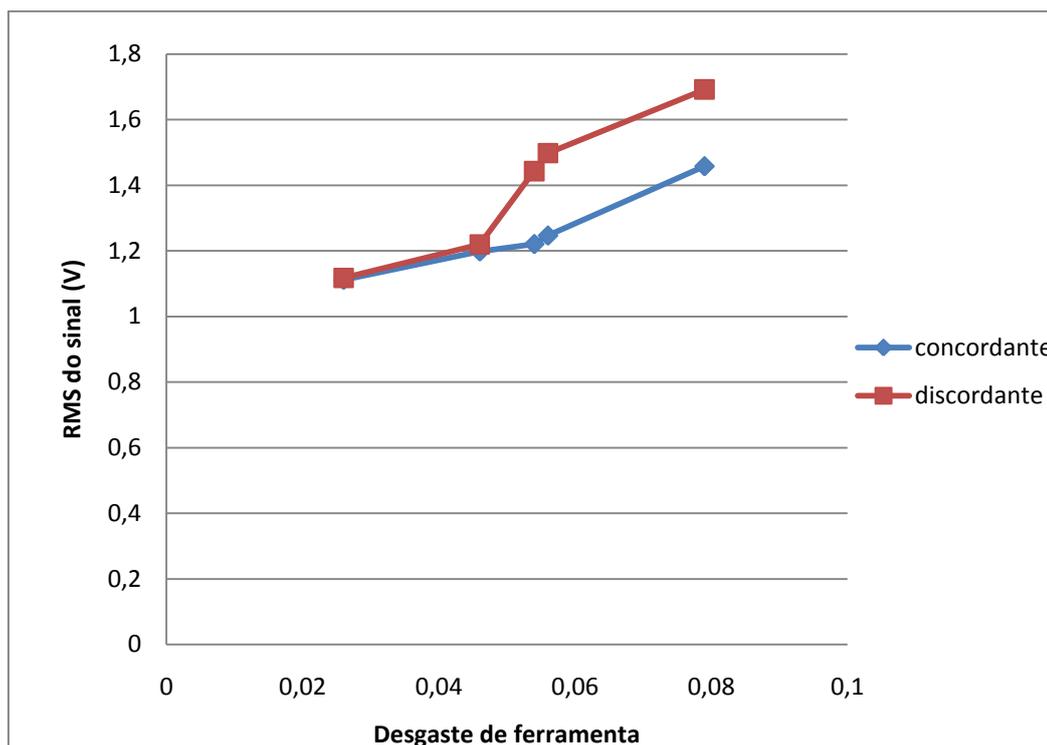
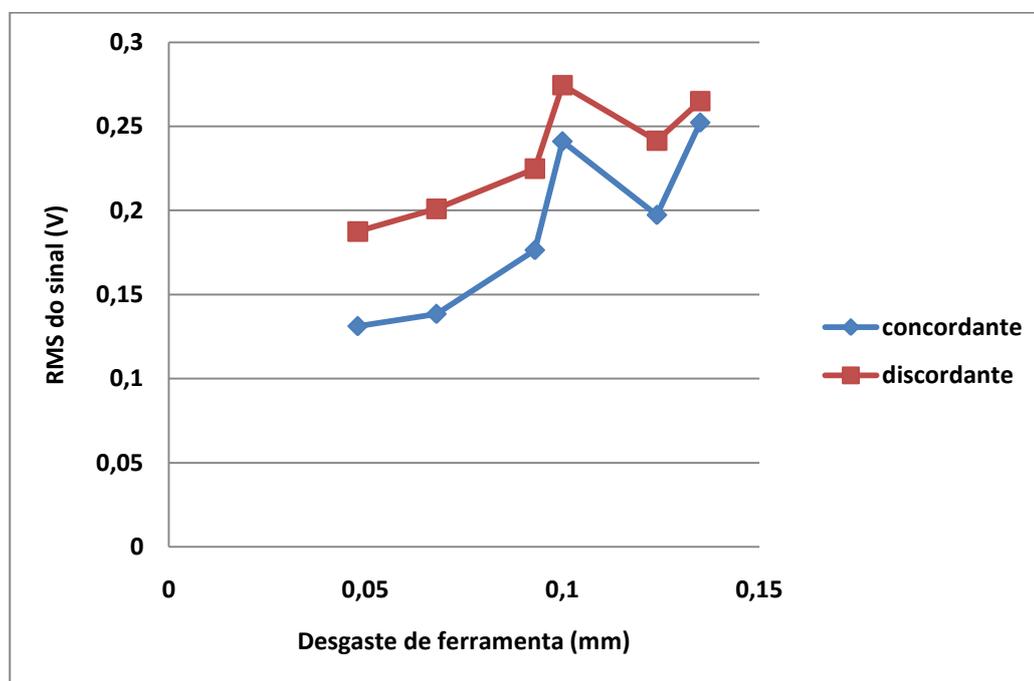


