



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA SEM FIO PARA O
MONITORAMENTO DA VIBRAÇÃO NA OPERAÇÃO DE
FRESAMENTO

PEDRO IVO ALVES VIANELLO

Belo Horizonte, 21 de fevereiro de 2020

Pedro Ivo Alves Vianello

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA SEM FIO PARA O MONITORAMENTO DA VIBRAÇÃO NA OPERAÇÃO DE FRESAMENTO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção de título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Processos de Fabricação.

Orientador: Prof. Alexandre Mendes Abrão.

Universidade Federal de Minas Gerais.

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

2020

V614d Vianello, Pedro Ivo Alves.
Desenvolvimento de um sistema sem fio para o monitoramento da vibração na operação de fresamento [recurso eletrônico] / Pedro Ivo Alves Vianello. - 2020.
1 recurso online (126 f. : il., color.) : pdf.

Orientador: Alexandre Mendes Abrão.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Apêndices e anexos: f. 111-126.

Bibliografia: f. 104-110.
Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Engenharia mecânica - Teses. 2. Fresagem (Trabalhos em metal) - Teses. 3. Vibração - Teses. 4. Aço - Teses. 5. Desgaste mecânico - Teses. 6. Acelerômetros - Teses. I. Abrão, Alexandre Mendes. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 621(043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

FOLHA DE APROVAÇÃO

*DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA SEM FIO PARA O MONITORAMENTO DA VIBRAÇÃO NA
OPERAÇÃO DE FRESAMENTO*

PEDRO IVO ALVES VIANELLO

Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de "Mestre em Engenharia Mecânica", na área de concentração de "Engenharia de Manufatura e Materiais".

Dissertação aprovada no dia 27 de março de 2020.

Por:



Documento assinado eletronicamente por **Alexandre Mendes Abrao, Professor do Magistério Superior**, em 26/08/2020, às 17:59, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Antonio Augusto Torres Maia, Professor do Magistério Superior**, em 11/09/2020, às 10:30, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Igor César Pereira, Usuário Externo**, em 15/09/2020, às 08:33, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador 0225820 e o código CRC C8E785E6.

Dedico esse trabalho à minha mãe.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Alexandre Mendes Abrão pela orientação, atenção e ensinamentos.

À minha mãe pelo apoio e suporte durante toda a elaboração deste trabalho.

À Rebeca pelo carinho e motivação para seguir em frente.

Aos professores Antônio Maia e Horácio Duarte pela ajuda e conselhos.

Ao professor Igor Pereira e ao técnico Reinaldo Fortes pelo auxílio na execução dos testes experimentais.

Ao professor Luís Maia pelo apoio nas análises dos resultados.

Ao amigo Luiz Janeiro pelo suporte e ajuda durante a elaboração do código do microcontrolador.

Ao colega Breno Lizardo pelo auxílio na fabricação do suporte.

Aos demais professores e alunos ligados ao laboratório de usinagem da UFMG.

À CAPES pelo apoio financeiro.

Meus sinceros agradecimentos.

RESUMO

O processo de usinagem possui particularidades vantajosas como o bom acabamento superficial da peça e a possibilidade de produção de pequenos lotes se comparado com as operações de fundição e conformação mecânica, por exemplo. Devido a essas e outras qualidades, a usinagem é muito presente nos processos de fabricação mesmo que represente um alto custo de produção devido ao elevado tempo de fabricação e à alta taxa de desperdício de material em forma de cavaco. Dentre as operações de usinagem destaca-se o fresamento pela alta taxa de remoção de material, versatilidade e produção de peças com geometrias complexas. Uma das aplicações do fresamento é a usinagem de aços ferramentas para a produção de matrizes para conformação mecânica. Como o custo de usinagem é alto, é necessário um rígido controle das variáveis do processo para que as tolerâncias sejam atendidas com o mínimo de perdas possível. Para que as dimensões, tolerâncias e qualidade superficial do produto após a usinagem sejam aceitáveis, a inspeção das arestas de corte da ferramenta é fundamental. Considerando os avanços tecnológicos e a implementação da Indústria 4.0, este trabalho propõe um método de monitoramento do desgaste de ferramentas de corte a partir do espectro da vibração durante o fresamento do aço ferramenta ABNT H13 revenido com pastilhas de metal duro por meio de um acelerômetro de baixo custo conectado a uma rede sem fio. O acelerômetro pode captar a aceleração nos três eixos com auxílio do microcontrolador, cujo *hardware* possui conexão integrada à *internet*, pode ser conectado a um servidor local por meio da rede *wifi*. Para validar a funcionalidade do sistema proposto foram realizados testes com variação dos parâmetros de corte (velocidade de corte, avanço e profundidade de usinagem) e teste de vida da ferramenta a fim de verificar a sensibilidade do sensor quanto às variações nos esforços de corte e quanto à progressão do desgaste da aresta de corte. Os resultados mostraram que o sensor responde bem à variação dos parâmetros de corte, sendo que a velocidade de corte e a profundidade de usinagem apresentam a maior influência nas amplitudes de vibração na primeira frequência de trabalho. Quanto ao desgaste, não foi possível afirmar com respaldo estatístico que o sensor é sensível à variação do desgaste das arestas de corte até o nível mensurado ($VB_B \approx 0,3\text{mm}$).

Palavras chaves: fresamento; aço ABNT H13; monitoramento; vibração; desgaste; acelerômetro.

ABSTRACT

Some of machining processes qualities are good surface finish at the component and the possibility of small batches production in contrast to casting and forming. Machining processes are relevant and widely used in industrial manufacture due to these features, despite their high production cost and large amount of chips produced. Milling stands out due to its high material removal rate and complex geometry production capability. Manufacture of dies and molds is one well known application of milling. As the production cost increases, the need to a tougher process control parameter is required in order to guarantee a desirable product tolerance and quality and to reduce material losses. Tool wear must be constantly supervised to assure acceptable product dimension and surface finish. Taking into account Industry 4.0 and technology advance in software communication, this study presents a wear monitoring method based on tools vibration signal during milling of annealed AISI H13 tool steel with WC inserts using a low-cost accelerometer and a microcontroller connected via wi-fi. Experimental tests were conducted to validate its functionality. Varying cutting speed, feed rate and depth of cut order to verify the sensor sensibility on tool wear evolution and cut parameters variation. The results shown that the low-cost sensor presents satisfactory response to cutting parameters variations and cutting speed and depth of cut are the most influent in the first harmonic spectral amplitudes. On the other hand, wear increasement was not statistically responsive to wear level measured ($VB_B \approx 0,3\text{mm}$).

Keywords: milling, tool steel, signal monitoring, vibration, tool life, accelerometer.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 - Processo de corte no fresamento: a) entrada positiva, b) entrada negativa, c) arco de contato pequeno, d) arco de contato grande, e) saída negativa.	21
FIGURA 2.2 - Tipos de abertura de cavidades: a) cavidade plana, b) cavidade de forma livre, c) cavidade de canto, d) cavidade de múltiplas entradas, e) cavidade com base de múltiplas faces, f) cavidade com base de forma livre.	23
FIGURA 2.3 - Ferramentas para o fresamento de perfis: a) pastilhas redondas, b) ball nose intercambiável, c) ball nose cabeça intercambiável, d) ball nose inteiriça.	24
FIGURA 2.4 - Tipos de fresamento: a) interpolação helicoidal, b) interpolação circular, c) fresamentos em mergulho interno, d) fresamento em mergulho externo.	25
FIGURA 2.5 - Mecanismos de desgaste nas ferramentas de corte: a) Cisalhamento plástico a altas temperaturas, b) Deformação sob tensão de compressão, c) Difusão, d) Attrition, e) Abrasão e f) Desgaste de entalhe.	37
FIGURA 2.6 - Tipos de desgaste: a) desgaste de cratera, b) desgaste de flanco e c) desgaste de entalhe.	40
FIGURA 2.7 - Representação da vibração auto-excitada.	57
FIGURA 2.8 - Diagrama de estabilidade de uma máquina para o processo de fresamento.	58
FIGURA 3.1 - Esquema da ligação dos componentes e montagem do circuito.	61
FIGURA 3.2 - Esquema da comunicação dos elementos do sistema de aquisição.	64
FIGURA 3.3 - Montagem da calibração do sistema de aquisição.	67
FIGURA 3.4 - Esquema do projeto do suporte e da montagem suporte e fresa.	68
FIGURA 3.5 - Montagem do sistema de aquisição junto ao suporte, montagem dos acelerômetros piezelétricos à peça e orientação dos eixos.	69
FIGURA 3.6 - Profundidade de trabalho máxima para que apenas uma aresta realize corte por vez.	71
FIGURA 3.7 - Sentido de contagem dos insertos no sentido horário a partir da posição do acelerômetro.	73
FIGURA 4.1 - Comparação do espectro de frequência a)10Hz, b)30Hz, c)50Hz, d)75Hz, e)100Hz, f)150Hz, g)200Hz, h)250Hz.	75
FIGURA 4.2 - Comparação da resposta na frequência entre o acelerômetro ideal e o MPU6050.	76

FIGURA 4.3 - a) comparação entre as amplitudes, b) razão entre as amplitudes.	77
FIGURA 4.4 - Sinal de vibração no eixo axial durante o fresamento concordante e discordante em diferentes velocidades de corte: a) 31,4 m/min, b) 47,1 m/min, c) 70,7 m/min e d) 78,5 m/min.	78
FIGURA 4.5 - Sinal de vibração no eixo radial durante o fresamento concordante e discordante em diferentes velocidades de corte: a) 31,4 m/min, b) 47,1 m/min, c) 70,7 m/min e d) 78,5 m/min.	79
FIGURA 4.6 - Sinal de vibração no eixo tangencial durante o fresamento concordante e discordante em diferentes velocidades de corte: a) 31,4 m/min, b) 47,1 m/min, c) 70,7 m/min e d) 78,5 m/min.	80
FIGURA 4.7 - Espectro do sinal de vibração no eixo axial para diferentes rotações: a) sentido concordante a 31,4 m/min, b) sentido concordante a 47,1 m/min, c) sentido concordante a 70,7 m/min, d) sentido concordante a 78,5 m/min, e) sentido discordante a 31,4 m/min, f) sentido discordante a 47,1 m/min, g) sentido discordante a 70,7 m/min e h) sentido discordante a 78,5 m/min.	81
FIGURA 4.8 - Espectro do sinal de vibração no eixo radial para diferentes rotações: a) sentido concordante a 31.4 m/min, b) sentido concordante a 47.1 m/min, c) sentido concordante a 70.7 m/min, d) sentido concordante a 78.5 m/min, e) sentido discordante a 31.4 m/min, f) sentido discordante a 47.1 m/min, g) sentido discordante a 70.7 m/min e h) sentido discordante a 78.5 m/min. Note: a escala da amplitude no corte discordante é o dobro.	83
FIGURA 4.9 - Primeiro modo de vibração do conjunto mandril-fresa-suporte.	84
FIGURA 4.10 - Comparação do espectro da vibração nos eixos em função das condições de corte. Vibração axial na condição: a) branda, b) média e c) pesada. Vibração radial na condição d) branda, e) média e f) pesada.	85
FIGURA 4.11 - Sinal de vibração para o corte em sentido discordante sob os parâmetros de corte mais pesados: a) direção do eixo axial e b) eixo radial.	86
FIGURA 4.12 - Contribuição de cada parâmetro de corte na amplitude da primeira frequência de trabalho da fresa: a) velocidade de corte, b) avanço, c) sentido de fresamento e d) profundidade de usinagem.	87
FIGURA 4.13 - Teste de normalidade para os resíduos.	88
FIGURA 4.14 - Efeito principal de cada parâmetro na amplitude da primeira frequência de trabalho: a) velocidade de corte, avanço e profundidade de usinagem na vibração média axial, b) velocidade de corte, avanço e profundidade de usinagem na vibração média radial.	90
FIGURA 4.15 - Curva de vida da ferramenta com três insertos.	94

FIGURA 4.16 - Deslocamento a) radial e b) axial das arestas de corte nos três inseros. OBS: figura fora de escala.....	92
FIGURA 4.17 - Desgaste de flanco para a inserto 1 após: a) 0,8, b) 27, c) 78 e d) 199 m fresados.	93
FIGURA 4.18 - Espectro vibracional para o eixo axial durante o teste de vida por comprimento fresado.....	93
FIGURA 4.19 - espectro vibracional para o eixo radial durante o teste de vida por comprimento fresado.....	94
FIGURA 4.20 - Rugosidade em função ao comprimento fresado.....	95
FIGURA 4.21 - Comparação do RMS do sinal de vibração no acelerômetro piezométrico de referência e o acelerômetro MPU6050 para: a) eixo axial e b) eixo radial.	96
FIGURA 4.22 - Correlação entre RMS da amplitude do sinal de vibração e o desgaste médio para o eixo axial entre a) acelerômetro MPU6050 e b) acelerômetro de referência e para o eixo radial entre c) acelerômetro MPU6050 e d) acelerômetro de referência..	97
FIGURA 4.23 - Comparação dos parâmetros assimetria e achatamento em relação ao desgaste: a) assimetria no eixo axial, b) achatamento no eixo axial, c) assimetria no eixo radial e d) achatamento no eixo radial.	98
FIGURA 4.24 - Espectro de frequência em relação ao comprimento usinado adquirido no acelerômetro de referência: a) eixo axial em 0,8 m fresado, b) eixo radial em 0,8 m fresado, c) eixo axial em 199,36 m fresados e d) eixo radial em 199,36 m fresados	100

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1 - COMPARAÇÃO DAS PROPRIEDADES DOS MATERIAIS DE FERRAMENTA..	28
TABELA 2.2 - MÉTODOS DIRETO E INDIRETO DE MONITORAMENTO E PRINCIPAIS SENSORES...	43
TABELA 3.1 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO AÇO FERRAMENTA H13..	60
TABELA 3.2 - VARIAÇÃO DOS PARÂMETROS DE CORTE PARA OS TESTES PRELIMINARES....	70
TABELA 3.3 - PARÂMETROS DE CORTE AVALIADOS NOS TESTES EXPERIMENTAIS.....	70
TABELA 3.4 - SEQUÊNCIA DE USINAGEM E COMPRIMENTO USINADO PARA O TESTE DE VIDA DA FERRAMENTA.....	72
TABELA A.1 - ORDEM DE EXECUÇÃO DOS TESTES.....	123
TABELA A.2 - DESGASTE DE FLANCO E RUGOSIDADE MEDIDOS NAS FERRAMENTAS E RUGOSIDADE APÓS CADA PASSADA.....	124
TABELA A.3 - EFEITOS DE SIGNIFICANCIA DE CADA FATOR NA RESPOSTA EM AMPLITUDE PARA O EIXO AXIAL EM FUNÇÃO DO P-VALOR.....	125
TABELA A.4 - EFEITOS DE SIGNIFICANCIA DE CADA FATOR NA RESPOSTA EM AMPLITUDE PARA O EIXO RADIAL EM FUNÇÃO DO P-VALOR.....	126

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
1.1 Objetivos	16
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1 Fresamento de cavidades.....	22
2.1.1 Materiais para ferramentas usados no fresamento de cavidades	26
2.1.1.1 Metal Duro	28
2.1.1.2 Cermet.....	32
2.1.1.3 Nitreto Cúbico de Boro Policristalino (PCBN).....	33
2.1.1.4 Cerâmica	34
2.2 Desgaste de ferramentas de corte	35
2.3 Monitoramento e controle do processo de usinagem	41
2.3.1 Monitoramento direto.....	43
2.3.1.1 Ótico.....	44
2.3.1.2 Resistência elétrica da junção ferramenta/peça.....	45
2.3.1.3 Radioatividade.....	45
2.3.1.4 Mudanças nas dimensões da peça	46
2.3.1.5 Distância entre ferramenta e peça	46
2.3.2 Monitoramento indireto.....	47
2.3.2.1 Força de usinagem	48
2.3.2.2 Som	49
2.3.2.3 Temperatura de corte.....	50
2.3.2.4 Rugosidade.....	52
2.3.2.5 Emissão acústica	53
2.4 Vibração no fresamento	53
2.4.1 Tipos de vibração	54
2.4.1.1 Vibração livre.....	54
2.4.1.2 Vibração forçada	55
2.4.1.3 Vibração auto-excitada (<i>chatter</i>).....	56
2.4.2 Monitoramento da vibração.....	58
3. METODOLOGIA	60
3.1 Materiais.....	60

3.2 Equipamentos	61
3.2.1 Sistema de monitoramento da vibração.....	62
3.2.2 Calibração do sistema de monitoramento da vibração	62
3.2.3 Testes de validação.....	62
3.3 Métodos.....	63
3.3.1 Sistema de monitoramento da vibração.....	63
3.3.2 Calibração do sistema de monitoramento da vibração	66
3.3.3 Testes de validação.....	68
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	74
4.1 Calibração do sistema.....	74
4.2 Testes de validação.....	77
4.2.1 Testes preliminares	77
4.2.2 Influência dos parâmetros de corte.....	83
4.2.2 Teste de vida.....	91
5. CONCLUSÃO	101
6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	103
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	104
APÊNDICES	111
Apêndice A.....	112
Apêndice B.....	120
Apêndice C.....	123
Apêndice D.....	124
Apêndice E.....	125

1. INTRODUÇÃO

Os avanços tecnológicos vêm acontecendo de maneira exponencial, principalmente com o auxílio da comunicação global por meio da *internet*, onde pesquisadores podem disponibilizar e ter acesso a resultados e pesquisas de qualquer parte do mundo sem muitas barreiras. Essa revolução atinge a indústria permitindo a comunicação de máquinas e colaboradores para que o funcionamento ocorra de uma maneira excepcionalmente singular, surgindo a Indústria 4.0.

Nas indústrias de manufatura, todos os dados sobre a fabricação do componente mecânico quanto a qualidade do processo, vida das ferramentas, estado da máquina e parâmetros de manufatura podem estar disponíveis numa nuvem de informações acessíveis pela *internet*. Essa interlocução pessoa-máquina permite melhorias na gestão de custo, qualidade do trabalho, disponibilidade das máquinas e produtividade.

Em geral, em uma linha de produção a usinagem está presente em alguma etapa do processo de produção de peças, já que as operações variam do desbaste ao acabamento e confecção de geometrias simples a complexas. Dentre as diversas operações de usinagem, o fresamento é uma das mais importantes devido à grande versatilidade e produtividade.

Uma das aplicações mais consideráveis da operação de fresamento é a produção de matrizes e moldes para a conformação mecânica a quente e a frio, as quais são largamente utilizadas em indústrias automobilísticas, por exemplo. As matrizes e os moldes são fabricados a partir de aços de alta resistência mecânica e à corrosão, denominados aços ferramentas, apresentando difícil usinabilidade devido às suas propriedades.

Para que o desempenho desses componentes mecânicos seja no mínimo aceitável é necessário que a qualidade superficial e subsuperficial sejam adequadas. Esses atributos são garantidos pela excelência do processo de acabamento conferido pelo polimento. A qualidade, tempo e custo do acabamento são dependentes da boa execução do procedimento anterior, o fresamento.

Os parâmetros de corte, estabilidade da máquina, operação, presença de fluido de corte e a ferramenta definem as condições para a geração da nova superfície. Quanto à

ferramenta, além da geometria e do material, a presença de desgaste e avarias pode ser o critério de maior impacto na qualidade superficial.

Além disso, algumas particularidades do processo são influentes na vida da ferramenta. Nesse caso, a principal influência do fresamento são as elevadas variações térmicas e mecânica atuantes na ferramenta durante cada rotação devido ao corte interrompido. Juntamente com o desgaste inevitável da ferramenta, esses fenômenos podem colaborar para o processo de desgaste e surgimento de eventuais avarias.

O uso da tecnologia com a finalidade de monitorar o processo de corte pode ser uma boa alternativa para otimizar as operações de usinagem. O monitoramento da progressão do desgaste da ferramenta permite assegurar a tolerância dimensional da peça, garantir o acabamento e determinar o momento exato para a troca da ferramenta.

Informações confiáveis sobre as condições de corte são necessárias para preencher o banco de dados sobre cada interação ferramenta-peça-máquina durante o processo de usinagem, garantindo um ou uma combinação de métodos úteis para o monitoramento do desgaste das ferramentas.

Uma das formas para se monitorar a operação de fresamento é por meio da análise temporal e do espectro de vibração. Essa técnica pode disponibilizar informações sobre a ferramenta, superfície usinada, condições de corte, operação, características da máquina e influências externas ao processo de corte.

1.1 Objetivos

Como objetivo geral, esse trabalho propõe o desenvolvimento de um sistema sem fio e de baixo custo de monitoramento para avaliar a influência dos parâmetros de corte e do desgaste da ferramenta sobre o sinal de vibração durante a operação de fresamento do aço ferramenta ABNT H13 no estado recozido utilizando pastilhas de metal duro. Pretende-se analisar a capacidade do sistema proposto em perceber as modificações no sinal de vibração devido às alterações das condições de corte e desgaste da ferramenta. Mais especificamente, propõe-se:

- Desenvolver um sistema de monitoramento por vibração, sem fio e de baixo custo e verificar a capacidade do sistema desenvolvido comparando-o com um acelerômetro de referência;
- Variar os parâmetros velocidade de corte, avanço e profundidade de usinagem e analisar a influência dessa variação sobre os sinais de vibração;
- Analisar a influência do desgaste na ferramenta sobre os sinais de vibração e a sensibilidade do sistema quanto a essa variação.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A manufatura pode ser realizada por meio de diversos processos que possuem como finalidade conferir propriedades, dimensões e formas a um material para que ele seja apto a realizar uma determinada função. Essas podem ser conferidas sem a remoção de material como a conformação mecânica ou fundição, com adição de material como a soldagem, por exemplo, ou por meio da remoção de material, nas operações de usinagem.

As operações de usinagem são responsáveis por atribuir forma e acabamento à peça usinada por meio da retirada de cavaco. O cavaco é definido como uma porção de material removido da peça pela ferramenta e que apresenta em uma forma geométrica irregular (FERRARESI, 1969).

A transformação da matéria prima em produto acabado por meio da usinagem é, ao mesmo tempo, um processo simples e complexo. Simples pois se resume na remoção de porções de material, mas complexo devido às dificuldades no processo oriundas à imprevisibilidade do desempenho durante o corte (SHAW, 2005). Essa imprevisibilidade se deve às inúmeras combinações de parâmetros de corte ocasionando sempre em uma nova interação entre a ferramenta e a peça com altas taxas de deformação plástica.

A usinagem engloba diversas operações e essas podem ser subdivididas entre não-usinagem convencional e convencional. As operações não-convencionais são de menor popularidade e de aplicações mais específicas, tais como a eletroerosão, eletroquímica, plasma, laser, fluxo abrasivo, jato d'água ou abrasivo, entre outros. Já a usinagem convencional envolve as operações de torneamento, furação, rosqueamento, brochamento, serramento, retificação, faceamento, aplainamento e fresamento (FERRARESI, 1969). As ferramentas para tais operações podem possuir geometrias definidas ou não e são fabricadas de materiais variados.

Essa variedade de operações de usinagem agrega versatilidade e possibilidade de produção de peças de alta complexibilidade geométrica. Cada operação possui singularidades que as tornam notáveis em suas aplicações. Dentre essas, a operação de fresamento se destaca como uma mais versáteis devido às altas taxas de remoção de material e à produção das mais variadas e complexas geometrias por meio da combinação do tipo de máquina, ferramenta e movimentos da ferramenta e peça (MACHADO *et al.*, 2009).

O fresamento é a operação de usinagem que consegue produzir superfícies planas ou abauladas por meio da rotação da ferramenta combinada com o movimento da mesa, que suporta a peça ou o movimento da própria ferramenta (TRENT & WRIGHT, 2000).

A operação pode ser classificada de acordo com a posição do eixo-árvore (fresamento horizontal, vertical ou inclinado) ou de acordo com a orientação das arestas de corte (frontal e tangencial), segundo Ferraresi (1969). Ainda sobre a classificação da operação, outra diferenciação é feita quanto ao movimento realizado, que pode ser concordante ou discordante. Quando os movimentos de corte e avanço possuem a mesma direção e sentido é denominado fresamento concordante, já quando possuem sentidos opostos é denominado de fresamento discordante (FERRARESI, 1969).

Durante o fresamento discordante a espessura do cavaco é nula no início do corte e aumenta até uma espessura máxima. No início de cada ciclo de ativo da operação, como a espessura de corte é mínima, há um aumento na pressão específica de corte pontual causando a elevação da temperatura no contato ferramenta/peça, além do encruamento da superfície que está sendo usinada. Por outro lado, no fresamento concordante há um choque da ferramenta com a peça no início do ciclo ativo, já que o corte se inicia com a espessura do cavaco próxima da máxima (DINIZ *et al.*, 2001). Como no fresamento concordante a espessura de corte é inicialmente alta, na maioria das vezes ocasiona menos vibração e um melhor acabamento superficial.

A característica mais importante dessa operação é o corte intermitente realizado por cada aresta de corte. Cada aresta está submetida a impactos periódicos quando entra em contato com a peça. Logo, a ferramenta está submetida a tensões e ao aquecimento durante a fase ativa do ciclo (corte), seguido de um período de alívio de tensão e resfriamento, caracterizando a parte inativa do ciclo. Essa característica do processo provoca fadiga térmica e mecânica na ferramenta (TRENT & WRIGHT, 2000). Entretanto, essa característica apresenta como vantagem a possibilidade de utilizar ferramentas com um maior número de arestas de corte, levando a uma melhor distribuição dos esforços e com a possibilidade de aumentar a velocidade de avanço através do incremento do avanço de cada aresta.

A escolha do número de arestas de corte presentes na fresa deve ser levada em consideração já que essa influencia a operação. Normalmente, uma fresa com muitas arestas de corte, denominada de passo fino, distribui melhor os esforços de usinagem entre os dentes, permitindo um avanço maior da ferramenta, mas em contrapartida pode causar problemas

devido ao acúmulo de cavacos e o aumento no consumo de energia. Por outro lado, uma fresa com poucas arestas de corte (passo grande) pode levar a um esforço maior das arestas, gerando desgaste mais acelerado, problemas de acabamento e peças fora das dimensões desejadas (SOUTO, 2007).

Cada aresta cortante da fresa possui um posicionamento relativo em relação à peça, fator que afeta a vida da ferramenta. Esse posicionamento é relativo ao contato intermitente durante a fase ativa do ciclo entre ferramenta e peça que pode ser dividido em três estágios: entrada do corte, arco de contato do corte e saída do corte, conforme a FIG. 2.1 (SANDVIK COROMANT, 2019a).

A entrada da ferramenta na peça é a fase menos sensível se a ferramenta for de metal duro pois este material possui uma boa resistência ao impacto e às tensões compressivas, que normalmente são mais brandas com a entrada positiva da ferramenta (FIG. 2.1a) e mais severas com a entrada negativa (FIG. 2.1b).

O arco de contato durante o corte pode chegar no máximo a 180° de contato. Quando o arco de contato é pequeno (FIG. 2.1c), é gerado menos calor no contato, permitindo maiores velocidades de corte. Os cavacos gerados normalmente são mais curtos o que permite a utilização de ferramentas positivas para reduzir os esforços de corte.

Já quando o arco de contato é grande (FIG. 2.1d), o tempo de contato é maior, gerando maior transferência de calor para a ferramenta, além de maiores esforços radiais.

A formação de cavacos espessos na saída da ferramenta pode ser problemática, como apresentado na FIG. 2.1e. Quando espesso, o cavaco irá provocar uma tensão de tração que poderá ocasionar trincas ou fratura da aresta de corte. Esse fato pode acarretar na redução da vida da ferramenta, especialmente na usinagem de aços duros (SANDVIK COROMANT, 2019a).

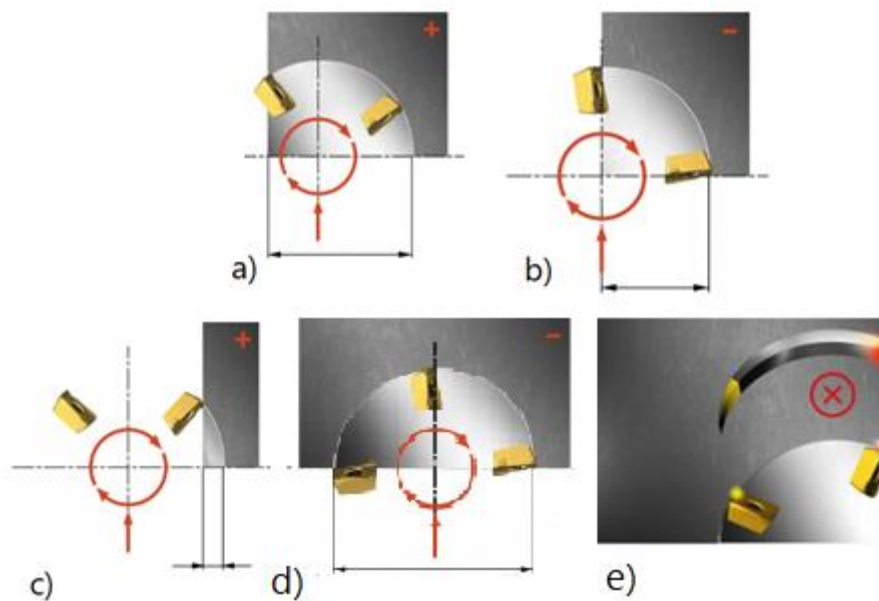


FIGURA 2.1 - Processo de corte no fresamento: a) entrada positiva, b) entrada negativa, c) arco de contato pequeno, d) arco de contato grande, e) saída negativa.

FONTE: SANDVIK COROMANT (2019a).

A estratégia de remoção de cavacos ou a estratégia de usinagem afeta tanto o tempo de produção quanto a integridade superficial. Diferentes caminhos implicam em diferentes orientações dos grãos e tensões residuais. No caso do fresamento em cinco eixos, os ângulos de saída e inclinação efetivos atuam na qualidade superficial da peça usinada, sendo o ângulo de saída o mais influente (KALVODA & HWANG, 2009).

A escolha da estratégia de usinagem ideal afeta, juntamente com a escolha dos parâmetros de corte, diretamente o tempo de corte e o tempo de produção total da peça (produtividade), (TUNÇ *et al.*, 2015). O tempo de corte pode ser diminuído por meio da simulação da estratégia de usinagem, podendo ser de viável aplicação industrial já que abrange todos os estágios da produção por usinagem: desbaste, semi-acabamento e acabamento. Por meio da simulação é possível prever as forças de corte, estabilidade do corte e a altura das marcas de avanço, sendo esses os parâmetros limitantes para a escolha da trajetória de usinagem (TUNC, 2019).

2.1 Fresamento de cavidades

Matrizes e moldes são comumente produzidos por meio de fundição e/ou por usinagem. Entretanto, mesmo as matrizes fundidas precisam passar por algum processo de acabamento, que na maioria dos casos é alguma operação de usinagem. A usinagem de matrizes e moldes é normalmente realizada por fresamento seguido das operações de eletroerosão (EDM – *eleto discharge machining* em inglês), retificação e polimento. A eletroerosão é uma operação de alta precisão, indicado para a produção de cavidades estreitas e de grande profundidade em materiais de elevada dureza, já que dependente essencialmente da condutividade elétrica e não da dureza do material da peça (ALTAN *et al.*, 1993).

O fresamento é a operação de usinagem mais indicada na produção de cavidades em matrizes e moldes por condições e peculiaridades do processo na qual a fresa pode apresentar as mais variadas formas, garantindo a versatilidade do processo (DINIZ *et al.*, 2001). A alta taxa de remoção de material é uma das principais vantagens do fresamento sobre o processo de eletroerosão. Essa peculiaridade, analisada isoladamente, já representa uma grande diminuição no tempo de fabricação (COSTA, 2003). Além disso, uma característica intrínseca da eletroerosão é a alta temperatura (que atinge faixas de 10000 a 20000 °C), enquanto as operações de fresamento gera temperaturas em torno de 400 °C. As altas temperaturas provocam tensões residuais de tração que na maioria dos casos, não são bem-vindas em uma matriz ou molde (DEWES *et al.*, 1999).

Para a fabricação de moldes e matrizes por fresamento é comumente necessária a abertura de sulcos ou rasgos iniciais que darão origem à cavidade principal. Geralmente moldes e matrizes são fabricados em aços ferramentas com médio a alto teor de carbono e elementos de liga que conferem, principalmente, alta resistência mecânica. Por conseguinte, a tarefa, mesmo que simples, possui alguns desafios.

De acordo com Hatna *et al.* (1998), pode-se classificar o tipo de cavidades quanto a forma, sendo as principais:

- Cavidade plana: definida por segmentos de reta e arcos, com base plana e paredes verticais côncavas ou convexas (FIG. 2.2a);
- Cavidade de forma livre: definida por curvas de forma livre nos perfis das paredes (FIG. 2.2b);
- Cavidade de canto: cavidade sem uma ou mais paredes (FIG. 2.2c);

- Cavidade de múltiplas entradas: a base possui mais de uma face horizontal (FIG. 2.2d);
- Cavidade com base de múltiplas faces: a base possui mais de uma face (FIG. 2.2e);
- Cavidade com base de forma livre: a base possui perfil de forma livre (FIG. 2.2f).

