



CENTRO UNIVERSITÁRIO SENAI CIMATEC
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO STRICTO SENSU
GESTÃO E TECNOLOGIA INDUSTRIAL

DIEGO URSULINO DOS SANTOS

DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA PARA MEDIÇÃO DE
FORÇAS EM OPERAÇÕES DE MICROFRESAMENTO

Salvador
2017

DIEGO URSULINO DOS SANTOS

DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA PARA MEDIÇÃO DE
FORÇAS EM OPERAÇÕES DE MICROFRESAMENTO

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu da Centro Universitário SENAI CIMATEC como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Gestão e Tecnologia Industrial.

Orientador: Prof. Dr. Guilherme Oliveira de Souza

Salvador
2017

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca do Centro Universitário SENAI CIMATEC

S237d Santos, Diego Ursulino dos

Desenvolvimento de sistema para medição de força em operações de microfresamento / Diego Ursulino dos Santos. – Salvador, 2017.

92 f. : il. color.

Orientador: Prof. Dr. Guilherme Oliveira de Souza.

Dissertação (Mestrado em Gestão e Tecnologia Industrial) – Programa de Pós-Graduação, Centro Universitário SENAI CIMATEC, Salvador, 2017.

Inclui referências.

1. Microusinagem. 2. Microfresamento. 3. Força de usinagem. 4. Dinamômetro. I. Centro Universitário SENAI CIMATEC. II. Souza, Guilherme Oliveira de. III. Título.

CDD: 671.35

DIEGO URSULINO DOS SANTOS

DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA PARA MEDIÇÃO DE FORÇA EM
OPERAÇÕES DE MICROFRESAMENTO

Dissertação apresentada como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Gestão e Tecnologia Industrial, Centro Universitário SENAI CIMATEC.

Banca Examinadora

Guilherme Oliveira de Souza - Orientador _____

Doutor em Engenharia Aeronáutica e Mecânica pelo Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, Brasil

Centro Universitário SENAI CIMATEC

Jacson Machado Nunes _____

Doutor em Engenharia Aeronáutica e Mecânica pelo Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, Brasil

Universidade Federal do Recôncavo da Bahia

Charles Chemale Yurgel _____

Doutor em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil

Centro Universitário SENAI CIMATEC

Dedico este trabalho a minha família e
ao SENAI Alagoas pelo apoio.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, gostaria de aproveitar esta oportunidade para expressar a minha gratidão ao SENAI Alagoas, pela oportunidade e confiança.

Aos profissionais do SENAI CIMATEC e da banca examinadora que contribuíram para a minha formação no programa e para o desenvolvimento deste trabalho. Em especial ao meu orientador Professor Doutor Guilherme Oliveira de Souza, pelo seu apoio científico, além de seu precioso aconselhamento e encorajamento. Ainda, estendo meus agradecimentos aos alunos do CIMATEC, George Menezes, Nailson Sobrinho, Bruno Souza, Valter Moura Neto, Arthur Xavier e Bruno Guatieri, pelas contribuições significativas na concepção do conceito, como também nas montagens e execuções de experimentos.

Aos amigos e colegas do SENAI Alagoas, pelas parcerias ao longo desse programa de Mestrado.

Sou grato, também, pela família maravilhosa que tenho, que compreende a minha ausência, sempre me incentivam e me proporcionam um ambiente favorável para o meu crescimento pessoal e profissional. Destaco meus agradecimentos ao meu irmão que sempre está comigo em meus projetos e neste atuou como um verdadeiro consultor de eletrônica.

RESUMO

O conhecimento das forças envolvidas nos processos de usinagem é de fundamental importância para o controle tecnológico destes processos. A intensidade das forças advindas das interações mecânicas da ferramenta com a peça na formação dos cavacos tem impactos em características operacionais, como determinação de dispositivos de fixação, adequação de capacidade dinâmica e de potência de máquina, integridade e longevidade de ferramenta e qualidade de peça. De modo que ser capaz de medir forças em processos de microfresamento pode ser útil tanto para objetivos de pesquisa e desenvolvimento, como também para acompanhamento de processo. Porém, a quantificação dessas forças é dificultada pelas proporções micrométricas do fenômeno de remoção de cavaco. O objetivo deste trabalho é expor as etapas do desenvolvimento de um sistema para realizar medições qualitativas das forças de operações de microfresamento. O trabalho contemplou uma revisão teórica a respeito de microfresamento, forças de microfresamento e sistemas de medição de forças de microusinagem; uma etapa de experimentos exploratórios para avaliar as capacidades de precisão e confiabilidade metrológicas de sensores, onde os sensores piezoelétricos em cápsulas foram selecionados; e uma etapa de experimentos para validação do conceito do Sistema de Medição desenvolvido, através do monitoramento da usinagem de canais com parâmetros velocidade de corte, profundidade de corte e avanço por dente controlados e relacionados entre si. Os resultados foram obtidos através de gráficos dos sinais no domínio do tempo e no domínio da frequência. Contudo, foi evidenciado que o Sistema detém capacidade de detecção dos sinais do fenômeno, desde que haja o devido tratamento dos sinais, uma vez que há incidência gritante de ruídos em outras frequências maiores. Entretanto, ainda carece de maiores detalhamentos e experimentos, utilizando sensores de cristais nobres, servindo de base para o desenvolvimento de um sistema de medição de forças confiável para fins de pesquisa científico-acadêmica.

Palavras-chave: microusinagem, microfresamento, forças de usinagem, dinamômetro.

ABSTRACT

The knowledge of the forces involved in the machining processes is of fundamental importance for the technological control of these processes. The strength of the forces resulting from the mechanical interactions of the tool with the workpiece in the formation of the chips has impacts on operational characteristics such as determination of fastening devices, suitability of dynamic capacity and machine power, tool integrity and longevity, and workpiece quality. So being able to measure forces in micromilling processes can be useful for both research and development purposes as well as process monitoring. However, the quantification of these forces is hampered by the micrometric proportions of the chip removal phenomenon. The objective of this work is to outline the steps of the development of a system to perform qualitative measurements of the forces of micromilling operations. The work contemplated a theoretical revision regarding micromilling, micromilling forces and micro-force force measurement systems; a step of exploratory experiments to evaluate the metrological precision and reliability capabilities of sensors, where piezoelectric sensors in capsules were selected; and a stage of experiments to validate the concept of the Measurement System developed, by monitoring the machining of channels with parameters of cutting speed, depth of cut and feed per tooth controlled and related to each other. The results were obtained by graphing the signals in the time domain and in the frequency domain. However, it was evidenced that the System has the capacity to detect the signs of the phenomenon, as long as there is due treatment of the signals, since there is a striking incidence of noise in other higher frequencies. However, it still lacks further details and experiments, using noble crystal sensors, serving as the basis for the development of a reliable force measurement system for scientific-academic research purposes.

Keywords: micromachining, micromilling, machining forces, dynamometer.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparação do desempenho típico do material de ferramenta.....	21
Tabela 2 – Principais defeitos de superfície em peças microusinadas.	28
Tabela 3 – Comparação de previsão obtida por meio de modelo analítico com medição experimental.	34
Tabela 4 – Relação de valores de força de usinagem máximos medidos em algumas pesquisas.	39
Tabela 5 – Matriz de condições experimentais para seleção do sensor	52
Tabela 6 – Matriz de condições experimentais para usinagem dos canais.....	60
Tabela 7 – Parâmetros utilizados para cálculos dos tempos amostrais	62
Tabela 8 – Resultados das condições experimentais da seleção do sensor	64
Tabela 9 – Resultados das intensidades de sinal nas frequências de excitação das condições experimentais.....	75

LISTAS DE FIGURAS

Figura 1 – Fresa de topo reto de 6 mm (6000 μm) de diâmetro e microfresa de 400 μm de diâmetro.	18
Figura 2 – Exemplos de micro características de alta qualidade e/ou complexidade.	19
Figura 3 – Raiz do cavaco para um corte em escala convencional (a) e microescala (b).....	23
Figura 4 – Formação de cavacos em relação à espessura mínima de usinagem em microusinagem.....	24
Figura 5 – Amassamento devido ao raio da aresta de corte no microfresamento.....	25
Figura 6 – Microestrutura do aço carbono com tamanho normal de grão, à esquerda; microestrutura do mesmo material com grão ultrafino, à direita.....	26
Figura 7 – Formação de rebarbas (a) rebarbas de saída e laterais no corte ortogonal; (b) rebarbas superiores e de saída no microfresamento.....	30
Figura 8 – Principais componentes da força de usinagem no processo de fresamento.	31
Figura 9 – Influência da geometria da ferramenta na distribuição de forças.	33
Figura 10 – Componentes e esquema de montagem de um sistema para medição de forças.	38
Figura 11 – Modelos de dispositivos para medição de forças de usinagem da empresa <i>Kistler</i>	41
Figura 12 – Modelos de dispositivos para medição de forças da <i>HBM</i>	43
Figura 13 – Módulos funcionais de um sistema de medição.....	44
Figura 14 – Geometria das peças principais do protótipo do sistema de medição de forças.	45
Figura 15 – Configuração dos sensores e batentes montados.	46
Figura 16 – Circuito amplificador para dois sensores.....	47