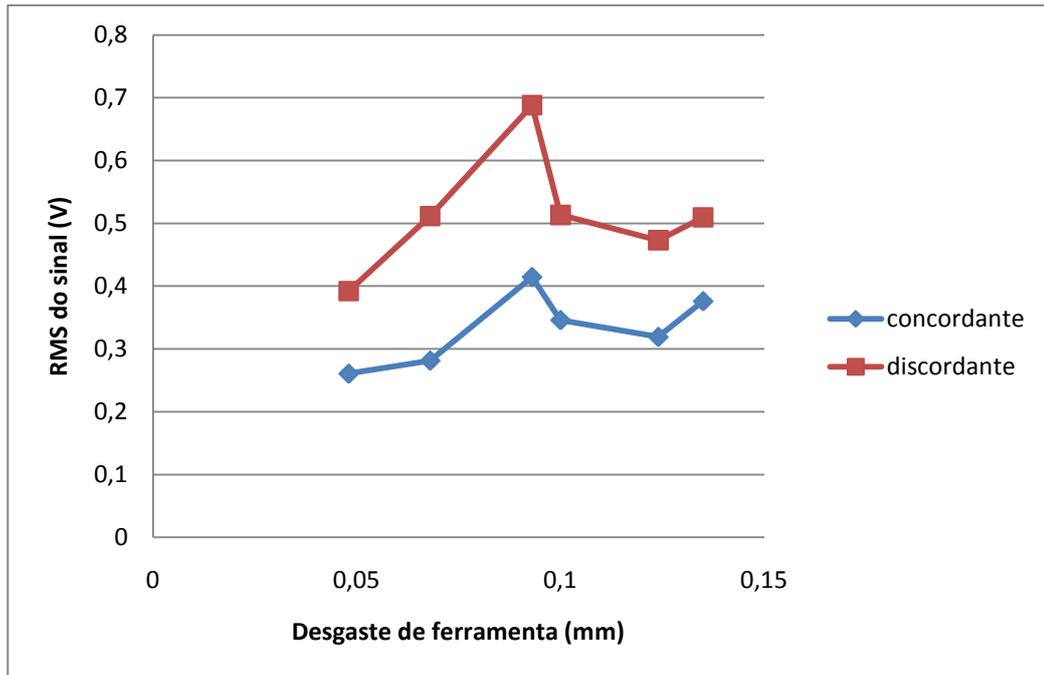
Gráfico I: RMS do sinal em função do desgaste de flanco da ferramenta na coordenada x no fresamento a 50m/min com avanço por dente de 0,05mm/rev e profundidade de corte de 1,25mm.



