

Dissertação de Mestrado

ANÁLISE DO DESGASTE DE FERRAMENTA NO PROCESSO DE FRESAMENTO DO AÇO AISI 4340 ATRAVÉS DO SINAL DE VIBRAÇÃO

Bruno César Rocha Vitória

Natal, setembro de 2016

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**ANÁLISE DO SINAL DE VIBRAÇÃO NO FRESAMENTO DO AÇO AISI 4340 COM
FERRAMENTAS DESGASTADAS**

Dissertação submetida à

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE

como parte dos requisitos para a obtenção do grau de

MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

BRUNO CÉSAR ROCHA VITÓRIA

ULISSES BORGES SOUTO

Natal, setembro de 2016

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**ANÁLISE DO SINAL DE VIBRAÇÃO NO FRESAMENTO DO AÇO AISI 4340 COM
FERRAMENTAS DESGASTADAS**

BRUNO CÉSAR ROCHA VITÓRIA

**Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de
MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA
sendo aprovada em sua forma final.**

BANCA EXAMINADORA

Ulisses Borges Souto – Presidente – Orientador – UFRN

Anderson Clayton Alves de Melo – UFRN

Ramsés Otto Cunha Lima – Externo – UFERSA

Catálogo da Publicação na Fonte
Universidade Federal do Rio Grande do Norte - Sistema de Bibliotecas
Biblioteca Central Zila Mamede / Setor de Informação e Referência

Vitória, Bruno César Rocha.

Análise do sinal de vibração no fresamento do aço AISI 4340 com ferramentas desgastadas / Bruno César Rocha Vitória. - 2016. 81 f. : il.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Natal, RN, 2016.

Orientador: Prof. Dr. Ulisses Borges Souto.

1. Aço AISI 4340 – Dissertação. 2. Fresamento – Dissertação. 3. Desgaste de ferramenta – Dissertação. 4. Usinagem – Dissertação. 5. Monitoramento – Dissertação. 5. Vibração - Dissertação. I. Souto, Ulisses Borges. III. Título.

RN/UF/BCZM

CDU 669.14

*À minha família,
principalmente aos meus pais
José Vitória e Alzira Zulmar.*

AGRADECIMENTOS

A Deus que me deu inteligência e perseverança para finalizar este trabalho.

Ao Professor Ulisses Borges Souto, pela idealização do projeto, pela paciência diante das dificuldades e pela exigência perante sua realização.

Ao PPGEM, na pessoa do Professor Luiz Guilherme pelo apoio, pelos conselhos e pela compreensão ante as dificuldades.

À equipe de professores do LabMan que apoiou, torceu e contribuiu com a conclusão deste trabalho: Prof. Anderson Melo, Prof. Adilson Oliveira, Prof. Márcio Valério, Prof. Lúcio Fontes, Prof. Wallace. Bem como aos técnicos que sempre se dispuseram para ajudar nas necessidades existentes: João Maria Frazão, Francisco, Elmar, Francisco Chavier.

Aos meus colegas Igor Lopes, Felipe de Menezes, Yuri Paiva, Lavosier, José Felipe que contribuíram de forma direta com a pesquisa realizada e com a realização dos ensaios.

Aos amigos Raul Victor, Geraldo Rebouças, João Deodato, Flávio Júnior, Ítalo Santiago, pelo apoio e incentivo.

À minha família que sempre me incentivou e acreditou em mim. Pai, mãe, tios, tias, primos.

À minha namorada Hellen Mendes, que esteve ao meu lado durante esse período, se alegrando nas alegrias, sofrendo nas dificuldades.

Ao Professor Márcio Valério pela participação na banca de qualificação e contribuição para o enriquecimento do trabalho.

Aos Professores Anderson Melo e Ramsés Lima, pela participação na banca examinadora e contribuição com o trabalho.

À Anp, no seu Prh 14, pelo apoio financeiro.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 OBJETIVOS	2
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1 PROCESSOS DE USINAGEM	3
2.1.1 Fresamento	3
2.1.2 Vibração na usinagem	4
2.2 AVARIAS, DESGASTE E VIDA DE FERRAMENTAS	7
2.2.1 Avarias	7
2.2.2 Desgaste	8
2.2.3 Vida da Ferramenta	10
2.3 MONITORAMENTO	10
2.3.1 Monitoramento através da Potência e da Corrente do motor	12
2.3.2 Monitoramento através das forças de usinagem	14
2.3.3 Monitoramento através da emissão acústica	16
2.3.4 Monitoramento através da temperatura	19
2.3.5 Monitoramento através do sinal de vibração	20
3. MATERIAIS E MÉTODOS	34
3.1 MÁQUINA-FERRAMENTA	34
3.2 FERRAMENTA DE CORTE	35
3.3 CORPOS DE PROVA	36
3.4 PROCESSO DE USINAGEM	37
3.5 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL	40
3.6 SISTEMA DE AQUISIÇÃO	41
3.7 PROCESSAMENTO DO SINAL	42
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	44
4.1 SINAL NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA	46
4.2 PARÂMETROS ESTATÍSTICOS EXTRAÍDOS DO SINAL	58
4.2.1 Parâmetros estatísticos por banda de frequência	58
5. CONCLUSÕES	75
6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	76
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	77

Lista de Figuras

Figura 1 – Fresamento: a) corte discordante; b) corte concordante – adaptado de Trent; Wright (2000).....	4
Figura 2 – Três tipos de vibração. a) livre; b) forçada; c) auto excitada – Grzesik (2008).....	6
Figura 3 – Principais regiões de desgaste de uma ferramenta de corte – adaptado de Dearnley; Trent (1982).....	9
Figura 4– Características do desgaste de flanco –adaptado de Stephenson e Agapiou (2006) .	9
Figura 5 – A) Correlação entre desgaste de flanco e comprimento de corte; B) Correlação entre a corrente do motor de acionamento do eixo-árvore versus comprimento de corte até o limite de quebra de ferramenta. Fonte: Braga (1992) - Adaptado.....	13
Figura 6 – (A) Sinal de corrente com ambos os insertos novos; (B) sinal de corrente com um inserto novo e outro quebrado – Adaptado de René de Jesús <i>et al.</i> (2003).....	14
Figura 7 – Comparação entre ferramenta nova e desgastada – Kalvoda e Hwang (2010) – Adaptado.....	16
Figura 8 – (A) Mapa de intensidade luminosa de uma fresa frontal com dois insertos com visualização de defeito na peça (em baixo relevo); (B) Mapa de intensidade luminosa reproduzindo o fresamento de um bloco de motor – Souto (2007).....	17
Figura 9 – Desgaste de flanco médio versus RMS da amplitude do sinal – Adaptado de Kosaraju; Anne e Popuri (2012).....	18
Figura 10 – Valores de emissão acústica – Adaptada – Hase <i>et al</i> (2013).....	19
Figura 11 – Esquema da TDA – Meola (2005).....	22
Figura 12 – Quantificação do sinal harmônico – Meola (2005).....	23
Figura 13 – a) Sinal homogêneo; b) Sinal com picos destacados – Santos (2008).....	23
Figura 14 – Variação dos valores de Fator de Crista em função da variação dos valores de pico e RMS – Meola (2005).....	24
Figura 15 – Sinal no domínio do tempo. a) Ferramenta Nova; b) Ferramenta Desgastada – Adaptado de Wang <i>et al.</i> (2014).....	24
Figura 16 – Valores de curtose de acordo com o achatamento da curva de distribuição – Adaptado de Macário (2006).....	25
Figura 17 – Quantificação do sinal harmônico – El-Wardany; Gao; Elbestawi (1996).....	26
Figura 18 – A) Sinal de um processo de fresamento no domínio do tempo; B) Espectro de frequência do sinal – Adaptado de Orhan <i>et al.</i> (2007).....	28

Figura 19 – Sinal de vibração no domínio do tempo – Adaptado de Miko e Nowakowski (2012).....	29
Figura 20 – Espectro de frequência de fresamento com (a) ferramenta nova; (b) semidesgastada; (c) desgastada – Adaptado de Orhan <i>et al.</i> (2007).....	30
Figura 21 – Relação entre amplitude e desgaste – Adaptado de Orhan <i>et al.</i> (2007).....	30
Figura 22 – Sinal no domínio da frequência de ferramentas novas e gastas – adaptado de Zhang e Chen (2008)	31
Figura 23 – Sinal no domínio do tempo e da frequência para ferramentas em condição de corte e após atingir falha – adaptado de Venkata Rao; Murthy e Mohan Rao (2013).....	32
Figura 24 – Histograma dos pontos do sinal de vibração para diferentes condições da ferramenta de corte	33
Figura 25 – Centro de usinagem Romi D600	34
Figura 26 – Fresa utilizada nos experimentos	35
Figura 27 – Corpo de prova utilizado nos ensaios e seu respectivo sistema de fixação	37
Figura 28 – Primeiro estágio do faceamento do corpo de prova	38
Figura 29 – fases ativa e inativa do fresamento.....	38
Figura 30 – Sequência de realização de experimentos	40
Figura 31 – Acelerômetro IEPE B&K 4514.....	41
Figura 32 – Módulo condicionador de sinais e Chassi	42
Figura 33 – Esquema gráfico do sistema de aquisição	42
Figura 34 – Gráficos completos no domínio do tempo do sinal bruto (acima) e filtrado (abaixo) de uma réplica do experimento 1	44
Figura 35 – Gráficos ampliados no domínio do tempo do sinal bruto (acima) e filtrado (abaixo) de uma réplica do experimento 1	45
Figura 36 – Gráficos ampliados no domínio do tempo do sinal bruto (acima) e filtrado (abaixo) de uma réplica do experimento 1	46
Figura 37 – Gráfico do espectro de frequências do experimento 1	47
Figura 38 – Espectro de frequência dividido em bandas.....	48
Figura 39 – Gráficos seminormal dos efeitos dos picos das frequências para a) faixa de frequência de 30 a 700 Hz; b) faixa de frequência de 700 a 1600 Hz; c) faixa de frequência de 1600 a 2400 Hz; d) faixa de frequência de 2400 a 3000 Hz.....	50
Figura 40– Gráfico de intervalos para os picos de frequência na faixa de 700 Hz a 1600 Hz.	51
Figura 41 – Gráfico de intervalos para os picos de frequência na faixa de 1600 Hz a 2400 Hz	51

Figura 42 – Gráfico de intervalos para os picos de frequência na faixa de 2400 Hz a 3000 Hz	52
Figura 43 – Gráfico de espectro de frequência do experimento 1 na faixa de frequência de 30 a 700 Hz.....	53
Figura 44 – Gráfico de espectro de frequência do experimento 2 na faixa de frequência de 30 a 700 Hz.....	54
Figura 45 – Gráfico de espectro de frequência do experimento 3 na faixa de frequência de 30 a 700 Hz.....	55
Figura 46 – Gráfico de espectro de frequência do experimento 4 na faixa de frequência de 30 a 700 Hz.....	56
Figura 47 – Gráfico de intervalos para os picos de frequência na faixa de 30 Hz a 700 Hz...	57
Figura 48 – Gráfico de intervalos da RMS para um sinal na faixa de frequência de 30 Hz a 3,0 kHz.....	59
Figura 49 – Gráfico de intervalos do Pico para um sinal na faixa de frequência de 30 Hz a 3,0 kHz.....	60
Figura 50 – Gráfico de intervalos da Curtose para um sinal na faixa de frequência de 30 Hz a 3,0 kHz.....	60
Figura 51 – Gráfico de intervalos do Fator de crista para um sinal na faixa de frequência de 30 Hz a 3,0 kHz	61
Figura 52 – Gráfico de intervalos da RMS para um sinal na faixa de frequência de 30 Hz a 700 Hz.....	62
Figura 53 – Gráfico de intervalos da Curtose para um sinal na faixa de frequência de 30 Hz a 700 Hz.....	63
Figura 54 – Gráfico de intervalos do Pico para um sinal na faixa de frequência de 30 Hz a 700 Hz.....	63
Figura 55 – Gráfico de intervalos do Fator de crista para um sinal na faixa de frequência de 30 Hz a 700 Hz	64
Figura 56 – Gráfico de intervalos da RMS para um sinal na faixa de frequência de 700 Hz a 1600 Hz.....	65
Figura 57 – Gráfico de intervalos da Curtose para um sinal na faixa de frequência de 700 Hz a 1600 Hz.....	65
Figura 58 – Gráfico de intervalos do Pico para um sinal na faixa de frequência de 700 Hz a 1600 Hz.....	66

Figura 59 – Gráfico de intervalos do Fator de crista para um sinal na faixa de frequência de 700 Hz a 1600 Hz	66
Figura 60 – Gráfico de intervalos da RMS para um sinal na faixa de frequência de 1600 Hz a 2400 Hz.....	67
Figura 61 – Gráfico de intervalos da Curtose para um sinal na faixa de frequência de 1600 Hz a 2400 Hz.....	68
Figura 62 – Gráfico de intervalos do Pico para um sinal na faixa de frequência de 1600 Hz a 2400 Hz.....	69
Figura 63 – Gráfico de intervalos do Fator de crista para um sinal na faixa de frequência de 1600 Hz a 2400 Hz	69
Figura 64 – Gráfico de intervalos da RMS para um sinal na faixa de frequência de 2400 Hz a 3000 Hz.....	70
Figura 65 – Gráfico de intervalos da Curtose para um sinal na faixa de frequência de 2400 Hz a 3000 Hz.....	71
Figura 66 – Gráfico de intervalos do Pico para um sinal na faixa de frequência de 2400 Hz a 3000 Hz.....	71
Figura 67 – Gráfico de intervalos do Fator de crista para um sinal na faixa de frequência de 2400 Hz a 3000 Hz	72

Lista de Tabelas

Tabela1 – Características do Centro de usinagem ROMI D600	35
Tabela 2 - Composição química do aço AISI 4340 utilizado nos experimentos.....	36
Tabela 3 – Variação das condições de corte.....	39
Tabela 4 – Planejamento experimental.....	41
Tabela 5 – Valores de amplitudes para os picos encontrados no espectro de frequência para cada faixa de frequência (os valores estão em volt)	49
Tabela 6 – Resumo da relação parâmetro estatístico com estado da ferramenta em todas as bandas de frequência.....	72

RESUMO

Na indústria metal-mecânica, um fator que gera muitos custos é o desgaste de ferramentas de usinagem. Embora a literatura que aborda o assunto seja ampla, ainda não foi possível consolidá-lo. Em muitos casos, não estimá-lo pode causar distorções dimensionais e de acabamentos nas peças fabricadas, além de causar paradas no processo (para avaliar visualmente o quão desgastada está a ferramenta) e, por conseguinte, prejuízos - devido a tempos improdutivos. Uma alternativa que possibilita assegurar boas condições da ferramenta de corte é utilizar técnicas de monitoramento em tempo real, de forma indireta. O objetivo deste trabalho é contribuir na verificação do sinal de vibração como indicador do estado de desgaste da ferramenta de corte com os parâmetros de processo e materiais utilizados. Para isso utilizou-se uma fresa de 50 mm com dois insertos intercambiáveis de metal duro, montados diametralmente opostos. O corpo de prova foi de aço AISI 4340. Realizou-se um corte concordante com profundidade lateral constante (a_e) de 20 mm e avanço por dente (f_z) de 0,1 mm/dente. Para a realização dos experimentos, foram consideradas uma condição de corte de desbaste e outra de acabamento. Já as ferramentas de corte foram consideradas como boa, com valor de desgaste de flaco médio (VB_B) inferior a 0,35 mm e como gasta, com VB_B superior a 0,35 mm. A vibração foi medida com um acelerômetro uniaxial e estes dados foram adquiridos e armazenados pelo LabView® e processados com o Matlab®. O sinal foi filtrado em algumas bandas e então foi aplicada uma transformada rápida de Fourier (FFT) para análise do espectro de frequência, além de serem extraídos parâmetros estatísticos (RMS, Curtose, Pico e Fator de Crista) do sinal no domínio do tempo. Para o espectro de frequência, a banda que mostrou-se mais sensível ao desgaste foi a compreendida entre 30 Hz e 700 Hz. Já entre os parâmetros estatísticos, de alguma forma todos mostraram-se sensíveis ao desgaste. Sendo a RMS e a curtose as que foram sensíveis em mais casos e o sinal filtrado na banda de 1,6 kHz e 2,4 kHz foi o que teve uma maior amplitude de resultados positivos.

Palavras-chave: Desgaste, Monitoramento, Vibração, Fresamento, Aço AISI 4340

ABSTRACT

In the metal-mechanical industry, machining tool wear is a costly factor. Although the literature on the subject is vast, it was not possible to consolidate it. In many cases, overlooking the tool wear could lead to dimensional and finishing distortions in manufactured parts and cause downtime in the process (to visually evaluate the tool wear) and therefore casualties resulting from downtimes. An alternative that allows securing favorable cutting tool conditions is to use indirect monitoring techniques and automatic wear detection. The objective of this study is to assess if the vibration signal can be a good indicator of the cutting tool wear state considering the process parameters and materials used. To this end a 50mm milling cutter with two interchangeable carbide inserts, assembled diametrically opposed was used. The test sample was made of AISI 4340 steel. A concordant cut was made with lateral depth (a_e) of 20 mm and a feed per tooth (f_z) of 0.1 mm/tooth. The two cutting conditions used in the experiments were roughing and finishing. In regard of the cutting tools, the first was considered good, with average flank wear value (VB_B) less than 0.35mm and a second one as worn, with VB_B exceeding 0.35mm. The vibration was measured with a uniaxial accelerometer and these data were acquired and stored using LabView and processed with Matlab. The signal was filtered in some bandwidths and then it was applied to a Fast Fourier Transform (FFT) for the analysis of the frequency spectrum as well as being extracted statistical parameters (RMS, kurtosis, peak and crest factor) from signal in the time domain. For the frequency spectrum, the bandwidth that was more sensitive to wear was between 30 Hz and 700 Hz. Among the statistical parameters, somehow all were sensitive to wear. Being the RMS and kurtosis those that were sensitive in most cases and the filtered signal with the bandwidth of 1.6 kHz and 2.4 kHz was the one with a wider range of positive results.

Keywords: Wear, Monitoring, Vibration, Milling, Steel AISI 4340

1. INTRODUÇÃO

O desgaste excessivo em ferramentas de corte causa distorções dimensionais e de acabamento nas peças, além de provocar custos adicionais, sendo, portanto, um dos principais desafios da indústria. Para que a ferramenta seja usada em boas condições, utilizam-se métodos de detecção do estado da ferramenta e sistemas de monitoramento do processo de corte.

As trocas de ferramentas ocorrem devido à quebra e ao desgaste excessivo. Muitas vezes há uma quebra inesperada ou o desgaste excessivo prematuro. Por outro lado, em alguns casos, troca-se a ferramenta quando ainda há condições efetivas de corte devido a uma estimativa média de algum fator relacionado ao fim de vida da ferramenta, como um tempo de usinagem, comprimento de corte, dentre outros, desde que leve-se em consideração as condições de operação. Muitas vezes essas ferramentas são monitoradas de forma direta para avaliar o desgaste através de métodos ópticos adequados. Esse procedimento não é tão eficiente, pois causa interrupções do processo e gera, assim, tempos improdutivos e, por conseguinte, prejuízo na indústria. Torna-se imprescindível, portanto, que sejam desenvolvidas técnicas que propiciem a diminuição dos tempos de paradas indesejáveis (MARQUES *et al.*, 2012; SOUTO, 2007).

Um ponto essencial, talvez o mais crítico na usinagem de um componente, é saber o momento exato da troca da ferramenta de corte, considerando sua máxima utilização e, obviamente, respeitando os limites da qualidade da peça produzida. Portanto, o monitoramento do processo de usinagem é de extrema importância para a otimização da vida da ferramenta e prevenção de quebra, possibilitando uma diminuição do custo de produção (SOUTO, 2007).

Um bom sistema de monitoramento de usinagem é nada mais do que um procedimento de manutenção preditiva em tempo real. Através de técnicas preditivas, pode-se detectar e diagnosticar defeitos antecipadamente, ao longo da utilização de equipamentos industriais, antecipando-se à sua quebra, facilitando assim, uma programação pontual de manutenção (MEOLA; DUARTE, 2006)

O monitoramento consiste na maioria das vezes, de uma sequência de subsistemas para aquisição e tratamento dos dados, desde a detecção dos sinais até o diagnóstico do estado da ferramenta: aquisição (sensoriamento); pré-processamento (condicionamento de sinais);

representação (tratamento de sinais); avaliação e resposta (reação ou tomada de decisão) (MEOLA; DUARTE, 2006).

Existem diversos métodos de avaliação do desgaste da ferramenta de usinagem de forma indireta, possibilitando a parada de máquina-ferramenta apenas quando indicativos de desgastes e avarias nas ferramentas forem detectados. Entre os principais pode-se citar: monitoramento através da temperatura, das forças de usinagem, da potência de corte, da emissão acústica e da vibração. Este último pode utilizar, por exemplo, acelerômetros acoplados na ferramenta, no eixo árvore ou diretamente na peça usinada para aquisição do sinal de vibração (MARQUES *et al.*, 2012).

1.1 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é dar uma contribuição nas pesquisas sobre o monitoramento em tempo real do estado da ferramenta no processo de fresamento a fim de minimizar o número de interrupções do processo de usinagem, ocasionadas pela troca de ferramenta, aumentar a confiabilidade, melhorar a qualidade do produto final, reduzir custos e, conseqüentemente, melhorar a determinação do momento ideal de troca de ferramenta no processo de fresamento. Sua realização ocorre através da avaliação indireta da evolução desgaste e/ou avarias utilizando o sinal de vibração, utilizando o aço AISI 4340 como material do corpo de prova dos experimentos.

Os objetivos específicos são:

- Verificar se o sinal de vibração pode ser um bom indicador do estado de desgaste da ferramenta de corte nas condições e materiais utilizados;
- Elencar técnicas de tratamento de sinais de vibração que são sensíveis ao desgaste de ferramenta;
- Identificar faixas de frequência sensíveis ao desgaste;
- Identificar parâmetros estatísticos do sinal de vibração sensíveis ao fenômeno do desgaste.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 PROCESSOS DE USINAGEM

Entende-se como usinagem o processo de fabricação de metais que produz cavaco ao conferir a uma peça a forma, as dimensões ou o acabamento, ou uma combinação destes três itens. Cavaco é definido como a porção de material da peça, retirada da ferramenta, caracterizada por apresentar forma geométrica irregular (FERRARESI, 1970).

O corte de metais é um assunto em que a prática industrial sempre tem guiado a teoria. O estudo do processo de usinagem inevitavelmente incorre no desenvolvimento de máquinas-ferramenta modernas. Além disso, este campo geralmente absorve avanços provenientes das necessidades, e consequentes mudanças ocorridas no chão de fábrica (STEPHENSON; AGAPIOU, 2006).

2.1.1 Fresamento

O fresamento é um processo mecânico de usinagem destinado à obtenção de superfícies quaisquer com o auxílio de ferramentas geralmente multicortantes. Caracteriza-se pelo movimento giratório da ferramenta, enquanto que o movimento de avanço é feito, geralmente, em uma trajetória pré-determinada pela peça submetida ao processo de usinagem a qual está fixada na mesa da máquina (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2001; FERRARESI, 1970). Para um centro de usinagem com três eixos, pode-se realizar a usinagem em único eixo linear (X ou Y ou Z), em um plano na composição de dois eixos (XZ ou ZY ou XY), ou ainda pela movimentação no espaço utilizando simultaneamente os três eixos (XYZ). No caso de quatro ou cinco eixos, há movimentos de rotação em torno dos eixos X (eixo B) e Y (eixo A).

O processo de fresamento é distinguido dos demais processos de corte pelo tipo de cavaco produzido, pois são gerados cavacos descontínuos e quebradiços, causados pela geometria do processo de corte, ao contrário, por exemplo, do torneamento o qual produz cavacos descontínuos devido à fratura do cavaco. Pode-se também associar a descontinuidade desses cavacos às condições cíclicas não estacionárias de força e temperatura. Quando ocorre o início de corte, a aresta cortante sofre um forte choque seguido de uma variação de força. Isto se repete enquanto durar o processo (SHAW, 2005).

2.1.1.1 Tipos fundamentais de fresamento

Pode-se classificar o fresamento segundo dois critérios básicos. De acordo com a posição do eixo árvore da máquina-ferramenta ou a disposição dos dentes ativos da fresa (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2001).

Segundo Ferraresi (1970), há dois tipos básicos de fresamento:

- Fresamento cilíndrico tangencial: tem como produto final uma superfície plana paralela ao eixo de rotação da ferramenta, ou, em casos especiais desse mesmo processo, a superfície não é plana ou o eixo de rotação é inclinado em relação à superfície originada. Em todo caso, a superfície gerada não é perpendicular ao eixo da ferramenta;
- Fresamento frontal: ocorre quando a superfície gerada na usinagem é perpendicular ao eixo de rotação da ferramenta.

Há alguns casos nos quais os dois tipos básicos de fresamento ocorrem simultaneamente no processo. Pode-se haver, ou não, predominância de um sobre o outro.

No fresamento cilíndrico tangencial, há uma diferenciação entre corte concordante e em corte discordante. No corte discordante (figura 1a), ao iniciar o corte há uma mínima remoção de material a qual cresce até um valor máximo que ocorre no ponto de contato final entre ferramenta e peça de trabalho. Já no corte concordante (figura 1b), ocorre o contrário, ou seja, a espessura máxima do cavaco ocorre no início do corte (TRENT; WRIGHT, 2000).

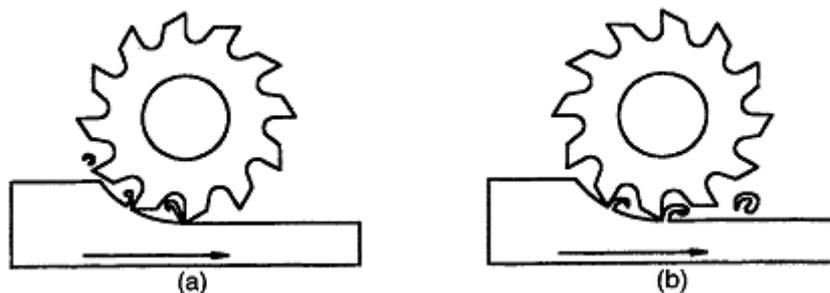


Figura 1 – Fresamento: a) corte discordante; b) corte concordante – adaptado de Trent; Wright (2000)

2.1.2 Vibração na usinagem

Vibração é definida como qualquer movimento que se repita após um intervalo de tempo em torno de sua posição estática. Sua teoria trata do estudo de movimentos oscilatórios de corpos e as forças associadas a eles. A vibração de um sistema envolve a transferência alternada

de sua energia potencial para energia cinética e de energia cinética para energia potencial. Se o sistema for amortecido, certa quantidade de energia é dissipada em cada ciclo de vibração e deve ser substituída por uma fonte externa, se for preciso manter um regime permanente de vibração. Logo, para que um sistema mecânico vibre, é necessário, e suficiente, que o mesmo tenha capacidade de armazenar energia cinética (que tenha inércia), energia potencial elástica (que seja flexível) e uma excitação externa dependente do tempo. Consequentemente, na prática, é muito difícil evitar a vibração. Geralmente ela ocorre por causa dos efeitos dinâmicos de tolerâncias de fabricação, folgas, contatos, atrito entre peças de uma máquina e, principalmente, devido ao efeito de forças dinâmicas desequilibradas de componentes rotativos e alternativos de máquinas (DUARTE, 2005 *apud* SOUTO, 2007; RAO, 2008).

Em processos de usinagem, a vibração é gerada pelo movimento cíclico relativo entre a peça e a ferramenta, sendo que a vibração está presente em todos os processos, por mais simples que sejam. Uma das grandes dificuldades ao lidar com o assunto de vibração em usinagem é a determinação da faixa de amplitude da mesma, uma vez que vários fatores contribuem para sua formação (COSTA, 1995).

Segundo Grzesik (2008), três classes de vibrações mecânicas podem ser identificadas em qualquer tipo de processo de usinagem: livre, forçada e auto-excitada, como mostrada na figura 2 e na equação diferencial do movimento amortecido (equação 1).

$$m\ddot{\mathbf{x}}(t) + \kappa\dot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{c}\mathbf{x}(t) = \begin{cases} \mathbf{0} & \text{Vibrações livres} \\ & \omega = \omega_0, \mathbf{x}_0 \rightarrow \mathbf{0} \\ \mathbf{F}(t) & \text{Vibrações forçadas} \\ & \omega = \omega_F, \mathbf{x}_0 = \text{constante} \\ \mathbf{F}[\mathbf{x}(t)] & \text{Vibrações auto excitadas} \\ & \omega \approx \omega_F, \mathbf{x}_0 \rightarrow \infty \end{cases} \quad (1)$$

Onde m é a massa do sistema de vibração (kg), κ é o coeficiente de amortecimento (Ns/m), c é o módulo de rigidez, ω é a frequência angular das vibrações livres (rad/s), ω_0 é a frequência angular das vibrações auto-excitadas (rad/s), ω_f é a frequência angular das vibrações forçadas (rad/s), e x_0 é a amplitude de vibração.