Figura 17 – Dispositivos para aquisição de dados (NI 9172 e NI 9201).....	48
Figura 18 – Tela do dispositivo mostrador/registrador	49
Figura 19 – Bancada experimental do experimento de seleção do sensor.....	50
Figura 20 – Esquema do circuito eletrônico microcontrolado	51
Figura 21 – Sensores	56
Figura 22 – Exemplo de frame	57
Figura 23 – Configuração da montagem experimental de validação de conceito.	58
Figura 24 – Exemplo de gráfico do espectro de frequências de sinais.	61
Figura 25 – Exemplo de espectrograma de frequência de sinais.....	63
Figura 26 – Relação entre velocidade e valor de sinais.....	65
Figura 27 – Amplitude entre picos dos sinais nas mesmas condições.....	66
Figura 28 – Repetibilidade de diferentes sensores nas mesmas condições	67
Figura 29 – Coeficiente de variação de diferentes sensores nas mesmas condições	67
Figura 30 – Comparação entre ciclos diferentes nas mesmas condições.....	68
Figura 31 – Integridade do sinal de diferentes sensores nas mesmas condições.....	69
Figura 32 – Percentual em que há contato entre sensor e atuador no ciclo.	71
Figura 33 – Comportamento do sinal de um sensor, antes, durante e depois do corte.	72
Figura 34 – Sinal parcial de um sensor, sem e com a ocorrência de corte.....	73
Figura 35 – Amostra parcial do sinal de um sensor equivalente a 12 rotações da fresa.....	74
Figura 36 – Gráfico dos espectros de frequências de sinais da condição experimental 1.....	76
Figura 37 – Gráfico dos espectros de frequências de sinais da condição experimental 2.....	77
Figura 38 – Gráfico dos espectros de frequências de sinais da condição experimental 3.....	78

Figura 39 – Gráfico dos espectros de frequências de sinais da condição experimental 4.....	78
Figura 40 – Gráfico dos espectros de frequências de sinais da condição experimental 5.....	79
Figura 41 – Gráfico dos espectros de frequências de sinais da condição experimental 6.....	80
Figura 42 – Gráfico dos espectros de frequências de sinais da condição experimental 7.....	80
Figura 43 – Gráfico dos espectros de frequências de sinais da condição experimental 8.....	81
Figura 44 – Intensidade de sinal (dB) em função da variação de a_p	82
Figura 45 – Intensidade de sinal (dB) em função da variação do f_z	83
Figura 46 – Intensidade de sinal (dB) em função da variação da v_c	84

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

SENAI	Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial
CBN	Nitreto de Boro Cúbico (Cubic Boron Nitride)
r_e	Raio da aresta de corte
MQL	Mínima Quantidade de Lubrificante
μm	Micrometro
a_e	Penetração de trabalho
ANOVA	Análise de variância
a_p	Profundidade de corte
b	Largura de corte
CAD	Projeto Auxiliado por Computador
CNC	Comando Numérico Computadorizado
D	Diâmetro da fresa
f	Avanço
F_{ap}	Força de apoio
F_c	Força de corte
F_f	Força de avanço
F_p	Força passiva
F_R	Força resultante
F_u	Força de usinagem
F_x	Força ao longo do eixo x do dinamômetro
F_y	Força ao longo do eixo y do dinamômetro
f_z	Avanço por dente
F_z	Força ao longo do eixo z do dinamômetro
h	Espessura de corte
h_c	Espessura mínima do cavaco
h_{min}	Espessura mínima de corte
H_z	Hertz
kHz	Quilo Hertz

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 Problema	16
1.2 Justificativa	16
1.3 Objetivos	16
1.4 Estrutura do Trabalho	17
2 REFERENCIAL TEÓRICO	18
2.1 Microfresamento	18
2.1.1 Ferramentas de corte	20
2.1.2 Efeito de escala	22
2.1.3 Amassamento	24
2.1.4 Material da peça	25
2.1.5 Condições de processo	27
2.1.6 Integridade de superfície	27
2.2 Forças de usinagem	30
2.2.1 Modelos de previsão de forças	35
2.2.2 Métodos de medição de forças	38
3 DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO	44
3.1.1 Transdutor	44
3.1.2 Aquisição e tratamento de sinais	47
3.1.3 Dispositivo mostrador e registrador	49
4 MATERIAIS E MÉTODOS	50
4.1 Experimento de seleção do sensor	50
4.1.1 Planejamento experimental	52
4.1.2 Sensores e equipamentos	55
4.2 Análise de tempo de recuperação	56
4.3 Experimento de validação do conceito	57
4.3.1 Aparato experimental	58
4.3.2 Planejamento experimental	59
4.3.3 Procedimento de análise de dados	60
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	64

5.1 Seleção do elemento sensor	64
5.2 Tempo de recuperação da cápsula piezoelétrica	70
5.3 Validação do protótipo do conceito.....	72
5.3.1 <i>Resultados das análises no domínio da frequência</i>	75
5.3.2 <i>Análise da influência da variação dos parâmetros de usinagem</i>	81
5.3.3 <i>Considerações acerca da validação do conceito</i>	84
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	86
6.1 Trabalhos futuros.....	87
REFERÊNCIAS.....	88

1 INTRODUÇÃO

Com a evolução da manufatura, apresenta-se cada vez mais uma crescente demanda por componentes miniaturizados de qualidade, no entanto, para fabricar componentes cada vez menores se faz necessário o conhecimento mais aprofundado dos processos de fabricação, o que serve de incentivo para que hajam mais trabalhos científicos direcionados ao desenvolvimento tecnológico do campo da microfabricação. Dentre as diversas modalidades de fabricação de micropeças, o microfresamento se destaca por viabilizar a usinagem de geometrias simples ou complexas numa variada gama de materiais. Entretanto, existe grande dificuldade em se adaptar todo o conhecimento do fresamento em escala convencional para a microescala, onde é notório que na escala micro existem fenômenos que devem ser levados em consideração por interferirem diretamente no processo e na qualidade do produto fabricado por usinagem. As forças de usinagem, são exemplos de fenômenos que possuem influência significativa na microusinagem mecânica realizada através de corte. Tais forças são originadas de interações da ferramenta com a peça no fenômeno de formação dos cavacos, e influenciam na vida útil da ferramenta, requisitos de qualidade da peça usinada, características de dispositivos de fixação e máquinas, dentre outros. No processo de microfresamento, há ainda mais importância, uma vez que a resistência das ferramentas é menor, devido aos pequenos diâmetros envolvidos, o que faz com que haja um maior risco de quebra. Isto se torna um inconveniente porque essa quebra pode ser imperceptível, já que o operador não consegue identificar este tipo de ocorrência apenas observando o processo do lado de fora da máquina e a variação do nível de ruído de processo também não é significativa a ponto de ser audível. Neste tipo de situação, uma operação pode prosseguir por muito tempo sem que o operador perceba que o corte não está ocorrendo. Desta maneira, o conhecimento forças em processos de microfresamento agrega valores tanto para pesquisa e desenvolvimento científico, como para supervisão simultânea de operações de cortes. As forças de usinagem podem ser quantificadas através de diversos meios, sendo as medições efetuadas por sistemas de medição, o meio mais eficaz.

1.1 Problema

Como realizar análises comparativas de forças de microfresamento utilizando aparatos tecnológicos de baixo custo e fácil aquisição?

1.2 Justificativa

A força resultante do corte pela microfresa no microfresamento é um fenômeno que se destaca por estar diretamente relacionada à qualidade da peça usinada, vida útil das ferramentas utilizadas, bem como eficiência da produção. Deste modo, a avaliação e o controle da força exercida pela ferramenta junto à peça, aliado com outros fatores, pode influenciar nos resultados dos processos. A quantificação das forças de usinagem pode ser efetivada por meio de modelagem matemática ou por intermédio de **medições diretas ou indiretas**. Os procedimentos de medição apresentam elevados níveis de dificuldade, pela complexidade do processo de microfresamento e também pelas proporções micrométricas do fenômeno, que levam a forças de magnitude significativamente menores comparadas àquelas medidas em processos de usinagem convencionais. Para tanto é necessário o uso de aparatos tecnológicos que permitam a quantificação das forças de usinagem através de medição, considerando que tais ferramentas não interfiram no andamento normal do processo de microfresamento. As soluções comerciais existentes no mercado atual para medição e análise das condições de forças de usinagem nos processos de microfresamento se posicionam num elevado patamar de dificuldade de acesso, uma vez que seus custos são altíssimos e não existe fabricação nacional deste tipo de tecnologia.

