

Monografia de Graduação

MONITORAMENTO DA EVOLUÇÃO DO DESGASTE DE UMA FERRAMENTA DE CORTE ATRAVÉS DE VIBRAÇÕES

José Felipe Nobre de Melo

Natal, fevereiro de 2014

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me conceder saúde e inteligência necessária para a conclusão deste trabalho.

A Petrobras, por ter concedido a bolsa e financiado o trabalho durante os dois anos.

Ao Programa de Recursos Humanos da Agência Nacional do Petróleo 14 da UFRN (PRH ANP - 14), que me orientou para a formação do trabalho.

Aos meus pais, João Melo e Viviani Nobre, que me incentivaram nos estudos e tiveram paciência comigo nos meus momentos mais difíceis.

Ao meu orientador Professor Ulisses Souto, por ter dado confiança na realização deste trabalho e está sempre disposto a ajudar.

A todos os amigos, por me concederem incentivo para a realização deste trabalho.

Paciência e perseverança tem o efeito mágico de fazer as dificuldades desaparecerem e os obstáculos sumirem.

John Quincy Adams

RESUMO

O desgaste excessivo em ferramentas de corte é um dos grandes problemas da indústria, causando distorções dimensionais e de acabamento, além de provocar custos adicionais. Para que a ferramenta seja sempre usada em boas condições, os métodos de detecção e sistemas de monitoramento são muito importantes para os processos de corte. Existem na literatura da usinagem vários trabalhos sobre monitoramento de desgaste, porém ainda não há consenso entre pesquisadores sobre um método totalmente eficaz. O objetivo deste trabalho, portanto, é dar uma contribuição nas técnicas de utilização do sinal de vibração para o monitoramento da evolução do desgaste da ferramenta em tempo real e com isso, determinar o momento correto de sua troca no processo fresamento. Para isto, será utilizado um centro de usinagem CNC Romi D600, em que serão fresados corpos de prova de aço 4340 (de grande aplicação em equipamentos de exploração de petróleo) e equipamentos para aquisição do sinal de vibração para compreender algumas características deste durante a usinagem. Os resultados dos experimentos indicam que o sinal de vibração é um bom indicador de várias situações que acontecem durante a usinagem, dentre estas, o estado de desgaste da ferramenta.

Palavras-chave: Monitoramento. Vibração. Desgaste. Ferramenta.

ABSTRACT

Excessive wear on cutting tools is one of big problems of industry, causing dimensional and finishing distortions, as well as causing additional costs. For the tool will always be used in good conditions, the methods of detection and monitoring systems are very important to the cutting process. Exist at literature of machining, several papers about wear monitoring, but there is no consensus among researchers on a method completely effective. The objective this study, therefore, is to give a contribution in the techniques of utilization of vibration signal for the evolution monitoring of tool wear in real time and thus, determine the correct time of your change at milling process. For this, is used a CNC Romi D600 machining center, in which workpiece of steel 4340 (wide application in oil exploration equipment) are milling and equipment for vibration signal acquisition to understand some features of this during machining. The experimental results indicate that the vibration signal is a good indicator of various situations that occur during the machining, among them the state of tool wear.

Keywords: Monitoring. Vibration. Wear. Tool.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Classificação dos processos de fabricação.....	12
Figura 2 – Direção dos movimentos de corte, de avanço e efetivo no fresamento	14
Figura 3 – Avanço por dente (f_z), avanço de corte (f_c) e avanço efetivo de corte (f_e) no fresamento	16
Figura 4 – Profundidade ou largura de usinagem (a_p), penetração de trabalho (a_e) e penetração de avanço (a_f) no fresamento.....	17
Figura 5 – Fresamento cilíndrico tangencial	17
Figura 6 – Fresamento cilíndrico tangencial	18
Figura 7 – Fresamento tangencial de encaixes “rabo de andorinha”	18
Figura 8 – Fresamento tangencial de perfil	18
Figura 9 – Fresamento frontal	18
Figura 10 – Fresamento frontal de canaletas com fresa de tampo	19
Figura 11 – Fresamento composto	19
Figura 12 – Representação do fresamento com movimento discordante e concordante.....	19
Figura 13 – Fresadora vertical	20
Figura 14 – Fresadora horizontal.....	20
Figura 15 – Fresadora universal	21
Figura 16 – Cunha de corte de uma ferramenta qualquer.....	24
Figura 17 – Elementos da cunha de corte de uma fresa frontal.....	24
Figura 18 – Operação de corte tridimensional	25
Figura 19 – Força de usinagem e seus componentes para os processos de torneamento e de fresamento.....	25
Figura 20 – Principais áreas e formas de desgaste de uma ferramenta	29
Figura 21 – Parâmetros utilizados para medir os desgastes das ferramentas de corte	31
Figura 22 – Comportamento do desgaste de uma ferramenta de corte com o tempo de Corte	32
Figura 23 – Número de publicações dos métodos de monitoramento direto para medir o desgaste da ferramenta.....	36
Figura 24 – Número de publicações dos métodos de monitoramento indireto para medir o desgaste da ferramenta	38
Figura 25 – Fotomicrografia do aço AISI 4340 com ampliação de 1000x	44
Figura 26 – Inseto Sandvik Coromant	45

Figura 27 – Fresa	46
Figura 28 – Centro de usinagem Romi	46
Figura 29 – Acelerômetro piezoelétrico.....	47
Figura 30 – Módulo condicionador de sinal e conversor analógico digital.....	47
Figura 31 – Chassi	47
Figura 32 – Resumo do sistema de aquisição.....	48
Figura 33 – Dinâmica da usinagem	48
Figura 34 – Desgaste de 0,338 mm	50
Figura 35 – Desgaste de 0,268 mm	50
Figura 36 – Experimento realizado	51
Figura 37 – Aquisição do Experimento 1 (duas pastilhas novas e a_p igual a 0,25 mm) no domínio do tempo	52
Figura 38 – Aquisição do Experimento 2 (duas pastilhas novas e a_p igual a 0,5 mm) no domínio do tempo	53
Figura 39 – Aquisição do Experimento 3 (duas pastilhas novas e a_p igual a 1 mm) no domínio do tempo	53
Figura 40 – Aquisição do Experimento 4 (duas pastilhas desgastadas e a_p igual a 0,5 mm) no domínio do tempo	54
Figura 41 – Aquisição do Experimento 5 (uma pastilha nova e uma desgastada e a_p igual 0,5 mm) no domínio do tempo	55
Figura 42 – Média quadrática das amplitudes de 10 a 15 segundos com variação da profundidade.....	55
Figura 43 – Média quadrática das amplitudes de 50 a 55 segundos com variação da profundidade	56
Figura 44 – Média quadrática das amplitudes de 10 a 15 segundos.....	56
Figura 45 – Média quadrática das amplitudes de 50 a 55 segundos.....	57
Figura 46 – Comportamento do sinal do Experimento 1 (duas pastilhas novas e a_p igual a 0,25 mm) no tempo de 10 segundos	58
Figura 47 – Comportamento do sinal do Experimento 2 (duas pastilhas novas e a_p igual a 0,5 mm) no tempo de 10 segundos	58
Figura 48 – Comportamento do sinal do Experimento 3 (duas pastilhas novas e a_p igual a 1 mm) no tempo de 10 segundos	59
Figura 49 – Comportamento do sinal do Experimento 4 (duas pastilhas desgastadas e a_p igual a 0,5 mm) no tempo de 10 segundos	60

Figura 50 – Comportamento do sinal do Experimento 5 (uma pastilha nova e uma desgastada e a_p igual a 0,5 mm) no tempo de 10 segundos	60
Figura 51 – Comportamento do sinal do Experimento 1 (duas pastilhas novas e a_p igual a 0,25 mm) na quinta marcação de vermelho da Figura 46.....	61
Figura 52 – Comportamento do sinal do Experimento 2 (duas pastilhas novas e a_p igual a 0,5 mm) na quinta marcação de vermelho da Figura 47.....	61
Figura 53 – Comportamento do sinal do Experimento 3 (duas pastilhas novas e a_p igual a 1 mm) na quinta marcação de vermelho da Figura 48.....	62
Figura 54 – Comportamento do sinal do Experimento 4 (duas pastilhas desgastadas e a_p igual a 0,5 mm) na quinta marcação de vermelho da Figura 49.....	62
Figura 55 – Comportamento do sinal do Experimento 5 (uma pastilha nova e uma desgastada e a_p igual a 0,5 mm) na quinta marcação de vermelho da Figura 50.....	63
Figura 56 – Aquisição do Experimento 1 (duas pastilhas novas e a_p igual a 0,25 mm) no domínio das frequências	63
Figura 57 – Aquisição do Experimento 2 (duas pastilhas novas e a_p igual a 0,5 mm) no domínio das frequências	64
Figura 58 – Aquisição do Experimento 3 (duas pastilhas novas e a_p igual a 1 mm) no domínio das frequências.....	64
Figura 59 – Aquisição do Experimento 4 (duas pastilhas desgastadas e a_p igual a 0,5 mm) no domínio das frequências	65
Figura 60 – Aquisição do Experimento 5 (uma pastilha nova e uma desgastada e a_p igual 0,5 mm) no domínio das frequências.....	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição química do aço SAE/AISI 4340	32
Tabela 2 – Composição química do aço SAE/AISI 4340	44
Tabela 3 – Parâmetros de usinagem empregados nos experimentos.....	49

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
1.1 OBJETIVOS	11
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	11
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
2.1 USINAGEM	12
2.1.1 Classificação dos processos de fabricação	12
2.1.2 Conceito	12
2.1.3 Grandezas físicas da operação de corte	13
2.1.4 Fresamento	17
2.1.5 Força de usinagem	24
2.2 AVARIAS E DESGASTES DE FERRAMENTAS DE USINAGEM	26
2.2.1 Avarias	26
2.2.2 Desgastes	27
2.3 FIM DE VIDA DE FERRAMENTAS DE USINAGEM	29
2.4 AÇO SAE/AISI 4340	32
2.5 MONITORAMENTO NA USINAGEM	33
2.5.1 Métodos de monitoramento direto na usinagem	35
2.5.2 Métodos de monitoramento indireto na usinagem	38
2.5.3 Monitoramento de usinagem via vibração	41
3 MATERIAIS E MÉTODOS	44
3.1 PRINCIPAIS MATERIAIS E EQUIPAMENTOS UTILIZADOS	44
3.1.1 Aço	44
3.1.2 Inserto	45
3.1.3 Fresa	45
3.1.4 Centro de usinagem	46
3.1.5 Sistema de aquisição	47
3.2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	48
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	52
5 CONCLUSÃO	66
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	67
7 REFERÊNCIAS	68

1 INTRODUÇÃO

O desgaste excessivo em ferramentas de corte é um dos grandes problemas da indústria, causando distorções dimensionais e de acabamento, além de provocar custos adicionais. Então, para que a ferramenta seja sempre usada em boas condições, os métodos de detecção e sistemas de monitoramento são muito importantes para os processos de corte.

A necessidade de diminuir os tempos de paradas indesejáveis vem aumentando cada vez mais, provocados pelas trocas de ferramentas devido à quebra e desgaste excessivos das mesmas. Na maioria das vezes, a medição de desgastes é feita diretamente na ferramenta através de métodos ópticos adequados para esse procedimento, causando uma interrupção do processo, e assim tempos improdutivos e conseqüentemente, prejuízo na indústria.

Um ponto essencial, talvez o mais crítico na fabricação 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.

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 dos equipamentos industriais, da quebra destes, facilitando assim, uma programação pontual de manutenção (MEOLA; DUARTE, 2006).

A manutenção preditiva consiste, na maioria das vezes, de uma sequência de subsistemas para a condução 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).

Os ensaios serão realizados no centro de usinagem CNC e o material a ser usinado é o aço AISI 4340 o qual é também empregado na fabricação de componentes de equipamentos da indústria petrolífera, na indústria automotiva e construção naval. Na área da indústria do petróleo, esse aço pode ser encontrado, por exemplo, em eixos das caixas de redutor de unidade de bombeamento e nas engrenagens deste redutor.

1.1 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo contribuir para o estudo de vibração do sistema porta-ferramenta/ferramenta/peça para monitorar o processo de desgaste e quebra da ferramenta de usinagem no processo de fresamento frontal. Com isso, foi montado um sistema de aquisição que consta de alguns equipamentos como acelerômetro piezoelétrico, que transforma os sinais de vibração em voltagem, permitindo a leitura dos dados pelo computador, acoplador que viabiliza a aquisição dos dados pelo acelerômetro e módulo condicionador de sinal e conversor analógico digital que transformam esses sinais, podendo ser lidos e armazenados através do computador.

Com o intuito de minimizar o número de paradas, aumentar a confiabilidade da ferramenta, melhorar a qualidade do produto final e reduzir custos, propõe-se uma contribuição nas pesquisas sobre o monitoramento em tempo real do estado da ferramenta no processo de fresamento através da medição indireta de desgastes e avarias.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Fazer uma análise qualitativa dos sinais adquiridos com o estágio de desgaste da ferramenta de corte.
- Verificar o potencial do sinal de vibração para uma verificação mais aprofundada de sua correlação com o desgaste em situações de corte mais amplas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 USINAGEM

2.1.1 Classificação dos processos de fabricação

Os processos de fabricação podem ser classificados com remoção de cavaco e sem remoção de cavaco, conforme é mostrado na Figura 1. No primeiro caso, esse processo é chamado de usinagem no qual este trabalho aborda esse processo de fabricação. No segundo, pode ser classificado em fundição, soldagem, metalurgia do pó, conformação entre outros.

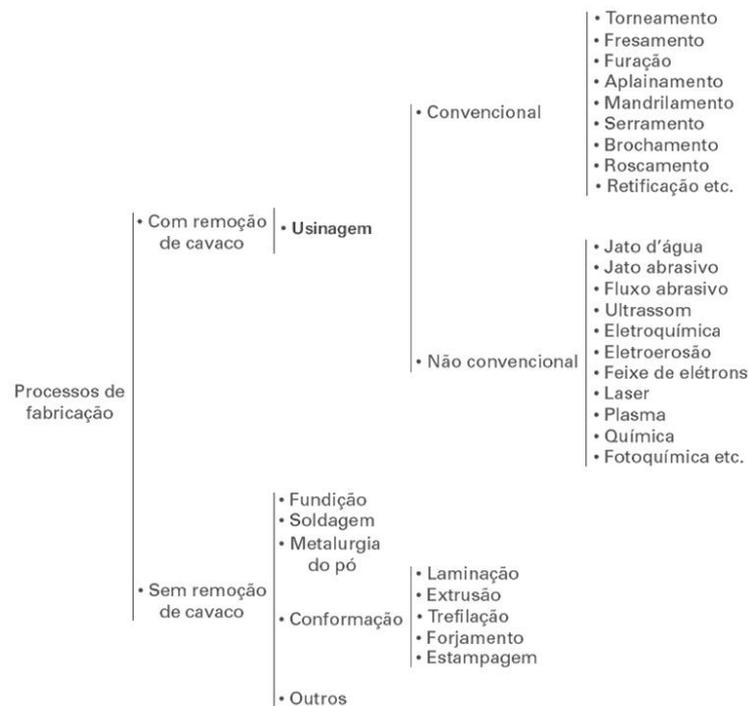


Figura 1 – Classificação dos processos de fabricação (MACHADO *et al.*, 2011).

2.1.2 Conceito

A usinagem é um processo mecânico de fabricação que ocorre através de movimentos relativos entre a ferramenta e a peça, onde esta sofre um processo de remoção de material. Para efeito de estudo, o processo de usinagem sempre ocorre supondo-se que a peça está parada e a ferramenta em movimento.

Os processos de usinagem podem ser divididos em duas grandes categorias: convencionais e processos não-convencionais. No primeiro caso, as operações de corte

empregam energia mecânica na remoção do material, principalmente por cisalhamento, no contato físico da ferramenta com a peça. No segundo, as operações utilizam-se de outros tipos de energia de usinagem (exemplo: termelétrica), não geram marcas-padrão na superfície da peça e a taxa volumétrica de remoção de material é muito menor que a dos processos convencionais – exemplo: laser (radiação), eletroerosão (elétrons) e plasma (gases quentes) (KALPAKJIAN, 1995 *apud* SOUZA, 2004).

Os processos convencionais de usinagem podem ainda ser subdivididos em duas classes: usinagem com ferramentas de corte com geometria definida – exemplo: torneamento, fresamento, furação; e usinagem com ferramentas de corte com geometria não-definida – exemplo: retificação, brunimento, lapidação (SOUZA, 2004).

2.1.3 Grandezas físicas da operação de corte

Para melhor entendimento dos processos de usinagem é necessário definir as grandezas físicas da operação de corte. A norma que é responsável por esses conceitos é a NBR 6162 – *Movimentos e Relações Geométricas na Usinagem dos Metais: Terminologia*. As definições a seguir baseiam-se nessa norma.

i) Classificação dos movimentos

Podem ser classificados como ativos e passivos. Os ativos são responsáveis pela remoção do material no momento em que ocorre o processo e os passivos não ocasionam a remoção do material quando acontece a usinagem.

Os movimentos ativos (Figura 2) podem ser classificados em (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2001):

- Movimento de corte: é o movimento entre a ferramenta e a peça, no qual, sem a ocorrência do movimento de avanço, provoca uma única rotação a remoção de cavaco.
- Movimento de avanço: é o movimento entre a ferramenta e a peça que, com o movimento de corte, causa a remoção do cavaco, durante as rotações ou cursos da ferramenta. O movimento de avanço pode ser contínuo, exemplo disso é o torneamento e a furação, ou intermitente, no qual o aplainamento pode ser considerado um exemplo.
- Movimento efetivo: é o movimento entre a ferramenta e a peça, realizados ao mesmo tempo. Quando o movimento de avanço é contínuo, o movimento efetivo é o

resultante da composição dos movimentos de corte e de avanço. Quando o movimento de avanço é intermitente, o movimento efetivo é o próprio movimento de corte.

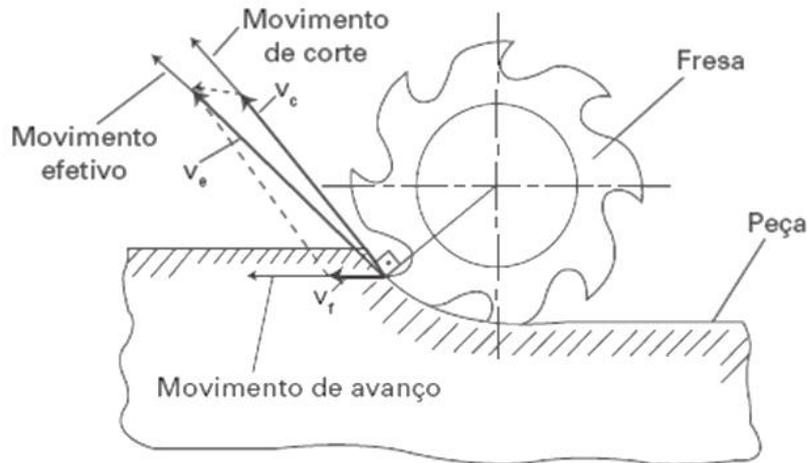


Figura 2 – Direção dos movimentos de corte, de avanço e efetivo no fresamento (MACHADO *et al.*, 2011).

Já os movimentos passivos podem ser classificados como (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2001):

- Movimento de ajuste: é o deslocamento entre a ferramenta e a peça, no qual tem o objetivo de determinar a espessura da camada de material a ser removida. Nos processos de sangramento, furação e brochamento, este movimento não ocorre, pois a espessura de material a ser removida está definida pela geometria da ferramenta.
- Movimento de correção: realizado entre a ferramenta e a peça, empregado para compensar alterações de posicionamento devidas, por exemplo, ao desgaste da ferramenta, variações térmicas, deformações plásticas, entre outras, que normalmente incidem durante a ocorrência do processo.
- Movimento de aproximação: é o deslocamento entre a ferramenta e a peça com o qual a ferramenta, antes do início da usinagem, é aproximada da peça.
- Movimento de recuo: é o movimento que ocorre entre a ferramenta e a peça com o qual a ferramenta, após a usinagem, é afastada da peça.

ii) Classificação das direções dos movimentos

As direções dos movimentos que são responsáveis diretamente pela retirada do cavaco são (FERRARESI, 1970):

- Direção de corte: direção instantânea do movimento de corte.
- Direção de avanço: direção instantânea do movimento de avanço.
- Direção efetiva: direção instantânea do movimento efetivo de corte.

iii) Classificação das velocidades

As velocidades podem ser classificadas em (MACHADO *et al.*, 2009):

- Velocidade de corte (V_c): é a velocidade instantânea do ponto de referência da aresta cortante, segundo a direção e sentido de corte (Figura 2) e é dada em (m/min). Ela é calculada pela Equação 1:

$$V_c = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{1000} \quad (1)$$

Onde: d = diâmetro da peça ou da ferramenta (mm); e n = número de rotações (rpm).