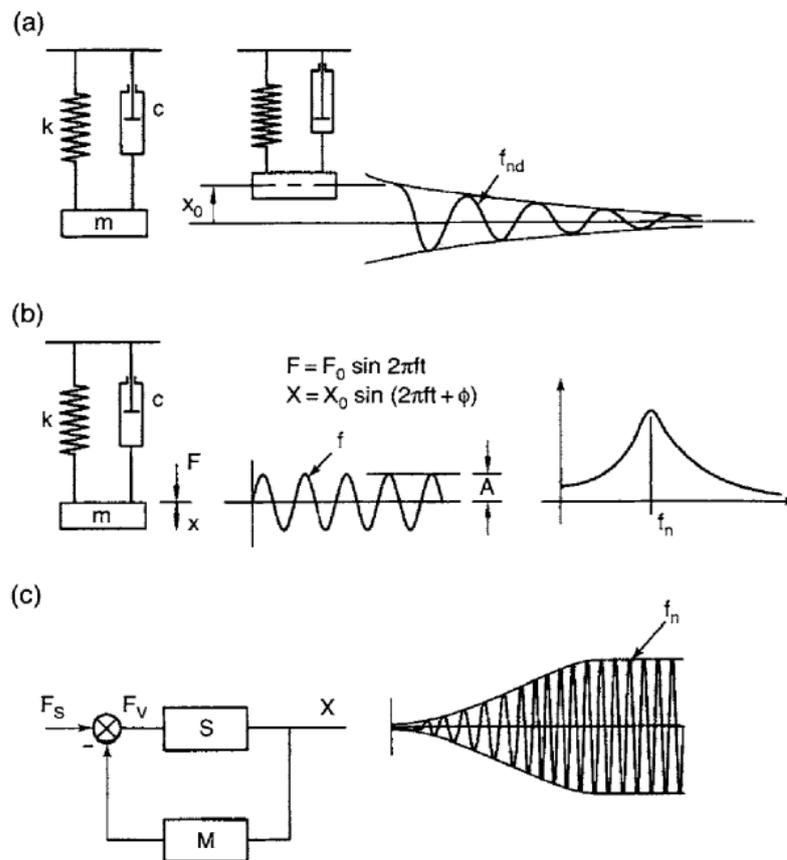


Figura 2 – Três tipos de vibração. a) livre; b) forçada; c) auto excitada – Grzesik (2008)

As vibrações livres são originadas a partir de impulsos transferidos para a estrutura da máquina-ferramenta através de sua fundação, de súbitas inversões de sentido de massas oscilantes, ou do contato inicial da ferramenta de corte com a peça usinada. O resultado, cujas características são valor de amplitude decrescente e frequência igual à frequência natural f_{nd} amortecida do sistema desse efeito, é mostrado na figura 2a (GRZESIK, 2008).

As vibrações forçadas são resultado de forças periódicas $F(t)$ atuando no sistema devido, por exemplo, ao contato intermitente dos dentes de uma fresa durante a usinagem, o que ocasiona uma vibração com amplitude A constante e frequência de vibração f igual à frequência de excitação da força (figura 2b). Quando $f=f_n$, o sistema entra em ressonância, gerando altas amplitudes (GRZESIK, 2008). Segundo Altintas (2000), o comportamento geral da vibração de uma estrutura pode ser avaliado pela solução de equações diferenciais ordinárias do movimento, sabendo-se previamente qual processo de usinagem utilizado.

Já as vibrações auto-excitadas, também conhecidas como *chatter*, são causadas por instabilidades na dinâmica do processo de corte. Elas, geralmente, resultam de uma dinâmica

instável do processo de corte e se desenvolvem devido a uma relação como que uma malha (circuito) fechada do mecanismo representado na figura 2c. Suas principais características são:

- O crescimento da amplitude até um valor constante;
- A sua frequência é muito próxima da frequência natural do sistema, senão igual;
- Não sofre influência de forças externas, periódicas e independentes;
- Uma força periódica é gerada através da vibração no sistema derivada de uma força constante.

2.2 AVARIAS, DESGASTE E VIDA DE FERRAMENTAS

Não obstante às suas altas dureza e resistência ao desgaste e, por menor que seja a resistência mecânica da peça de trabalho, a ferramenta de corte sofre um processo de desgaste que exige a sua substituição (MACHADO *et al.*, 2011).

A falha da ferramenta de corte resulta do desgaste, da deformação plástica ou da fratura. Para se entender o caminho da vida da ferramenta, é necessário que se tenha um entendimento dos mecanismos que causam essa falha (STEPHENSON; AGAPIOU, 2006).

2.2.1 Avarias

Segundo Machado *et al.* (2011), a avaria é um fenômeno que corre de maneira repentina e inesperada, ocasionado pela quebra, lascamento ou trinca na aresta de corte.

2.2.1.1 Quebra

A quebra é a ruptura da ponta ou da aresta de corte e é originada pela ação de grandes forças de usinagem associadas a outros fatores, tais como ângulo da ponta pequeno, material de corte frágil (cerâmicas e alguns tipos de metal duro), corte interrompido e/ou a parada instantânea do movimento de corte sem que, previamente, realize-se o afastamento da ferramenta da peça (FERRARESI, 1970). A quebra da ferramenta não ocasiona somente dano na ferramenta, mas também no porta-ferramentas, bem como na própria peça (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2001).

2.2.1.2 Trincas

As trincas são originadas pela variação de temperatura, se formam nas pastilhas de metal duro pouco tenazes, principalmente. Durante a usinagem, a ferramenta não tem uma temperatura uniforme em todas as suas regiões. À medida que a região da ferramenta se

distancia da zona de contato com o cavaco, menor a sua temperatura, formando um gradiente térmico. Devido ao gradiente de temperatura, a pastilha se dilata e se deforma de forma heterogênea e, portanto, surgem tensões distintas por todo o seu corpo as quais poderão conduzir à formação de trincas que se desenvolvem perpendicularmente à aresta cortante (FERRARESI, 1970).

Muitas vezes as trincas se apresentam em forma de sulcos os quais se apresentam em forma de pente e são decorrentes do corte interrompido, da usinagem com variação de avanço e do acesso irregular do fluido de corte.

Há também as trincas originadas pela variação de esforços mecânicos. De modo distinto da anterior, estas se apresentam perpendicularmente à aresta de corte (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2001).

2.2.2 Desgaste

Mesmo que possua tenacidade suficiente para evitar uma avaria, a ferramenta de corte está sempre sujeita ao desgaste. Há ocorrência de desgaste progressivo na superfície de folga e na superfície de saída da ferramenta. Segundo Machado *et al.* (2011), são três as principais formas de desgaste que podem existir, as quais estão representadas na figura 3.

- Região A: Desgaste de cratera (KT)
- Região B: Desgaste de flanco (VB_B – desgaste de flanco médio; $VB_{Bmáx}$ – desgaste de flanco máximo)
- Região C e D: Desgaste de entalhe (VB_N)

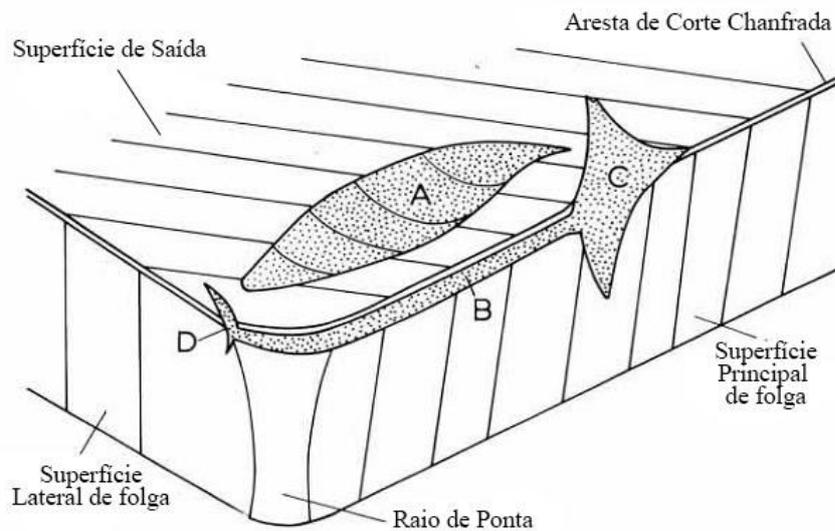


Figura 3 – Principais regiões de desgaste de uma ferramenta de corte – adaptado de Dearnley; Trent (1982)

Segundo Diniz (2001), o desgaste de flanco é o mais comum e ocorre na superfície de folga da ferramenta, tendo por causa o contato entre ferramenta e peça, ocorrendo em todo processo de usinagem. Esse tipo de desgaste, segundo Stephenson e Agapiou (2006), resulta da abrasão da aresta de corte. Como já citado, há duas variantes do desgaste de flanco: desgaste de flanco médio (VB_B) e desgaste de flanco máximo ($VB_{B_{máx}}$), conforme figura 4. O atrito entre a região desgastada com a superfície usinada causa danos a esta, além do surgimento de tensões que aumentam as deformações e reduzem a precisão dimensional da peça.

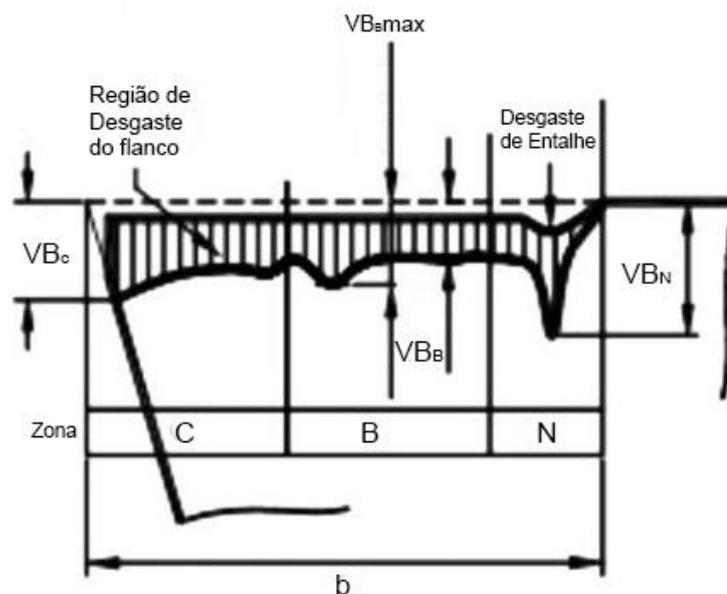


Figura 4– Características do desgaste de flanco – adaptado de Stephenson e Agapiou (2006)

O desgaste de cratera, por sua vez, ocorre na superfície de saída da ferramenta, devido ao atrito entre o cavaco e a ferramenta. Nos casos de utilização de ferramentas de metal duro revestidas (Al_2O_3 é a cobertura mais eficiente), ferramentas cerâmicas ou quando o material da peça é frágil (gera cavacos curtos), este tipo de desgaste não ocorre. Sua presença aumenta o ângulo de saída efetivo e, por conseguinte, reduz a força de usinagem, embora o excesso deste tipo de desgaste torne a aresta de corte mais vulnerável, podendo conduzir à quebra da ferramenta, devendo, portanto, ser evitado porque encurta a sua vida útil (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2001; STEPHENSON; AGAPIOU, 2006).

O desgaste de entalhe também ocorre na superfície de saída da ferramenta, especificamente no ponto de contato entre a ferramenta e a superfície ainda não usinada da peça. Sua incidência é maior nas ferramentas usadas no torneamento (STEPHENSON; AGAPIOU, 2006).

Os mecanismos que causam esses desgastes, segundo Trent e Wright (2000), são cisalhamento plástico a altas temperaturas, deformação sob tensão de compressão, desgaste por difusão, desgaste por aderência e arrastamento (*attrition*) e desgaste por abrasão.

2.2.3 Vida da Ferramenta

2.3 MONITORAMENTO

Quando o grau de degradação de um equipamento se aproxima ou atinge o limite previamente estabelecido de condição de uso, decide-se intervir no processo, visto que o estado do equipamento exige essa atitude. Em um ambiente de manufatura, o monitoramento de uma ferramenta ganha importância ao reduzir impactos econômicos acarretados pelo desgaste da ferramenta ou pela sua quebra, e ao evitar a perda de qualidade dos produtos manufaturados (DESCHAMPS, 2004; GONDIM, 2008).

As técnicas de monitoramento podem ser classificadas, tradicionalmente, em diretas e indiretas. Nos métodos diretos, mede-se a variável avaliada, no caso, o desgaste da ferramenta, para chegar a uma conclusão. Por outro lado, no caso dos métodos indiretos, são medidas variáveis indiretas, fazendo-se relações através de determinações empíricas com a variável que se deseja avaliar. Apesar de serem mais aplicáveis em termos práticos, os métodos indiretos são menos precisos que os diretos. Diferenciam-se destes, principalmente, porque os processos de usinagem são monitorados continuamente por meio de sensores e dispositivos de detecção que

quantificam o desempenho ou fornecem informações para a otimização do processo (TETI *et al.*, 2010).

Muitos métodos diretos só podem ser usados como técnicas de laboratório. Isto ocorre devido, principalmente, às limitações de funcionamento causadas por problemas de acesso durante a usinagem, à iluminação e ao uso de fluido de corte. Entretanto, a medição direta tem um alto grau de precisão e tem sido empregado extensivamente em laboratórios de pesquisa para apoiar as investigações de fenômenos mensuráveis fundamentais durante o processo de usinagem. Os métodos diretos de monitoramento mais comuns utilizam (DESCHAMPS, 2004; TETI *et al.*, 2010):

- Sensores de proximidade (baseia-se na medição da modificação da distância entre a aresta de corte principal e a peça);
- Sensores radioativos;
- Sensores de visão;
- Medição através de microscópio;
- Raios laser;
- Resistência elétrica.

Com relação ao monitoramento indireto, os métodos mais comumente usados medem as seguintes variáveis (DIMLA, 2000; TETI *et al.*, 2010):

- Potência e Corrente do Motor;
- Força e Torque;
- Emissão Acústica;
- Temperatura;
- Vibração.

Para Pigari (1995), algumas prioridades são fundamentais para o sucesso da implantação de um sistema de monitoramento, que são:

- Ser um sistema confiável;
- Não intrusivo;
- Adequado para ambientes reais de trabalho;
- Ter custo compatível com seus propósitos.

Destaca-se, ainda, que a aplicação pura e simples de um sistema de monitoramento não garante que o objetivo o qual se almeja seja alcançado. Dessa maneira, faz-se necessário que apenas o fenômeno que se vai analisar influencie no parâmetro medido, ou seja, o sistema deve garantir que interferências externas ao parâmetro de interesse sejam eliminadas. Além do mais, para que o sistema não seja intrusivo, o funcionamento normal da máquina sobre a qual ele está montado não pode sofrer alterações. Por fim, os componentes utilizados precisam ter uma resistência que assegure um bom funcionamento e repetibilidade das funções executadas, a fim de não serem problemas no sistema de aquisição a causa de interrupções da produção (PIGARI, 1995; SILVA, 2010).

O comportamento do sistema máquina-ferramenta sofre grande influência das condições de ambiente de trabalho. Além do mais, o monitoramento do processo de usinagem é de difícil implementação, devido ao fato de ter muitas variáveis interligadas. Dentre essas variáveis, pode-se citar (PIGARI, 1995):

- Velocidade de corte;
- Avanço;
- Profundidade de corte;
- Características da ferramenta (geometria, material, revestimento);
- Propriedades do material da peça.

A seguir são explicadas as principais técnicas de monitoramento indireto de usinagem as quais já foram citadas no texto. A ênfase será dada à técnica de monitoramento através do sinal de vibração que é o foco do presente trabalho.

2.3.1 Monitoramento através da Potência e da Corrente do motor

Durante o processo de usinagem, uma vez aumentado o desgaste de flanco da ferramenta, observa-se o aumento da força de usinagem. Fato explicado pelo desenvolvimento de maior área de contato entre a ferramenta e a peça e, por conseguinte, o aumento do atrito entre ambas. Por outro lado, o desgaste de cratera, por aumentar o ângulo de saída efetivo da ferramenta, tende a diminuir a força de usinagem. A potência de corte, por sua vez é diretamente proporcional à potência elétrica consumida pelo motor da máquina. Portanto, a medição de parâmetros elétricos como tensão e corrente, pode ser um bom indicativo dos esforços de corte presentes na usinagem (COSTA, 1995; FERRARESI, 1970).

A principal vantagem desse método é que os equipamentos de medição não são intrusivos. A capacidade de medir a potência já existe no controlador da unidade como parte da malha de controle rígido da máquina ou pode ser facilmente adaptado e é adequado para uso em ambientes de produção (BYRNE *et al.*, 1995).

Braga (1992) torneou aço AISI 1045 com pastilhas de metal duro e observou que a corrente do motor de avanço da máquina-ferramenta apresenta valores muito instáveis com o decorrer do tempo, sendo inviável a sua utilização. Já a corrente do motor principal cresce de forma lenta até que sejam atingidos valores de 0,8 mm de desgaste de flanco ($VB_{Bmáx}$) da ferramenta; fato que torna inviável a sua utilização em operações de acabamento, enquanto que em operações de desbaste, por haver uma maior sensibilidade para avanços e velocidade de altos valores, é possível a sua utilização. Em casos de altos valores de desgaste, os valores da corrente crescem rapidamente e, após a quebra, há uma queda brusca, o que torna esse método muito útil na prevenção de uma possível quebra da ferramenta que está prestes a ocorrer. Esse fato é mostrado na figura 5.

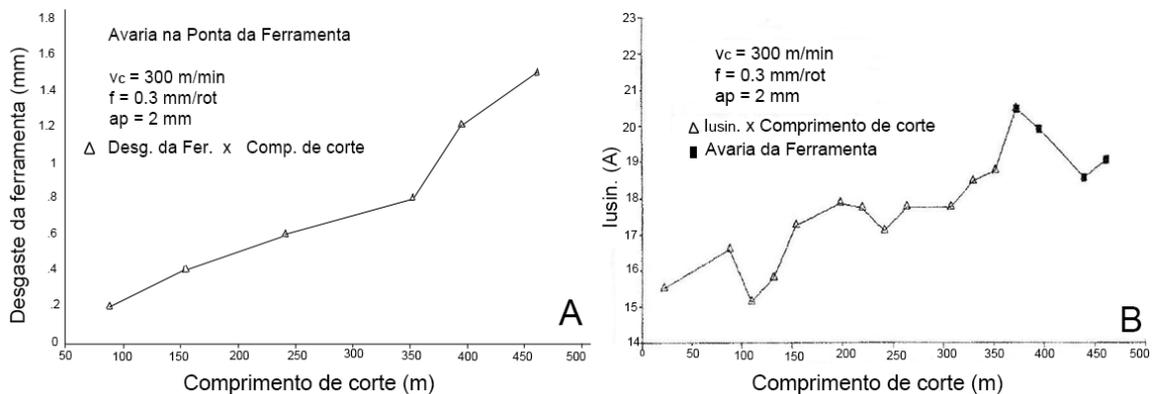


Figura 5 – A) Correlação entre desgaste de flanco e comprimento de corte; B) Correlação entre a corrente do motor de acionamento do eixo-árvore versus comprimento de corte até o limite de quebra de ferramenta. Fonte: Braga (1992) - Adaptado

Costa (1995) torneou aço laminado com condições de corte que caracterizam desbaste, variando tanto a velocidade de corte quanto o avanço e avaliando o desgaste de flanco. O crescimento do valor da corrente elétrica do motor principal da máquina acompanhou o crescimento do valor do desgaste de flanco da ferramenta, além de sinalizar o aumento repentino do desgaste. No entanto, não foi possível utilizar um valor fixo de corrente para estabelecer fim de vida de ferramenta.

René de Jesús *et al.* (2003) desenvolveram uma metodologia baseada na implementação de um filtro analógico passa-banda que minimiza a influência de ruídos e obtiveram resultados que demonstram que o método é adequado, possibilitando a extração de sinal. Sua aplicabilidade é muito útil para monitoramento de quebra de ferramenta de fresamento, conforme figura 6, onde percebe-se a diferença no sinal filtrado quando um dos insertos está quebrado em comparação com o sinal em que ambos estão em condições de corte. Claramente nota-se que quando um dos insertos está quebrado, há uma variação significativa no sinal. Para avaliar o desgaste das ferramentas não se alcançou a mesma eficácia.

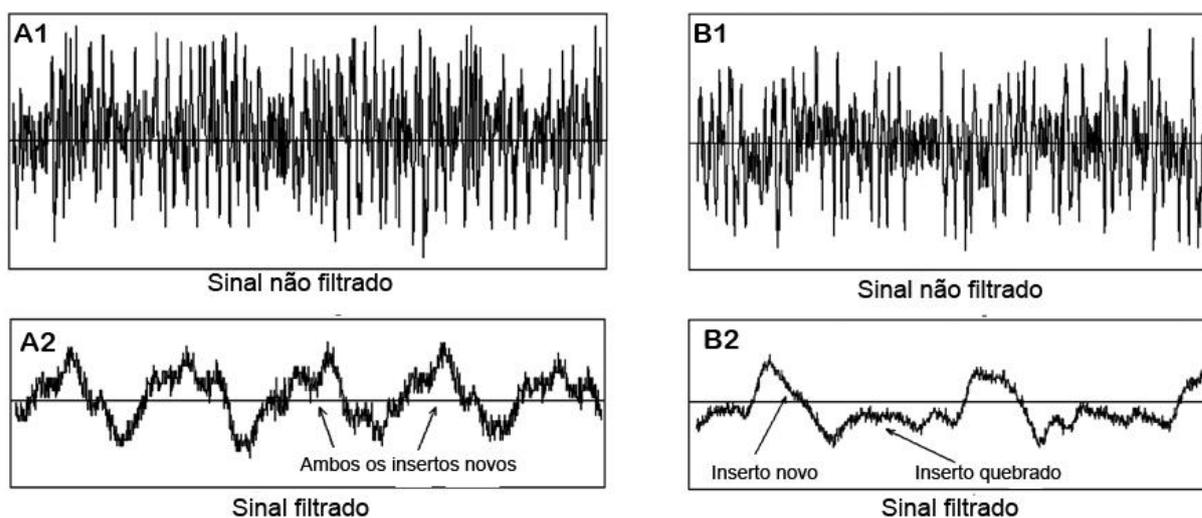


Figura 6 – (A) Sinal de corrente com ambos os insertos novos; (B) sinal de corrente com um inserto novo e outro quebrado – Adaptado de René de Jesús *et al.* (2003)

2.3.2 Monitoramento através das forças de usinagem

As forças geradas nas operações de usinagem são de grande interesse na engenharia. Essas forças influenciam diretamente na potência da máquina, causando deflexões na peça, na ferramenta ou na estrutura da máquina-ferramenta. Além disso, eleva a energia do processo de corte, podendo causar elevadas temperaturas de corte e vibrações estáveis no sistema. O monitoramento através de forças de usinagem é, por vezes, utilizado para comparar a usinabilidade dos materiais, especialmente quando não é possível realizar testes de vida de ferramenta, devido à falta de tempo ou ao baixo estoque de material. É possível, portanto, avaliar tanto o processo, quanto o desgaste e a falha da ferramenta (STEPHENSON; AGAPIOU, 2006).

O desgaste da ferramenta e, principalmente, a quebra ou o lascamento, atuam na usinagem provocando alteração nos valores das forças envolvidas no processo (CALDEIRANI

FILHO, 1998). As forças de usinagem são o método mais pesquisado para se monitorar o processo de usinagem por dois motivos: a primeira é a facilidade de se medir as forças de usinagem por dinamometria, um método amplamente conhecido, e a segunda é que há um “consenso” de que a força de usinagem é um bom parâmetro indicador sobre desgaste, quebra ou outras anomalias referentes à ferramenta (BONIFÁCIO, 1993).

A implantação de um sistema de análise de forças de usinagem é muito desafiante, visto que o uso do dinamômetro é muito intrusivo na produção industrial quando consideram-se as dimensões de algumas peças e o custo de implantação de transdutores de força (GIRARDIN; RÉMOND; RIGAL, 2010). Em casos de laboratórios, realizam-se adaptações como, por exemplo, limitar as dimensões da peça às dimensões do dinamômetro a fim de evitar que influências inconvenientes à análise dos resultados (BERKENBROCK, 2012).

Kalvoda e Hwang (2010) utilizaram como técnica de análise de dados a transformada de Hilbert-Huang (HHT), avaliando sinais de força e de vibração no fresamento. Como resultado da análise do sinal de força, comparando-se uma ferramenta desgastada com uma nova, constatou-se que o pico do sinal para a ferramenta nova correspondia à frequência de entrada da ferramenta na peça, enquanto que há uma alteração no valor da frequência na qual está o pico do sinal da ferramenta desgastada, conforme figura 7. A frequência, para a ferramenta desgastada, diminui seu valor, certamente, devido à alteração da geometria de corte ocasionada pelo desgaste ou avaria.

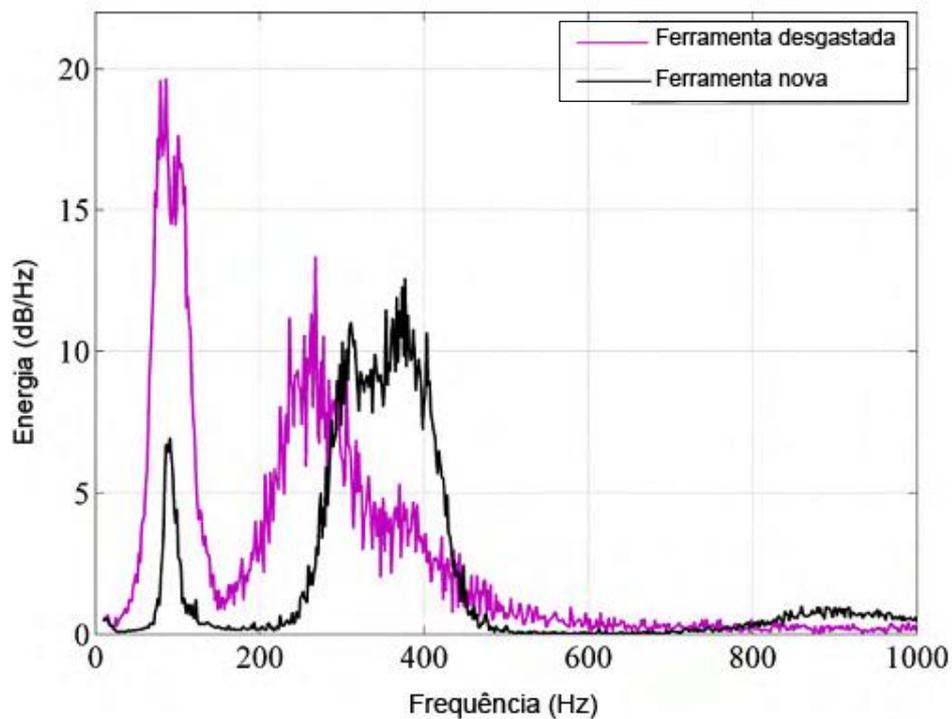


Figura 7 – Comparação entre ferramenta nova e desgastada – Kalvoda e Hwang (2010) – Adaptado

2.3.3 Monitoramento através da emissão acústica

O sinal de emissão acústica é definido como ondas elásticas transientes, dentro de um material, geradas pela liberação de energia de tensão localizada. Estas ondas de tensão produzem deslocamentos na superfície do material, podendo então ser detectadas por sensores piezelétricos que transformam estes deslocamentos em sinais elétricos. O sinal de emissão acústica contém informações úteis sobre o mecanismo de desgaste da ferramenta e pode indicar a alteração das condições de corte, bem como pode ser usado como um meio confiável para um monitoramento do desgaste da ferramenta (CUI *et al.*, 2010; RAVINDRA; SRINIVASA; KRISHNAMURTHY, 1997; SOUTO, 2007).

A faixa de frequência desse tipo de sinal está compreendida entre 80 kHz e 1 MHz. Seus sensores são usados tanto para monitoramento de desgaste de ferramenta quanto para monitoramento de falha. Entretanto, a faixa de frequência para cada fenômeno é específica. Por exemplo, um sensor de 200 kHz é utilizado para desgaste e outro sensor de 800 kHz é utilizado para detecção de quebra (JANTUNEN, 2002). Essa faixa de frequência caracteriza uma grande vantagem da emissão acústica, visto que seus valores são superiores aos valores das vibrações da máquina-ferramenta e dos ruídos provenientes do ambiente de trabalho (CHEN; LI, 2006).

Segundo Grzesik (2008), a emissão acústica é um dos métodos mais comumente usados para monitoramento de condição de ferramenta de usinagem, atingindo êxito em boa parte dos casos. A seguir serão descritos resultados obtidos a partir da utilização desse método.

Souto (2007) avaliou o emprego do sinal RMS da emissão acústica no fresamento, variando a quantidade de insertos na fresa, gerando um mapa de intensidade luminosa a partir do sinal; fez uso também do sinal bruto. O mapa de intensidade luminosa mostrou-se muito útil para o monitoramento não só do desgaste, mas de toda a operação de fresamento, visto que foi possível detectar alguns problemas típicos como erros de batimento axial e radial e níveis diferentes de desgastes nos insertos, bem como a representação da superfície que está sendo usinada, conforme figura 8. Além disso, foram feitas análises a fim de avaliar o comportamento do sinal com a ferramenta em três estágios diferentes (nova, média e gasta) e utilizar uma rede neural probabilística (PNN). A rede neural teve índices muito próximos de 100% de acerto na classificação dos estágios de desgaste de ferramenta, com condições de corte que caracterizam acabamento. Nas condições de desbaste, somente o estágio ferramenta desgastada teve um índice de acerto de aproximadamente 100%, enquanto os demais tiveram índices menores.