1.3 Objetivos

O objetivo geral é desenvolver uma solução de baixo custo, utilizando sensores de força eletromecânicos, para a medição de forças de microfresamento que permita análises comparativas quantitativas. A partir dos seguintes objetivos específicos:

- Selecionar um tipo de sensor de força eletromecânico por meio de análise e comparação da capacidade e do comportamento do sinal elétrico de sensores de força comercialmente disponíveis de baixo custo;
- Propor um sistema de medição de forças em operações de microfresamento utilizando exemplares do sensor de força selecionado dispostos de maneira

a permitir medição de forças em três direções mutuamente ortogonais entre si;

- Fabricar um protótipo do sistema proposto e realizar ensaios de validação de conceito.

1.4 Estrutura do Trabalho

Este trabalho está estruturado da seguinte maneira: no capítulo 1, é apresentada a Introdução onde são exibidos o problema da pesquisa, sua justificativa e os objetivos traçados para o projeto; no capítulo 2 são expostos os referenciais teóricos utilizados para embasar a pesquisa, apresentando conceitos importantes para alcançar os objetivos delineados; o capítulo 3 apresenta os detalhes do desenvolvimento do Sistema de Medição bem como a descrição das partes que o compõem; no capítulo 4, são detalhados os métodos experimentais empregados no desenvolvimento do trabalho com as etapas, técnicas e ferramentas utilizadas no percurso; o capítulo 5 apresenta e analisa os resultados obtidos com os experimentos utilizados na pesquisa; no capítulo 6 e último, são apresentadas as considerações finais com sugestão de trabalhos futuros e as limitações encontradas no desenvolvimento desta pesquisa.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Nesta sessão do trabalho são apresentados os principais temas que norteiam o desenvolvimento da pesquisa. Primeiro, são apresentados alguns dos principais conceitos acerca de microfresamento, bem como características peculiares do processo, com o objetivo de evidenciar a importância deste processo de fabricação e suas particularidades. Em seguida são expostos os conceitos de força de usinagem e métodos utilizados para quantificação dessas forças, alguns métodos são de modelagem para calcular e prever o comportamento das forças e outros métodos são práticos aplicando-se medições que exprimem o comportamento real das forças num processo de microfresamento.

2.1 Microfresamento

Para Dib (2013), a microusinagem mecânica, realizada através do corte, se refere à usinagem com dimensões em escala reduzida, tomando-se como base as dimensões da ferramenta de corte utilizada, que possuem diâmetros de no máximo 1000 micrômetros. No entanto, considera-se como aspecto mais relevante as questões relacionadas a ordem de grandeza da espessura de corte, tamanho e orientação do grão do material, que frequentemente são da mesma ordem do raio da ponta da ferramenta. A figura 1 serve como exemplo para comparação entre uma fresa de topo reto utilizada num processo convencional e uma ferramenta similar utilizada em um processo de microfresamento, cujas dimensões são bem inferiores.

Figura 1 – Fresa de topo reto de 6 mm (6000 μm) de diâmetro e microfresa de 400 μm de diâmetro.

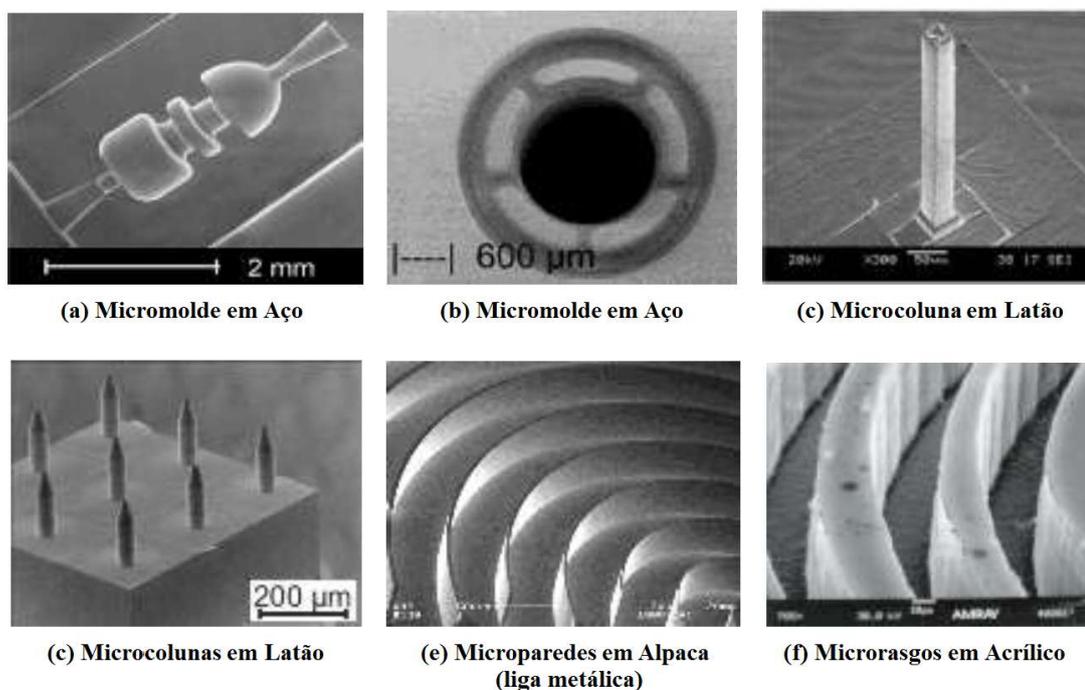


Fonte: Autoria própria.

Conforme Picarelli (2015), os processos utilizados para a microusinagem são baseados em ferramentas de corte sólidas, bem como em processos que utilizam feixes de energia (laser, elétrons e íons) para remoção de materiais. Entretanto, o uso de feixes possui limitações como a baixa taxa de remoção de material e o baixo controle da estrutura tridimensional, sem falar que é necessário estruturar um ambiente com condições suficientemente propícias para garantir o controle e a segurança adequados ao processo. Ao passo que a utilização de ferramentas inteiriças de corte pode superar algumas dessas limitações, com o emprego de máquinas de alta precisão que realizam operações de furação, torneamento, fresamento, retificação, entre outras.

Portanto, para Rahman et al. (2010 apud PICARELLI, 2015), a microusinagem baseada em operações convencionais de remoção de material se posiciona num patamar diferenciado em relação às outras tecnologias, devido também à vasta possibilidade de materiais usináveis e o alto grau de complexidade das estruturas tridimensionais que podem ser confeccionadas. A figura 2 apresenta alguns exemplos de características complexas de alta qualidade confeccionadas por microfresamento nos mais diversos materiais.

Figura 2 – Exemplos de micro características de alta qualidade e/ou complexidade.



Fonte: Adaptado de Wu, 2012.

Wu (2012) destaca que o processo de microfresamento possui diversas características vantajosas, tais como flexibilidade, rentabilidade, repetibilidade e alta precisão de forma, além de ser um dos principais meios para se obterem peças tridimensionais reais nos tamanhos de lotes pequenos e médios. Destaca ainda, que este processo é utilizado em um número de aplicações importantes em inúmeras áreas, incluindo:

- Medicina: implantes dentários, pontes, próteses de quadril, placas e parafusos ósseos, gancho espinhal, pinças e tesouras cirúrgicas, micromecanismos de bombeamento, etc.
- Relojoaria: carcaças de relógios de precisão, peças de relógio de pulso, engrenagens, eletrodos, mostrador, etc.
- Eletrônica: micromoldes para conectores, dispositivos eletrônicos em miniatura, microsensores, chips de identificação de radiofrequência, etc.
- Óptica: matrizes de microlentes, dispositivos ópticos, etc.
- Aeroespacial: molde para engrenagens planetárias, dispositivos em miniatura para foguetes, microcomponentes de giroscópio, microválvulas e servodispositivos, etc.
- Outras: moldes para anéis e pingentes, componentes para dispositivos de medição, bicos de injeção, eletrodos para insertos de corte, etc.

Em suma, potenciais aplicações industriais, bem como capacidades de processo vantajosas, fazem com que o processo de microfresamento seja cada vez mais promissor e, conseqüentemente, tenha recebido um interesse generalizado em aprimorar o entendimento científico da tecnologia.