- Velocidade de avanço (V_f): é a velocidade instantânea da ferramenta segundo a direção e sentido de avanço (Figura 2) e a unidade é dada em (mm/mim). A velocidade de avanço é calculada pela Equação 2:

$$V_f = f \cdot n \quad (2)$$

Onde: f = avanço (mm/volta); e n = número de rotações (rpm).

- Velocidade efetiva de corte (V_e): é a velocidade instantânea do ponto de referência da aresta cortante, segundo a direção e o sentido efetivo do corte (Figura 2) e é dada em (m/min). Ela é calculada vetorialmente pela Equação 3:

$$\vec{V}_e = \vec{V}_c + \vec{V}_f \quad (3)$$

iv) Classificação das grandezas de corte

São grandezas que devem ser ajustadas na máquina. Essas podem ser classificadas como (MACHADO *et al.*, 2009):

- Avanço: é o percurso de avanço em cada volta da peça (mm/volta) ou em cada curso da ferramenta (mm/golpe). Para a fresa, que possui mais de um dente, tem-se o avanço por dente (f_z), que representa o percurso de avanço de cada dente medido na direção do avanço da ferramenta. A Equação 4 representa esta relação e a unidade é dada em (mm/rev):

$$f = f_z \cdot z \quad (4)$$

Onde: z = número de dentes.

O avanço por dente pode ser decomposto no avanço de corte (f_c) e no avanço efetivo de corte (f_e), mostrados na Figura 3. O primeiro (f_c) é a distância entre duas superfícies consecutivas em usinagem medida na direção perpendicular à direção de corte no plano de trabalho (Equação 5), onde a unidade é (mm/dente). O segundo (f_e) é a distância entre duas superfícies consecutivas em usinagem medida na direção perpendicular à direção efetiva de corte no plano de trabalho (Equação 6).

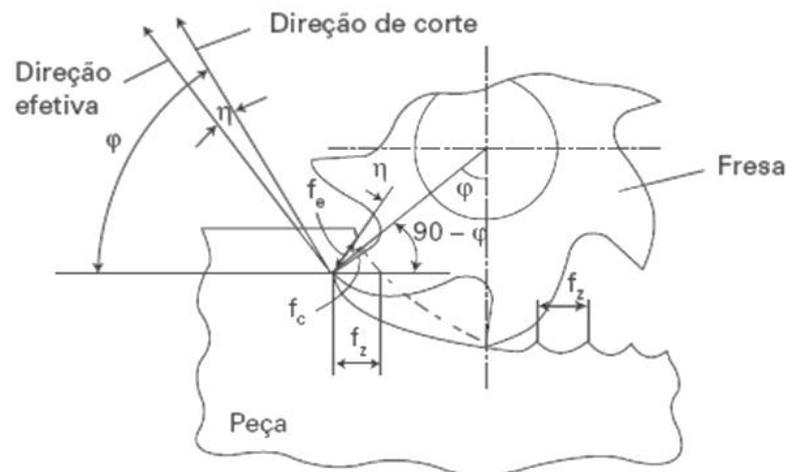


Figura 3 – Avanço por dente (f_z), avanço de corte (f_c) e avanço efetivo de corte (f_e) no fresamento (MACHADO *et al.*, 2011).

$$f_c = f_z \cdot \sin \varphi \quad (5)$$

$$f_e = f_z \cdot \sin(\varphi - \eta) \quad (6)$$

- Profundidade ou largura de corte (a_p): é a profundidade ou largura de penetração da aresta principal de corte, medida em relação a uma direção perpendicular ao plano de trabalho (Figura 4). A unidade é dada em (mm).
- Penetração de trabalho (a_e): é a penetração da ferramenta em relação à peça, medida no plano de trabalho e em uma direção perpendicular à direção de avanço (Figura 4). A unidade é em (mm).
- Penetração de avanço (a_f): é a grandeza de penetração da ferramenta medida no plano de trabalho e na direção de avanço (Figura 4). A unidade é dada em (mm).

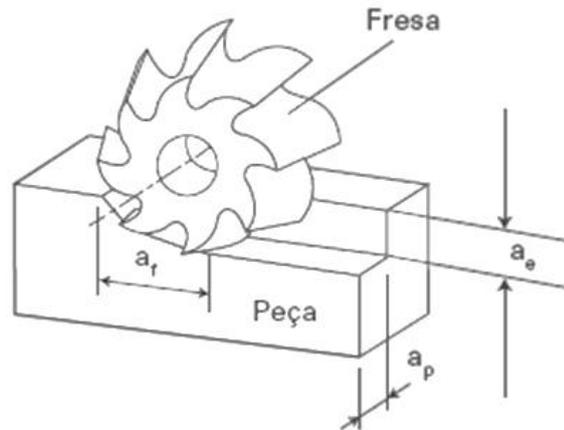


Figura 4 – Profundidade ou largura de usinagem (a_p), penetração de trabalho (a_e) e penetração de avanço (a_f) no fresamento (MACHADO *et al.*, 2011).

2.1.4 Fresamento

O fresamento é um processo mecânico de usinagem que tem objetivo obter uma superfície com o auxílio de ferramentas geralmente multicortantes. Portanto, a ferramenta gira e a peça ou a ferramenta se movem em uma determinada trajetória. O fresamento é dividido em dois tipos básicos (FERRARESI, 1970):

- Fresamento cilíndrico tangencial: é um processo de fresamento com o objetivo de obter uma superfície plana paralela ao eixo de rotação da ferramenta (Figuras 5 e 6). Se a superfície obtida não for plana ou o eixo de rotação da ferramenta for inclinado em relação à superfície originada na peça, será considerado um processo especial de fresamento tangencial (Figuras 7 e 8).



Figura 5 – Fresamento cilíndrico tangencial (FERRARESI, 1970).

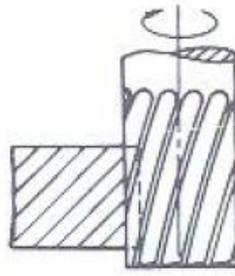


Figura 6 – Fresamento cilíndrico tangencial (FERRARESI, 1970).

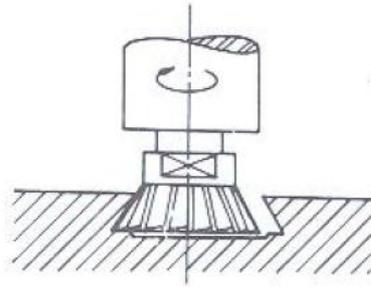


Figura 7 – Fresamento tangencial de encaixes “rabo de andorinha” (FERRARESI, 1970).

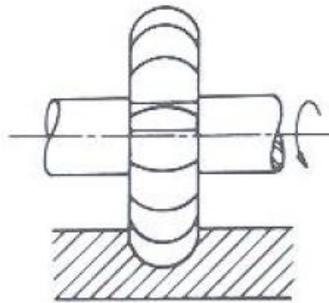


Figura 8 – Fresamento tangencial de perfil (FERRARESI, 1970).

- Fresamento frontal: é direcionado à obtenção de superfície plana perpendicular ao eixo de rotação da ferramenta (Figuras 9 e 10).

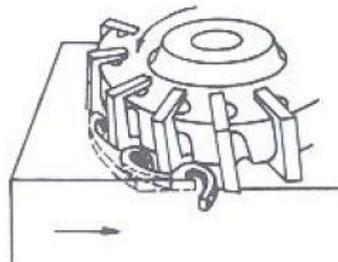


Figura 9 – Fresamento frontal (FERRARESI, 1970).

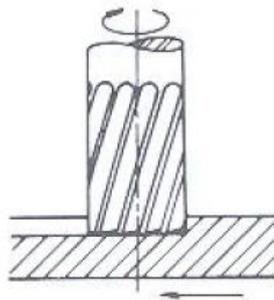


Figura 10 – Fresamento frontal de canaletas com fresa de tampo (FERRARESI, 1970).

- Fresamento composto: é quando os dois tipos básicos de fresamento compõem simultaneamente, podendo haver ou não predominância de um sobre o outro (Figura 11).

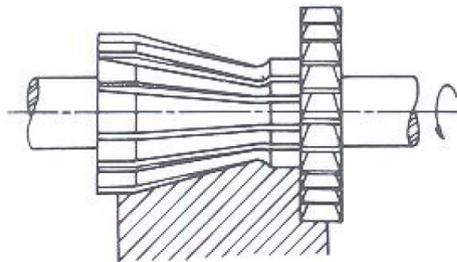


Figura 11 – Fresamento composto (FERRARESI, 1970).

No fresamento, dependendo do sentido de rotação da ferramenta e o avanço da peça, existem o fresamento concordante e o fresamento discordante. No fresamento discordante o avanço e o movimento de corte têm sentidos contrários, ao passo que no fresamento concordante eles apresentam o mesmo sentido, conforme ilustrado na Figura 12. Porém, de acordo com a posição da fresa em relação à peça, um processo de fresamento pode apresentar uma parte concordante e outra discordante (SOUTO, 2007).

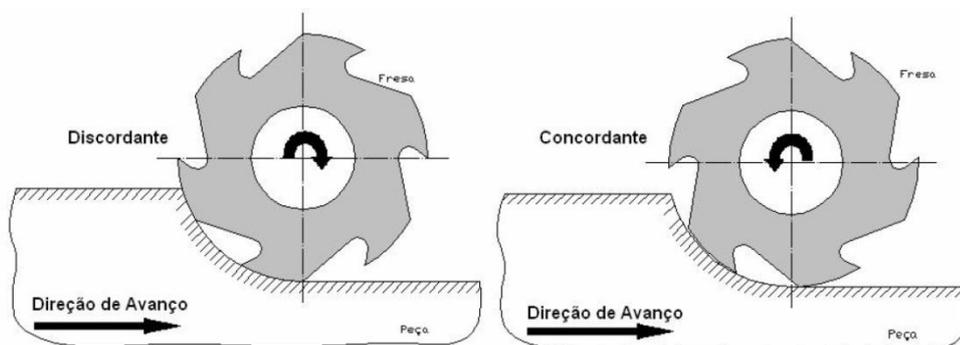


Figura 12 – Representação do fresamento com movimento discordante e concordante (SOUTO, 2007).

Existem alguns tipos de fresadoras e essas podem ser diferenciadas pela posição do eixo-árvore com relação à mesa da peça:

- Fresadora vertical: é quando o eixo-árvore ocupa a posição vertical, ou seja, perpendicular à superfície da mesa da máquina, como mostra a Figura 13. A fixação da peça pode ser através de uma morça ou divisor e ela se desloca em relação à ferramenta nas coordenadas x e/ou y .

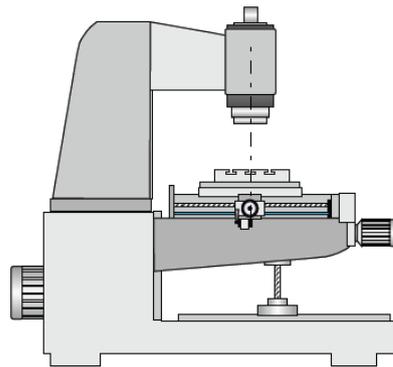


Figura 13 – Fresadora vertical (SCHROETER; STOETERAU; WEINGAERTNER, 2004).

- Fresadora horizontal: é quando o eixo árvore ocupa a posição horizontal, ou seja, paralela à superfície da mesa da máquina, conforme ilustrado na Figura 14. A fixação da peça pode ser através de uma morça ou divisor e ela se desloca em relação à ferramenta nas coordenadas x e/ou y .

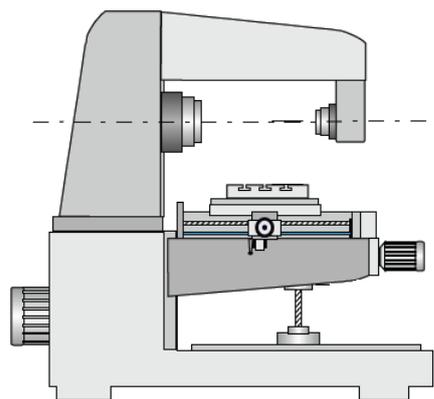


Figura 14 – Fresadora horizontal (SCHROETER; STOETERAU; WEINGAERTNER, 2004).

- Fresadora universal: é a fresadora mais versátil porque permite que sejam efetuados diversos tipos de trabalhos diferentes (Figura 15). Essa versatilidade é justificada pelos acessórios especiais tais como: mesa circular, mesa inclinável, cabeçote universal, cabeçote divisor, eixo porta-fresas, entre outros. A peça se desloca nos eixos x , y e z e

ainda pode sofrer rotações nos sentidos horário e anti-horário ao mesmo tempo dos movimentos tridimensionais.

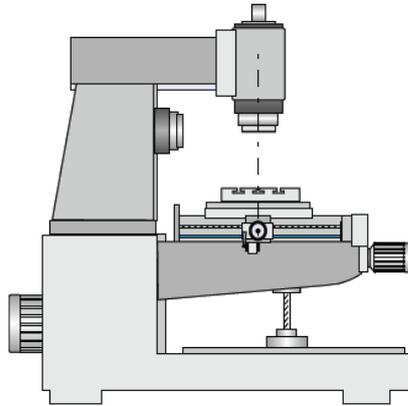


Figura 15 – Fresadora universal (SCHROETER; STOETERAU; WEINGAERTNER, 2004).

i) Ferramenta de corte

a) Material

O processo de usinagem é baseado na retirada de material, utilizando como ferramenta um material mais duro e mecanicamente mais resistente que a peça. A partir do princípio da dureza relativa, o surgimento de novos materiais e ligas estruturais com excelentes propriedades de resistência mecânica e elevada dureza contribuíram para o aparecimento de novos materiais para a confecção de ferramentas mais resistentes para as operações de usinagem. No entanto, a usinagem de materiais frágeis ou em operações de cortes interrompidos requer ferramentas com materiais que apresentem tenacidade suficiente para suportar os impactos inerentes ao processo de usinagem. Normalmente, dureza e tenacidade são duas propriedades distintas (geralmente alta dureza está relacionado com a baixa tenacidade e vice-versa), então, o balanço dessas propriedades nos materiais de ferramenta de corte se tornou um desafio para os fabricantes. A conciliação dessas propriedades foi conquistada com a produção de ferramentas com diferentes composições químicas, refinamento de grãos, controle dos processos de fabricação e do tratamento térmico, o que dar graus compatíveis de dureza e qualidade (MACHADO *et al.*, 2009).

De acordo com Machado *et al.* (2009), as principais propriedades desejáveis em um material para ferramenta de corte são:

- Alta dureza;
- Tenacidade suficiente para evitar falha por fratura;

- Alta resistência ao desgaste abrasivo;
- Alta resistência à compressão;
- Alta resistência ao cisalhamento;
- Boas propriedades mecânicas e térmicas em temperaturas elevadas;
- Alta resistência ao choque térmico;
- Alta resistência ao impacto;
- Ser inerte quimicamente.

Não existe uma classificação geral de materiais para ferramentas. Esses materiais citados abaixo estão em ordem crescente de dureza a quente e resistência ao desgaste por abrasão. Normalmente, quando se aumenta a dureza a quente e a resistência ao desgaste por abrasão, diminui a tenacidade do material. Com base nas suas características químicas, eles podem ser agrupados da seguinte maneira (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2001):

- Aços rápidos;
- Aços rápidos com cobertura;
- Metal duro;
- Metal duro com cobertura;
- Material cerâmico;
- Nitreto de boro cúbico;
- Diamante.

b) Geometria

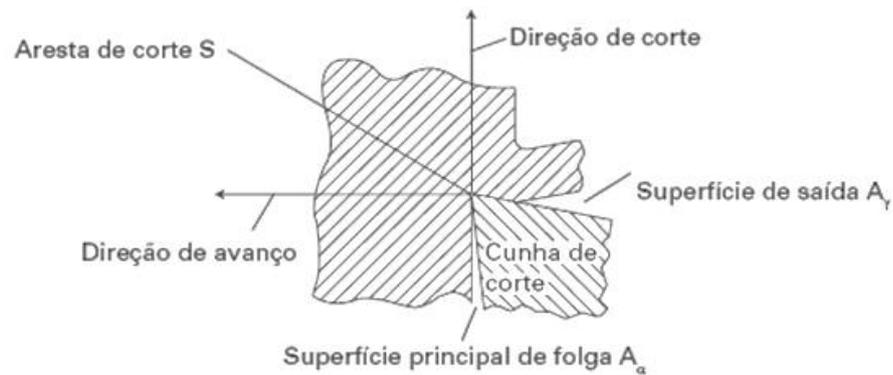
A forma da geometria da ferramenta de corte exerce grande influência no desempenho da usinagem. Por melhor que seja o material dela, se a sua geometria não tiver sido preparada adequadamente, não haverá sucesso na operação. A sua importância é tão grande que se faz necessário normalizar, da maneira mais conveniente possível, os ângulos da cunha cortante para uniformizar a nomenclatura entre os profissionais e a literatura especializada (MACHADO *et al.*, 2009). As definições a seguir, baseiam-se na norma brasileira NBR 6163 – Conceitos da Técnica de Usinagem: Geometria da Cunha Cortante: Terminologia.

De acordo com Diniz, Marcondes e Coppini (2001), as ferramentas de usinagem apresentam, geralmente, as seguintes partes construtivas:

- Parte de corte: parte ativa da ferramenta constituída pelas suas cunhas de corte. A parte ativa da ferramenta é construída ou fixada sobre um suporte ou cabo da

ferramenta, através do qual é possível fixar a ferramenta para construção, afiação, reparo, controle e trabalho. A Figura 17 mostra que a ferramenta poderá ser fixada pelo seu eixo.

- Cunha de corte: é a cunha da ferramenta, formada pela intersecção das superfícies de saída e folga (Figura 16).
- Superfície de saída (A_γ): é a superfície da cunha de corte sobre a qual o cavaco é formado e sobre a qual o cavaco escoo durante sua saída da região do trabalho de usinagem (Figuras 16 e 17).
- Superfície principal de folga (A_α): é a superfície da cunha de corte da ferramenta que contém sua aresta principal de corte e que defronta com a superfície em usinagem principal (Figuras 16 e 17).
- Superfície secundária de folga (A'_α): é a superfície da cunha de corte da ferramenta que contém sua aresta de corte secundária e que defronta com a superfície em usinagem secundária (Figuras 16 e 17).
- Aresta principal de corte S: é a aresta da cunha de corte formada pela intersecção das superfícies de saída e de folga principal (Figura 16). Gera na peça a superfície em usinagem principal (Figura 17).
- Aresta secundária de corte S': é a aresta da cunha de corte formada pela intersecção das superfícies de saída e de folga secundária. Gera na peça a superfície em usinagem secundária (Figura 17).
- Ponta de corte: é a parte da cunha de corte onde se encontram as arestas principal e secundária de corte (Figura 17). A ponta de corte pode ser a intersecção das arestas, ou a concordância das duas arestas através de um arredondamento, ou o encontro das duas arestas através de um chanfro.



Plano da figura = Plano de trabalho

Figura 16 – Cunha de corte de uma ferramenta qualquer (MACHADO *et al.*, 2011).

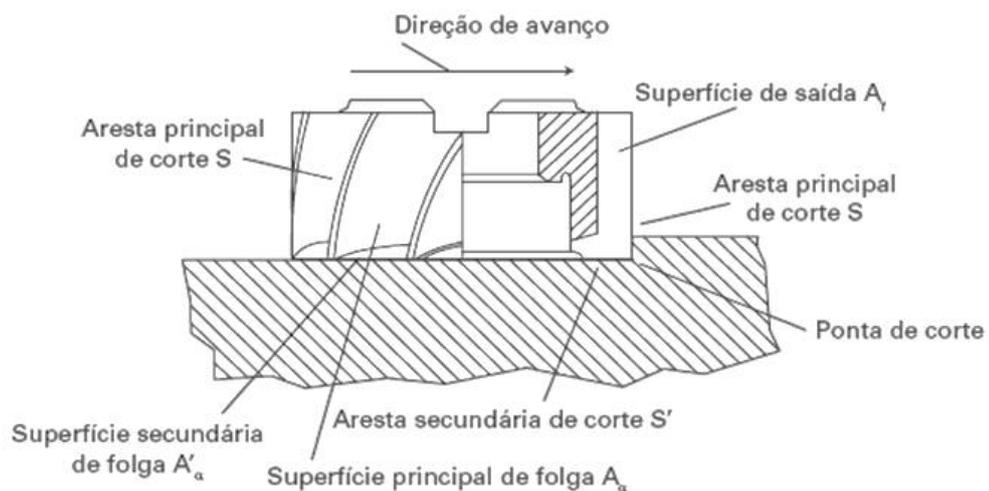


Figura 17 – Elementos da cunha de corte de uma fresa frontal (MACHADO *et al.*, 2011).