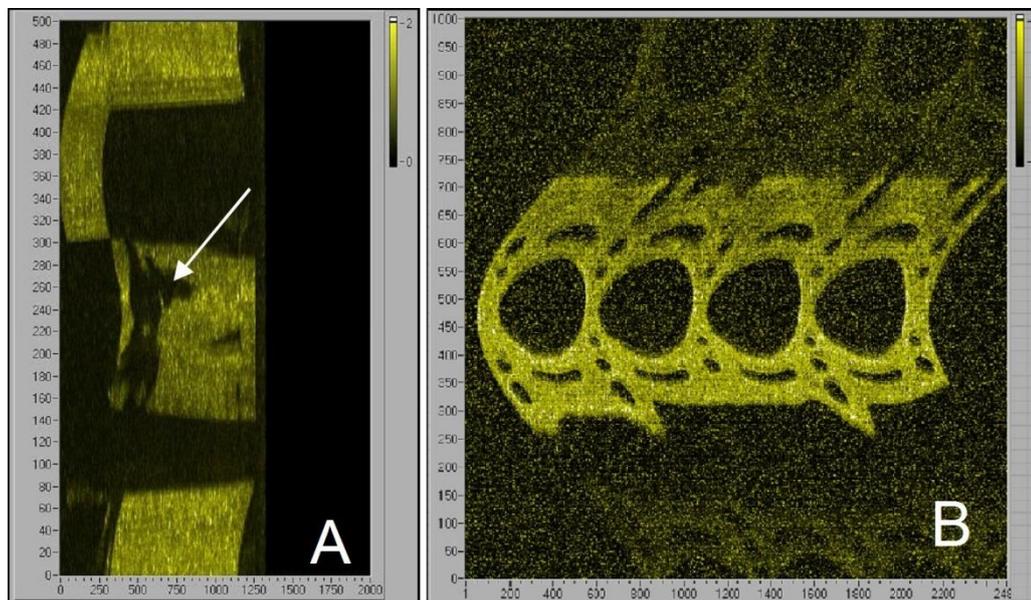


Figura 8 – (A) Mapa de intensidade luminosa de uma fresa frontal com dois insertos com visualização de defeito na peça (em baixo relevo); (B) Mapa de intensidade luminosa reproduzindo o fresamento de um bloco de motor – Souto (2007)

Kosaraju; Anne e Popuri (2012) tornearam uma liga de Titânio (Ti-6Al-4V) com inserto de metal duro revestido com TiAlN, Variando a velocidade de corte (v_c), o avanço (f) e a

profundidade de corte (a_p) em três níveis de valores diferentes cada um. Na pesquisa realizada, o sinal RMS cresceu com o desgaste de flanco médio, de acordo com a Figura 9. Também foi desenvolvido um modelo matemático do sinal de emissão acústica, o qual contém como variáveis os parâmetros de corte v_c (m/min), f (mm/rev) e a_p (mm). O referido modelo foi correlacionado com os dados experimentais com erro máximo de 2,32%.

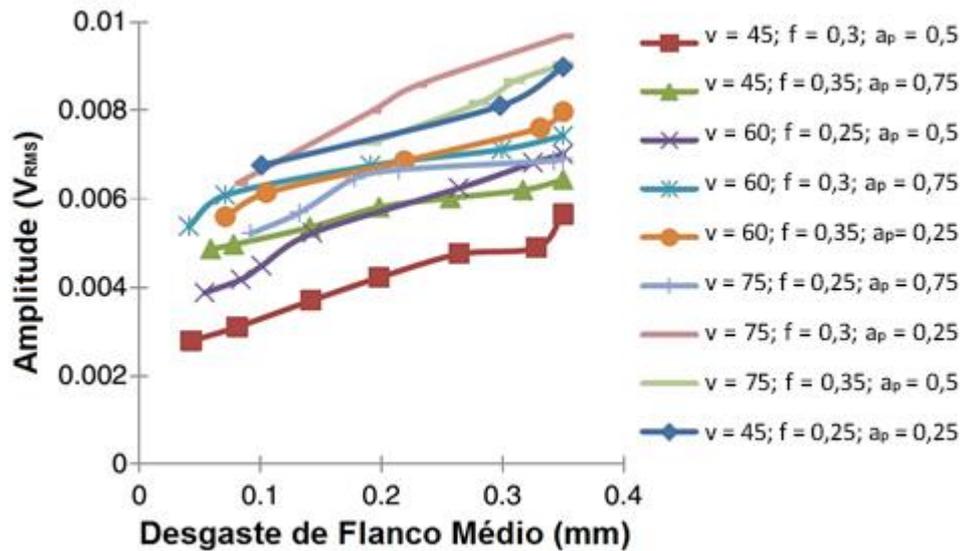


Figura 9 – Desgaste de flanco médio versus RMS da amplitude do sinal – Adaptado de Kosaraju; Anne e Popuri (2012)

Hase *et al.* (2013) tornearam aço JIS SKS3 normalizado utilizando uma ferramenta de *Cermet*. A velocidade de corte e a profundidade de corte foram mantidas constantes, enquanto foi variado o avanço em quatro níveis diferentes de valores (0,05; 0,075; 0,1 e 0,15 mm/rev). A fim de correlacionar o desgaste com o sinal de emissão acústica, foram medidas a espessura de cavaco e a rugosidade superficial da peça usinada. Também foram usados dois valores de dureza diferentes do material da peça: 200 HV e 300 HV, entretanto o primeiro foi mais utilizado nos experimentos. O valor do sinal de EA, gerado na usinagem das peças com dureza de 300 HV, foi entre 2 e 4 vezes maiores em comparação com o sinal gerado na usinagem das peças de dureza de 200 HV, conforme figura 10. Em conformidade com a literatura, o sinal aumentou com o desgaste de flanco e, após um longo comprimento de usinagem, quando surgiu o desgaste de cratera, houve a diminuição nos valores do sinal.

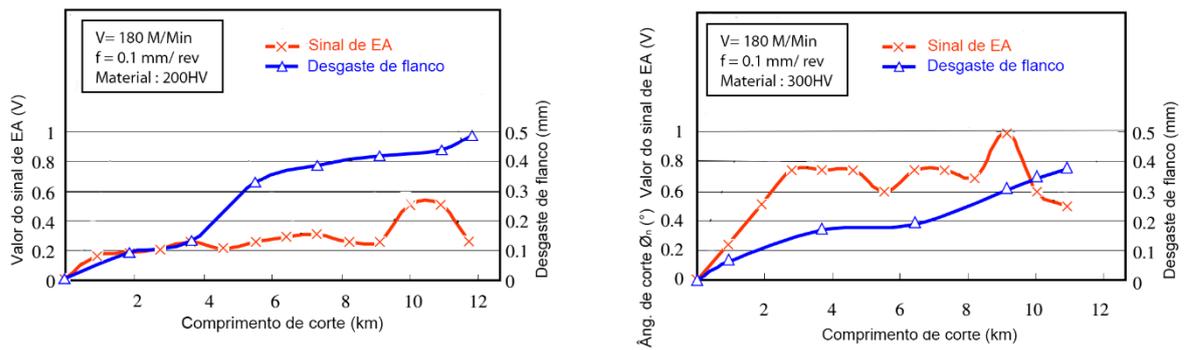


Figura 10 – Valores de emissão acústica – Adaptada – Hase *et al* (2013)

2.3.4 Monitoramento através da temperatura

A temperatura tem grande influência no processo de usinagem. O aumento de seu valor influencia diretamente nos mecanismos de desgaste da ferramenta como difusão, reações químicas e amolecimento térmico. A eficiência e a produtividade em operações de usinagem são, portanto, adversamente afetadas pela temperatura. O principal impedimento para a compreensão do comportamento térmico em usinagem é a incapacidade de medir temperaturas de forma consistente, com precisão e com altas resoluções (DAVIES *et al.*, 2007).

Com o aumento do atrito, causado pelo aumento da área de contato do par ferramenta-peça devido ao desgaste de flanco da ferramenta, a temperatura eleva-se no processo de usinagem. Consequentemente, pode-se utilizar esse fenômeno como método de monitoramento de desgaste da ferramenta (PIGARI, 1995).

Algumas técnicas de medição de temperatura são usuais, porém com limitações. Pode-se utilizar o termopar ferramenta-peça no torneamento o qual fornece uma resposta satisfatória, porém requer uma calibração para cada combinação de materiais da ferramenta e da peça, tornando inviável o seu uso no chão de fábrica. Outras técnicas muito comuns são: termopar embutido, termometria de resistência, sensores infravermelhos, técnicas metalográficas e termômetros de radiação. No entanto, há uma dificuldade para aplicar esses métodos de forma precisa e com alta resolução. Como exemplo, pode-se citar o emprego do termopar embutido, o qual necessita ficar o mais próximo possível da aresta de corte, fornecendo apenas um valor aproximado de temperatura. Outro exemplo é a utilização de sensores infravermelhos que têm uma boa resolução, porém são facilmente afetados pela temperatura do cavaco ou do fluido de corte (se houver) do processo (LI; WANG; CHU, 2013).

No caso do fresamento, torna-se ainda mais desafiante, obter medidas de temperatura do processo de usinagem. Estuda-se como empregar equipamentos para fazer esse tipo de medição. Mais comumente empregam-se termopares integrados, radiação direta ou taxa de radiação. No caso dos termopares integrados, sua adaptação é feita por meio de um anel deslizante, porém há complicações nas juntas auxiliares, como o contato entre inserto e suporte. O método da radiação direta é pouco empregado, pois, ao que parece, a montagem de um pirômetro sobre os eixos móveis da máquina ferramenta é caro e arriscado (DAVIES *et al.*, 2007).

Pujante *et al.* (2013) tornearam ligas de alumínio e concluíram que os mecanismos de desgaste são influenciados pela temperatura do processo. Em temperaturas abaixo de 150 °C, houve uma moderada abrasão e transferência de material da peça foi mínima e mesmo o material que aderiu à ferramenta foi desprendido no próprio processo. Entre 150 °C e 250 °C, os mecanismos de transferência de material foram mais ativos e houve uma maior aderência do alumínio à ferramenta. Acima de 350 °C surgiram óxidos semi-estáveis que motivaram severos desgastes por abrasão.

2.3.5 Monitoramento através do sinal de vibração

Quando um elemento de máquina tem suas características alteradas por desgaste ou trinca, há alteração de uma componente de frequência de vibração do sistema, alterando assim a sua forma de frequência global (GONDIM, 2008).

As vibrações que ocorrem durante a usinagem têm dois tipos distintos de origem, embora não sejam exclusivos. O primeiro tipo é a vibração originária do processo de corte, enquanto o outro tipo é a vibração originária de outras fontes como outras máquinas ou os elementos de máquina do próprio equipamento em análise. A vibração derivada da usinagem demonstra algumas características que são próprias do processo de corte, como por exemplo, o corte interrompido, a heterogeneidade do material da peça de trabalho etc. (TETI *et al.*, 2010).

Desgastes e quebras, bem como a variação de parâmetros de corte, geralmente causam desbalanceamento na rotação das ferramentas de corte, causando vibrações adicionais. Para a identificação da condição da ferramenta de corte, é essencial que sejam relacionados as variações do sinal de vibração com o defeito que se deseja identificar. Isso não é algo facilmente

realizável por causa da dificuldade de identificar as causas da vibração no sinal (ZHANG; CHEN, 2008).

A medição de vibrações tem a vantagem de uma simples implantação, devido à localização do acelerômetro que pode ser feita no eixo-árvore sem que seja necessário alterações na máquina ou na fixação da peça. Além do mais, não há alteração, durante o corte, nas vibrações nas direções axiais e radiais, mantendo-se, portanto, em uma frequência constante (JANTUNEN, 2002).

A fim de poder encontrar os indícios deixados pela variável que se deseja avaliar no sinal de vibração, algumas técnicas são aplicadas ao sinal. Meola (2005) propôs algumas dessas técnicas, as quais são classificadas em “Análise no Domínio do Tempo” e em “Análise Espectral”.

2.3.5.1 Técnicas de análise no domínio do tempo

2.3.5.1.1 Média no domínio do tempo (*Time Domain Average – TDA*):

- Consiste em fazer a média de um sinal periódico, de modo a se calcular os valores médios do sinal sobre um período. A equação 2 mostra sua representação matemática.

$$y(i\Delta t) = \frac{1}{N} \sum_{r=0}^{N-1} x(i\Delta t + rM\Delta t) \quad (2)$$

Onde:

- $y(i\Delta t)$: média dos períodos do sinal – TODA;
- $x(i\Delta t)$: sinal amostrado no domínio do tempo;
- N : número de períodos utilizados para média;
- M : número de pontos por período;
- T : comprimento finito do sinal no tempo.

Na prática, para se utilizar a TDA, faz-se necessário sincronizar os períodos do sinal a fim de que na execução da média não se atenuem componentes de frequência importantes do sinal (CUNHA JR; DUARTE, 2000). A TDA está representada esquematicamente na figura 11.

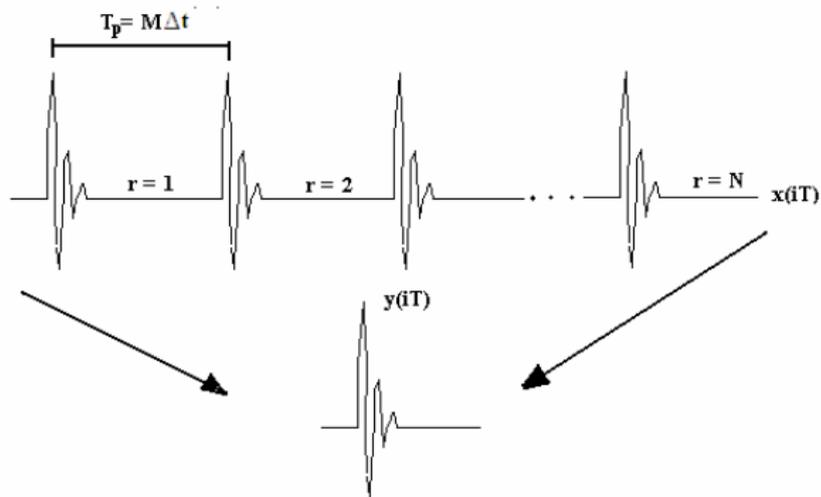


Figura 11 – Esquema da TDA – Meola (2005)

2.3.5.1.2 Quantificação do nível de vibração

A amplitude de vibração é a característica que descreve a sua severidade. Pode ser quantificada de diversas maneiras: valor de pico-a-pico, valor de pico, valor RMS e valor médio (NEPOMUCENO, 1989 *apud* MEOLA, 2005).

O valor de pico a pico indica a excursão máxima da onda. Trata-se, portanto da diferença entre o pico e o vale. É importante para definir quando um elemento de máquina atinge valores críticos, considerando máximas tensões ou folga mecânica, por exemplo.

Segundo Almeida (2007), o valor de pico é útil na medida de respostas dos sistemas a choques mecânicos. Leva em consideração apenas o valor máximo, sem levar em conta a cronologia da onda.

O valor de RMS para um sinal discreto, mostrado na equação 3, é o valor eficaz ou valor médio quadrático. Quantifica a energia que está diretamente ligada ao fenômeno estudado, indicando o poder destrutivo da vibração. Na manutenção preditiva, é utilizado como parâmetro global para determinação de níveis de alerta (ALMEIDA, 2007; MEOLA, 2005).

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2} \quad (3)$$

Onde x_i é o conjunto de valores do sinal discreto com N pontos dados.

O valor médio indica o deslocamento do sinal em relação à referência. Devido ao fato de vibrações serem, por definição, o estudo das oscilações em torno da posição de equilíbrio em um sistema mecânico, esse parâmetro não tem muita utilidade no monitoramento de vibração.

Cada um dos valores acima são representados na figura 12.

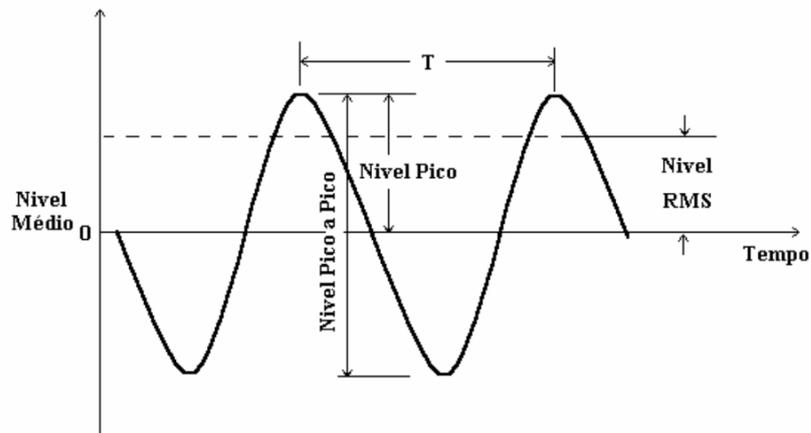


Figura 12 – Quantificação do sinal harmônico – Meola (2005)

2.3.5.1.3 Fator de Crista

Este parâmetro é a razão entre o valor do pico e o valor RMS da amostra. Ele indica o quão homogêneo é o sinal ao longo de um determinado período de tempo. Grandes valores indicam a presença de algum pico destacado no período (CUNHA, 2005). Observando-se a figura 13, pode-se concluir que a parte b tem um valor de fator de crista maior.

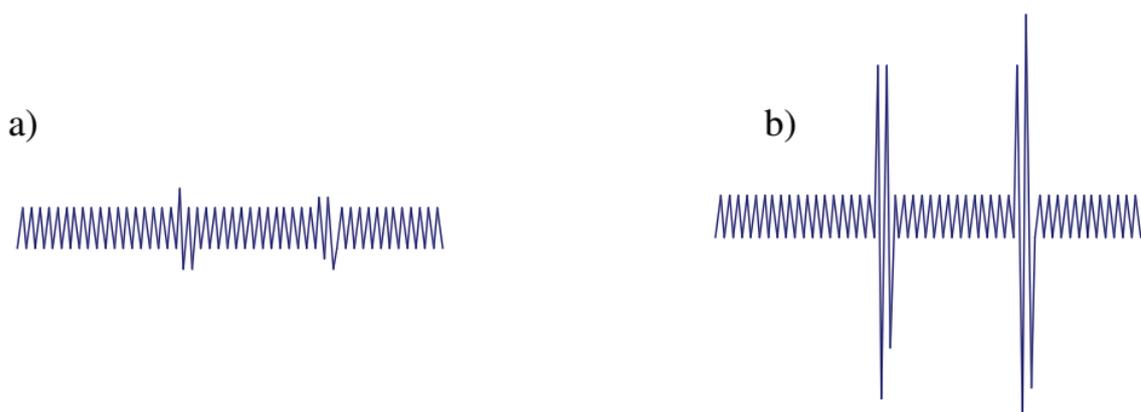


Figura 13 – a) Sinal homogêneo; b) Sinal com picos destacados – Santos (2008)

Segundo Meola (2005), quando há a presença de um determinado defeito moderado em um sistema dinâmico, o valor do fator de crista cresce. Porém quando o mesmo defeito torna-se severo, há uma queda no valor desse parâmetro, conforme a figura 14. Na usinagem, em

conformidade com a afirmação sobre os picos destacados, a tendência é que quando uma ferramenta está severamente desgastada, o sinal de vibração forneça valores de fator de crista menores, visto que, conforme foi mostrado por Wang *et al.* (2014), há mais picos destacados no sinal de uma ferramenta nova do que no sinal de vibração do fresamento com uma ferramenta desgastada, conforme figura 15.

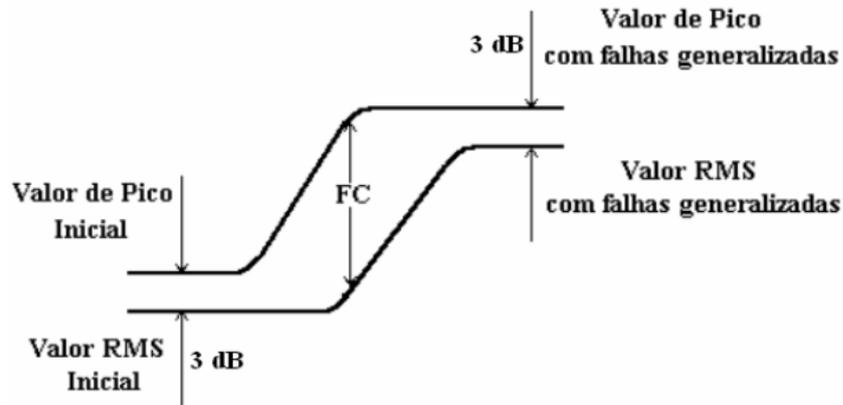


Figura 14 – Variação dos valores de Fator de Crista em função da variação dos valores de pico e RMS – Meola (2005)

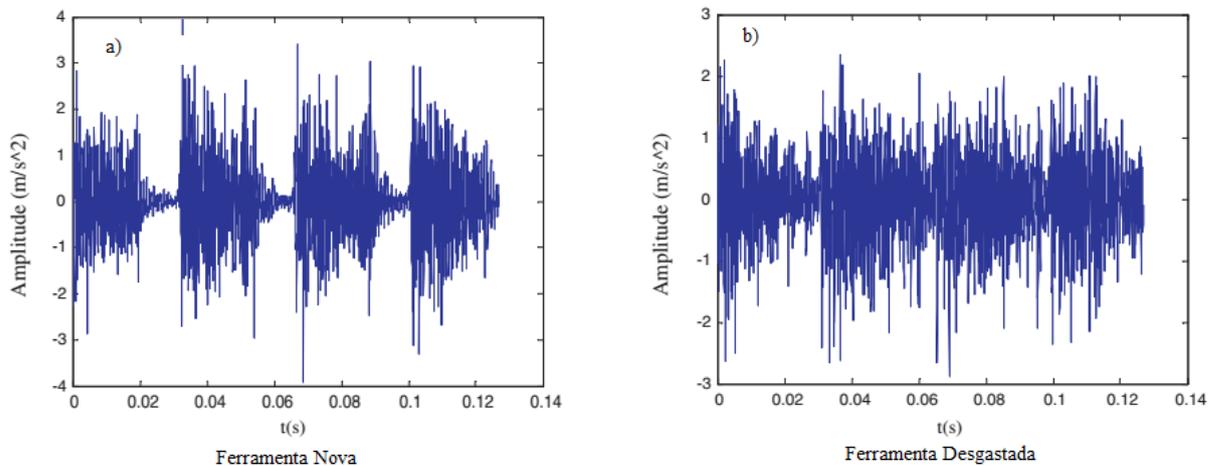


Figura 15 – Sinal no domínio do tempo. a) Ferramenta Nova; b) Ferramenta Desgastada – Adaptado de Wang *et al.* (2014)

2.3.5.1.4 Método da curtose

O fator de curtose (K) pode ser definido como a representação em número do grau de achatamento de uma distribuição, considerado, a priori, em relação à distribuição normal. Seu valor é definido pela equação 4.

$$K = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{i=N} \frac{(x_i - \bar{x})^4}{\sigma^4} \quad (4)$$

Onde x_i é a amplitude instantânea do sinal de vibração, \bar{x} é a média do sinal de vibração, σ é o desvio padrão do sinal e N é o tamanho amostral.

Os valores da curtose variam de acordo com a dispersão dos dados e sua variação é representada na figura 16.

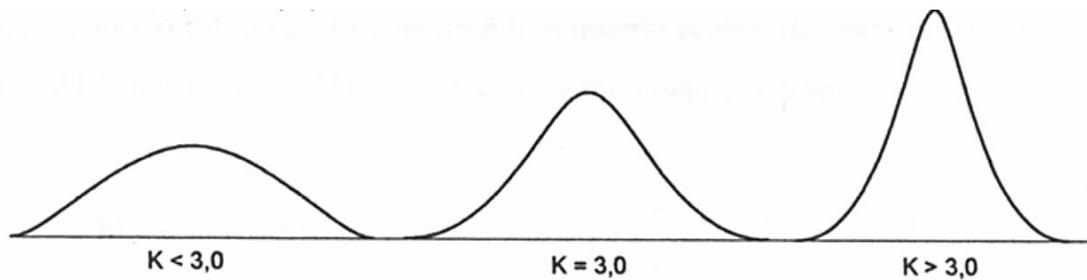


Figura 16 – Valores de curtose de acordo com o achatamento da curva de distribuição – Adaptado de Macário (2006)

Segundo El-Wardany; Gao; Elbestawi (1996), em um sinal de vibração, o valor da curtose independe da amplitude ou da frequência do sinal, porém, para um determinado nível de amplitude, ao surgir um certo pico, quanto maior a razão entre esse pico e o valor de amplitude médio, maior a curtose. Para esse mesmo nível de amplitude, à medida que se aumenta o número de picos, menor torna-se o valor da curtose, conforme a figura 17.

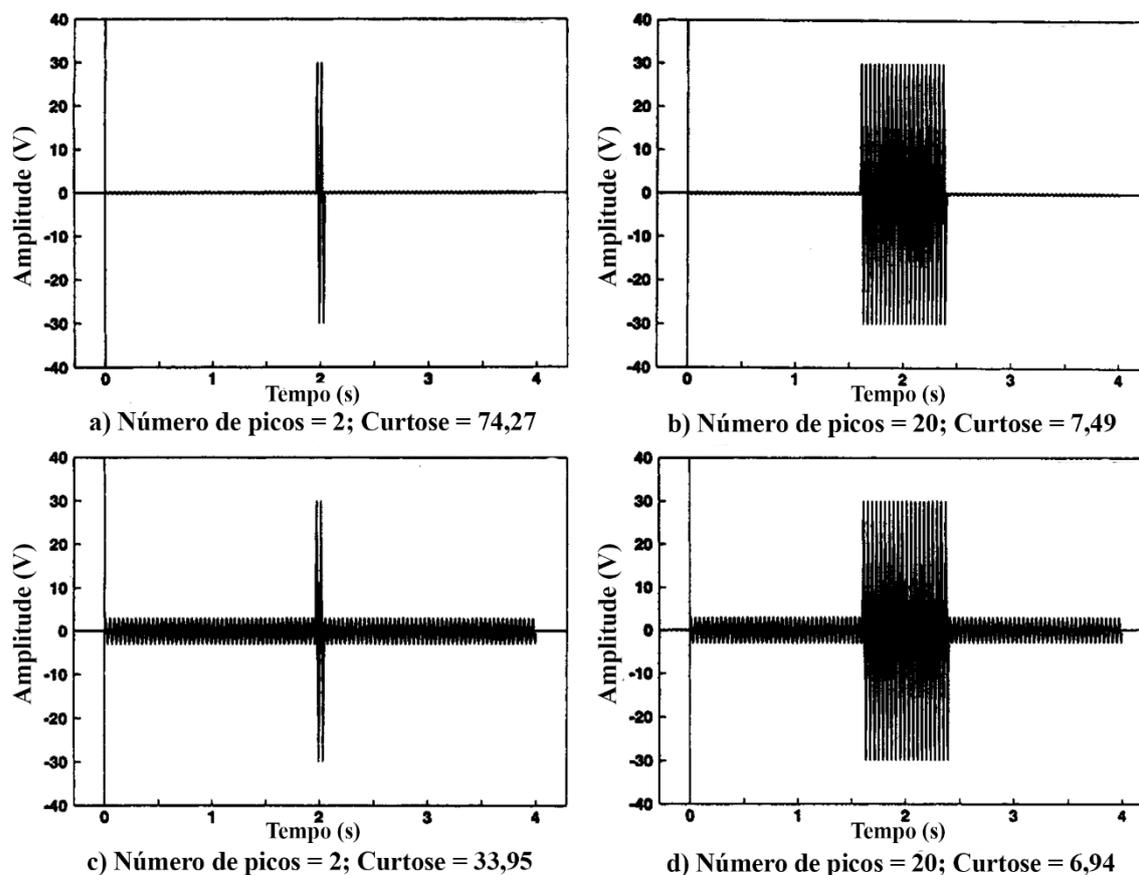


Figura 17 – Quantificação do sinal harmônico – El-Wardany; Gao; Elbestawi (1996)

Esse aumento no valor da curtose ocorre devido ao surgimento de modificações instantâneas no sinal. Dessa forma o fator de curtose é utilizado, geralmente, para identificar se há presença de informações transientes no sinal (LIU *et al.*, 2011).

2.3.5.2 Técnicas de análise espectral

Dentre as principais técnicas de análise espectral, pode-se citar a Transformada Rápida de Fourier (*Fast Fourier Transformer* – FFT), a Transformada de Hilbert, o Método de Cepstrum, a Análise de Ordem e a Técnica do envelope. Como neste trabalho, a análise espectral foi realizada apenas com a FFT, esta técnica é a única detalhada logo mais.

De uma forma geral, o comportamento das perturbações em máquinas é periódico. Isso se deve à alternância e limitação do movimento. Para casos como esses, a função periódica pode ser representada por uma série de Fourier, a qual é definida como uma expansão de uma função ou representação de uma função em uma série de senos e cossenos, representada na equação 5 (ARFKEN; WEBER, 2007; MEOLA, 2005).

$$x(t) = \frac{A_0}{2} + \sum_{i=1}^{\infty} A_i \cos\left(\frac{2\pi i}{T}t\right) + \sum_{i=1}^{\infty} B_i \operatorname{sen}\left(\frac{2\pi i}{T}t\right) \quad (5)$$

Onde A_0 é o nível médio do sinal, A_i (equação 6) e B_i (equação 7) são os coeficientes de Fourier.

$$A_i = \frac{2}{T} \int_0^T x(t) \cos\left(\frac{2\pi i}{T}t\right) dt \quad (6)$$

$$B_i = \frac{2}{T} \int_0^T x(t) \operatorname{sen}\left(\frac{2\pi i}{T}t\right) dt \quad (7)$$

Expressando os senos e cossenos da equação 5 em forma exponencial, esta mesma equação pode ser reescrita

$$x(t) = \frac{A_0}{2} + \sum_{i=0}^{\infty} C_i e^{j\left(\frac{2\pi i}{T}t + \phi_i\right)} \quad (8)$$

Onde:

$$C_i = \sqrt{(A_i)^2 + (B_i)^2}; \quad \phi_i = \tan^{-1}\left(\frac{B_i}{A_i}\right) \quad e \quad j = \sqrt{-1} \quad (9)$$

O gráfico gerado após essa ferramenta matemática ser aplicada é denominado espectro de frequência. Na figura 18, encontra-se a representação de um sinal no domínio do tempo e seu respectivo espectro de frequências em um processo de fresamento.