2.1.1 Ferramentas de corte

Para Wu (2012), os materiais de ferramenta, revestimentos, juntamente com geometrias de ferramenta de corte são os fatores mais importantes que determinam o desempenho eficaz de uma fresa. Muitos tipos de materiais, como aço rápido, metal duro, cerâmica, nitreto de boro cúbico (CBN) e diamante podem ser usados para fabricar ferramentas de corte que podem ser usadas no microfresamento. Entretanto, geralmente, nenhum desses materiais tem excelentes propriedades em

todos os aspectos demandados. Por exemplo, enquanto o aço rápido possui alta tenacidade, ao mesmo tempo possui baixa resistência ao desgaste. Para efeitos de comparação, pode-se verificar a tabela 1, onde são mostrados alguns materiais típicos para ferramentas de microusinagem e suas características de desempenho.

Tabela 1 – Comparação do desempenho típico do material de ferramenta.

	Dureza a quente	Tenacidade	Resistência ao desgaste	Resistência ao choque térmico	Velocidade de corte	Qualidade de Superfície	Custo
Aço Rápido	Baixa	Alta	Baixa	Alta	Baixa	Baixa	Baixo
Metal Duro	↓	↑	↓	↑	↓	↓	↓
Cerâmica	↓	↑	↓	↑	↓	↓	↓
CBN	↓	↑	↓	↑	↓	↓	↓
Diamante	Alta	Baixa	Alta	Baixa	Alta	Alta	Alto

Fonte: Adaptado de Childs et al., 2000.

As ferramentas de metal duro podem ser empregadas na usinagem de quase todos os materiais de engenharia, mas sofrem de desgaste severo no caso de cortar materiais de elevada dureza. No entanto, as técnicas de revestimento são utilizadas para prolongar a vida da ferramenta e melhorar seu desempenho. Embora os revestimentos mais comuns para microferramentas sejam baseados em titânio, os revestimentos de diamante para microfresamento são vantajosos e promissores porque são capazes de reduzir ou eliminar a aderência do material de trabalho à superfície da ferramenta, reduzir o desgaste da ferramenta devido à alta dureza e reduzir as forças de corte devido aos baixos coeficientes de atrito contra muitos materiais (HEANEY et al., 2008).

De acordo com Picarelli (2015), as geometrias e formas típicas das microferramentas são diretamente reduzidas das ferramentas convencionais devido à similaridade do seu processo de corte. Entretanto, sendo as microferramentas geometricamente referidas como ferramentas com diâmetro de corte menor do que

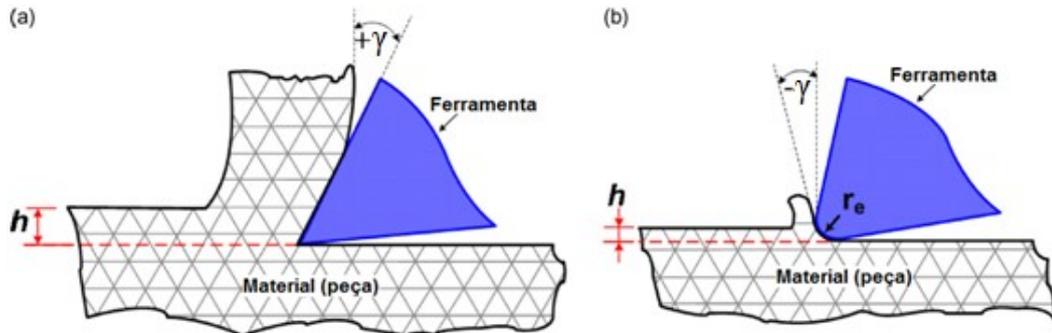
um milímetro, as tolerâncias no diâmetro e no raio de aresta da microfresa não permitiam que fossem mantidas condições de corte constantes para os avanços de apenas alguns micrômetros. Sem contar que, em alguns casos, apenas uma das arestas da ferramenta realiza efetivamente o corte. Como consequência surgem aumentos de desgaste, das forças de corte envolvidas, da probabilidade de quebra das ferramentas, como também redução da qualidade superficial da peça usinada.

Fleischer et al. (2008), argumentam que o projeto geométrico das ferramentas de microfresamento foi adotado a partir de ferramentas com dimensões convencionais, assumindo que os efeitos durante o processo de fresamento são idênticos. Porém, a experiência demonstrou que as microferramentas respondem às influências de uma maneira muito diferente das ferramentas convencionais. Portanto, se faz necessário um aprofundamento para alcançar uma compreensão abrangente de todo o processo, com o objetivo de otimizar as tecnologias de corte para microferramentas de usinagem.

2.1.2 Efeito de escala

A característica dos processos de microusinagem conhecida como efeito de escala se refere ao fato de que o raio de aresta das ferramentas de corte não se reduz na mesma proporção (escala) que as grandezas de penetração, principalmente, a espessura de usinagem (h), que pode atingir a mesma ordem de grandeza do raio de aresta da ferramenta (DORNFELD et al., 2006; OLIVEIRA, 2012; BODZIAK, 2011; ARAMCHAROEN; MATIVENGA, 2009). Observa-se na figura 3, que na microusinagem (b), a espessura de material a ser removida é bem menor em relação à usinagem convencional (a), desta forma a relação entre o raio da aresta de corte e a espessura de usinagem influencia significativamente os resultados do processo (OLIVEIRA, 2012).

Figura 3 – Raiz do cavaco para um corte em escala convencional (a) e microescala (b).

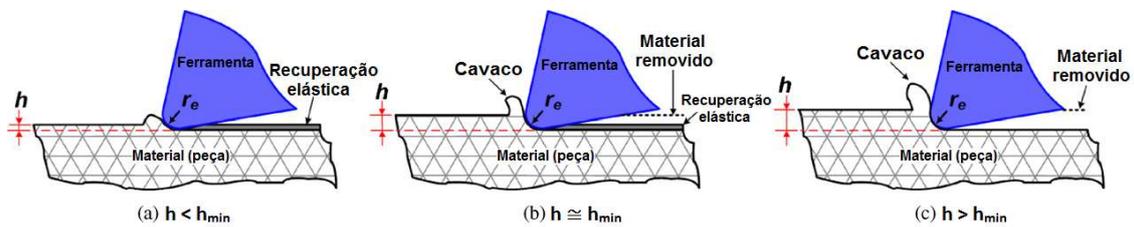


Fonte: Adaptado de Aramcharoen e Mativenga, 2009.

Para Bodziak (2011), na figura 3 (a), num processo de usinagem em escala convencional, nota-se que a aresta se apresenta afiada (baixo valor relativo de raio de aresta) e o ângulo de saída se encontra positivo, o que proporciona uma formação do cavaco com menor quantidade de deformação. Porém, na figura 3 (b), num processo de microusinagem, o raio da aresta de corte (r_e) se torna muito representativo, por apresentar uma dimensão de micrômetros a centésimos de milímetro, o que faz com que, mesmo para ferramentas positivas, o cavaco possa ser formado com um ângulo de saída negativo.

Segundo Oliveira (2012), através do estudo do efeito de escala, surgiu o conceito de espessura mínima de usinagem (h_{min}), onde foi descoberto que o cavaco somente será formado se a espessura de usinagem (h) for maior que h_{min} . Apresenta-se na figura 4, uma comparação visual da relação entre espessura de usinagem (h) e espessura mínima de usinagem (h_{min}).

Figura 4 – Formação de cavacos em relação à espessura mínima de usinagem em microusinagem.



Fonte: Adaptado de Aramcharoen e Mativenga, 2009.

Ainda conforme Oliveira (2012), o fenômeno da figura 4 é descrito da seguinte maneira:

"Quando a espessura do cavaco não deformado é menor que h_{min} , [Figura 4(a)], ocorre apenas deformação e não há remoção de material. À medida que a espessura do cavaco não deformado se aproxima do valor de h_{min} , [Figura 4(b)], pequenos cavacos são formados a partir do cisalhamento de parte do material e na porção restante do material ainda há uma parcela de deformação ocorrendo. Finalmente, quando a espessura do cavaco não deformado é maior que h_{min} , [Figura 4(c)], o material é totalmente cisalhado e toda a espessura do cavaco não deformado é retirada, formando o cavaco completamente."