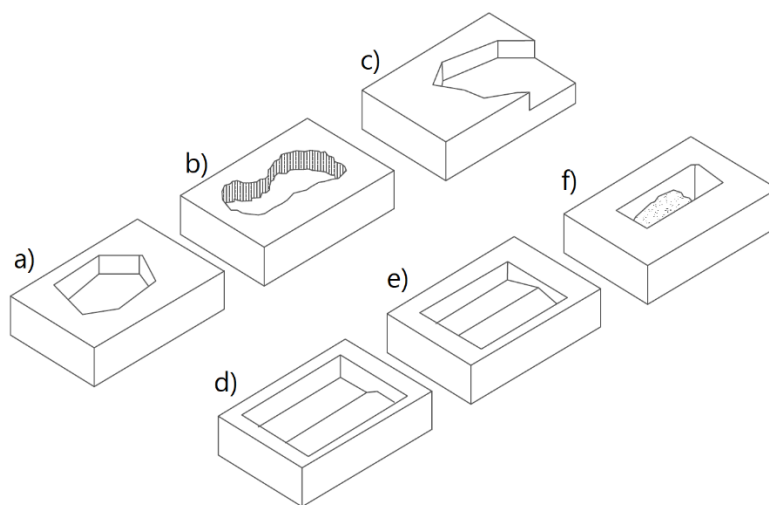


FIGURA 2.2 - Tipos de abertura de cavidades: a) cavidade plana, b) cavidade de forma livre, c) cavidade de canto, d) cavidade de múltiplas entradas, e) cavidade com base de múltiplas faces, f) cavidade com base de forma livre.

FONTE: Adaptado de Hatna *et al.* (1998).

Para essa operação, os tipos de fresas que normalmente são aplicáveis ao fresamento de perfis e cavidades são as fresas de topo esférica (*ball nose*) com inserto ou cabeça intercambiável ou a fresa inteira do mesmo material, como apresentado na FIG. 2.3 (SANDVIK COROMANT, 2019d).

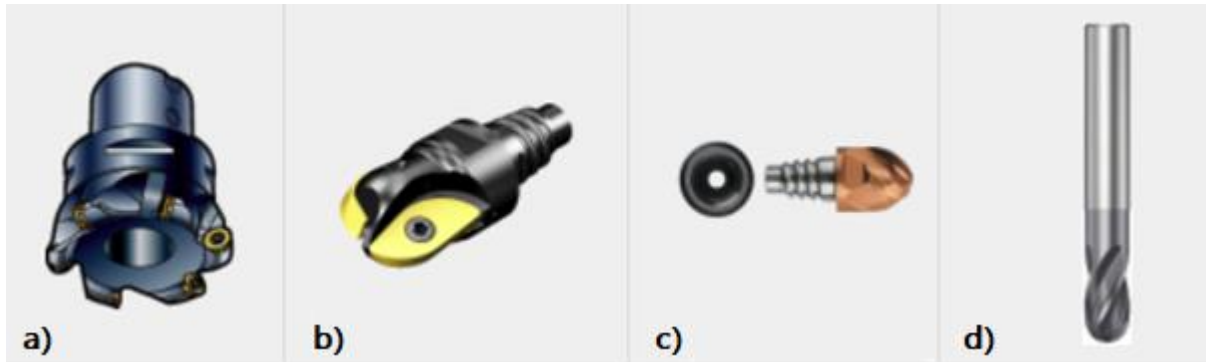


FIGURA 2.3 - Ferramentas para o fresamento de perfis: a) pastilhas redondas, b) *ball nose* intercambiável, c) *ball nose* cabeça intercambiável, d) *ball nose* inteiriça.

FONTE: SANDVIK COROMANT (2019d).

Segundo SANDVIK COROMANT (2019c) as formas de se usar uma cavidade por meio do fresamento são classificadas essencialmente em oito, podendo ser variadas entre si com a troca do ferramental:

- Usinagem em rampa linear com dois eixos;
- Usinagem em rampa circular;
- Alargamento de um furo;
- Fresamento externo circular ou usinagem em rampa;
- Fresamento em mergulho;
- Fresamento pica-pau;
- Métodos de fatiamento;
- Ângulos ou bolsões fechados.

Para se abrir uma cavidade, o método mais eficaz e rápido é por meio de um pré-furo produzido pela operação de furação. Contudo a quebra e a remoção de cavacos pode ser um empecilho em certos tipos de materiais. Ademais, a furação não é uma operação dinâmica na qual se produz várias geometrias além das circulares, abrindo espaço para outros métodos como a usinagem em rampa circular. Esse método possui como vantagens o menor uso de ferramentas (apenas a fresa), versatilidade e a não obrigatoriedade do uso de fluido de corte. A combinação de métodos é uma opção onde é possível combinar a furação com o fresamento circular ou em mergulho, por exemplo (SANDVIK COROMANT, 2019c).

A escolha da trajetória de usinagem é mais complexa do que apenas em termos de produtividade. O método de usinagem escolhido deve contemplar o tipo de ferramenta

disponível para o trabalho, a capacidade da máquina-ferramenta e as dimensões da cavidade a ser usinada (CAVICHIOILLI, 2017).

Para o desbaste de cavidades são utilizados normalmente dois métodos: a interpolação helicoidal/circular (FIG. 2.4a e 2.4b) e o fresamento em mergulho (FIG. 2.4c e 2.4d).

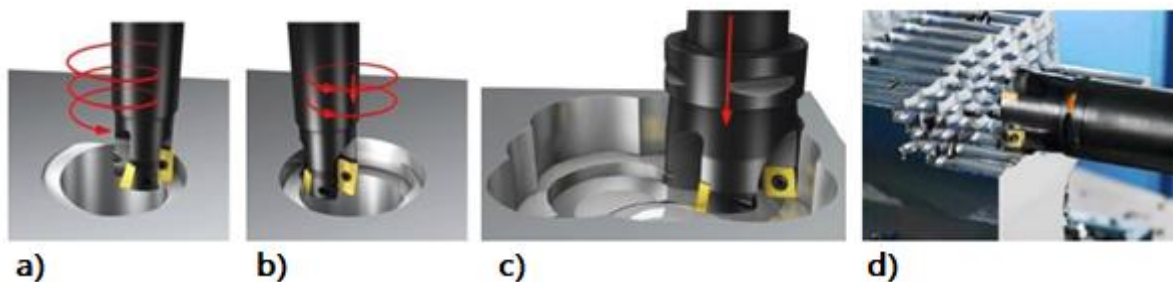


FIGURA 2.4 - Tipos de fresamento: a) interpolação helicoidal, b) interpolação circular, c) fresamentos em mergulho interno, d) fresamento em mergulho externo.

FONTE: SANDVIK COROMANT (2019c).

Na interpolação helicoidal/circular, as forças de corte são predominantemente radiais, podendo contribuir para a maior vibração durante a operação. O fresamento de mergulho é indicado para os casos onde há dificuldades devido ao grande comprimento em balanço da ferramenta – superior a quatro vezes o diâmetro da ferramenta – sendo os esforços radiais de grande influência nesse caso (CAVICHIOILLI, 2017). Ainda segundo o autor, o fresamento de mergulho é indicado para semi-acabamento de cantos, materiais duros de difícil usinabilidade e quando a máquina é instável ou possui pouca potência. Geralmente a maior dificuldade durante o fresamento de mergulho é a eliminação de cavacos.

Uma variação muito acentuada dos esforços de corte durante o desbaste pode influenciar a operação de acabamento, sendo necessário operações de semi-acabamento antes do acabamento final (TUNC, 2019). Diante disso, é crucial a determinação de parâmetros de corte e trajetória de usinagem para a redução do tempo de ciclo. Tunc (2019) demonstrou por meio de simulações e experimentos que a força de corte não é constante durante o fresamento convencional, prejudicando o acabamento. O autor propõe a otimização da trajetória da usinagem durante o processo de semi-acabamento baseada nas forças de usinagem, deflexão da ferramenta e erros geométricos, poupando até 33% do tempo do ciclo de acabamento.

Kull Neto (2016) realizou experimentos para avaliar a influência da variação do comprimento em balanço da fresa juntamente com a variação da estratégia de corte (ascendente ou descendente) e a frequência de entrada dos dentes na peça sobre os esforços de corte e a rugosidade da peça usinada. Como resultado, o balanço da ferramenta e a frequência de entrada dos dentes não mostraram grande impacto na rugosidade da peça e nos esforços de usinagem. Por outro lado, a estratégia de usinagem e os ângulos de saída e inclinação da ferramenta mostraram grande influência, pois contribuem diretamente com a componente radial da força, que está relacionada com a vibração do processo.

Já Wojciechowski *et al.* (2018) realizaram um estudo empregando um sensor ótico para medir a rugosidade da peça variando o comprimento em balanço da fresa e a velocidade de corte. A fresa com maior comprimento em balanço foi mais sensível ao aumento da velocidade de corte, gerando maior trepidação e marcas na peça devido as maiores deflexões instantâneas acarretadas pelas forças de corte, principalmente as radiais. Entretanto, as deflexões na ferramenta são agravadas quando a velocidade de corte está na faixa instável do diagrama de estabilidade da máquina.

2.1.1 Materiais para ferramentas usados no fresamento de cavidades.

Metais endurecidos ou aços ferramentas são amplamente aplicados para a fabricação de matrizes e moldes para trabalho a quente e a frio devido às propriedades desses materiais tais como: alta dureza, alta resistência mecânica, boa resistência em altas temperaturas, alta resistência à fadiga e desgaste. Todavia, esses materiais são de baixa usinabilidade, ocasionando altas forças de corte e elevado atrito entre ferramenta e cavaco, visto que são materiais que apresentam grande encruamento e cavacos difíceis de controlar e de comportamento abrasivo (CHINCHANIKAR & CHOUDHURY, 2015).

Atualmente, as fresas de alto desempenho podem executar tarefas de alta exigência com velocidades de corte elevadas e ainda manter um tempo de vida satisfatório. No entanto, alguns fatores devem ser considerados ao escolher a ferramenta e os parâmetros de corte para se obter um bom desempenho, maximizando o potencial da ferramenta e diminuindo o tempo de troca do ferramental (TUNER, 2018).

A usinagem para a produção das matrizes e moldes pode ser realizada no material já no estado endurecido ou ainda no estado recozido. Usinar o material e posteriormente

realizar o tratamento térmico pode gerar erros geométricos devido a distorções, sendo necessário o retrabalho ou a adição de alguma operação. Por outro lado, usinar o material já no estado endurecido exige muito mais da ferramenta e da máquina.

A seleção da velocidade de corte para o processo pode ser tanto visando a maior vida da ferramenta quanto visando o menor tempo, utilizando a usinagem de alta velocidade (HSM – *high speed machining*), por exemplo. O método HSM implica em empregar processos de usinagem sob velocidades rotacionais e de avanço consideravelmente mais altas que aquelas usadas na usinagem convencional, com destaque no processo de fresamento (SALOMON *apud* DEWES *et al.*, 1999). Em seu trabalho clássico realizado em 1931, Salomon acreditava que com o aumento da velocidade de corte acima de um valor crítico, a temperatura deveria decair pois não haveria tempo de condução de calor para a ferramenta, justificativa para a utilização do método HSM. Esse fato não foi confirmado, mas um ponto interessante nesse método é diminuir o tempo de produção da peça, já que as operações de fresamento e polimento demandam muito tempo na produção de uma matriz ou molde (PU & SINGH, 2013). Logo, a escolha da ferramenta e dos parâmetros de corte devem ser feita em função do material a ser usinado, disponibilidade do ferramental e da máquina, tempo e custo.

Geralmente, as fresas de aço rápido não são indicadas para o fresamento de aços endurecidos devido à baixa dureza relativa e à perda da resistência mecânica sob altas temperaturas, proveniente do corte em alta velocidade. Os materiais para as fresas na usinagem de aço endurecido mais utilizados são: metal duro, nitreto núbico de boro policristalino (PcBN) e cermets.

A Tab. 2.1 apresenta a comparação das ferramentas de aço rápido, cermet, PcBN e cerâmica com as de metal duro. Nota-se que as ferramentas de metal duro se destacam pela resistência ao choque térmico e tenacidade à fratura, características importantes para o corte interrompido.

TABELA 2.1

Comparação das propriedades dos materiais de ferramenta.

Material	Temperatura para início da mudança estrutural	Interação química com aço	Módulo de elasticidade (GPa)	Dureza Vickers a 20°C	Tenacidade à fratura (K_{1C})	Faixa de velocidade de corte (m/min)	Resistência ao choque mecânico	Resistência ao choque térmico
HSS	600 °C	Alta	220 - 240	823 - 897	15 - 19.5	30 - 100	Alta	Alta
Cermet	-	Pouca	390 - 420	1500 - 1800	-	120 - 600	Média	Média
PCBN	1100 - 1350 °C	Pouca	680 - 710	3000	4.5	300 - 1200	Baixa	Baixa
Cerâmica	1350 - 1500 °C	Nenhuma	380 - 425	1600 - 2200	4 - 7	600 - 2000	Baixa	Baixa
WC	950 °C	Alta (classe K); Moderada (outras)	490 - 650 (depende da classe)	1400 - 2000	9	100 - 500	Média	Alta

FONTE: Childs *et al.*(2000); Trent & Wright (2000).

2.1.1.1 Metal Duro

O surgimento desse material para o uso como ferramenta de corte ocorreu por volta da década de 1920 na Alemanha, por meio da sinterização do pó de tungstênio com carbono para produzir o carboneto de tungstênio em pó. Esse pó foi misturado com outros elementos químicos para obter a ligação entre os fragmentos, sendo o cobalto o elemento mais eficiente realizar essa ligação (TRENT & WRIGHT, 2000). A criação desse novo grupo de ferramentas de corte possibilitou o aumento da velocidade de corte devido às boas características como resistência ao desgaste, resistência mecânica e tenacidade, revolucionando o mercado da época (MACHADO *et al.*, 2009).

Uma das principais particularidades dessa classe é a possibilidade de adição de outros materiais como TiC (carboneto de titânio), TaC (carboneto de tântalo), NbC (carboneto de nióbio), etc., para criar diferentes propriedades e suprir deficiências mecânicas (MACHADO *et al.*, 2009). A possibilidade de criar uma gama de ferramentas de corte faz com que essas ferramentas cubram a usinagem de uma vasta diversidade de materiais e grande porção das ligas e materiais não-metálicos, indo do material mais macio até materiais endurecidos. Essa condição torna esse grupo de ferramentas de metal duro o mais importante na área de usinagem.

As ferramentas de metal duro podem ser classificadas de acordo com a norma ABNT NBR ISO 513 *apud* Moura (2017), na qual as classes estão de acordo com as funções e aplicações básicas para cada grupo de ferramenta. Essas classes são definidas por K, P, M, N, S e H:

- Classe K: esse grupo foi o primeiro a ser desenvolvido, e é composto principalmente por carboneto de tungstênio agregado ao cobalto. Como não são resistentes ao desgaste de cratera, são aplicados na usinagem de metais frágeis e ligas ferrosas que apresentam cavacos curtos e em materiais não-metálicos.
- Classe P: grupo de ferramenta com elevado teor de TiC e TaC. Apresentam elevada dureza a quente e resistência ao desgaste. São aplicados na usinagem de metais e ligas ferrosas que apresentam cavacos contínuos e dúcteis. As ferramentas desta classe são empregadas na usinagem de aços não ligados, aços de alta liga, aços fundidos e ferros maleáveis de cavacos longos. Não são indicadas para aços inoxidáveis com estrutura austenítica.
- Classe M: são ferramentas com propriedades intermediárias de múltiplas aplicações. São aplicados na usinagem de metais e ligas ferrosas que apresentam tanto cavacos contínuos como cavacos curtos, como os aços inoxidáveis austeníticos, ferríticos e martensíticos, aços fundidos, aços-manganês, ferros fundidos e ferros fundidos maleáveis.
- Classe N: são os metais duros e os diamantes policristalinos (PCD) empregados em vários tipos de alumínio e outros metais não-ferrosos e materiais não metálicos.
- Classe S: é o grupo dos metais duros e cerâmicas com *whiskers* (SiC), indicados para a usinagem de ligas resistentes ao calor, ligas especiais à

base de níquel ou cobalto, titânio e suas ligas, aços de alta liga e demais materiais de difícil remoção de cavacos.

- Classe H: classe dos metais duros e cerâmicas com adição de TiC e PcBN, para operações em materiais endurecidos como aço temperado, ferro fundido temperado, ferro fundido coquilhado e aço manganês.

Além dessa classificação, as classes são subdivididas com uma numeração de 01 até no máximo 50, onde esse número representa a porcentagem de cobalto na liga. O algarismo 01 indica a menor porcentagem de cobalto (normalmente 6%), usado em ferramentas mais rígidas e sob maiores velocidades de corte. Já o maior algarismo indica uma maior porcentagem, sendo a ferramenta mais tenaz que resiste a avanços maiores (MACHADO *et al.*, 2009).

Mesmo possuindo essa diversidade de composições, uma maneira de prolongar a vida da ferramenta é a adição de um material de sacrifício que irá entrar em contato com o material que está sendo cortado e que se desgastará primeiro, os denominados revestimentos. O revestimento diminui a taxa de desgaste e possibilita o aumento da velocidade de corte se comparado com uma ferramenta de metal duro convencional (TRENT & WRIGHT, 2000).

Ferramentas com a superfície dura e resistente e núcleo mais macio e tenaz possuem uma boa resistência à fadiga, maior resistência ao choque e à propagação de trincas, além da melhor condição ferramenta/cavaco. Tais ferramentas são obtidas por meio da aplicação de revestimento.

O processo de deposição química de vapor (CVD - *Chemical Vapour Deposition*, em inglês) consiste no aquecimento do gás rico no material que irá ser depositado por um intervalo considerável de tempo em uma câmara com a ferramenta que será revestida, onde acontecerá uma reação química entre o vapor e o substrato. As camadas depositadas são uniformes e possuem a granulação bem fina de distribuição equiaxial, podendo apresentar microtrincas devido ao resfriamento (TRENT & WRIGHT, 2000). Já o processo de deposição físico de vapor (PVD - *Physical Vapour Deposition*, em inglês) consiste na deposição de uma camada fina de material na superfície da ferramenta através da evaporação seguido da condensação (MACHADO *et al.*, 2009).

O método PVD induz tensão residual de menor intensidade do que o processo CVD devido a menor temperatura atingida (em torno de 500° C, enquanto no processo CVD atinge

valores acima de 1000° C). A temperatura é principal limitação do processo CVD, visto que ferramentas de baixo ponto de fusão como o aço rápido perdem as propriedades promovidas pelo tratamento térmico anterior. Por outro lado, a adesão do revestimento ao substrato é muito mais forte no processo CVD (MACHADO *et al.*, 2009).

Uma ferramenta de metal duro pode ser submetida a ambos os processos de deposição. A diferenciação na escolha do método reside no número de camadas e o material a serem depositados, com o foco na aplicação da ferramenta.

O material do revestimento pode ser escolhido para maior resistência ao desgaste, já o material do substrato pode ser escolhido para maior resistência mecânica a tensões altas que causam deformação e fratura da ferramenta (TRENT & WRIGHT, 2000). Os revestimentos TiC, TiN e Al_2O_3 , mesmo em camadas finas (espessura menor que 10 μm) podem resistir a muitas operações severas quando estão sobre um substrato de metal duro, enquanto a ferramenta inteiriça desse material iria quebrar ou sofrer avarias diante o mesmo esforço (TRENT & WRIGHT, 2000).

A utilização das ferramentas de metal duro com revestimento é uma alternativa viável economicamente para substituir as ferramentas de PcBN e cerâmica. Essas possuem um preço mais alto e são indicadas para substituir operações de retificação (CHINCHANIKAR & CHOUDHURY, 2015).

As temperaturas relativamente baixas encontradas no fresamento de material endurecido com ferramentas de metal duro corroboram para o emprego dessas ferramentas nesse tipo de trabalho (DEWES *et al.*, 1999).

Como as ferramentas de metal duro são amplamente utilizadas não só nas operações de fresamento, o estudo para a otimização do uso e melhora das propriedades dessas ferramentas são extensamente estudados.

Oliveira (2007) observou que durante a operação de fresamento de materiais endurecidos com metal duro com revestimento de TiN/TiCN e de metal duro e cermet (ambas sem revestimento), sob as mesmas condições de corte, a ferramenta revestida apresentou uma vida 3,8 e 2,1 vezes mais longa, respectivamente. Esse fato evidencia as características inferidas à ferramenta pelo revestimento, como a maior resistência à abrasão e difusão, bem como o menor coeficiente de atrito.

Chen *et al.* (2016) avaliaram a usinabilidade do ferro fundido cinzento HT250 (equivalente ao DIN GG25) com ferramentas de metal duro com 8% de cobalto e metal duro

com 8% de cobalto mais 5% de carboneto de titânio e 0,5% de carboneto de vanádio. Estas ferramentas apresentaram maior dureza e resistência ao desgaste devido aos grãos mais finos de carboneto de tungstênio, logo apresentaram vida mais longa se comparadas com a ferramenta sem adição de carbonetos na mesma condição. Quanto ao desgaste, ambas sofreram desgaste de flanco por adesão e oxidação, mas nenhum lascamento nem desgaste por abrasão.

Chowdhury *et al.* (2017) compararam o desempenho de pastilhas de metal duro sem revestimento e com revestimento durante a usinagem da liga aeroespacial Ti6Al4V. A ferramenta com revestimento auto-lubrificante TiB_2 produzida pelo processo PVD apresentou um aumento na vida da ferramenta em até 73%.

Deshpande & Venugopal (2018) propuseram uma mudança microestrutural no metal duro por meio de um tratamento térmico criogênico. As pastilhas de metal duro foram submetidas a uma temperatura de $-193\text{ }^\circ\text{C}$ e posteriormente temperadas. Em todos os casos foi observado um aumento na resistência ao desgaste, sendo que a vida da ferramenta, no pior dos casos foi de três vezes maior que a ferramenta sem tratamento. Já Rajbongshi *et al.* (2018) realizaram mudanças na superfície de folga da ferramenta de metal duro, aplicando diferentes texturas por meio de eletroerosão. De um modo geral, a texturização da superfície de folga ajudou a diminuir as taxas de desgaste de flanco, havendo menor contato com a peça e menor temperatura, mas o acabamento foi pior do que o obtido com a ferramenta original.

Durmaz & Yildiz (2019) realizaram um estudo sobre propriedades estruturais, mecânicas e tribológicas do metal duro com diferentes revestimentos depositados por CAPVD (*cathodic arc physical vapor deposition*). Após o fresamento, a menor rugosidade superficial e a maior resistência ao desgaste de flanco foram encontradas na ferramenta revestida com TiAlN.

2.1.1.2 Cermet

Os cermets são compósitos com fases metálicas e cerâmicas produzidos por sinterização. As ferramentas de cermet são menos frágeis que ferramentas inteiras de cerâmica, porém com resistência térmica inferior. Cermets são compostos geralmente de carbonetos e/ou nitretos de titânio como elemento duro e o níquel ou cobalto como elemento ligante (KLOCKE, 2010).

Xiong *et al.* (2018) utilizaram pó de níquel, titânio e carbono (NiTiC) como ligante em ferramentas de cermet Ti(C,N). Não foi observado aumento na dureza das ferramentas, mas o limite de resistência aumentou consideravelmente, promovendo uma diminuição na propagação de trincas e aumento na tenacidade.

A fresa de topo de carbonitreto de titânio (Ti(C,N)) com aresta abauladas é uma ótima alternativa para a usinagem de aços endurecidos. Essa ferramenta propicia forças de corte muito menores que uma ferramenta de metal duro realizando o mesmo trabalho devido às menores interações químicas entre ferramenta e peça, sendo uma boa opção para o fresamento de paredes finas. Ademais, além de possuir uma vida mais longa, a qualidade superficial da peça usinada é superior se comparada com ferramentas de metal duro (WANG & LIU, 2016).

2.1.1.3 Nitreto Cúbico de Boro Policristalino (PcBN)

O nitreto cúbico de boro policristalino é um material que não é encontrado na natureza. Esse composto criado em laboratório é formado por dois elementos com estrutura cúbica de face centrada infundidos, sendo os átomos centrados na face, em um, de boro e no outro, de nitrogênio. Nem todas as ligações com a estrutura vizinha são covalentes, como no diamante; desse modo essa estrutura se torna muito rígida e de dureza superior a qualquer carboneto metálico (TRENT & WRIGHT, 2000).

As ferramentas de PcBN são normalmente encontradas no mercado como uma camada depositada ou brasada sobre as ferramentas de metal duro ou como pastilhas inteiriças (TRENT & WRIGHT, 2000). Juntamente com as ferramentas de cerâmica, o PcBN é uma boa escolha para substituir as operações de retificação de alto custo (WANG & LIU, 2016).

O PcBN é a ferramenta mais indicada para a usinagem em alta velocidade por fresamento de aços endurecidos. A vida dessa ferramenta pode ser de até oito vezes mais longa se comparada com a mesma ferramenta produzida em metal duro e revestida com TiAlN quando usinado o aço ferramenta AISI D2 a uma velocidade de corte de 500 m/min (WOJCIECHOWSKI & TWARDOWSKI, 2012). A faixa da velocidade de trabalho dessa ferramenta varia de 300 a 1200 m/min, dependendo do material a ser usinado (PU & SINGH, 2013).

Pu & Singh (2013) compararam o desempenho da ferramenta de PCBN com a ferramenta de metal duro no fresamento do aço endurecido SAE A2. Foi observado que a ferramenta de PcBN induziu menor tensão residual e menor encruamento da superfície usinada. Porém os autores atentam quanto ao possível lascamento repentino da ferramenta quando essa já está com um certo nível de desgaste.

2.1.1.4 Cerâmicas

As cerâmicas são materiais compostos de elementos metálicos e não metálicos, geralmente na forma de óxidos, carbonetos ou nitretos, cuja a finalidade é utilizar as qualidades das propriedades de ambas fontes. As ferramentas cerâmicas possuem alta resistência ao desgaste e altas temperaturas, boa resistência a fluência, boa estabilidade química e térmica, baixa condutividade térmica e alta resistência à compressão. Por outro lado, essas ferramentas são frágeis e não suportam esforços de tração.

Diante disso, essas ferramentas possuem limitações de aplicação onde há variações nos impactos mecânicos e térmicos, como nos processos de fresamento, por exemplo, onde o corte é interrompido. Para sanar essas limitações cerâmicas com adição de outros elementos em sua composição foram desenvolvidas. As ferramentas mais comuns são as a base de Al_2O_3 e Si_3N_4 com adição de elementos como o carboneto de titânio (TiC), óxido de zircônio (ZrO_2), carboneto de silício (SiC), entre outros (MACHADO *et al.*, 2009).

Embora a utilização dessas ferramentas para o corte interrompido não seja a opção mais viável e as circunstâncias serem piores durante a usinagem de aços endurecidos devido às maiores variações nos esforços, pesquisas recentes apontam que ferramentas a base de cerâmica podem ser utilizadas na operação de fresamento com boa qualidade superficial da peça usinada e vida satisfatória.

Wang & Liu (2016) avaliaram o desempenho de quatro tipos de fresas inteiriças de cerâmica durante o fresamento do aço AISI H13 no estado endurecido e compararam com ferramentas de metal duro. A ferramenta de Si_3N_4 apresenta uma melhor qualidade superficial e uma vida mais longa quando comparadas com a ferramenta de metal duro.

De forma similar, Dang *et al.* (2019) observaram o desempenho de uma fresa inteiriça de Sialon (Al_2O_3/Si_3N_4) durante o fresamento em altas velocidades da liga de titânio

Ti6Al4V. Os autores descobriram que a ferramenta não suporta a severidade da usinagem desta liga. A diferença entre os coeficientes de dilatação térmica acelera a abertura de trincas térmicas, além das altas taxas de adesão e difusão.

2.2 Desgaste de ferramentas de corte

A usinagem de metais é caracterizada pelo contato direto e agressivo entre a ferramenta/peça e ferramenta/cavaco com elevados atrito, esforços e temperaturas, sendo apenas amenizado pelo uso de fluidos lubrificantes e refrigerantes. Diante disso, é inevitável a ocorrência de avarias e desgastes nas ferramentas de corte.

O fim de vida da ferramenta é estipulado pela perda das características e da capacidade de corte. Os fenômenos responsáveis por esse fato podem ser divididos em três classes: avarias, desgaste e a deformação plástica (MACHADO *et al.*, 2009). Já para Ferraresi (1969) as deformações plásticas são consideradas como avarias e para Trent & Wright (2000) as deformações plásticas são consideradas como mecanismos de desgaste. De acordo com Childs *et al.* (2000), o desgaste é a perda de material em uma aspereza ou em um microcontato ou até mesmo em escala atômica. De qualquer forma, avarias e desgastes promovem a perda de material da ferramenta enquanto a deformação plástica é a realocação de material.

As avarias acontecem de forma repentina e inesperada. São caracterizadas pela quebra, lascamento ou trinca da aresta de corte, onde há remoção brusca de material da ferramenta. A quebra da aresta é recorrente em ferramentas duras com baixa tenacidade como as cerâmicas, já o lascamento não segue esse padrão. As trincas podem aparecer em qualquer tipo de ferramenta e não removem material no momento do surgimento, mas podem induzir a formação de sulcos e até mesmo de lascamentos e quebras (MACHADO *et al.*, 2009).

Normalmente as avarias são de difícil ocorrência no corte contínuo, exceto quando os parâmetros e condições de corte estão muito acima das suportadas pela ferramenta e máquina. Todavia, são frequentes em cortes interrompidos, como o fresamento, onde a ferramenta está submetida à exigência extrema devido ao choque e à variação do avanço (FERRARESI, 1969). Essas ferramentas comumente apresentam sulcos verticais e transversais próximos a aresta de corte. Os verticais, em forma de pente, são devido às variações térmicas, agravadas quando o resfriamento é brusco (presença de fluido ou elementos no ar). Já os sulcos

transversais são provenientes das variações dinâmica e alternada dos esforços atuantes na ferramenta, podendo levar a falha por fadiga (KLOCKE, 2010).

O desgaste da ferramenta é um fenômeno inevitável, independente da tenacidade e da dureza da ferramenta e do material usinado. Em qualquer aplicação de usinagem, com o decorrer do corte a forma da aresta de corte será gradualmente alterada de forma minuciosa e quase imperceptível ao olho nu, e em algum momento a ferramenta perde a eficiência, implicando na necessidade de troca ou reafiação (TRENT & WRIGHT, 2000).

A forma e a evolução desse desgaste não depende apenas do tempo e do comprimento de corte que a ferramenta irá realizar, mas também das características geométricas da ferramenta, parâmetros de corte, propriedades do material e se há presença e as propriedades do fluido de corte e como isso influenciará no sistema (ASTAKHOV, 2006). A mesma ferramenta usinando sob os mesmos parâmetros de corte, mas materiais diferentes ou um mesmo material com condições diferentes sofrerá desgaste dissemelhante. Outros mecanismos irão ser predominantes no desgaste total da ferramenta (CHILDS *et al.*, 2000).

As formas típicas de desgaste em ferramentas de corte podem ser classificadas em: desgaste de flanco, desgaste de cratera e desgaste de entalhe, sendo esse também considerado por alguns autores como mecanismo de desgaste.

Os mecanismos de desgaste acontecem simultaneamente durante o corte, embora geralmente um mecanismo terá maior impacto no desgaste gerado (MACHADO *et al.*, 2009). A ocorrência e o destaque de cada mecanismo de desgaste estão fortemente ligados às condições de usinagem, principalmente a velocidade de corte pois essa é o fator de maior influência sobre a temperatura de corte. A FIG. 2.5 apresenta a classificação dos mecanismos de desgaste.

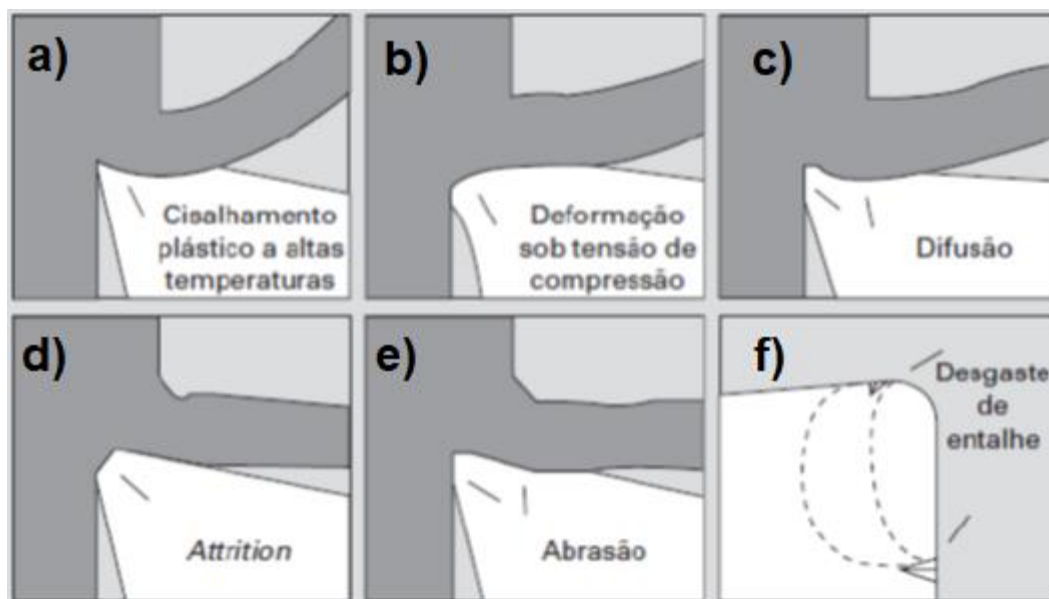


FIGURA 2.5 - Mecanismos de desgaste nas ferramentas de corte: a) Cisalhamento plástico a altas temperaturas, b) Deformação sob tensão de compressão, c) Difusão, d) *Attrition*, e) *Abrasão* e f) *Desgaste de entalhe*.

FONTE: Trent & Wright, 2000, *apud* Machado *et al.* (2009).