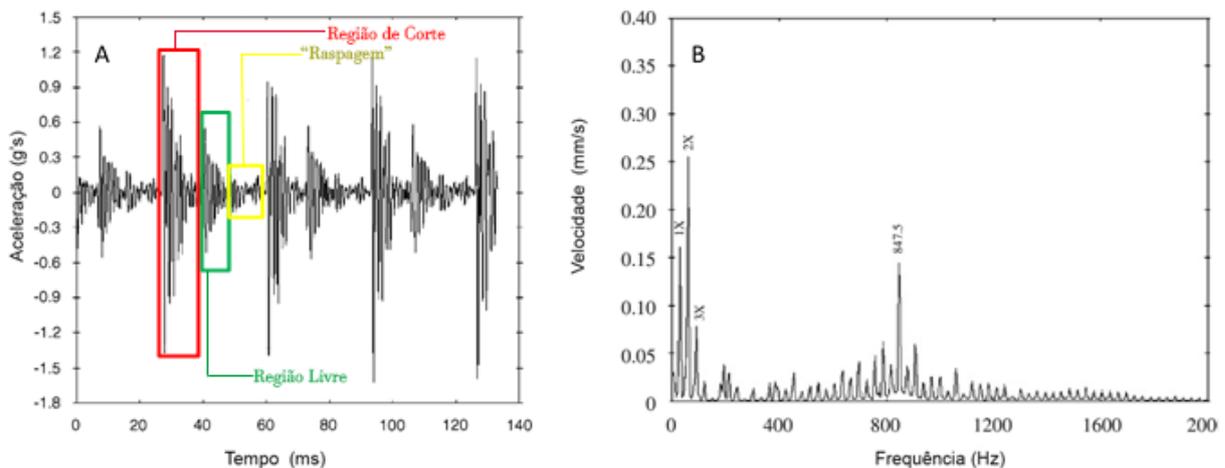


Figura 18 – A) Sinal de um processo de fresamento no domínio do tempo; B) Espectro de frequência do sinal – Adaptado de Orhan *et al.* (2007)

Orhan *et al.* (2007) classificaram algumas regiões do sinal no domínio do tempo de um fresamento em corte discordante. São elas: região de corte, região livre e região de contato entre a peça e a fresa sem que ocorra o corte (raspagem). Tais regiões são mostradas no sinal, respectivamente pelas regiões envoltas pelos retângulos vermelho, verde e amarelo da figura 18a. As distâncias entre os maiores picos demonstram o período de entrada de ferramenta na peça o qual é o inverso de uma das frequências apresentadas no espectro (1x). As demais frequências apresentadas (2x, 3x, etc.) são múltiplas da frequência de entrada de ferramenta na peça, conforme figura 18b.

A aplicação da FFT, portanto, pode ajudar a distinguir as vibrações de usinagem geradas em diferentes bandas de frequência, o que pode ser causado por desequilíbrios oriundos de quebras ou desgastes de ferramentas e se apresentam como um pico específico de uma determinada frequência distinto dos demais. Utilizando esse princípio para diagnosticar falhas de ferramentas, é possível que se monitore a condição da ferramenta enquanto se executa a usinagem (ZHANG; CHEN, 2008)

2.3.5.3 Resultados obtidos na literatura

Ainda que se tenham alguns trabalhos referentes ao tema, ainda não há uma consolidação desse tipo de análise. Isso se deve, em parte, à dificuldade em se definir um modelo dinâmico que represente o sistema com certo grau de confiança. Alguns desses trabalhos serão descritos a seguir.

Bonifácio (1993) torneou, em condições de acabamento, peças de aço AISI 4340. Comparou o desgaste da ferramenta com o sinal de vibração e com a rugosidade do corpo de prova. Essas duas variáveis de saída mostraram comportamentos semelhantes a partir do momento no qual a ferramenta está próxima do seu fim de vida, indicado pela aceleração do desgaste de flanco. Constatou-se que o valor absoluto da vibração não indicava o momento de troca de ferramenta, mas a mudança brusca do sinal. Também foi aplicado uma FFT ao sinal de vibração, o que não levou a nenhuma conclusão clara com a qual se pudesse relacionar alguma faixa de frequência específica com o desgaste da ferramenta.

Miko e Nowakowski (2012) facearam um corpo de prova de aço C45 na operação de fresamento. Constatou-se que o sinal de vibração extraído da operação de usinagem pode fornecer informações acerca do processo como um todo, embora, a priori, não se tenha detalhado o sinal. Pode-se perceber, na figura 19, características da movimentação da ferramenta, como o seu posicionamento, o início do corte e a sequência do corte ao longo da peça (região de maior amplitude). Os autores concluíram que o sinal de vibração do fresamento é um sinal periódico distorcido que depende da rotação da ferramenta e das entradas e saídas das arestas de corte da peça.

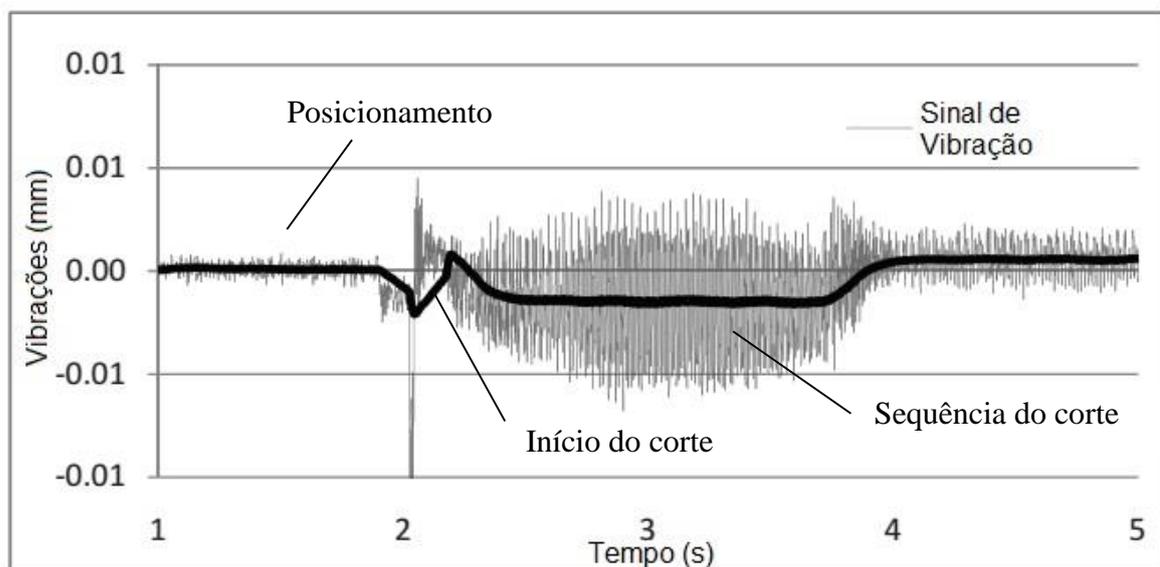


Figura 19 – Sinal de vibração no domínio do tempo – Adaptado de Miko e Nowakowski (2012)

Orhan *et al.* (2007) investigaram a relação entre o desgaste de uma fresa com insertos de CBN e o sinal de vibração da usinagem do aço AISI D3. Foi aplicado ao sinal de vibração

uma FFT e constatou-se que as frequências mais sensíveis ao desgaste foram justamente as múltiplas da frequência de entrada de ferramenta na peça (1x, 2x, 3x e assim por diante). A amplitude dessas frequências que foi levada em consideração foi o pico do espectro. Constatou-se que à medida que o desgaste de flanco crescia, a amplitudes dessas frequências também cresciam. A figura 20 ilustra como o espectro de frequência caracteriza o desgaste da ferramenta.

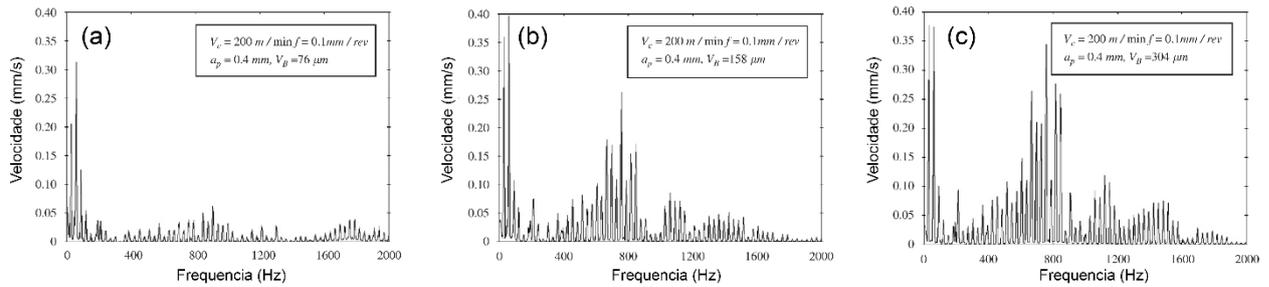


Figura 20 – Espectro de frequência de fresamento com (a) ferramenta nova; (b) semidesgastada; (c) desgastada – Adaptado de Orhan *et al.* (2007)

Os valores extraído da figura 20 foram plotados em um gráfico comparando-se diretamente o valor de amplitude do pico com o valor de desgaste de flanco médio. Esse gráfico está representado na figura 21.

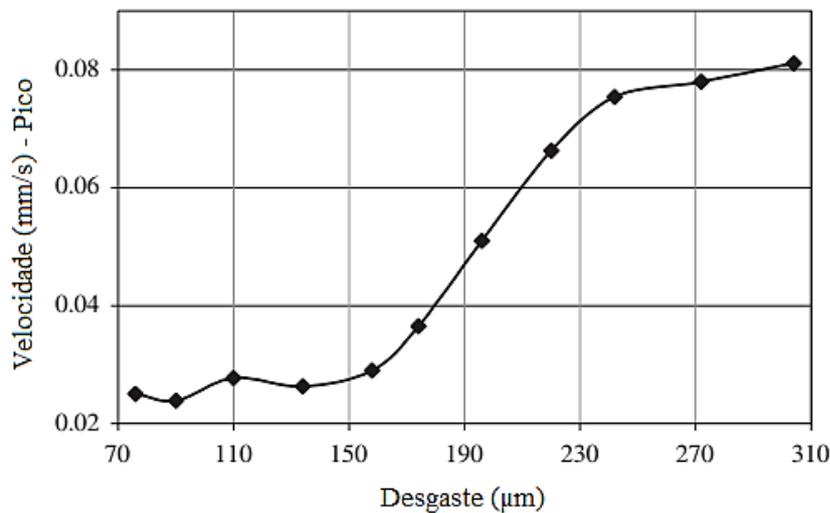


Figura 21 – Relação entre amplitude e desgaste – Adaptado de Orhan *et al.* (2007)

Zhang e Chen (2008) utilizaram fresas de topo, variando o número de arestas destas, a rotação das ferramentas e a velocidade de avanço. A profundidade de corte foi constante para todos os experimentos. O sinal de vibração foi captado por um acelerômetro triaxial e os resultados apresentados no domínio do tempo e da frequência. No domínio do tempo observou-se um aumento na amplitude da vibração com o desgaste da ferramenta. O sinal no domínio da

frequência foi obtido aplicando-se uma FFT. O sinal do processo com a ferramenta desgastada apresentou um pico na frequência aproximadamente igual à frequência de rotação da ferramenta nas direções X e Y, conforme figura 22. A direção Z não mostrou uma diferença consistente no sinal que pudesse ser utilizada para classificação do estado de ferramenta.

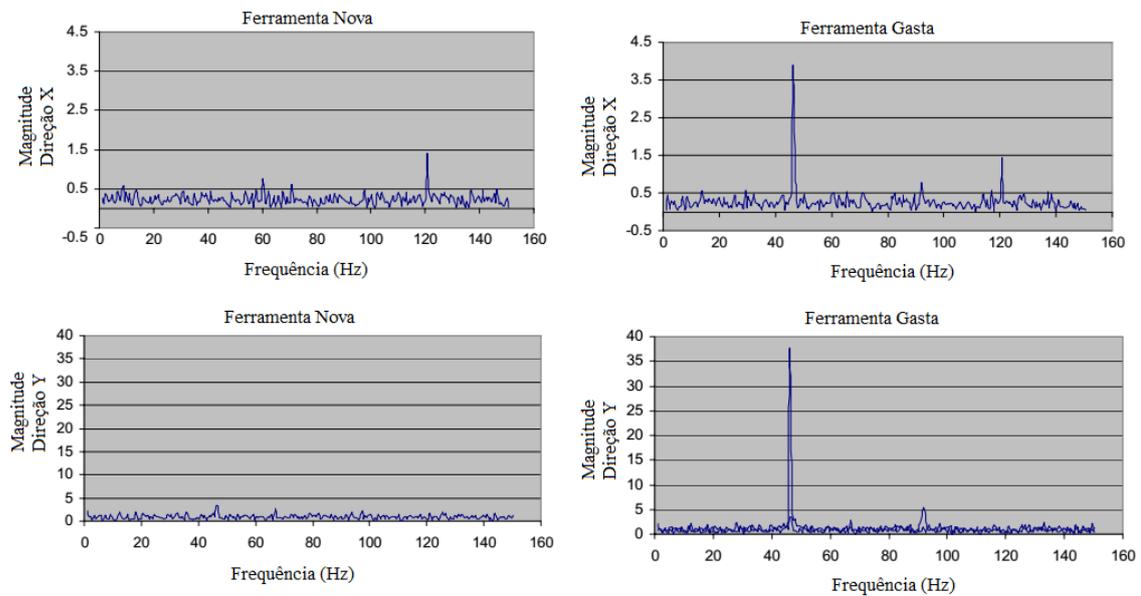


Figura 22 – Sinal no domínio da frequência de ferramentas novas e gastas – adaptado de Zhang e Chen (2008)

Maia (2009) fresou aço 4140 tanto com corte concordante quanto com corte discordante. Houve dificuldade em se determinar uma relação entre a amplitude do espectro de frequências e o desgaste da ferramenta. Em alguns casos, a amplitude aumentou com o aumento do desgaste. Tal fato, certamente ocorreu devido aos valores de desgaste estarem muito próximos. Do mesmo modo, a RMS do sinal de vibração também não indicou bem, para as mesmas condições, o desgaste da ferramenta.

Venkata Rao; Murthy e Mohan Rao (2013) realizaram um torneamento interno de um corpo de prova de aço AISI 1040. Constatou-se que a RMS aumentou com o desgaste das ferramentas. Além disso, observou-se um crescimento na amplitude do sinal tanto no domínio do tempo quanto no domínio da frequência, quando o desgaste da ferramenta crescia, vide figura 23.

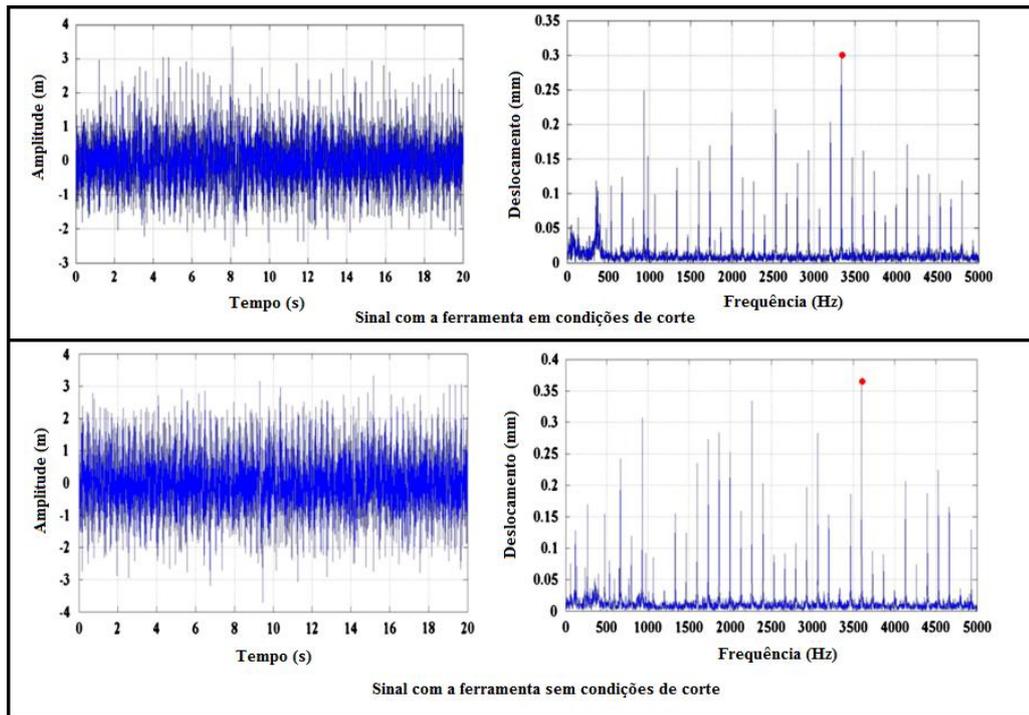


Figura 23 –Sinal no domínio do tempo e da frequência para ferramentas em condição de corte e após atingir falha – adaptado de Venkata Rao; Murthy e Mohan Rao (2013)

C. K. Madhusudana; Kumar e Narendranath (2016) fresaram um aço liga 42CrMo4 com insertos de metal duro e parâmetros de corte constantes. Foram considerados três tipos de falha: desgaste de flanco, quebra e lascamento. Além desses três tipos, foram realizados experimentos com ferramentas novas. Ao realizar-se a comparação entre cada um dos tipos de falha utilizando o sinal de vibração no domínio do tempo, não foi possível chegar a qualquer conclusão. Plotou-se, então um histograma com esses mesmos dados, mostrado na figura 24. O objetivo da utilização do histograma foi investigar quais barras poderiam ter características pertencentes a apenas um dos tipos de falha. A utilização do histograma mostrou diferenças entre cada uma das condições de corte, alcançando sucesso em mais de 90% dos casos, para algumas características extraídas do gráfico.

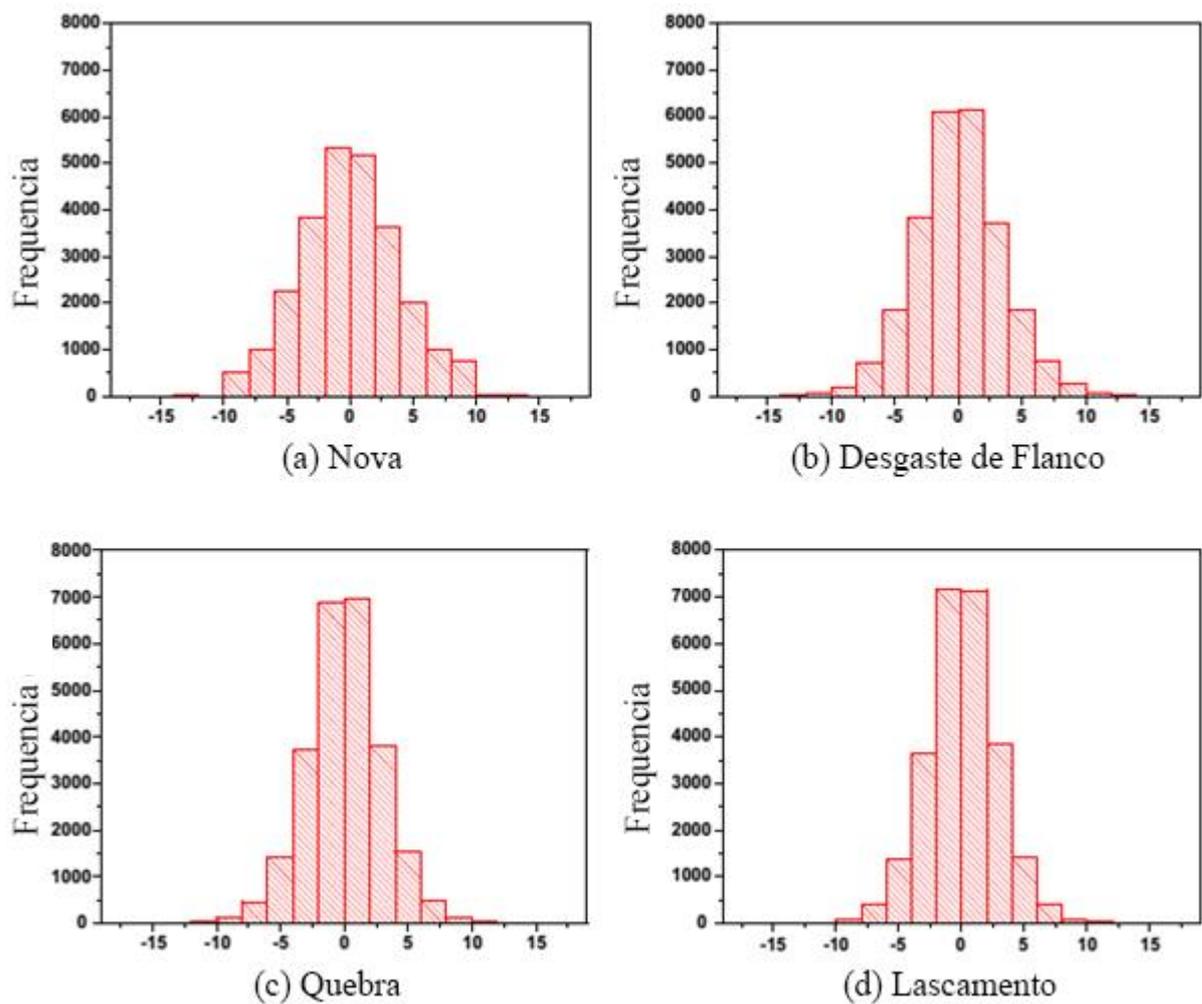


Figura 24 – Histograma dos pontos do sinal de vibração para diferentes condições da ferramenta de corte

Apesar de haver resultados que relacionem o sinal de vibração com o desgaste da ferramenta, ainda há algumas lacunas existentes dentro desse campo da metal-mecânica. A variação de parâmetros de corte, do tipo da ferramenta, do material usinado, dentre outros, influenciam no resultado final obtido, dificultando que o assunto se consolide dentro do meio acadêmico e que seja efetivamente empregado dentro da indústria.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Baseado no objetivo geral deste trabalho que é contribuir na utilização do sinal de vibração para o monitoramento da evolução do desgaste da ferramenta e, por conseguinte, determinar o momento ideal de sua troca no processo de fresamento do aço AISI 4340, realizou-se a análise do comportamento do sinal de vibração de usinagem utilizando ferramentas novas e gastas. O estudo foi realizado no Laboratório de Manufatura da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN).

3.1 MÁQUINA-FERRAMENTA

Os experimentos foram realizados no Centro de usinagem vertical Romi D600, equipado com comando numérico GE Fanuc Oi-MC, representado na figura 25. Suas principais características operacionais foram apresentadas na tabela 1.



Figura 25 – Centro de usinagem Romi D600

Tabela1 – Características do Centro de usinagem ROMI D600

Descrição	Característica
Máxima rotação	10000 rpm
Cursos X/Y/Z	600/530/580 mm
Superfície da mesa	840 x 500 mm
Massa admissível	800 kg
Capacidade do magazine	20 ferramentas
Diâmetro máximo de ferramenta	80 mm
Potência	15 kW (20 cv)

3.2 FERRAMENTA DE CORTE

A usinagem do material foi realizada por uma fresa de 50 mm de diâmetro da marca Sandvik Coromant. A fresa é composta de duas partes principais: o suporte e os insertos intercambiáveis. No caso em questão o suporte é especificado como R290-050Q22-12M com capacidade para 4 insertos. Os insertos, de metal duro, são especificados como R290.90-12T320M-PM. A montagem da ferramenta foi feita com apenas dois insertos de forma que ficassem dispostos alinhados diametralmente. Isso garantiu, como será visto mais a frente, que apenas um inserto realizasse o corte por vez. A ferramenta completa (suporte com insertos) é mostrada na figura 26.



Figura 26 – Fresa utilizada nos experimentos

3.3 CORPOS DE PROVA

Os corpos de prova utilizados nos experimentos foram de aço AISI 4340 com dureza de 229 HB e composição química apresentada na tabela 2.

Tabela 2 - Composição química do aço AISI 4340 utilizado nos experimentos

Composição Química, %							
C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	P	S
0,420	0,780	0,015	0,900	1,850	0,240	0,016	0,014

Este material é utilizado na fabricação de componentes para sistemas mecânicos, principalmente estruturais. Suas principais aplicações são: eixos, engrenagens, engrenagens planetárias, colunas, mangas, cilindros, bielas, virabrequins, etc. É comumente utilizado para a fabricação de peças na indústria automotiva, aeroespacial, na construção naval e na fabricação de máquinas e equipamentos para a indústria petrolífera.

Geometricamente, cada corpo de prova consistiu em um paralelepípedo com dimensões de 45 x 95 x 100 mm. A altura de 100 mm decrescia à medida que o material ia sendo removido. Sua fixação na máquina foi realizada através de uma morsa mecânico- hidráulica a qual prendia 20 mm da altura da peça na sua lateral. A cada volta dada na morsa (já na sua fase hidráulica), obtinha-se uma carga compressiva no corpo de prova de 1 tonelada, sendo dadas 2 voltas para a fixação da peça. O corpo de prova com seu respectivo sistema de fixação estão representados na figura 27.



Figura 27 – Corpo de prova utilizado nos ensaios e seu respectivo sistema de fixação

3.4 PROCESSO DE USINAGEM

O corpo de prova foi totalmente faceado, porém em dois estágios de corte. Primeiramente realizou-se o corte concordante com profundidade lateral (a_e) de 20 mm e avanço por dente (f_z) de 0,1 mm/dente. Nesse estágio foi gerada a face de cor vermelha da figura 28, sendo, então o momento em que o sinal de vibração do processo foi coletado. Para o completo faceamento do corpo de prova, realizou-se mais um corte, removendo-se todo o material restante de uma única vez.

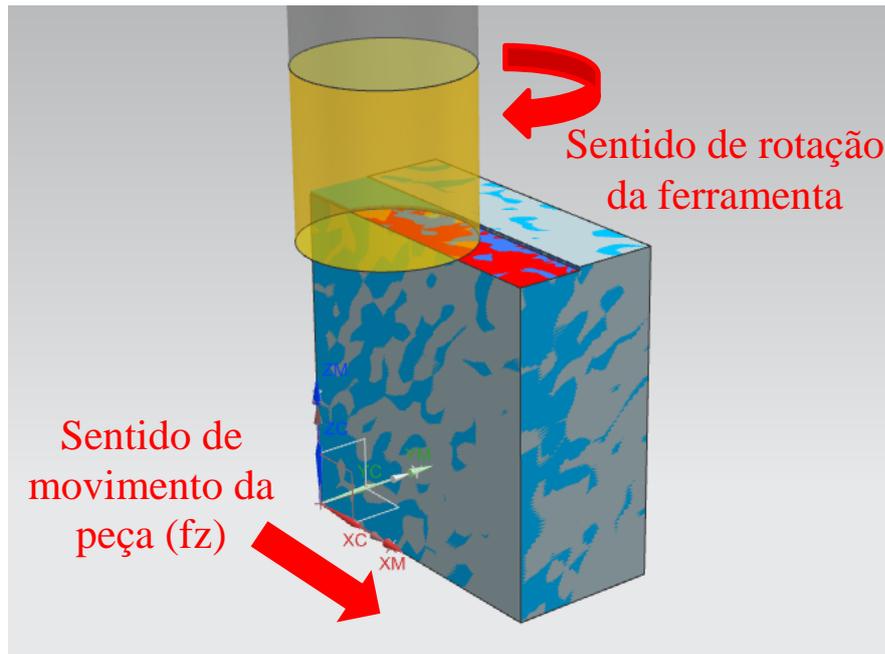


Figura 28 – Primeiro estágio do faceamento do corpo de prova

A entrada da ferramenta na peça foi feita de forma reta. Como o corte é concordante, seu início ocorreu com espessura máxima de cavaco. No fim da região de corte, por essa espessura chegar ao seu valor mínimo, há uma deformação do material até que o contato é finalizado. A isto denomina-se de fase ativa de corte (região vermelha da figura 29). Quando a ferramenta passa a ter apenas contato axial com a peça, perdendo o contato até que reinicie o corte, chama-se fase inativa de corte (região azul da figura 29). Nessa região, pode-se observar duas partes distintas: na primeira há contato da ferramenta com a peça, como que uma raspagem, na segunda não há contato da aresta de corte com a peça.

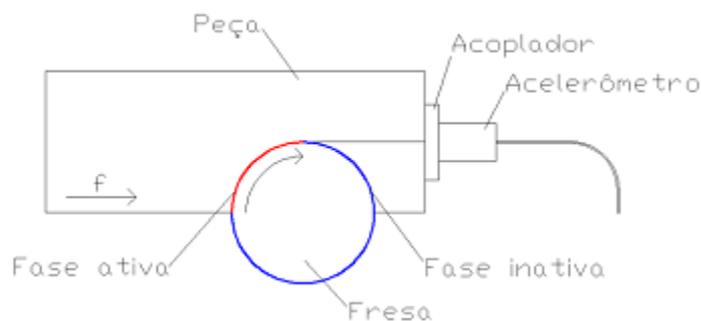


Figura 29 – fases ativa e inativa do fresamento

Para definição dos parâmetros de usinagem utilizados nos experimentos, estabeleceu-se duas condições de corte: desbaste e acabamento. Variou-se a velocidade de corte (v_c) e a profundidade de corte (a_p). Baseando-se na literatura de fresamento do aço AISI 4340 e no

catálogo do fabricante da ferramenta, os valores de velocidade estabelecidos foram, portanto, 175 m/min e 230 m/min (CHAKRABORTY *et al.*, 2008; SANDVIK, 2011). Tais valores associados, respectivamente, aos valores de 1,0 mm e 0,1 mm para o a_p , formaram as condições de desbaste e acabamento, conforme tabela 3.

Tabela 3 – Variação das condições de corte

<i>Parâmetro</i> <i>Condição de corte</i>	<i>Velocidade de corte</i> <i>(m/min)</i>	<i>Profundidade de corte</i> <i>(mm)</i>
<i>Desbaste</i>	175	1,0
<i>Acabamento</i>	230	0,1

No que se refere ao desgaste da ferramenta, foi tomada como referência a norma ISO 8688-1 (1989) que estabelece como critério de fim de vida da ferramenta um desgaste de flanco médio (VB_B) de 0,35 mm. Como, deseja-se relacionar o sinal de vibração com o desgaste da ferramenta, de acordo com a norma, o estado da ferramenta foi dividido em dois: boa (com $VB_B < 0,35\text{mm}$) e gasta (com $VB_B > 0,35\text{mm}$).

O desgaste da ferramenta era medido a cada 5 passadas que eram dadas na peça. Para isso, utilizou-se microscópio digital, modelo BW1008-500x, montado em um suporte para relógio apalpador, modelo TGL 15043, da fabricante Ausjena. A imagem era então processada em um microcomputador através do programa Micro-mensure, versão 1.2.