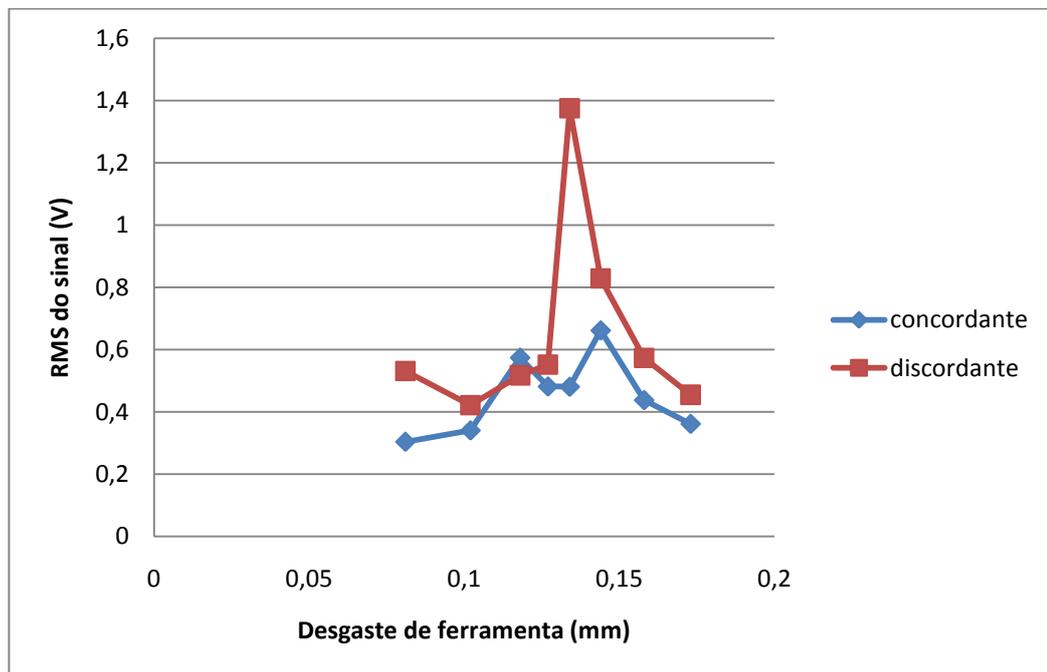
**Gráfico II:** RMS do sinal em função do desgaste de flanco da ferramenta na coordenada z no fresamento a 50m/min com avanço por dente de 0,05mm/rev e profundidade de corte de 1,25mm.



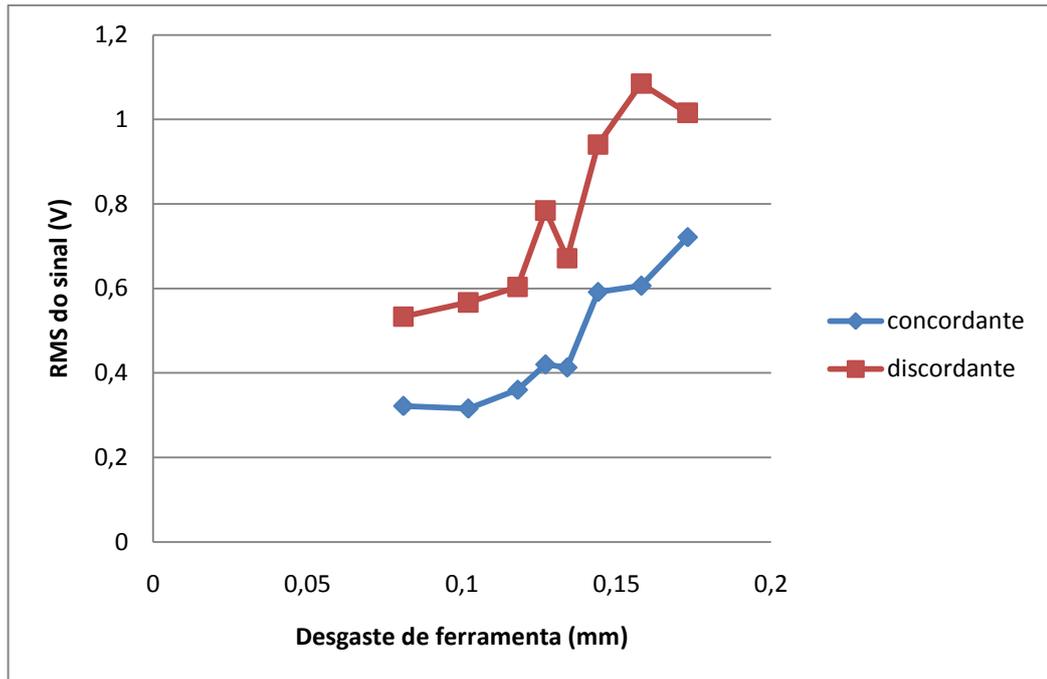
**Gráfico III:** RMS do sinal em função do desgaste de flanco da ferramenta na coordenada x no fresamento a 150m/min com avanço por dente de 0,05mm/rev e profundidade de corte de 1,25mm.