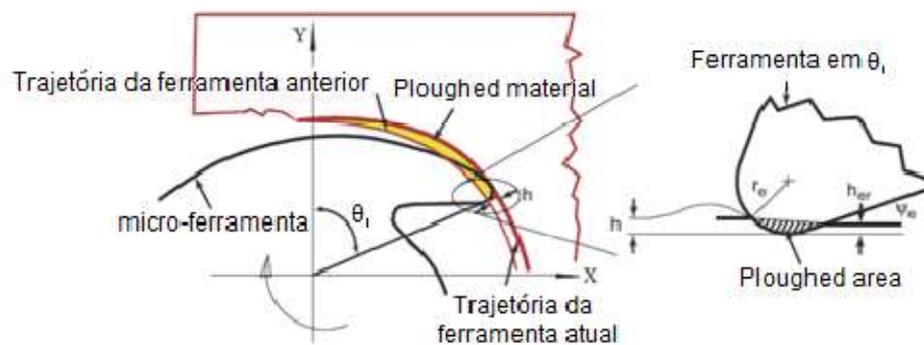
2.1.3 Amassamento

Uma parcela de estudiosos dos processos de microusinagem considera que, durante a formação do cavaco, independentemente da espessura de usinagem e do raio de aresta, sempre há uma parcela de material que será deformada plasticamente sob a aresta de corte (BODZIAK, 2011; WU, 2012; PICARELLI, 2015; DIB, 2013). A esse fenômeno os autores costumam dar o nome de *ploughing* ou *plowing*, e neste trabalho será adotado o termo amassamento para se referir a este.

Bodziak (2011) argumenta que apesar das palavras *plough* ou *plow* significarem arado, referentes ao rastro deixado pela máquina agrícola homônima utilizada na preparação da terra para o plantio, no processo de microfresamento, este termo se refere ao material que foi esmagado na superfície da peça e não foi retirado por não atingir a espessura mínima de corte. O termo *ploughing* pode ser entendido como esmagamento ou amassamento, em português, tradução livre.

Segundo Wu (2012), o amassamento (*ploughing*) tem uma grande influência na qualidade superficial da peça, uma vez que a ferramenta arrasta o material ao invés de cortá-lo, provocando deformações plásticas e elásticas, sem que haja a formação de cavaco, conforme apresentado na figura 5. O amassamento também contribui significativamente com a ocorrência de vibrações, o aumento da formação de rebarbas e da energia específica de corte.

Figura 5 – Amassamento devido ao raio da aresta de corte no microfresamento.



Fonte: Bodziak, 2011.

2.1.4 Material da peça

Os materiais que são utilizados para compor as peças afetam diretamente o desempenho da ferramenta de corte. Geralmente, a aplicação da peça é o principal critério para definição do material que será utilizado, de modo que diferentes setores industriais requerem materiais específicos, como aço inoxidável e ligas de titânio para produtos médicos, ligas de alumínio para a área aeroespacial e silício para eletrônicos. No entanto, o desempenho de corte e as características de usabilidade dos materiais variam muito, de acordo com suas propriedades mecânicas, físicas e químicas (WU, 2012).

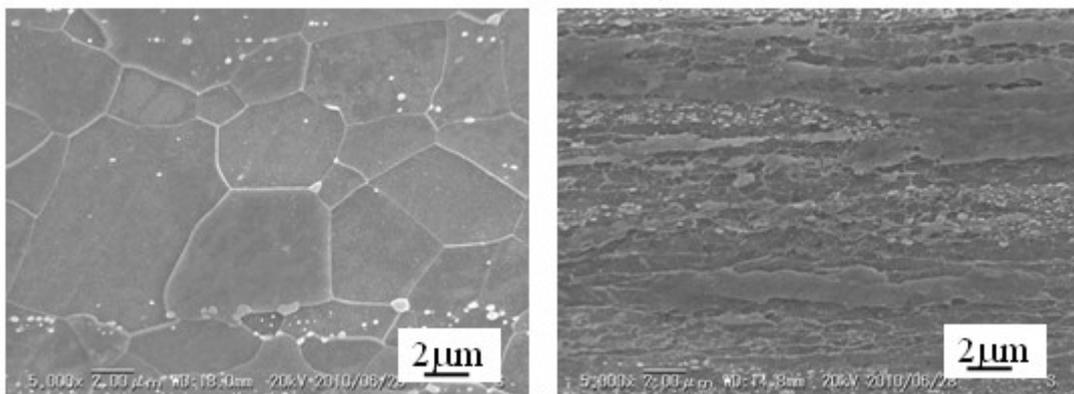
Ao passo que nos processos de usinagem convencionais, os materiais usinados são considerados homogêneos e isotrópicos, e os cavacos gerados são formados por um grande pedaço de material removido, na usinagem em microescala, a espessura dos cavacos torna-se da mesma ordem que o tamanho de grão médio de materiais

usinados, onde, por vezes, o corte é realizado por remoção de apenas um grão de material. Neste caso, a microestrutura do material de trabalho deve ser tratada como não homogênea e anisotrópica, o que impõe um impacto significativo no mecanismo de corte. Segundo Picarelli (2015) quando essa interação com apenas um grão ocorre, de acordo com a orientação de cada grão, proporciona uma variação drástica nas forças de corte envolvidas no processo, gerando "covas" e sulcos.

Para Dornfeld et al. (2006), as dimensões das microestruturas dos materiais trabalhados em microusinagem, juntamente com a similaridade da ordem de grandeza do raio da ferramenta de corte com a espessura de usinagem, são os dois aspectos do efeito escala mais significantes para a microusinagem.

Estudos recentes indicam que as microestruturas diferentes de materiais resultam em repostas diferentes de usinabilidade e qualidade de peça. De acordo com Wu (2012), a alteração da microestrutura do material de trabalho, seja na granulometria, pureza ou orientação cristalográfica, pode afetar as forças de corte, formação de cavacos, qualidade superficial e formação de rebarbas. A figura 6 apresenta a diferença entre uma liga de aço carbono composta por grãos de tamanho normal e outra composta por grãos ultrafinos.

Figura 6 – Microestrutura do aço carbono com tamanho normal de grão, à esquerda; microestrutura do mesmo material com grão ultrafino, à direita.



Fonte: Komatsu et al., 2012.

Conforme Schmidt et al. (2002), os materiais de trabalho podem ser tratados termicamente para a obtenção de microestrutura mais fina e equidistante antes do

processo de usinagem, afim de que se obtenham forças de usinagem constantes, de modo a superar a heterogeneidade e anisotropia da microestrutura do material.

2.1.5 Condições de processo

Conforme Wu (2012), do ponto de vista das condições do processo, o desempenho de corte de microferramentas é determinado, principalmente, pela velocidade de corte, avanço, profundidade de usinagem, trajetória da ferramenta e fluido de corte. Sendo possível otimizar o processo de corte através do entendimento da influência de cada um desses fatores no desempenho das ferramentas.

No microfresamento nem sempre é possível aplicar velocidades de corte similares às que se aplicam no fresamento convencional, dados os minúsculos diâmetros das ferramentas e as limitações de velocidade rotacional existentes nos rotores das microfresadoras. Entretanto, para Picarelli (2015), alguns pesquisadores apontam que a combinação adequada dos parâmetros de corte pode suprir essa carência e produzir um processo eficiente e com produtividade.

Para Dimov et al. (2004) a principal consideração para a seleção de uma estratégia de usinagem apropriada deveria ser a manutenção de uma espessura de usinagem constante e a prevenção de quebras de ferramentas. Deste modo, as microfresadoras, ferramentas de corte e os sistemas de programação precisam ser bem coordenados, a fim de produzir trajetórias de ferramenta otimizadas e tolerâncias de movimentos mais rigorosas.

Acerca da influência do uso de fluido de corte, Li e Chou (2010), em seu trabalho, evidenciaram que o desempenho da técnica de Mínima Quantidade de Lubrificante (MQL) em microfresamento comparado com o corte a seco, pode melhorar significativamente a vida útil da ferramenta, a rugosidade da superfície e a formação de rebarbas.

2.1.6 Integridade de superfície

Ferraresi (2003) define como qualidade superficial o acabamento obtido através da usinagem, bem como as propriedades físicas e mecânicas na região das camadas próximas à superfície das peças.

Conforme Picarelli (2015), as microfresas juntamente com os parâmetros de usinagem utilizados nos processos de microfresamento influenciam diretamente na qualidade superficial. Natarajan et al. (2011 apud PICARELLI, 2015) concluíram que para valores menores de avanço por dente utilizados, a rugosidade média também resulta em valores menores, enquanto a velocidade de rotação não tem influência significativa.

Alguns fatores podem influenciar nessas propriedades, entre eles a pressão da ferramenta contra a peça; o atrito da superfície de incidência da ferramenta com a peça; o atrito interno do metal na região de deformação plástica; calor gerado no processo de corte; fenômenos específicos do processo de formação de cavaco; vibração da ferramenta e máquina. Isto pode acarretar uma série de irregularidades geométricas, além da modificação da estrutura cristalográfica da camada superficial. Em determinados metais pode ocorrer também alterações na composição química, como a descarbonetação de alguns tipos de aço (PICARELLI, 2015).

Tais fatores podem acarretarem diversos defeitos geométricos e estruturais nas camadas superficiais, conforme observado na tabela 2.