A realização dos experimentos iniciava-se com a medição do desgaste da ferramenta. De acordo com o valor obtido, definia-se o seu estado e, conforme o planejamento experimental definia-se também a condição de corte. Então o experimento era realizado. A aquisição do sinal ocorria, como explicado anteriormente, na primeira parte do corte, sendo o restante do material removido posteriormente para completar o faceamento. Caso a ferramenta estivesse na condição boa, repetia-se esse procedimento (sem aquisição de sinal) por mais quatro vezes. Com isso realizava-se uma nova medida do desgaste e repetia-se o processo. O resumo desse procedimento encontra-se na figura 30.

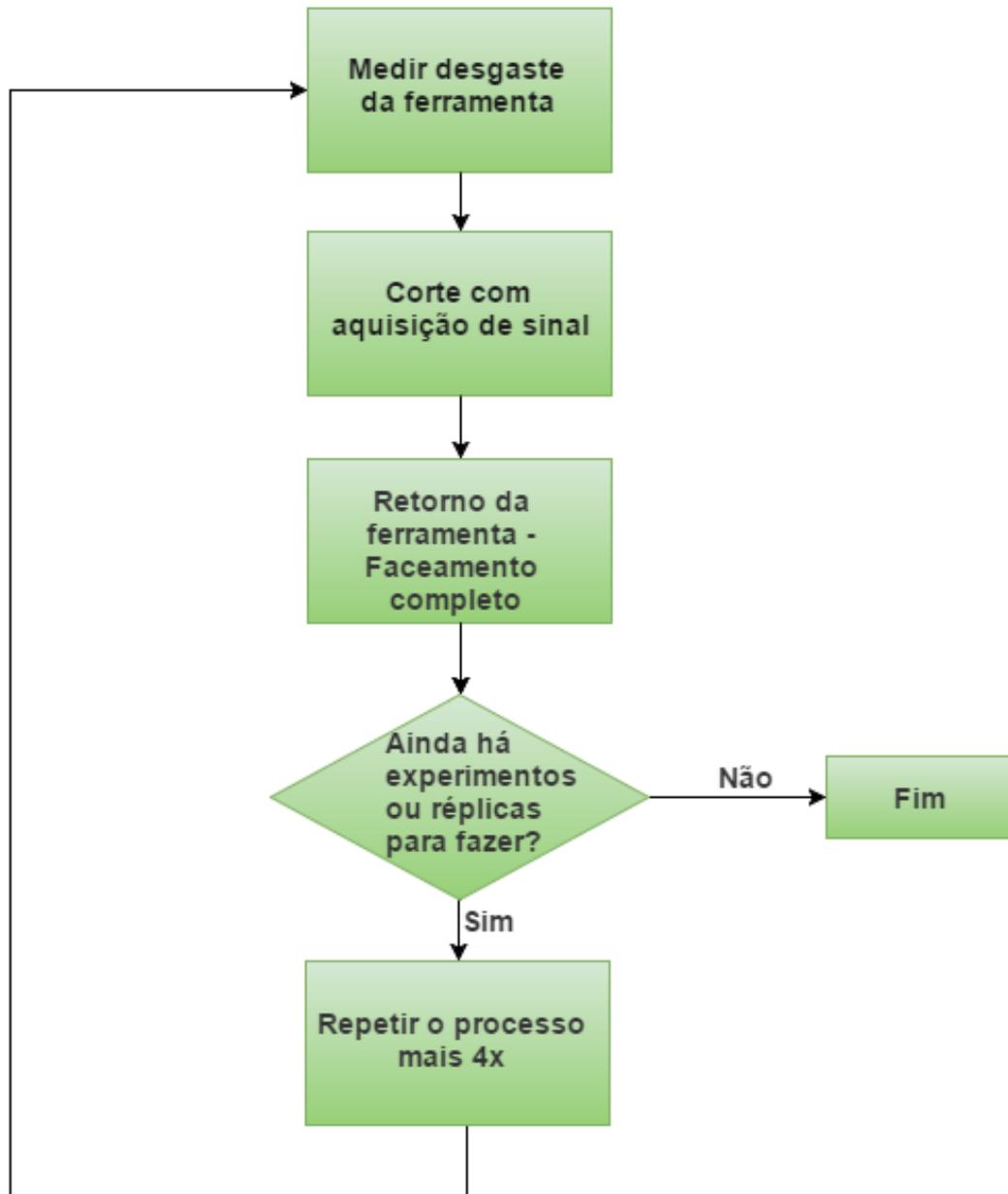


Figura 30 – Sequência de realização de experimentos

3.5 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

Para os experimentos, foi realizado um planejamento fatorial, no qual os fatores avaliados no processo são variados conjuntamente. Determinou-se, então, que dois fatores seriam variados, com dois níveis cada: condição de corte e estado da ferramenta.

Como descrito anteriormente, a condição de corte se divide em condição de desbaste e condição de acabamento. A primeira com velocidade de corte de 175 m/min e profundidade de corte de 1,0 mm; a segunda com velocidade de corte de 230 m/min e profundidade de corte de 0,1 mm. Ambas tem avanço por dente de 0,1 mm/dente.

No caso do estado do desgaste da ferramenta, definiu-se que a mesma seria classificada em boa e em gasta, de acordo com a norma ISO 8688-1 (1989) a qual define a ferramenta com desgaste de flanco médio superior a 0,35 mm como já tendo atingido o fim de vida útil. Além disso, caso a ferramenta sofresse uma falha catastrófica, sua classificação também era de ferramenta gasta.

O planejamento experimental foi realizado com o auxílio do software Minitab, e dividiu-se em 4 experimentos, descritos mais detalhadamente na tabela 4.

Tabela 4 – Planejamento experimental

<i>Experimento</i>	Condição de corte	Estado da ferramenta
<i>1</i>	Desbaste	Boa
<i>2</i>	Acabamento	Boa
<i>3</i>	Desbaste	Gasta
<i>4</i>	Acabamento	Gasta

3.6 SISTEMA DE AQUISIÇÃO

Para aquisição de sinais de vibração, utilizou-se acelerômetro piezoelétrico uniaxial modelo IEPE B&K 4514, apresentado na figura 31, que transforma os sinais de vibração em sinais de voltagem, permitindo que se realize a leitura destes pontos através do computador. Este transdutor compreende a faixa de frequência de 1 Hz a 10 kHz.



Figura 31 – Acelerômetro IEPE B&K 4514

Para interligar o acelerômetro ao computador e converter o sinal obtido em sinal digital, foram utilizados o módulo condicionador de sinal e conversor analógico digital NI 9234 e o

chassi NI cDaq-9178, ambos da marca National Instruments, representados na figura 32. A aquisição, o armazenamento e a análise dos dados foram realizados através do programa Labview®.



Figura 32 – Módulo condicionador de sinais e Chassi

O sistema de aquisição de dados é a parte do sistema que está ligada diretamente ao transdutor, juntamente com o algoritmo existente para processar o sinal vindo deste. A aquisição acontece durante o processo de usinagem onde se faz a leitura dos dados tanto brutos, quanto filtrados com um filtro passa-banda com frequência baixa de 30 Hz e frequência alta de 3,0 kHz, baseado em Cho; Binsaeid e Asfour (2009). O esquema de todo o sistema de aquisição é graficamente representado na figura 33.

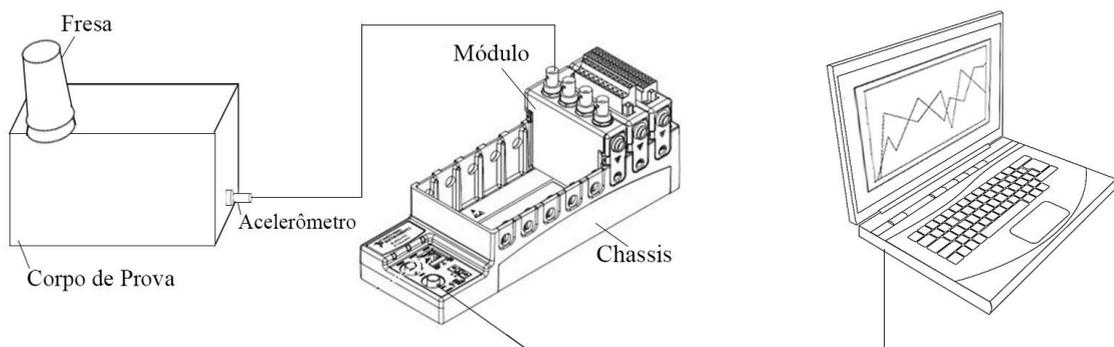


Figura 33 – Esquema gráfico do sistema de aquisição

3.7 PROCESSAMENTO DO SINAL

Em primeiro lugar, realizou-se uma comparação do sinal no domínio do tempo bruto com o mesmo sinal filtrado. Isso ocorre de duas formas distintas: considerando todo o sinal (aproximação da ferramenta da peça, início do corte e sequência de corte), bem como

considerando uma porção do sinal de forma detalhada a fim de se analisar as características do corte que o sinal de vibração pode fornecer.

Além disso, aplicou-se a uma FFT a uma porção do sinal de 3s da região próxima ao ponto médio do percurso da ferramenta. O sinal no domínio da frequência foi dividido em bandas que possam apresentar comportamentos semelhantes no decorrer dos experimentos. Uma das bandas analisadas foi entre 30 Hz e 700 Hz, de acordo com Maia (2009).

Para comparar o nível de vibração com o desgaste, foram utilizados os seguintes parâmetros estatísticos, os quais foram explicados no Capítulo 2:

- RMS;
- Pico;
- Curtose;
- Fator de Crista.

Com isso, pôde-se estabelecer uma relação direta do parâmetro com o desgaste ao fazer uma comparação entre experimentos com as mesmas condições de corte e diferentes estados de ferramentas.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Pôde-se observar que o sinal de vibração gerado tem duas de características distintas, aqui classificadas como: macrocaracterística e microcaracterística do sinal de vibração. A primeira não nos permite observar detalhes acerca do processo de usinagem em si, demonstrando apenas o início e o fim do processo, bem como uma variação de amplitude que ocorre ao longo de todo o processo de corte. Na figura 34, encontram-se os gráficos dos sinais completos bruto e filtrado, respectivamente, de uma das réplicas do experimento 1, enquanto na figura 35, encontram-se os mesmos gráficos, só que ampliados, exibindo o período de 1s de fresamento.

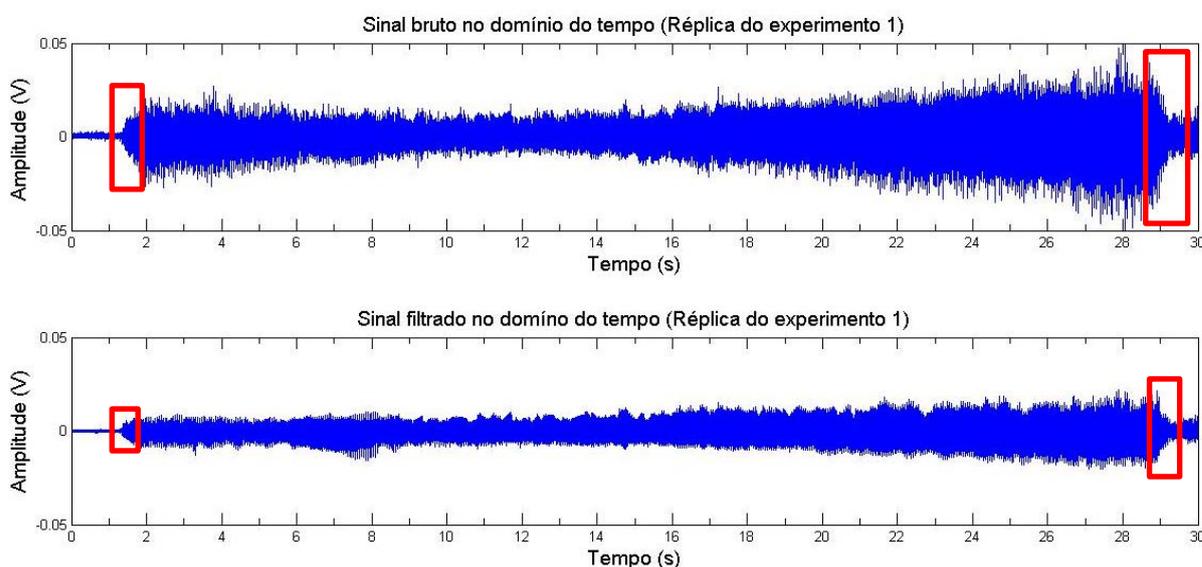


Figura 34 – Gráficos completos no domínio do tempo do sinal bruto (acima) e filtrado (abaixo) de uma réplica do experimento 1

Em primeiro lugar, ao observar a figura 34, percebe-se dois pontos específicos, comuns para ambos os sinais, que são o início e o fim do processo de fresamento. Tais pontos estão identificados por um retângulo vermelho. Outra característica apresentada é o crescimento do sinal à medida que o tempo cresce. Este último fato, certamente ocorre em decorrência do corte ocorrer cada vez mais distante do ponto de localização do acelerômetro, o que gera deflexões maiores no corpo de prova, gerando portanto amplitudes maiores de vibração.

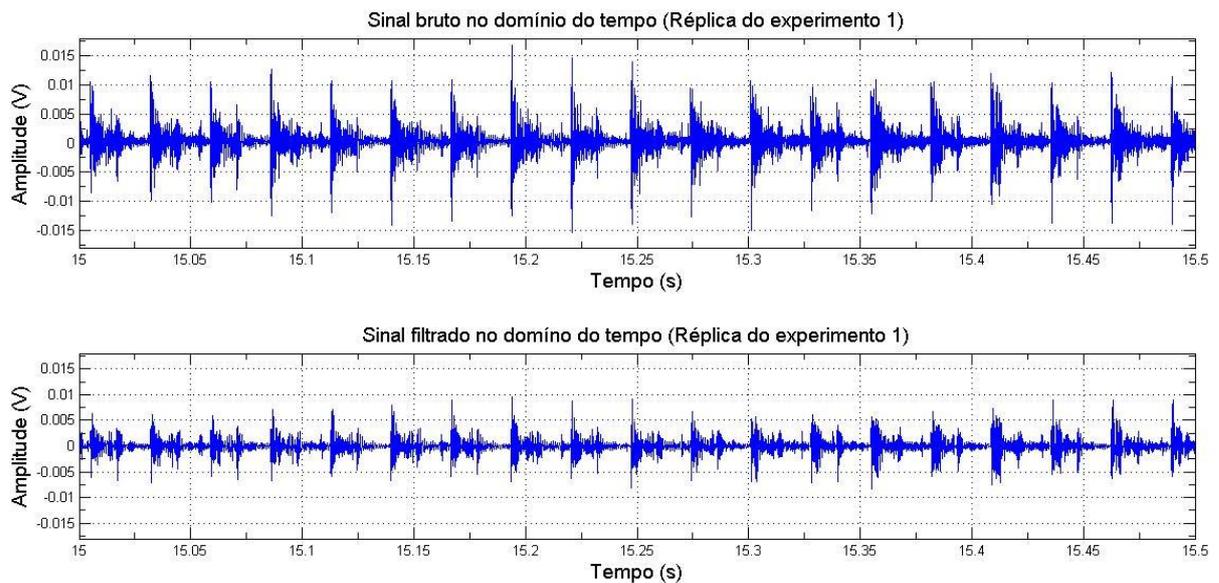


Figura 35 – Gráficos ampliados no domínio do tempo do sinal bruto (acima) e filtrado (abaixo) de uma réplica do experimento 1

Ao ampliar-se o sinal, percebe-se que há uma periodicidade ocorrendo nele. A tomada de tempo entre um pico e outro da figura 35 fornece o período decorrido entre o início de corte realizado por umas das arestas de corte da fresa e o início do corte da outra aresta. Logo, o surgimento desses pontos ocorre com uma frequência igual a frequência de entrada de ferramenta na peça cujo valor é metade da frequência de rotação da fresa.

Já a figura 36 mostra ampliações dos sinais de experimentos em cada um dos quatro tipos de combinação que podem existir: condição de desgaste e ferramenta boa, condição de desgaste e ferramenta gasta, condição de acabamento e ferramenta boa e condição de acabamento e ferramenta gasta.

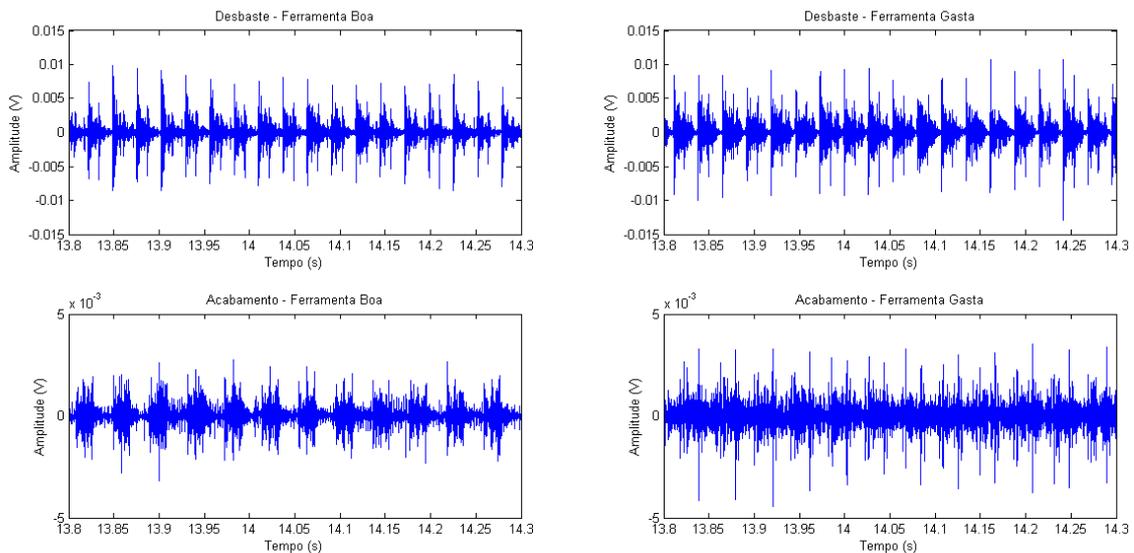


Figura 36 – Gráficos ampliados no domínio do tempo do sinal bruto (acima) e filtrado (abaixo) de uma réplica do experimento 1

Apesar de ser possível identificar algumas diferenças entre cada situação experimental na figura 36, não se pode tirar conclusões definitivas acerca da relação do sinal com o desgaste da ferramenta. Dessa forma, como afirmaram Madhusudana; Kumar; Narendranath(2016), faz-se necessário utilizar outras técnicas de análise. Para isso, aplicou-se uma FFT ao sinal para observar-se seu comportamento no domínio da frequência e fez-se uma análise de alguns parâmetros estatísticos extraídos do sinal no domínio do tempo.

4.1 SINAL NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA

Para realizar-se uma análise do sinal no domínio da frequência, empregou-se a ferramenta denominada Transformada Rápida de Fourier (FFT). Transformadas de Fourier aparecem com frequência em estudos de ondas e na extração de informações de ondas, em particular quando estão envolvidas informações de fase. A FFT é, portanto, um modo particular de fatorar e rearranjar os termos nas somas da transformada discreta de Fourier (ARFKEN; WEBER, 2007).

Antes da realização desse procedimento, porém, uma parcela do sinal com duração de 3 s foi extraída do sinal completo. Tal parcela encontrava-se na região intermediária do sinal e o objetivo de sua extração foi eliminar os fatores gerados no início e fim do percurso da ferramenta de corte. Essa região corresponde à região central do corpo de prova, onde há uma maior estabilidade dinâmica no processo de usinagem.

Nestas regiões citadas anteriormente foi aplicado sobre uma FFT através do *software* Labview®. Inicialmente não foi possível identificar dados que possibilitassem análises e comparações mais profundas através dos gráficos obtidos, visto que, havia uma grande densidade de elementos gráficos presente no sinal. Para ilustrar tal situação, pode-se observar a figura 37.

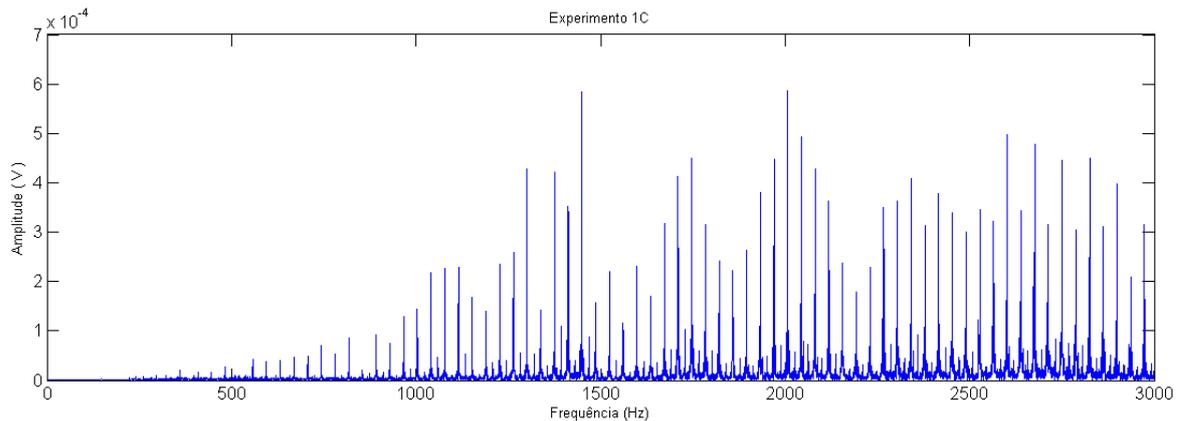


Figura 37 – Gráfico do espectro de frequências do experimento 1

A princípio, poucas informações puderam ser colhidas da figura 37, tais como, o valor aproximado do maior pico de frequência, quais bandas demonstram uma maior variação de amplitude, por exemplo.

Foram escolhidas algumas faixas de frequências que apresentassem comportamentos semelhantes de variação de amplitude ou que já fossem referenciadas na literatura. De acordo com Maia (2009), a faixa de frequência que melhor indica o desgaste da ferramenta está compreendida entre 30Hz e 700Hz. As demais faixas definidas como descrito anteriormente são entre 700Hz e 1600Hz, entre 1600Hz e 2400Hz e entre 2400Hz e 3000Hz. Essa divisão está representada na figura 38.

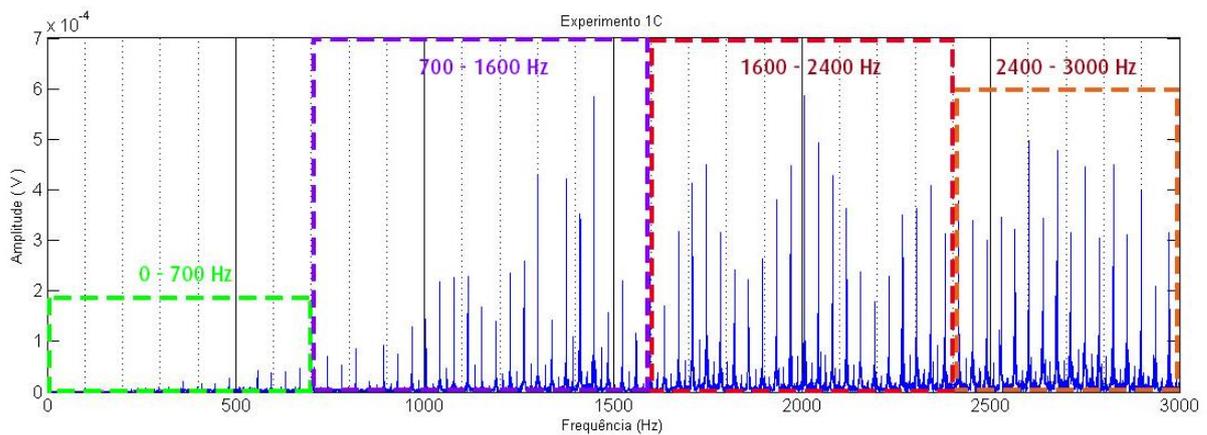


Figura 38 – Espectro de frequência dividido em bandas

Os picos ocorreram, geralmente nas frequências múltiplas da frequência (f) de entrada de ferramenta na peça: 37,17 Hz para os experimentos na condição de desbaste e 43,83 Hz para os experimentos na condição de acabamento. Em alguns casos, porém, surgiram frequências múltiplas de 60 Hz que atingiram picos superiores aos que são interessantes à análise de vibração em usinagem. Certamente, esses valores são derivados da rede elétrica a qual têm a mesma frequência.

Esses picos nas frequências múltiplas de 60 Hz ocorreram em experimentos nos quais a condição de corte foi o acabamento. Para estes casos, o espectro de frequência não caracterizava bem, aparentemente, os aumentos de amplitude ocasionados pelo desgaste da ferramenta, entretanto, ao fazer-se uma análise mais profunda do sinal, percebeu-se a presença de picos das frequências múltiplas da entrada de ferramenta na peça, obviamente com valores abaixo dos maiores picos presentes no espectro de frequência. Consequentemente esses picos conduziram a uma melhor caracterização do estado da ferramenta.

A fim de avaliar quais faixas de frequência poderiam caracterizar o estado de uma ferramenta, comparou-se todos os valores dos picos obtidos para cada uma delas em cada réplica dos experimentos, os quais estão contidos na tabela 5. Os valores estão em volt.

Tabela 5 – Valores de amplitudes para os picos encontrados no espectro de frequência para cada faixa de frequência (os valores estão em volt)

Experimento	Réplica	30 - 700 Hz	700 - 1600 Hz	1600 - 2400 Hz	2400 - 3000 Hz
1	A	3,31E-05	2,72E-04	2,62E-04	4,13E-04
	B	3,96E-05	6,03E-04	1,97E-04	2,14E-04
	C	4,66E-05	5,85E-04	5,86E-04	4,96E-04
2	A	6,14E-06	6,06E-05	5,51E-05	9,30E-05
	B	1,04E-05	7,68E-05	5,98E-05	5,20E-05
	C	1,36E-05	6,22E-05	6,91E-05	1,14E-04
3	A	6,02E-05	6,31E-04	1,48E-04	2,89E-04
	B	5,30E-05	6,08E-04	5,31E-04	3,08E-04
	C	5,81E-05	4,53E-04	4,45E-04	3,20E-04
4	A	1,95E-05	1,64E-04	6,44E-05	8,30E-05
	B	2,00E-05	2,09E-04	4,87E-05	6,10E-05
	C	1,59E-05	1,69E-04	1,79E-04	1,28E-04

A análise foi realizada utilizando o gráfico de probabilidade seminormal dos efeitos que assim como o gráfico de probabilidade normal, é utilizado para comparar a magnitude e a significância estatística dos efeitos principais e de interação em um experimento fatorial com 2 níveis. Os gráficos foram gerados com o auxílio do *software* Minitab®. Segundo Nóbrega (2010) esse tipo de gráfico é mais vantajoso para auxiliar no julgamento dos efeitos, se comparado ao gráfico normal. Dessa forma, pode-se demonstrar quais efeitos são significativos, à medida que se afastam da linha ajustada a qual indica onde se deve esperar que os pontos estejam se os efeitos forem zero (MONTGOMERY; RUNGER; HUBELE, 2004).

O gráfico de probabilidade normal exibe tanto os efeitos negativos quanto os positivos, à esquerda e à direita da linha ajustada, respectivamente; o que torna difícil a comparação das magnitudes entre efeitos positivos e negativos. Por outro lado, o gráfico de probabilidade seminormal exibe apenas valores absolutos de todos os efeitos, sejam eles positivos ou negativos. Todos os efeitos significativos ficam, portanto, do lado direito da linha ajustada, permitindo uma melhor comparação das magnitudes relativas (SUPORTE AO MINITAB, 2015). Os gráficos são mostrados na figura 43.

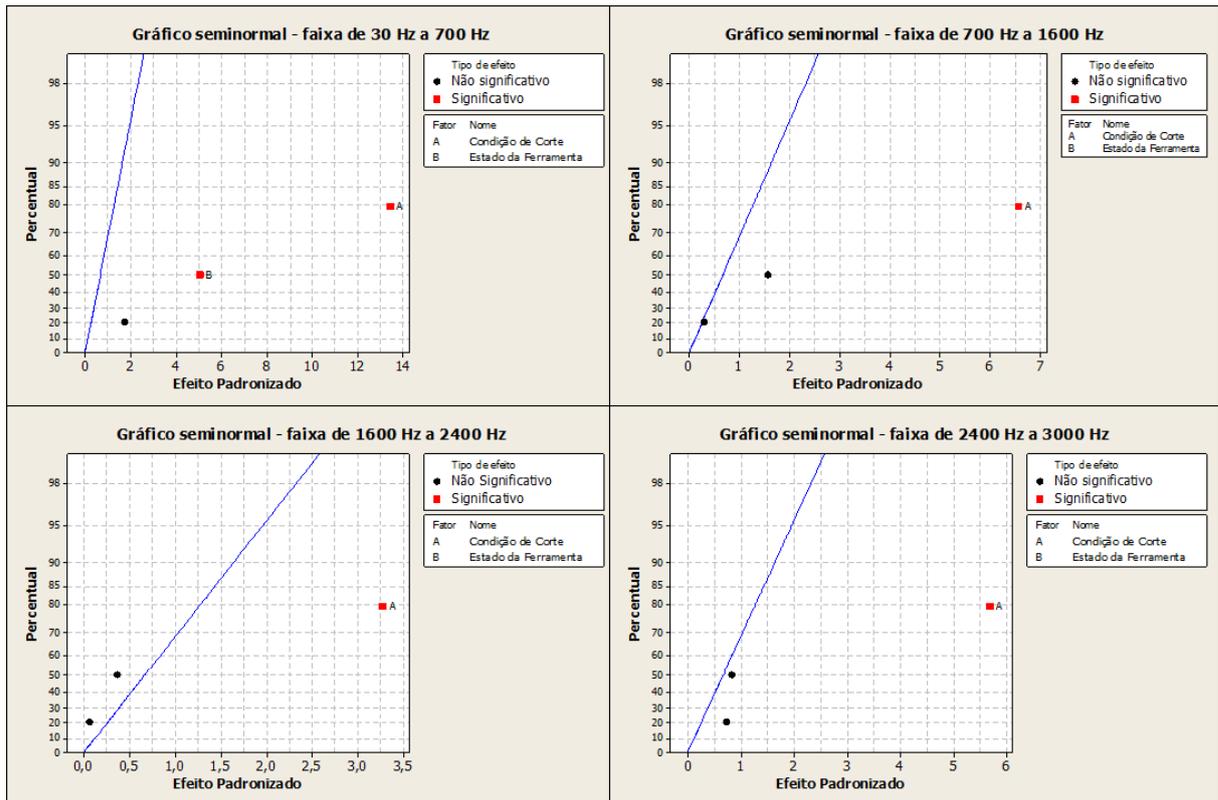


Figura 39 – Gráficos seminormal dos efeitos dos picos das frequências para a) faixa de frequência de 30 a 700 Hz; b) faixa de frequência de 700 a 1600 Hz; c) faixa de frequência de 1600 a 2400 Hz; d) faixa de frequência de 2400 a 3000 Hz

Na figura 39, os fatores que são estatisticamente significativos para o processo em questão são representados por um pequeno quadrado vermelho. Constata-se, portanto, que o fator condição de corte é estatisticamente significativo para os picos de frequência apenas na banda de 30 a 700 Hz.