2.1.5 Força de usinagem

Os conhecimentos da força de usinagem que age sobre a cunha cortante e o estudo de seus componentes são de grande importância, porque a partir disso, pode-se estimar a potência necessária para o corte, bem como as forças que atuam nos elementos da máquina-ferramenta, além de manter relação com o desgaste das ferramentas de corte, influenciando a viabilidade econômica do processo (MACHADO *et al.*, 2009).

A formação dos cavacos nos processos de usinagem ocorre, na maioria das operações reais, tridimensionalmente, como mostra Figura 18.

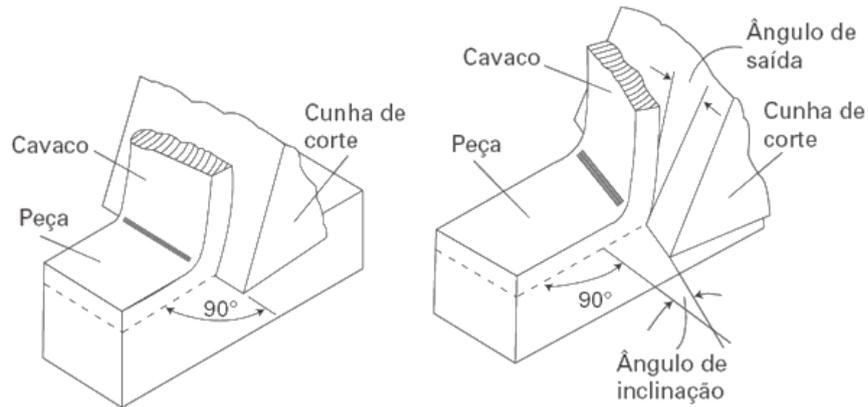


Figura 18 – Operação de corte tridimensional (MACHADO et al., 2011).

Por estar no espaço tridimensional, a força de usinagem (F_u) possui três componentes básicos que agem diretamente na cunha cortante e conseqüentemente, na estrutura da máquina-ferramenta. A Figura 19 mostra a força de usinagem tridimensional e seus componentes para os processos de torneamento e de fresamento (MACHADO *et al.*, 2009).

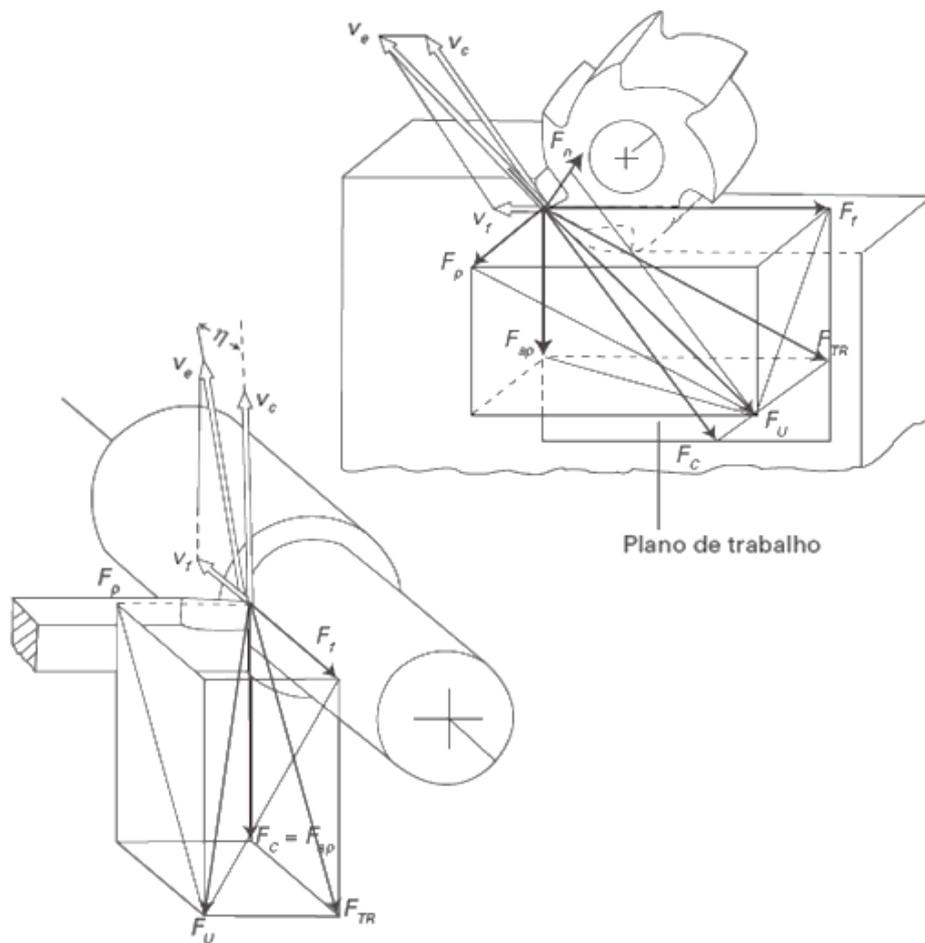


Figura 19 – Força de usinagem e seus componentes para os processos de torneamento e de fresamento (FERRARESI, 1977 *apud* MACHADO *et al.*, 2011).

Segundo Machado *et al.* (2009), pode-se identificar seis importantes forças de componentes da força de usinagem:

- Força de corte ou força principal de corte (F_c): é a projeção da força de usinagem sobre o plano de trabalho, na direção de corte, dada pela velocidade de corte.
- Força de avanço (F_f): é a projeção da força de usinagem sobre o plano de trabalho, na direção de avanço, dada pela velocidade de avanço.
- Força passiva ou força de profundidade (F_p): é a projeção da força de usinagem perpendicular ao plano de trabalho.
- Força ativa (F_{TR}): é a projeção da força de usinagem sobre o plano de trabalho.
- Força de compressão (F_n): é a projeção da força de usinagem sobre uma direção perpendicular à superfície principal de corte.
- Força de apoio (F_{ap}): é a projeção da força de usinagem sobre uma direção perpendicular à direção de avanço, situada no plano de trabalho.

Como a força de usinagem (dada em Newton) é normalmente decomposta nos seus três principais componentes, então:

$$F_U = \sqrt{F_{ap}^2 + F_f^2 + F_p^2} \quad (7)$$

2.2 AVARIAS E DESGASTES DE FERRAMETAS DE USINAGEM

2.2.1 Avarias

A avaria, que acontece de maneira repentina e inesperada, é quando ocorre um lascamento ou trinca. As avarias tornam-se mais comuns nos processos de corte interrompido, principalmente com relação a choques térmicos e mecânicos, onde as ferramentas estão submetidas a exigências extremas (SOUTO, 2007).

Alguns tipos de avarias são (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2001):

- Lascamento: acontece quando partículas maiores são retiradas de uma só vez, ao contrário dos desgastes de cratera e de flanco (conceituados no tópico 2.3.2), que retiram partículas muito pequenas da ferramenta de forma contínua.
- Trincas: são causadas pela variação da temperatura e/ou pela variação dos esforços mecânicos. Alguns fatores que causam isso são: corte interrompido, dificuldade de penetração do fluido de corte e variação da espessura de corte (típica do fresamento).

2.2.2 Desgastes

O desgaste pode atingir níveis elevados e comprometer a qualidade do processo de usinagem. Ele ocorre de maneira progressiva, implicando na perda de material tanto da superfície de saída como da superfície de folga. Pode ocorrer tanto no corte interrompido como no contínuo (SOUTO, 2007).

Os principais fatores responsáveis pelo desgaste das ferramentas são (STEMMER, 2005):

- **Deformação plástica:** acontece quando a dureza a quente do material da ferramenta não é mais o suficiente para resistir às pressões de usinagem, o que se observa isso especialmente com avanços maiores.
- **Abrasão:** é o arrancamento de finas partículas de material, devido ao escorregamento sob alta pressão e temperatura entre a peça e a ferramenta. Esta forma de desgaste aumenta com o número de inclusões e partículas duras no aço (como por exemplo, carbonetos e óxidos). Vale salientar que a resistência à abrasão depende essencialmente da dureza do material da ferramenta e o aumento da velocidade de corte causa um aumento considerável da taxa de desgaste, em virtude do impacto e da redução da resistência da ferramenta à abrasão em temperaturas de trabalho mais altas.
- **Aderência:** ocorre entre o material da peça e as asperezas superficiais da ferramenta que se deve à ação das altas temperaturas e pressões presentes na zona de corte e ao fato de que a superfície inferior do cavaco, recém arrancada, apresenta-se limpa, sem camadas protetoras de óxido e, portanto, quimicamente muito ativa. A prova de que tais aderências se podem formar é o gume postiço, também conhecido como aresta postiça de corte (APC).
- **Difusão:** acontece entre os materiais da peça e da ferramenta. É provocada pelo aumento da temperatura na região de corte, em que as moléculas adquirem certa mobilidade. Para ferramentas de aço carbono e aço rápido, esta forma de desgaste não tem significação, pois a faixa de temperaturas de difusão é bem mais alta que a temperatura de amolecimento da ferramenta. Diferente é a situação nos metais duros, nos quais podem ocorrer fenômenos em temperaturas na faixa de 700 a 1300°C, na usinagem de peças de aço.
- **Oxidação do material:** acontece na superfície da ferramenta. Pelo fato de ocorrer o aquecimento de peças a altas temperaturas com a formação de carepas, pode ser causa

de desgaste. Geralmente, a oxidação em baixas temperaturas é evitada por camadas protetoras de material oxidado. Metais duros iniciam a formação de carepas em temperaturas de 700 a 800°C, ou seja, em temperaturas que normalmente se usina com este material. Para Braga (1992), a oxidação acontece algumas vezes devido ao fluido de corte, principalmente quando contém água.

- Correntes elétricas iônicas: são produzidas pelo atrito entre a peça e ferramenta. Estas correntes podem ser explicadas como um fenômeno termoelétrico, gerado pelo aquecimento do ponto de união de um par de materiais distintos (termopar).

Ainda com relação ao desgaste por aderência, a aresta postiça de corte se forma devido ao atrito entre as superfícies de contato do cavaco e a superfície de saída da ferramenta. Neste ponto, em baixas velocidades de corte, acontecerá a solda entre as partes com posterior deposição de partículas do cavaco sobre a superfície de saída da ferramenta. A presença da aresta postiça na região de corte causa modificações no comportamento da força de usinagem, no acabamento superficial da peça e no próprio desgaste da ferramenta de corte. O aparecimento do APC está relacionado com a temperatura de corte e conseqüentemente com a velocidade de corte. Nota-se uma decomposição da aresta postiça quando é atingida a temperatura de recristalização do material da peça. Os atritos entre superfície de saída-cavaco e superfície de folga-peça causam o desgaste da ferramenta por abrasão. Esse tipo de desgaste é predominante em elevadas velocidades de corte e é incentivado pela presença de partículas duras no metal na peça (BRAGA, 1992).

Já as formas de desgaste podem ser:

- Desgaste de cratera: acontece na superfície de saída da ferramenta, causado pelo atrito entre a ferramenta e o cavaco (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2001).
- Desgaste de flanco (frontal): acontece na superfície de folga da ferramenta, causado pelo contato entre a ferramenta e a peça. É o tipo de desgaste mais comum e todo processo de usinagem causa desgaste de flanco (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2001).
- Desgaste de entalhe: apesar do desgaste de entalhe ser uma forma de desgaste, é considerado como um mecanismo devido à falta de unanimidade quanto a suas causas. Sua ocorrência se verifica principalmente na usinagem de materiais resistentes a altas temperaturas (ligas de níquel, titânio, cobalto e aços inoxidáveis) (SOUTO, 2007).

A seguir, a Figura (20) mostra as principais áreas de desgaste de uma ferramenta e as três formas de desgaste dela:

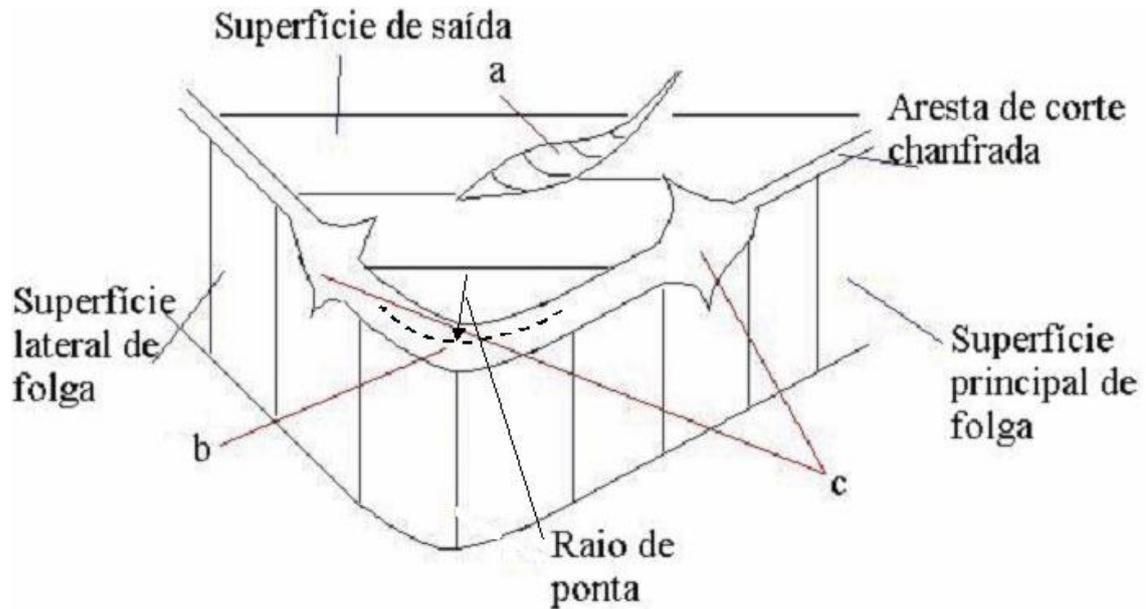


Figura 20 – Principais áreas e formas de desgaste de uma ferramenta (DEARNLEY; TRENT, 1982 *apud* SOUTO, 2007).

Onde: (a) desgaste de cratera; (b) desgaste de flanco; e (c) desgaste de entalhe.

Portanto, a separação quantitativa dos componentes do desgaste é praticamente impossível de se realizar, mas qualitativamente, pode-se concluir que o desgaste da ferramenta é influenciado principalmente pelo cisalhamento da aresta postiça de corte em baixas velocidades de corte. Já em velocidades de corte maiores, o desgaste é influenciado por fatores cuja intensidade depende principalmente da temperatura de corte, tais como abrasão, difusão e oxidação (CUPINI, 1991 *apud* BRAGA, 1992).

2.3 FIM DE VIDA DE FERRAMENTAS DE USINAGEM

A vida da ferramenta pode ser definida como o tempo que a mesma trabalha de forma efetiva (deduzidos os tempos passivos), até perder sua capacidade de corte, dentro de um critério pré-estabelecido. Atingido esse tempo, a ferramenta deve ser reafiada ou substituída. O percurso de avanço (L_f), que pode ser utilizado para expressar a vida de uma ferramenta, para uma vida de T minutos, é dado pela Equação 8 (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2001):

$$L_f = \frac{T * f * 1000 * V_c * n}{\pi * d} \quad (8)$$

Onde: T = tempo de corte em minutos; f = avanço, em mm/volta; V_c = velocidade de corte em metros/min; n = rotação em r.p.m.; e d = diâmetro em mm.

À medida que a ferramenta vai se desgastando, observam-se variações mais ou menos profundas no processo de usinagem. A temperatura se eleva progressivamente, a força de corte e a potência consumida aumentam, as dimensões da superfície usinada se alteram, o acabamento superficial piora. Em condições extremas, ocorre um faiscamento intenso no corte, a superfície usinada se apresenta áspera. Em ferramentas de metal duro o aumento da força de usinagem, no caso de um desgaste excessivo, provoca o lascamento e destruição total do gume. A utilização de uma ferramenta até este ponto é de todo desaconselhável, pois será necessário um longo trabalho de reafiação com a remoção de uma extensa camada de material de corte, antes que se possa restabelecer um gume adequado (STEMMER, 2005).

O ponto que representa o fim da vida da ferramenta é de fundamental importância no estudo da usinabilidade. São utilizados na prática e nos ensaios de laboratório diversos critérios para determinar este ponto, dependendo a escolha, em grande parte, das exigências da usinagem (precisão de medidas, grau de acabamento) e do material da ferramenta. Pode-se citar (STEMMER, 2005):

- Falha completa da ferramenta: impossibilita para o corte, por motivo de superaquecimento (queima), lascamento ou quebra. Na prática, não convém ir até este ponto, por causa das despesas de reafiação e do consumo da ferramenta tornam o processo antieconômico.
- Falha preliminar da ferramenta: caracterizada pelo aparecimento na superfície usinada ou transitória da peça, de uma estreita faixa altamente polida, indicando forte atrito de escorregamento com o flanco da ferramenta. Ocorre faiscamento intenso. Este é um critério frequentemente usado no emprego de ferramentas de aço rápido.
- Largura da marca de desgaste, no flanco: este é o critério de emprego mais frequente na indústria para a determinação do fim de vida da ferramenta de metal duro e cerâmica. Uma vez alcançada uma largura da marca de desgaste da ordem 0,8 a 2 mm, as ferramentas de metal duro perdem a eficiência de corte. As larguras maiores de marca de desgaste são admissíveis em ferramentas de maiores dimensões, velocidades de corte mais baixas e com pastilhas mais tenazes.
- Vibrações intensas (“chatter”) da peça ou da ferramenta, ruídos fortes por vibrações da máquina: impossibilita o prosseguimento da usinagem. Podem ter como causa o desgaste no flanco da ferramenta.

- Profundidade da cratera, KT (Figura 21): Em ferramentas de metal duro, a formação de crateras na face pode determinar o fim da vida.

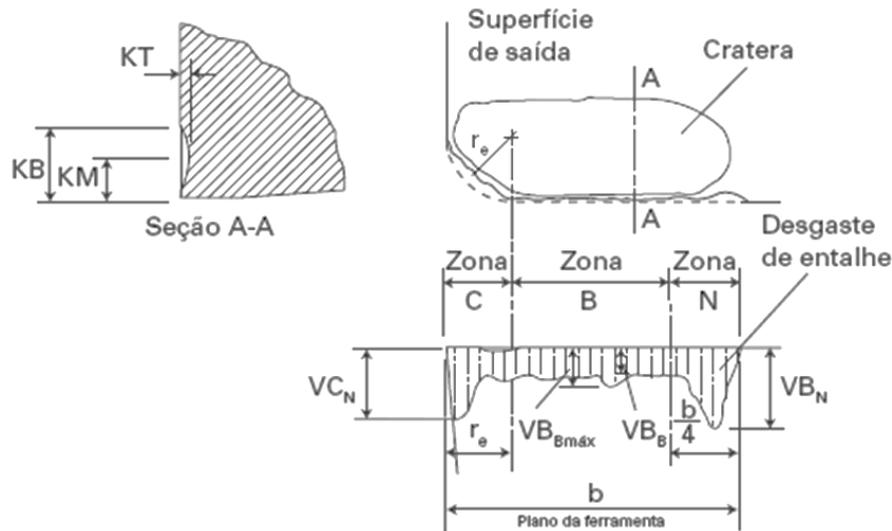


Figura 21 – Parâmetros utilizados para medir os desgastes das ferramentas de corte (MACHADO *et al.*, 2011).

- Deficiência de acabamento superficial: ocorre frequentemente uma mudança súbita e pronunciada do grau de acabamento superficial, a qual pode ser tomada como limite de vida da ferramenta.
- Forma dos cavacos: uma brusca variação da forma dos cavacos pode ser usada como critério de fim de vida.
- Formação de rebarbas de usinagem, na peça.

Caso o critério de final de vida seja atingido e se a ferramenta não for reafiada ou trocada, algumas consequências podem ocorrer como (SOUTO, 2007):

- Acabamento superficial não satisfatório, o que não pode acontecer principalmente em operações de acabamento.
- A impossibilidade de atingir tolerâncias dimensionais determinadas pelo projeto.
- O aumento excessivo nas forças de usinagem.
- Elevadas temperaturas na região de corte.
- A quebra da aresta.