Tabela 2 – Principais defeitos de superfície em peças microusinadas.

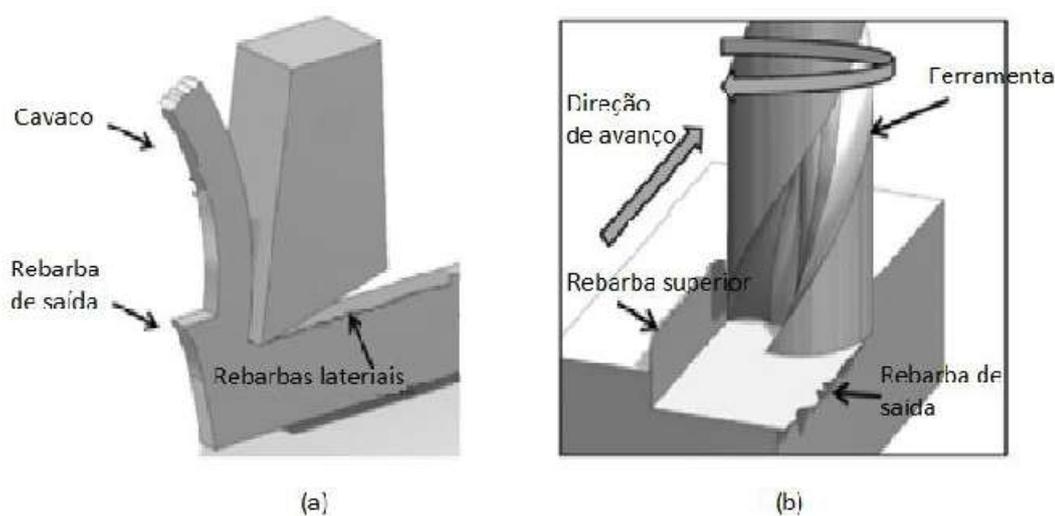
DEFEITO DE SUPERFÍCIE	CARACTERÍSTICA	CAUSA
Cavidades	Descontinuidades na superfície usinada.	Devido à natureza das condições de atrito na região de contato da peça com a aresta de corte.
Debris	Descontinuidades na superfície usinada.	Nucleação e propagação de trincas à frente da aresta de corte, com conseqüente remoção de material.
Dimples	Pequenas depressões na superfície da peça.	Formação e coalescência de microvazos ao longo do caminho da fratura, processo que envolve um considerável nível de deformação plástica localizada.
Fluxo plástico severo	Material severamente deformado com fluxo orientado na direção do corte.	Material plasticamente deformado, pertencente à última parte do cavaco.
Ploughing	Amassamento de material na superfície da peça.	Ocorre principalmente quando o avanço por dente é inferior ao raio de aresta da ferramenta.

Grooves	Riscos ou asperezas ao longo da superfície da peça em decorrência da passagem da aresta de corte.	Têm origem no polimento causado pela superfície de flanco da ferramenta.
Grooves de microcavacos	Ranhuras mais profundas que as <i>grooves</i> , também paralelas à direção de corte.	Semelhante à formação de <i>grooves</i> , porém com geração de microcavacos que podem vir a aderir à superfície da peça.
Marcas de chatter	Ranhuras retas, paralelas entre si e perpendiculares à direção do corte.	Relacionadas à interação peça-ferramenta com o aumento da velocidade de corte e desgaste da ferramenta.
Prows	Pequenas saliências na superfície usinada.	Formados na usinagem com baixa velocidade de corte, sendo associados à aresta postiça de corte.
Rebarbas	Porção de material da peça deslocada para a direção axial da ferramenta.	Relacionado às propriedades mecânicas do material, com mecanismo de formação dependente do tipo de rebarba.
Recuperação elástica	Elevações na superfície não relacionadas à rugosidade gerada pela usinagem e/ou a efeitos dinâmicos da máquina ferramenta.	Consequência dos diferentes níveis de resistência à deformação entre os grãos da microestrutura da peça.
Restos de material	Material aderido à superfície da peça.	Originário da formação de <i>debris</i> , cavidades ou vazios.
Smeared material	Material deformado plasticamente no sentido contrário ao do avanço da ferramenta.	Surge devido ao aumento da razão entre a força de avanço e a força de corte.
Steps	Ondulações sensíveis subsequentes a fluxos plásticos severos.	Sua ocorrência está relacionada à formação de fluxo plástico severo.
Trincas	Fissuras que penetram na superfície da peça.	Mudança das propriedades mecânicas entre os grãos, tensões residuais e fadiga na superfície da peça.
Vazios	Descontinuidades na superfície usinada.	Diferenças no limite de escoamento entre as fases da microestrutura.

Fonte: Assis, 2013.

Para Assis (2013) as rebarbas geradas durante o corte em microescala são indesejadas, porém inevitáveis, devidos às características do processo de fresamento, onde o material sofre escoamento com o contato mecânico entre ele e a ferramenta. A remoção dessas rebarbas decorrentes da microusinagem é muito mais difícil comparando-se com a usinagem convencional, sendo necessários estudos devido à importância dessa questão no processo. Embora existam alguns métodos que realizam o acabamento e removem essas rebarbas, algumas mudanças nos parâmetros do processo podem diminuir a formação das mesmas, como, a diminuição da profundidade de usinagem, aumento da velocidade de corte, dentre outros. Outra forma de reduzir a formação de rebarbas é reforçar a borda da superfície do material onde a aresta de corte sairá, melhorando a resistência à deformação plástica (PICARELLI, 2015). A Figura 7 mostra as rebarbas que se formam no material usinado durante o processo de microfresamento.

Figura 7 – Formação de rebarbas (a) rebarbas de saída e laterais no corte ortogonal; (b) rebarbas superiores e de saída no microfresamento.



Fonte: Picarelli, 2015.

2.2 Forças de usinagem

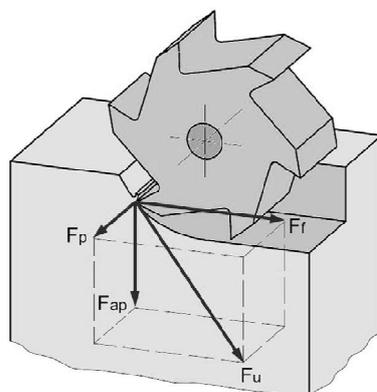
Diniz, Marcondes e Coppini (1999) argumentam que as forças de usinagem são consideradas como reações da peça que atuam sobre a ferramenta durante o

processo de usinagem. Entender como funciona o comportamento e as magnitudes dessas forças é importante para apoiar os projetos de máquinas de usinagem, de ferramentas de corte, o uso das condições de corte adequadas, a otimização da qualidade das peças produzidas, bem como a comparação de comportamentos de diversos tipos de ferramentas ou materiais. Segundo eles uma das abordagens utilizadas para estudo das forças de corte se dá pela análise fenomenológica do mecanismo de formação de cavaco, teoricamente considerando esforços que ocorrem no plano de cisalhamento do cavaco e da superfície de saída da ferramenta, dadas as simplificações necessárias. Outro meio de abordagem, mais empírico, pode ser aplicado ao se utilizar valores de coeficientes advindos de procedimentos experimentais para equacionar os esforços de corte.

Nos fenômenos de formação de cavaco em processos de usinagem atuam diversas forças em direções e magnitudes variadas, a resultante dessas forças é denominada de força de usinagem (F_u), entretanto, como nem a direção nem o sentido da força de usinagem são conhecidos, nos estudos da força de usinagem são trabalhados seus componentes, estes com direções conhecidas (DINIZ, MARCONDES, COPPINI, 1999).

Segundo Machado et al. (2009), na grande maioria das operações nos processos de usinagem a formação dos cavacos ocorre tridimensionalmente. Deste modo, a força de usinagem pode ser decomposta em três componentes básicas, conforme observa-se na figura 8, as principais componentes da força de usinagem em um processo de fresamento.

Figura 8 – Principais componentes da força de usinagem no processo de fresamento.



Fonte: Baldo, 2013.