O cisalhamento em altas temperaturas (FIG. 2.5a) pode ocorrer ao usinar aços ou outro material com alto ponto de fusão sob velocidades de corte e avanços altos. O resultado é a formação de uma cratera na superfície de saída da ferramenta onde a temperatura é alta, evidenciando a realocação desse material da ferramenta cisalhado da cratera para uma porção logo atrás dessa região de maior temperatura. Esse fenômeno também é observado na superfície de folga quando a ferramenta já está severamente desgastada (TRENT & WRIGHT, 2000).

A deformação plástica da aresta de corte sob tensões compressivas (FIG. 2.5b) geralmente começa e é mais severa na ponta da ferramenta que apresenta menor ângulo de ponta e/ou menor raio de ponta. As altas temperaturas provocam o amolecimento localizado e atuam como gatilho para o desgaste se alastrar para o resto da aresta de corte. Assim que há deformação plástica na ponta da ferramenta, a superfície de folga desaparece. Dessa forma, há um aumento localizado dos esforços e da temperatura que pode levar a falha da ferramenta (SHAW, 2005).

Durante a usinagem de metais com ferramentas metálicas, há contato metal-metal sob temperaturas altíssimas, especialmente na zona de aderência. Esse quadro configura um ambiente perfeito para a difusão dos átomos entre esses metais (FIG. 2.5c), sobretudo em ferramentas que estão realizando corte já a algum tempo. A difusão é a movimentação e mudança de posição dos átomos alavancada por altas temperaturas (KLOCKE, 2010). O desgaste por difusão ocorre quando os átomos difundidos de metal da ferramenta são retirados

pelo fluxo de cavaco escoando sobre a superfície de saída e/ou são difundidos e removidos pela peça usinada (TRENT & WRIGHT, 2000). Esse fenômeno se intensifica com o aumento da velocidade de corte e avanço (aumento da temperatura) e ocasiona na formação de uma cratera de aparência lisa (MACHADO *et al.*, 2009).

O desgaste por adesão e arrastamento (*attrition*), vide FIG. 2.5d, acontece em velocidades de corte relativamente baixas, quando as temperaturas vão ser conseqüentemente baixas, que fazem com que o fluxo de material sobre a arestas de corte seja irregular, podendo levar, também, à formação de aresta postiça de corte (APC). Diante desse quadro, fragmentos são arrancados da superfície e arrastados pelo fluxo de material criando uma superfície irregularmente desgastada. Nessa região onde houve arrancamento da superfície vai acontecer uma junção entre ferramenta e material da peça. O mecanismo de desgaste por adesão e arrastamento tende a diminuir ou até desaparecer sob velocidades de corte mais elevadas (TRENT & WRIGHT, 2000).

O desgaste abrasivo (FIG. 2.5e) ocorre por meio de partículas duras que provocam o sulcamento, deslocamento ou corte de material da superfície da ferramenta. O tipo de desgaste abrasivo provocado por tais partículas é dependente da razão da dureza entre as superfícies, tamanho e angulação da partícula e se essas partículas estão presas a superfície abrasiva (abrasão por dois corpos) ou rolando livremente (abrasão por três corpos) (HUTCHINGS, 1992).

A classificação do desgaste provocado por partículas duras é dividida entre deformação plástica e a fratura frágil, sendo esses dependentes das propriedades da ferramenta tais como dureza e a tenacidade a fratura. A deformação plástica causa sulcamentos gerando deformação da superfície da ferramenta e perda de material por microcorte, já a fratura frágil provoca a abertura de trincas internas à superfície da ferramenta (HUTCHINGS, 1992). Essas partículas duras podem estar presentes no cavaco na forma de incrustações, carbonetos ou o material encruado do cavaco, tanto como podem ser partículas soltas que se desprenderam do material ou da ferramenta ou até mesmo podem ser partículas contaminantes do ambiente.

O desgaste de entalhe (FIG. 2.5f) acontece na superfície de folga e se estende para a superfície de saída da ferramenta. É provocado por mudanças bruscas nos esforços térmicos e mecânicos na porção final do contato cavaco/ferramenta, somadas à ação do cavaco encruado como agente abrasivo e o contato da superfície da ferramenta, que estava em alta temperatura em contato com o cavaco, com a atmosfera (KLOCKE, 2010). Esse tipo de desgaste é mais

recorrente no corte de materiais resistentes a altas temperaturas como o aço inoxidável, ligas de níquel e de titânio (MACHADO *et al.*, 2009). Apesar do desgaste de entalhe ser uma forma de desgaste, é considerado também como um mecanismo devido à falta de consenso sobre a explicação de sua ocorrência.

Segundo SANDVIK COROMANT (2019b), o desgaste de entalhe possui característica adesiva, isto é, há adesão entre os cavacos e a ferramenta seguido de uma deformação dessa superfície endurecida configurando o dano na superfície de saída e na superfície de folga da ferramenta na altura da profundidade de corte. Já Shaw (2005), cita algumas prováveis explicações para esse tipo de desgaste:

- Presença de camada encruada de material na superfície da peça usinada;
- Concentração de tensão devido a uma variação de tensão entre a superfície livre e sob tensões de corte;
- Gradiente térmico entre a superfície livre e a sob corte gerando trincas térmicas;
- Presença de rebarba na aresta oriunda da superfície usinada anteriormente;
- Presença de camada de óxidos abrasivos na superfície;
- Fadiga da ferramenta devido a flutuação de esforços na superfície livre;
- Fragmentos da ferramenta depositadas na superfície da peça anteriormente usinada.

Durante o corte interrompido, Braghini (1998) constatou por meio de imagens de microscopia eletrônica de varredura que os principais mecanismos de desgaste atuantes durante o fresamento de aços endurecidos, tanto para os insertos de metal duro quanto para PcBN, foram adesão e abrasão.

Ademais, durante o fresamento é plausível que a ferramenta sofra deformações plásticas na aresta de corte devido à alta temperatura e tensão na zona de contato. Além disso, lascamentos e trincas podem surgir devido à fadiga mecânica ocasionada pelos sucessivos impactos na entrada e saída do material e trincas em forma de pente dado às variações térmicas entre o ciclo ativo e passivo.

A FIG. 2.6 apresenta a classificação dos tipos de desgaste nas ferramentas de corte.



FIGURA 2.6 - Tipos de desgaste: a) desgaste de cratera, b) desgaste de flanco e c) desgaste de entalhe.

FONTE: Klocke (2010).

Mesmo esses tipos de desgaste e avarias sendo influenciados fortemente por altas temperaturas devido principalmente aos parâmetros de corte. Segundo Astakhov (2006), o aumento da velocidade de corte e de avanço em alguns casos pode ajudar a diminuir o desgaste. Por meio do aumento dos parâmetros de corte é possível atingir a temperatura ótima de corte, a qual irá reduzir significativamente o desgaste da ferramenta.

Segundo Varghese *et al.* (2019), uma outra abordagem para diminuir o desgaste nas ferramentas é por meio do tratamento criogênico. Esse processo consiste no resfriamento da ferramenta em banho criogênico a temperaturas que podem atingir valores por volta de -196°C seguido de um tratamento térmico em temperaturas mais elevadas, resultando em mudanças nas propriedades mecânicas e na estrutura cristalográfica. O uso do tratamento criogênico nas ferramentas de metal duro é um meio barato de melhorar a vida da ferramenta, se comparado com métodos de revestimento como CVD e PVD, além de ser menos agressivo ao ambiente devido aos gases envolvidos no processo (nitrogênio, hélio, oxigênio e neônio). Os autores notaram que o banho criogênico por 24 horas favoreceu a usinagem com pastilhas de metal duro (WC-Co), melhorando a qualidade superficial e reduzindo as forças de corte. Foi

observado também um aumento na microdureza do metal duro em 14%, aumento na condutividade elétrica, aumento da resistência ao desgaste em altas velocidades, resultando em um aumento de quase 30% da vida da ferramenta.

2.3 Monitoramento e controle do processo de usinagem

Devido à severidade do processo de fresamento e da difícil usinabilidade dos aços no estado endurecido se faz necessária a troca periódica das arestas de corte para assegurar a qualidade da peça e do andamento da operação.

A troca da ferramenta nem sempre é uma ação simples, já que o operador não tem certeza do momento exato em que a aresta de corte deixou de ser eficaz e ainda mais em máquinas fechadas onde o processo de usinagem é observado através da carenagem de proteção, na presença de fluido de corte na maioria das vezes, e abafado acusticamente, dificultando ainda mais a observação.

Um dos maiores desafios é a otimização do processo por meio da previsão do momento exato de troca da ferramenta. A troca no momento certo resulta no menor prejuízo devido ao tempo da máquina parada, evita trocas prematuras do ferramental que ainda possui capacidade de trabalho e/ou trocas postergadas que prejudicam e atrasam a fabricação.

A adoção de um critério para a troca da ferramenta é uma possibilidade de estipular o tempo ideal de troca. Uma das maneiras é adotar um critério baseado no fim de vida da ferramenta. O fim de vida pode ser baseado na rugosidade da superfície usinada, valor máximo ou médio do desgaste de flanco, profundidade do desgaste de cratera, amplitude de vibração, potência consumida pela máquina, extensão usinada, entre outros (SOUTO, 2007).

Como na operação de fresamento há várias arestas de corte trabalhando simultaneamente, o monitoramento se faz pela média do parâmetro escolhido. Essa média apresenta muita dispersão pois não retrata o que realmente acontece em cada ferramenta, já que cada uma desgasta de forma diferente. Esse fato resulta no descarte ou na troca de muitas ferramentas que não foram totalmente aproveitadas (SOUTO, 2007).

Para não interromper a produção, muitas vezes é comum estipular a vida da ferramenta com base na capacidade de produção que essa ferramenta deveria possuir e colocando como margem as propriedades do material a ser usinado. Desse modo, a vida da

ferramenta é um valor estipulado e fixo, sendo que geralmente esse método não utiliza da melhor forma os recursos da ferramenta e máquina (ZONTA, 2016).

Uma forma de contornar esse método empírico é por meio do monitoramento, ou seja, pelo conhecimento e controle de todas as variáveis provenientes do processo de usinagem. O monitoramento permite o melhor aproveitamento da matéria prima e ferramental, evitando desperdícios e conferindo maior estabilidade ao processo e reduzindo os custos provenientes da manutenção (ZONTA, 2016). Hoje, por conexão via *internet*, todas as máquinas podem ser monitoradas pela rede ou um serviço de armazenamento em nuvem, aproximando a cada vez mais de um processo ideal de produção.

A TAB. 2.2 apresenta os dois principais métodos de monitoramento do processo de usinagem seguido dos respectivos sensores mais populares para a finalidade. Estes métodos serão discutidos a seguir.

TABELA 2.2

Métodos direto e indireto de monitoramento e principais sensores.

	Processo	Medição	Sensor
Direto	Ótico	Forma ou posição da borda	Câmera CCD, sensor ótico, espectrofotômetro
	Partículas de desgaste e radioatividade	Tamanho da partícula	Medidor de radioatividade
	Resistência elétrica da junção	Alteração elétrica	Ohmímetro
	Mudanças na dimensão da peça	Dimensão da peça	Apalpador, sensor eletromagnético, ultrassônico e ótico
	Distância entre ferramenta e peça	Distância entre peça e um ponto definido	Micrômetro, medidor de deslocamento
Indireto	Força de corte	Alteração na força	Dinamômetro
	Emissão acústica	Energia nas ondas de deformação	Sensor piezelétrico
	Som	Ondas acústicas	Microfone
	Vibração	Vibração da ferramenta ou máquina	Acelerômetro
	Temperatura	Variação da temperatura	Termopar, pirômetro
	Corrente do motor	Consumo de potência pelo motor da máquina	Amperímetro, sensor de corrente
	Rugosidade	Rugosidade da superfície usinada	Agulha mecânica, sensor ótico e a laser

FONTE: adaptado de DAN & MATHEW (1990).

2.3.1 Monitoramento direto

Uma das formas de se realizar o monitoramento é por meio do controle das variáveis do processo de forma direta, ou seja, através da análise das grandezas da operação de usinagem como o desgaste da ferramenta, por exemplo. De acordo com Bonifácio (1993), o controle direto das grandezas não é afetado por outros fenômenos do processo, entretanto, essas técnicas não são aplicáveis simultaneamente e instantaneamente à usinagem, sendo realizadas normalmente após o corte.

Os métodos mais comuns de monitoramento direto são o monitoramento óptico do desgaste da ferramenta, a radioatividade, resistência elétrica na junção ferramenta/peça, as dimensões usinadas, entre outras.

2.3.1.1 Ótico

A superfície de uma ferramenta desgastada apresenta uma maior refletividade quando comparada com uma ferramenta sem desgaste. Os métodos óticos e eletro-ópticos se baseiam nesse fenômeno para a análise do desgaste da ferramenta (DAN & MATHEW, 1990).

Esse método pode ser realizado pela avaliação da imagem da zona desgastada por meio de câmeras que conseguem controlar a vida da ferramenta, podendo ser aplicada em células de manufatura (LEVI *et al.*, *apud* DAN & MATHEW, 1990).

Outra forma de medição ótica, talvez mais simples e óbvia, é pela utilização de um gabarito feito de material termoplástico transparente com a marcação do contorno máximo do desgaste de cratera admitido. Esse gabarito é sobreposto à ferramenta em operação e enquanto o desgaste não atingir as dimensões definidas pelo gabarito, a ferramenta ainda está em condições admissíveis de uso (TSAO *et al.*, 1968).

A câmera de carga acoplada CCD (em inglês *charge-coupled device*) também pode ser empregada para o controle do desgaste da ferramenta de corte. Neste método, o desgaste da ferramenta é captado por uma câmera, processado por um computador e exibido num monitor. Como esse processo não consegue observar a ferramenta quando em contato com a peça, pode ser aplicado no fresamento devido a parte inativa do ciclo, mas se há presença de APC ou adesão de material sobre a região desgastada, o desempenho pode não ser satisfatório (RUTELLI & CUPPINI *apud* BONIFÁCIO, 1993).

Para medir o desgaste de flanco e de cratera, Giusti *et al.* (1987) utilizaram sensores de fibra ótica e uma fonte *laser* para iluminar a superfície de folga e saída da ferramenta com a finalidade de obter imagens e mapear a extensão do desgaste na ferramenta durante o processo de corte. Já Jeon & Kim (1988) utilizaram um método ótico-eletrônico para monitorar o desgaste de flanco da ferramenta de corte. Um feixe *laser* incide e ilumina a superfície de folga da ferramenta e, através de uma câmera, é gerada uma imagem da região desgastada. Essa

imagem é convertida em pixels digitais que são processados em um *software* e revelam a extensão do desgaste em tempo real com uma resolução de 0,1mm.

2.3.1.2 Resistência elétrica da junção ferramenta/peça

O contato entre ferramenta e peça aumenta à medida que a ferramenta se desgasta. Esse aumento na área de contato provoca a redução da resistência elétrica nessa junção (DAN & MATHEW, 1990).

Um método para medir essa progressão do desgaste é através de um filme condutor depositado na superfície de saída da ferramenta. Quando há desgaste de flanco, há desgaste desse filme condutor, aumentando a resistência elétrica de forma proporcional ao desgaste de flanco (UEHARA, 1974).

2.3.1.3 Radioatividade

Todos os materiais comumente utilizados como ferramenta de corte na usinagem podem ser empregados na medição do desgaste pelo método da radioatividade, exceto a cerâmica a base de Al_2O_3 . O metal duro é a ferramenta que melhor se submete a esse método devido a meia vida do cobalto ser elevada (FERRARESI, 1969).

Essa técnica consiste no bombardeio de nêutrons sobre a ferramenta num reator atômico. Durante o processo de usinagem, esse material ativado é removido e fica preso ao cavaco e por meio da análise da radioatividade o desgaste da ferramenta pode ser analisado (FERRARESI, 1969).

Por meio da adição de material radioativo na superfície de folga da ferramenta, Cook (1980) mostrou que o método pode evidenciar pequenos desgastes nas ferramentas, os quais são difíceis de se detectar por outros meios. A detecção do desgaste pode ser feita tanto no pela queda de radiação na ferramenta quanto no aumento da presença de radiação no cavaco. No entanto, é necessário muito cuidado na aplicação dessa técnica devido aos efeitos da radiação sobre o ambiente e as pessoas presentes (DAN & MATHEW, 1990).

2.3.1.4 Mudanças nas dimensões da peça

De acordo com Dan & Mathew (1990), as dimensões da peça são sensíveis a mudanças geométricas na aresta de corte da ferramenta. Na medida em que a ferramenta se desgasta durante a usinagem, as dimensões da peça são modificadas. Por exemplo, durante o torneamento o diâmetro da peça usinada tende a aumentar devido ao desgaste da ferramenta.

Uma das dificuldades de se monitorar o quanto a ferramenta se desgastou por meio desse método é devido a dilatação térmica da peça. Logo, não se tem a representação real da perda de material da ferramenta por desgaste. Além disso, como o volume de material desgastado é muito pequeno, as vibrações no sistema influirão nessa medida (BONIFÁCIO, 1993) e é difícil distinguir qual o tipo de desgaste e possíveis avarias (DAN & MATHEW, 1990).

Che & Ratnam (2018) desenvolveram um método de monitoramento em tempo real da dimensão da peça durante o torneamento com o uso de uma *webcam* de alta resolução para aquisição das imagens da peça durante a usinagem com auxílio de lâmpadas LED para iluminação. O diâmetro após o passe da ferramenta foi determinado por um algoritmo, sem a necessidade de parada da máquina para controlar as dimensões da peça. Os resultados mostram que o método foi efetivo em mensurar o diâmetro da peça, com uma exatidão de 0,6%.

2.3.1.5 Distância entre ferramenta e peça

Em máquinas convencionais, a diminuição da distância entre um ponto estipulado no porta-ferramenta da máquina e a superfície sendo usinada pode ser um objeto de monitoramento do processo (DAN & MATHEW, 1990).

O controle dessa distância relativa entre a ferramenta e a peça determina a qualidade da superfície usinada, sendo de grande interesse o monitoramento desse contato (YOSHIOKA *et al.*, 2014). Porém essa distância é afetada por vários fatores: a posição da peça, deformação do material da peça, erros de movimentação, deformação da mesa, vibração do chão, temperatura do ambiente, deformação da ferramenta, erros de montagem da ferramenta, entre outros (YOSHIOKA *et al.*, 2014).

Takeyama *et al.* (1967) realizaram o controle dessa distância por meio de um micrômetro elétrico posicionado entre a máquina e a peça. A distância no micrômetro reduziu à medida que a ferramenta foi se desgastando. Todavia, essa medição é muito sensível a variações como a temperatura na superfície de corte, qualidade superficial, presença de fluido de corte, etc. (DAN & MATHEW, 1990).

Yoshioka *et al.* (2014) propuseram um método para a avaliação da distância da ponta da ferramenta de diamante e a superfície usinada por meio de um feixe eletromagnético gerado na ponta da ferramenta durante o corte. A intensidade do feixe refletido corresponde a distância relativa entre as superfícies em níveis micrométricos. Esse experimento é de grande interesse em operações como a microusinagem.

2.3.2 Monitoramento indireto

O monitoramento indireto é um método do controle do desgaste ou da detecção de avarias na ferramenta através da sinais adquiridos dos fenômenos decorrentes da usinagem, ou seja, é a análise da resposta de alguma interação durante o processo de corte. Para isso, os sinais são mensurados durante a usinagem, ou seja, em tempo real, sem a necessidade da parada da máquina. A principal dificuldade do método indireto de monitoramento é estabelecer a ponte entre o parâmetro medido e o fenômeno que está acontecendo, bem como eliminar qualquer tipo de interferência no sinal medido (CALDEIRANI FILHO, 1998).

O sinal a ser estudado é medido na máquina com condições de usinagem definidas, sendo esse o estado normal do processo usado em comparação com sinais obtidos posteriormente na tentativa de encontrar incongruências que indicariam possíveis erros no processo, tais como o desgaste da ferramenta. Essa relação encontrada pode ainda ser usada para assegurar modelos matemáticos e simulações computacionais no intuito de diminuir erros.

Uma das grandes vantagens do monitoramento indireto é a possibilidade de acompanhar a operação de usinagem em tempo real, permitindo o controle dos fenômenos. Segundo Byrne *et al.* (1995), uma maneira fácil de controlar a operação é por meio de limites pré-definidos para os sinais, chamados de gatilhos ou *thresholds*. Dessa forma, se o sinal ultrapassar esse limite indica que algo no processo está fora do aceitável (desgaste excessivo, quebra da ferramenta, colisões, etc.).

2.3.2.1 Força de usinagem

As forças de usinagem são influenciadas pelas condições da interface ferramenta-cavaco, sendo que na maioria das vezes, a temperatura do contato e a inércia química da ferramenta são de forte influência, além da resistência mecânica do material a ser usinado. De um modo geral, todos os parâmetros de usinagem atuam sobre os dois fatores.

O monitoramento da força de corte pode ser associado a diversos fenômenos ocorrentes na ferramenta e na superfície usinada, tais como a integridade superficial, o estado da aresta de corte e as interações nas interfaces ferramenta-peça e ferramenta-cavaco.

Os esforços de corte podem ser correlacionados com a quantidade de material que é removida pela ferramenta, de modo que a alteração na aresta de corte devido ao desgaste modifica a remoção de material, além de alterar o contato nas interfaces e provoca variações na força de usinagem. Não só a força de corte, mas a força passiva e de avanço podem indicar variações na geometria da ferramenta devido ao desgaste e às avarias. Entretanto, determinar as forças atuantes durante o fresamento é mais complicado do que em processos mais simples, como o torneamento (TOENSHOFF & DENKENA, 2013).

As forças de corte podem ser monitoradas por meio de diversos métodos pela relação do sinal de saída com os esforços de usinagem. Embora esses métodos sejam considerados como monitoramento indireto, já que os valores de força são obtidos através da conversão de um outro sinal, para Childs *et al.* (2000) quando o monitoramento é realizado empregando dinamômetros, esse é considerado como um método direto, porque o dinamômetro é capaz de informar com exatidão a direção e a magnitude das forças de corte, de avanço e passiva, bem como o torque.

Um dinamômetro deve apresentar rigidez para suportar deformações, sensibilidade a variação de esforços e ter boa exatidão de medição (SHAW, 2005). Totis *et al.* (2010) produziram um protótipo de um dinamômetro rotativo capaz de captar a variação dos esforços no três eixos para cada pastilha durante o processo de fresamento, permitindo o monitoramento do desgaste em cada aresta de corte.

Outra opção é analisar a corrente consumida pelo motor. Os motores da máquina-ferramenta consomem uma certa potência elétrica proporcional à potência mecânica exigida

para realizar uma operação. Essa potência condiz com as forças de usinagem realizadas durante o corte de um material e podem ser um parâmetro de monitoramento indireto dos esforços atuantes na ferramenta (FERRARESI, 1969).

No chão de fábrica é comum monitorar em tempo real a corrente do motor para controlar o avanço, baseado na carga do motor, e prever o momento de troca de ferramentas desgastadas. Com isso o monitoramento e a troca de arestas de corte sem a intervenção do operador, no processo de fresamento, pode ser uma realidade (ALTAN *et al.*, 1993b).

Kaneko *et al.* (2018) desenvolveram um modelo matemático de monitoramento do fresamento no qual é possível prever a força de corte sem realizar procedimentos experimentais. Nesse modelo é utilizada como variável de entrada apenas o ângulo de cisalhamento do material e as características geométricas da ferramenta. A previsão da força de corte é realizada por meio do monitoramento do torque do motor e apresenta boa correlação com as forças obtidas experimentalmente, podendo ser uma boa opção de monitoramento para a indústria.

2.3.2.2 Som

A investigação do som próximo à zona de corte contém uma variedade de informações sobre o processo de corte, as quais podem ser usadas para monitorar a atividade de usinagem (DAN & MATHEW, 1990).

As baixas frequências no espectro do som resultam do atrito entre peça e ferramenta e podem ser usadas para monitorar o desgaste de flanco. O aumento da frequência em 2,75 a 3,5 vezes pode ser a diferença entre a ferramenta nova e a desgastada. Geralmente com o aumento da velocidade de corte há uma diminuição no ruído. Quanto maior o comprimento em balanço da ferramenta, maior o ruído devido às deformações elásticas (SADAT & RAMAN *apud* DAN & MATHEW, 1990).

A captação dos sinais de som pode identificar e evitar as trepidações durante o processo de fresamento que causam marcas e ferem a qualidade superficial da peça. Quintana *et al.* (2009) levantaram um mapa de estabilidade da máquina por meio de microfones instalados dentro da máquina-ferramenta. Por meio do diagrama de estabilidade da máquina é

possível saber quais as faixas de velocidade de corte mais críticas que provavelmente irão causar as trepidações.

Por meio do monitoramento do som com o microfone posicionado próximo a zona de corte, Carou *et al.* (2017) conseguiram resultados satisfatórios com alta taxa de aquisição. Os autores perceberam que a rugosidade na peça usinada pode ser monitorada com boa exatidão. Madhusudana *et al.* (2018) realizaram experimentos durante o fresamento utilizando microfones para captar o sinal de som da operação em condições normais de usinagem e em condições falhas e por meio da transformada de *Wavelet*, alimentar um algoritmo computacional com o objetivo de validar o processo *Decision Tree*, o qual consiste no aprendizado desse modelo em diferenciar e encontrar as falhas durante a usinagem. Os autores conseguiram 81% de exatidão na identificação e classificação de problemas durante o fresamento por esse método.

Em alguns casos não é prático usar esse método no chão de fábrica devido a grande interferência de ruídos no ambiente (DAN & MATHEW, 1990).

2.3.2.3 Temperatura de corte

Grande parte da potência consumida no corte de metais é transformada em calor próximo à aresta de corte da ferramenta. Devido a esse fato, quase todos os problemas da usinagem são derivados diretamente ou indiretamente das altas temperaturas de corte. As altas temperaturas podem limitar as velocidades de corte, principalmente no corte de materiais com alto ponto de fusão (TRENT & WRIGHT, 2000).

De acordo com Shaw (2005), a temperatura é responsável por vários fenômenos importantes na usinagem. A temperatura no plano de cisalhamento é influente no limite de escoamento da peça usinada e decisiva nas temperaturas nas superfícies de saída e folga da ferramenta. Essas temperaturas nessas duas superfícies ditam o desgaste de cratera e a extensão do desgaste de flanco, além de determinar o tamanho e a estabilidade da aresta postiça de corte. Astakhov (2006) contrapõe esse argumento, já que a temperatura no plano de cisalhamento primário atinge temperaturas muito inferiores às temperaturas no plano de cisalhamento secundário, sendo essa a mais influente.

A temperatura é decisiva na vida e no desempenho das ferramentas principalmente no corte interrompido onde a faixa de variação de temperatura é alta, provocando choques térmicos.

A temperatura na cunha da ferramenta é crucial para o desgaste. A difusão e a oxidação são mecanismos de desgaste fortemente influenciados pelas altas temperaturas. Além disso, a distribuição da temperatura na superfície da peça usinada é determinante para a qualidade superficial e rege as propriedades da peça como mudança na dureza, tensão residual e alterações na microestrutura do material (TOENSHOFF & DENKENA, 2013). Porém, mensurar a temperatura em um processo de usinagem é uma tarefa difícil, já que a região de corte é diminuta, altas temperaturas e bruscos gradientes de temperatura, altas tensões mecânicas e velocidades de aquecimento e deformação mecânica elevadas são observadas (TOENSHOFF & DENKENA, 2013).

Segundo Childs *et al.* (2000), os métodos mais comuns para medição da temperatura durante o corte são: termopar inserido, termopar ferramenta-peça, imagem termal por radiação térmica e emissão acústica. Embora haja muitos métodos para mensurar a distribuição da temperatura, normalmente é muito difícil obter a temperatura nas interfaces, principalmente na interface cavaco-ferramenta (plano secundário de cisalhamento) devido às altas tensões de compressão atuantes na zona de aderência. Diante desse quadro, modelos matemáticos e simulações por elementos finitos podem ser uma boa alternativa para avaliar a distribuição e o comportamento da temperatura.

Zhang *et al.* (2017) realizaram uma simulação por elementos finitos do fresamento do aço ferramenta AISI H13. A simulação não levou em conta as vibrações oriundas do processo e contou com um erro inferior a 15% entre as forças simuladas e experimentais. Quanto à temperatura, o aumento da velocidade de corte não apresentou influência sob a força de corte. O aumento do avanço elevou muito a temperatura até certo ponto, atingindo valores próximos de 540 °C. Valores mais elevados de avanço não influenciaram o aumento da temperatura. Como a temperatura encontrada é abaixo da temperatura de austenitização, é provável que não haja formação de camada branca.

Lima *et al.* (2018) conduziram testes de simulação da temperatura por elementos finitos e compararam com o resultado experimental por meio do termopar ferramenta-peça e termopar inserido durante o fresamento do aço AISI D2, no estado recozido, com pastilhas de metal duro. O aumento dos parâmetros velocidade de corte, avanço por pastilha, profundidade

de corte e trabalho influenciaram a temperatura em diferentes proporções, já a diferença de temperatura entre o fresamento concordante e o discordante foi irrisória. Segundo os autores, a determinação experimental do coeficiente de atrito foi crucial para estimativa da distribuição da temperatura por simulação.

2.3.2.4 Rugosidade

A superfície gerada é o retrato dos parâmetros de usinagem, processo, qualidade da ferramenta e da máquina e das circunstâncias externas, portanto, a observação da rugosidade dessa superfície usinada pode dizer sobre as condições de usinagem. A rugosidade pode sofrer alteração quando há mudanças na aresta de corte devido ao desgaste ou avarias sendo uma possível alternativa para o monitoramento da vida do ferramental.

É possível utilizar transdutores de fibra-ótica para mensurar a rugosidade durante o acabamento. O sensor segue o mesmo caminho no qual a ferramenta usinou a superfície, a refletividade da luz nessa superfície recém usinada varia inversamente à rugosidade gerada. Desse modo, por meio de um circuito integrado ao transdutor é possível perceber qualquer mudança na superfície e relacionar com a extensão do desgaste, determinando o limite aceitável de desgaste para garantir o acabamento desejado (SPIRGEON & SLATER *apud* DAN & MATHEW, 1998).

Wu & Yin (2018) utilizaram um modelo matemático para definir quais os parâmetros de usinagem são mais influentes na rugosidade durante o fresamento de um aço ferramenta para matriz e estabelecer os melhores parâmetros para o procedimento. Os autores concluíram que a velocidade de corte e o avanço são os principais fatores influentes na rugosidade, seguido da profundidade de corte e da profundidade de trabalho. Com isso, foi possível determinar a relação dos parâmetros de forma benéfica para a rugosidade por meio de uma expressão matemática, na qual a rugosidade é descrita em função dos parâmetros: rotação do motor, avanço, profundidade de corte e profundidade de trabalho.

2.3.2.5 Emissão acústica

A emissão acústica pode ser definida como ondas de tensão elástica resultante da rápida liberação de energia quando um material está submetido a um estímulo. Essas ondas são originadas devido ao rearranjo da estrutura cristalina nos metais (RAVINDRA *et al.*; DOLINSEK & KOPAC *apud* SOUTO, 2007) O sinal de emissão acústica é proveniente ao processo de deformação dos materiais, ou seja, o sinal é intrínseco ao corte do material, ao atrito, a trinca e/ou quebra da ferramenta, formação do cavaco, etc. (Pigari, 1995). Logo, os sensores de emissão acústica podem ser acoplados na máquina, no suporte de ferramenta, na ferramenta, na peça ou na mesa, permitindo uma gama de combinações ou possibilidades de monitoramento.

Caldeirani Filho (1998) utilizou o sinal de emissão acústica para monitorar o processo de fresamento e percebeu que esse sinal é muito influenciado por outros fenômenos que ocorrem durante o corte do material além do desgaste da ferramenta. Dessa forma, só há alteração significativa nos valores de emissão acústica quando a ferramenta já está com um desgaste considerável, sendo um resultado não satisfatório no acompanhamento da progressão do desgaste.

Já Souto (2007) observou que os estágios de progressão do desgaste podem ser melhores analisados em condições mais brandas de corte por meio da investigação do espectro de potência de emissão acústica. O autor afirma que o mapa de intensidade luminosa pode ser empregado para avaliar certas características do fresamento como erros de batimento axial e radial, insertos com níveis diferentes de desgaste, impacto da ferramenta, momento exato da quebra da aresta de corte e o instante em que as arestas alisadoras tocam a superfície já usinada durante a fase inativa do ciclo.

2.4 Vibração no fresamento

Caso sofra um carregamento externo, um corpo com certa elasticidade capaz de armazenar energia cinética está apto a sofrer vibração. As vibrações podem ser definidas como um movimento dinâmico em torno de sua posição estática, geralmente resultando em

movimentos ondulatórios periódicos (SOUTO, 2007). Normalmente todos os corpos estão suscetíveis a vibração, sendo praticamente impossível evitar a sua ocorrência.

No caso da usinagem, todas as operações induzem algum tipo de vibração. Máquinas e estruturas não são corpos rígidos, mas sistemas que respondem elasticamente aos esforços internos e externos. Além disso, ainda há movimentos relativos (folgas) entre os componentes internos a máquina, o que promove ainda mais o surgimento de esforços internos (QUINTANA *et al.*, 2009). Logo, como as máquinas são estruturas elásticas, o efeito estático e dinâmico das forças (variação do centro de massa da máquina, deformação causada pelas forças de corte, etc.) pode ser perceptível nas dimensões, formas e na superfície da peça (DORNFELD & LEE, 2008).

Os níveis de vibrações podem definir parâmetros importantes para o processo como a velocidade de corte, avanço e a profundidade de corte. Geralmente a vibração máxima em um procedimento de usinagem define a vida da ferramenta e a qualidade da superfície usinada, ademais, vibrações excessivas podem causar queda na precisão dimensional da peça, aumento do consumo de potência do motor e danos aos componentes da máquina.