Com relação à evolução do desgaste da ferramenta de corte, observa-se na Figura 22, o comportamento desse desgaste até atingir o final da vida da ferramenta. A figura apresenta três estágios claros no desenvolvimento do desgaste. No primeiro trecho (estágio I), a ferramenta apresenta um rápido crescimento do desgaste, que é o resultado de uma

acomodação do par tribológico do sistema. No final deste estágio há uma diminuição da taxa de desgaste (ocorre uma inflexão na curva). Essa diminuição do desgaste do primeiro trecho irá se refletir no segundo trecho (estágio II), em que há uma acomodação da evolução do desgaste, que cresce lentamente e de forma praticamente constante. O último trecho (estágio III) começará quando no estágio anterior houver uma nova inflexão na curva, mostrando que o desgaste está aumentando de forma mais acelerada. Neste estágio, a ferramenta atinge rapidamente o seu final de vida. Se caso neste estágio a ferramenta não for reafiada ou substituída, poderá vir a falhar rapidamente, pois sua geometria de corte está comprometida devido ao desgaste, o que acarreta grandes níveis de atrito, geração de calor e elevadas tensões (MACHADO *et al.*, 2009).

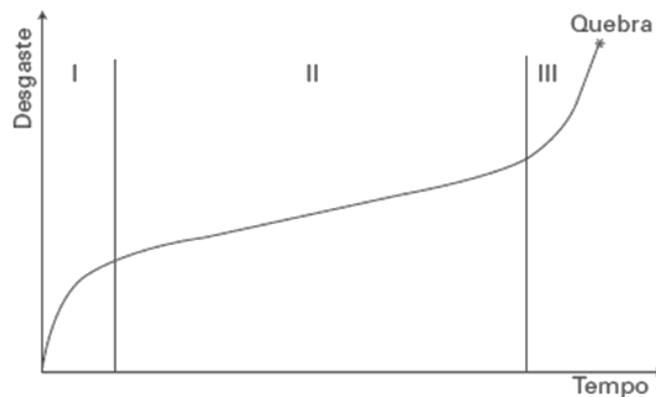


Figura 22 – Comportamento do desgaste de uma ferramenta de corte com o tempo de corte (MACHADO *et al.*, 2011).

2.4 AÇO SAE/AISI 4340

O aço AISI 4340 é um aço-liga para produtos planos. Muitos aços-liga de baixo teor em ligas são utilizados na fabricação de produtos planos. Alguns, após serem conformados na forma final, são submetidos a tratamento térmico para melhorar as propriedades mecânicas, superiores às que possuem o produto acabado a quente (CHIAVERINI, 2005). Segue na Tabela 1, a composição química do aço 4340.

Tabela 1 – Composição química do aço SAE/AISI 4340 (OLIVEIRA; ARAÚJO; SILVA, 2009).

Composição Química, %							
C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	P	S
0,38/0,43	0,60/0,80	0,15/0,35	0,70/0,90	1,65/2,00	0,20/0,30	0,030	0,040

O aço AISI 4340 é um aço de elevada temperabilidade, alta resistência mecânica, elevada tenacidade e boa forjabilidade, porém sua usinagem é relativamente pobre. Dependendo do teor de carbono, a dureza na condição temperada varia de 54 a 59 HRC. Por causa da sua alta temperabilidade, não é aconselhável a sua aplicação em soldagem por métodos convencionais, exceto para processos sofisticados (OLIVEIRA; ARAÚJO; SILVA, 2009).

Devido às suas características, ele é aplicado para fabricação de virabrequins de automóveis, caminhões, tratores e aviões e eixos em geral com elevada solicitação mecânica (OLIVEIRA; ARAÚJO; SILVA, 2009). Também, esse material é utilizado em trens de pouso de aeronaves, onde as exigências fundamentais de projeto são alta resistência mecânica e tenacidade (SOUZA *et al.*, 2002).

2.5 MONITORAMENTO NA USINAGEM

O monitoramento de uma ferramenta de corte é importante em um sistema de manufatura. A partir de um sistema de monitoramento do estado das ferramentas, por exemplo, a quebra da ferramenta pode ser detectada a tempo de reduzir os impactos econômicos acarretados e a troca pode ser providenciada antes do seu estado excessivamente desgastado, evitando a perda de qualidade dos produtos manufaturados (DESCHAMPS, 2004). Portanto, o monitoramento do processo de usinagem tem importância de otimizar a vida da ferramenta e prevenir a quebra dela, ocasionando uma diminuição no custo de produção.

Sistema de monitoramento utiliza-se de diversos sinais provenientes do processo de usinagem com o fim de auxiliar na completa automatização do processo. Alguns fatores que permitirão a completa aplicação do monitoramento (BONIFÁCIO, 1993; BRAGA, 1992) são:

- Barateamento do sistema de aquisição e interpretação do processo de desgaste e quebra da ferramenta;
- Eficiência do processo;
- Portabilidade do sistema para o nível de chão da fábrica;
- Facilidade de operação e manutenção do sistema;
- Não ser intrusivo na fabricação, o que corresponde à não necessidade de se montarem complexos dispositivos que interfiram no funcionamento da máquina;

- Que o parâmetro medido seja influenciado pelo que deseja medir; por exemplo, fatores como vibração, ruídos, variação de parâmetros do processo não devem influenciar no parâmetro de monitoramento do desgaste da ferramenta.
- Um mesmo processo de monitoramento cobrir várias condições e processos de usinagem;
- Relação custo/benefício ser compatível.

Um sistema de monitoramento e controle do processo de usinagem tem a principal função de substituir as funções que o homem ainda exerce na produção de peças, de maneira a poder acompanhar a velocidade de produção dos processos modernos que estão sendo instalados nas indústrias, dentro desses novos conceitos de produzir peças. Diversas máquinas CNC já conseguem substituir diversas funções anteriormente realizadas pelo homem, como aproximação, afastamento, posicionamento e percurso da ferramenta, fixação do avanço e velocidade de corte, etc. Mas algumas funções ainda permanecem sob a responsabilidade do operador, como o estabelecimento do momento de troca da ferramenta, inspeção da peça e a própria troca da ferramenta. Um sistema de monitoramento e controle do processo de usinagem realiza estas atividades que ainda permanecem sob a responsabilidade do operador (CALDEIRANI FILHO, 1998).

As justificativas para a utilização de máquinas CNC e sistemas flexíveis e automatizados de produção (BRAGA, 1992) são:

- Sistemas de monitoramento e controle do processo.
- Os novos e caros materiais de ferramentas (CBN e diamante) fazem com que a quebra ou a deterioração rápida da ferramenta devam ser evitadas a todo custo.
- O corte de materiais difíceis de usinar e com poucas informações disponíveis sobre seu comportamento, tais como materiais reforçados com fibras, ligas resistentes ao calor, faz com que o processo se torne de certo modo imprevisível, o que ressalta a necessidade de monitoramento em tempo real.
- Os pequenos lotes de peças encarecem a rejeição de uma peça.

O tempo de resposta em tais sistemas é muito importante, pois pode-se evitar choques entre elementos em movimento relativo, corrigir desvios ocorridos tanto na máquina como na ferramenta e na peça devido aos fenômenos de quebra, desgastes, vibrações e outros. Podem-se ter sistemas de monitoramento, onde o tempo é crítico (da ordem de milissegundos), o qual prevê correções em tempo real nas variáveis de controle que são importantes para continuidade do processo produtivo (BRAGA, 1992).

Vários fatores influenciam de modo a dificultar o monitoramento do processo de usinagem, sendo que um dos principais pontos observado, segundo a literatura, é a inexistência de um consenso quanto ao sistema de monitoramento e aos parâmetros a serem monitorados que possam ser usados para uma ampla variedade de processos de usinagem e para todo o campo de aplicação na usinagem. Portanto, os diversos tipos de materiais de ferramentas, diferentes condições de usinagem como velocidade de corte, profundidade da usinagem e avanço, diferentes materiais a serem usinados, máquinas ferramentas com diversas condições de uso entre outros, contribuem para que os sistemas de monitoramento se tornem específicos a cada situação (COSTA, 1995).

Existem vários métodos para implementar um monitoramento do processo de usinagem. Esses métodos são, normalmente, divididos em dois grupos (PIGARI, 1995):

- Monitoramento direto: é aquele onde a grandeza estudada é medida diretamente.
- Monitoramento indireto: é quando um outro parâmetro é medido e relacionado com o parâmetro estudado para tomada de decisão.

O período de monitoramento gera outro critério importante para a classificação dos métodos de aquisição de sinal. Assim, com base nele, os métodos podem ser classificados como contínuo ou *on-line* e intermitente ou *off-line*. No primeiro caso, os parâmetros são medidos continuamente durante todo o processo. No último caso, os parâmetros são medidos apenas durante os intervalos do processo de corte. Métodos de medição direta ou *off-line* fornecem muitos resultados precisos, mas não são adequados para as aplicações práticas devido a limitações tais como: dificuldade de acesso, uso de fluidos de corte e iluminação. Os resultados obtidos a partir de métodos de medição indireta ou *on-line* são menos precisos do que os diretos, mas são mais adequados para as aplicações práticas (SIDDHPURA; PAUROBALLY, 2012).

2.5.1 Métodos de monitoramento direto na usinagem

Os métodos diretos de monitoramento de usinagem não apresentam interferências de outros parâmetros, porque medem diretamente a variável a ser monitorada. Entretanto, são muito difíceis de serem empregados na prática, pois, em geral não se consegue fazer as medições enquanto o processo está acontecendo “on-line” (BONIFÁCIO, 1993).

Siddhpura e Paurobally (2012) mostram os métodos de monitoramento direto mais utilizados (Figura 23), baseado nas bibliografias que descrevem estes métodos. Percebe-se que o método óptico é o mais popular de todos.

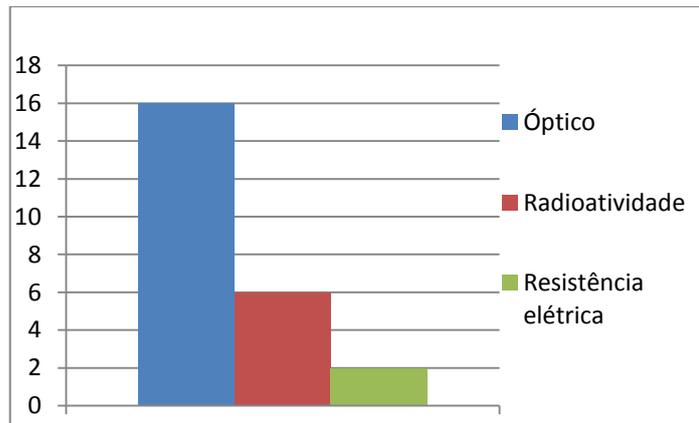


Figura 23 – Número de publicações dos métodos de monitoramento direto para medir o desgaste da ferramenta (SIDDHPURA; PAUROBALLY, 2012).

i) Óptico

Como uma ferramenta gasta reflete mais luz do que uma ferramenta nova, então, as medidas ópticas de monitoramento de usinagem baseiam-se nesta “propriedade” (BONIFÁCIO, 1993).

Um feixe de laser é direcionado à superfície desgastada da ferramenta, sendo que a reflexão desta é captada por uma câmara, e então digitalizada e processada, obtendo por este meio a amplitude do desgaste da ferramenta. Através deste sistema, pode-se levantar a posição ou a forma da ponta da ferramenta, sendo que a princípio o sistema óptico foi desenvolvido com o intuito de avaliar o grau de desgaste do flanco, porém experimentos foram e tem sido realizados no intuito de utilizar o método para a determinação de outros tipos de desgastes (COSTA, 1995).

ii) Radioatividade

Este método baseia-se no fato de que partículas que se desprendem da ferramenta originando o desgaste, são carregadas junto com os cavacos para fora da zona de usinagem. Baseando-se nisso, bombardeia-se a ferramenta com partículas radioativas. À medida que a ferramenta se desgasta, partículas ativadas radioativamente são extraídas da ferramenta, resultando num decaimento radioativo na zona de usinagem, que pode ser medido através de técnicas convenientes. Vale salientar que o monitoramento por análise radioativa é aplicado

de forma restrita, pois a radioatividade representa um sério risco para os operadores ou ao ambiente e exige um alto investimento para o seu controle (BONIFÁCIO, 1993).

iii) Resistência elétrica na junção peça/ferramenta

Na medida em que se aumenta o desgaste da ferramenta, cresce a área de contato entre a peça e a ferramenta e, portanto, cai a resistência elétrica dessa junção (PIGARI, 1995).

Este método de monitoramento é normalmente utilizado para a verificação do desgaste da superfície de folga da ferramenta em processos de torneamento em operações de acabamento (COSTA, 1995).

Cuidados especiais devem ser tomados quando a escolha do modelo se relaciona a variação da resistência elétrica com o desgaste da ferramenta. Uma vez que o desgaste da ferramenta está diretamente ligado aos parâmetros de corte utilizados, deve-se saber a velocidade de corte, o avanço e as forças envolvidas no processo (COSTA, 1995).

iv) Mudanças dimensionais na peça

Devido ao desgaste da ferramenta, as dimensões da peça que foi usinada mudam. Portanto, o desgaste pode ser avaliado diretamente da medição de mudanças nas dimensões da peça. Existem vários sensores que foram desenvolvidos para medição do diâmetro da peça. Os métodos utilizados podem ser de medição por contato ou sem contato (PIGARI, 1995). Vale salientar que a dilatação térmica da peça e as vibrações do sistema são problemas enfrentados por este método (CALDEIRANI FILHO, 1998).

v) Distância peça/ferramenta

Durante uma operação de corte, à medida que o desgaste da ferramenta aumenta, a distância entre a ferramenta ou o porta-ferramentas e a peça diminui com o crescimento desse desgaste. Esta distância pode ser medida utilizando micrômetros eletrônicos, ondas ultrassônicas ou medidores pneumáticos (CALDEIRANI FILHO, 1998). Vibrações e dilatação térmica são problemas enfrentados por esse método, afetando os resultados (PIGARI, 1995).

2.5.2 Métodos de monitoramento indireto na usinagem

Os métodos indiretos de monitoramento de usinagem têm a sua principal característica a fácil aplicação e pouca interferência no processo, pois pode-se utilizar equipamentos de pequenas dimensões, e em vários casos, mede-se um sinal ou efeito remotamente, ou seja, distante da zona de usinagem, não interferindo portanto no processo. A sua principal desvantagem está no fato de que não somente o que se quer medir, por exemplo, o desgaste da ferramenta, influencia no sinal medido, mas também outros fatores, como condições de usinagem, condições da máquina, etc (BONIFÁCIO, 1993).

Siddhpura e Paurobally (2012) mostram os métodos de monitoramento indireto mais utilizados (Figura 24), baseado em bibliografias que descrevem estes métodos. Observa-se que os métodos de força e vibração são os mais usados pelos pesquisadores.

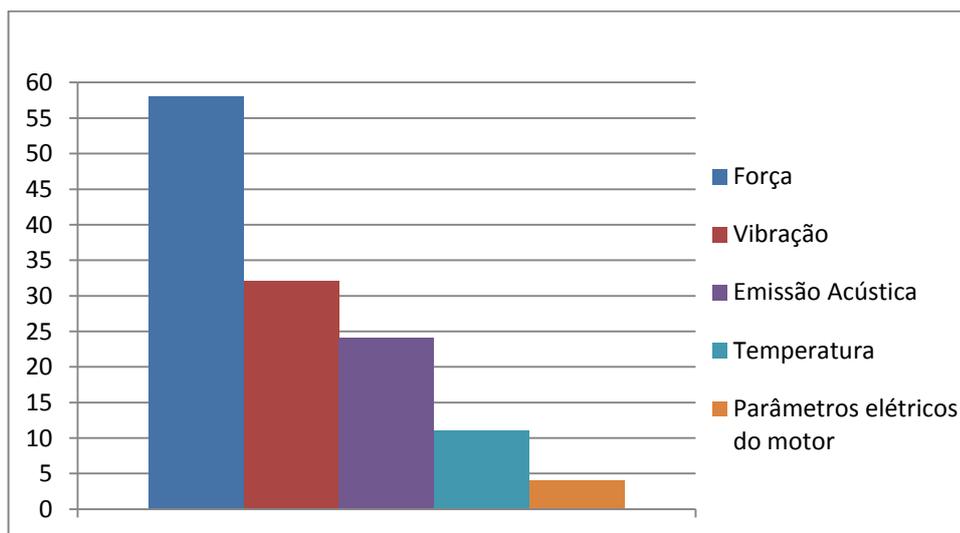


Figura 24 – Número de publicações dos métodos de monitoramento indireto para medir o desgaste da ferramenta (SIDDHPURA; PAUROBALLY, 2012).

i) Forças de usinagem

As forças de usinagem são o método mais pesquisado para se monitorar o processo de usinagem por duas principais justificativas: 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).

Entre os vários sistemas utilizados na medição das forças da usinagem, o que se destaca é o dinamômetro piezelétrico. Ele é baseado no fato de que alguns cristais, uma vez comprimidos dinamicamente, produzem um sinal elétrico proporcional às forças dinâmicas transmitidas através deles (COSTA, 1995).

ii) Emissão Acústica

A emissão acústica pode ser definida como sendo ondas de tensão elásticas geradas como resultante da liberação rápida de energia de deformação dentro de um material submetido a um estímulo exterior, provocado pelo rearranjo de sua estrutura. Estas ondas de tensão produzem deslocamentos na superfície do material, podendo então ser detectados por sensores piezoelétricos, que possuem a característica de transformar estes deslocamentos em sinais elétricos. No processo de usinagem, as principais fontes de emissão acústica são atrito cavaco-ferramenta, o atrito ferramenta-peça, a deformação e a quebra do cavaco (COSTA, 1995).

Esse tipo de emissão é um meio sensível de monitorar tanto o desgaste como a fratura da ferramenta. O transdutor utilizado, o piezoelétrico é de custo relativamente baixo. Porém, devido às faixas de frequências consideradas importantes para a análise, entre 100 KHz a 1 MHz, a armazenagem do dados em bruto é um pouco dificultada, assim como o processamento do sinal. Este ponto tende a deixar de ser um problema, à medida que novos dispositivos de aquisição e processamento se tornam disponíveis a um custo adequado (TAVARES FILHO, 1996).

A emissão acústica apresenta algumas vantagens em relação a outros métodos de monitoramento indireto, quais sejam: o sensor é barato e pequeno (pouco intrusivo); as faixas de frequências estão acima das frequências de vibração de certos elementos da máquina ferramenta como motores e rolamentos, fazendo com que tais vibrações não se constituam em ruído no sinal medido (BONIFÁCIO, 1993).

iii) Parâmetros elétricos do motor

Durante o procedimento de corte, a corrente e a potência do motor estão relacionadas ao torque e, assim, à componente tangencial da força de corte. Com a utilização de uma ferramenta mais afiada, vai se exigir um menor torque e conseqüentemente, menor potência

do motor (TAVARES FILHO, 1996). Esse tipo de monitoramento indireto é medido através da tensão e/ou corrente dos motores que acionam a máquina (BONIFÁCIO, 1993).

O sensoriamento da corrente é realizado através de sensores simples e barato, tais como o de efeito hall ou transformadores de corrente. A instalação dos sensores e eletrônica associada pode ser feita fora da área de usinagem das peças, não alterando a operação da máquina, o que torna uma grande vantagem para este processo (TAVARES FILHO, 1996).

iv) Medição de rugosidade

Ao longo da vida da ferramenta de corte, a rugosidade da peça usinada sofre alteração, principalmente quando um mecanismo de danificação da aresta de corte acontece, um lascamento por exemplo. Portanto, verificando-se a rugosidade das peças usinadas, é possível monitorar a vida da ferramenta (PIGARI, 1995).