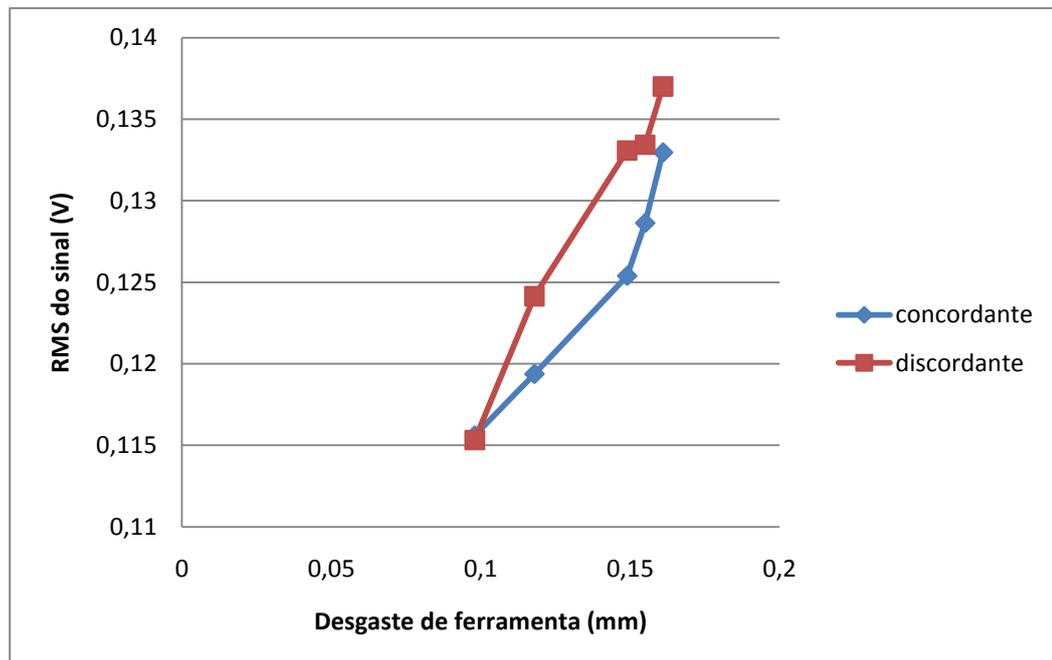
**Gráfico IV: RMS do sinal em função do desgaste de flanco da ferramenta na coordenada z no fresamento a 150m/min com avanço por dente de 0,05mm/rev e profundidade de corte de 1,25mm.**