2.4.1 Tipos de vibração

As vibrações são inerentes ao processo de usinagem e podem ter origem em diversas fontes. As principais fontes de vibração são: vibrações geradas pelo processo de usinagem, vibrações internas a máquina, vibrações do ambiente de trabalho e vibrações devido a características geométricas e estruturais do material da peça. As vibrações podem ser classificadas em vibrações livres, forçadas e autoexcitadas ou regenerativas (*chatter*).

2.4.1.1 Vibração livre

Ao se aplicar uma carga externa inicial ou uma carga de impacto, o sistema é excitado e vibra livremente sendo amortecido geralmente pelos componentes e fundação da máquina. Essas excitações pulsadas sobre a máquina são denominadas de vibrações livres (Maia, 2009).

As vibrações livres não devem ser prejudiciais ao processo de usinagem, já que a máquina-ferramenta é um sistema projetado para ter alta rigidez (SÓRIA, 2016).

2.4.1.2 Vibração forçada

A aplicação de um carregamento dinâmico de uma fonte externa é denominada como vibração forçada. As vibrações forçadas podem ser um problema para a integridade do processo quando essas ocorrem em uma frequência próxima a alguma frequência natural do sistema, uma vez que o sistema absorve mais energia vibracional do que é capaz de amortecer, aumentando a amplitude da vibração (BONIFÁCIO, 1993).

A maior preocupação quanto aos efeitos da vibração forçada é a produção de uma superfície ondulada além da tolerável, como no caso típico do fresamento onde a vibração forçada é causada pela frequência de entrada dos dentes da fresa. Nesse caso se a frequência de entrada dos dentes coincidir com a frequência natural torsional do motor pode afetar a qualidade da peça usinada (DORNFELD & LEE, 2008). A resposta do sistema a essa vibração forçada depende do tipo da excitação externa, por exemplo, se a excitação for periódica, a resposta do sistema também será periódica (CHENG, 2009).

As vibrações forçadas podem ser distintas em (DORNFELD & LEE 2008; TOBIAS *apud* PIRES, 2011; STEPHERSON & AGAPIOU *apud* SORIA, 2016):

- Vibrações internas a máquina-ferramenta: fontes internas a máquina como o desgaste e folgas em elementos de transmissão, rolamentos, guias, engrenagens, desbalanceamento de componentes rotativos, desbalanceamento do eixo-árvore, inércia dos componentes devido á aceleração e desaceleração, eixos em alta velocidade, etc.
- Vibrações externas a máquina-ferramenta: fontes externas no ambiente transmitem vibrações pela fundação da máquina. Ainda, a vibração no chão de fábrica possui um amplo espectro de frequência que pode coincidir com alguma frequência natural da máquina. Esse ruído é geralmente pequeno devido ao bom isolamento da máquina, mas para operações finas de acabamento, essa vibração pode ser problemática.

- Vibrações devido às características da peça: as diferentes fases em um material da peça possuem diferentes durezas e conseqüentemente, provocam uma flutuação nas forças de corte. Essa flutuação causa pequenas vibrações que geralmente são consideradas como ruídos da usinagem. Além disso, pode-se considerar a formação e a quebra de aresta postiça de corte.
- Vibrações inerentes ao fresamento: durante a usinagem com corte interrompido, os impactos nas aresta de corte durante o início do ciclo, a diferença no avanço durante o corte e a diferença dos esforços entre as arestas ativas e as inativas provocam vibrações consideráveis.

2.4.1.3 Vibração autoexcitada (*chatter*)

A fonte das vibrações autoexcitadas é interna à operação de usinagem e resulta de um processo regenerativo durante a formação de cavacos, basicamente na variação da espessura (ALTINTAS, 2012). As variações periódicas das forças durante o corte podem interagir com o comportamento dinâmico da rigidez da ferramenta, incluindo peça e o suporte da ferramenta, causando vibrações autoexcitadas (*chatter*), (CHILDS *et al.*, 2000).

O *chatter* é um tipo de vibração auto excitada que ocorre durante o corte de metais. Diferente da vibração forçada, *chatter* não é causado por uma força periódica externa ao sistema, mas sim de uma força periódica que se autossustenta. Tal vibração pode não existir (corte estável) ou pode existir e geralmente leva à grandes amplitudes de vibração (DORNFELD & LEE, 2008).

De acordo com a FIG. 2.7, se uma superfície com característica ondulada formada pelo passe anterior da ferramenta é removida pelo novo passe da ferramenta, a característica ondulatória da superfície é conservada devido a essa vibração. Dependendo da fase entre esses passes da ferramenta, a espessura do cavaco formado é aumentada exponencialmente na mesma frequência do *chatter* (ALTINTAS, 2012).

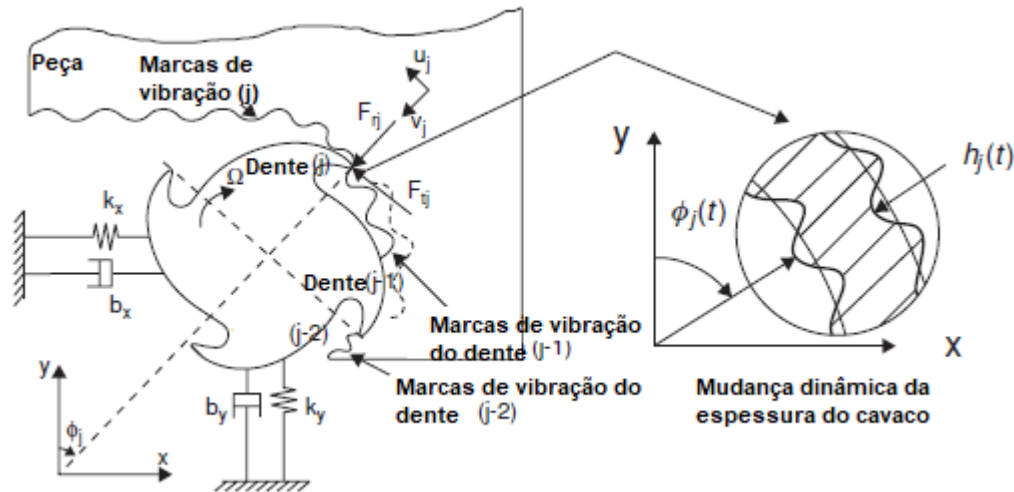


FIGURA 2.7 - Representação da vibração auto-excitada.

FONTE: adaptado de Altintas (2012).

O *chatter* pode ser causado também por vibrações forçadas devido às forças externas ou complicações do processo. Esse tipo de vibração acontece principalmente quando um módulo de vibração estrutural do sistema ferramenta-peça é excitado pelas forças de corte (CHENG, 2009).

O *chatter* é inadmissível na maioria dos casos, causando vibração excessiva entre a peça e a ferramenta, alto ruído, qualidade superficial ruim, erros dimensionais e acelerando o desgaste e a falha da ferramenta. Além do mais, para operações nos quais a ferramenta possui um longo comprimento em balanço, como no caso do fresamento de cavidades em matrizes e moldes, esse tipo de vibração é agravado (CHILDS *et al.*, 2000; CHENG, 2009).

A vibração autoexcitada pode ser considerada como um fator limitante da produtividade já que, normalmente, para amortecer essa vibração é necessário diminuir a remoção de material (TOBIAS *apud* PIRES, 2011). Geralmente, quando é detectado a presença desse tipo de vibração é comum mudar imediatamente os parâmetros de corte, sendo mais comum variar a profundidade de usinagem (Dornfeld & Lee, 2008).

O diagrama de estabilidade ou diagrama de lóbulos da máquina é um mapa que retrata as regiões de corte instáveis e estáveis de acordo com os parâmetros velocidade de corte e profundidade de corte, sendo uma tentativa de redução dos efeitos da trepidação. A construção desse diagrama requer informações prévias sobre a função resposta da frequência da ferramenta de corte, do suporte da ferramenta, da máquina-ferramenta e do material da peça (QUINTANA *et al.*, 2009). A FIG. 2.8 mostra um exemplo de um diagrama de estabilidade de uma máquina-ferramenta. Nota-se que a relação entre profundidade de usinagem e a rotação

da máquina situada no interior dos lóbulos condiz com a condição de corte estável, já a situada fora dos lóbulos indica que o fenômeno *chatter* poderá ocorrer.

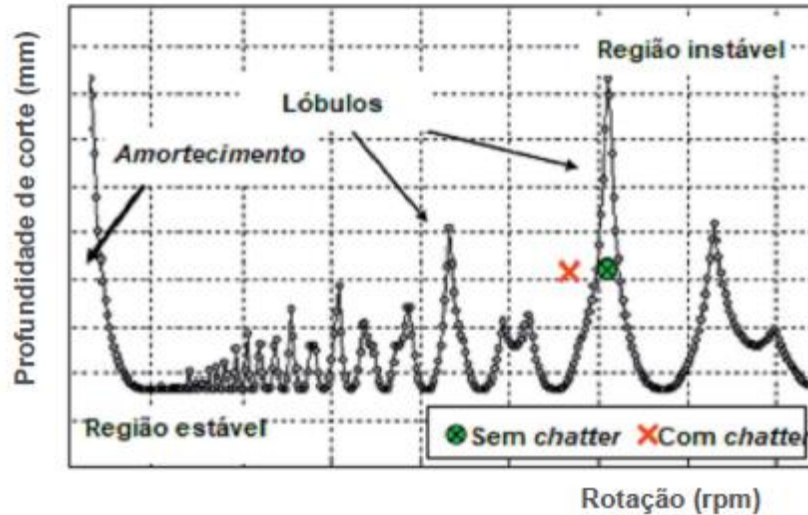


FIGURA 2.8 - Diagrama de estabilidade de uma máquina para o processo de fresamento.

FONTE: adaptado de Quintana & Ciurana (2011).

Diante desse quadro, as vibrações autoexcitadas ainda são o foco de pesquisas e estudos devido à complexidade de ocorrência e aos impactos negativos na qualidade do processo e da peça (QUINTANA & CIURANA, 2011).

2.4.2 Monitoramento da vibração

O atrito entre a peça e a ferramenta produz vibrações que podem ser mensuradas, cujo sinais contém informações aplicáveis ao monitoramento do processo (DAN & MATHEW, 1990). A partir do aumento do desgaste da ferramenta, as forças de corte elevam e conseqüentemente causam maiores amplitudes de vibração. Entretanto, variações nos fatores como velocidade de corte, avanço, geometria e material da ferramenta e da peça podem influenciar e mascarar o monitoramento do desgaste via medição de vibração (BONIFÁCIO, 1993).

O monitoramento do desgaste da ferramenta por meio da análise do sinal de vibração no domínio do tempo pode indicar fraturas e lascamentos da ferramenta, porém para

o acompanhamento da progressão do desgaste pode não ser um bom indicador (DIMLA *apud* SOUTO, 2007).

Bonifácio (1993) mostrou que as condições de corte representaram uma influência diferente sobre a rugosidade do que a vibração. Nessas condições, a vibração pode não ser tão dominante na rugosidade quanto os parâmetros de corte. O sinal RMS (do inglês *root mean square*) é um bom parâmetro para avaliar o acabamento e definir o fim de vida da ferramenta de acordo com o autor.

Pires (2011) concluiu que o conjunto ferramenta com haste de metal duro e porta-ferramenta com cabeçote de aço pode apresentar a rigidez reduzida. Nessa configuração, a ferramenta com haste de metal duro e a ferramenta com haste de aço apresentaram um desempenho semelhante, não justificando o uso de uma ferramenta inteiriça de metal duro nesse caso.

Antoniali *et al.* (2010) utilizaram a frequência da vibração durante o fresamento para mensurar o esforço radial na ferramenta e estipular uma faixa de frequência de atuação da ferramenta com a finalidade de prolongar a vida. Além disso, insertos redondos e com um ângulo de entrada maior apresentaram esforços radiais com frequências maiores, provocando a falha prematura da ferramenta.

Sória (2016) afirmou que por meio da transformada discreta de *Wavelet* é possível evidenciar a presença de vibrações em condições instáveis no fresamento, já que esse método pode separar faixas de frequências diferentes e evidenciar espectros de frequência no sinal de vibração. O autor relatou que o aumento do raio de ponta e do comprimento em balanço ocasionou no aumento da vibração.

A transformada de Hilbert-Huang é um método alternativo para analisar as frequências de vibrações não-estacionárias e não-lineares. Susanto *et al.* (2018) compararam a transformada de Fourier (FFT) com a transformada de Hilbert-Huang (HHT) para a análise da vibração no fresamento. A HHT apresentou uma identificação mais fácil do fenômeno de *chatter*, além de apontar diferenças na frequência quando a usinagem é a seco e com presença de fluido de corte, o qual atenuou a vibração.

3. METODOLOGIA

No presente capítulo serão descritos os materiais e equipamentos utilizados para a execução do trabalho, bem como os procedimentos e métodos utilizados na montagem e calibração do sistema de aquisição e para a condução dos ensaios.

3.1 Materiais

O material estudado foi o aço ABNT H13. Esse material é caracterizado por ser um aço de médio carbono e alto teor de cromo, cujo principal emprego é na fabricação de moldes e matrizes de conformação mecânica a quente em seu estado endurecido devido à sua resistência a choques térmicos, alta resistência mecânica, alta resistência ao desgaste, boa resistência a corrosão e boa tenacidade em altas temperaturas (ASM HANDBOOK, 1993). A faixa de composição do aço AISI H13 (equivalente ao ABNT H13) é mostrada na TAB 3.1.

TABELA 3.1

Faixa de composição química do aço ferramenta AISI H13.

AISI	UNS	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	W	V	Co
H13	T20813	0.32- 0.45	0.20-0.5	0.80- 1.20	4.75- 5.50	0.3 (max)	1.10- 1.75	...	0.80- 1.20	...

FONTE: ASM HANDBOOK (1993)

Após o tratamento térmico, o material é pouco suscetível à mudança de dureza com o aumento da temperatura, justificante o largo emprego desse material em matrizes de conformação a quente. Porém, no presente trabalho o material foi utilizado em seu estado recozido. A dureza do média do material é de 174 HB e as dimensões iniciais do bloco utilizado nos ensaios são 160x160x160 mm.

A fresa utilizada para realizar as operações foi SANDVIK R300-25T12-10M com capacidade para três insertos redondos com diâmetro externo de 10 mm acoplada ao mandril SANDIVIK 39255T-4012098 com comprimento de corpo de 71mm, totalizando 106mm de

comprimento em balanço. Os insertos utilizados para os testes de fresamento foram de metal duro SANDVIK ISO R300-1032E-PM-1025 (classe ISO P10) com revestimento de TiCN+TiN (PVD). Já os insertos usados para os testes de desempenho foram insertos de metal duro SANDVIK R300-1032E-PM-4040 (classe ISO P40) com revestimento $TiCN + Al_2O_3 + TiN$ (CVD). Os ensaios de fresamento foram realizados sem a aplicação de fluido de corte.

3.2 Equipamentos

A seguir são listados os equipamentos utilizados em cada etapa do desenvolvimento do presente trabalho.

3.2.1 Sistema de monitoramento da vibração

Partindo do princípio de se obter um equipamento de baixo custo a fim de monitorar a vibração da fresa durante a operação, o sistema de aquisição é composto de um acelerômetro e um microcontrolador ligados a uma fonte de alimentação (9V) em um circuito simples, conforme o esquema apresentado na FIG. 3.1.

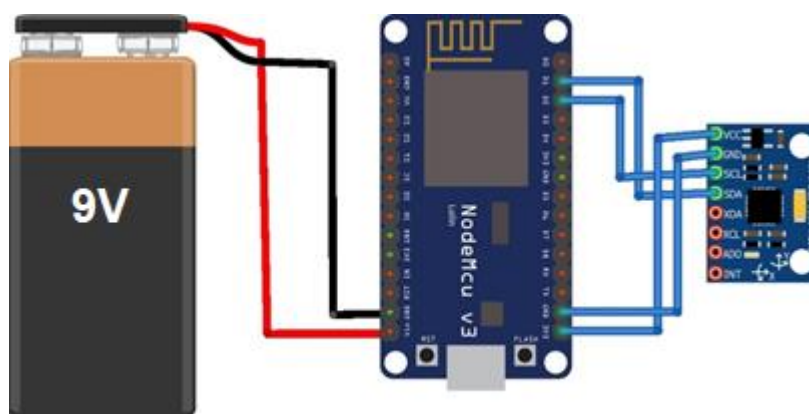


FIGURA 3.1 - Esquema da ligação dos componentes e montagem do circuito.

O acelerômetro utilizado foi o MPU6050, que possui as funções de acelerômetro, giroscópio e ainda pode inferir temperaturas na faixa de -40 a 85 °C, sendo considerado um

sensor de seis graus de liberdade já que pode medir vibrações e o giro nos três eixos. Nesse caso foi apenas utilizado sua função de acelerômetro já que as outras funções não são o foco desse trabalho.

Os dados captados por esse sensor analogicamente são transformados em dados digitais, pela própria placa do acelerômetro e destinados à placa NodeMcu ESP8266. Essa placa possui um microcontrolador com conexão à *internet*.

É necessário a programação da placa para que o microcontrolador funcione da maneira desejada, no caso, estabelecer a comunicação entre o sensor e a rede *wifi*. Tal programação, em linguagem C, foi realizada por meio do *software* Arduino IDE.

3.2.2 Calibração do sistema de monitoramento da vibração

Para que se garanta a confiabilidade nos valores adquiridos pelo sistema de monitoramento desenvolvido, é necessário a realização de uma calibração, a qual envolve a comparação das medições entre o acelerômetro MPU6050 e um acelerômetro previamente calibrado.

Os testes de calibração se dão por meio da medição de sinais de vibração cuja amplitude e frequência são controladas e conhecidas a fim de se observar o comportamento do acelerômetro a ser calibrado em diferentes condições de vibração.

Para a calibração foram utilizados um analisador de sinais (*Dynamic Signal Analyzer*) versão 35670A, um amplificador de sinal (*Power Amplifier*) tipo 2718, um *mini-shaker* e um acelerômetro piezelétrico National Instruments modelo 353B34, além dos componentes do sistema de aquisição de dados.

3.2.3 Testes de validação

Para verificar a funcionalidade do sistema desenvolvido, testes experimentais de fresamento foram conduzidos em um centro de usinagem ROMI D600 motor principal com potência de 15 kW e cabeçote com rotação máxima de 10.000 rpm.

Durante os ensaios de fresamento foi utilizado um acelerômetro de referência com a finalidade de comparação dos sinais adquiridos por esse acelerômetro e o sistema desenvolvido. O sensor escolhido para tal, foi um acelerômetro piezelétrico National Instruments modelo 353B34, o qual foi conectado ao módulo NI9234 e ao computador.

Uma lupa Olympus SZ61 com aumento de 45 vezes e o *software* Micro Image Analysis (capaz de capturar e analisar imagens) foram utilizados para mensurar a progressão do desgaste da ferramenta durante a operação de fresamento.

Durante os ensaios de vida da ferramenta foi realizada a medição da rugosidade após cada avaliação de desgaste da ferramenta por meio de um rugosímetro Digimess TR200, com o intuito de observar a possibilidade de ocorrência de *chatter* e principalmente a variação na qualidade superficial devido a alteração da geometria da aresta de corte da ferramenta.

3.3 Métodos

Os métodos utilizados para o correr dos testes são descritos a seguir de acordo com a ordem de execução.

3.3.1 Sistema de monitoramento da vibração

Um ponto interessante foi utilizar apenas a função de acelerômetro do sensor, possibilitando taxas de aquisição mais altas, já que com a implementação de todas as funções a maior frequência de aquisição é de 1 kHz. Porém, medindo apenas a aceleração, é possível utilizar sua capacidade de aquisição máxima de 4 kHz, se conectado por meio de uma porta serial sendo que o acelerômetro é ajustável para as faixas de $\pm 2g$, $\pm 4g$, $\pm 8g$ e $\pm 16g$.

No caso do presente trabalho, a comunicação da placa com o computador é feita por meio de uma rede *wireless*, sendo este o fator mais limitante da taxa de aquisição. Essa dificuldade se origina devido ao tempo de resposta do envio e recepção do sinal, comunicação dos componentes e a comunicação com a rede.

Os dados enviados via *wifi* são armazenados em arquivo de extensão .xlsx (Excel) por meio de um servidor local situado no computador. Esse servidor com acesso à mesma rede

na qual a placa está conectada, faz a requisição e recebe os sinais enviados pela placa no estado “cru”, sem nenhuma manipulação. Tal servidor foi programado em *NodeJs* com auxílio do *software* IntelliJ. Ambos códigos foram baseados no código desenvolvido por Bauermeister (2017).

A FIG. 3.2 representa o esquema de funcionamento do sistema e a conexão da mesma com o servidor local.

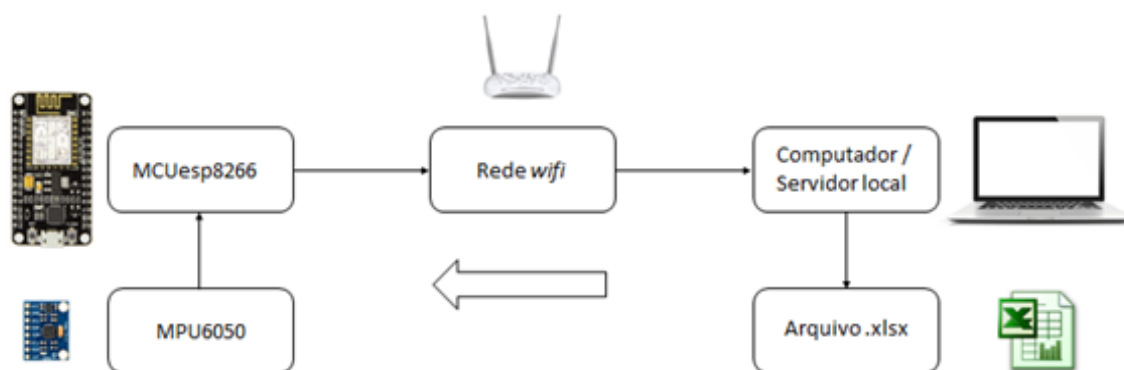


FIGURA 3.2 - Esquema da comunicação dos elementos do sistema de aquisição.

O MPU6050 é conectado ao microcontrolador NodeMcu ESP8266. O sensor realiza apenas a função de adquirir o sinal de aceleração nos três eixos, conforme foi previamente programado. É importante ressaltar que a aquisição de dados foi feita de modo que o sensor adquira os valores de aceleração e esses sejam armazenados em um vetor de valores na memória da ESP8266.

O envio dos dados para a rede pela placa é realizado em pacotes, armazenados nos vetores, conhecidos como *buffers* de maneira que o sensor efetue um certo número de medições e a placa os envie para a rede de uma única vez, esvaziando o vetor para armazenar novos valores. Dessa forma, é possível aumentar significativamente a taxa de aquisição de dados. Por outro lado, enquanto a placa realiza o envio dos valores armazenados para o servidor é cessada a função de coletar novos dados, ocorrendo uma tarefa de cada vez.

É por meio de uma rede *wifi* que é estabelecida a comunicação do computador com a placa ESP8266. Para isso, é necessário que o microcontrolador e o computador possuam permissão de conexão com essa rede. Essa rede foi gerada por um *router* sem conexão à

internet, na qual somente o computador e a placa possuíam permissão de conexão, a fim de evitar qualquer possível conflito com outros dispositivos.

O servidor local programado e em execução no computador é conectado à rede e permanece à espera da requisição de envio dos dados, realizada pela placa. Assim que os dados do sinal contidos no vetor de valores são enviados e recebidos pelo servidor local, esse realiza a conversão e os salva como arquivo .xlsx.

O sinal de retorno é enviado pelo servidor assim que os dados são armazenados, autorizando a placa a realizar aquisição de um novo vetor de valores.

Toda essa comunicação é realizada por meio da comunicação em rede *wireless*, o que causa um certo atraso, ou seja, há um tempo para a coleta de dados, um tempo para o envio e recepção desses dados pelo servidor e um tempo para o envio da resposta do servidor para a placa, sendo que quanto maior a quantidade de dados armazenados no vetor, maior é o tempo necessário para o envio e recebimento. Após algumas tentativas, o tempo de aquisição de dados foi estabelecido em 250 ms, o qual corresponde a uma maior taxa de aquisição e a um tempo de retorno de 300 ms.

O código da programação da placa NodeMcu ESP8266 com o acelerômetro MPU6050 e o código do servidor local podem ser vistos nos APÊNDICE A e APÊNDICE B, respectivamente.

O acelerômetro foi programado para varrer a faixa dinâmica de 8g. Mesmo que nessas condições a operação de fresamento provavelmente não abranja os valores máximos, um dos contratempos desse trabalho foi que sob as altas rotações da fresa os eixos Z e Y do acelerômetro ultrapassavam os limites da faixa dinâmica. Diante disso, as condições de corte do presente trabalho foram escolhidas para que no mínimo dois eixos do acelerômetro pudessem realizar a aquisição normalmente, no caso Y e o X. Além disso, a escolha da calibração para 8g foi preferida a 16g devido ao ganho de resolução.

Uma característica do método escolhido para a condução desse trabalho é a mudança do referencial para os eixos Z e Y, já que o acelerômetro foi fixado na ferramenta e essa realiza movimento rotacional durante o corte. Em tal caso, tanto o eixo Y quanto o Z realizam medições parecidas, sendo difícil separar a direção e sentido do sinal adquirido nesses eixos.

Outra dificuldade encontrada na condução dos testes é o meio no qual o acelerômetro foi programado para conectar à rede. Já que o acelerômetro realiza *buffer* e envia

pacotes de dados, o sinal temporal da vibração contém inúmeras interrupções entre um envio e o próximo. Esse tipo de fenômeno é conhecido como perda espectral (em inglês *frequency leakage*), comum em sinais truncados. O janelamento é geralmente utilizado para minimizar o efeito de tal fenômeno nas formas de ondas truncadas (DRIEMEIER *et al.*, 2016). O janelamento, no domínio da frequência, é a convolução do espectro do sinal com o espectro da janela. No caso, foi empregado janelamento *Hanning*, que se assemelha a uma função de meia onda cossenoidal com o objetivo de evidenciar os picos e alargar o lóbulo principal.

3.3.2 Calibração do sistema de monitoramento da vibração

Os equipamentos foram dispostos de acordo com a FIG. 3.3, de maneira que o acelerômetro MPU6050 e o acelerômetro piezométrico foram posicionados sobre o *mini-shaker*, o qual realizou uma mesma excitação simultânea em ambos os sensores. Essa excitação foi ajustada e controlada pelo analisador de sinais, onde é possível estabelecer uma excitação de frequência conhecida. Já o amplificador de sinais domina o ganho na amplitude do sinal por meio do controle da corrente elétrica. Dessa forma, um sinal controlado é gerado e transmitido para os dois acelerômetros simultaneamente, possibilitando a comparação dos resultados obtidos pelo acelerômetro MPU6050 e o acelerômetro de referência.

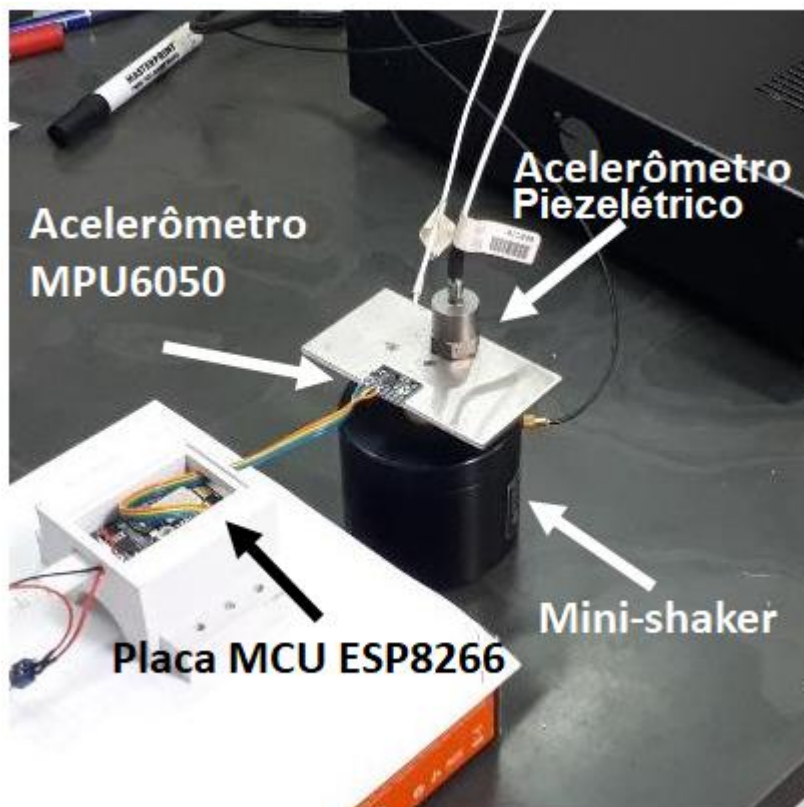


FIGURA 3.3 - Montagem da calibração do sistema de aquisição.

As frequências para calibração foram selecionadas com base na faixa de frequência de atuação do acelerômetro. Em média, o acelerômetro do sistema desenvolvido consegue obter 138 amostras a cada 250 ms, apresentando uma frequência de aquisição de 552 Hz. Porém, nem sempre os dados são enviados com a mesma taxa e nem sempre a placa irá conseguir a conexão com a rede, podendo enviar mais ou menos dados em períodos menores ou maiores a 250 ms.

Dada a importância e considerando o teorema de Nyquist, a frequência de observação máxima será de 276 Hz, porém, como não é constante a taxa de aquisição, a frequência máxima considerada foi de 250 Hz. As frequências varridas pela calibração foram as de 10, 30, 50, 75, 100, 150, 200 e 250 Hz.

3.3.3 Testes de validação

Para fixar o circuito contendo os componentes do sistema de aquisição de vibração à fresa foi necessário fabricar um suporte. O projeto do suporte teve como prioridade a proteção do circuito contra danos oriundos do meio, como a projeção de cavacos.

Para o desenvolvimento do projeto do suporte, a haste e a fresa foram modeladas com auxílio do *software* SolidWorks. Desse modo, apresenta-se o projeto foi conduzido para que o suporte ocupasse o menor espaço possível e suficiente resistência mecânica para suportar as cargas e a rotação da ferramenta. O esquema dessa montagem é apresentado na FIG. 3.4.

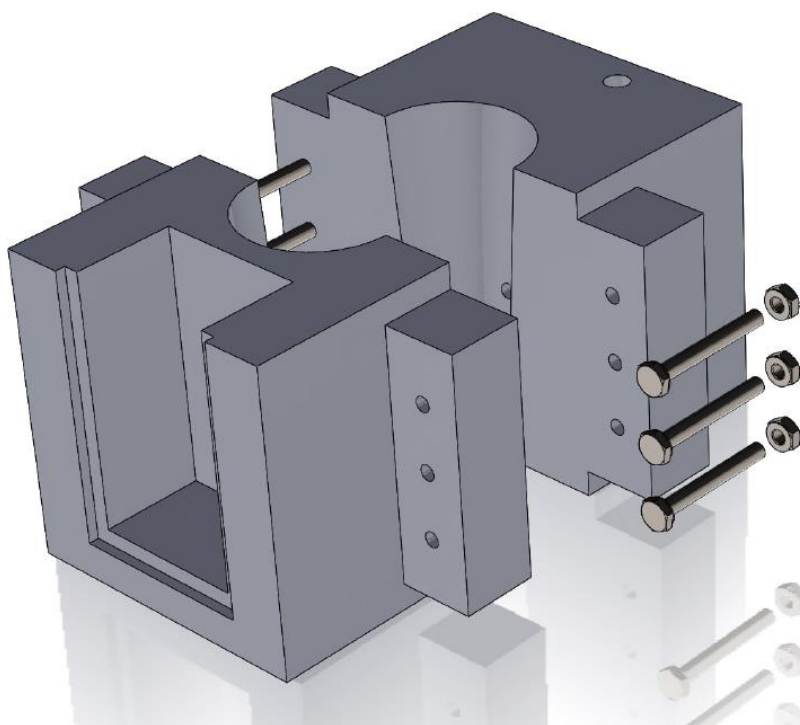


FIGURA 3.4 - Esquema do projeto do suporte e da montagem suporte e fresa.

O método de deposição de filamento (em inglês FDM – *fused deposition modeling*) de impressão 3D foi escolhido para a fabricação do suporte por ser um método relativamente simples, rápido e por aferir boa resistência para essa aplicação. Por meio desse método, o objeto é produzido por superposição de camadas de um material termoplástico ou resina. A máquina usada para a impressão foi a Rapman 3 operada pelo microcontrolador Ramps 1.4.

O acelerômetro de referência foi posicionado na peça a ser usinada nos três sentidos de referência da máquina, a fim de estar posicionado o mais próximo do acelerômetro MPU6050, localizado na ferramenta. A montagem completa do sistema de monitoramento e o acelerômetro piezelétrico é apresentada na FIG. 3.5. Como o acelerômetro MPU6050 possui seu próprio eixo de coordenadas, a disposição dos eixos não são os mesmos dos eixos da máquina. No caso, o eixo X do acelerômetro corresponde ao eixo Z da máquina.