Fazendo-se uma comparação mais precisa da influência que o estado da ferramenta tem sobre os picos de frequência, utilizou-se o gráfico de intervalos gerado pelo software Minitab, no qual se tem a média da amostra analisada e o intervalo contido entre as barras azuis horizontais é definido pelo erro padrão da média, cujo cálculo realiza-se dividindo-se o desvio padrão pela raiz quadrada de n (tamanho amostral). Da figura 40 à figura 42 são apresentados os referidos gráficos para as faixas de frequência que não se apresentaram estatisticamente significativas.

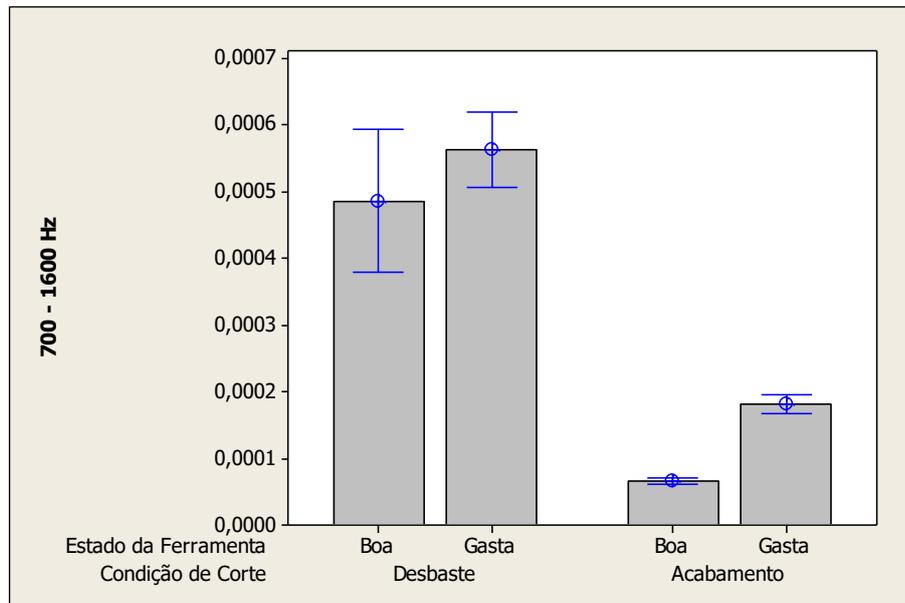


Figura 40– Gráfico de intervalos para os picos de frequência na faixa de 700 Hz a 1600 Hz

Pode-se observar na figura 40 que apenas para uma condição de (acabamento) há uma real diferença nos resultados apresentados entre ensaios com ferramenta boa e com ferramenta gasta para a faixa de frequências entre 700 Hz e 1600 Hz. Tal condição é o acabamento. No desbaste não há diferença significativa, visto que as barras dos intervalos se sobrepõem.

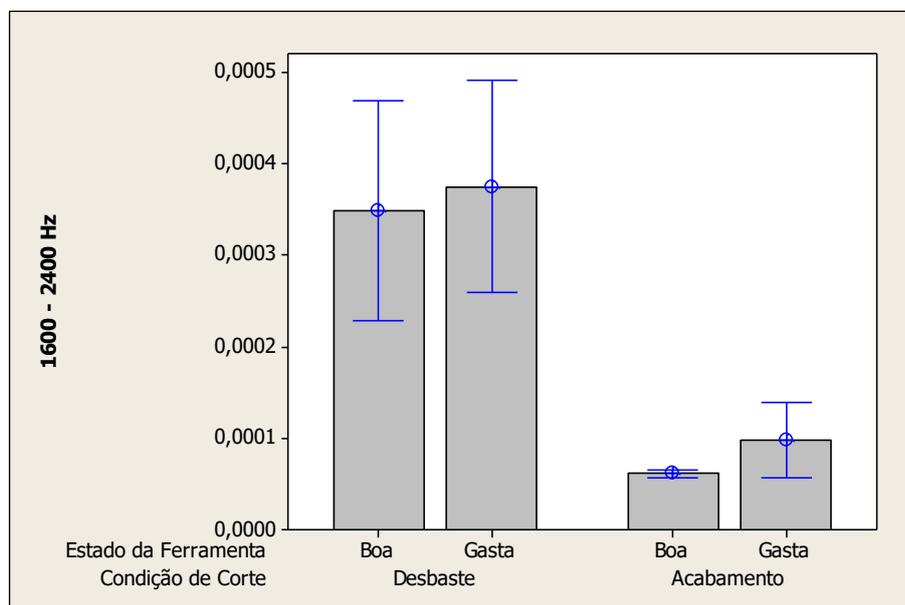


Figura 41 – Gráfico de intervalos para os picos de frequência na faixa de 1600 Hz a 2400 Hz

Para a faixa de frequência de 1600 Hz a 2400 Hz, conforme a figura 41, em nenhuma condição de corte foi possível encontrar diferenças significativas entre experimentos com ferramentas boas e gastas.

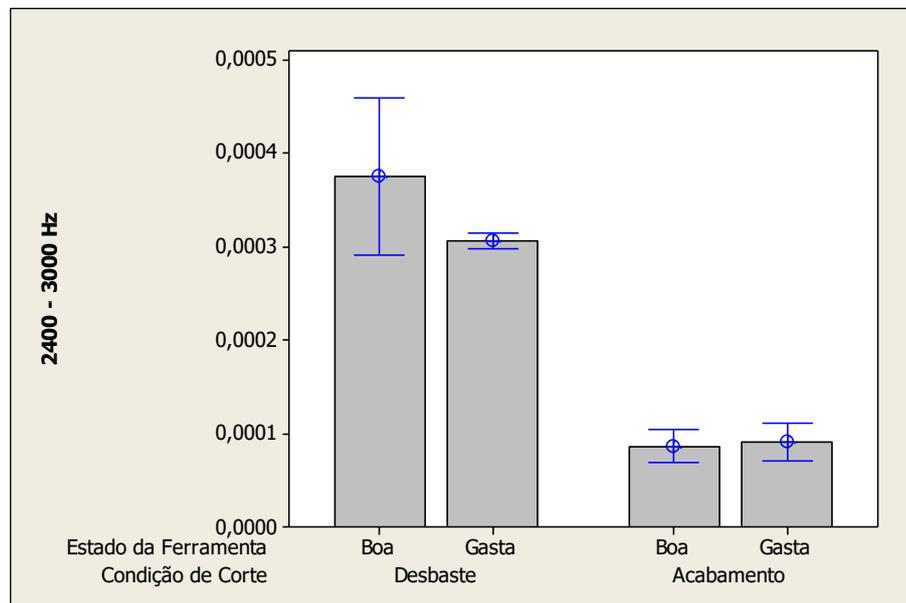


Figura 42 – Gráfico de intervalos para os picos de frequência na faixa de 2400 Hz a 3000 Hz

Na faixa de frequência de 2400 Hz a 3000 Hz, não foi possível extrair qualquer informação sobre o estado da ferramenta. O gráfico de intervalos não fornece informações relevantes, visto que os intervalos dos experimentos com ferramentas boas e gastas se sobrepõem em ambas as condições de corte, conforme figura 42.

Na faixa de 30 a 700 Hz, o efeito mais significativo é a condição de corte (fator A), sendo o estado da ferramenta (fator B) também significativo. Portanto, pode-se afirmar que a faixa de frequência de 0 a 700 Hz é a melhor faixa para avaliar o desgaste da ferramenta para as condições de corte analisadas. Seguindo essa constatação, a seguir, da figura 43 à figura 46 serão apresentados os espectros de frequência do sinal nessa faixa para cada experimento e suas réplicas.

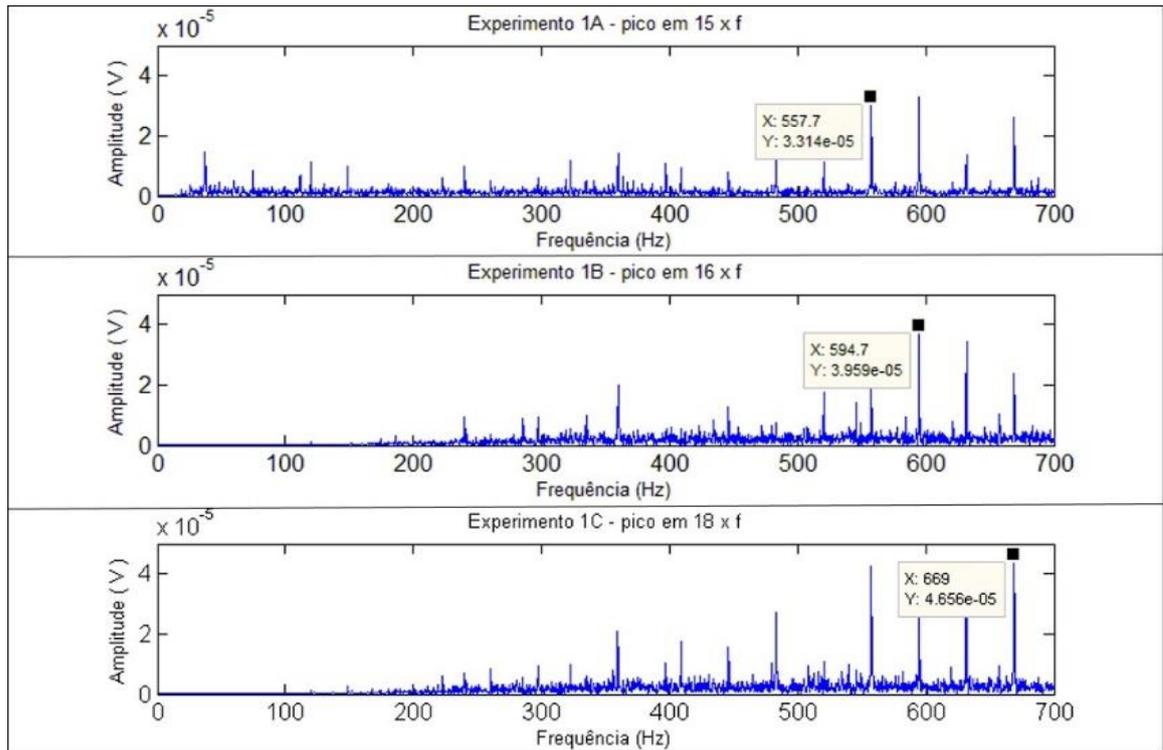


Figura 43 – Gráfico de espectro de frequência do experimento 1 na faixa de frequência de 30 a 700 Hz.

Pode-se observar na figura 43 que os picos alcançados nas réplicas do experimento 1 nessa faixa de frequência foram de valores muito próximos para todas as réplicas. A média das 3 foi de $3,98 \times 10^{-5}$ V.

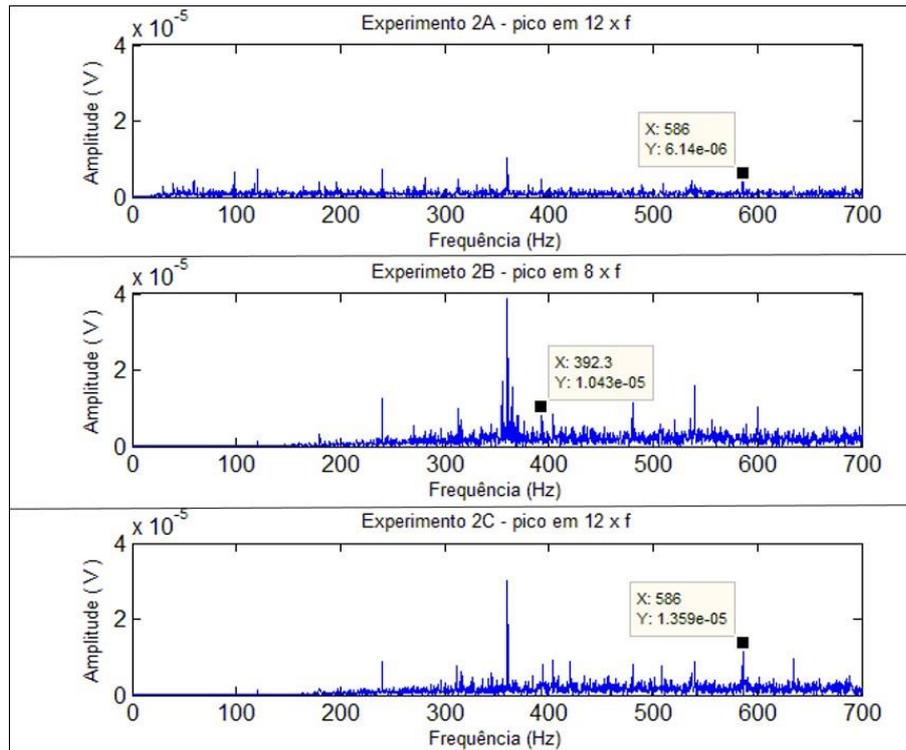


Figura 44 – Gráfico de espectro de frequência do experimento 2 na faixa de frequência de 30 a 700 Hz

A figura 44, por outro lado, já mostra picos que podem gerar conclusões imprecisas a respeito do que se está avaliando, visto que os picos com maiores amplitudes são correspondentes às frequências múltiplas de 60 Hz. As frequências oriundas do processo de fresamento geraram, neste caso, amplitudes inferiores. No entanto, se enquadram nos valores que caracterizam o estado da ferramenta. A média das três réplicas foi de $1,01 \times 10^{-5}$ V.

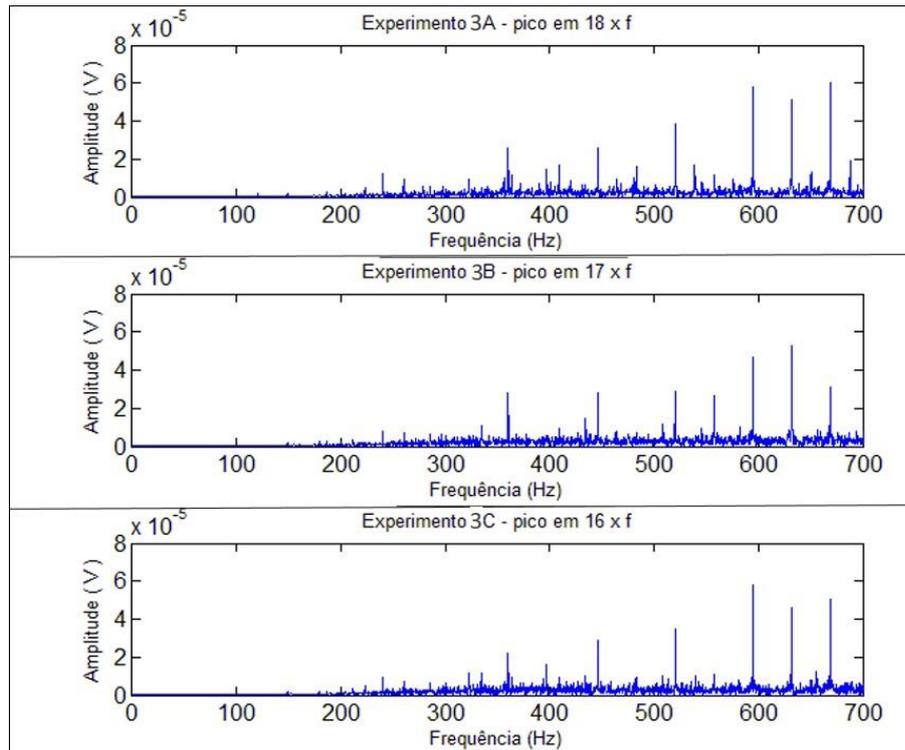


Figura 45 – Gráfico de espectro de frequência do experimento 3 na faixa de frequência de 30 a 700 Hz

Por fim, o experimento 3 é caracterizado pelos picos de frequência ocorrendo nas frequências oriundas do processo de fresamento. A média dos valores máximos de amplitude foi de $5,71 \times 10^{-5}$ V.

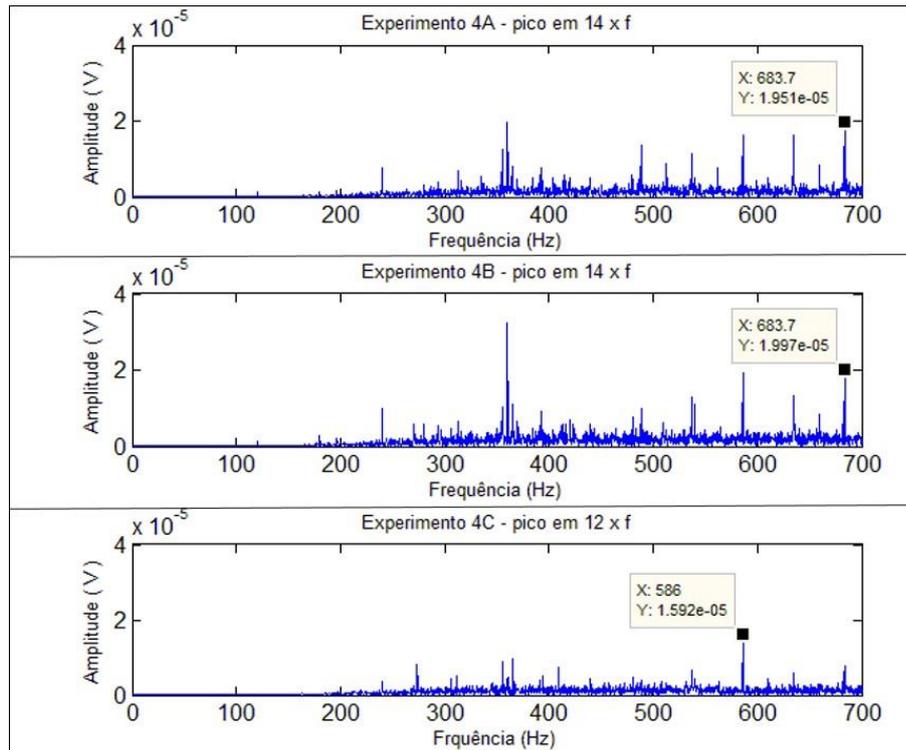


Figura 46 – Gráfico de espectro de frequência do experimento 4 na faixa de frequência de 30 a 700 Hz

No experimento 4, observa-se também uma incidência de picos de frequências múltiplas de 60 Hz, no entanto, seus valores não são tão maiores que os picos das frequências oriundas do processo de fresamento como no experimento 2, conforme figura 46. Certamente, essas diferenças de valores são menores porque a condição de corte utilizada nesses experimentos foram as de acabamento, sendo, por conseguinte, o estado da ferramenta o fator que gerou esse aumento de amplitude, afinal o experimento 4 e o experimento 2 foram realizados com ferramentas gastas e novas, respectivamente. A média de amplitude para o experimento 4 foi de $1,85 \times 10^{-5}$ V.

Dos gráficos dos espectros de frequências pode-se afirmar que os experimentos com condição de corte de acabamento geraram picos de frequências oriundas da rede elétrica. Entre esses experimentos, aqueles que foram realizados com ferramentas desgastadas geraram frequências oriundas do processo de usinagem com maiores amplitudes. No entanto, na maioria dos casos, a amplitude da rede elétrica foi maior.

As frequências oriundas do processo de fresamento geraram picos nos múltiplos da frequência de entrada de ferramenta na peça. Nos experimentos com condição de desgaste, os

picos foram, geralmente, na frequência de 18 vezes f , enquanto que nos experimentos com condição de acabamento, esses picos ocorreram, no geral, em frequências de 12 vezes f .

A fim de atestar que os picos das frequências múltiplas da frequência de entrada de ferramenta na peça são um bom indicador para o diagnóstico de uma ferramenta gasta, também utilizou-se o gráfico de intervalos o qual está apresentado na figura 47.

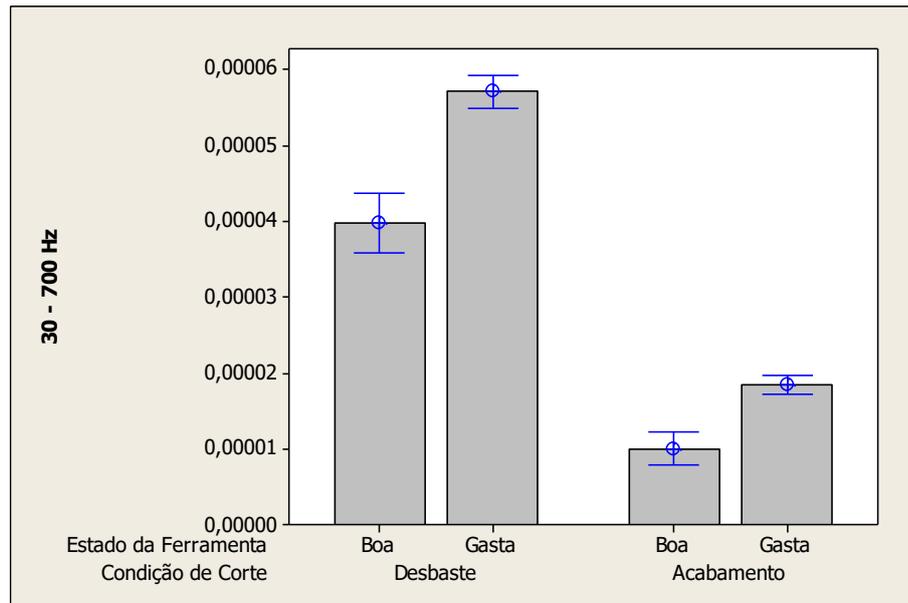


Figura 47 – Gráfico de intervalos para os picos de frequência na faixa de 30 Hz a 700 Hz

Em qualquer uma das condições de corte, ao observar-se a figura 47, percebe-se que as diferenças entre os picos de frequência de experimentos com ferramentas boas e os com ferramentas gastas são significativas em todas as condições de corte. Dessa forma, certificou-se que a banda compreendida entre 30 Hz e 700 Hz do espectro de frequência de um sinal de vibração é um bom indicador para a análise do estado da ferramenta de corte.

Dessa forma, percebe-se que os resultados estão de acordo com Maia (2009) e, portanto, pode-se utilizar essa faixa do espectro de frequência, desde que sejam mensurados os picos das frequências múltiplas da entrada de ferramenta na peça, como um indicativo do estado da ferramenta, conforme fizeram Orhan *et al.* (2007).

4.2 PARÂMETROS ESTATÍSTICOS EXTRAÍDOS DO SINAL

Como explicado na Revisão Bibliográfica, na análise de sinais de vibração pode-se extrair do sinal alguns parâmetros estatísticos, a fim de compará-los com algum efeito que se esteja investigando, relacioná-los com esse efeito e, conseqüentemente, obter conclusões a respeito disso.

Como citado no item Materiais e Métodos, foram escolhidos os seguintes parâmetros para análise do sinal de vibração: RMS, Pico, Curtose e Fator de Crista.

4.2.1 Parâmetros estatísticos por banda de frequência

Para se fazer uma análise dos parâmetros extraídos do sinal de vibração, determinou-se algumas faixas de frequência para se aplicar ao sinal um filtro compreendido dentro dessas faixas. A priori uma primeira faixa já estava determinada, a faixa do filtro inicial aplicado ao sinal: entre 30 Hz e 3,0 kHz. Foram determinadas outras faixas, as quais foram as mesmas faixas escolhidas para análise do espectro de frequência (30 Hz a 700 Hz, 700 Hz a 1,6 kHz, 1,6 kHz a 2,4 kHz e 2,4 kHz a 3,0 kHz) e foram aplicados ao sinal já filtrado filtros compreendidos entre as bandas de frequência citadas. Após a aplicação do filtro, foram extraídos os parâmetros banda a banda.

Para analisar a relação que cada um desses parâmetros tem com o estado da ferramenta foi utilizado o gráfico de intervalos gerado pelo software Minitab®.

4.2.1.1 Parâmetros estatísticos extraídos na banda de frequência de 30 Hz a 3,0 kHz

Para a banda de frequência compreendida entre 30 Hz e 3,0 kHz, os gráficos de intervalo de cada um dos fatores são apresentados, portanto, da figura 48 à figura 51.

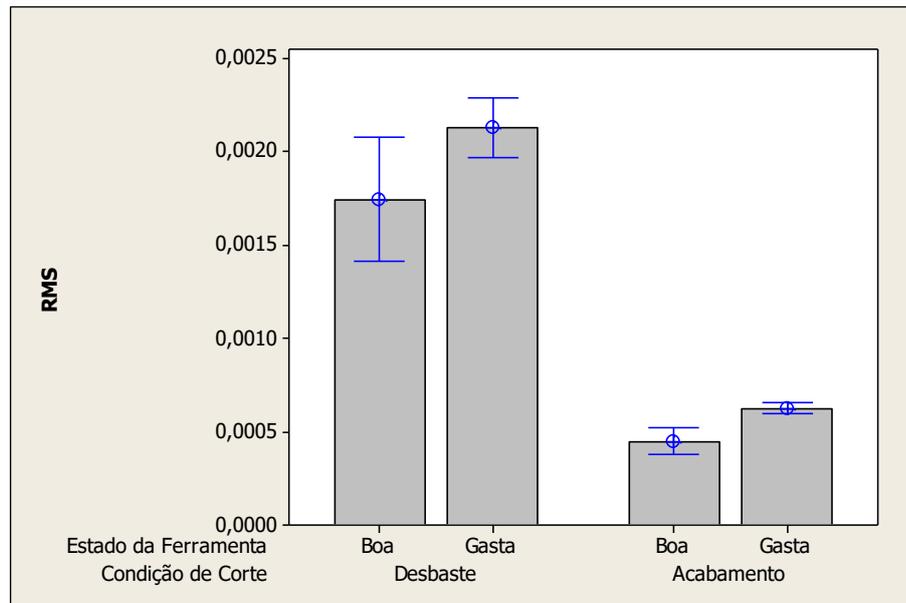


Figura 48 – Gráfico de intervalos da RMS para um sinal na faixa de frequência de 30 Hz a 3,0 kHz

Para a RMS, de acordo com a figura 48, o estado da ferramenta só se mostra perceptível na condição de acabamento. Na condição de desbaste, embora a média alcançada nos experimentos realizados com ferramentas gastas seja maior que nos experimentos com ferramentas boas, a variação que ocorre dos valores de RMS obtidos não permite ter uma conclusão bem definida a respeito da relação desse parâmetro com a condição da ferramenta de corte, visto que o limite inferior da barra do intervalo de ferramenta gasta está abaixo do limite superior da barra do intervalo da ferramenta boa, ou seja, as diferenças entre as médias não são significativas.

Já na condição de acabamento, as barras de intervalo não se sobrepõem, o que possibilita a conclusão de que nesta condição as diferenças entre as médias são significativas.

Segundo Meola (2005), a RMS indica o nível de energia presente no sinal. No caso de acabamento, houve uma elevação significativa do nível de energia devido ao desgaste da ferramenta de corte. Já na condição de desbaste, a elevação do nível de energia ocorreu em alguns casos, visto que há diferença nas médias, porém não foi uma elevação significativa. Este fato deve ter ocorrido porque o nível de energia já existente no sinal era bem superior ao nível de energia incrementado quando ocorreu o desgaste.

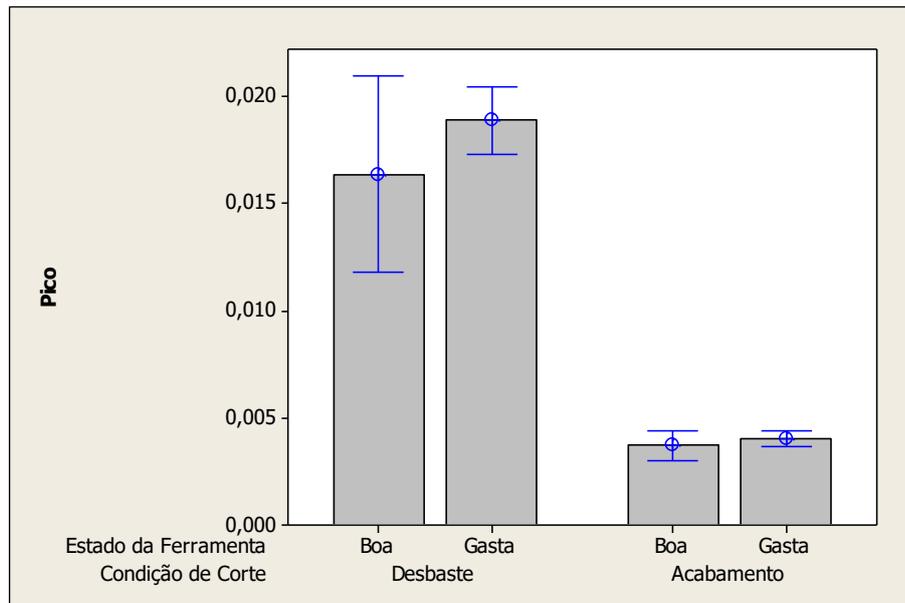


Figura 49 – Gráfico de intervalos do Pico para um sinal na faixa de frequência de 30 Hz a 3,0 kHz

No que diz respeito ao Pico, ao observar a figura 49, percebe-se que em nenhuma das condições de corte as diferenças entre as médias são significativas. Tanto para o desbaste, quanto para o acabamento as barras dos intervalos se sobrepõem umas às outras.