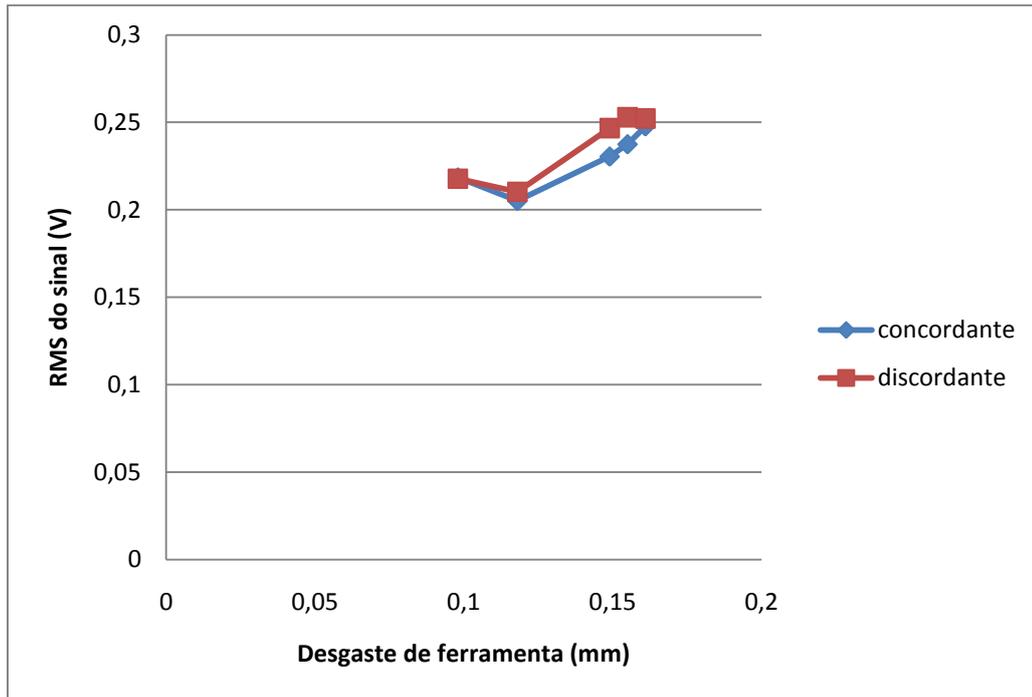
**Gráfico V: RMS do sinal em função do desgaste de flanco da ferramenta na coordenada x no fresamento a 250m/min com avanço por dente de 0,05mm/rev e profundidade de corte de 1,25mm.**



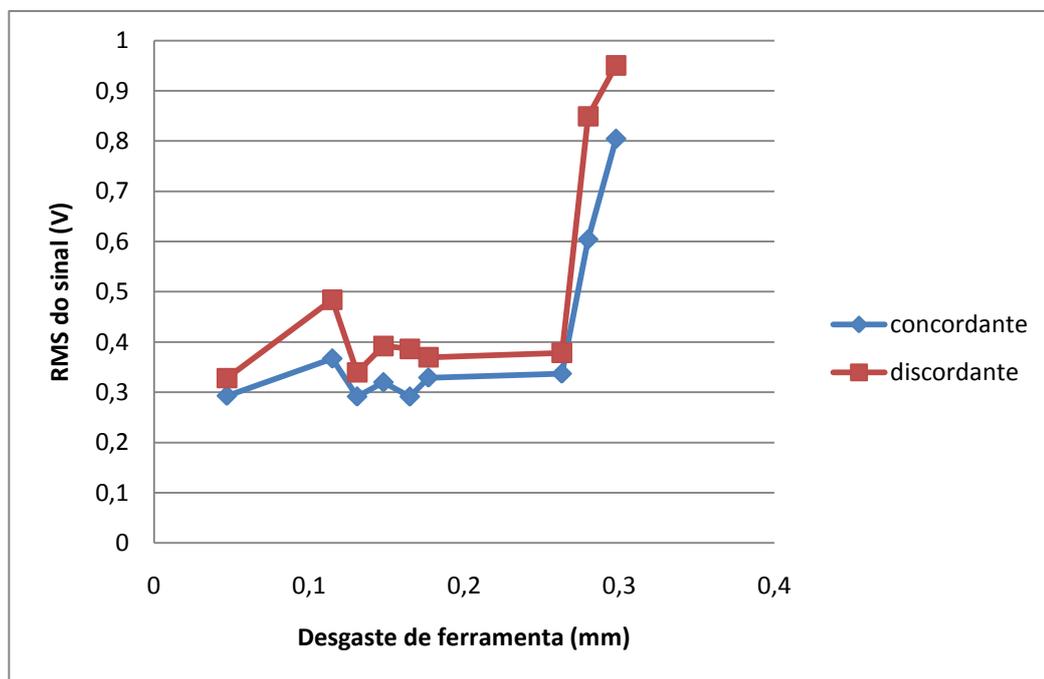
**Gráfico VI:** RMS do sinal em função do desgaste de flanco da ferramenta na coordenada z no fresamento a 250m/min com avanço por dente de 0,05mm/rev e profundidade de corte de 1,25mm.