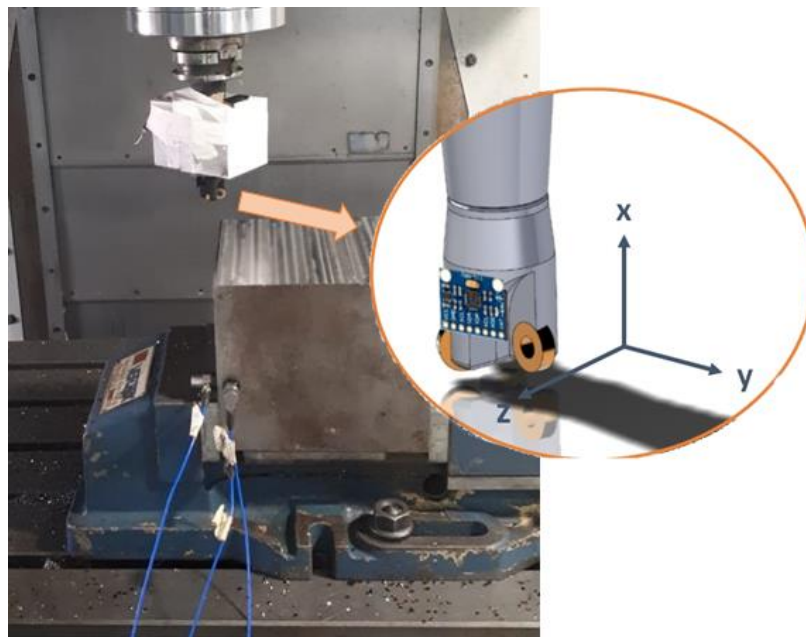


FIGURA 3.5 - Montagem do sistema de aquisição junto ao suporte, montagem dos acelerômetros piezelétricos à peça e orientação dos eixos.

É importante ressaltar a orientação dos eixos do acelerômetro MPU em relação à fresa, uma vez que os acelerômetros de referência foram fixados à peça seguindo a mesma orientação do acelerômetro MPU6050 e não seguindo a orientação da mesa. No presente trabalho, os eixos X, Y e Z do acelerômetro serão denotados como eixo axial, radial e tangencial, respectivamente.

Os testes de validação foram divididos em testes preliminares, testes para analisar a influência dos parâmetros de corte e teste de vida.

Para os testes preliminares, os parâmetros escolhidos para serem avaliados foram velocidade de corte e o sentido de fresamento (concordante ou discordante). Já os outros parâmetros foram mantidos inalterados. Os valores dos parâmetros de corte podem ser visualizados na TAB. 3.2.

TABELA 3.2

Variação dos parâmetros de corte para os testes preliminares.

Fator	Nível								
Velocidade de corte [m/min]	15,7	23,55	31,4	39,25	47,1	54,95	62,8	70,65	78,5
Rotação [rpm]	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
Avanço por aresta [mm/rotação]	0,1								
Profundidade de usinagem [mm]	0,4								
Penetração de trabalho [mm]	0,45								

Os testes experimentais para analisar a influência dos parâmetros de corte contaram com uma planilha de execução dos testes, gerada com auxílio do *software* Minitab. Esses testes foram ordenados de forma aleatória e podem ser visualizados no APÊNDICE C. Porém, os experimentos com condições de corte de mesma profundidade foram conduzidos em sequência para evitar qualquer no material. Dessa forma, após os testes de mesma profundidade, a superfície foi faceada para prosseguir com os próximos ensaios. A troca de aresta da ferramenta ocorreu após o faceamento completo da superfície. A variação dos parâmetros de corte e os respectivos níveis são apontadas pela TAB 3.3.

TABELA 3.3

Parâmetros de corte avaliados nos testes experimentais.

Fator	Nível		
Velocidade de corte [m/min]	50	75	100
Avanço por dente [mm/rotação]	0,05	0,10	0,15
Profundidade de usinagem [mm]	0,4	0,7	1
Penetração de trabalho [mm]	0,45		

É importante ressaltar que em todos os testes a penetração de trabalho foi de 4,5mm para que apenas uma aresta realize o corte, já que o acelerômetro MPU6050 não é capaz de fornecer uma alta taxa de aquisição nas condições impostas. Logo, se apenas uma aresta está realizando corte, a frequência de passagem das arestas e seus múltiplos ocorrerão em frequências menores. A FIG. 3.6 ilustra a escolha do valor desse parâmetro.

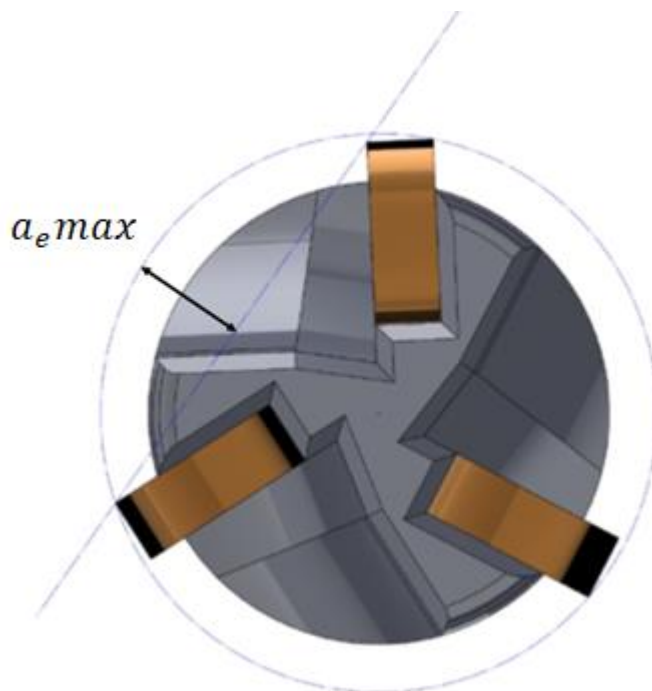


FIGURA 3.6 - Penetração de trabalho máxima escolhida para que apenas uma aresta realize corte por vez.

Cada teste apresentado na TAB 3.3 contou com uma réplica, totalizando 54 experimentos. Nesses experimentos, a direção de corte foi concordante e sem a presença de fluido de corte. A condição de usinagem com velocidade de corte de 100 m/min, avanço por dente de 0,15 mm e profundidade de usinagem de 1 mm (teste 25 do APÊNDICE C) foi reproduzida no sentido discordante para avaliar a influência do sentido de fresamento sobre sinal de vibração. Além disso, essa condição também foi utilizada na condução do teste de vida.

Durante o teste de vida, o desgaste e a rugosidade foram medidos após um certo número de passadas de acordo com a TAB. 3.4. O rugosímetro foi ajustado para um comprimento de amostragem de 0,8mm, o qual é indicado para aferir a rugosidade no processo de fabricação por fresamento (ABNT NBR ISO 4287, 2002 *apud* RODRIGUES, 2018). Foram avaliados os parâmetros desvio aritmético médio (R_a), desvio médio quadrático (R_q) e a altura máxima do perfil (R_z).

TABELA 3.4

Comprimento usinado acumulativo para o teste de vida da ferramenta.

Nº de passadas	Comprimento usinado acumulativo[m]
5	0,8
26	4,16
47	7,52
68	10,88
110	17,6
173	27,68
236	37,76
299	47,84
362	57,92
425	68
488	78,08
572	91,52
656	104,96
782	125,12
908	145,28
1034	165,44
1160	185,6
1246	199,36

Foi estabelecido um sentido de identificação dos insertos a fim de garantir o acompanhamento da progressão do desgaste em cada inserto (FIG. 3.7).

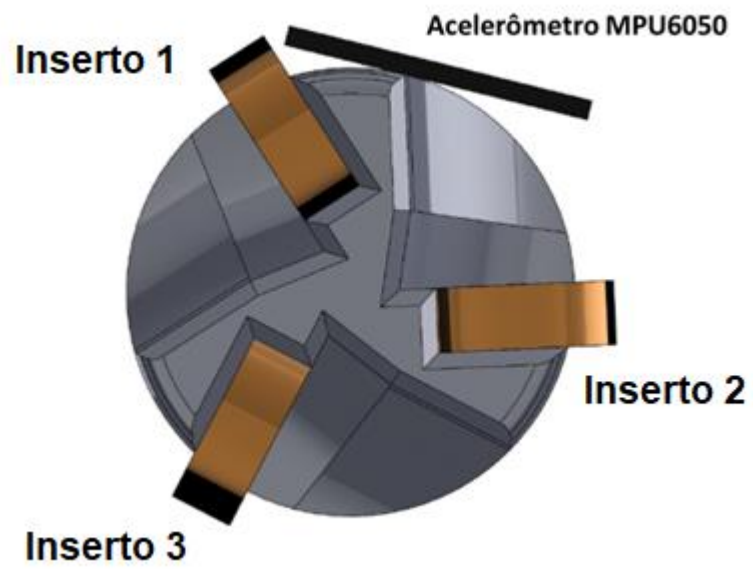


FIGURA 3.7 - Identificação dos insertos no sentido horário a partir da posição do acelerômetro.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Esta seção está organizada em resultados obtidos na calibração do sistema desenvolvido, testes realizados durante o desenvolvimento do sistema e resultados dos testes experimentais de desempenho.

4.1 Calibração do sistema

A FIG. 4.1 apresenta a comparação dos espectros obtidos para a faixa de frequência de calibração. É possível observar que o acelerômetro MPU6050 respondeu, com amplitudes menores, nas frequências corretas de excitação em todos os experimentos, e com uma exatidão menor do que a do acelerômetro de referência. Além disso, a resposta nas frequências mais altas apresentou maior ruído e excitação em frequências secundárias.

Levando em consideração que o acelerômetro MPU6050 é de custo muito inferior ao acelerômetro de referência, a menor exatidão e menor taxa de aquisição são aceitáveis.

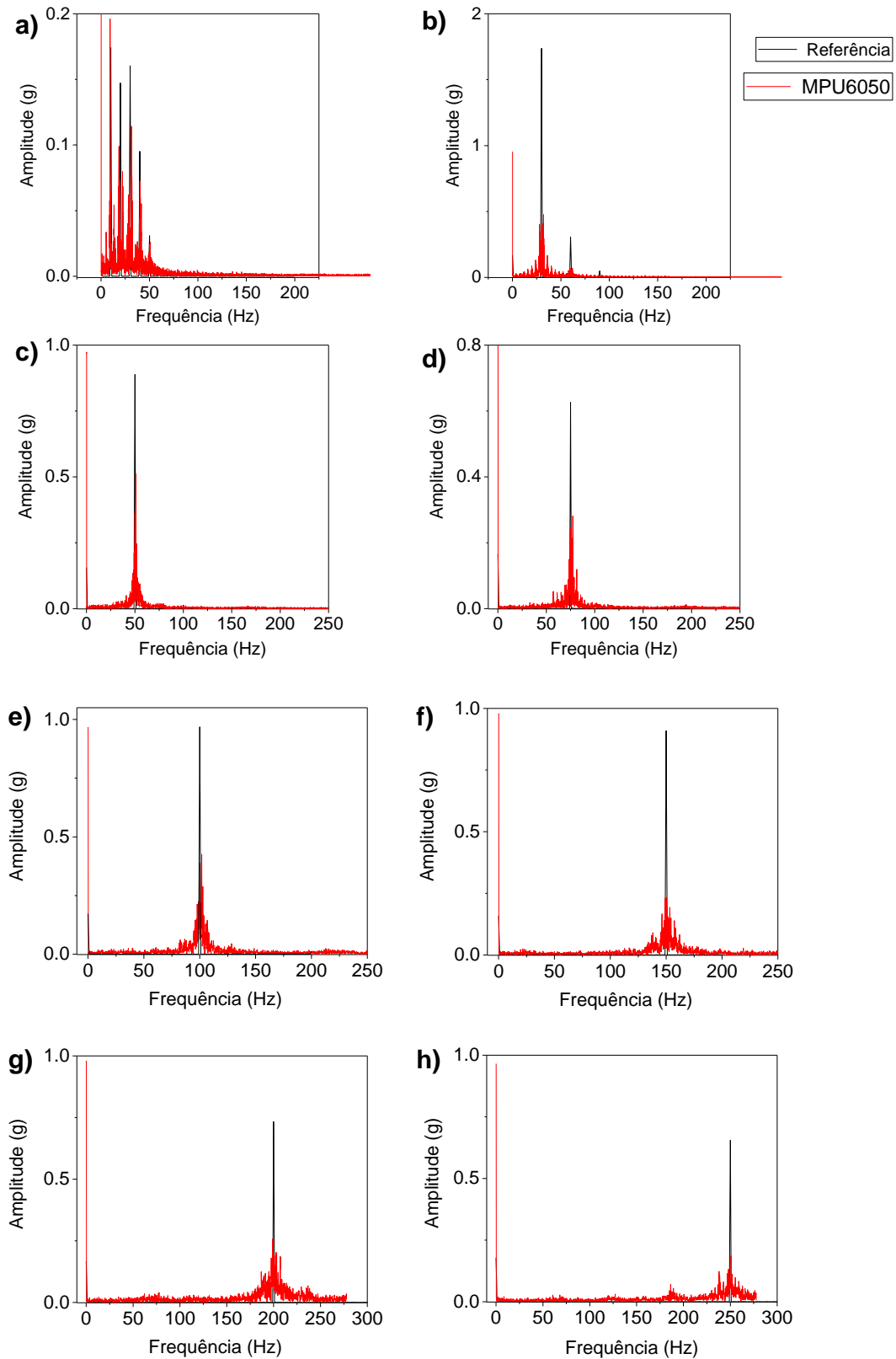


FIGURA 4.1 - Comparação do espectro de frequência: a) 10 Hz, b) 30 Hz, c) 50 Hz, d) 75 Hz, e) 100 Hz, f) 150 Hz, g) 200 Hz e h) 250 Hz.

A FIG. 4.2 compara a resposta dos acelerômetros nas frequências de excitações. É possível observar que as amplitudes máximas foram exatamente nas frequências de excitação. Já a FIG. 4.3 apresenta a razão entre as amplitudes máximas nessas frequências de excitação. É evidente que há uma diferença entre as amplitudes de modo geral. Essa discrepância é maior na frequência de 30 Hz, contudo a diferença entre as amplitudes é menor nas outras frequências, cujo valor permaneceu em torno de 0,35 da amplitude do acelerômetro de referência.

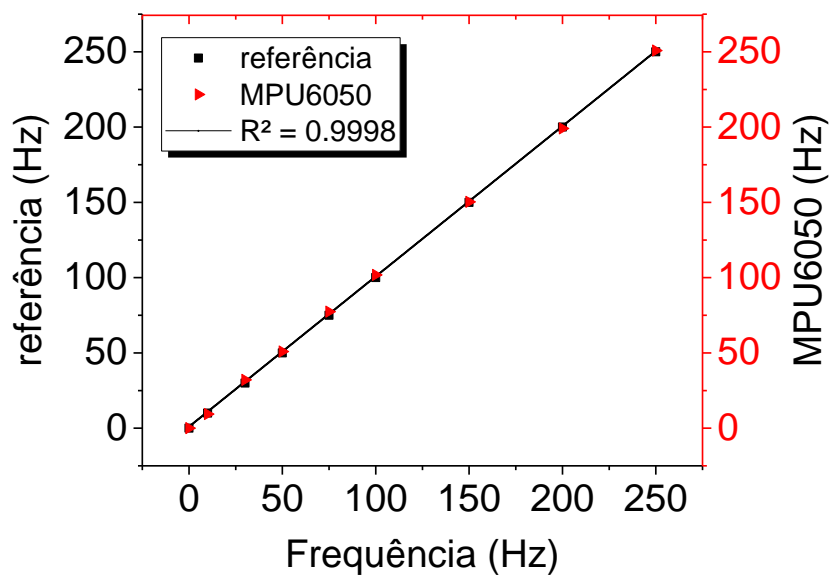


FIGURA 4.2 - Comparação da resposta na frequência entre o acelerômetro de referência e o MPU6050.

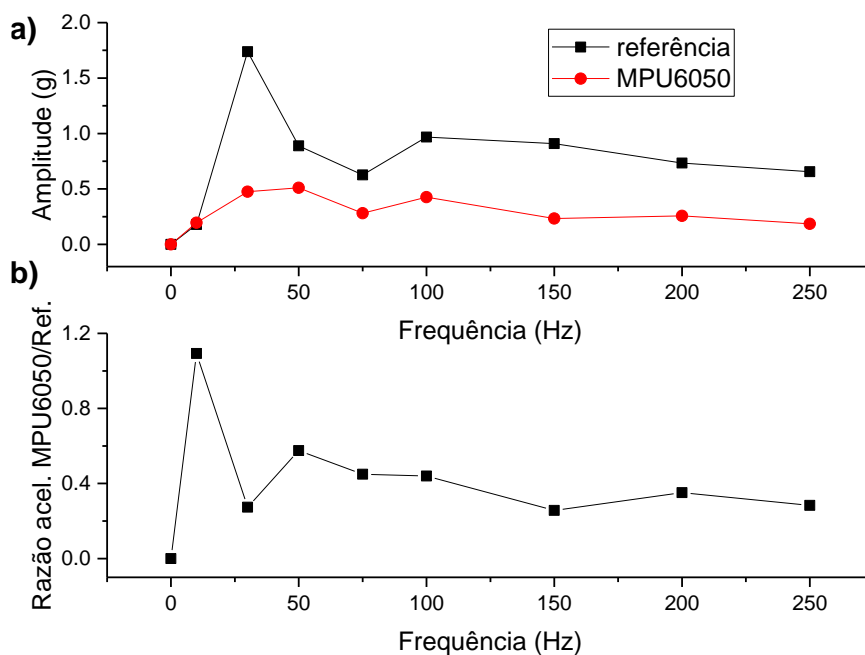


FIGURA 4.3 - comparação entre as a) amplitudes e b) razão entre as amplitudes.

De certa forma, o comportamento do acelerômetro MPU6050 corresponde ao sinal de vibração, mas com amplitudes menores. Essa diferença na amplitude pode estar atrelada à sensibilidade do acelerômetro (já que o mesmo é de baixo custo), ou até mesmo, ao tipo de janelamento utilizado.

4.2 Testes de validação

Os testes de validação foram subdivididos entre os testes preliminares, testes para avaliar a influência dos parâmetros de corte e o teste de vida, conforme apresentado a seguir.

4.2.1 Testes preliminares

Os resultados apresentados nesta seção possuem a finalidade de exibir a funcionalidade do sistema desenvolvido, uma vez que a alteração no parâmetro velocidade de corte implica na alteração da rotação do eixo árvore e, com isso, uma variação na frequência de trabalho da ferramenta. Além do mais, a velocidade de corte é um dos parâmetros mais

influentes na amplitude do sinal de vibração, conforme será apresentado ao decorrer desse capítulo.

A FIG. 4.4 apresenta o sinal de vibração do eixo axial do acelerômetro (direção axial da fresa) em alguns testes conduzidos durante o desenvolvimento do sistema. É importante enfatizar que o sentido de fresamento nesses testes foi o concordante e o discordante. Essa característica pode ser observada no espaçamento presente nos gráficos da FIG 4.4, no qual o sinal à esquerda corresponde ao corte no sentido concordante, acompanhado pelo fim de curso da ferramenta e o retorno da ferramenta realizando o corte discordante.

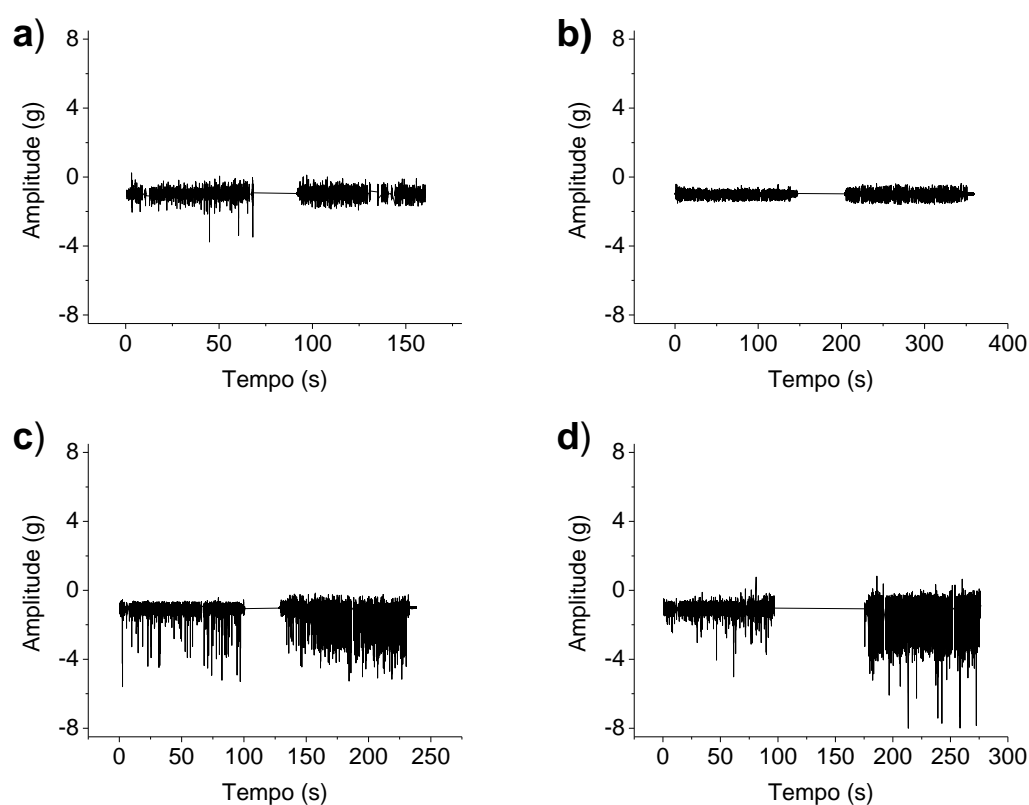


FIGURA 4.4 - Sinal de vibração no eixo axial durante o fresamento concordante e discordante sob diferentes velocidades de corte: a) 31,4 m/min, b) 47,1 m/min, c) 70,7 m/min e d) 78,5 m/min.

É evidente que o fresamento discordante geralmente origina vibrações mais intensas. Esse fato ocorre devido principalmente a uma característica do processo: a aresta de corte engaja na peça com a espessura mínima de corte, o qual pode ocasionar à sulcamentos na superfície, maiores temperaturas e caldeamento de material na aresta de corte, dificultando a remoção inicial do material. Por outro lado, outra característica é o sentido contrário entre

avanço e direção de movimento da fresa, sendo que nesse caso, a fresa empurra a peça. Tal característica elimina as folgas presentes nos componentes da máquina tal como no fuso da mesa.

É possível observar que a velocidade de corte é influente sobre sinal de vibração, uma vez que o aumento desse parâmetro eleva a taxa de cisalhamento de material, afetando a temperatura, força e periodicidade da passagem das arestas. Ademais, é possível observar que a vibração no sentido radial da ferramenta (FIG. 4.5) é geralmente de maior amplitude que a vibração no sentido axial, já que nesse eixo a ferramenta possui muito mais rigidez do que o eixo radial, possibilitando maiores deslocamentos e amplitudes de vibração.

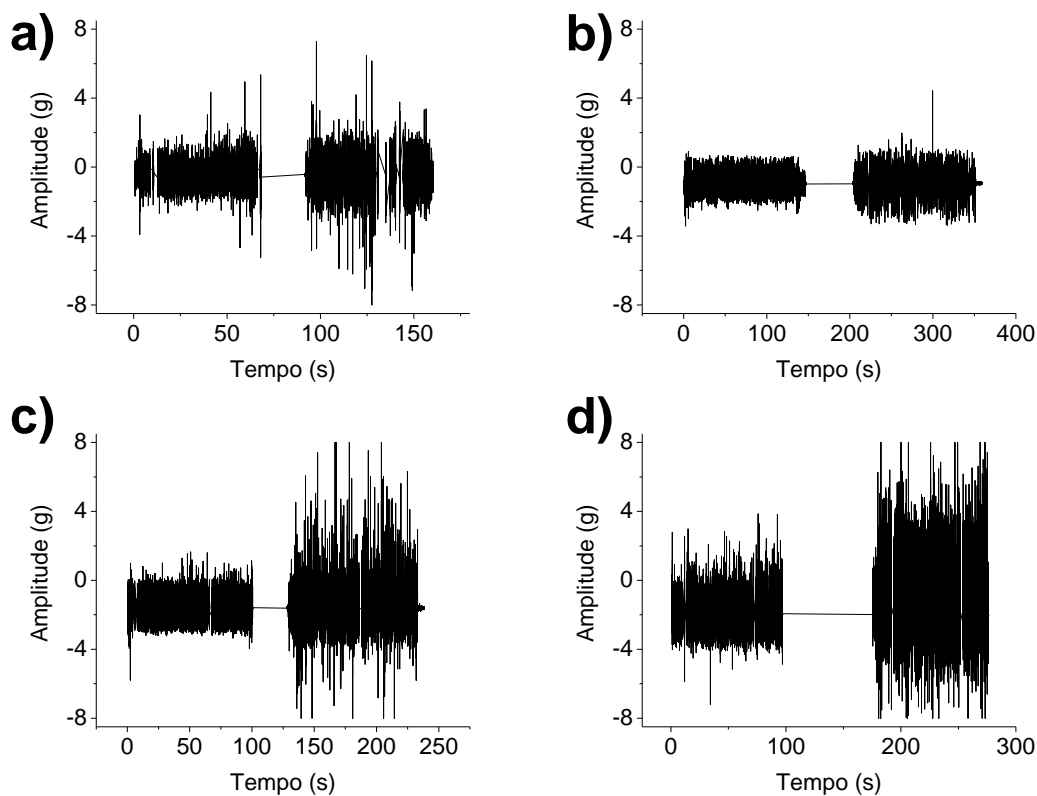


FIGURA 4.5 - Sinal de vibração no eixo radial durante o fresamento concordante e discordante sob diferentes velocidades de corte: a) 31,4 m/min, b) 47,1 m/min, c) 70,7 m/min e d) 78,5 m/min.

O aumento da velocidade de corte ocasiona uma elevação das amplitudes de vibração. Conforme Maia (2009), o aumento da velocidade de corte eleva a frequência de excitação do sistema podendo indicar um aumento da amplitude de vibração e do sinal RMS (valor eficaz).

Durante o corte discordante nas rotações mais altas, os picos do sinal de vibração no eixo radial atingiram o limite da faixa dinâmica ajustado em 8g. Esse empecílio foi encontrado sobretudo no eixo tangencial, como observado na FIG. 4.6, sendo o principal motivo para o presente trabalho apenas analisar os sinais vibracionais obtidos apenas nos eixos X e Y do acelerômetro (axial e radial, respectivamente).

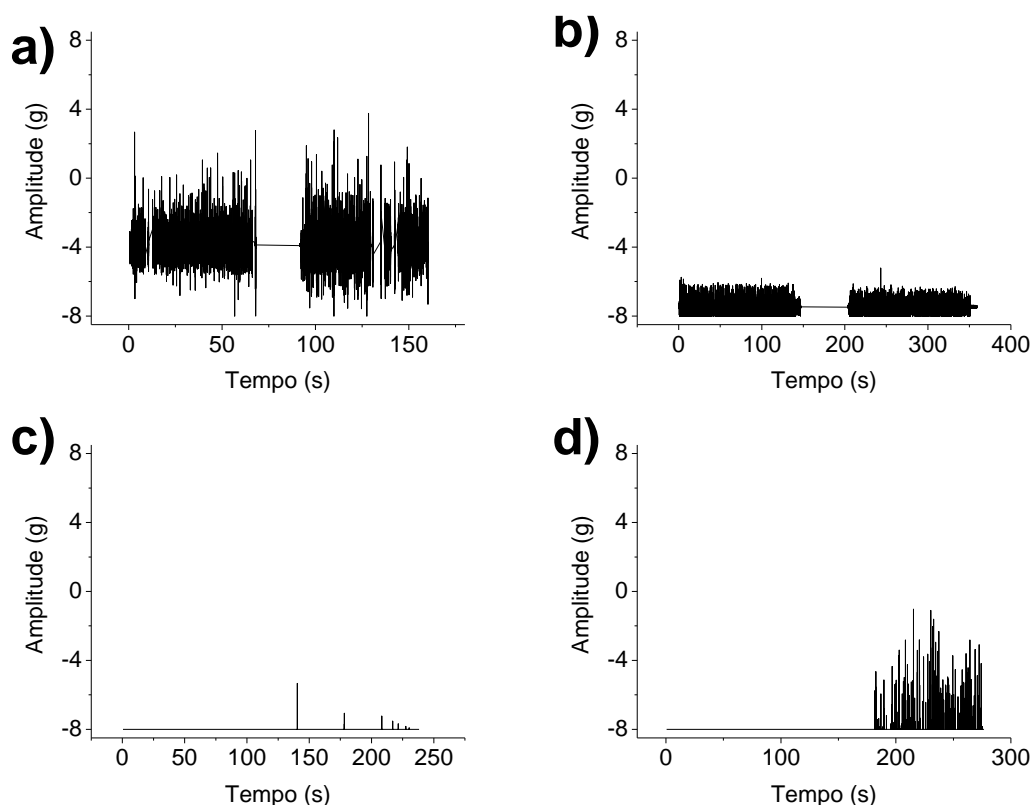


FIGURA 4.6 - Sinal de vibração no eixo tangencial durante o fresamento concordante e discordante sob diferentes velocidades de corte: a) 31,4 m/min, b) 47,1 m/min, c) 70,7 m/min e d) 78,5 m/min.

Os sinais obtidos para o eixo tangencial situaram-se fora da faixa dinâmica de 8g em rotações acima de 700 rpm, sendo que as amplitudes de vibração são de magnitude aproximadas às vibrações no eixo radial, porém a origem do gráfico é deslocada à medida que a rotação aumenta. Uma possível explicação para tal fenômeno pode ser a própria rigidez do acelerômetro. Uma vez que o acelerômetro é fixado em uma superfície circular, boa parte do acelerômetro fica em balanço, principalmente a superfície responsável pela rigidez do eixo Z (sentido tangencial).

Entretanto, de acordo com Souto (2007), a análise do sinal de vibração no domínio do tempo é significativa apenas para indicar fraturas e lascamentos da ferramenta, não sendo

uma ferramenta ideal para o acompanhamento da progressão do desgaste. A FIG. 4.7 apresenta a análise desses sinais de vibração após o processamento por FFT (*Fast Fourier Transform*).

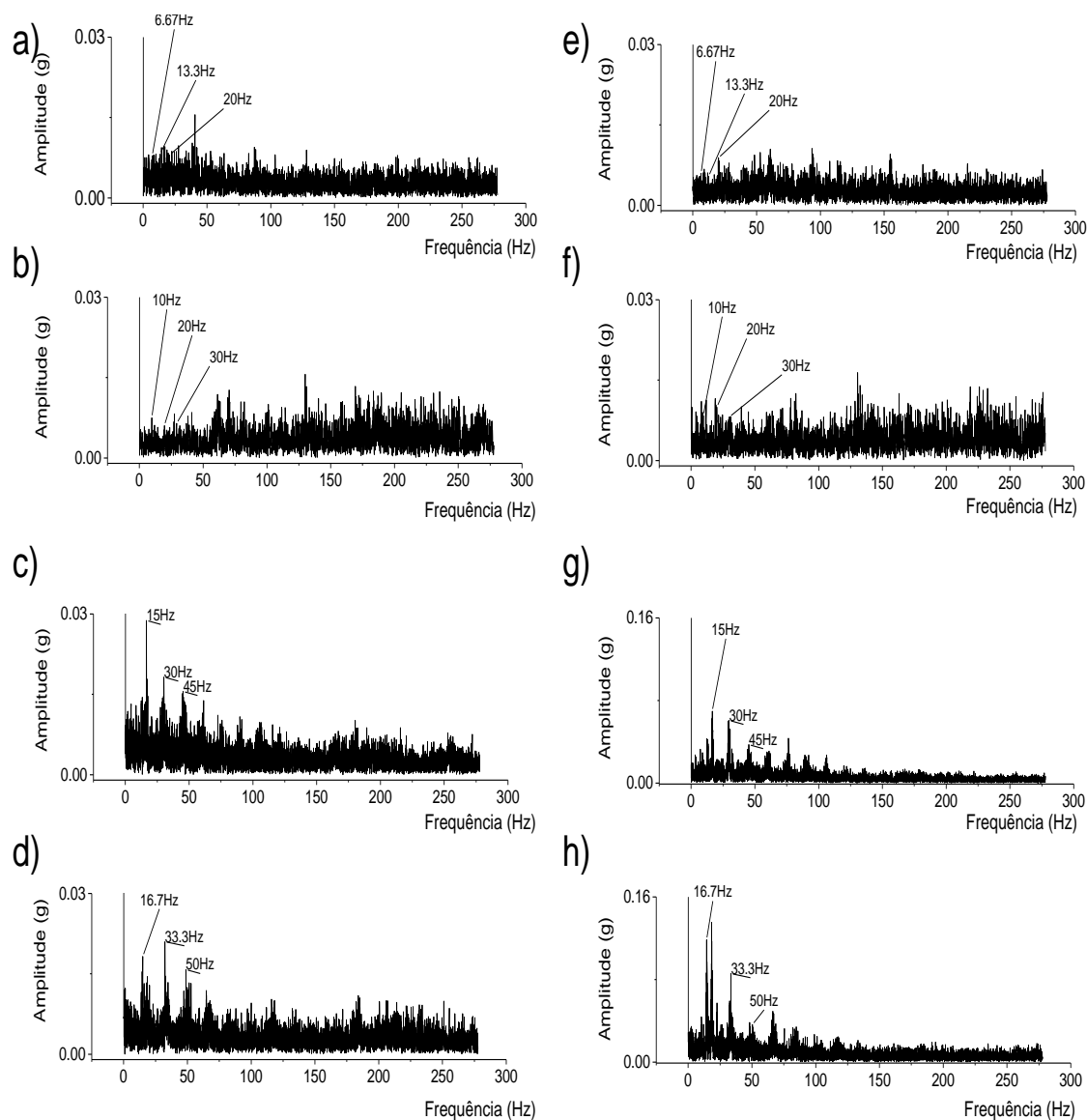


FIGURA 4.7 - Espectro do sinal de vibração no eixo axial para diferentes velocidades de corte: a) sentido concordante a 31,4 m/min, b) sentido concordante a 47,1 m/min, c) sentido concordante a 70,7 m/min, d) sentido concordante a 78,5 m/min, e) sentido discordante a 31,4 m/min, f) sentido discordante a 47,1 m/min, g) sentido discordante a 70,7 m/min e h) sentido discordante a 78,5 m/min.