Tais componentes atuam diretamente na ferramenta, na máquina, bem como, na peça que está sendo usinada. Para Machado et al. (2009), em um espaço tridimensional os componentes básicos da força de usinagem são:

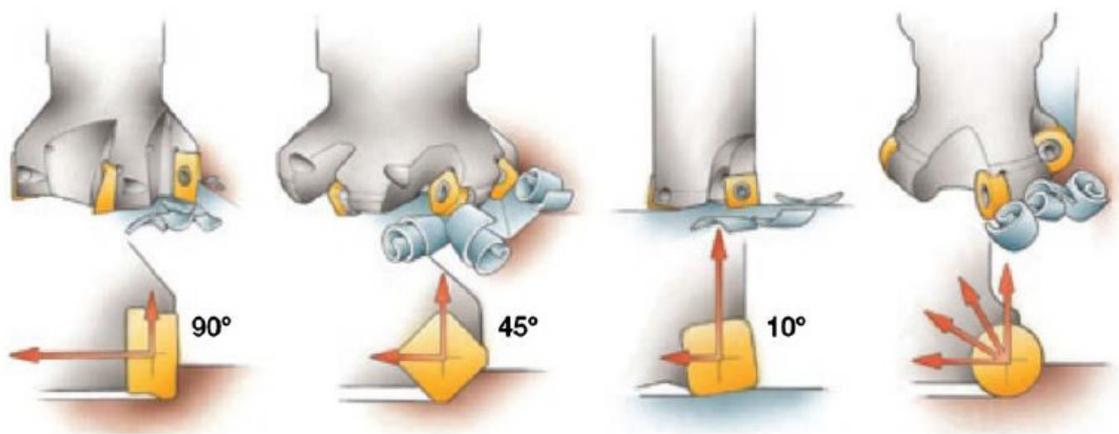
- Força de corte (F_c) é a projeção da força de usinagem sobre o plano de trabalho, na direção de corte, dada pelo movimento de corte;
- Força de avanço (F_f) é a projeção da força de usinagem sobre o plano de trabalho, na direção de avanço, dada pelo movimento de avanço;
- Força passiva ou de profundidade (F_p) é a projeção da força de usinagem perpendicular ao plano de trabalho;
- Força de apoio (F_{ap}) é a projeção da força de usinagem sobre o plano de trabalho, na direção perpendicular à direção de avanço;
- Força ativa é a projeção da força de usinagem sobre o plano de trabalho;
- Força de compressão é a projeção da força de usinagem sobre uma direção perpendicular à superfície principal de corte;

Para a análise de processos de fresamento, devido ao fato da direção do movimento de corte não ser constantemente ortogonal à direção do movimento de avanço (o ângulo entre as direções desses dois movimentos varia de 0 a 360° para cada rotação da fresa), adotam-se as componentes ortogonais F_f , F_{ap} e F_p . Desta maneira, a força de usinagem pode ser calculada por:

$$F_u = \sqrt{F_{ap}^2 + F_f^2 + F_p^2} \quad (2.1)$$

Segundo Baldo (2013), a distribuição e a magnitude das forças sofrem influência de diversos fatores, como parâmetros de corte, estrutura do material trabalhado, ou mesmo a geometria da ferramenta e suas arestas. Observa-se na figura 9, a influência do ângulo de posição da aresta principal de corte sobre a distribuição das forças de avanço e passiva, cujas magnitudes são ilustradas pelo comprimento das setas.

Figura 9 – Influência da geometria da ferramenta na distribuição de forças.



Fonte: Sandvik, 2012.

Para Baldo (2013), através do monitoramento das forças de usinagem é possível realizar um controle mais eficiente dos resultados esperados com o processo de usinagem, bem como comparar a influência de diversas variáveis nos resultados.

Portanto, ser capaz de determinar forças em processos de microfresamento pode ser útil tanto para objetivos de pesquisa e desenvolvimento, como também para acompanhamento de processo. Segundo Machado et al. (2009) existem métodos para determinação das forças de usinagem tanto teóricos quanto experimentais, sendo os teóricos realizados através de modelagem matemática para previsão de forças e os experimentais feitos com medições de forças realizadas durante o processo, sejam diretas ou indiretas.

Conforme Wu (2012), existe um modelo analítico convencional para predição das forças de usinagem proposto por Tlusty e Macneil em 1975. Ao longo do tempo, a partir desse modelo, surgiram outros que foram incorporando outras variáveis e aperfeiçoando cada vez mais os métodos de maneira a aumentar a precisão e exatidão dos resultados apresentados quando comparados com outros métodos. Tais modelos se utilizam de dados como ângulo do plano de cisalhamento primário, pressão específica de corte, área da seção de cavaco, dentre outras variáveis, como entrada para os cálculos de estimativa teórica da força de usinagem. Porém, a variação de parâmetros, como a velocidade de corte, a profundidade de usinagem e a presença ou não do fluido de corte são fatores principais que fazem com que haja

variação da força de usinagem e, conseqüentemente, da qualidade da superfície de peças usinadas (WU, 2012).

Bao e Tansel (2000) desenvolveram um modelo analítico incorporando as condições do processo, geometria da ferramenta e material de peça, no qual a espessura de usinagem foi calculada considerando a trajetória da ponta da ferramenta de corte. Os autores compararam as diferenças do modelo proposto com o modelo convencional e concluíram que o modelo proposto estima as forças de usinagem com maior precisão. Atualmente, com a evolução das tecnologias de processamento, existem softwares que são capazes de simular o processo de usinagem e estimar o comportamento das forças que devem atuar no mesmo. Entretanto, para Carvalho (2015), a complexidade elevada do processo de microfresamento, bem como em casos especiais, por exemplo, no uso de materiais com revestimento para peças, pode-se encontrar uma diferença significativa entre a predição teórica do comportamento das forças de usinagem e o comportamento observado por meio de **medições diretas ou indiretas**. Na tabela 3 é possível observar a discrepância entre o valor calculado através de um modelo de predição de força proposto pelo próprio autor e o valor medido no experimento conduzido pelo próprio autor, no experimento em questão foram usinados microcanaís numa peça de latão revestida com estanho. As medições foram realizadas com um dinamômetro apropriado do fabricante *Kistler*.

Tabela 3 – Comparação de previsão obtida por meio de modelo analítico com medição experimental.

Comparação do modelo teórico com o experimental	
	Média da força resultante máxima (N)
Modelo teórico	8,44
Experimento 3	20,38

Fonte: Carvalho, 2015.

Conforme Machado et al. (2009), tanto do ponto de vista prático quanto do ponto de vista experimental, a medição da força de usinagem pode ser importante para análise posterior ao processo ou para análise com o processo em andamento, o que pode possibilitar a interferência do operador no processo caso o comportamento não esteja ocorrendo conforme esperado.

2.2.1 Modelos de previsão de forças

Para Campos (2014) é sabido que existe uma quantidade significativa de modelos de previsão de força de usinagem publicados no meio científico, entretanto, a maioria deles são variações ou adaptações de modelos clássicos da década de 70 aplicados a casos específicos. Como é o caso da previsão de forças no microfresamento, onde muitos modelos realizam a partição da aresta de corte em elementos infinitesimais e somam os elementos de força em cada parte da aresta, para encontrar a força total.

Ainda segundo Campos (2014), a equação básica da força de corte é, em sua forma diferencial, dada pela equação:

$$d\vec{F} = \vec{K} t_c db \quad (2.2)$$

onde $d\vec{F}$ é o elemento de força em um elemento da aresta de corte, \vec{K} é a pressão específica de corte, t_c é a espessura do cavaco indeformado (espessura de usinagem) e db é o elemento da aresta de corte. Observa-se pela Equação 2.2, que o cálculo das forças de corte está diretamente ligado à computação da pressão específica de corte.

Conforme Mougo (2016) os modelos podem ser classificados em analítico, empírico, mecanístico e numérico, de acordo com a sua linha de desenvolvimento, como seguem:

- Modelos analíticos: tratam-se dos modelos que utilizam a menor quantidade de dados experimentais possível, com o objetivo de encontrar relações matemáticas entre as variáveis conhecidas do processo.

- Um exemplo de modelo analítico, conforme abordado anteriormente, foi proposto por Bao e Tansel (2000). Considerado o primeiro modelo analítico que foi desenvolvido para calcular as forças de corte em operações de microfresamento com fresa de topo, apresentado na Equação 2.3. Trata-se de uma adaptação baseada em modelos desenvolvidos para o fresamento convencional propostos por Tlustý e Macneil (1975) e Kline et al. (1982). O modelo considera a espessura de usinagem (t_c) conforme mostrado na Equação 2.4. Onde p é uma constante do material e f_t representa o avanço por dente.

$$dF_x = -2 \left(\frac{K_t r f_t}{\tan \lambda / 2} \right) (\sin \theta \cos \theta d\theta + p \sin^2 \theta d\theta)$$

$$dF_y = 2 \left(\frac{K_t r f_t}{\tan \lambda / 2} \right) (\sin^2 \theta d\theta + p \sin \theta \cos \theta d\theta) \quad (2.3)$$

$$t_c(\theta) = f_t \sin \theta - \frac{z}{2\pi r} f_t^2 \sin \theta \cos \theta + \frac{1}{2zn} f_t \cos^2 \theta \quad (2.4)$$

A primeira parcela da Equação 2.3 contribui para a determinação efetiva de t_c e o seu cálculo é suficiente para os modelos convencionais. O segundo termo trata do fresamento discordante ou concordante. Contudo, uma parcela negativa age durante o fresamento discordante ($0^\circ < \theta < 90^\circ$) e uma parcela positiva age no fresamento concordante ($90^\circ < \theta < 180^\circ$). Como consequência, a t_c no fresamento concordante é maior que no discordante. Como também foi observado que quando $f_t/r_e < 0,1$ o modelo convencional pode ser utilizado para simular microfresamento de topo e estimar as forças de corte com erro $< 15\%$. Foi observado também que a força específica de corte (K_t) aumenta com o desgaste da ferramenta e permanece em zero com a quebra da ferramenta (BAO E TANSEL, 2000).