Em condições de chão de fábrica, apesar que a utilização da rugosidade da peça como elemento indicador de desgaste não seja um processo prático, o uso deste parâmetro em experimentos de medida do desgaste é extremamente interessante, pois é na realidade, o parâmetro final que se deseja controlar em operações de acabamento. A medida da rugosidade é feita utilizando rugosímetro, mas a leitura é lenta e não adequada para o uso durante a produção, no entanto, pode ser utilizada como controle estatístico de qualidade (TAVARES FILHO, 1996).

v) Temperatura de corte

À medida que a ferramenta se desgasta, há um acréscimo na área de contato peça/ferramenta e conseqüentemente, aumenta a região de atrito e, portanto, cresce a temperatura de corte. Então, a temperatura pode ser usada para monitorar o desgaste da ferramenta e um equipamento que pode medir esse parâmetro é o termopar. Porém, esse equipamento apresenta certa dificuldade para se usar na prática, visto que a colocação de um termopar padrão sobre uma pastilha convencional seria difícil de ser realizada por operadores em chão de fábrica. Isto exige pastilhas especiais, o que limita a utilização em condições industriais. Além disso, existe a dificuldade dos tornos em transmissão do sinal capturado neste transdutor para a eletrônica de condicionamento, pois o sinal emitido pelo termopar é de pequena intensidade (PIGARI, 1995; TAVARES FILHO, 1996).

vi) Combinação de parâmetros

Influenciado por muitas variáveis, o desgaste da ferramenta é um fenômeno extremamente complexo. Então, vários pesquisadores têm dado ênfase, nos últimos anos, para o monitoramento com a medição de dois ou mais parâmetros (PIGARI, 1995).

2.5.3 Monitoramento de usinagem via vibração

Vibração ou oscilação é qualquer movimento que se repete após um intervalo de tempo. O balançar de um pêndulo e o movimento de uma corda dedilhada são exemplos típicos do mesmo. A teoria de vibração trata do estudo de movimentos oscilatórios de corpos e as forças associadas a eles. Geralmente, um sistema vibratório possui um meio para armazenar energia cinética (massa ou inércia), energia potencial (mola ou elasticidade) e um meio de perda gradual de energia (amortecedor) (RAO, 2008).

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 (RAO, 2008).

Para os processos de usinagem, define-se vibração como sendo o movimento cíclico relativo entre a peça e a ferramenta, sendo que a vibração pode estar presente em todos os processos de usinagem por mais simples que seja. Uma das grandes dificuldades ao lidar com o assunto de vibração em usinagem refere-se à determinação da faixa de amplitude da mesma, uma vez que vários fatores contribuem para sua formação (COSTA, 1995).

Segundo Bonifácio (1993), sinais de vibração de vários processos de usinagem em faixas de frequências de poucos Hz a alguns kHz têm sido investigadas por muitos pesquisadores para sua possível aplicação em sistemas de monitoramento em tempo real e alguns resultados têm sido relatados. Apesar de muitas demonstrações interessantes de praticabilidade em laboratório, algumas tentativas para aplicar a tecnologia para condições de fábrica não tem ainda alcançado sucesso. Os sinais de vibração dos processos de usinagem dos metais contêm informações muito úteis e oferece excelentes possibilidades para diagnóstico em tempo real para muitos problemas críticos da usinagem dos metais, incluindo desgaste da ferramenta.

As fontes de vibração mais comuns e que podem ser responsabilizadas pela quase totalidade das vibrações mecânicas indesejáveis são (MEOLA, 2005):

- Desequilíbrio de massas girantes (desbalanceamento).
- Desalinhamento de eixos, correias e correntes.
- Folgas generalizadas e bases soltas.
- Dentes de engrenagens.
- Rolamentos.
- Corrente elétrica.
- Campo magnético desequilibrado (motores elétricos).

Já as fontes de vibração na usinagem são causadas devido à força surgida entre a peça e a ferramenta, pequenas folgas na fixação na peça, formação inadequada do cavaco, frequência de contato do dente da fresa (geralmente entre 200 e 400 Hz) e ressonâncias surgidas no processo (SCHROETER; STOETERAU; WEINGAERTNER, 2004).

Além da formação do cavaco, os fatores que influenciam na vibração do sistema são o estágio de conservação da máquina, instalação inadequada, operação além de suas especificações técnicas, ferramentas em diferentes estágios de vida, etc (COSTA, 1995).

Contudo, as soluções para este problema são a adição de massa na máquina, mudança com movimento concordante ou discordante, melhora na fixação e alteração da velocidade de corte, profundidade e rotação (SCHROETER; STOETERAU; WEINGAERTNER, 2004).

Muitos estudos têm sido realizados para saber se o som ou vibração produzido pela máquina carregam informações necessárias para a manutenção de seus elementos estruturais (BONIFÁCIO, 1993). Devido a estes estudos, levantou-se a hipótese que da mesma maneira que a vibração ou som emitido pela máquina-ferramenta trás informações sobre o seu estado, estes mesmos sinais quando provenientes do par ferramenta – porta-ferramenta, também poderiam trazer informações sobre as condições de ferramenta ou do processo de formação de cavaco, o que possibilitaria o monitoramento em tempo real de diversos fatores do processo, dentre eles o desgaste e a vida da ferramenta. A dificuldade principal do monitoramento da vida da ferramenta via vibração está na identificação e isolamento da frequência de vibração que de fato influencia no processo de desgaste e quebra da ferramenta, pois o sistema global de usinagem possui vários fatores que induzem a vibração e que não são pertinentes ao processo de desgaste e quebra ferramenta.

Lemaster, Lu e Jackson (2000) demonstraram que um projeto que usa acelerômetro para monitorar a vibração de um eixo pode ser uma técnica útil para monitorar o desgaste de uma ferramenta e com isso, fazer uma correlação com a qualidade da peça em um equipamento utilizando CNC. Certas bandas do sinal de frequência do acelerômetro parecem

ser mais sensíveis a alterações nas condições da ferramenta e da peça. Estes pesquisadores indicam que a banda de frequência de 1000 a 7000 Hz parece ser a melhor para monitorar o estado da ferramenta e a peça.

Orhan *et al.* (2006) realizaram um estudo da relação entre a alteração da vibração e o desgaste da ferramenta durante o fresamento. Para esse efeito, uma série de experiências foram realizadas em uma fresadora vertical e a vibração foi medida em uma única direção da máquina. É bem conhecido da literatura que a amplitude de vibração aumenta com a progressão do desgaste da ferramenta. Neste estudo, o deslocamento e a amplitude de vibração estão de acordo com essa expectativa.

As fontes que geram vibração em um processo de usinagem podem ser divididas em dois tipos: vibração forçada e vibração auto-excitada (SHAW 1968 *apud* COSTA, 1995).

i) Vibração forçada

Esta vibração acontece sob a ação de forças externas variando ciclicamente sendo que o sistema é forçado a vibrar na frequência da excitação. Na medida que a frequência de vibração se aproxima da frequência natural do sistema (ferramenta-peça-máquina-dispositivo de fixação), o sistema tende a absorver ligeiramente mais energia por ciclo vibracional do que o sistema devolve ao meio através de amortecimento gerando a ressonância (COSTA, 1995).

ii) Vibração auto-excitada

A vibração auto-excitada acontece quando mais energia é absorvida do que despreendida durante um ciclo simples. Para provocar uma vibração auto-excitada, a ferramenta tem que sofrer algum choque ou encontrar uma pequena incrustação dura no material da peça (BONIFÁCIO, 1993).

Dos dois tipos de vibração citados anteriormente, a que interessa ao monitoramento do processo de desgaste e quebra da ferramenta é a vibração auto-excitada, pois está contida toda vibração originária do contato ferramenta-peça e cavaco-ferramenta (COSTA, 1995).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 PRINCIPAIS MATERIAIS E EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

3.1.1 Aço

O material utilizado na usinagem do experimento foi o aço SAE/AISI 4340 que possui uma dureza de 229 HB e a seguinte composição química (Tabela 2), segundo a empresa fornecedora do próprio.

Tabela 2 – Composição química do aço SAE/AISI 4340.

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

Foi realizado uma metalografia, sob aspecto qualitativo, referente à identificação das fases constituintes do material e observações morfológicas dessas estruturas o ataque químico foi realizado com o reagente Nital 2% durante 15s. Na Figura 25, pode ser encontrada uma mistura de fases como ferrita (linhas clara) e cementita (linhas escura).

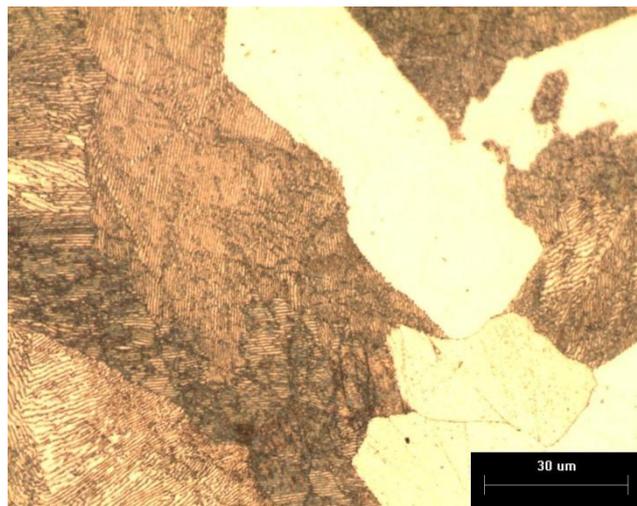


Figura 25 – Fotomicrografia do aço AISI 4340 com ampliação de 1000x.

3.1.2 Inserto

O inserto foi da Sandvik Coromant de especificação R290.90-12T320M-PM 4220 (Figura 26) e detêm as seguintes características:

- Tipo de operação: médio.
- Profundidade de corte máxima: 10,7 mm.
- Ângulo da aresta de corte principal: 90° .
- Ângulo de folga principal: 18° .
- Ângulo de saída da pastilha: 19° .

As condições de usinagem ideais, de acordo com o fabricante, para este tipo de ferramenta seria com f_z igual a 0,17 mm e v_c igual a 290 m/min.

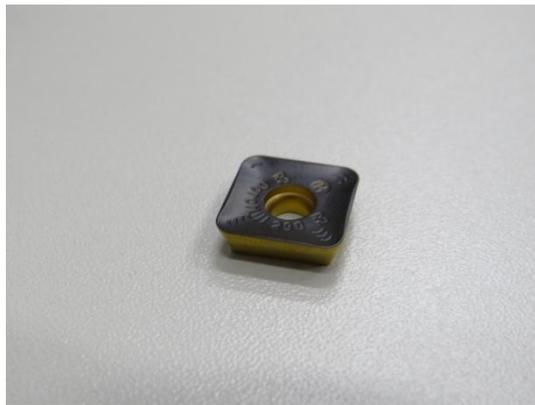


Figura 26 – Inserto Sandvik Coromant.

3.1.3 Fresa

A fresa é também da marca Sandvik Coromant, sendo que a especificação é a R290-050Q22-12M (Figura 27), no qual possui 50 mm de diâmetro, suporta rotação de até 18400 rpm, profundidade máxima de corte de 10,7 mm e até 4 insertos.

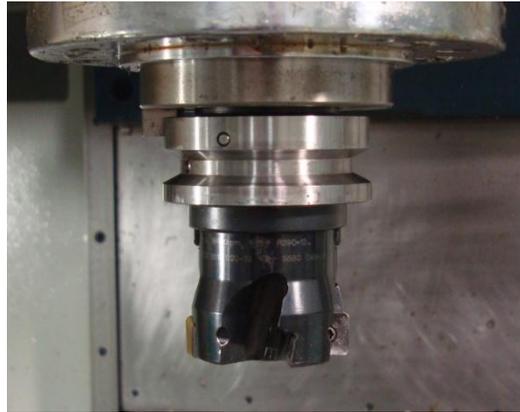


Figura 27 – Fresa.

3.1.4 Centro de usinagem

O centro de usinagem de modelo Romi D600 (Figura 28), utilizando CNC GE Fanuc Oi-MC, possui um cabeçote vertical com eixo-árvore cone ISO 40, com faixa de velocidades de 10 a 10000 rpm, potência de 15 kW, avanço rápido nos eixos x e y de 30 m/min e avanço rápido no eixo z de 30 m/min. Outras especificações do equipamento são:

- Curso da mesa superior (eixo x): 600 mm.
- Curso da mesa inferior (eixo y): 530 mm.
- Curso do cabeçote (eixo z): 580 mm.
- Distância entre nariz do eixo-árvore e mesa: 115 a 695 mm.



Figura 28 – Centro de usinagem Romi (ROMI, 2013).

3.1.5 Sistema de aquisição

O acelerômetro utilizado é o de modelo IEPE B&K 4514 (Figura 29), monoaxial, com amplitude de 1 Hz a 10kHz, sensibilidade de 10,24 mV/g e frequência de ressonância de 32 kHz. Também é utilizado na aquisição de dados o *Coupler* ou acoplador, módulo condicionador de sinal e conversor analógico digital NI 9234 (Figura 30) e chassi NI cDaq-9178 (Figura 31), ambos da marca National Instruments.



Figura 29 – Acelerômetro piezoelétrico.



Figura 30 – Módulo condicionador de sinal e conversor analógico digital (NATIONAL INSTRUMENTS, 2013a).



Figura 31 – Chassi (NATIONAL INSTRUMENTS, 2013b).

3.2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

A parte experimental desse trabalho consistiu na usinagem (fresamento) do aço AISI 4340 no formato de barra retangular com dimensões de 95 x 45 mm em um centro de usinagem.

Para a aquisição de sinais de vibração durante o fresamento, utilizou-se um acelerômetro piezoelétrico que transforma os sinais de vibração em tensão, permitindo a leitura destes pontos através do computador.

Por fim, os sinais foram gravados na memória de um computador. Para que aconteça isso, se faz necessário a utilização do módulo condicionador de sinal e conversor analógico digital e do chassi. O programa responsável por essa aquisição e armazenamento de sinais é o *Labview Signal Express*. Após essa aquisição, é necessário analisar esses sinais, no qual o programa utilizado para isso é o *Matlab*. A Figura 32 mostra de forma resumida, o procedimento experimental para a realização da aquisição.

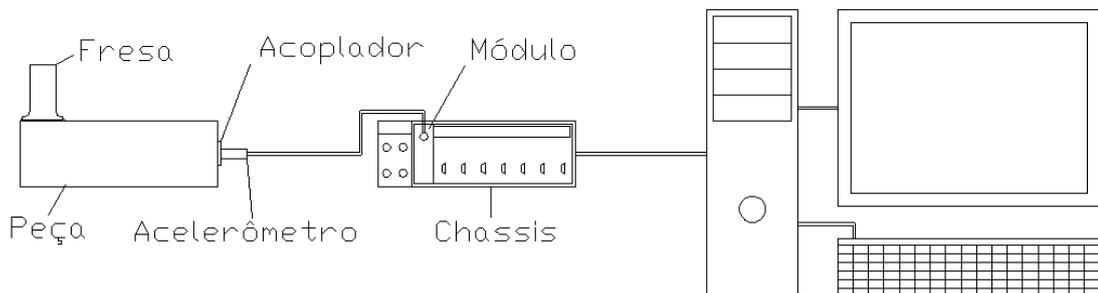


Figura 32 – Resumo do sistema de aquisição.

Já a Figura 33 indica a fase ativa e inativa, posição do acelerômetro e o sentido que a peça se move em relação a fresa.

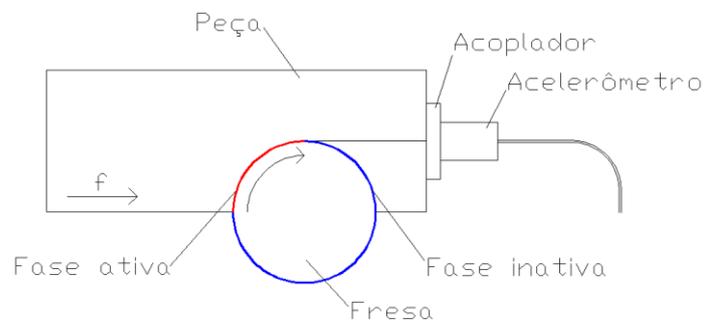


Figura 33 – Dinâmica da usinagem.

Os experimentos foram realizados com dois insertos, cada um 180° em relação ao outro, utilizando duas ferramentas novas, duas desgastadas e uma nova e uma desgastada. A Tabela 3 mostra os parâmetros de usinagem empregados nos experimentos. Para cada experimento foram feitos 2 ensaios e escolhido o melhor resultado desses 2 ensaios.

Tabela 3 – Parâmetros de usinagem empregados nos experimentos.

Experimento 1. Duas pastilhas novas.			
V_c (m/min)	f_z (mm/rev)	a_e (mm)	a_p (mm)
200	0,05	25	0,25
Experimento 2. Duas pastilhas novas.			
V_c (m/min)	f_z (mm/rev)	a_e (mm)	a_p (mm)
200	0,05	25	0,5
Experimento 3. Duas pastilhas novas.			
V_c (m/min)	f_z (mm/rev)	a_e (mm)	a_p (mm)
200	0,05	25	1
Experimento 4. Duas pastilhas desgastadas com $VB_{BMÁX}$ igual a 0,338 e 0,268 mm.			
V_c (m/min)	f_z (mm/rev)	a_e (mm)	a_p (mm)
200	0,05	25	0,5
Experimento 5. Uma pastilha nova e uma desgastada com $VB_{BMÁX}$ igual a 0,338 mm.			
V_c (m/min)	f_z (mm/rev)	a_e (mm)	a_p (mm)
200	0,05	25	0,5

A seleção das pastilhas desgastadas foi baseada na norma ISO 8688-1 (1989), indicada para o fresamento frontal, que recomenda alguns valores (pelo critério Normal) para estabelecer o final de vida de ferramentas independente de seu material (SOUTO, 2007):

- Desgaste de flanco médio, $VB_B = 0,35$ mm;
- Desgaste de flanco máximo, $VB_{BMÁX} = 1,0$ mm;
- Falha catastrófica.

Com isso, foram escolhidas as pastilhas com desgaste de flanco de 0,338 mm (Figura 34) e 0,268 mm (Figura 35) para realizar o ensaio, onde os parâmetros de usinagem são os mesmos com relação ao segundo experimento realizado.

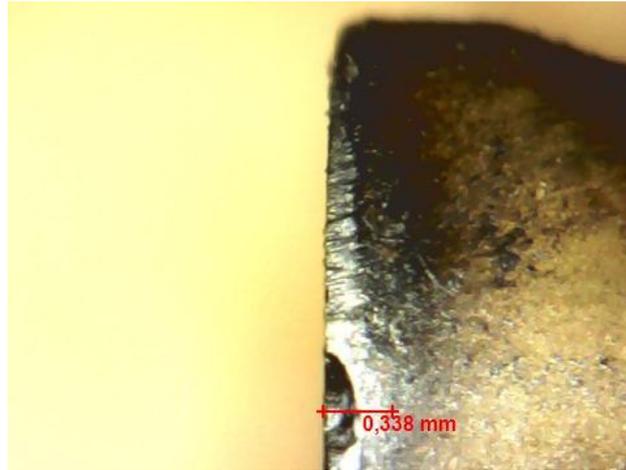


Figura 34 – Desgaste de 0,338 mm.

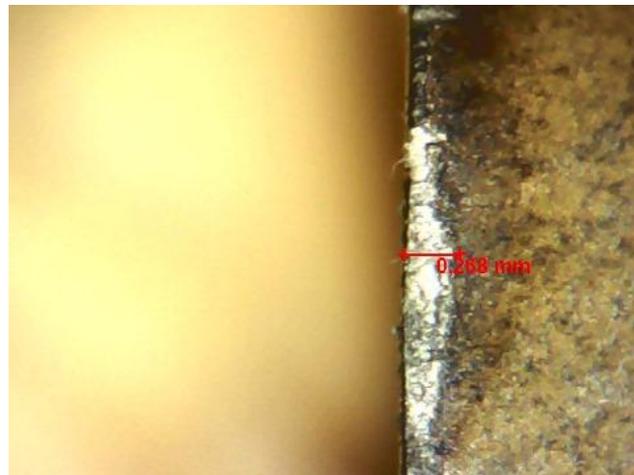


Figura 35 – Desgaste de 0,268 mm.

Para uma aquisição com a amostragem adequada é necessário utilizar o Teorema de Nyquist. Ele afirma que o sinal original s pode ser reconstruído exatamente a partir das amostras $s(t_i)$ se a frequência de amostragem (f^*) for maior que o dobro da maior frequência das componentes presentes em s , ou seja, para garantir a reconstrução correta de um sinal arbitrário, é necessário remover as suas componentes com frequências maiores ou iguais a $f^*/2$ antes da amostragem (STOLFI, 2006).

Como se deseja analisar o espectro até por volta de 7000 Hz, valor baseado na literatura sobre vibração na usinagem, a frequência de amostragem foi feita a 14000 Hz, seguindo o Teorema de Nyquist. Para a realização da análise de sinal no domínio da frequência foi utilizado a transformada de Fourier.