Nota-se que a escala da faixa da amplitude no corte discordante para as rotações 900 e 1000rpm (FIG. 4.7g e 4.7h) é de aproximadamente cinco vezes maior e que os picos das baixas frequências excitadas são as frequências de trabalho da fresa e seus múltiplos. Outras frequências excitadas podem ser frequências naturais do conjunto mandril-fresa e dos

componentes da máquina, fenômenos tribológicos decorrentes do corte e microestrutura do material e frequência natural da peça.

É perceptível que as altas rotações intensificam os picos das frequências de trabalho da fresa enquanto em baixas rotações os ruídos mascaram esses picos. Tal acontecimento pode ser devido ao baixo esforço de corte em virtude do estado recozido do material e às condições brandas de corte, principalmente em baixas rotações, acrescido da qualidade do sensor. Já em rotações mais altas, há um aumento na taxa de cisalhamento e um conseqüente aumento no esforço sob a ferramenta.

De forma geral, é possível observar que no eixo radial as amplitudes do espectro das frequências excitadas são maiores assim como no domínio do tempo (FIG. 4.8). De forma similar o ruído também é ligeiramente maior. Essas variações dinâmicas que caracterizam o ruído podem ser associadas à rotação da ferramenta, ou seja, o referencial do eixo não é estático, mas muda a cada posição do acelerômetro durante o giro da ferramenta. Logo, as variações dinâmicas obtidas não são apenas de uma direção ou de um eixo, mas sim de múltiplas direções radiais e tangenciais, tornando-se mais próximos de um plano do que um eixo em si.

Tal qual a resposta do acelerômetro no tempo para o eixo Z em rotações acima de 700rpm, o espectro obviamente tem mesmo comportamento, já que não há valores para o processamento do sinal. Já em rotações menores o comportamento e as amplitudes do sinal vibracional nas frequências excitadas são de forma bem semelhante ao apresentado pelo eixo Y.

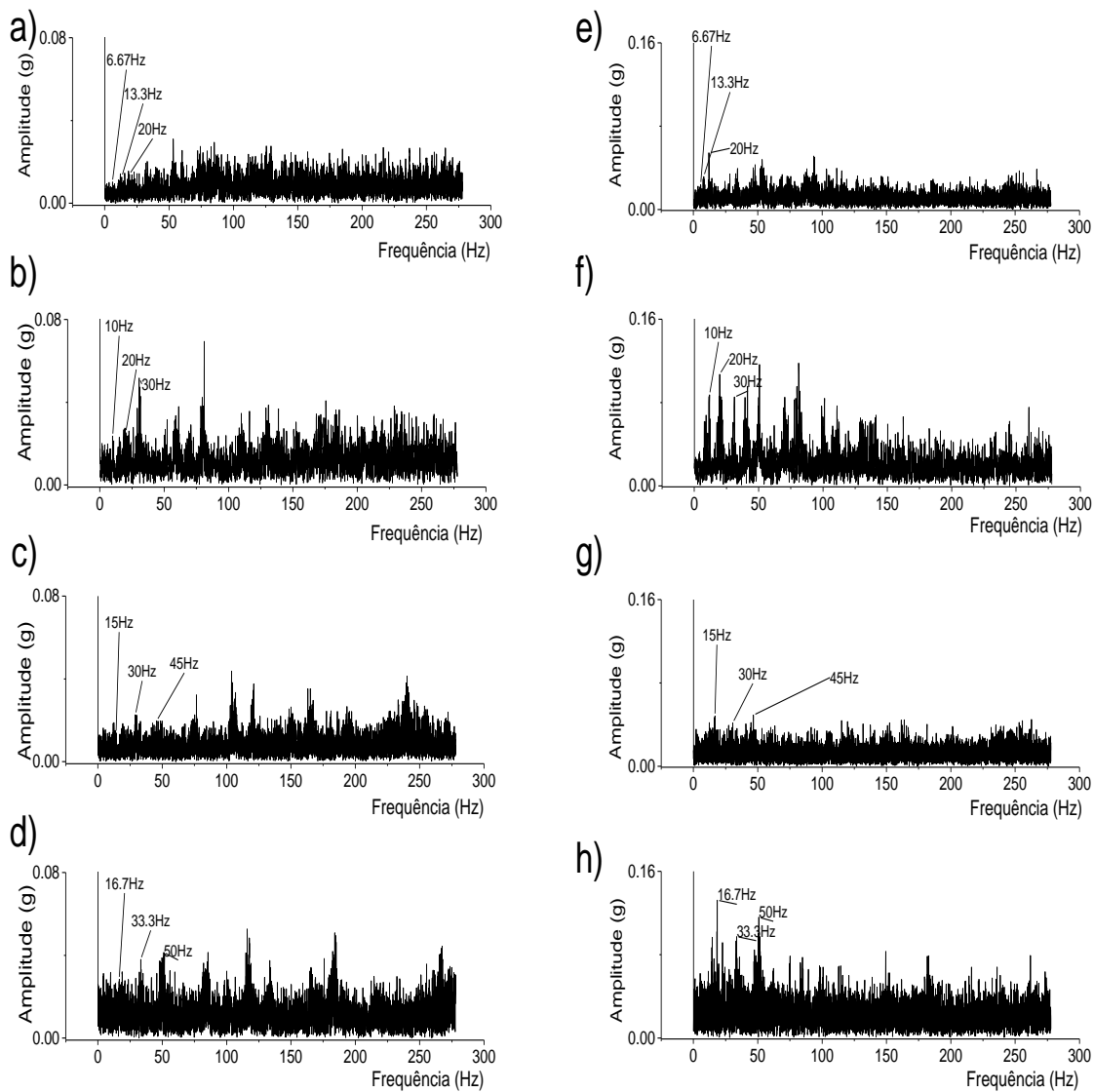


FIGURA 4.8 - Espectro do sinal de vibração no eixo radial para diferentes velocidades de corte: a) sentido concordante a 31.4 m/min, b) sentido concordante a 47.1 m/min, c) sentido concordante a 70.7 m/min, d) sentido concordante a 78.5 m/min, e) sentido discordante a 31.4 m/min, f) sentido discordante a 47.1 m/min, g) sentido discordante a 70.7 m/min e h) sentido discordante a 78.5 m/min. Note: a escala da amplitude no corte discordante é o dobro.

4.2.2 Influência dos parâmetros de corte

Esses testes foram conduzidos para verificar a sensibilidade do acelerômetro em termos de amplitude e frequência de vibração quanto à variação dos parâmetros de corte. Com o intuito de verificar se há influência da frequência natural do conjunto mandril-fresa e suporte nas frequências excitadas do sinal, foi feita uma simulação das principais modais.

Mandril e fresa foram modelados como peças distintas, porém a junção dos corpos foi determinada como conectados. Ambas as peças foram consideradas como aço para ferramentas, presente na lista de materiais do Solidworks conforme a norma DIN. Já o material do suporte foi PVC.

Analisando o resultado da simulação mostrado na FIG. 4.9 da primeira modal do conjunto mandril-fresa, nota-se que a frequência de excitação para tal é de 1581,4 Hz, ou seja, muito maior do que a frequência máxima de observação na qual o sensor MPU6050 consegue atuar com essas configurações. Logo, qualquer relação de influência de ressonância da frequência natural do conjunto não pode ser considerada nesse trabalho.

De acordo com os resultados da simulação realizados por Polli (2005), o primeiro modo de vibração do sistema utilizado pelo autor foi de 1638 Hz, corroborando com os resultados encontrados.

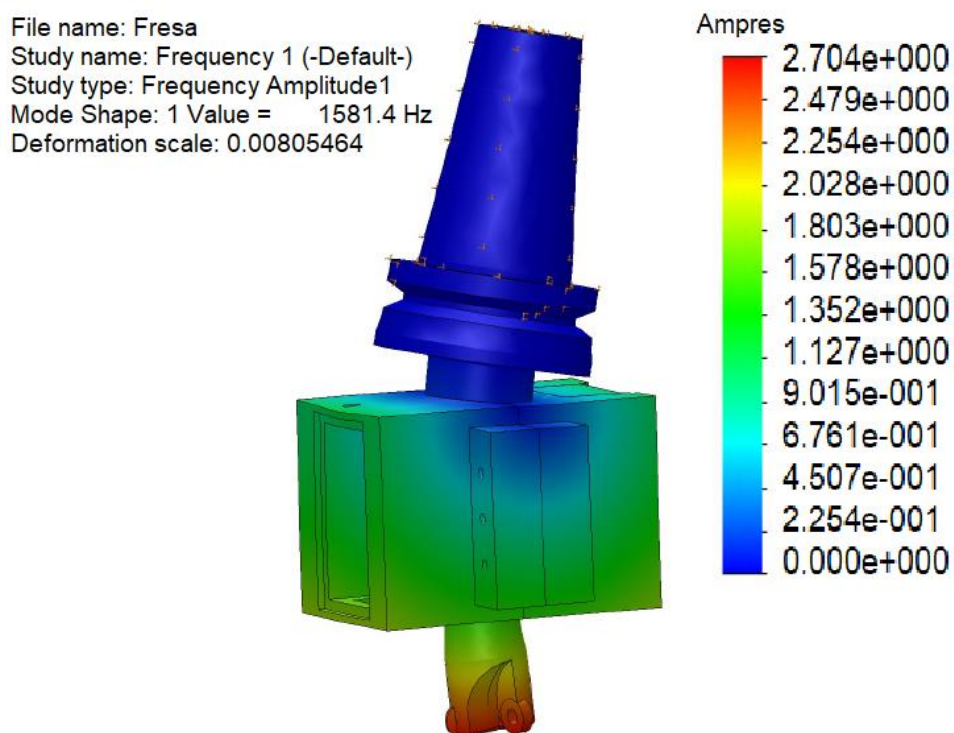


FIGURA 4.9 - Primeiro modo de vibração do conjunto mandril-fresa-suporte.

Em relação à peça, não foi realizada a modelagem e a simulação das frequências naturais, pois o corpo de prova foi fixado em uma morsa, o que impede seu deslocamento e aumenta consideravelmente a rigidez. Além do mais, levando em conta as dimensões da peça,

não há risco de flambagem já que a altura é menor que 2,5 vezes do que a base (GRÜNNING, 1996).

A FIG. 4.10 apresenta uma comparação do espectro da vibração diante a condição mais branda ($V_c = 50$ m/min, $f = 0,05$ mm e $a_p = 0,4$ mm), média ($V_c = 75$ m/min, $f = 0,1$ mm e $a_p = 0,7$ mm) e a mais severa condição de corte ($V_c = 100$ m/min, $f = 0,15$ mm e $a_p = 1,0$ mm).

Dentre os parâmetros mencionados, foi escolhido a condição mais severa de corte para a réplica do teste no sentido discordante de fresamento, conforme apresentado A FIG. 4.11.

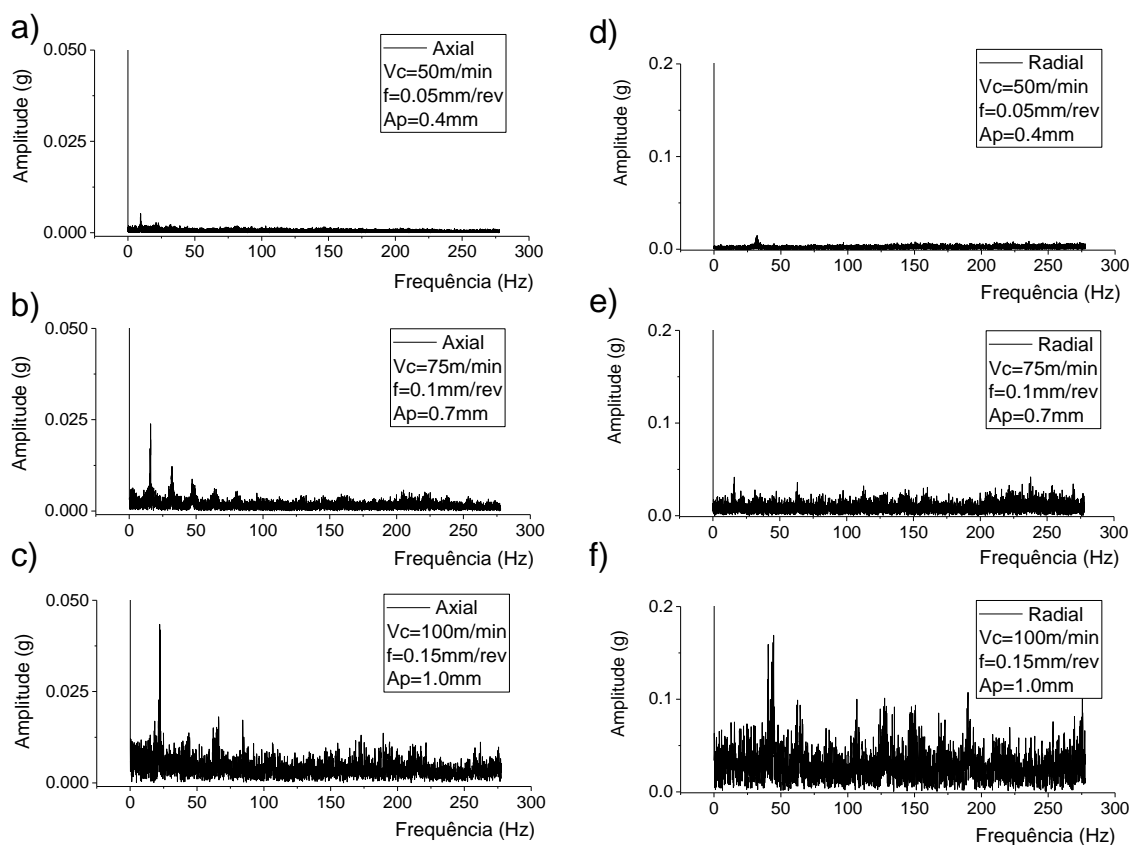


FIGURA 4.10 - Comparação do espectro da vibração nos eixos em função das condições de corte. Vibração axial nas condições: a) branda, b) média e c) severa. Vibração radial nas condições d) branda, e) média e f) severa.

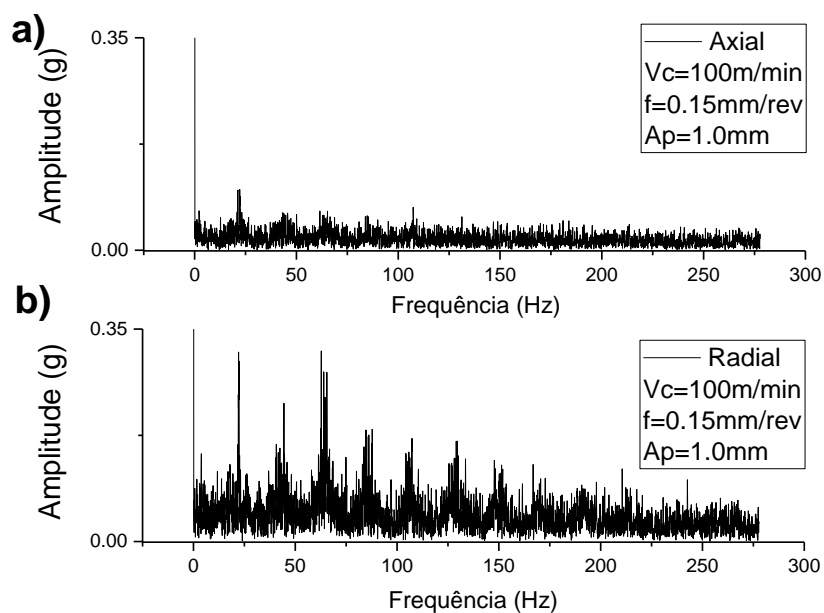


FIGURA 4.11 - Sinal de vibração para o corte em sentido discordante sob os parâmetros de corte mais severa: a) direção do eixo axial e b) eixo radial.

Como esperado, condições mais severas de corte refletem em maiores amplitudes nas frequências de trabalho devido ao maior esforço imposto sobre a ferramenta. Nota-se na FIG. 4.10 que a faixa dinâmica para o eixo radial é quatro vezes maior do que no eixo axial. Contudo, uma análise direta do espectro de vibração não permite confirmar qual é a relação dos parâmetros com a amplitude das frequências de trabalho. Para realizar uma conspícua comparação entre a influência dos parâmetros de corte, foi feita a análise da primeira frequência de trabalho em cada condição, conforme a FIG. 4.12 Nessa analogia foi avaliada a amplitude da primeira frequência de trabalho em relação a um dos parâmetros de corte, o qual foi escolhido como variável e então os outros foram mantidos como referência e assim reproduzido para as demais condições.

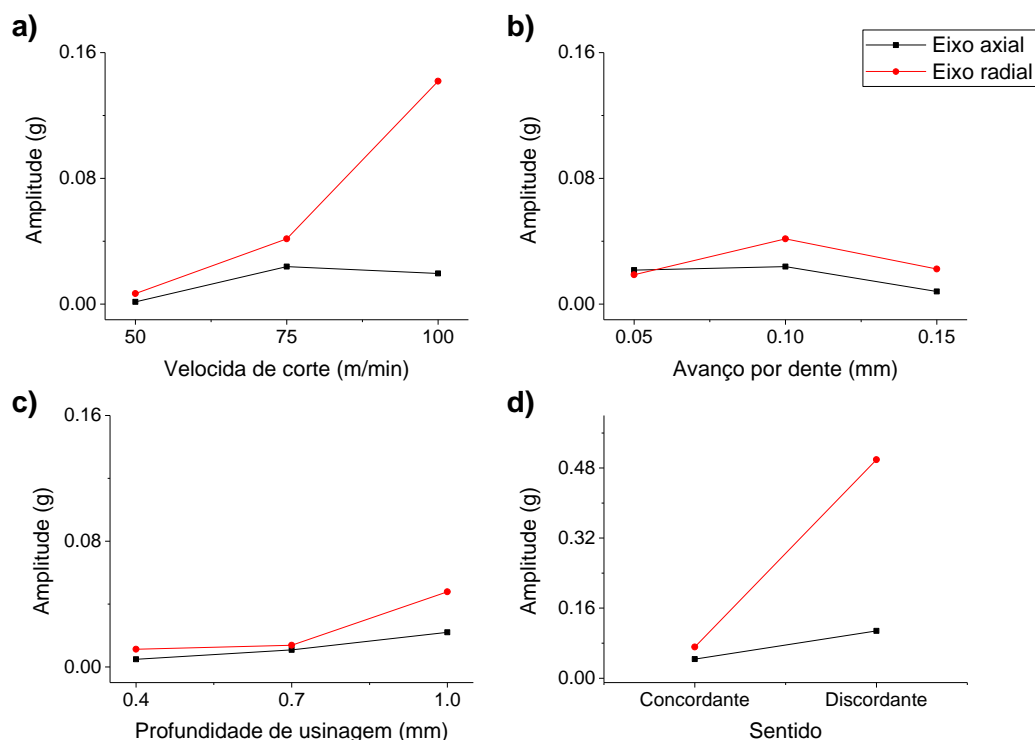


FIGURA 4.12 - Contribuição de cada parâmetro de corte na amplitude da primeira frequência de trabalho da fresa: a) velocidade de corte, b) avanço, c) sentido de fresamento e d) profundidade de usinagem.

Uma avaliação superficial do comportamento da amplitude em relação aos parâmetros de corte permite inferir algumas consequências do processo: o aumento da velocidade de corte implica em um aumento na taxa de cisalhamento, aumentando a vibração. Já para o avanço, uma explicação plausível é que baixos valores de avanço provocam um maior grau de recalque e um menor ângulo de cisalhamento, aumentando a energia específica de corte, justificando a maior amplitude com o menor avanço. Além disso, baixos valores de avanço podem provocar sulcamentos na peça e não o corte, ocorrendo o chamado efeito escala (em inglês *size effect*). Com o aumento do avanço a pressão específica de corte diminui, reduzindo os esforços e a vibração. Todavia, esse parâmetro não aparenta ser tão influente na vibração quanto os demais. Já o aumento da profundidade de usinagem causa um incremento direto na força de usinagem pois aumenta a seção e a rigidez do cavaco, proporcionando maiores amplitudes de vibração. Finalmente, o sentido de corte aparenta ser o fator mais influente sobre a amplitude de vibração. Além dos motivos para o corte discordante provocar maiores vibrações como discutido anteriormente, segundo Toh (2005) durante o corte concordante a temperatura da superfície do cavaco é maior do que durante o corte discordante. Fundamentado nessa hipótese, a elevação da temperatura resulta em menores esforços e vibrações.

É perceptível que o eixo radial é muito mais sensível ao efeito dos parâmetros de corte já que as componentes de força radiais impõem de fato a deflexão da fresa. De acordo com Pires (2011), é de se esperar que o eixo da componente radial seja muito mais nocivo à estabilidade do processo.

A partir dos dados de amplitude em função dos parâmetros de corte, foi feita uma análise de variância (ANOVA) a fim de demonstrar estatisticamente o que foi previamente discutido. A análise de variância tem como objetivo avaliar a influência de cada fator (parâmetros de corte) na resposta (amplitude). Por meio dessa análise é possível atestar a validade das observações experimentais.

Entretanto após o estudo estatístico, constatou-se que o comportamento dos resíduos não segue uma distribuição normal (FIG. 4.13), invalidando a análise dos resultados para nível de significância para um teste paramétrico ($\alpha < 0,05$).

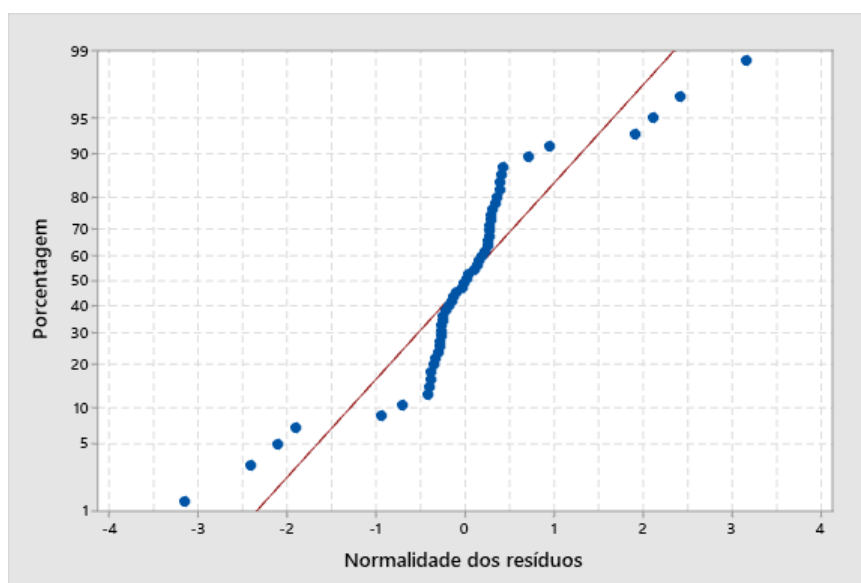


FIGURA 4.13 - Teste de normalidade para os resíduos.

Por conseguinte, foi utilizada uma análise estatística não paramétrica (método Kuskal-Wallis). Esse é método alternativo à ANOVA é utilizado em casos que as suposições exigidas pela ANOVA não são atendidas, tais quais a normalidade da distribuição. Tal método permite realizar a comparação de duas ou mais amostras independentes de tamanhos diferentes indicando qual amostra é dominante (FARIA, 2017).

Partindo da metodologia Kruskal-Wallis, onde não se faz necessário que os resíduos sigam uma distribuição normal, fez-se análise de significância de cada fator na variável de resposta, como pode ser observado nas TAB. 4.1.

TABELA 4.1 - Efeitos de significância de cada fator na resposta em amplitude do eixo axial de acordo com a metodologia Kruskal-Wallis.

Fator	Significância	P-valor (axial)	P-valor (Radial)
Velocidade de corte	Sim	0,000	0,000
Profundidade de usinagem	Sim	0,002	0,001
Avanço	Não	0,479	0,847
Sentido de fresamento	Não	0,121	0,121

A análise não-paramétrica pelo método Kruskal-Wallis é somente da entrada individual de cada parâmetro e não da interação entre eles, como ocorre na metodologia ANOVA. Diante disso, a avaliação dos fatores deve apresentar um valor de p-valor inferior ao valor do erro ou nível de significância α para que os parâmetros sejam estatisticamente significativos.

Com isso, analisando as TAB. A.3 e TAB. A.4 do APÊNDICE E, os fatores que possuem o p-valor abaixo de 0,05 são velocidade de corte e profundidade de usinagem. Esses são os parâmetros que estatisticamente possuem significância na amplitude da vibração da frequência de trabalho. Quanto aos parâmetros avanço e sentido de corte, não é possível afirmar que são significativos. Além disso, quanto ao sentido de corte, não foram realizadas um número de réplicas necessárias para que se tenha um resultado estatístico confiável.

Em seguida, após verificado quais são os parâmetros que são estatisticamente significativos, foi levantado o efeito principal a fim de determinar qual parâmetro, individualmente, possui maior influência sobre o processo. A FIG. 4.14 apresenta o gráfico de efeito principal para os eixos axial e radial.

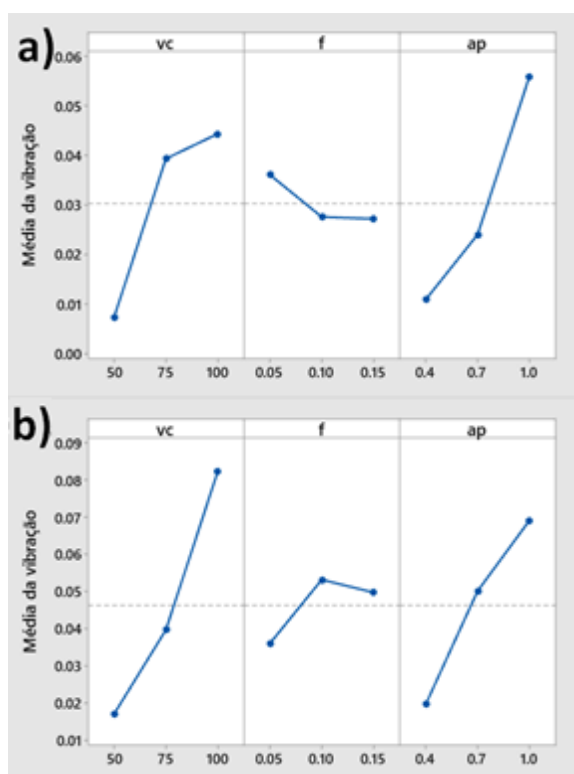


FIGURA 4.14 - Efeito principal de cada parâmetro na amplitude da primeira frequência de trabalho: a) velocidade de corte, avanço e profundidade de usinagem na vibração média axial, b) velocidade de corte, avanço e profundidade de usinagem na vibração média radial.

Pode-se dizer que a velocidade de corte é fortemente influente sobre a amplitude de vibração média em ambos os eixos axial e radial, sendo que, esse fator apresenta maior ação sobre o eixo radial.

Com base nesses resultados não é possível afirmar que o aumento do avanço possui influência na amplitude de vibração. Entretanto, conforme Polli (2005), o aumento do avanço não induz a perda de estabilidade do corte, mas valores maiores de avanço implicam em um aumento na magnitude do sinal devido à maior retirada de material.

Tal qual a velocidade de corte, a profundidade de usinagem apresentou grande atuação sobre a amplitude de vibração nas direções axial e radial, já que a elevação desse fator aumenta consideravelmente a rigidez do cavaco.

Conforme os resultados obtidos por Maia (2009), o sentido de corte discordante apresentou maiores amplitudes de vibração em relação ao corte concordante em quase todos os testes. Entretanto, devido ao nível de significância, não foi possível confirmar tal afirmação

Jain & Pradhan (2019) utilizaram o acelerômetro MPU6050 com o intuito de encontrar as melhores condições de corte para obter a relação de menor rugosidade e menor amplitude de vibração. Os autores concluíram que o avanço é o fator governante sobre a rugosidade e a velocidade de corte é a responsável pela maior amplitude de vibração, além disso, foi possível determinar o diâmetro ótimo da fresa.

4.2.3 Teste de vida

Com o propósito de averiguar se o acelerômetro é capaz de identificar a progressão do desgaste na ferramenta, esse teste foi conduzido considerando que o desgaste de flanco máximo de 0,3 mm é a condição de final de vida da ferramenta. A FIG. 4.15 apresenta a progressão do desgaste de flanco nas ferramentas em relação ao comprimento usinado.

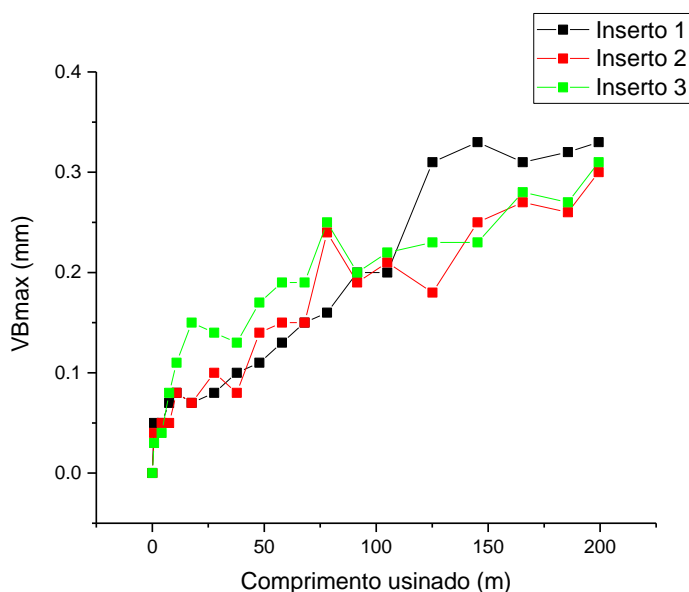


FIGURA 4.15 - Curva de vida da ferramenta com três insertos.

Como o desgaste foi mensurado por meio de uma lupa é comum que haja alguns pontos incongruentes (como pode ser visto próximo a 75 metros usinados) devido ao material aderido na ferramenta e a erros de medição. Já a diferença na progressão do desgaste entre as ferramentas pode ser devido ao batimento do eixo árvore e da fresa, tanto axial quanto radial, conforme apresentado na FIG. 4.16. Nesta figura mostra que quanto mais distante do centro,

maior é o batimento da ferramenta. A curva pontilhada representa o volume de material que o inserto deslocado provavelmente está retirando a mais que o inserto anterior. Como o inserto 2 está ligeiramente mais recuado do que as demais, é justificável o retardo na progressão do desgaste.

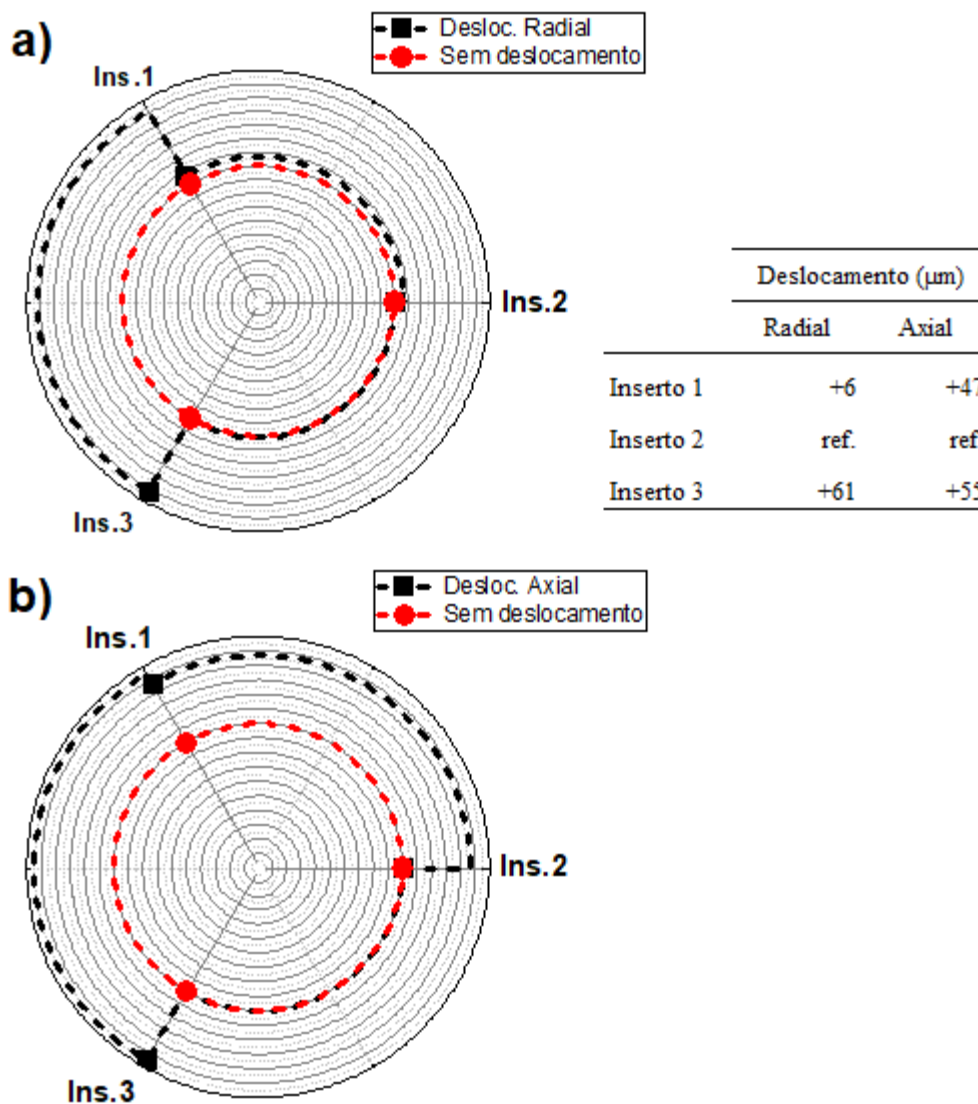


FIGURA 4.16 - Deslocamento a) radial e b) axial das arestas de corte nos três inserts. OBS: figura fora de escala.