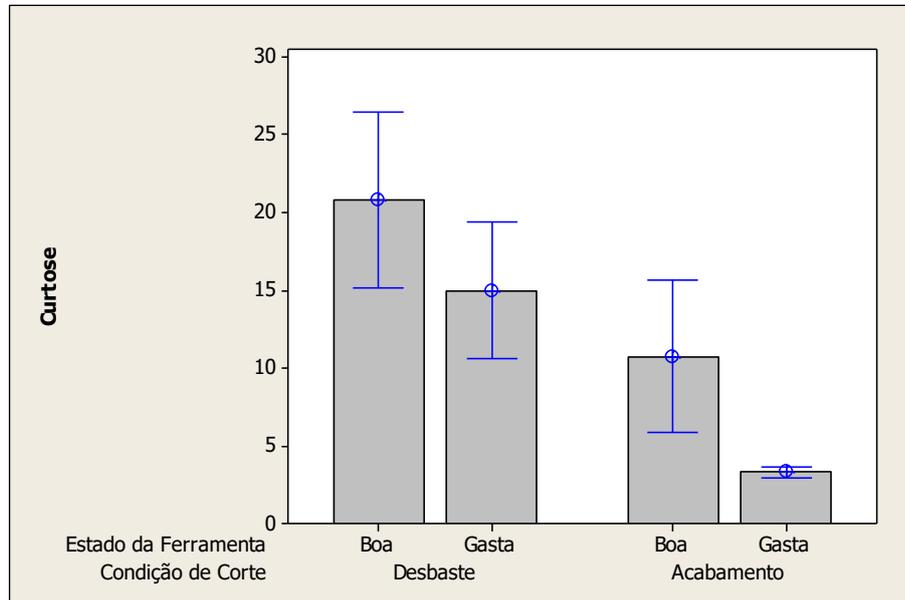


Figura 50 – Gráfico de intervalos da Kurtose para um sinal na faixa de frequência de 30 Hz a 3,0 kHz

Na figura 50 pode-se perceber que as médias dos valores da kurtose variam, dentro de cada condição de corte, com o estado da ferramenta. Porém, quando a condição de corte foi o desbaste, a diferença entre as médias não foi significativa nos resultados comparados entre os

experimentos realizados com ferramenta boa e gasta. Nota-se que o limite superior dos experimentos realizados com ferramenta gasta supera o limite inferior dos experimentos realizados com ferramenta nova. Desse modo não é possível afirmar que numa condição de desgaste pode-se utilizar a curtose como parâmetro indicativo do estado da ferramenta.

Por outro lado, ainda analisando a figura 50, quando a condição de corte foi de acabamento, percebe-se que há uma variação significativa entre os resultados obtidos ao comparar-se experimentos com ferramenta boa e gasta. Desse modo, pode-se afirmar que esse parâmetro, na condição de desgaste, indica que a ferramenta atingiu o nível de desgaste colocado como limite.

Para Santos (2008), a diminuição do valor da curtose mostra que houve um aumento do número de picos no sinal. Certamente, no caso da condição de desgaste, esse aumento não foi suficiente para indicar de modo satisfatório o desgaste da ferramenta. Já no caso do acabamento, esse aumento deve-se, por certo, ao menor valor de amplitude do sinal, em comparação com o sinal na condição de desgaste.

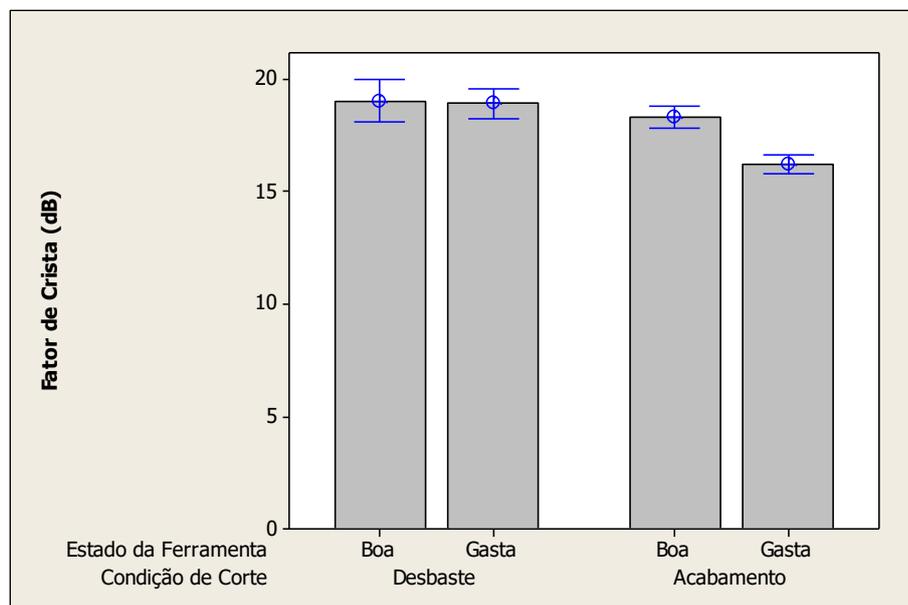


Figura 51 – Gráfico de intervalos do Fator de crista para um sinal na faixa de frequência de 30 Hz a 3,0 kHz

Na figura 51, percebe-se que para o desgaste não se pode afirmar que o fator de crista indica o desgaste da ferramenta. Nota-se que até mesmo as médias desses valores são coincidente para ambos os estados da ferramenta. Já no caso do acabamento, a ferramenta gasta tem um valor de fator de Crista inferior ao da ferramenta boa. Além disso, há uma variabilidade

nos dados que assegura que os valores obtidos para cada um dos estados possíveis da ferramenta serão diferentes do outro.

Na condição de desgaste, a variação de pico e de RMS tiveram um comportamento muito semelhante, o que influencia no comportamento do fator de Crista, que não fornece qualquer informação relevante sobre o desgaste nesta condição de corte. Já na condição de acabamento não ocorreu essa semelhança para os dois primeiros parâmetros, possibilitando a variação no fator de Crista.

4.2.1.2 Parâmetros estatísticos extraídos na banda de frequência de 30 Hz a 700 Hz

Para a banda de frequências compreendidas entre 30 Hz e 700 Hz, os gráficos de intervalos dos parâmetros estatísticos estão apresentados da figura 52 à figura 55.

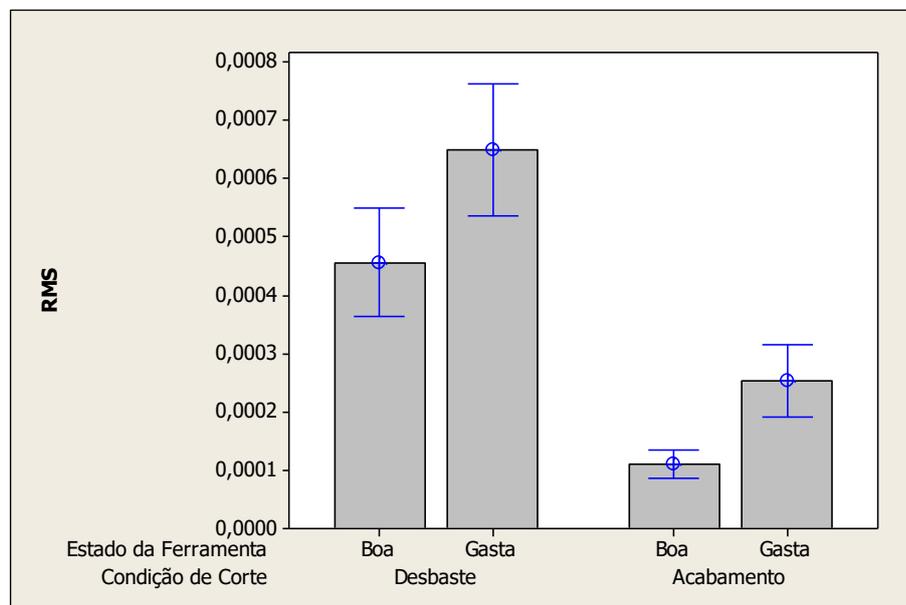


Figura 52 – Gráfico de intervalos da RMS para um sinal na faixa de frequência de 30 Hz a 700 Hz

Ao observar a figura 52, pode-se constatar que o sinal de vibração no domínio do tempo, após aplicado um filtro na faixa de frequência compreendida entre 30 Hz e 700 Hz fornece a RMS com diferentes médias. Os experimentos realizados com ferramentas gasta têm médias superiores aos experimentos com ferramentas boas. Entretanto apenas no caso em que a condição de corte foi de acabamento houve uma variabilidade real, pois os intervalos da variação das médias não se sobrepõem. No caso da condição de desgaste, o limite superior do intervalo dos experimentos realizados com ferramentas boas é maior que o limite inferior dos

experimentos realizados com ferramentas gastas. Percebe-se neste caso uma semelhança considerável com a faixa de frequência geral (30 Hz a 3,0 kHz).

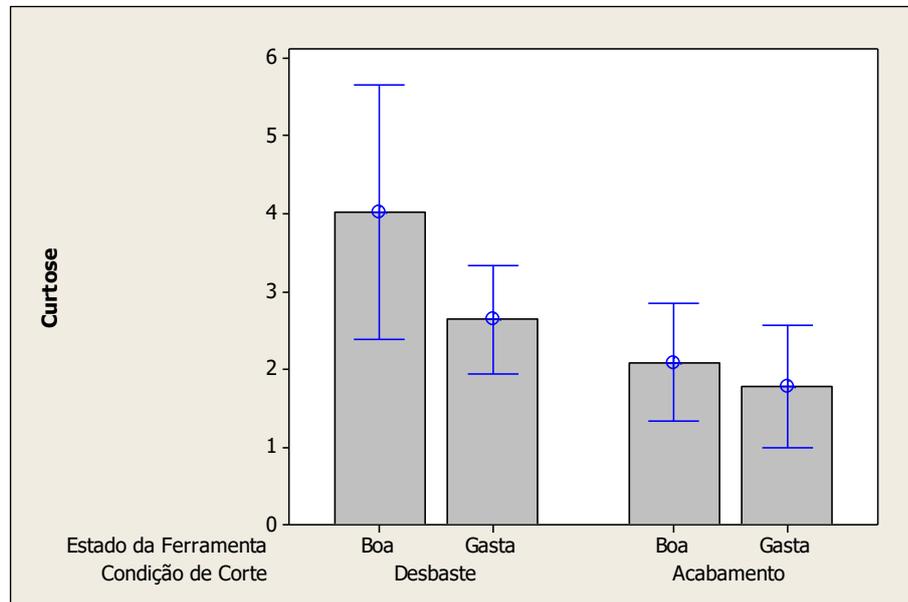


Figura 53 – Gráfico de intervalos da Curtose para um sinal na faixa de frequência de 30 Hz a 700 Hz

Já com relação à curtose nessa banda de frequência, de acordo com a figura 53, percebe-se que não se pode extrair qualquer informação clara do gráfico de intervalos. Tanto para o desbaste, quanto para o acabamento, os intervalos dos experimentos com ferramentas boas e gastas são sobrepostos, significando, portanto, que tais dados não são significativos.

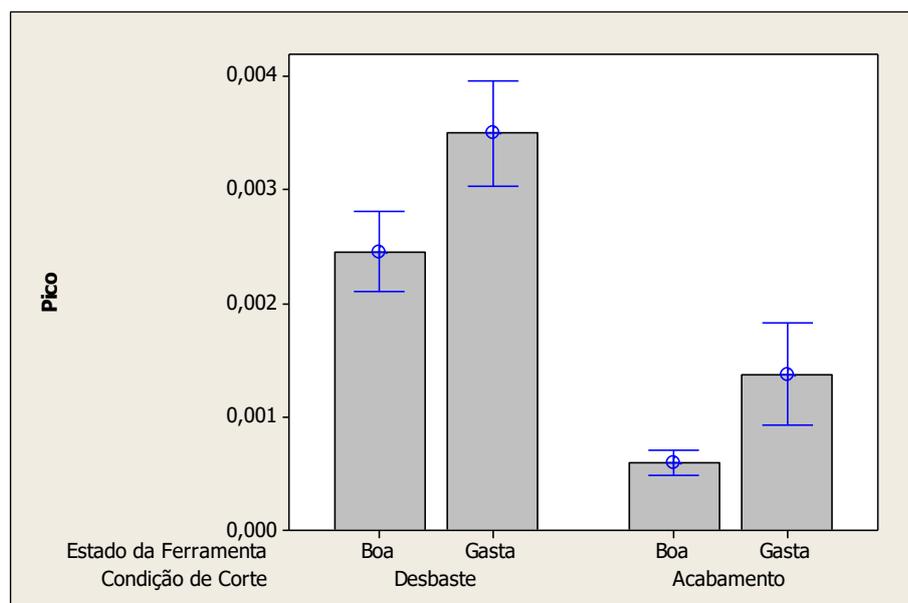


Figura 54 – Gráfico de intervalos do Pico para um sinal na faixa de frequência de 30 Hz a 700 Hz

Já observando-se a figura 54, percebe-se que pico do sinal é um bom indicador de que a ferramenta está gasta. Em ambas as condições de corte não há sobreposição dos intervalos, indicando assim que os dados são significativos. Estes resultados são condizentes com os resultados obtidos com os espectros na mesma banda de frequência.

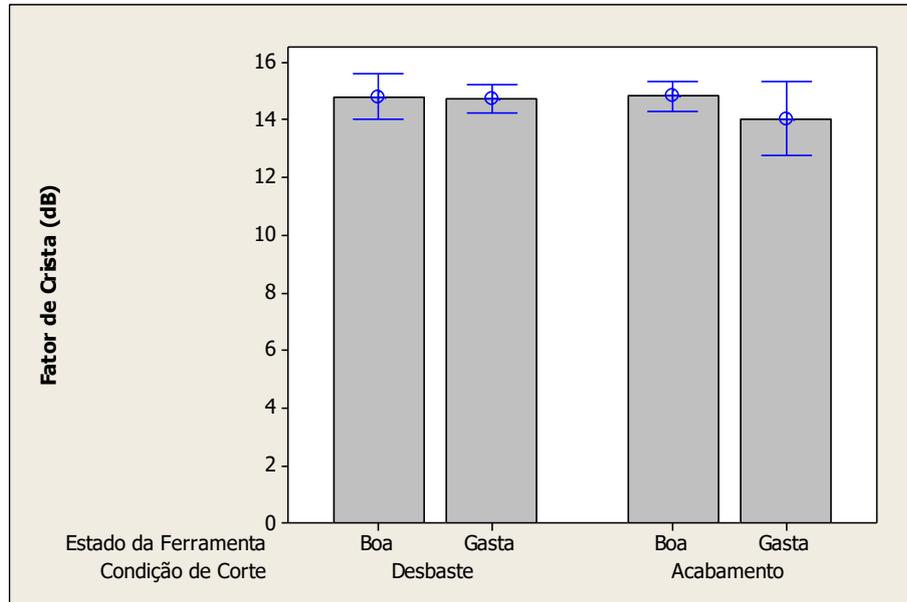


Figura 55 – Gráfico de intervalos do Fator de crista para um sinal na faixa de frequência de 30 Hz a 700 Hz

Por fim, de acordo com a figura 55, para o sinal filtrado na banda de frequência de 30 Hz a 700 Hz não se pode extrair qualquer informação sobre o estado da ferramenta.

4.2.1.3 Parâmetros estatísticos extraídos na banda de frequência de 700 Hz a 1600 Hz

Da figura 56 à figura 59 encontram-se os gráficos de intervalos dos parâmetros estatísticos do sinal filtrado na banda de frequência de 700 Hz a 1600 Hz.

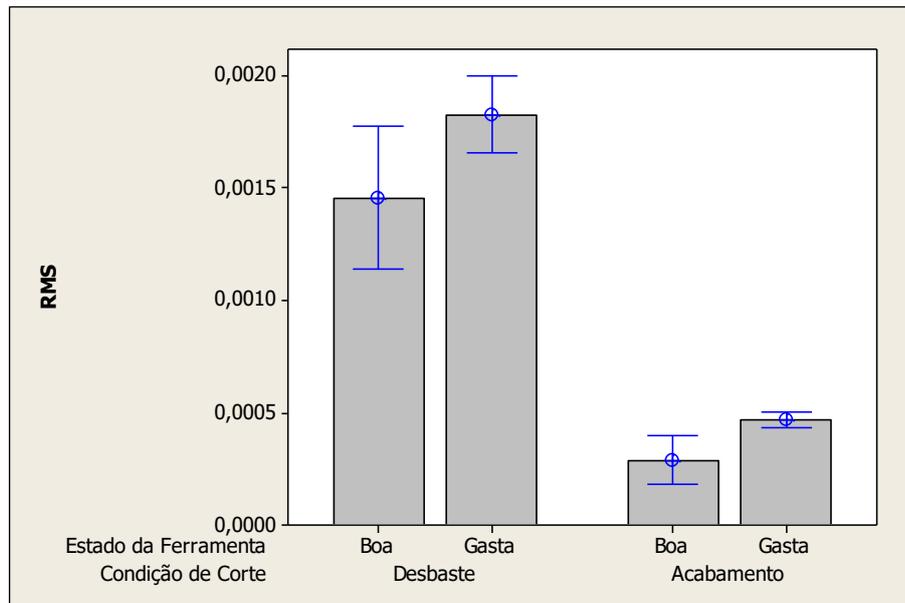


Figura 56 – Gráfico de intervalos da RMS para um sinal na faixa de frequência de 700 Hz a 1600 Hz

Para a faixa de frequência de 700 Hz a 1600 Hz, a RMS do sinal tem comportamento semelhante à faixa compreendida entre 30 Hz e 700 Hz. Para esta nova banda, de acordo com a figura 56, apenas na condição de acabamento o valor da RMS pôde indicar que a ferramenta está gasta. Na condição de desbaste há sobreposição de intervalos para os diferentes estados de ferramenta.

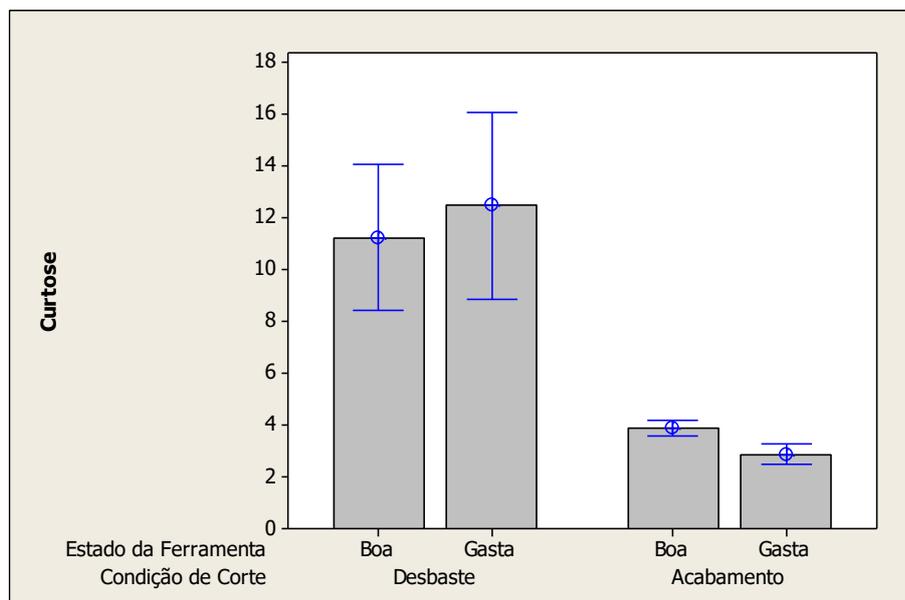


Figura 57 – Gráfico de intervalos da Curtose para um sinal na faixa de frequência de 700 Hz a 1600 Hz

A curtose extraída do sinal nesta banda de frequência para a condição de desgaste não é capaz de indicar o estado da ferramenta, conforme a figura 57, visto que há sobreposição das barras dos intervalos. Já no caso do acabamento, há uma diferença significativa na diferença das médias

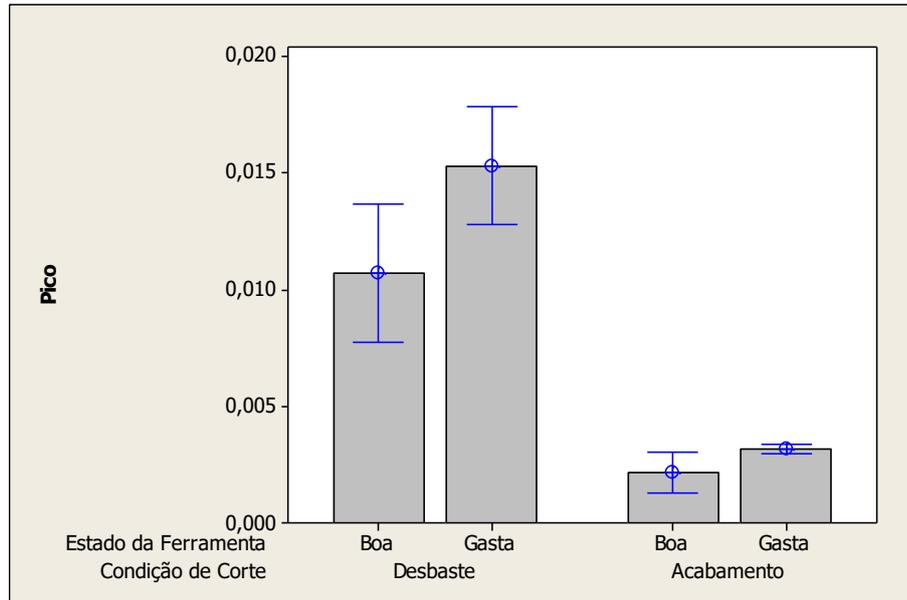


Figura 58 – Gráfico de intervalos do Pico para um sinal na faixa de frequência de 700 Hz a 1600 Hz

De acordo com a figura 58, o pico do sinal na banda de 700 Hz a 1600 Hz não é um bom sinal para indicar o estado da ferramenta.

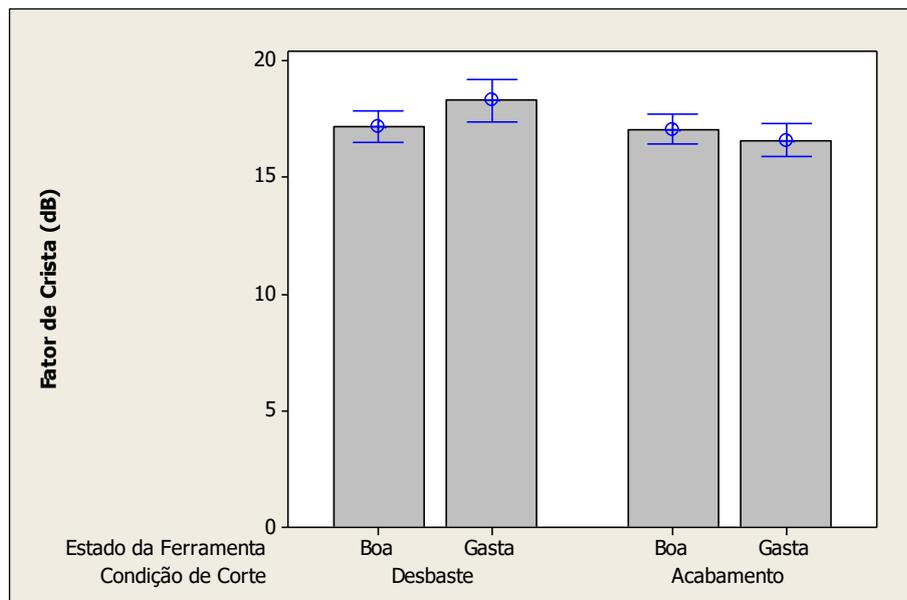


Figura 59 – Gráfico de intervalos do Fator de crista para um sinal na faixa de frequência de 700 Hz a 1600 Hz

Assim como o pico, o fator de crista para a faixa de frequência em questão não indica diferenças significativas entre ferramentas boas e gastas, para ambas as condições de corte, conforme figura 59.

4.2.1.4 Parâmetros estatísticos extraídos na banda de frequência de 1600 Hz a 2400 Hz

Da figura 60 à figura 63 encontram-se os gráficos de intervalos dos parâmetros estatísticos do sinal filtrado na banda de frequência de 1600 Hz a 2400 Hz.

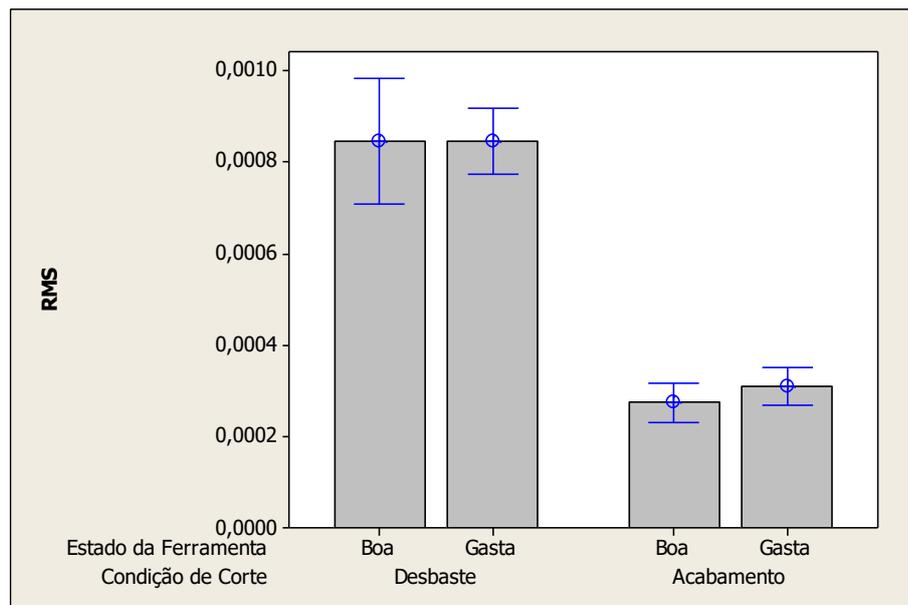


Figura 60 – Gráfico de intervalos da RMS para um sinal na faixa de frequência de 1600 Hz a 2400 Hz

De acordo com a Figura 60, constata-se que a RMS do sinal na faixa de frequência de 1600 Hz a 2400 Hz não é significativa para a determinação do estado da ferramenta de corte, qualquer que seja a condição de corte.

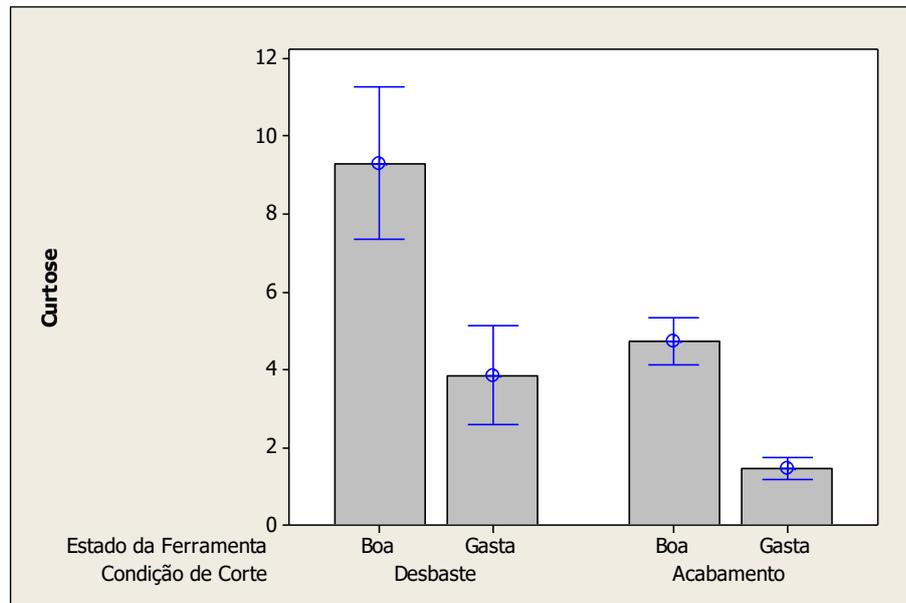


Figura 61 – Gráfico de intervalos da Curtose para um sinal na faixa de frequência de 1600 Hz a 2400 Hz

Já a curtose extraída do sinal nessa faixa de frequência é distinta, em ambas as condições de corte, em experimentos com ferramentas boas e gastas. Ao comparar-se os estados das ferramentas para uma mesma condição, como na figura 61, constata-se que a diferença existente para diferentes estados da ferramentas são nítidas, visto que as barras dos intervalos não se sobrepõem.

Segundo Santos (2008), há um crescimento no número de picos com o aumento de desgaste devido à assimetria do desgaste nas arestas de corte, tornando, pois o valor de curtose menor, visto que quanto mais picos presente no sinal, menor será o valor desse parâmetro.