A Figura 36 mostra o aço 4340 sendo fresado e uma peça de tecnil onde o acoplador e o acelerômetro estão dentro da própria no intuito de proteger ambos do cavaco. Também pode

ser visualizado uma mangueira, que tem o mesmo objetivo da peça de tecnil, só que agora é proteger o fio.

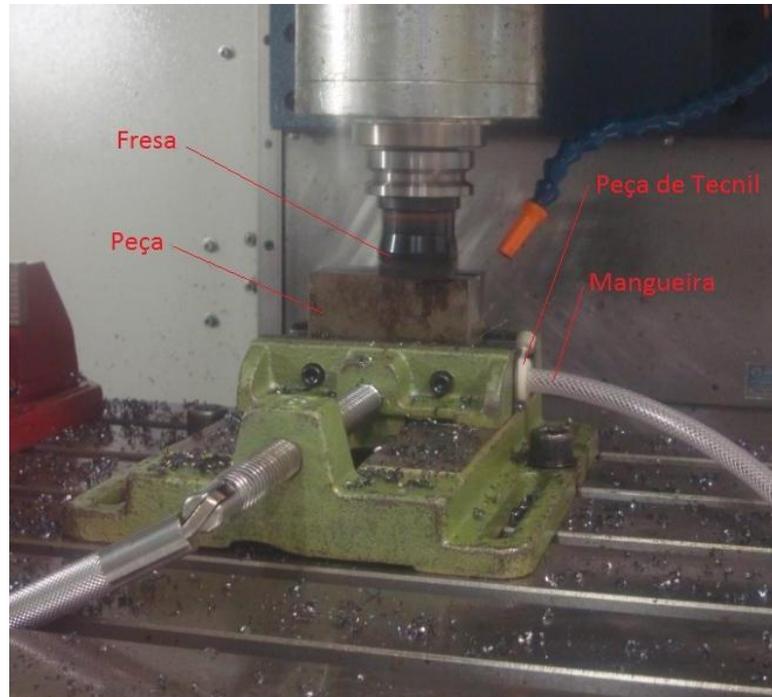


Figura 36 – Experimento realizado.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O primeiro ensaio realizado foi utilizando duas pastilhas novas como é de observar no Experimento 1. A Figura 37 mostra como se comporta o sinal nessas condições.

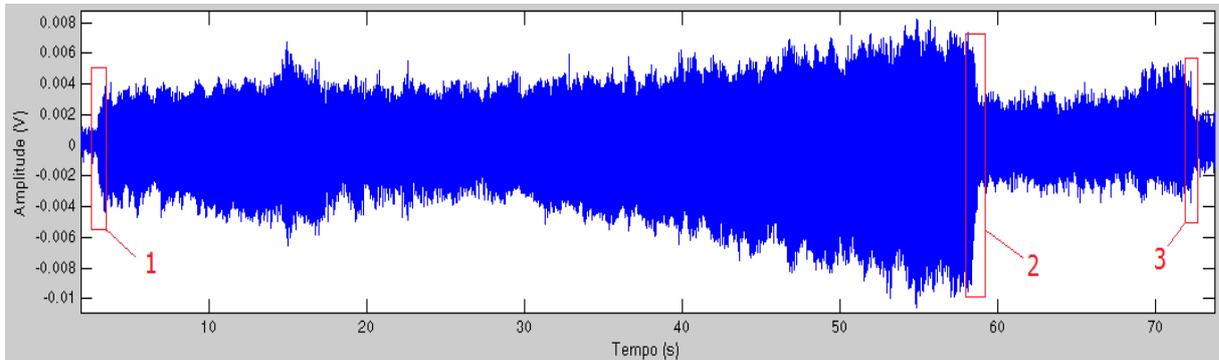


Figura 37 – Aquisição do Experimento 1 (duas pastilhas novas e a_p igual a 0,25 mm) no domínio do tempo.

Observa-se que a entrada das pastilhas de corte acontece com menos de 5 segundos (primeira marcação de vermelho) na peça, depois a amplitude de vibração aumenta, sofre uma diminuição após 15 segundos e volta a subir principalmente após 30 segundos. A amplitude máxima acontece logo após os 55 segundos, quando ocorre uma queda brusca da vibração (segunda marcação de vermelho). Nesta etapa, os insertos não estão usinando e sim, apenas raspando na peça durante sua fase inativa. Em seguida, ela diminui (terceira marcação de vermelho), pois os insertos não estão mais encostando na peça e o sinal é resultante apenas de ruídos.

Também se percebe durante a aquisição que a amplitude começa em um determinado valor e depois vai aumentando (apesar de uma queda após 15 segundos). Acredita-se que esse aumento ocorra devido à posição do acelerômetro. Observa-se na Figura 36 que este está à direita da peça e a peça se desloca da esquerda para a direita, promovendo um aumento da amplitude de vibração do lado esquerdo da peça devido a uma maior distância onde ele se encontra e o local que está ocorrendo à usinagem. Esta variação de amplitude ocorre em todos os experimentos deste trabalho.

Como foi dito anteriormente, a vibração diminui após aproximadamente 15 segundos e volta a crescer depois de 30 segundos. O primeiro pode ser justificado pelo balanço da peça no qual ela encontra uma maior rigidez no seu centro e o segundo pela distância do acelerômetro em relação à área usinada e pelo próprio balanço. Após a segunda marcação de

vermelho, a amplitude aumenta devido às mesmas justificativas comentadas após os 30 segundos de ensaio.

O Experimento 2 é representado pela Figura 38, onde os parâmetros de usinagem são os mesmos com relação ao primeiro ensaio, exceto a profundidade que agora é de 0,5 mm.

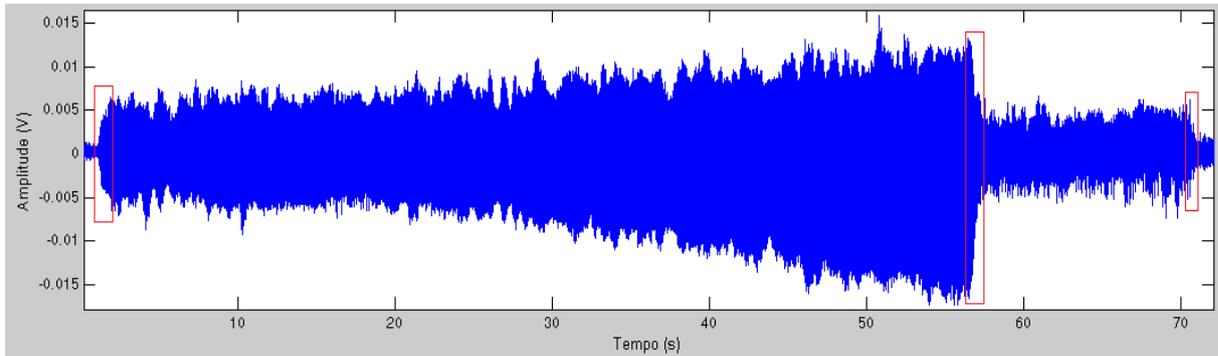


Figura 38 – Aquisição do Experimento 2 (duas pastilhas novas e a_p igual a 0,5 mm) no domínio do tempo.

Observa-se que a amplitude de vibração é maior do que o Experimento 1 justamente devido à profundidade de corte, exigindo maior força de usinagem para acontecer uma maior remoção de cavaco em um mesmo intervalo de tempo comparado com o primeiro ensaio, ocasionando uma maior vibração na peça. De acordo com Bonifácio, 1993 (citando ARSHINOV; ALEKSEEV, 1970), as amplitudes tendem a crescer com o aumento da profundidade de corte. As três marcações em vermelho presente na Figura 38 seguem a mesma explicação do primeiro experimento realizado.

A Figura 39 corresponde ao Experimento 3, no qual os parâmetros de usinagem são idênticos ao primeiro experimento, porém a profundidade de corte é 1 mm.

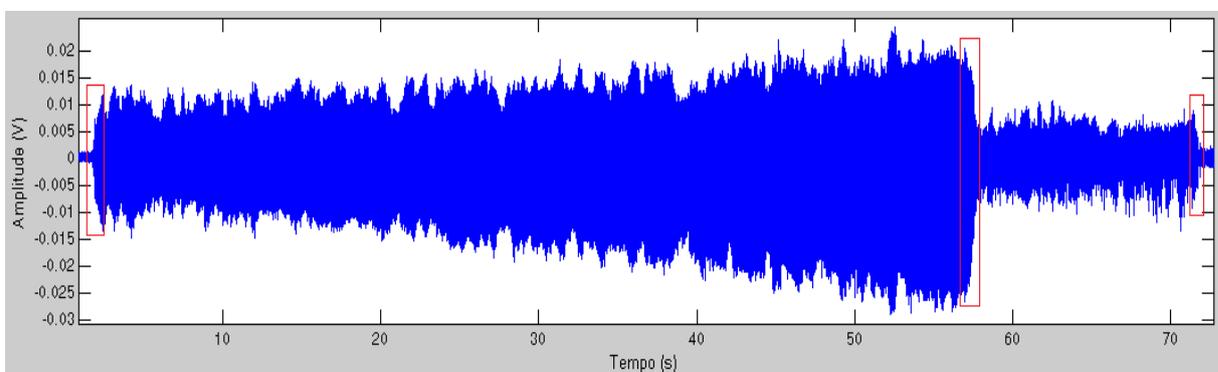


Figura 39 – Aquisição do Experimento 3 (duas pastilhas novas e a_p igual a 1 mm) no domínio do tempo.

Observa-se que a amplitude é superior, quando comparada com as Figuras 37 e 38, onde as peças foram usinadas com largura de corte de 0,5 mm e 1 mm respectivamente. A justificativa disso pode ser pelo fato de ter uma maior remoção de cavaco, ou seja, maior força de usinagem sendo aplicada na peça. Vale salientar que as três marcações em vermelho presente na Figura 39 seguem a mesma explicação do primeiro experimento realizado.

A Figura 40 representa o Experimento 4, onde está presente duas pastilhas desgastadas.

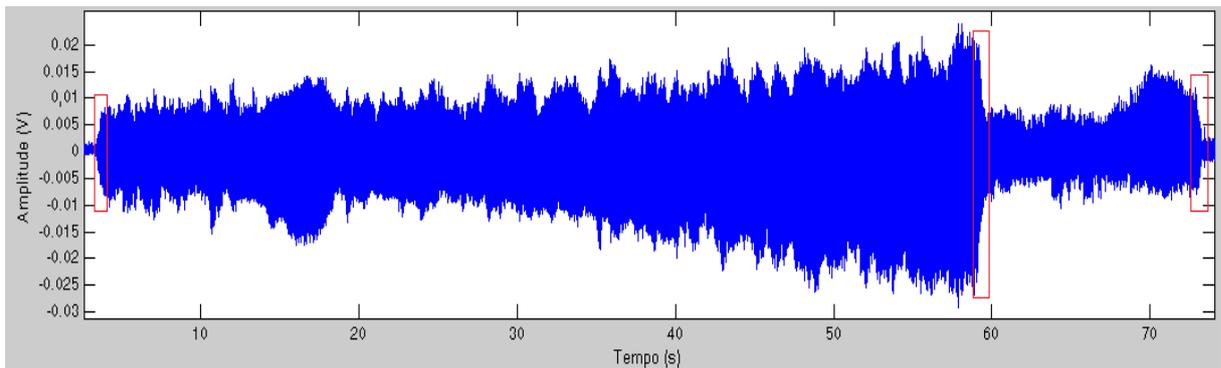


Figura 40 – Aquisição do Experimento 4 (duas pastilhas desgastadas e a_p igual a 0,5 mm) no domínio do tempo.

Observa-se que a amplitude de vibração é maior, quando comparada com a Figura 38, pelo fato de ter utilizado duas ferramentas já desgastadas, fazendo com que a amplitude de vibração aumenta com a progressão do desgaste da ferramenta, como afirmam Orhan *et. all* (2006). As três marcações em vermelho presente na Figura 40 seguem a mesma explicação do primeiro experimento realizado.

Ainda pode-se perceber que a amplitude só começa a aumentar de forma mais acentuada com aproximadamente 30 segundos. Acredita-se que pela posição do acelerômetro e pela questão do balanço da peça. Após a segunda marcação acontece o mesmo fenômeno citado anteriormente.

A Figura 41 mostra o estado de vibração da peça utilizando uma ferramenta nova e a outra com desgaste de flanco de 0,338 mm, seguindo o experimento 5.

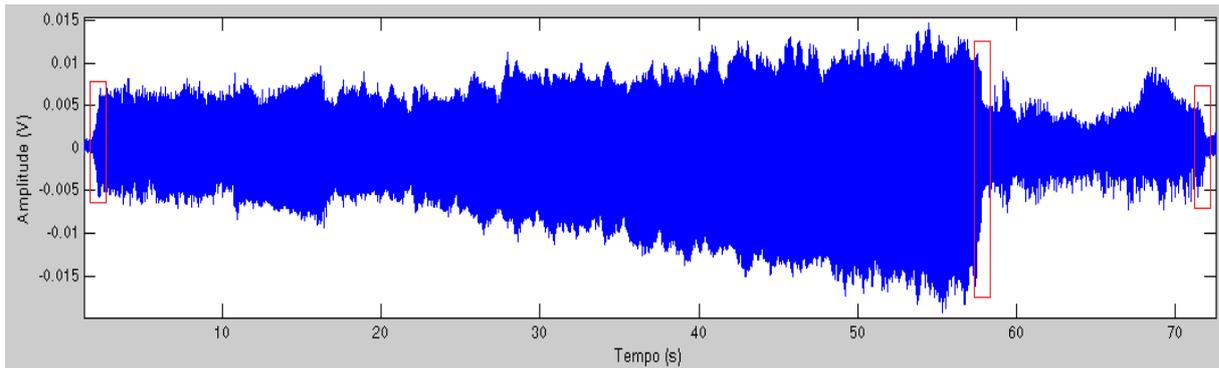


Figura 41 – Aquisição do Experimento 5 (uma pastilha nova e uma desgastada e a_p igual 0,5 mm) no domínio do tempo.

Ao comparar a Figura 41 com a Figura 38, as amplitudes de vibração são praticamente iguais. As três marcações em vermelho presente na Figura 38 seguem a mesma explicação do primeiro experimento realizado.

Após a primeira marcação de vermelho, observa-se que a vibração é constante, sofre uma pequena queda e volta subir até a segunda marcação. Essa queda pode ter acontecido pelo fato do balanço da peça e o aumento da amplitude ocasionado pelo próprio balanço e a distância do acelerômetro até a área usinada, como explicado anteriormente.

A Figura 42 mostra a comparação dos valores quadrático médios dos Experimentos 1, 2 e 3 que levam em consideração as amplitudes de vibração no tempo de 10 a 15 segundos.

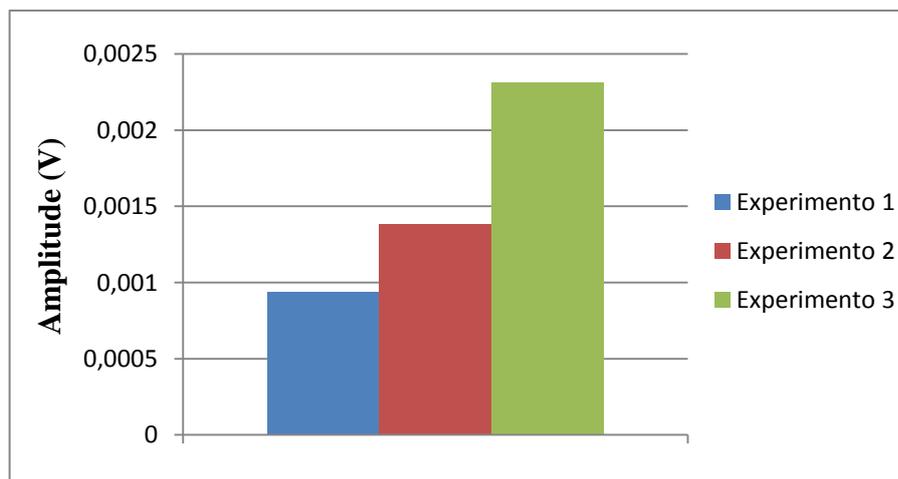


Figura 42 – Média quadrática das amplitudes de 10 a 15 segundos com variação da profundidade.

Percebe-se que a vibração é maior para o Experimento 3 em relação as demais e o Experimento 2 possui uma amplitude superior quando comparado com o Experimento 1. Para ambos os casos, a justificativa está na profundidade, na qual quanto maior for essa acontecerá um aumento na vibração, confirmando a literatura.

Na Figura 43 visualiza-se a comparação dos valores eficaz nos Experimentos 1, 2 e 3 que levam em consideração as amplitudes de vibração no tempo de 50 a 55 segundos.

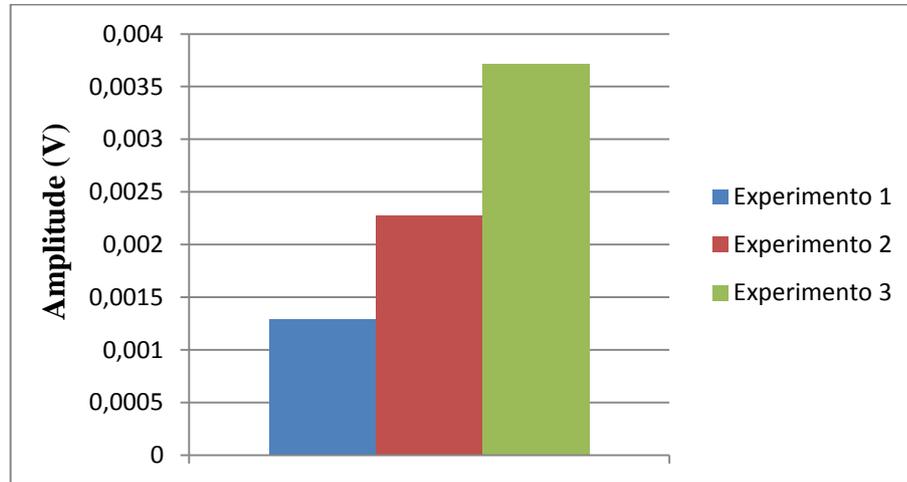


Figura 43 – Média quadrática das amplitudes de 50 a 55 segundos com variação da profundidade.

Ao observar a Figura 43, analisa-se que essa apresenta um comportamento parecido com a Figura 42 no que diz respeito à profundidade de corte que quanto maior for ela, acontecerá um aumento na vibração. A diferença entre as últimas duas figuras estão nas amplitudes onde essas, da Figura 43, são superiores em relação à Figura 42, devido à distância do acelerômetro que é maior para os tempos de 50 a 55 segundos de aquisição.

A Figura 44 mostra a diferença dos valores quadrático médios dos Experimentos 2, 4 e 5 que levam em ponderação as amplitudes de vibração no tempo de 10 a 15 segundos.

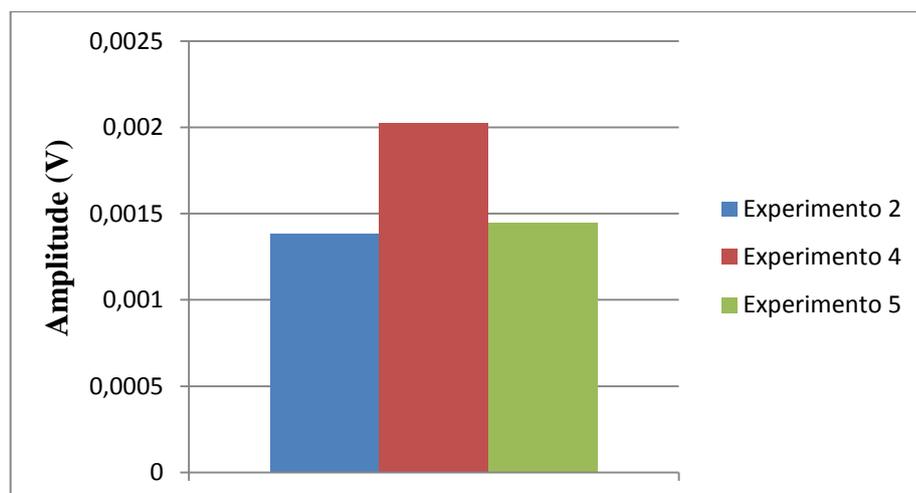


Figura 44 – Média quadrática das amplitudes de 10 a 15 segundos.

Essa figura apresenta que a amplitude do Experimento 4 é maior do que as demais e a vibração do Experimento 5 é um pouco superior do que o Experimento 2. Para o Experimento 4, já era de se esperar uma maior amplitude devido as duas ferramentas estarem desgastadas. Porém, para o Experimento 5 esperava-se uma amplitude superior pelo fato de ter colocado no porta ferramenta a pastilha mais desgastada (0,338 mm).