Alguns pontos na progressão do desgaste foram selecionados para apresentação. A FIG. 4.17 mostra a progressão o desgaste de flanco do inserto 1 após 0,8, 11, 18, 58, 79, 145 e 199 m fresados e as FIG. 4.17 e 4.18 apresentam o sinal de vibração nos eixos axial e radial para os respectivos pontos para exemplificar o comportamento do sinal adquirido durante esses testes.

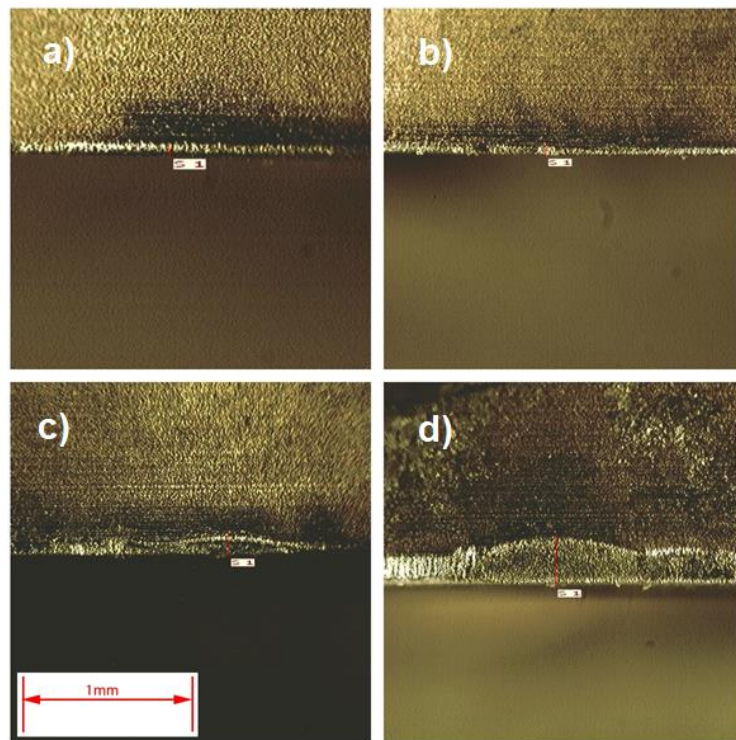


FIGURA 4.17 - Desgaste de flanco para a inserto 1 após: a) 0,8, b) 27, c) 78 e d) 199 m fresados.

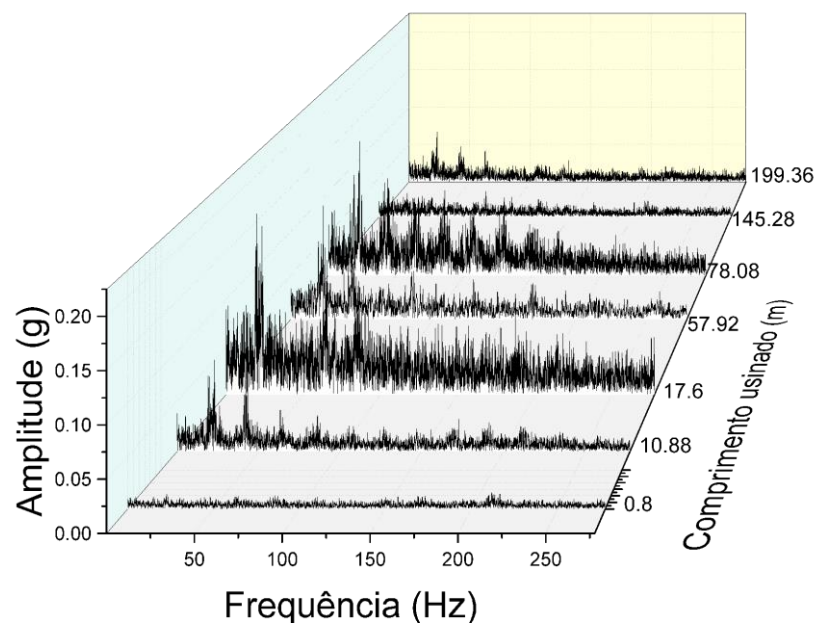


FIGURA 4.18 - Espectro vibracional para o eixo axial durante o teste de vida.

É perceptível que a amplitude do sinal aumenta de acordo com a progressão do desgaste. De acordo com Bonifácio (1993), as forças de usinagem se elevam com a progressão

do desgaste e conseqüentemente a vibração. Ainda, conforme os resultados de Pires (2011), as amplitudes de vibração aumentam à medida que o desgaste de flanco se acentua, principalmente a vibração radial. Contudo, analisando as amplitudes do sinal após 199,36 m usinados, pode-se notar que as amplitudes são bem menores se comparado com a ferramenta menos desgastada. Esse fato pode ser devido à quantidade de material removido, já que a ferramenta apresenta um maior desgaste, a mesma remove uma quantidade de material menor do que a ferramenta menos desgastada, logo os esforços são menores.

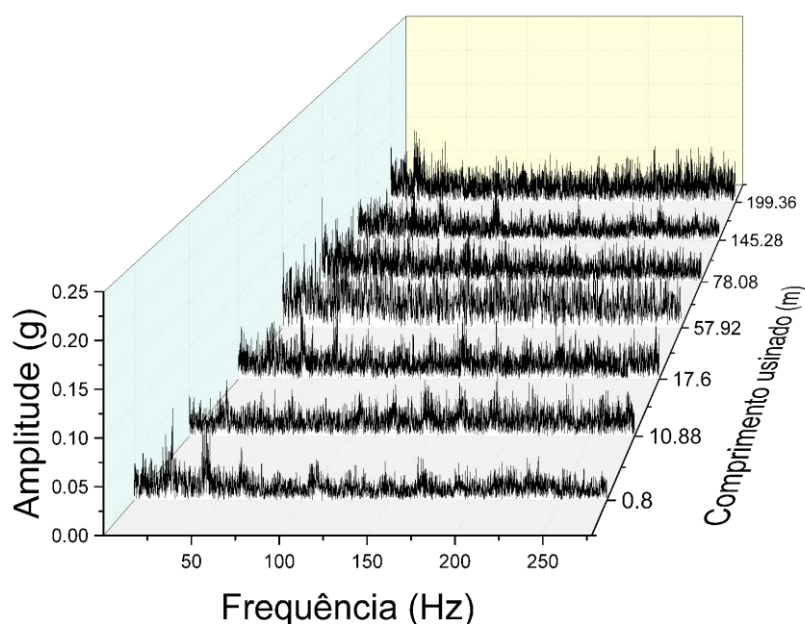


FIGURA 4.19 - Espectro vibracional para o eixo radial durante o teste de vida por comprimento fresado.

Observando o espectro da vibração para o eixo radial, é perceptível de um modo geral, que as amplitudes são maiores do que no eixo axial, porém as amplitudes nas frequências de trabalho nem sempre são maiores, como foi apresentado em todos os testes até o momento. Além do mais, o sinal apresenta muito mais ruídos.

Outro fator analisado para correlacionar com a vibração da ferramenta foi a rugosidade. A FIG. 4.20 apresenta a evolução da rugosidade em relação ao comprimento usinado.

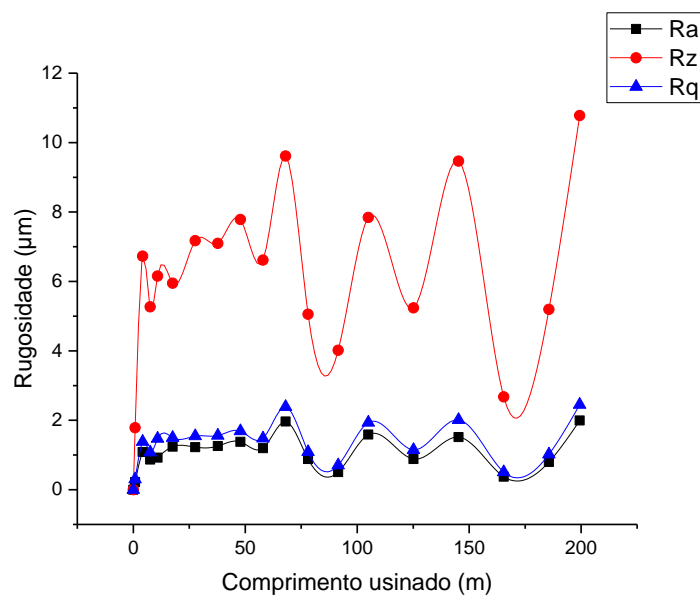


FIGURA 4.20 - Rugosidade em função ao comprimento fresado.

É possível observar que todos os parâmetros de rugosidade avaliados possuem o mesmo comportamento. Há uma estabilidade na rugosidade desde o início do corte com a ferramenta nova até um comprimento usinado próximo de 75 m. A partir desse ponto é perceptível o início da instabilidade no corte, provavelmente devido ao desgaste dos insertos.

Aguiar *et al.* (2013) observou um comportamento similar do parâmetro R_z em relação a vida da ferramenta: houve um aumento da rugosidade em relação ao desgaste da ferramenta e uma grande dispersão no valor de rugosidade à medida que o desgaste da ferramenta progrediu. Os autores analisaram os picos da amplitude na frequência de trabalho e perceberam o desgaste de uma aresta em relação a outra. Como o desgaste é maior em uma aresta do que nas outras, como pode ser visto na curva de vida da ferramenta (FIG. 4.15), uma aresta irá cortar mais material do que as demais. Com isso, os esforços sobre as arestas estão constantemente variando para compensar a retirada irregular de material. Esse fenômeno pode ser justificado como uma instabilidade no corte devido ao desgaste.

Na tentativa de analisar o sinal de vibração de acordo com a progressão do desgaste foram escolhidos três parâmetros estatísticos: RMS (FIG. 4.21 e 4.22), achatamento (curtose) e assimetria (*skewness*), vide FIG. 4.23.

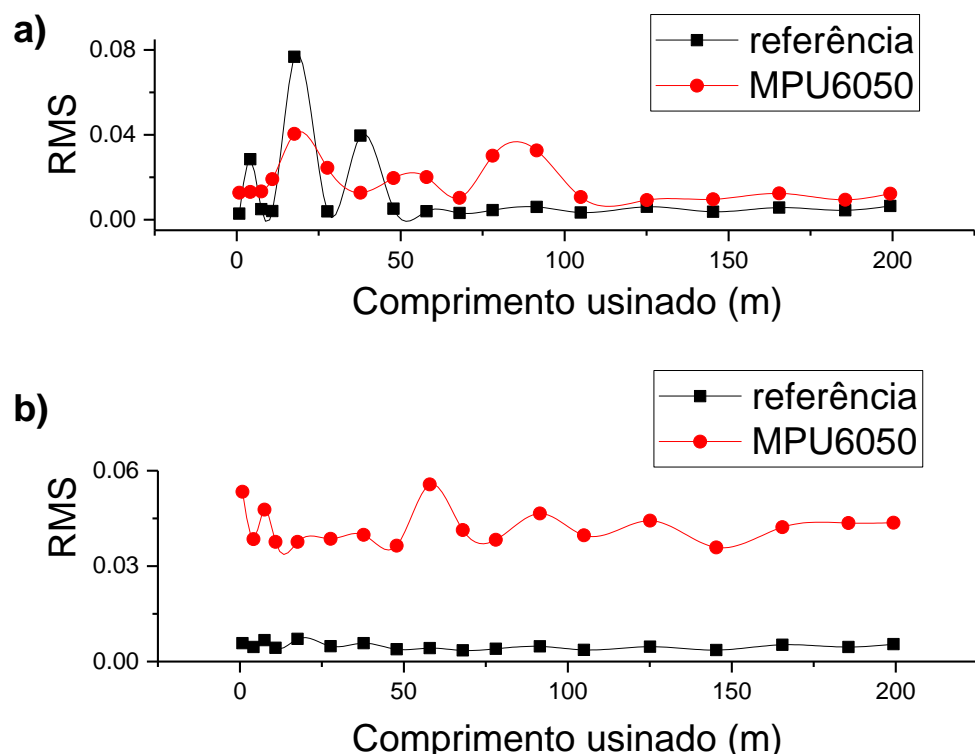


FIGURA 4.21 - Comparação do sinal RMS de vibração entre o acelerômetro de referência e o acelerômetro MPU6050: a) eixo axial e b) eixo radial.

O parâmetro RMS compreende a energia do sinal, sendo denominado de valor eficaz ou valor médio quadrático. De acordo com Vitória (2016), o sinal RMS é um parâmetro crescente em relação ao desgaste, isto é, o RMS geralmente é superior em ferramentas desgastadas e menor em ferramentas novas. A justificativa é a perda da aresta de corte e da superfície de folga principal da ferramenta, o que ocasiona num aumento de forças de usinagem e atrito.

No caso em estudo, os valores RMS de amplitude tanto o acelerômetro MPU6050 como em um acelerômetro de referência não apresentaram valores significativos para tal observação. No entanto, a FIG. 4.22 mostra os valores RMS em relação ao desgaste de flanco máximo.

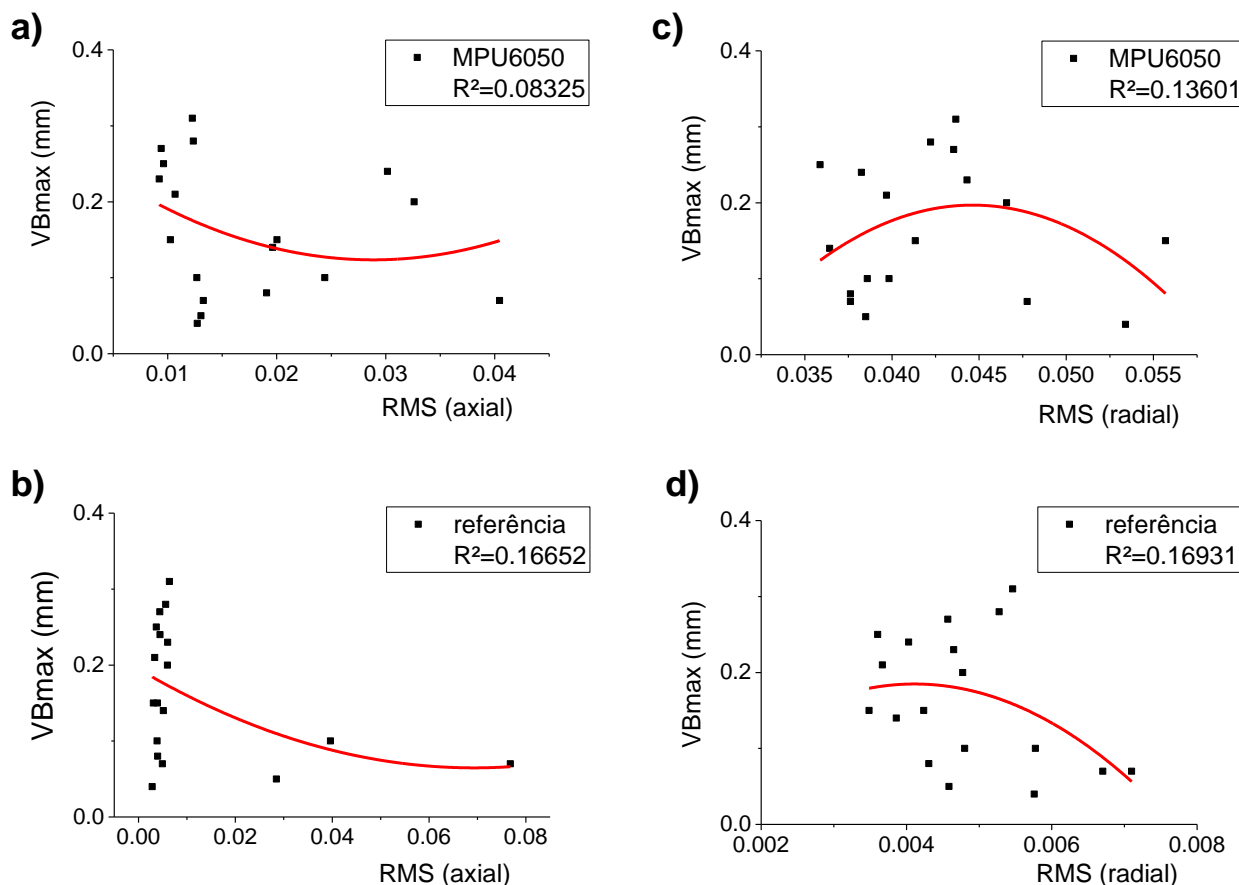


FIGURA 4.22 - Correlação entre RMS da amplitude do sinal de vibração e o desgaste médio para o eixo axial entre a) acelerômetro MPU6050 e b) acelerômetro de referência e para o eixo radial entre c) acelerômetro MPU6050 e d) acelerômetro de referência.

Em geral, pode-se notar que o sinal RMS no eixo axial possui um comportamento decrescente até certo nível de desgaste e um comportamento crescente após esse ponto, o que pode ser compreendido como a perda inicial de material da ferramenta e o consequente decréscimo no corte de material seguido de crescimento do RMS pelo aumento das forças de usinagem e atrito. O comportamento crescente do sinal RMS pode ser visto nos experimentos de Bombonato *et al.*, (2008), que afirma ser normal o valor da correlação ser baixo uma vez que existem inúmeras variáveis envolvidas no processo de usinagem.

Quanto ao comportamento do sinal RMS no eixo radial, este pode estar relacionado apenas a essa primeira fase de perda de material na aresta principal da ferramenta e queda de espessura do cavaco, sendo essa ainda não representativa para um aumento expressivo no atrito e na força de usinagem. Esse fato pode ser embasado nos resultados apresentados por Orhan *et al.*, (2007), no qual é demonstrado que o comportamento da média da amplitude de aceleração da vibração tem uma tendência a aumentar até o desgaste de 220 μm e sofrer uma redução até

o valor de 300 μm . Além do mais, o corte de material com uma ferramenta desgastada pode aumentar a temperatura devido à maior área de contato entre ferramenta e peça resultando em menores esforços de usinagem.

A FIG. 4.23 exibe a comparação dos parâmetros de assimetria e achatamento para os eixos axial e radial.

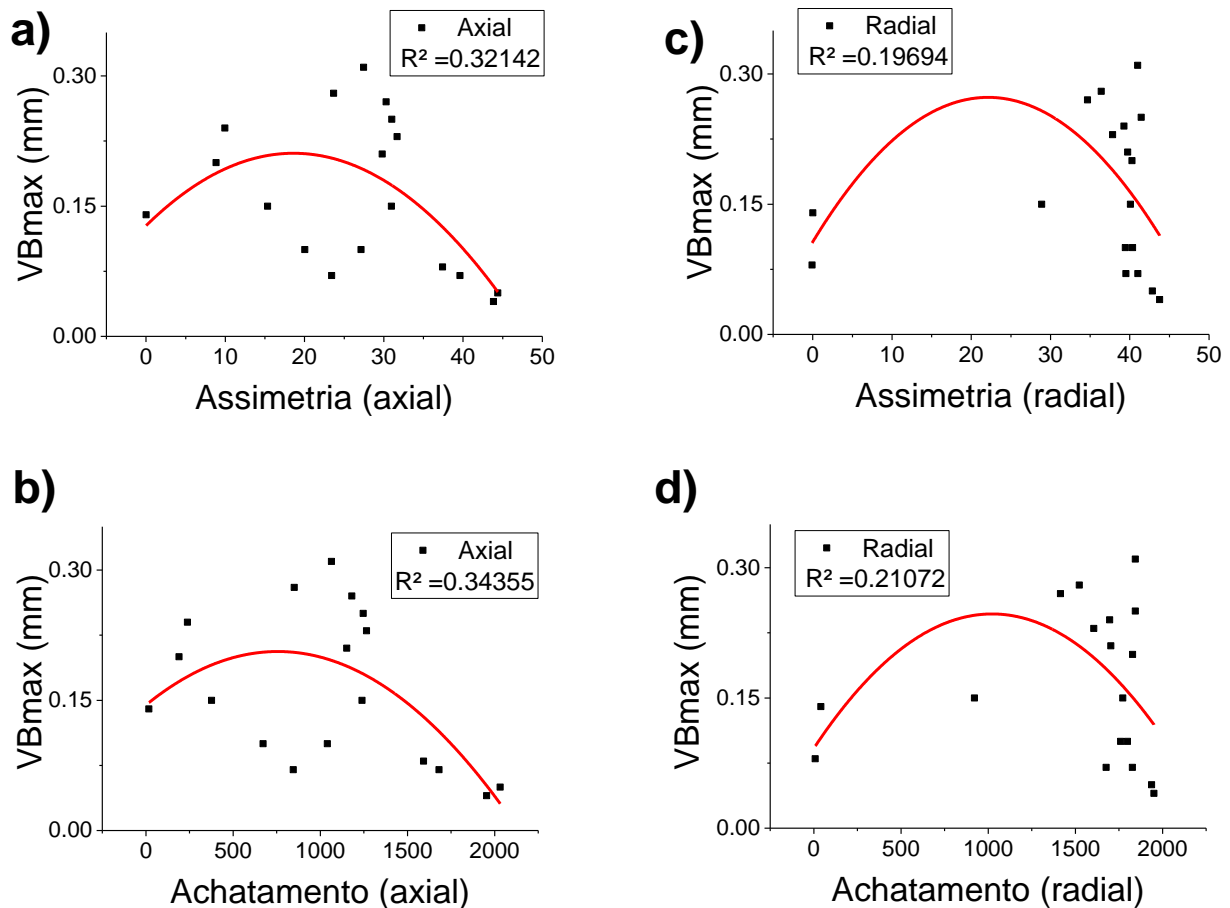


FIGURA 4.23 - Comparação dos parâmetros assimetria e achatamento em relação ao desgaste: a) assimetria no eixo axial, b) achatamento no eixo axial, c) assimetria no eixo radial e d) achatamento no eixo radial.

O parâmetro de assimetria indica a quantidade de pontos acima ou abaixo da média. Em vibração, esse parâmetro pode indicar a predominância de picos ou vales na distribuição do sinal. No caso, as FIG. 4.23a e 4.23c, os valores da amplitude no sinal de vibração aumentam até certo ponto e depois decrescem com o aumento do desgaste de flanco, conforme observado nas FIG. 4.18 e 4.19, portanto o comportamento da assimetria é condizente com o sinal vibracional adquirido.

Baseado nos resultados encontrados por Bombonato *et al.* (2008), conforme o desgaste de flanco aumenta ocorre uma redução nos valores de assimetria, indicando a redução da presença de picos no sinal adquirido. Entretanto, o comportamento da assimetria apresentado pelo autor é decrescente em todo o desgaste observável. Esse fato pode estar relacionado à redução da flutuação da temperatura em relação ao aumento do desgaste de flanco, uma vez que a temperatura se distribui pela ferramenta devido ao aumento do contato da ferramenta com a peça.

Já o parâmetro de achatamento (curtose) indica o grau de achatamento de uma distribuição, sendo que os valores pequenos indicam uma distribuição mais achatada e os valores mais altos uma distribuição mais esbelta. Na vibração, o valor de achatamento pode ser compreendido como a razão entre um pico e o valor médio da amplitude, sendo que quanto maior a razão, maior é o achatamento e considerando o mesmo nível de amplitude, quanto maior o número de picos, menor é o valor do achatamento (EL-WARDANY *et al.*, 1996).

Observando o comportamento do achatamento nos eixos axial e radial (FIG. 4.23b e 4.23d, respectivamente), pode-se dizer que o comportamento é bem similar ao da assimetria, salvo a diferença dos valores, sendo crescente até um certo ponto e decrescente com a progressão do desgaste. De acordo com os resultados obtidos por Vitória (2016), para os valores de achatamento compreendidos na faixa de avaliação de 30 a 700 Hz não se pode correlacionar o comportamento do achatamento em relação ao estado da ferramenta. Entretanto, para a faixa de 30 a 3000 Hz, o valor de achatamento é inferior em ferramentas já desgastadas.

Apesar dos resultados apresentarem um comportamento parecido com o encontrado na bibliografia é difícil afirmar com propriedade que a relação entre os parâmetros RMS, assimetria e achatamento e desgaste pode ser utilizado como um método de monitoramento.

Considerando os trabalhos de Pires (2011) e Maia (2009), as frequências que apontaram a progressão do desgaste da ferramenta foram próximas das frequências naturais do conjunto, na faixa de 300 a 500 Hz, as quais estão acima de frequência máxima apresentada nesse trabalho. Corroborando com a análise de Vitória (2016), a faixa de frequência ideal para avaliar a variação dos parâmetros de corte e o estado da ferramenta no espectro compreende na faixa de 30 a 700 Hz.

O sinal adquirido pelo acelerômetro de referência, exibido na FIG. 4.24, foi sensível às variações no desgaste nas frequências próximas a 500 e a 1500 Hz, corroborando os resultados encontrados por Pires (2011), Maia (2009) e Vitória (2016) e com a simulação apresentada na FIG. 4.9. Ainda, de acordo com Vitória (2016), as frequências sensíveis para o fresamento de desgaste e acabamento se encontram nos múltiplos de 18 e 12 vezes a frequência de trabalho, respectivamente.

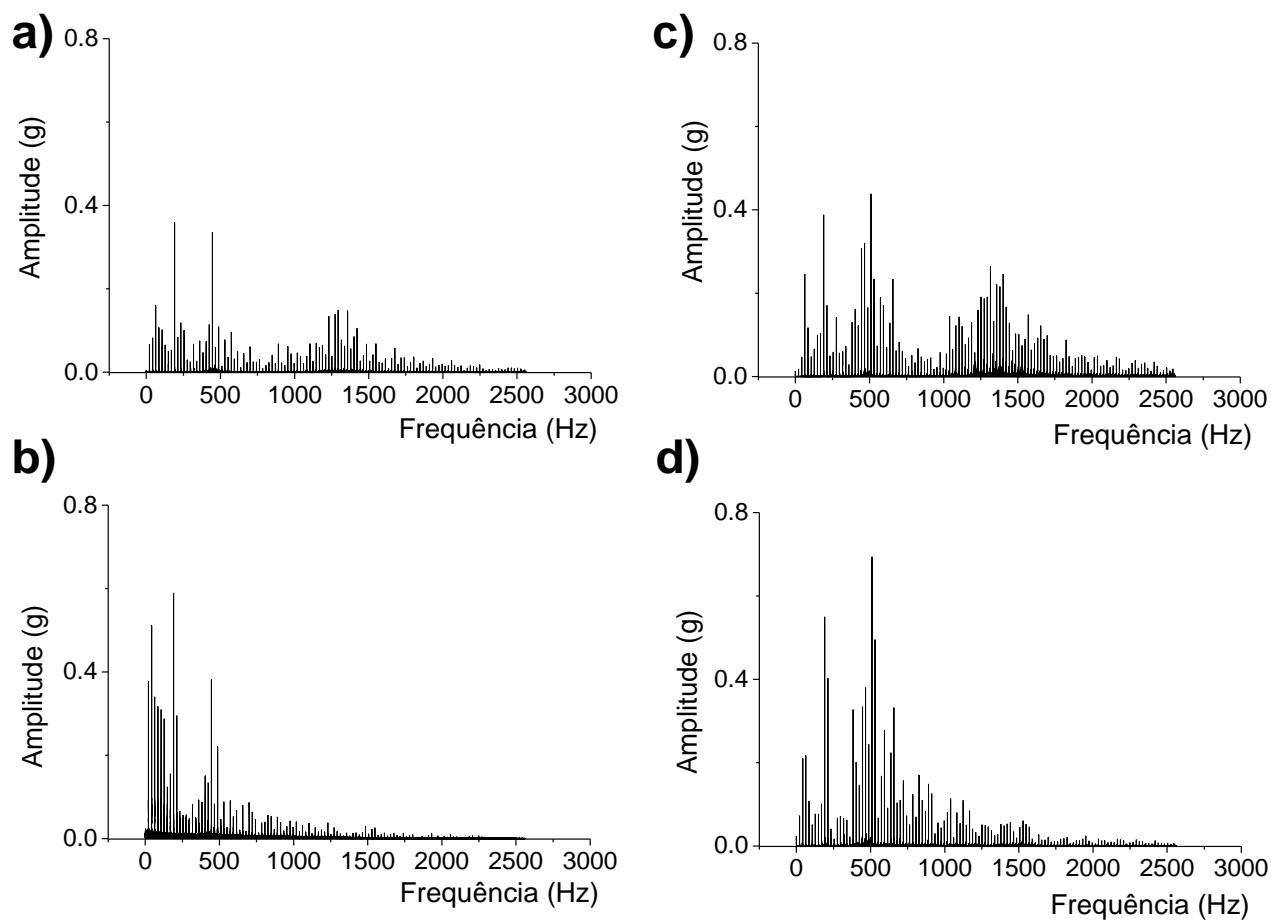


FIGURA 4.24 - Espectro de frequência em relação ao comprimento usinado adquirido no acelerômetro de referência: a) eixo axial em 0,8 m fresado, b) eixo radial em 0,8 m fresado, c) eixo axial em 199,36 m fresados e d) eixo radial em 199,36 m fresados .

5. CONCLUSÃO

Diante os resultados apresentados no presente trabalho, pode-se concluir que:

- A metodologia utilizada na programação do envio dos dados brutos adquiridos pelo acelerômetro para a rede foi fundamental para aumentar a frequência de aquisição, tornando possível o envio dos dados para o servidor local empregando uma rede sem fio. Apesar dos cortes no envio dos dados (*spectral leakage*) ocasionados pelo *buffer*, a funcionalidade do sistema não foi comprometida, já que o sistema respondeu nas mesmas frequências de excitação que o acelerômetro de referência. Entretanto, as altas rotações impossibilitaram a aplicabilidade de um dos eixos, sendo que rotações ainda maiores anulam mais de um eixo, para a forma de fixação utilizada;
- O sistema é sensível à mudança dos parâmetros de corte, especialmente em condições mais severas de corte, sendo que a velocidade de corte e a profundidade de usinagem os parâmetros mais influentes sobre a amplitude de vibração. Embora não tenha sido estatisticamente possível afirmar, o sentido de corte discordante apresentou maiores valores de amplitude vibracional. Contudo, o eixo axial apresentou resultados mais consistentes visto que o eixo radial forneceu ruídos mais intensos devido à troca de referencial causada pela rotação da ferramenta, principalmente nas frequências de trabalho e em seus harmônicos.
- Embora o comportamento dos fatores RMS, *skewness* (assimetria) e curtose (achatamento) seja plausível, não se pode afirmar que o sistema foi sensível ao desgaste da ferramenta. Conforme apresentado pelos espectros obtidos no acelerômetro de referência, os picos de frequência sensíveis a variação

da geometria da ferramenta são melhores representados próximos à 500 e 1500 Hz;

- O comportamento da rugosidade em relação à evolução do desgaste a partir de certo ponto é irregular. Fato possivelmente atribuído à instabilidade no corte ocasionado pelo desgaste na ferramenta e a consequente compensação no corte. Isso ocorre já que tal desgaste não foi uniforme nos três insertos, devido ao batimento radial e axial da ferramenta.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Promover melhorias no desenvolvimento do sistema, ou seja, empregar *threads* no código permitindo o microcontrolador executar várias funções ao mesmo tempo e utilizar banco de dados para aumentar a velocidade de comunicação entre microcontrolador e servidor local.
- Considerando a evolução da *Indústria 4.0* e almejando a implementação do sistema desenvolvido no chão de fábrica, sugere-se a elaboração de um servidor *online* para armazenar os dados em tempo real do sensor e de uma aplicação para acessar esses dados por *smartphones*, pode ser viável não apenas para o monitoramento da qualidade do processo bem como para a escolha da melhor condição de corte visando longevidade da vida da ferramenta e menos paradas da máquina.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT NBR ISO 4288, 2008. *Especificações geométricas de produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil - Regras e procedimentos para avaliação de rugosidade.*, s.l.: s.n.

Aguiar, M. M., Diniz, A. E. & Pederiva, R., 2013. Correlating surface roughness, tool wear and tool vibration in the milling process of hardened steel using long slender tools. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Issue 68, pp. 1 - 10.

Altan, T., Blaine, L. & Yen, Y. C., 1993a. Manufacturing of dies and molds. *CIRP Annals*, pp. 707-716.

Altan, T. et al., 1993b. Advanced techniques for die and mold manufacturing. *CIRP Annals*, pp. 707-716.

Altintas, Y., 2012. *Manufacturing Automation: Metal cutting mechanics, machine tool vibrations, and CNC design.* s.l.:Cambridge University Press.

Antoniali, A. I. S., Diniz, A. & Pederiva, R., 2010. Vibration analysis of cutting force in titanium alloy milling. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, pp. 65-74.

ASM HANDBOOK, 1993. *Properties and Selection: Irons Steels and High Performance Alloys.* s.l.:ASM International.

Astakhov, V. P., 2006. *Tribology of Metal Cutting.* s.l.:Elsevier.

Bauermeister, G., 2017. *Como usar acelerômetro com ESP8266 NodeMCU.* [Online] Available at: <https://www.filipeflop.com/blog/acelerometro-com-esp8266-nodemcu/> [Acesso em 03 2019].

Bombonato, S. G., Lustosa, A. A. & Da Silva, M. B., 2008. Análise do desgaste de ferramentas via emissão acústica com aplicações de redes neurais. *Horizonte Científico*, Volume 2.