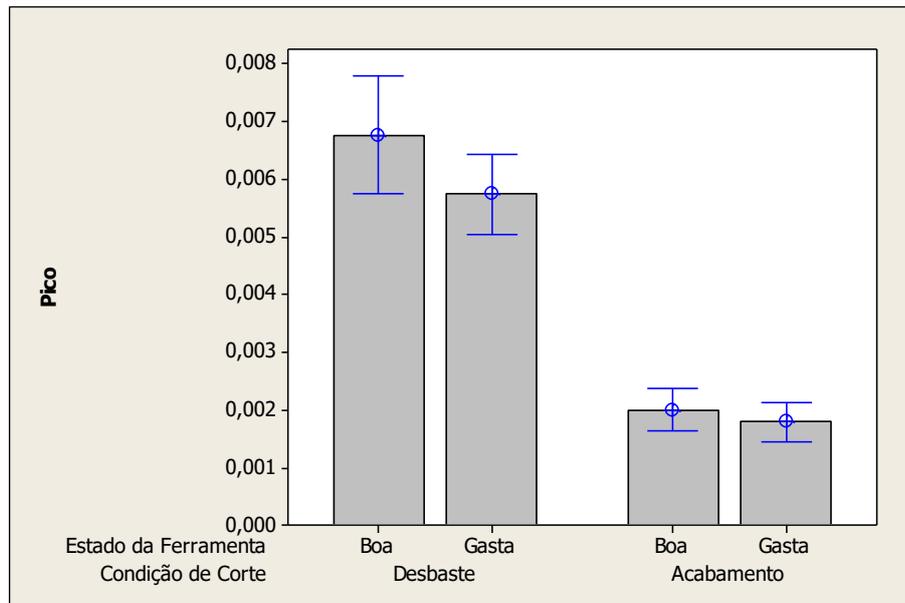


Figura 62 – Gráfico de intervalos do Pico para um sinal na faixa de frequência de 1600 Hz a 2400 Hz

Do gráfico de intervalos do pico numa faixa de frequência de 1600 Hz a 2400 Hz, figura 62, nenhuma informação criteriosa pode ser extraída.

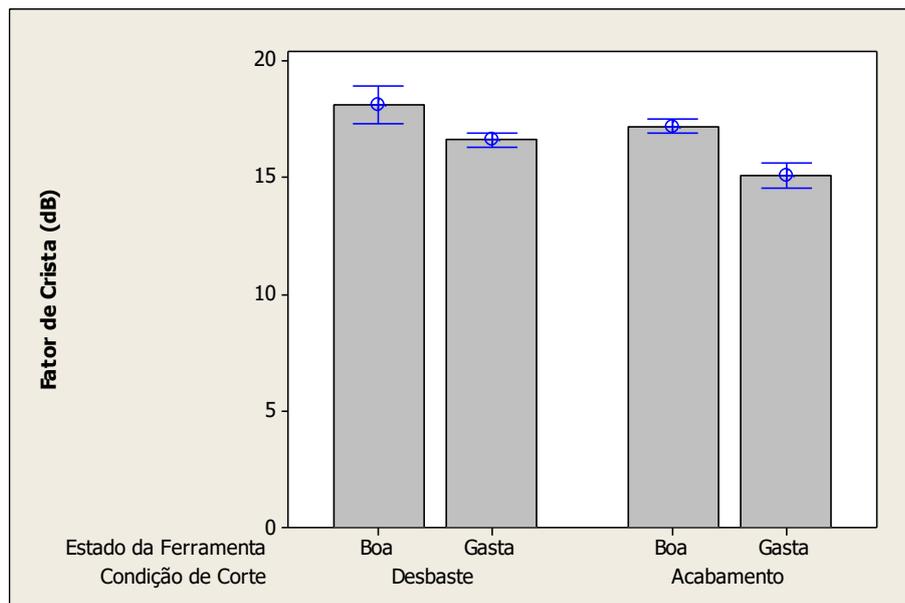


Figura 63 – Gráfico de intervalos do Fator de crista para um sinal na faixa de frequência de 1600 Hz a 2400 Hz

Já o fator de crista fornece dados significativos para identificação do estado da ferramenta, visto que na comparação dos experimentos com diferentes estados, em ambas as condições de corte, há uma real diferença nas médias desse fator para experimentos realizada

com ferramenta boa e gasta, devido ao fato de não haver sobreposição das barras de intervalos, conforme a figura 63.

Esse resultado contraria o que foi apresentado por Santos (2008), visto que em seu trabalho, houve um crescimento do valor do fator de crista com o aumento do sinal de vibração. No entanto, Macário (2006) afirmou que o seu valor decresce quando há a presença de defeito. Certamente essa diferença ocorreu devido a se ter atingido desgastes mais severos neste trabalho. Meola (2005), afirmou que o fator de crista cresce com a presença de um defeito e decresce quando esse defeito se torna severo.

4.2.1.5 Parâmetros estatísticos extraídos na banda de frequência de 2400 Hz a 3000 Hz

Da figura 64 à figura 67 encontram-se os gráficos de intervalos dos parâmetros estatísticos do sinal filtrado na banda de frequência de 2400 Hz a 3000 Hz.

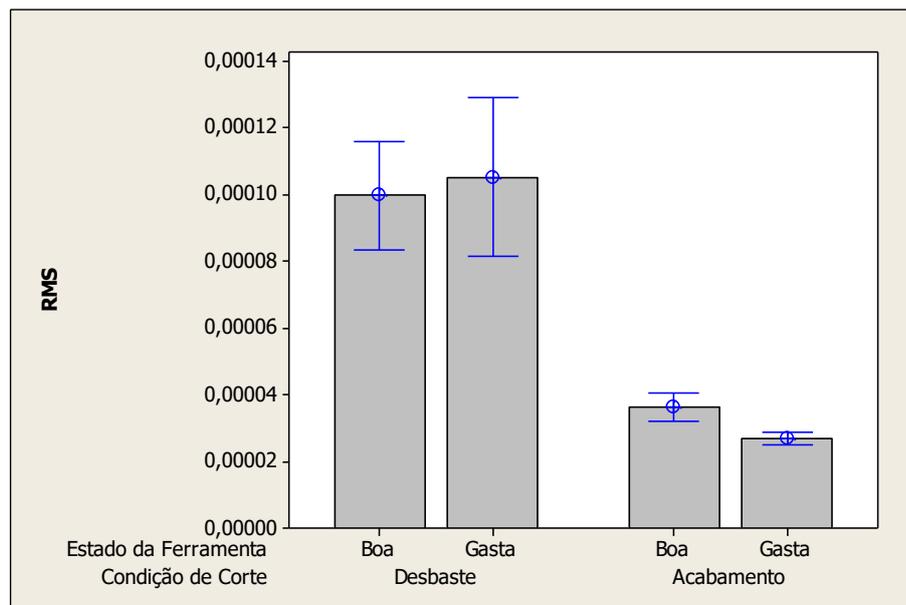


Figura 64 – Gráfico de intervalos da RMS para um sinal na faixa de frequência de 2400 Hz a 3000 Hz

Observando-se a figura 64, percebe-se que a RMS do sinal na banda de 2400 Hz a 3000 Hz não fornece informações consistentes sobre o estado da ferramenta na condição de desbaste. Nessa condição, não há diferença significativa entre as médias, havendo, pois, sobreposição das barras dos intervalos. Já na condição de acabamento, a variação das médias não chega a interceptar-se, portanto, este fator, nesta condição, é capaz de indicar o estado da ferramenta de corte.

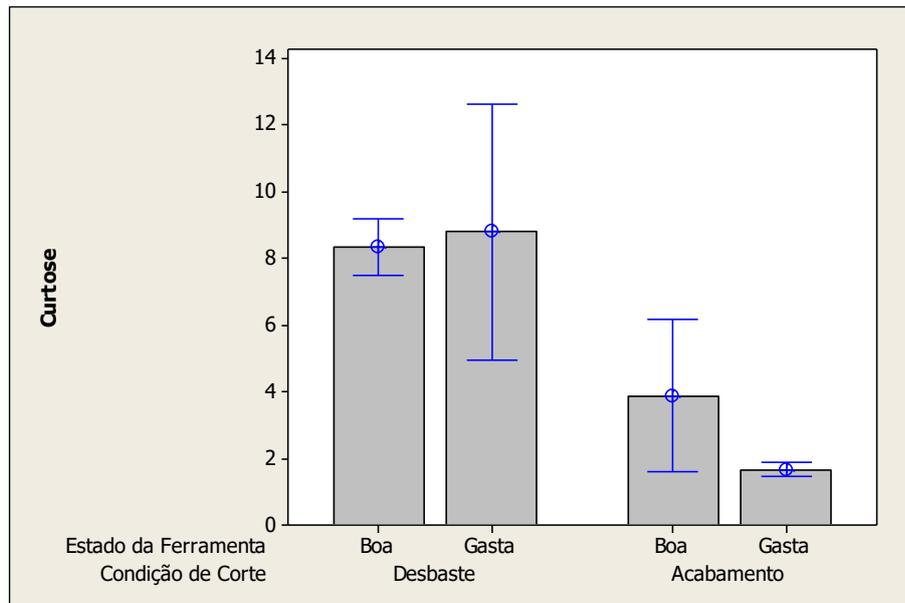


Figura 65 – Gráfico de intervalos da Curtose para um sinal na faixa de frequência de 2400 Hz a 3000 Hz

A curtose do sinal na banda de 2400 Hz a 3000 Hz, representada no gráfico de intervalos da figura 65, não fornece informações consistente sobre o estado da ferramenta. Em ambas as condições de corte os intervalos se sobrepõem.

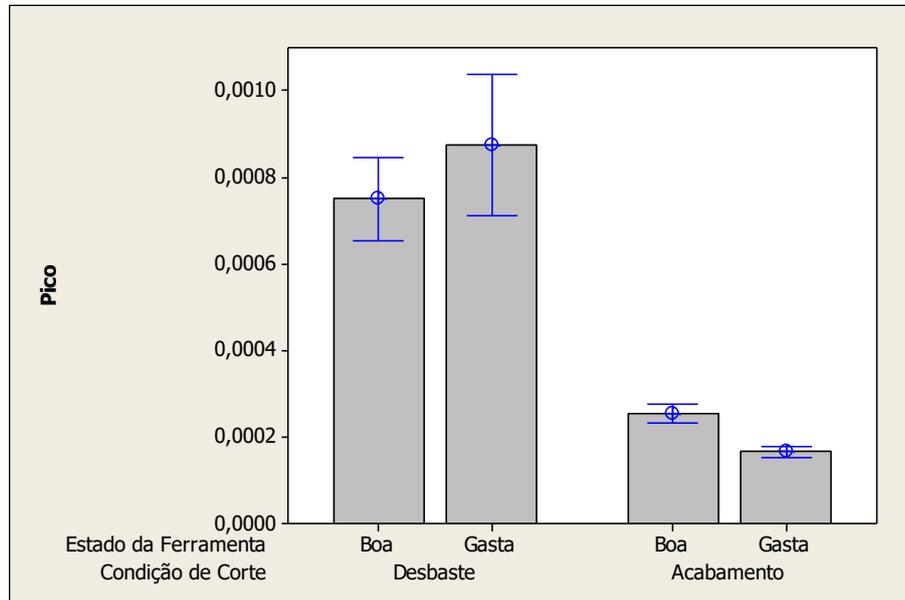


Figura 66 – Gráfico de intervalos do Pico para um sinal na faixa de frequência de 2400 Hz a 3000 Hz

Na figura 66, percebe-se que o pico não fornece informações consistentes a respeito do estado da ferramenta na condição de desbaste. Por outro lado, na condição de acabamento não

há sobreposição de barras de intervalo, logo, para esta condição, pode-se utilizar este parâmetro como indicador de que a ferramenta está desgastada.

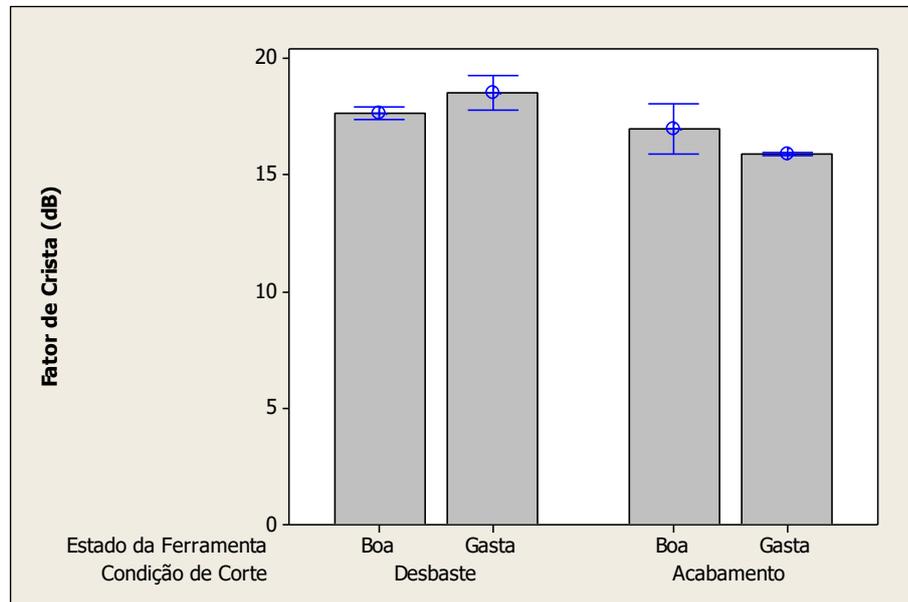


Figura 67 – Gráfico de intervalos do Fator de crista para um sinal na faixa de frequência de 2400 Hz a 3000 Hz

De acordo com a figura 67, não se pode utilizar o fator de crista como indicador do estado da ferramenta, qualquer que seja a condição de corte.

A tabela 6 traz um resumo de todos os resultados apresentados até agora. Para cada parâmetro, expressa-se se os dados são ou não significativos. Se houve uma relação dos dados obtidos com o estado da ferramenta, representa-se com a letra “S” (com fundo verde), caso contrário, representa-se com a letra “N” (com fundo vermelho).

Tabela 6 – Resumo da relação parâmetro estatístico com estado da ferramenta em todas as bandas de frequência

Banda de frequência	30Hz a 3,0 kHz		30 Hz a 700 Hz		700 Hz a 1,6 kHz		1,6 kHz a 2,4 kHz		2,4 kHz a 3,0 kHz	
	Desb.	Acab.	Desb.	Acab.	Desb.	Acab.	Desb.	Acab.	Desb.	Acab.
<i>RMS</i>	N	S	N	S	N	S	N	N	N	S
<i>Curtose</i>	N	S	N	N	N	S	S	S	N	N
<i>Pico</i>	N	N	S	S	N	N	N	N	N	S
<i>Fator de Crista</i>	N	S	N	N	N	N	S	S	N	N

Ao observar a tabela 6, percebe-se, de imediato, que há uma dificuldade maior, para todos os parâmetros, de indicar o desgaste da ferramenta numa condição de corte mais severa. Há bandas (30 Hz a 3,0 kHz; 700 Hz a 1,6 kHz e 2,4 kHz a 3,0 kHz) nas quais não há relação de nenhum dos parâmetros com o desgaste da ferramenta. Nas bandas que houve alguma relação (30 Hz a 700 Hz e 1,6 kHz a 2,4 k Hz), menos da metade dos parâmetros traduziram essa relação. No caso da banda de 30 Hz a 700 Hz, apenas o pico indicou o desgaste da ferramenta na condição de desbaste.

Já a banda de 1,6 kHz a 2,4 kHz, o desgaste acima do limite, na condição de desbaste, foi indicado pela curtose e pelo fator de crista em ambas as condições de corte, mostrando-se pois esta banda como a que pode fornecer melhores dados acerca do desgaste da ferramenta, seja qual for a condição de corte estabelecida. Certamente o sinal nessa banda de frequência teve um acentuação no número de picos, diminuindo, portando a quantidade destes mesmos picos acentuados. Dessa forma, os resultados estão em conformidade com a literatura.

Na condição de acabamento, porém, há uma relação maior do estado da ferramenta com os parâmetros estatísticos. Em mais da metade dos casos houve indicação do desgaste acima do limite. Na banda de 30 Hz a 3,0 kHz, por exemplo, todos os parâmetros, com exceção do pico, indicaram que a ferramenta estava desgastada. Nos demais casos, metade dos parâmetros mostraram alguma informação relevante.

Voltando-se a atenção para os parâmetros em si, percebeu-se que há alguns parâmetros com uma maior incidência de casos positivos dentro da análise que outros. Os parâmetros que mais demonstraram o estado da ferramenta foram a RMS e a curtose. O pico e o fator de crista tiveram menor quantidade de casos positivos (3 cada).

O pico indicou o estado da ferramenta na faixa de 2,4 kHz a 3,0 kHz apenas na condição de acabamento. Já na faixa de 30 Hz a 700 Hz, pôde-se indicar essa relação em ambas as condições de corte. Já o fator de crista demonstrou uma boa relação com o estado da ferramenta na faixa de 30 Hz a 3,0 kHz apenas no acabamento, enquanto que na faixa de 1,6 kHz a 2,4 kHz foi possível relacioná-lo em ambas as condições de corte.

A RMS foi um dos parâmetros que mais indicou o estado da ferramenta. Apenas na faixa de 700 Hz a 1,6 kHz não foi possível relacioná-los. Porém, sua capacidade de indicar que o desgaste da ferramenta ultrapassou os limites pré-estabelecidos na condição de acabamento.

Como foi explicado anteriormente, certamente esse fato deve-se ao nível de energia incrementado pelo desgaste da ferramenta na condição de desbaste ser bem abaixo do nível de energia já presente no sinal, no caso da ferramenta boa. Logo não foi possível relacionar o desgaste com a RMS nessa condição de corte.

A curtose indicou o estado da ferramenta tanto quanto a RMS. A vantagem deste parâmetro é que em um dos casos (na faixa de 1,6 kHz a 2,4 kHz) também indicou-se que a ferramenta estava gasta na condição de desbaste. Tal fato, levou a curtose a ser o parâmetro que melhor indica que a ferramenta está ou não apta para ser utilizada em um processo de fresamento. Isso ocorreu por conta do aumento do número de picos no sinal de vibração no caso de uma ferramenta desgastada, conforme Wang *et al.*(2014) e segundo Santos (2008), ao elevar-se o número de picos no sinal diminui-se o valor da curtose.

5. CONCLUSÕES

De acordo com os resultados obtidos com o presente trabalho, foi possível fazer as seguintes conclusões:

- A amplitude do espectro de frequência compreendido entre as frequências de 30 Hz e 700 Hz mostrou-se mais sensível ao desgaste da ferramenta.
- Dentre os parâmetros estatísticos, a RMS e a curtose foram os que melhor indicaram o desgaste da ferramenta de corte no domínio do tempo.
- A RMS somente indicou o desgaste da ferramenta na condição de acabamento.
- Os parâmetros curtose e fator de crista tiveram sucesso na identificação do estado da ferramenta tanto no acabamento quanto no desgaste, dentro da faixa de frequência entre 1,6 kHz e 2,4 kHz, no domínio do tempo.
- Na condição de corte de acabamento, foi possível ter uma melhor relação entre os parâmetros estatísticos do sinal de vibração e o estado da ferramenta.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Utilizar um acelerômetro tri-axial e relacionar os resultados obtidos nos três eixos com o desgaste;
- Fazer uma análise multissensorial;
- Utilizar métodos como Rede Neural ou Lógica fuzzy para a classificação do estado da ferramenta.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, F. R. DO V. **Análises Estatísticas e Reconhecimento de Padrão Aplicados em Diagnósticos de Defeitos em Rolamentos Através da Análise de Vibração**. [s.l.] Universidade Federal de Itajubá, 2007.
- ALTINTAS, Y. **Manufacturing Automation: Metal Cutting Mechanics, Machine Tool Vibrations, and CNC Design**. 1^a. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2000.
- ARFKEN, G.; WEBER, H. **Física matemática: métodos matemáticos para engenharia e física**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2007.
- BERKENBROCK, E. **Estudo do Efeito da direção e do sentido de corte na força de usinagem num processo de fresamento de formas complexas**. [s.l.] Sociedade Educacional de Santa Catarina, 2012.
- BONIFACIO, M. **Monitoramento do processo de torneamento de acabamento via sinais de vibração**. [s.l.] Universidade Estadual de Campinas, 1993.
- BRAGA, D. U. **Monitoramento do processo de Torneamento via Parâmetros Elétricos do Motor da Máquina**. [s.l.] Universidade Estadual de Campinas, 1992.
- BYRNE, G. *et al.* Tool condition monitoring (TCM)—the status of research and industrial application. **CIRP Annals- Manufacturing Technology**, v. 44, n. 2, p. 541–567, 1995.
- C. K. MADHUSUDANA; KUMAR, H.; NARENDRANATH, S. Condition monitoring of face milling tool using K-star algorithm and histogram features of vibration signal. **Engineering Science and Technology, an International Journal**, 2016.
- CALDEIRANI FILHO, J. **Estudo e Monitoramento do Processo de Fresamento Frontal com Fresas de Insertos Intecambiáveis**. [s.l.] Universidade Estadual de Campinas, 1998.
- CHAKRABORTY, P. *et al.* Modeling tool wear progression by using mixed effects modeling technique when end-milling AISI 4340 steel. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 205, n. 1-3, p. 190–202, ago. 2008.
- CHEN, X.; LI, B. Acoustic emission method for tool condition monitoring based on wavelet analysis. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 33, n. 9-10, p. 968–976, 6 maio 2006.
- CHO, S.; BINSAEID, S.; ASFOUR, S. Design of multisensor fusion-based tool condition monitoring system in end milling. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 46, n. 5-8, p. 681–694, 26 maio 2009.
- COSTA, C. **Monitoramento do processo de torneamento de desbaste via corrente elétrica do motor principal da máquina e via vibração da ferramenta**. [s.l.] Universidade Estadual de Campinas, 1995.
- CUI, Y. *et al.* Study on accurate tool wear monitoring based on acoustic emission signal. **Fourth International Seminar on Modern Cutting and Measurement Engineering**, v. 7997, p. 79970J–79970J–7, 26 dez. 2010.

CUNHA JR, S. S.; DUARTE, M. A. V. **USO DA TDA - MÉDIA NO DOMÍNIO DO TEMPO COMO FERRAMENTA DE IDENTIFICAÇÃO DE FALHAS EM CÂMBIOS AUTOMOTIVOS** (I. C. N. de E. M.-C. 2000, Ed.)I CONEM - Congresso Nacional de Engenharia Mecânica. **Anais...**Natal/RN: 2000

CUNHA, R. C. **Análise do Estado de Conservação de um Redutor de Velocidade Através da Técnica de Partículas de Desgaste no Óleo Lubrificante Auxiliada pela Análise de Vibrações**. [s.l.] Universidade Estadual Paulista, 2005.

DAVIES, M. A. *et al.* On The Measurement of Temperature in Material Removal Processes. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 56, n. 2, p. 581–604, jan. 2007.

DEARNLEY, P. A.; TRENT, E. M. Wear Mechanisms of Coated Carbide Tools. **Metals Technology**, v. 9, n. February, p. 60–75, 1982.

DESCHAMPS, F. **Contribuições para o desenvolvimento de um sistema de visão aplicado ao monitoramento do desgaste de ferramentas de corte – o sistema toolspy**. [s.l.] Universidade Federal de Santa Catarina, 2004.

DIMLA, D. E. Sensor signals for tool-wear monitoring in metal cutting operations—a review of methods. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 40, n. 8, p. 1073–1098, jun. 2000.

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. 3ª. ed. São Paulo: Artliber Editora, 2001.

DUARTE, V. M. A. **Manutenção Preditiva Via Análise de Vibrações**. Uberlândia/MG: Universidade Federal de Uberlândia., 2005.

EL-WARDANY, T. I.; GAO, D.; ELBESTAWI, M. A. Tool condition monitoring in drilling using vibration signature analysis. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 36, n. 6, p. 687–711, 1996.

FERRARESI, D. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**. 1ª. ed. São Paulo: Edgar Blucher, 1970.

GIRARDIN, F.; RÉMOND, D.; RIGAL, J. Tool wear detection in milling—An original approach with a non-dedicated sensor. **Mechanical Systems and Signal ...**, v. 24, p. 1907–1920, 2010.

GONDIM, R. M. **Aplicação da distribuição de weibull no monitoramento da operação de torneamento**. [s.l.] Universidade Federal de Uberlândia, 2008.

GRZESIK, W. **Advanced Machining Processes of Metallic Materials**. First ed. Amsterdam: Elsevier B. V., 2008.

HASE, A. *et al.* The relationship between acoustic emission signals and cutting phenomena in turning process. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 70, n. 5-8, p. 947–955, 6 out. 2013.

ISO 8688-1. **Tool Life Testing in Milling – Part 1: Face Milling**1989

- JANTUNEN, E. A summary of methods applied to tool condition monitoring in drilling. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 42, n. 9, p. 997–1010, jul. 2002.
- KALVODA, T.; HWANG, Y.-R. Analysis of signals for monitoring of nonlinear and non-stationary machining processes. **Sensors and Actuators A: Physical**, v. 161, n. 1-2, p. 39–45, jun. 2010.
- KOSARAJU, S.; ANNE, V. G.; POPURI, B. B. Online tool condition monitoring in turning titanium (grade 5) using acoustic emission: modeling. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 67, n. 5-8, p. 1947–1954, 28 nov. 2012.
- LI, K.; WANG, C.; CHU, W. An improved remote sensing technique for estimating tool – chip interface temperatures in turning. **Journal of Materials Processing Tech.**, v. 213, n. 10, p. 1772–1781, 2013.
- LIU, H. *et al.* On-line chatter detection using servo motor current signal in turning. **Science China Technological Sciences**, v. 54, n. 12, p. 3119–3129, 2011.
- MACÁRIO, C. C. L. **Utilização de filtros adaptativos para detecção de falhas em mancais de rolamentos**. [s.l.] Universidade Federal de Uberlândia, 2006.
- MACHADO, Á. R. *et al.* **Teoria da usinagem dos materiais**. 2ª edição ed. São Paulo: Editora Blucher, 2011.
- MAIA, L. H. A. **INFLUÊNCIA DAS CONDIÇÕES DE CORTE DO FRESAMENTO DO AÇO BAIXA LIGA ABNT 4140 NOS SINAIS VIBRACIONAIS E DE EMISSÃO ACÚSTICA**. [s.l.] Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, 2009.
- MARQUES, J. A. *et al.* **Influência da vibração no desgaste de ferramentas no fresamento em aços endurecidos** VII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica. **Anais...**São Luís/MA: ABCM, 2012
- MEOLA, T. **Monitoramento em tempo real da qualidade de sinais de vibrações, utilizando inteligência artificial**. [s.l.] UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA, 2005.
- MEOLA, T. ; DUARTE, M. A. V. **Monitoramento on-line de processos de usinagem via medição de vibrações** 16º POSMEC - Simpósio de Pós Graduação em Engenharia Mecânica. **Anais...**Uberlândia - MG: Simpósio de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, 2006
- MIKO, E.; NOWAKOWSKI, Ł. Vibrations in the Machining System of the Vertical Machining Center. v. 39, p. 405–413, 2012.
- MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C.; HUBELE, N. F. **Estatística Aplicada à Engenharia**. 2. ed. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2004.
- NEPOMUCENO, L. X. **Técnicas de Manutenção Preditiva**. Vol. 1 ed. São Paulo: Ed. Edgar Blucher, 1989.
- NÓBREGA, M. P. **Estudo Comparativo de Gráficos de Probabilidade Normal para Análise de Experimentos Fatoriais não Replicados**. [s.l.] Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2010.

ORHAN, S. *et al.* Tool wear evaluation by vibration analysis during end milling of AISI D3 cold work tool steel with 35 HRC hardness. **NDT & E International**, v. 40, n. 2, p. 121–126, mar. 2007.

PIGARI, A. C. **Monitoramento do Desgaste da Ferramenta no Processo de Torneamento usando Emissão Acústica**. Campinas - SP: Universidade Estadual de Campinas, 1995.

PUJANTE, J. *et al.* Investigations into wear and galling mechanism of aluminium alloy-tool steel tribopair at different temperatures. **Wear**, v. 308, n. 1-2, p. 193–198, 2013.

RAO, S. **Vibrações Mecânicas**. 4^a. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.

RAVINDRA, H. V.; SRINIVASA, Y. G.; KRISHNAMURTHY, R. Acoustic emission for tool condition monitoring in metal cutting. **Wear**, v. 212, n. 1, p. 78–84, nov. 1997.

RENÉ DE JESÚS, R.-T. *et al.* Driver current analysis for sensorless tool breakage monitoring of CNC milling machines. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 43, n. 15, p. 1529–1534, dez. 2003.

SANDVIK, C. **Catálogo principal**. Disponível em: <<http://www.sandvik.coromant.com/br>>. Acesso em: 17 dez. 2011.

SANTOS, J. A. Z. DOS. **Verificação da sensibilidade dos sinais de vibração, emissão acústica e corrente no acompanhamento da evolução do desgaste de brocas**. [s.l.] Instituto Superior Tupy, 2008.

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

SILVA, R. H. L. DA. **Monitoramento do Desgaste de Ferramentas no Fresamento de Topo Através dos Sinais de Potência e Emissão Acústica e Redes Neurais**. [s.l.] Universidade Federal de Uberlândia, 2010.

SOUTO, U. B. **Monitoramento do desgaste de ferramenta no processo de fresamento via emissão acústica**. [s.l.] Universidade Federal de Uberlândia, 2007.

STEPHENSON, D. A.; AGAPIOU, J. S. **Metal Cutting Theory and Practice**. 2nd. ed. Boca Raton, Flórida: Taylor and Francis Group, 2006.

SUPORTE AO MINITAB. **O que são gráficos normal e half normal dos efeitos?** Disponível em: <<http://support.minitab.com/pt-br/minitab/17/topic-library/modeling-statistics/doe/factorial-design-plots/normal-and-half-normal-effects-plots/>>. Acesso em: 25 fev. 2016.

TETI, R. *et al.* Advanced monitoring of machining operations. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 59, n. 2, p. 717–739, jan. 2010.

TRENT, E. M.; WRIGHT, P. K. **Metal Cutting**. 4. ed. ed. [s.l.] Butterworth-Heinemann, 2000.

VENKATA RAO, K.; MURTHY, B. S. N.; MOHAN RAO, N. Cutting tool condition monitoring by analyzing surface roughness, work piece vibration and volume of metal removed for AISI 1040 steel in boring. **Measurement: Journal of the International Measurement Confederation**, v. 46, n. 10, p. 4075–4084, 2013.

WANG, G. F. *et al.* Vibration sensor based tool condition monitoring using v support vector machine and locality preserving projection. **Sensors and Actuators, A: Physical**, v. 209, p. 24–32, 2014.

ZHANG, J. Z.; CHEN, J. C. Tool condition monitoring in an end-milling operation based on the vibration signal collected through a microcontroller-based data acquisition system. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 39, n. 1-2, p. 118–128, 2008.