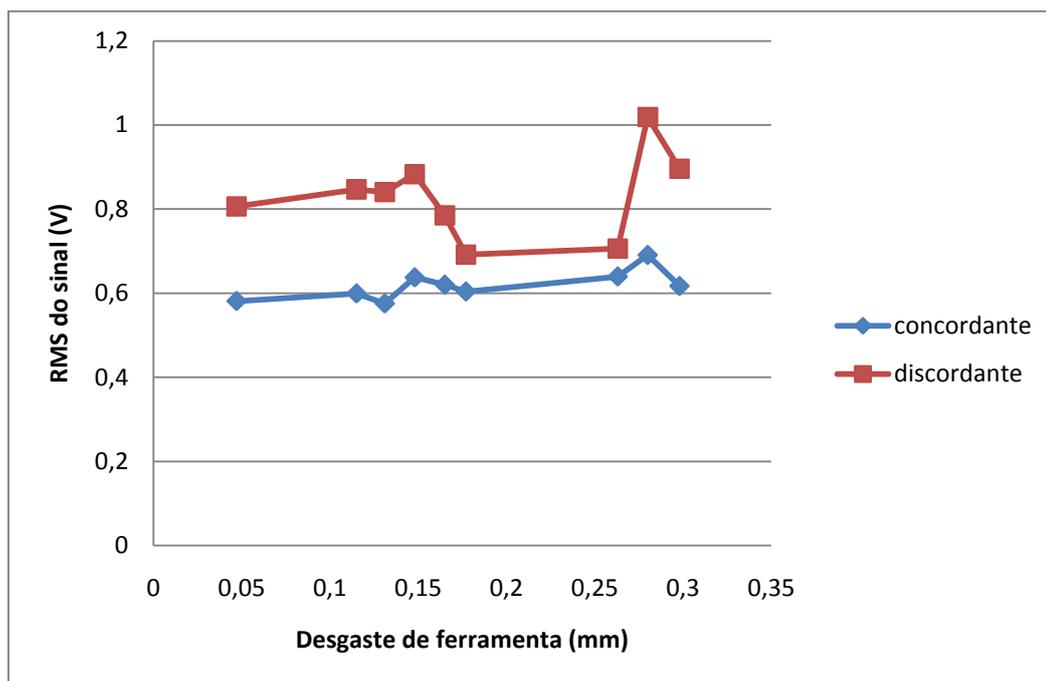
**Gráfico VII:** RMS do sinal em função do desgaste de flanco da ferramenta na coordenada x no fresamento a 50m/min com avanço por dente de 0,12mm/rev e profundidade de corte de 1,25mm.



**Gráfico VIII: RMS do sinal em função do desgaste de flanco da ferramenta na coordenada z no fresamento a 50m/min com avanço por dente de 0,12mm/rev e profundidade de corte de 1,25mm.**



**Gráfico IX: RMS do sinal em função do desgaste de flanco da ferramenta na coordenada x no fresamento a 150m/min com avanço por dente de 0,12mm/rev e profundidade de corte de 1,25mm.**



**Gráfico X: RMS do sinal em função do desgaste de flanco da ferramenta na coordenada z no fresamento a 150m/min com avanço por dente de 0,12mm/rev e profundidade de corte de 1,25mm.**

# Livros Grátis

( <http://www.livrosgratis.com.br> )

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)  
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)  
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)  
[Baixar livros de Matemática](#)  
[Baixar livros de Medicina](#)  
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)  
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)  
[Baixar livros de Meteorologia](#)  
[Baixar Monografias e TCC](#)  
[Baixar livros Multidisciplinar](#)  
[Baixar livros de Música](#)  
[Baixar livros de Psicologia](#)  
[Baixar livros de Química](#)  
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)  
[Baixar livros de Serviço Social](#)  
[Baixar livros de Sociologia](#)  
[Baixar livros de Teologia](#)  
[Baixar livros de Trabalho](#)  
[Baixar livros de Turismo](#)