Bonifácio, M. R., 1993. *Monitoramento do processo de torneamento de acabamento via sinais de vibração*, Campinas: s.n.

Byrne, G. et al., 1995. Tool condition monitoring - The status of reserch and industrial application. *CIRP Annals*, pp. 541-567.

Caldeirani Filho, J., 1998. *Estudo e monitoramento do processo de fresamento frontal com fresas de insertos intercambiáveis*, Campinas: s.n.

- Carou, D. et al., 2017. Study based on sound monitoring as a means for superficial quality control in intermittent turning of magnesium workpieces. *CIRP ICME*, pp. 262-268.
- Cavichiolli, F., 2017. Desbaste de cavidades. *Revista Ferramental*.
- Che, J. K. & Ratnam, M. M., 2018. Real time monitoring of workpiece diameter during turning by vision method. *Measurement*, pp. 369-377.
- Chen, J., Liu, W., Deng, X. & Wu, S., 2016. Tool life and wear mechanism of WC-5TiC-0.5VC-8Co cemented carbides inserts when machining HT250 gray cast iron. *Ceramics International*, pp. 10037-10044.
- Cheng, K., 2009. *Machining Dynamics: Fundamentals, Applications and Practices*. s.l.:Springer.
- Childs, T., Maekawa, K., Obikawa, T. & Yamane, Y., 2000. *Metal Machining*. s.l.:Arnold Publishers.
- Chinchanikar, S. & Choudhury, S. K., 2015. Machining of hardened steel: Experimental investigations, performance modeling and cooling techniques: A review. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, pp. 95-109.
- Chowdhury, M. S. et al., 2017. Wear behaviour of coated carbide tools during machining of Ti6Al4V aerospace alloy associated with strong built up edge formation. *Surface & Coating Technology*, pp. 319-327.
- Cook, N. H., 1980. Tool wear sensors. *Wear*, pp. 49-57.
- Costa, A. R., 2003. *otimização do processo de fresamento de cavidades com fresas de insertos intercambiáveis*, Campinas: s.n.
- Dang, J. et al., 2019. New observations on wear characteristics of solid Al₂O₃/Si₃N₄ ceramic tool in high speed milling of additive manufactured Ti6Al4V. *Ceramics International*.
- Dan, L. & Mathew, J., 1990. Tool wear and failure monitoring technics for turning - a review. *International Journal of Machining Tools and Manufacture*.
- Deshpande, R. G. & Venugopal, K. A., 2018. Machining with cryogenically treated carbide cutting tool inserts. *Materials Today: Proceedings* , pp. 1872-1878.
- Dewes, R. C. et al., 1999. Temperature measurement when high speed machining hardened mold/die steel. *Journal of Materials Processing Technology*, pp. 293-301.

- Diniz, A. E., Marcondes, F. C. & Coppini, N. L., 2001. *Tecnologia da Usinagem dos Materiais*. São Paulo: Art Lieber.
- Dornfeld, D. & Lee, D.-E., 2008. *Precision Manufacturing*. s.l.:Springer.
- Driemeier, L., Alves, M., Moura, R. T. & Coelho, T. H., 2016. *Análise de sinais*, São Paulo: s.n.
- Durmaz, Y. M. & Yildiz, F., 2019. The wear performance of carbide tools coated with TiAlSiN, AlCrN and TiAlN ceramic films in intelligent machining process. *Ceramics International*, pp. 3839-3848.
- Faria, B., 2017. *Teste de Kruskal-Wallis e Nemenyi*. [Online] Available at: <https://www.abgconsultoria.com.br/blog/teste-de-kruskal-wallis-e-nemenyi/> [Acesso em 12/05/2019 12 2019].
- Ferraresi, D., 1969. *Fundamentos da Usinagem dos Metais*. São Carlos: Editora Edgard Bucher LTDA.
- Giusti, F., Santochi, M. & Tantussi, G., 1987. Online sensing of flank and crater wear of cutting tools. *CIRP Annals*, pp. 41-44.
- Hatna, A., Grieve, R. J. & Broomhead, P., 1998. Automatic CNC milling of pockets: Geometrical and technological issues. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, pp. 309-330.
- Hutchings, I. M., 1992. *Tribology: Friction and wear of engineering materials*. s.l.:Arnold.
- Jain, V. & Pradhan, S., 2019. Vibration monitoring of ball nose end mill tool during milling of sculptured surfaces using MPU6050 sensor. *Materials Today: Proceeding*.
- Jeon, J. U. & Kim, S. W., 1988. Optical flank wear monitoring of cutting tools by image processing. *Wear*, pp. 207-217.
- Junior, A. B., 1998. *Investigação do desgaste de ferramentas de PcBN e Metal Duro no fresamento de topo de aços endurecidos*, São Carlos: s.n.
- Kalvoda, t. & Hwang, Y.-R., 2009. Impact of various ball cutter tool positions on the surface integrity of low carbon steel. *Materials and Design*, pp. 3360-3366.
- Kaneko, K., Nishida, I., Sato, R. & Shirase, K., 2018. Virtual milling force monitoring method based on in-process milling force prediction model to eliminate predetermination of cutting coefficients. *Procedia CIRP*, pp. 22-25.

- Klocke, F., 2010. *Manufacturing Processes I - Cutting*. s.l.:RWTH Aachen.
- Kull Neto, H., 2016. *Estudo das estratégias de usinagem visando a minimização da vibração no fresamento de superfícies convexas*, Campinas: s.n.
- Lima, H. V., Campidelli, A. F. V., Maia, A. T. & Abrão, A. M., 2018. Temperature assessment when milling AISI D2 cold work die steel using tool-chip thermocouple, implanted thermocouple and finite element simulation. *Applied Thermal Engineering*, pp. 532-541.
- Machado, A. R., Abrão, A. M., Coelho, R. T. & Da Silva, M. B., 2009. *Teoria da Usinagem dos Materiais*. Uberlândia: Edgard Blucher LTDA.
- Madhusudana, C. K., Kumar, H. & Narendranath, S., 2018. Fault diagnosis of face milling tool using decision tree and sound signal. *Materials today proceedings*, pp. 12035-12044.
- Maia, L. H. A., 2009. *Influência das condições de corte do fresamento do aço baixa liga ABNT 4140 nos sinais vibracionais e de emissão acústica*, Belo Horizonte: s.n.
- Moura, R. R., 2017. *Usinagem da liga Ti6Al4V com aplicação de lubrificantes sólidos no torneamento*, Uberlândia: s.n.
- Oliveira, A. J., 2007. *Análise dos desgastes de ferramentas no fresamento com alta velocidade de aços endurecidos*, Campinas: s.n.
- Orhan, S., Osman, A., Camuşçu, N. & Aslan, E., 2007. Tool wear evaluation by vibration analysis during end milling of AISI D3 cold work tool steel with 35 HRC hardness. *NDT & E International*, Volume 40, pp. 121 - 126.
- Pigari, A. C., 1995. *Monitoramento do desgaste da ferramenta no processo de torneamento usando emissão acústica*, Campinas: s.n.
- Pires, B. J., 2011. *Estudo das forças, vibrações e desgastes das ferramentas no fresamento da liga de titânio Ti-6Al-4V*, Campinas: s.n.
- Polli, M. L., 2005. *Análise da estabilidade dinâmica do processo de fresamento a altas velocidades de corte*, Florianópolis: s.n.
- Pu, Z. & Singh, A., 2013. High speed ball nose end milling of hardened AISI A2 tool steel with PCBN and coated carbide tools. *Journal of Manufacturing Process*, pp. 467-473.
- Quintana, G. & Ciurana, J., 2011. Chatter in machining processes: A review. *International journal of Machine Tools & Manufacture*, pp. 363-376.

Quintana, G., Ciurana, J., Ferrer, I. & Rodriguez, C. A., 2009. Sound mapping for identification of stability lobe diagrams in milling processes. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, pp. 203-211.

Rajbongshi, S. K., Singh, M. A. & Sarma, D. K., 2018. A comparative study in machining of AISI D2 steel using textured and non-textured coated carbide tool at the flank face. *Journal of Manufacturing Processes*, pp. 360-372.

Rodrigues, A. & Jasinevicius, R., 2018. *Estado de superfície*, s.l.: s.n.

SANDVIK COROMANT, 2019a. *Cutter path and chip formation in milling*. [Online] Available at: <https://www.sandvik.coromant.com/en-gb/knowledge/milling/pages/cutter-path-and-chip-formation.aspx>

[Acesso em 2019].

SANDVIK COROMANT, 2019b. *Desgaste nas arestas de corte*. [Online] Available at: [https://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/materials/cutting_tool_materials/wear_on_cutting_edges/pages/default.aspx?f=](https://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/materials/cutting_tool_materials/wear_on_cutting_edges/pages/default.aspx?f=1)

[1](https://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/materials/cutting_tool_materials/wear_on_cutting_edges/pages/default.aspx?f=1)

[Acesso em 2019].

SANDVIK COROMANT, 2019c. *Fresamento de furos e cavidades/bolsões*. [Online] Available at: <https://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/milling/milling-holes-cavities-pockets/pages/default.aspx>

[Acesso em 2019].

SANDVIK COROMANT, 2019d. *Profile milling*. [Online] Available at: <https://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/milling/pages/profile-milling.aspx>

[Acesso em 2019].

Shaw, M. C., 2005. *Metal cutting principles*. New York: Oxford University Press.

Sória, B. S., 2016. *Estudo do comportamento das vibrações em fresamento frontal do aço inoxidável AISI316 utilizando transformada de wavelet*, Porto Alegre: s.n.

Souto, U. B., 2007. *Monitoramento do desgaste de ferramenta no processo de fresamento via emissão acústica*, Uberlândia: s.n.

Susanto, A. et al., 2018. Application of Hilbert-Huang transform for vibration signal analysis in end-milling. *Precision Engineering*, pp. 263-277.

- Takeyama, H., Doi, Y., Mitsoka, T. & Seriguchi, H., 1967. Sensors of tool life for optimization of machining. *Proceedings of the 8th International MTDR Conference*, pp. 191-208.
- Toenshoff, H. K. & Denkena, B., 2013. *Basics of Cutting and Abrasive Processes*. s.l.:Springer.
- Totis, G. et al., 2010. Development of a dynamometer for measuring individual cutting edges forces in face milling. *Mechanical Systems and Signals Processing*, pp. 1844-1857.
- Trent, E. & Wright, P., 2000. *Metal Cutting*. s.l.:Butterworth Heinemann.
- Tsao, K. C., Husein, A. B. & Wu, S. M., 1968. Cutting tool crater wear measurement by lapping comparator technique. *International Journal of Machining Tool Design and Research*, pp. 15-26.
- Tunc, I. T., 2019. Smart tool path generation for 5-axis ball-end milling of sculptured surfaces using process models. *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, pp. 212-221.
- Tunç, L. T., Ozkirimli, O. m. & Budak, E., 2015. Machining strategy development and parameter selection in 5-axis milling based on process simulation. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, pp. 1483 - 1500.
- Tuner, E., 2018. *Selecting the right milling tool*. [Online] Available at: <https://www.productionmachining.com/articles/high-performance-milling-the-right-tool-for-every-application>
- Uehara, K., 1974. New attempts for short time tool-life testing. *Annals of CIRP*, pp. 23-24.
- Varghese, V., Ramesh, M. R. & Chakradhar, D., 2019. Influence of deep cryogenic treatment on performance of cemented carbide (WC-Co) insertes during dry end milling of maraging steel. *Journal of Manufacturing Processes*, pp. 242-250.
- Vitória, B. R., 2016. *Análise do sinal de vibração no fresamento do aço AISI 4340 com ferramentas desgastadas*, Natal: s.n.
- Wang, B. & Liu, Z., 2016. Cutting performance of solid ceramic end milling tools in machining hardened AISI H13 steel. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, pp. 24-32.
- Wang, B. & Liu, Z., 2016. Cutting performance of solid ceramic end milling tools in machining hardened AISI H13 steel. *International Journal of Refractory Matels and Hard Materials*, pp. 24-32.

Wojciechowski, S. & Twardowski, P., 2012. Tool life and process dynamics in high speed ball end millinf of hardened steel. *Procedia CIRP*, pp. 289-294.

Wojciechowski, S., Wiackiedwicz, M. & Krolczyk, G. M., 2018. Study on metrological relations between instant tool displacements and surface roughness during precise ball end milling. *Measurement*.

Wu, X. & Yin, X., 2018. Suerface roughness analysis and parameter optimizations of mold steel milling. *Procedia CIRP*, pp. 317-321.

Xiong, H., Wu, Y. & Gan, X., 2018. Strengthened Ti(C,N)-based cermets using high-energy ball-milled NiTiC binders: microstructure and mechanical properties. *Ceramics International*, pp. 19113-19122.

Yoshioka, H., Shinno, H., Sawano, H. & Tanigawa, R., 2014. Monitoring of distance between diamond tool edge and workpiece surface in ultraprecision cutting using evanescent light. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, pp. 341-344.

Zhang, Q., Zhang, S. & Li, J., 2017. Three dimensional finite element simulation of cutting forces and cutting temperature in hard milling of AISI H13 steel. *Procedia Manufacturing*, pp. 37-47.

Zonta, A., 2016. *Por que monitorar a usinagem?*. [Online] Available at: <https://omundodausinagem.com.br/porque-monitorar-a-usinagem/> [Acesso em 2019].

APÊNDICES

Apêndice A

```

ESP8266 #include <ESP8266WiFi.h> // biblioteca para usar as funções de Wifi do módulo

#include <Wire.h> // biblioteca de comunicação I2C
#include <ArduinoJson.h> // biblioteca JSON para sistemas embarcados

const int MPU_ADDR = 0x68; // definição do endereço do sensor MPU6050
(0x68)

const int WHO_AM_I = 0x75; // registro de identificação do dispositivo
const int PWR_MGMT_1 = 0x6B; // registro de configuração do gerenciamento
de energia

const int GYRO_CONFIG = 0x1B; // registro de configuração do giroscópio
const int ACCEL_CONFIG = 0x1C; // registro de configuração do acelerômetro
const int ACCEL_XOUT = 0x3B; // registro de leitura do eixo X do acelerômetro

const int sda_pin = D1; // definição do pino I2C SDA
const int scl_pin = D2; // definição do pino I2C SCL

bool led_state = false;

int16_t AcX, AcY, AcZ;

const char* SSID = "awp90m4a1";
const char* PASSWORD = "pedro123";
const char* rpiHost = "192.168.0.102";
const char* IpApiHost = "ip-api.com";

bool resetTemporizador = false;

int qtdVezesLeitura = 0;
typedef struct medicaao {

```

```

int16_t AccX, AccY, AccZ;
unsigned long Time;
};

typedef struct t {
    unsigned long tStart;
    unsigned long tTimeout;
};
//Tasks and their Schedules.
t t_post = {0, 250}; //Run every X S

medicao *vecMedicoes = NULL;

WiFiClient client;

bool tCheck (struct t *t ) {
    if (millis() > t->tStart + t->tTimeout) return true;
    return false;
}

void tRun (struct t *t) {
    t->tStart = millis();
}

void initI2C()
{
    //Serial.println("---inside initI2C");
    Wire.begin(sda_pin, scl_pin);
}

void writeRegMPU(int reg, int val)
{
    Wire.beginTransmission(MPU_ADDR); // inicia comunicação com endereço
do MPU6050
    Wire.write(reg); // envia o registro com o qual se deseja trabalhar

```



```

Wire.write(val);           // escreve o valor no registro
Wire.endTransmission(true); // termina a transmissão
}

uint8_t readRegMPU(uint8_t reg)
{
  uint8_t data;
  Wire.beginTransmission(MPU_ADDR); // inicia comunicação com endereço
do MPU6050
  Wire.write(reg);           // envia o registro com o qual se deseja trabalhar
  Wire.endTransmission(false); // termina transmissão mas continua com I2C
aberto (envia STOP e START)
  Wire.requestFrom(MPU_ADDR, 1); // configura para receber 1 byte do
registro escolhido acima
  data = Wire.read();         // lê o byte e guarda em 'data'
  return data;               //retorna 'data'
}

void findMPU(int mpu_addr)
{
  Wire.beginTransmission(MPU_ADDR);
  int data = Wire.endTransmission(true);

  if (data == 0)
  {
    Serial.print("Dispositivo encontrado no endereço: 0x");
    Serial.println(MPU_ADDR, HEX);
  }
  else
  {
    Serial.println("Dispositivo não encontrado!");
  }
}

void checkMPU(int mpu_addr)
{

```

```

findMPU(MPU_ADDR);

int data = readRegMPU(WHO_AM_I); // Register 117 – Who Am I - 0x75

if (data == 104)
{
    Serial.println("MPU6050 Dispositivo respondeu OK! (104)");

    data = readRegMPU(PWR_MGMT_1); // Register 107 – Power Management 1-
0x6B

    if (data == 64) Serial.println("MPU6050 em modo SLEEP! (64)");
    else Serial.println("MPU6050 em modo ACTIVE!");
}
else Serial.println("Verifique dispositivo - MPU6050 NÃO disponível!");
}

void initMPU()
{
    setSleepOff();
    setGyroScale();
    setAccelScale();
}

void setSleepOff()
{
    writeRegMPU(PWR_MGMT_1, 0); // escreve 0 no registro de gerenciamento de
energia(0x68), colocando o sensor em o modo ACTIVE
}

void setGyroScale()
{
    writeRegMPU(GYRO_CONFIG, 0);
}

/* configurar as escalas do acelerômetro

```

registro da escala do acelerômetro: 0x1C[4:3]

0 é 250°/s

AFS_SEL	Full Scale Range		
0	± 2g	0b00000000	0
1	± 4g	0b00001000	8
2	± 8g	0b00010000	16
3	± 16g	0b00011000	24

*/

```
void setAccelScale()
```

```
{
  writeRegMPU(ACCEL_CONFIG, 0b00010000);
}
```

/* função que lê os dados 'crus'(raw data) do sensor

são 14 bytes no total sendo eles 2 bytes para cada eixo e 2 bytes para temperatura:

0x3B 59 ACCEL_XOUT[15:8]

0x3C 60 ACCEL_XOUT[7:0]

0x3D 61 ACCEL_YOUT[15:8]

0x3E 62 ACCEL_YOUT[7:0]

0x3F 63 ACCEL_ZOUT[15:8]

0x40 64 ACCEL_ZOUT[7:0]

0x41 65 TEMP_OUT[15:8]

0x42 66 TEMP_OUT[7:0]

0x43 67 GYRO_XOUT[15:8]

0x44 68 GYRO_XOUT[7:0]

0x45 69 GYRO_YOUT[15:8]

0x46 70 GYRO_YOUT[7:0]

0x47 71 GYRO_ZOUT[15:8]

0x48 72 GYRO_ZOUT[7:0]

*/

```

void readRawMPU()
{
    Wire.beginTransmission(MPU_ADDR);    // inicia comunicação com endereço
do MPU6050

    Wire.write(ACCEL_XOUT);              // envia o registro com o qual se deseja
trabalhar, começando com registro 0x3B (ACCEL_XOUT_H)

    Wire.endTransmission(false);        // termina transmissão mas continua com
I2C aberto (envia STOP e START)

    Wire.requestFrom(MPU_ADDR, 14);     // configura para receber 14 bytes
começando do registro escolhido acima (0x3B)

    AcX = Wire.read() << 8;            // lê primeiro o byte mais significativo
    AcX |= Wire.read();                 // depois lê o bit menos significativo
    AcY = Wire.read() << 8;
    AcY |= Wire.read();
    AcZ = Wire.read() << 8;
    AcZ |= Wire.read();

    led_state = !led_state;
    digitalWrite(LED_BUILTIN, led_state); // pisca LED do NodeMCU a cada
leitura do sensor
    if (vecMedicoes == NULL) {
        vecMedicoes = (medicao*)malloc(sizeof(medicao));
    } else {
        vecMedicoes = (medicao*)realloc(vecMedicoes, (qtdVezesLeitura + 1) *
sizeof(medicao));
    }

    //Serial.print("AcX = "); Serial.print(AcX);
    //Serial.print(" | AcY = "); Serial.print(AcY);
    //Serial.print(" | AcZ = "); Serial.print(AcZ);
    //Serial.print(" | TIME = "); Serial.print(millis());
    //Serial.print(" | QTD = "); Serial.println(qtdVezesLeitura);
    medicao medicaoStruct = { AcX, AcY, AcZ, millis()};
    vecMedicoes[qtdVezesLeitura] = medicaoStruct;
    qtdVezesLeitura = qtdVezesLeitura + 1;
}

```

```
void reconnectWiFi()
{
  if (WiFi.status() == WL_CONNECTED)
    return;

  WiFi.begin(SSID, PASSWORD);

  while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
    delay(100);
    Serial.print(".");
  }

  Serial.println();
  Serial.print("Conectado com sucesso na rede: ");
  Serial.println(SSID);
  Serial.print("IP obtido: ");
  Serial.println(WiFi.localIP());
}

void initWiFi()
{
  delay(10);
  Serial.print("Conectando-se na rede: ");
  Serial.println(SSID);
  Serial.println("Aguarde");

  reconnectWiFi();
}

void populateJSON(JsonArray& data) {
  qtdVezesLeitura = qtdVezesLeitura + 1;
  int i;
  for (i = 0; i < qtdVezesLeitura - 1; i++) {
    JsonObject &obj = data.createNestedObject();
```

```

obj["AcX"] = vecMedicoes[i].AccX;
obj["AcY"] = vecMedicoes[i].AccY;
obj["AcZ"] = vecMedicoes[i].AccZ;
obj["Time"] = vecMedicoes[i].Time;
}
}

void makePOST(JsonArray& data)
{
if (!client.connect(rpiHost, 3000)) // aqui conectamos ao servidor
{
Serial.println("Não foi possível conectar ao servidor!\n");
}
else
{

// Serial.println("Conectado ao servidor");
// Make HTTP POST request
if (data.measureLength() > 0) {
client.println("POST /accel HTTP/1.1");
client.println("Host: 192.168.0.102");
client.println("Content-Type: application/json");
client.print("Content-Length: ");
client.println(data.measureLength());
client.println(); // enviamos os dados em JSON
//data.printTo(Serial);
data.printTo(client);
free(vecMedicoes);
qtdVezesLeitura = 0;
vecMedicoes = NULL;
resetTemporizador = true;
}
}
}

```

```
void setup() {
  pinMode(LED_BUILTIN, OUTPUT);
  Serial.begin(115200);

  Serial.println("\nIniciando configuração WiFi\n");
  initWiFi();

  Serial.println("\nIniciando configuração do MPU6050\n");
  initI2C();
  initMPU();
  checkMPU(MPU_ADDR);

  Serial.println("\nConfiguração finalizada, iniciando loop\n");
}

void loop() {
  readRawMPU(); // lê os dados do sensor
  resetTemporizador = false;
  if (tCheck(&t_post)) {
    DynamicJsonBuffer jsonBuffer(8000);
    JsonArray& data = jsonBuffer.createArray();
    populateJSON(data); // transforma os dados em formato JSON
    makePOST(data);
    if (resetTemporizador) {
      tRun(&t_post);
    }
  }
}
```

Apêndice B

```
var express = require('express');
var app = express();
var bodyParser = require('body-parser');
var server = require('http').Server(app);
var io = require('socket.io')(server);
var path = require('path');
var os = require('os');

app.use(bodyParser.json())

app.use(express.static(path.join(__dirname, '/public')));

var interfaces = os.networkInterfaces();
var addresses = [];
for (var k in interfaces) {
  for (var k2 in interfaces[k]) {
    var address = interfaces[k][k2];
    if (address.family === 'IPv4' && !address.internal) {
      addresses.push(address.address);
    }
  }
}

var accelData;
var accelX;
var accelY;
var accelZ;
var accelTime;
var fs = require('fs');
var dateTimeStr = new Date().toLocaleString();
  dateTimeStr = dateTimeStr.replace(' ', '-');
  dateTimeStr = dateTimeStr.replace(':', '');

```



```

    dateTimeStr = dateTimeStr.replace(':', '');
var localarquivo = 'medicoes/' + dateTimeStr + '.csv';

server.listen(3000, process.argv[2], function() {
    var host = server.address().address
    var port = server.address().port
    fs.appendFile(localarquivo,'AceleracaoX;AceleracaoY;AceleracaoZ;Tempo \n',
'utf8',

        // callback function
        function(err) {
            if (err) throw err;
            // if no error
            console.log("Data is appended to file successfully.")
        });
    console.log("Server listening on %s:%s...", host, port);
});

app.get('/', function (req, res) {
    res.sendFile(__dirname + '/index.html');
});

app.post('/accel', function(req, res) {

    accelData = req.body;
    console.log(req.body);

    io.emit('accelData', accelData);
    var data = "";

    accelData.forEach( function(item) {
        if(item.AcX != null) {
            accelX = item.AcX;
            accelY = item.AcY;
            accelZ = item.AcZ;

```

```
        accelTime = item.Time;
        data += accelX + ";" + accelY + ";" + accelZ + ";" + accelTime + "\n";
    }
});

// append data to file
fs.appendFile(localarquivo,data, 'utf8',
    // callback function
    function(err) {
        if (err) throw err;
        // if no error
        console.log("Data is appended to file successfully.")
    });
});
```

Apêndice C

Tabela A.1 - Ordem de execução dos testes.

OrdemPad	OrdemEns	TipoPt	Blocos	vc	f	ap
25	1	1	1	150	0.15	0.4
24	2	1	1	150	0.1	1
27	3	1	1	150	0.15	1
14	4	1	1	100	0.1	0.7
5	5	1	1	50	0.1	0.7
6	6	1	1	50	0.1	1
4	7	1	1	50	0.1	0.4
8	8	1	1	50	0.15	0.7
10	9	1	1	100	0.05	0.4
17	10	1	1	100	0.15	0.7
26	11	1	1	150	0.15	0.7
1	12	1	1	50	0.05	0.4
19	13	1	1	150	0.05	0.4
15	14	1	1	100	0.1	1
12	15	1	1	100	0.05	1
9	16	1	1	50	0.15	1
7	17	1	1	50	0.15	0.4
20	18	1	1	150	0.05	0.7
11	19	1	1	100	0.05	0.7
21	20	1	1	150	0.05	1
23	21	1	1	150	0.1	0.7
22	22	1	1	150	0.1	0.4
2	23	1	1	50	0.05	0.7
13	24	1	1	100	0.1	0.4
18	25	1	1	100	0.15	1
3	26	1	1	50	0.05	1
16	27	1	1	100	0.15	0.4
29	28	1	2	50	0.05	0.7
39	29	1	2	100	0.05	1
34	30	1	2	50	0.15	0.4
46	31	1	2	150	0.05	0.4
47	32	1	2	150	0.05	0.7
54	33	1	2	150	0.15	1
45	34	1	2	100	0.15	1
42	35	1	2	100	0.1	1
48	36	1	2	150	0.05	1
44	37	1	2	100	0.15	0.7
41	38	1	2	100	0.1	0.7
36	39	1	2	50	0.15	1
38	40	1	2	100	0.05	0.7
28	41	1	2	50	0.05	0.4
33	42	1	2	50	0.1	1
37	43	1	2	100	0.05	0.4
53	44	1	2	150	0.15	0.7
50	45	1	2	150	0.1	0.7
35	46	1	2	50	0.15	0.7
51	47	1	2	150	0.1	1
52	48	1	2	150	0.15	0.4
40	49	1	2	100	0.1	0.4
49	50	1	2	150	0.1	0.4
32	51	1	2	50	0.1	0.7
31	52	1	2	50	0.1	0.4
30	53	1	2	50	0.05	1
43	54	1	2	100	0.15	0.4

Apêndice D

Tabela A.2 – Desgaste de flanco e rugosidade medidos nas ferramentas e rugosidade após cada passada.

nº Passadas	Comprimento usinado [m]	Desgaste de flanco			Rugosidade média		
		Ferramenta 1	Ferramenta 2	Ferramenta 3	Ra	Rq	Rz
5	0.8	0.05	0.04	0.03	0.218	1.783	0.301
26	4.16	0.05	0.05	0.04	1.086	6.727	1.385
47	7.52	0.07	0.05	0.08	0.868	5.267	1.08
68	10.88	0.07	0.07	0.11	0.925	6.155	1.472
110	17.6	0.08	0.08	0.13	1.241	5.947	1.498
173	27.68	0.08	0.08	0.14	1.226	7.175	1.545
236	37.76	0.1	0.1	0.15	1.257	7.095	1.562
299	47.84	0.11	0.14	0.17	1.38	7.784	1.688
362	57.92	0.13	0.15	0.19	1.196	6.615	1.478
425	68	0.15	0.15	0.19	1.966	9.612	2.389
488	78.08	0.16	0.18	0.2	0.882	5.056	1.089
572	91.52	0.2	0.19	0.22	0.51	4.016	0.707
656	104.96	0.2	0.21	0.23	1.588	7.844	1.934
782	125.12	0.31	0.24	0.23	0.884	5.239	1.148
908	145.28	0.31	0.25	0.25	1.517	9.467	2.013
1034	165.44	0.32	0.26	0.27	0.374	2.676	0.509
1160	185.6	0.33	0.27	0.28	0.799	5.195	1.02
1246	199.36	0.33	0.3	0.31	1.995	10.78	2.449

Apêndice E

Tabela A.3 – Efeitos de significancia de cada fator na resposta em amplitude para o eixo axial em função do p-valor.

WORKSHEET 1

Kruskal-Wallis Test: Ax versus vc

Descriptive Statistics

vc	N	Median	Mean Rank	Z-Value
50	18	0.00550	13.8	-4.54
75	18	0.01905	34.3	2.26
100	18	0.01780	34.4	2.28
Overall	54		27.5	

Test

Null hypothesis H_0 : All medians are equal
 Alternative hypothesis H_1 : At least one median is different

Method	DF	H-Value	P-Value
Not adjusted for ties	2	20.63	0.000
Adjusted for ties	2	20.63	0.000

WORKSHEET 1

Kruskal-Wallis Test: Ax versus ap

Descriptive Statistics

ap	N	Median	Mean Rank	Z-Value
0.4	18	0.00975	21.0	-2.14
0.7	18	0.01175	26.3	-0.41
1.0	18	0.02660	35.2	2.55
Overall	54		27.5	

Test

Null hypothesis H_0 : All medians are equal
 Alternative hypothesis H_1 : At least one median is different

Method	DF	H-Value	P-Value
Not adjusted for ties	2	7.50	0.024
Adjusted for ties	2	7.50	0.024

WORKSHEET 1

Kruskal-Wallis Test: Ax versus f

Descriptive Statistics

f	N	Median	Mean Rank	Z-Value
0.05	18	0.01555	31.1	1.17
0.10	18	0.01050	26.5	-0.32
0.15	18	0.01100	24.9	-0.85
Overall	54		27.5	

Test

Null hypothesis H_0 : All medians are equal
 Alternative hypothesis H_1 : At least one median is different

Method	DF	H-Value	P-Value
Not adjusted for ties	2	1.47	0.479
Adjusted for ties	2	1.47	0.479

WORKSHEET 2

Kruskal-Wallis Test: Ax versus Sentido

Descriptive Statistics

Sentido	N	Median	Mean Rank	Z-Value
concordante	2	0.0273	1.5	-1.55
discordante	2	0.1233	3.5	1.55
Overall	4		2.5	

Test

Null hypothesis H_0 : All medians are equal
 Alternative hypothesis H_1 : At least one median is different

DF	H-Value	P-Value
1	2.40	0.121

The chi-square approximation may not be accurate when some sample sizes are less than 5.

Tabela A.4 – Efeitos de significancia de cada fator na resposta em amplitude para o eixo radial em função do p-valor.

WORKSHEET 1

Kruskal-Wallis Test: Ay versus vc

Descriptive Statistics

vc	N	Median	Mean Rank	Z-Value
50	18	0.01505	16.2	-3.74
75	18	0.02815	26.7	-0.26
100	18	0.07500	39.6	4.00
Overall	54		27.5	

Test

Null hypothesis H_0 : All medians are equalAlternative hypothesis H_1 : At least one median is different

Method	DF	H-Value	P-Value
Not adjusted for ties	2	20.05	0.000
Adjusted for ties	2	20.06	0.000

WORKSHEET 1

Kruskal-Wallis Test: Ay versus ap

Descriptive Statistics

ap	N	Median	Mean Rank	Z-Value
0.4	18	0.01525	17.1	-3.45
0.7	18	0.02815	29.2	0.55
1.0	18	0.06320	36.3	2.90
Overall	54		27.5	

Test

Null hypothesis H_0 : All medians are equalAlternative hypothesis H_1 : At least one median is different

Method	DF	H-Value	P-Value
Not adjusted for ties	2	13.74	0.001
Adjusted for ties	2	13.74	0.001

WORKSHEET 1

Kruskal-Wallis Test: Ay versus f

Descriptive Statistics

f	N	Median	Mean Rank	Z-Value
0.05	18	0.02115	26.1	-0.46
0.10	18	0.03130	27.3	-0.07
0.15	18	0.02305	29.1	0.53
Overall	54		27.5	

Test

Null hypothesis H_0 : All medians are equalAlternative hypothesis H_1 : At least one median is different

Method	DF	H-Value	P-Value
Not adjusted for ties	2	0.33	0.847
Adjusted for ties	2	0.33	0.847

WORKSHEET 2

Kruskal-Wallis Test: Ay versus Sentido

Descriptive Statistics

Sentido	N	Median	Mean Rank	Z-Value
concordante	2	0.09740	1.5	-1.55
discordante	2	0.44495	3.5	1.55
Overall	4		2.5	

Test

Null hypothesis H_0 : All medians are equalAlternative hypothesis H_1 : At least one median is different

DF	H-Value	P-Value
1	2.40	0.121

The chi-square approximation may not be accurate when some sample sizes are less than 5.