Na Figura 45 visualiza-se a comparação dos valores eficaz nos Experimentos 2, 4 e 5 que levam em consideração as amplitudes de vibração no tempo de 50 a 55 segundos.

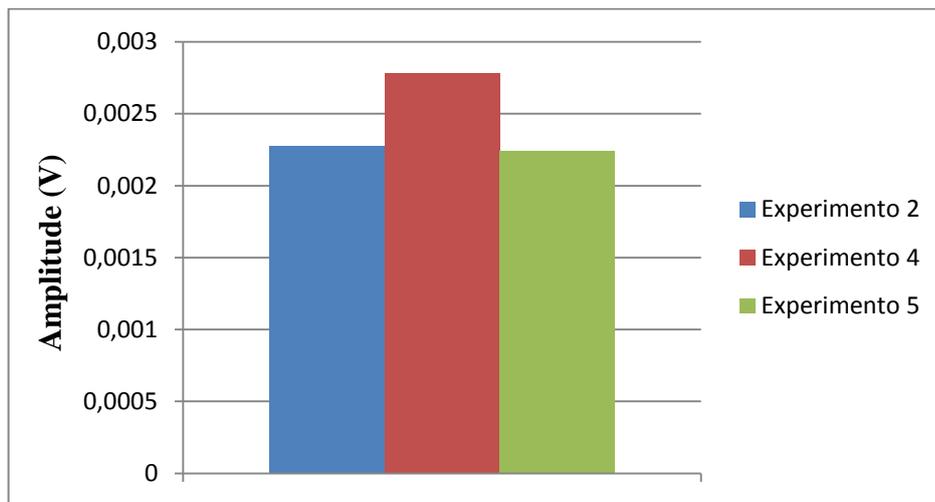


Figura 45 – Média quadrática das amplitudes de 50 a 55 segundos.

A Figura 45 apresenta características parecidas em relação à Figura 44. Entre elas é a questão do desgaste da ferramenta no qual quanto maior for ele, maior será a vibração na peça. A principal diferença entre as duas últimas figuras é a amplitude, no qual a Figura 45 apresenta valores superiores para todos os casos devido à distância do acelerômetro que é maior quando se comparado com os dados da Figura 44.

Foi selecionada a Figura 37 e ampliada no tempo de 10 segundos para saber como se comportava o sinal (Figura 46).

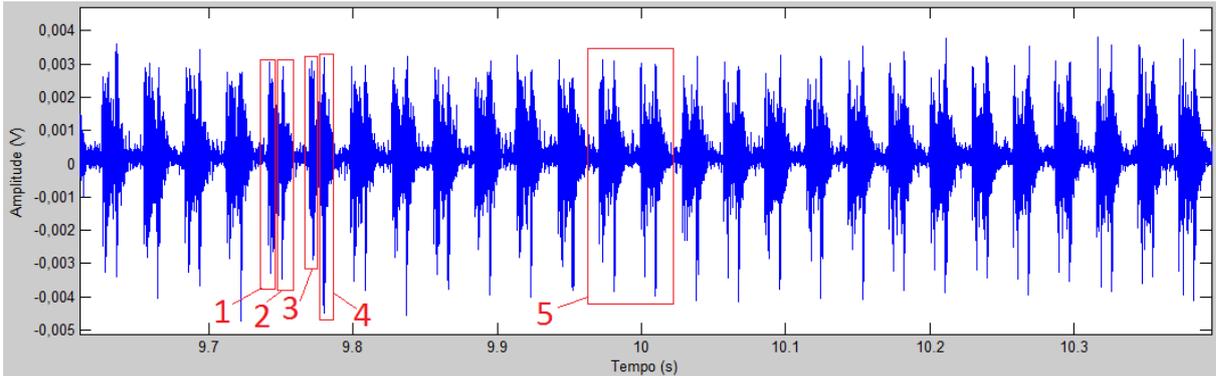


Figura 46 – Comportamento do sinal do Experimento 1 (duas pastilhas novas e a_p igual a 0,25 mm) no tempo de 10 segundos.

Na Figura 46, analisa-se que a vibração máxima gira em torno de 0,004 V, no qual possui uma amplitude inferior quando comparado com as Figuras 47 e 48 devido a sua profundidade de corte ser a menor entre os Experimentos 2 e 3.

Percebe-se através da primeira marcação em vermelho que acontece a entrada de uma das ferramentas de corte na fase ativa e na marcação em vermelho seguinte representa o mesmo inserto entrando na fase inativa (ao observar a Figura 33 facilita o entendimento). Na terceira marcação é o momento que a outra pastilha entra na fase ativa e conseqüentemente, a quarta marcação é quando a própria entra na fase inativa. Essa explicação segue para as marcações de vermelho que estão presentes nas Figuras 47, 48, 49 e 50.

Observa-se que a diferença de tempo entre a segunda marcação de vermelho e a terceira é maior do que a primeira e a segunda marcação e a terceira e quarta marcação. Isso é justificado pelo fato de que em certo momento do ciclo, as duas pastilhas não estarão encostando na peça. Vale salientar que essa diferença de tempo acontece em todos os 5 experimentos.

A Figura 47 é o resultado ampliação da Figura 38 no tempo de 10 segundos.

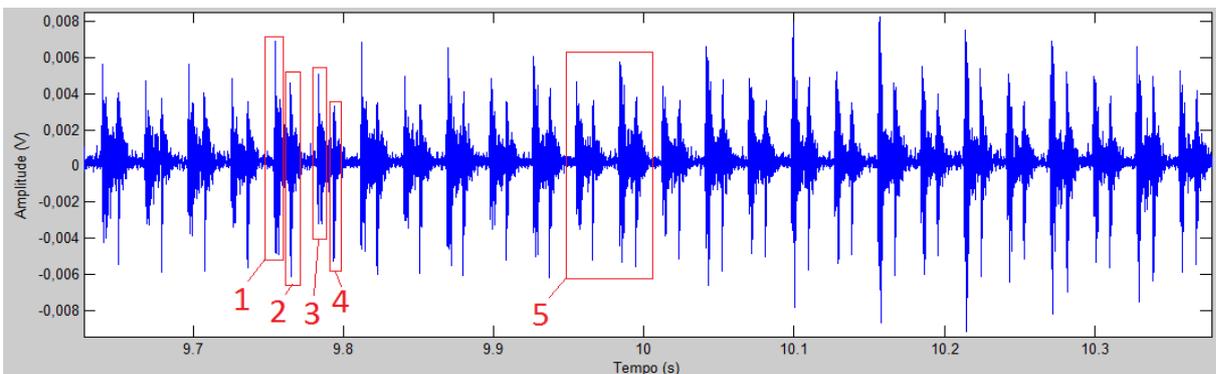


Figura 47 – Comportamento do sinal do Experimento 2 (duas pastilhas novas e a_p igual a 0,5 mm) no tempo de 10 segundos.

Ao analisar a Figura 47, observa-se que em 10,1 segundos, a amplitude cresce de forma mais acentuada pelo fato de possivelmente neste tenha usinado uma área de maior dureza na peça. Também, a figura mostra que sua amplitude de vibração é maior do que a Figura 46, como era de se esperar pelo fato da peça está sendo usinado com uma maior profundidade.

É possível identificar o momento que as ferramentas entram nas fases ativa e passiva, como já foi comentado no experimento anterior, e no momento da entrada dos insertos nas fases ativa (primeira marcação e terceira, por exemplo) há uma diferença de amplitude entre eles um pouco maior quando comparado com a Figura 46, sendo justificado pelo fato do Experimento 2 ter uma profundidade de corte superior em relação ao Experimento 1.

Também é possível observar que esses picos de vibração nas entradas das fases ativas (primeira marcação e terceira) são diferentes, pois provavelmente ocorreu um desvio de batimento radial e/ou axial das ferramentas fazendo com que uma das pastilhas usine mais do que a outra, ocasionando uma diferença de vibração. No experimento 3 acontece essa mesma característica.

A Figura 48 representa um aumento da Figura 39 no tempo de 10 segundos.

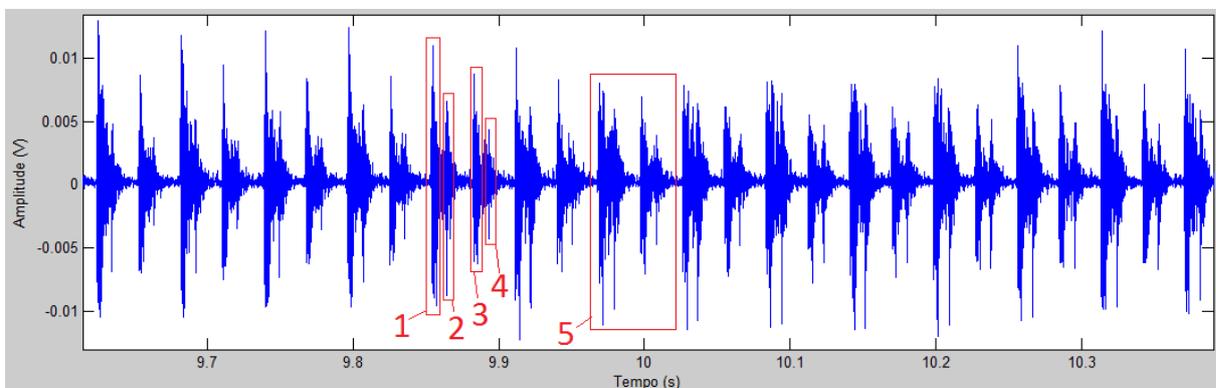


Figura 48 – Comportamento do sinal do Experimento 3 (duas pastilhas novas e a_p igual a 1 mm) no tempo de 10 segundos.

Na Figura 48 percebe-se que sua amplitude de vibração é superior do que as Figuras 46 e 47, uma vez que a peça está sendo usinada com uma maior profundidade.

No momento da entrada dos insertos na fase ativa há uma diferença de amplitude entre eles ainda maior quando comparado com as Figuras 46 e 47, sendo justificado pelo fato do Experimento 3 ter uma profundidade de corte superior em relação aos Experimentos 1 e 2.

A Figura 49 mostra a Figura 40 ampliada em 10 segundos.

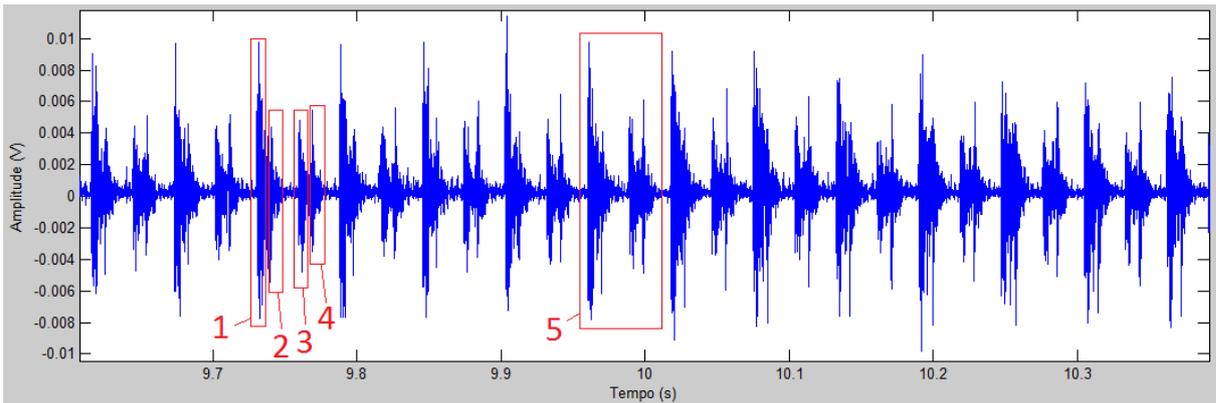


Figura 49 – Comportamento do sinal do Experimento 4 (duas pastilhas desgastadas e a_p igual a 0,5 mm) no tempo de 10 segundos.

Na Figura 49 percebe-se que sua amplitude é superior do que a Figura 47 devido o ensaio realizado ter utilizado duas pastilhas desgastadas e que segundo a literatura, quanto maior for esse desgaste, maior será a vibração.

Foi selecionada a Figura 41 e ampliada no tempo de 10 segundos para analisar o comportamento do sinal (Figura 50).

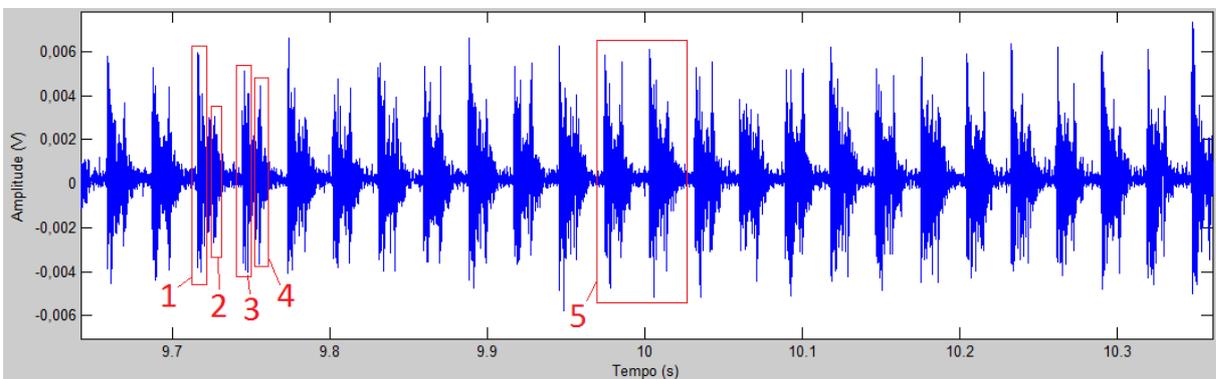


Figura 50 – Comportamento do sinal do Experimento 5 (uma pastilha nova e uma desgastada e a_p igual a 0,5 mm) no tempo de 10 segundos.

Ao observar a amplitude da Figura 50, percebe-se que ela é parecida em relação à Figura 47. Era de se esperar que a vibração fosse maior já que neste ensaio está presente uma pastilha desgastada, diferentemente do Experimento 2 que possui dois insertos novos.

Esperava-se que fosse possível identificar qual a amplitude representa a ferramenta nova e a desgasta, porém devido ao problema ocasionado pelos batimentos radial e axial, não se pode afirmar isso.

Em todas as Figuras (46, 47, 48, 49 e 50) visualiza-se uma operação de corte descontínuo, traduzindo a operação de fresamento.

Ainda na Figura 46 observa-se uma quinta marcação em cor vermelha. Nesta marcação, foi ampliada a imagem para observar como o sinal se comportava. Portanto, segue a Figura 51.

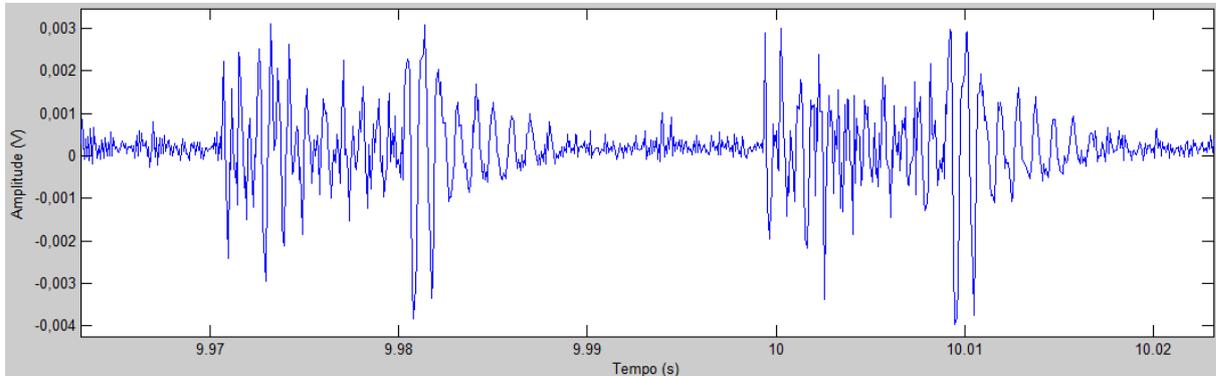


Figura 51 – Comportamento do sinal do Experimento 1 (duas pastilhas novas a_p igual a 0,25 mm) na quinta marcação de vermelho da Figura 46.

Percebe-se na Figura 51 que a peça começa a ser usinada logo após 9,97 segundos, em seguida ocorre uma pequena diminuição de amplitude e volta a ter outro aumento de amplitude depois 9,98 segundos, caracterizando a entrada da ferramenta na fase inativa. Logo após, a amplitude vai diminuindo a se estabilizar um pouco antes de 9,99 segundos, representando o momento em que os insertos não estão encostando na peça. Observa-se que o comportamento do sinal da segunda ferramenta é parecido com a primeira.

A Figura 52 representa a quinta marcação de vermelho da Figura 47 ampliada.

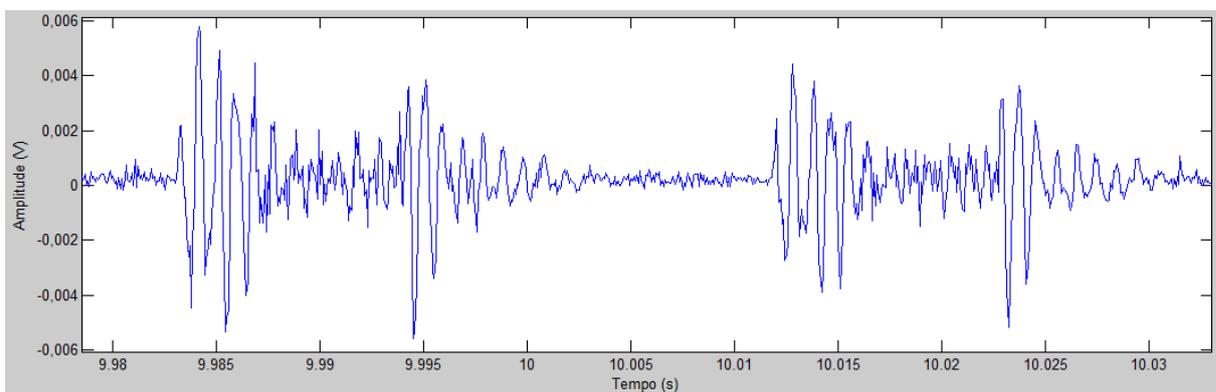


Figura 52 – Comportamento do sinal do Experimento 2 (duas pastilhas novas a_p igual a 0,5 mm) na quinta marcação de vermelho da Figura 47.

Essa figura apresenta um comportamento um pouco diferente da Figura 51, pois percebe-se que após a entrada do inserto na peça, por volta 9,987 segundos, a amplitude de vibração diminui de forma mais acentuada. Também, observa-se que o comportamento do

o sinal da segunda ferramenta é parecido com a primeira, porém esse possui uma amplitude maior.

A Figura 53 revela o sinal de vibração da quinta marcação da Figura 48.

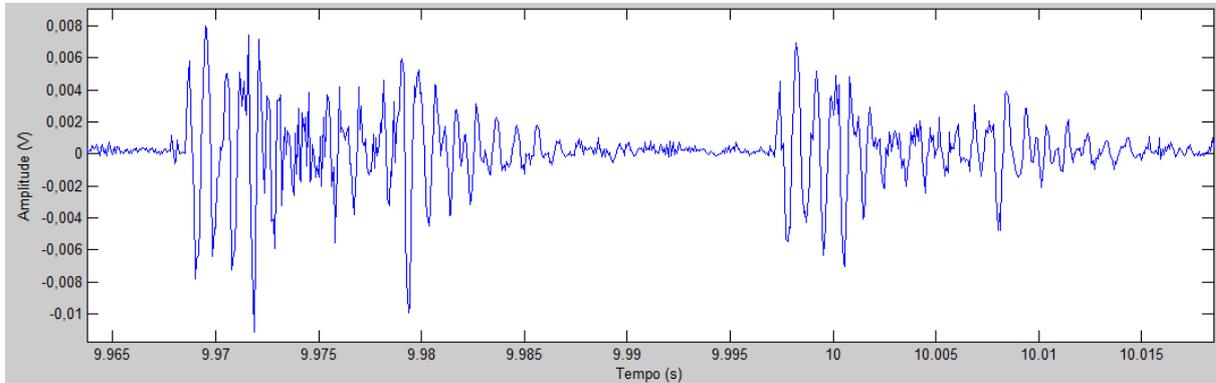


Figura 53 – Comportamento do sinal do Experimento 3 (duas pastilhas novas a_p igual a 1 mm) na quinta marcação de vermelho da Figura 48.

Observa-se que essa figura possui um comportamento parecido com a Figura 52 quando se visualiza a usinagem do primeiro inserto, porém o comportamento de vibração do segundo inserto na entrada da fase inativa não é parecido quando comparado com as Figuras 51 e 52.

A Figura 54 mostra a quinta marcação de vermelho da Figura 49 ampliada.

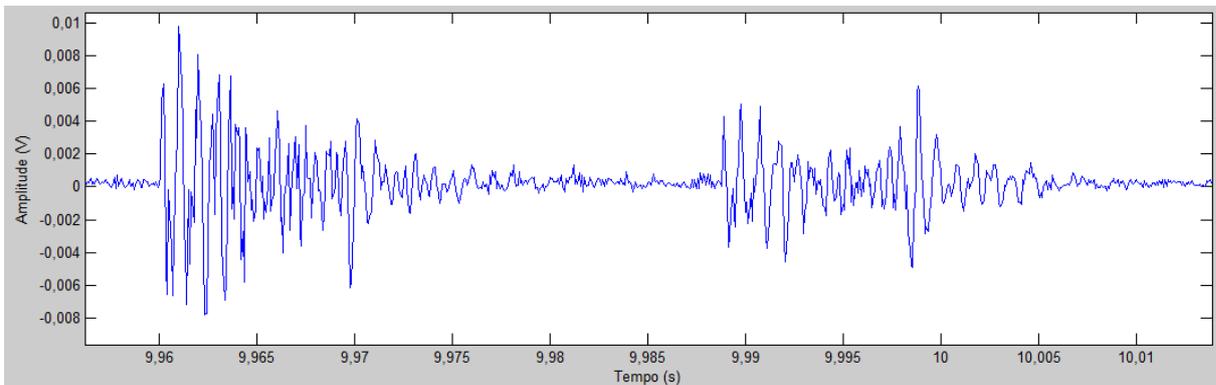


Figura 54 – Comportamento do sinal do Experimento 4 (duas pastilhas desgastadas e a_p igual a 0,5 mm) na quinta marcação de vermelho da Figura 49.

Percebe-se na Figura 44 que a vibração de entrada do primeiro inserto é bem mais acentuada do que o segundo podendo ser justificado pela diferença de desgaste do mesmo, onde o primeiro tem um maior desgaste médio quando comparado com o segundo.

A Figura 55 representa o sinal de vibração da quinta marcação da Figura 50.

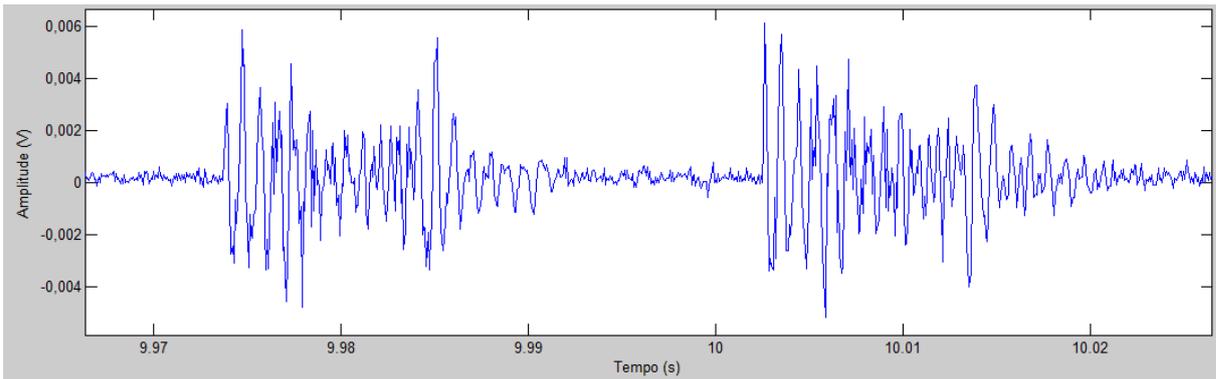


Figura 55 – Comportamento do sinal do Experimento 5 (uma pastilha nova e uma desgastada e a_p igual a 0,5 mm) na quinta marcação de vermelho da Figura 50.

Ao visualizar a Figura 55, infelizmente, não é possível afirmar qual é a ferramenta nova e a desgastada, justamente devido à questão do desvio de batimento radial e/ou axial, como já foi comentado anteriormente.

Segundo Lemaster, Lu e Jackson (2000) a banda de frequência recomendada para monitorar o estado da ferramenta é de 1000 a 7000 Hz. Então, todos os dados analisados foram utilizando a frequência até 6950 Hz, já que a frequência de amostragem realizada foi de 14000 Hz, seguindo o Teorema de Nyquist. A Figura 56 mostra a técnica de análise espectral, que é no domínio da frequência. Ela possibilita avaliar a densidade de potência espectral, função que representa a distribuição de energia sobre o domínio da frequência. Ou seja, quando um corpo vibra, geralmente gera frequências diferentes, cada uma com sua amplitude de vibração. Através desta figura, pode-se ter uma ideia do valor da amplitude para cada faixa de frequência.

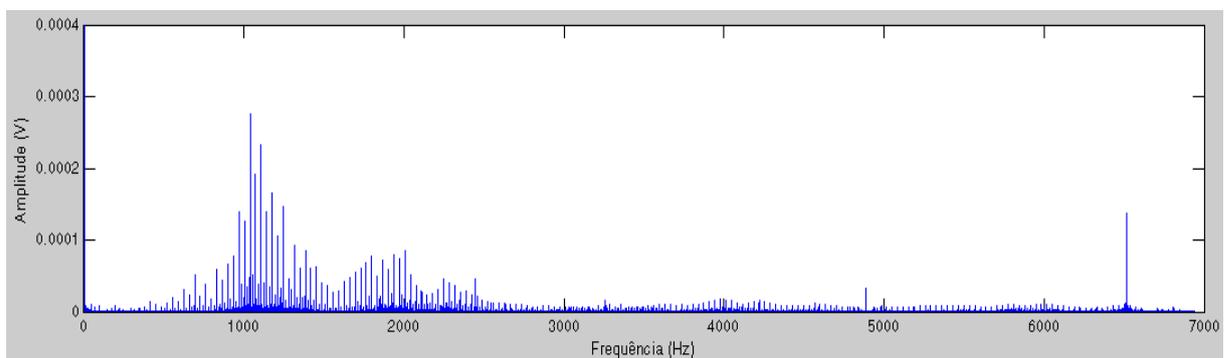


Figura 56 – Aquisição do Experimento 1 (duas pastilhas novas e a_p igual a 0,25 mm) no domínio das frequências.

Percebe-se que as maiores amplitudes são de frequência um pouco acima de 1000 Hz, confirmando o que a literatura afirmou, porém, existe uma quantidade de amplitudes considerável abaixo de 1.000 Hz.

A Figura 57 representa a aquisição do sinal das amplitudes em função das frequências do Experimento 1.

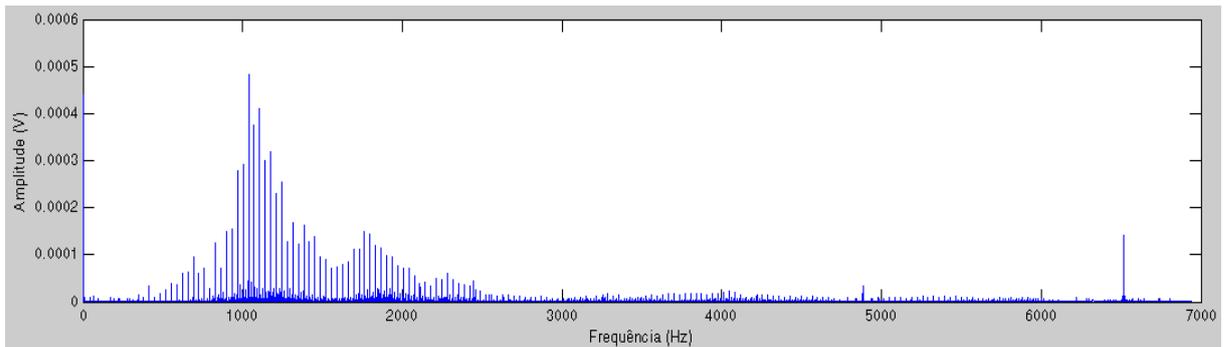


Figura 57 – Aquisição do Experimento 2 (duas pastilhas novas e a_p igual a 0,5 mm) no domínio das frequências.

No Experimento 2 percebe-se que as amplitudes são superiores com relação ao Experimento 1, como já era de se esperar devido a sua maior profundidade de corte. Porém, a densidade de potência espectral é parecida com o Experimento 1, com as maiores amplitudes na frequência um pouco acima de 1000 Hz e uma quantidade de amplitudes considerável abaixo de 1.000 Hz.

A Figura 58 mostra as amplitudes no domínio das frequências para o Experimento 3.

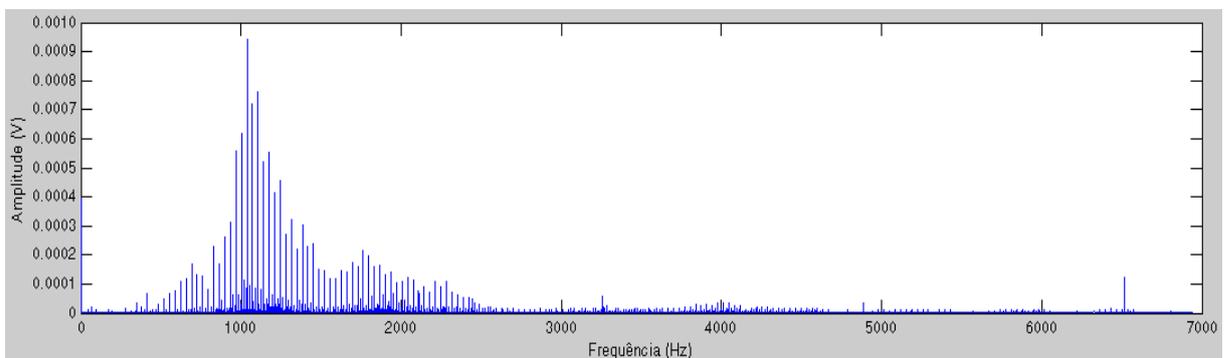


Figura 58 – Aquisição do Experimento 3 (duas pastilhas novas e a_p igual a 1 mm) no domínio das frequências.

Ao observar a Figura 58, analisa-se que as amplitudes são maiores do que a Experimento 1 e 2, confirmando a literatura. Com relação à distribuição de energia sobre o domínio da frequência, verifica-se que esse experimento é parecido com os dois anteriores.

Na Figura 59 pode-se observar as amplitudes de vibração em função das frequências do Experimento 4.

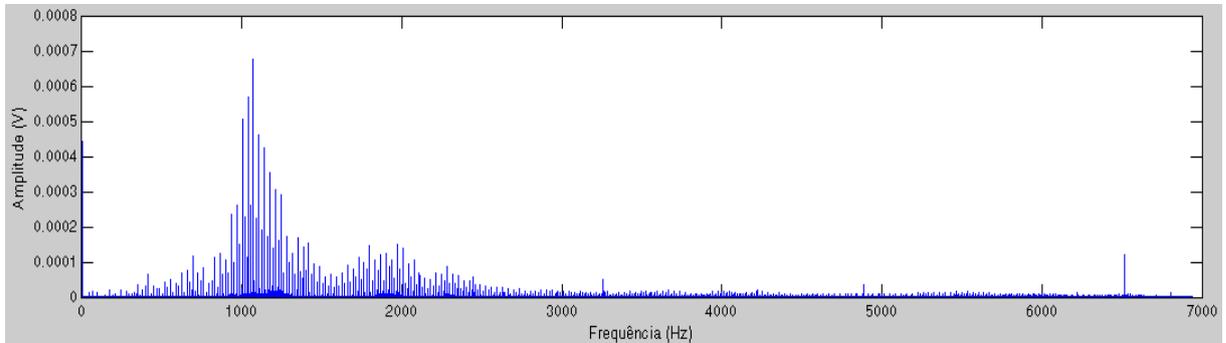


Figura 59 – Aquisição do Experimento 4 (duas pastilhas desgastadas e a_p igual a 0,5 mm) no domínio das frequências.

A Figura 59 exibe que as amplitudes são maiores do que a Experimento 2, conforme a literatura afirma, no qual quanto maior for o desgaste da ferramenta maior será vibração. Contudo, a densidade de potência espectral é um pouco diferente com relação ao segundo experimento e isso é percebido com mais ênfase nas frequências entre 1000 e 2000 Hz.

Já a Figura 60 mostra a aquisição do Experimento 5 em função das frequências.

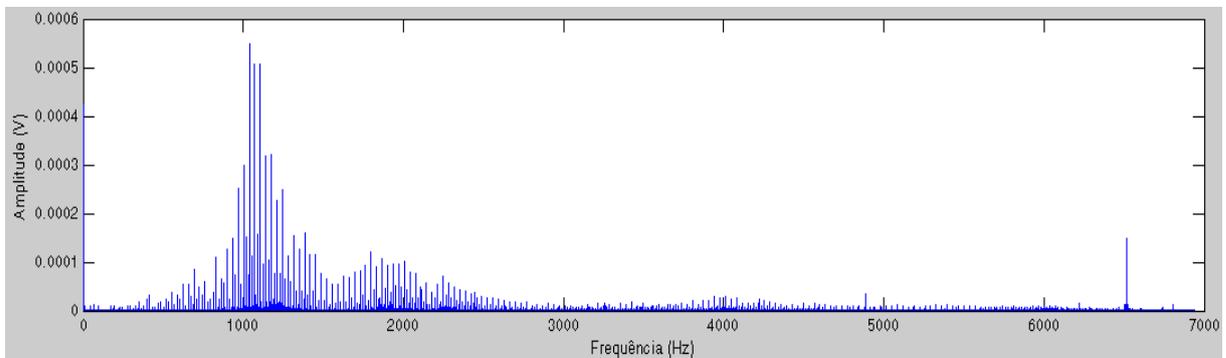


Figura 60 – Aquisição do Experimento 5 (uma pastilha nova e uma desgastada e a_p igual 0,5 mm) no domínio das frequências.

Percebe-se que a amplitude do Experimento 5 é um pouco maior do que o Experimento 2 e a densidade espectral é maior comparado com o mesmo, onde pode ser observado principalmente entre 1000 e 2000Hz.

5 CONCLUSÃO

De acordo com os resultados obtidos neste trabalho, pode-se concluir que:

- Foi confirmado neste trabalho que no processo de fresamento, a pastilha desgastada apresenta uma amplitude de vibração maior do que com a pastilha nova.
- Porém, quando foi realizado o ensaio utilizando um inserto novo e um desgastado, não se teve um aumento de amplitude considerável quando se comparado com as ferramentas novas.
- Com relação à mudança da profundidade de corte também se confirmou que o aumento deste produz um aumento na amplitude da vibração.
- Nos gráficos das amplitudes de vibração no domínio das frequências percebe-se que uma faixa de frequências entre cerca de 800 a 2000 Hz se mostrou sensível às variações introduzidas no processo.
- Os resultados deste trabalho indicam que de acordo com as condições usadas, a vibração pode ser usada como um bom indicador do estado de desgaste da ferramenta.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

As sugestões para trabalhos futuros são:

- Fazer uma análise modal de todo o equipamento (martelo de impacto).
- Descobrir o que está causando uma alta densidade de potência espectral nas frequências entre 800 e 2000 Hz nos gráficos das amplitudes de vibração no domínio das frequências.

7 REFERÊNCIAS

- BONIFÁCIO, M. E. R. *Monitoramento do processo de torneamento de acabamento via sinais de vibração*. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, 1993.
- BRAGA, D. U. *Monitoramento do processo de torneamento via parâmetros elétricos do motor da máquina*. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, 1992.
- CALDEIRANI FILHO, J. *Estudo e monitoramento do processo de fresamento frontal com fresas de insertos intercambiáveis*. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, 1998.
- CHIAVERINI, V. *Aços e ferros fundidos*. 7. ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2005.
- COSTA, C. E. *Monitoramento do processo de torneamento de desbaste via corrente elétrica do motor principal da máquina e via vibração da ferramenta*. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, 1995.
- DESCHAMPS, F. *Contribuições para o desenvolvimento de um sistema de visão aplicado ao monitoramento do desgaste de ferramentas de corte – o sistema toolspy*. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, 2004.
- DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. *Tecnologia da usinagem dos materiais*. 3. ed. São Paulo: Artliber Editora, 2001.
- FERRARESI, D. *Fundamentos da usinagem dos metais*. 12. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1970.
- LEMASTER, R. L.; LU, L.; JACKSON, S. *The use of process monitoring techniques on a CNC wood router. Part 2. Use of a vibration Accelerometer to monitor tool wear and workpiece quality*. Artigo, Forest Products Journal, 2000.
- MACHADO, A. R.; COELHO, R. T.; ABRÃO, A. M.; DA SILVA, M. B. *Teoria da usinagem dos materiais*. 1. ed. São Paulo: Editora Blucher, 2009.
- MACHADO, A. R.; COELHO, R. T.; ABRÃO, A. M.; DA SILVA, M. B. *Teoria da usinagem dos materiais*. 2. ed. São Paulo: Editora Blucher, 2011.
- MEOLA, T.; DUARTE, M. A. V. Monitoramento on-line de processos de usinagem via medição de vibrações. In: SIMPÓSIO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA, 16., 2006.
- MEOLA T. *Monitoramento em tempo real da qualidade de sinais de vibrações, utilizando inteligência artificial*. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia, 2005.
- NATIONAL INSTRUMENTS. NI 9234: módulo IEPE de 4 canais, ± 5 V, 51,2 kS/s, 24 bits. Disponível em: <<http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/pt/nid/208802>>. Acesso em: 10 dez. 2013.

NATIONAL INSTRUMENTS. *NI cDAQ-9178*: chassi NI CompactDAQ USB de 8 slots. Disponível em: <<http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/pt/nid/207534>>. Acesso em: 10 dez. 2013.

OLIVEIRA, A. R.; ARAÚJO, I. C.; SILVA, G. Influência da temperatura no revenimento do aço SAE 4340. In: ENCONTRO LATINO AMERICANO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 13.; ENCONTRO LATINO AMERICANO DE PÓS-GRADUAÇÃO, 9., Universidade do Vale do Paraíba, 2009.

ORHAN S.; ER A. O.; CAMUS-CU N.; ASLAN E. *Tool wear evaluation by vibration analysis during end milling of AISI D3 cold work tool steel with 35 HRC hardness*. Artigo, Elsevier Ltd, 2006.

PIGARI, A. C. *Monitoramento do desgaste da ferramenta no processo de torneamento usando emissão acústica*. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, 1995.

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

ROMI. *Centros de usinagem verticais*. Disponível em: <http://romi.com.br/fileadmin/Editores/MF/Catalogos/Portugues/cat_Romi_D_600_D_800_p_o_aa.pdf>. Acesso em: 10 dez. 2013.

SCHROETER, R. B.; STOETERAU, R.L.; WEINGAERTNER, W. L. *Processos de Usinagem*. 2004. Apostila.

SIDDHPURA, A.; PAUROBALLY R. *A review of flank wear prediction methods for tool condition monitoring in a turning process*. Artigo, Springer-Verlag London Limited, 2012.

SOUTO, U. B. *Monitoramento do desgaste de ferramenta no processo de fresamento via emissão acústica*. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Uberlândia, 2007.

SOUZA, A. J. *Aplicação de multisensores no prognóstico da vida da ferramenta de corte em torneamento*. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Santa Catarina, 2004.

SOUZA, R.C.; NASCIMENTO, M.P.; VOORW, H.J.C.; PIGATIN, W.L. Análise da fadiga, corrosão e desgaste abrasivo do cromo duro eletrodepositado e revestimento de carbetto de tungstênio por HVOF no aço ABNT 4340.2002. *Projeções*, v. 19/20, p. 59-69, Jan./Dez. 2001/2002.

STEMMER, C. E. *Ferramentas de corte I*. 6. ed. Florianópolis: Editora da UFSC, 2005.

STOLFI, R. O. *Síntese e reconhecimento da fala humana*. Trabalho final (mestrado profissional) – Universidade Estadual de Campinas, 2006.

TAVARES FILHO, R. F. *Análise multi-resolução na determinação do desgaste de ferramentas em torneamento*. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, 1996.