- Modelos empíricos: tratam-se dos modelos que utilizam a maior quantidade de dados experimentais possível.

- Para Campos (2014) o primeiro modelo de força de corte empírico foi proposto por Koenigsberger e Sabberwal (1961). Neste, os autores propuseram a Equação 2.2 para a força de corte tangencial, introduzindo um coeficiente chamado de pressão específica, encontrado experimentalmente para um processo e material específicos.
- Outro exemplo de modelo empírico foi desenvolvido por Newby et al. (2007), também para operações de microfresamento com fresa de topo, conforme Equação 2.5. Os autores definiram uma equação empírica para o cálculo de K_t a partir da equação do ajuste da curva dos valores experimentais, mostrada na Equação 2.6. Foi observado um aumento não-linear da curva de K_t quando a espessura de usinagem (t_c) diminui. Este fato está associado ao efeito de escala, que indica a atuação do efeito *ploughing* e de esforços adicionais na aresta de corte (MOUGO, 2016).

$$dF_x = \frac{K_t r}{\tan \alpha} t_c(\theta) (\cos \theta d\theta + K_r \sin \theta d\theta)$$

$$dF_y = \frac{K_t r}{\tan \alpha} t_c(\theta) (\sin \theta d\theta - K_r \cos \theta d\theta) \quad (2.5)$$

$$K_t = 0,8992(t_c)^{-1,3089} N/mm^2 \quad (2.6)$$

- Modelos mecanísticos: tratam-se dos modelos onde as equações para o cálculo das forças de corte são adaptadas para o processo em microescala através da adição dos esforços provenientes do efeito de escala.
 - Nestes modelos os valores de K_t são obtidos através de equações calibradas a partir de dados experimentais (MOUGO, 2016). A equação básica de um modelo mecanístico é:

$$F_c = k_s b h \quad (2.7)$$

Onde F_c é a força de corte, k_s é a pressão específica de corte, h é a espessura de usinagem e b é a largura de usinagem (CERVELIN, 2009).

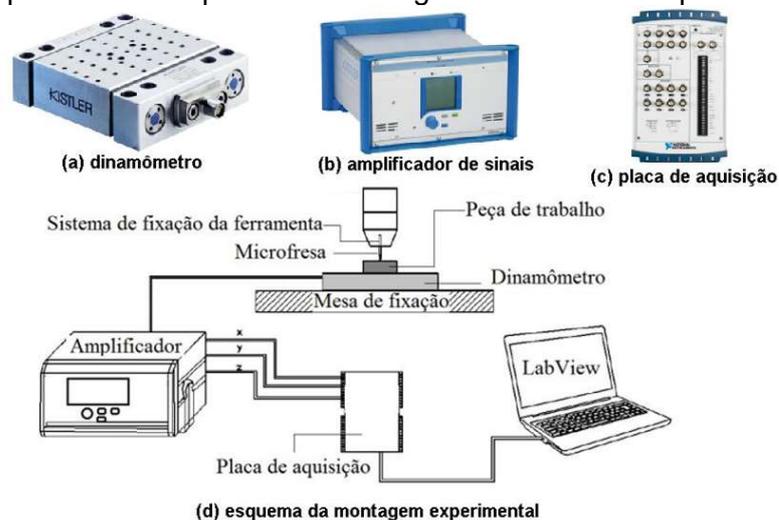
- Modelos numéricos: tratam-se de modelos que se utilizam do método de resolução de problemas matemáticos denominado método dos elementos finitos (MEF ou FEM, de *Finite Element Methods*), onde:

O objetivo de estudo é representado como um conjunto finito de elementos que são conectados uns aos outros por pontos nodais (nós), permitindo que um sistema complexo possa ser discretizado em outros mais simples formados por elementos. Ao conjunto de elementos e nós dá-se o nome de malha (*mesh*). A resposta de um elemento é caracterizada por meio de graus de liberdade que, por sua vez, são representados como os valores das incógnitas associadas aos nós. Há equações algébricas que definem a resposta de cada elemento para um dado problema e a resposta aproximada do sistema original é obtida quando se conecta todos os elementos (CERVELIN, 2009).

2.2.2 Métodos de medição de forças

Nos métodos de medição de forças de usinagem são utilizados dispositivos adicionais às máquinas de usinagem, estes são acoplados de alguma forma à ferramenta ou à peça de trabalho e são capazes de captar as forças de usinagem e converter em algum tipo de sinal analógico proporcional. Para Childs et al. (2000), os métodos de medições com a utilização de dinamômetro são utilizados quando as forças precisam ser conhecidas com precisão, tanto em magnitude e direção, por exemplo, as forças de avanço e de corte no torneamento, ou o torque e a força de avanço na furação. A figura 10 apresenta um exemplo de método idealmente utilizado para medição de forças de usinagem em operações de microfresamento.

Figura 10 – Componentes e esquema de montagem de um sistema para medição de forças.



Fonte: Mougo, 2016.

No método acima exposto, a peça de trabalho é fixada no componente dinamômetro (a), que por sua vez, capta o comportamento das forças ao longo do processo de usinagem, em seguida, os sinais recebidos do dinamômetro são amplificados (b) e enviados para uma placa de aquisição de dados (c) responsável pela comunicação do sistema com um computador, neste existe uma interface projetada no software *labview* para registro, exibição e tratamento dos dados. Os estudos que envolvem a medição de forças de usinagem apresentam resultados variados a depender de diversos fatores combinados, a tabela 4 apresenta uma relação de estudos publicados com os valores de força máxima encontrados nos experimentos realizados.

Tabela 4 – Relação de valores de força de usinagem máximos medidos em algumas pesquisas.

AUTOR	PESQUISA	MATERIAL	FRESA	AVANÇO	A _p	FORÇA
KOMATSU et al, 2012	Efeito do tamanho do grão de cristal em aço inoxidável no processo de corte em microfresamento	Aço inoxidável	0,8 mm	50 mm/min	50 μm	15 N
BALDO, 2013	Estudo do microfresamento da liga de titânio Ti-6Al-4V utilizando análise de sinais de força e emissão acústica	Liga de titânio Ti-6Al-4V	0,5 mm	100 mm/min	50 μm	7,5N
CAMPOS, 2014	Estudo das forças de corte no microfresamento da liga de alumínio 6351-T6	Liga de alumínio 6351-T6	0,38 mm	300 mm/min	100 μm	2,6N
CARVALHO, 2015	Modelagem das forças de usinagem no microfresamento de topo em materiais com revestimento	Latão com revestimento de estanho	0,8 mm	120 mm/min	300 μm	29,7 N
ZHOU et al, 2015	Modelagem analítica e validação experimental de forças de corte de microfresamento considerando o raio da aresta e os efeitos de fortalecimento do material	Aço inoxidável NAK80	1,0 mm	400 mm/min	100 μm	8,2 N

MOUGO, 2016	Microfresamento do aço superduplex: uma comparação mecânica com os aços inoxidáveis austenítico e ferrítico para as forças de usinagem e avaliação da superfície usinada	Aço superduplex	0,8 mm	240 mm/min	100 μ m	7,7 N
		Aço Inoxidável austenítico 316	0,8 mm	240 mm/min	100 μ m	5,3 N
		Aço Inoxidável ferrítico 430	0,8 mm	240 mm/min	100 μ m	7,8N
TAO et al, 2016	Um modelo genérico baseado na espessura do cavaco indeformado para modelagem de força de corte em microfresamento	Cobre	0,5 mm	150 mm/min	120 μ m	13 N

Fonte: Autoria própria.

Também existem alguns métodos para quantificar as forças por suposições ou deduções, que são realizados envolvendo a análise de sinais do comportamento da própria máquina de usinagem, ferramenta ou processo. Childs et al. (2000) cita como exemplo a análise das oscilações da potência consumida pelo motor do eixo principal relacionada com a força de corte (F_c). Entretanto, para Lauro (2011), geralmente tais métodos não apresentam a mesma sensibilidade e confiabilidade das medições propriamente ditas. Porém, em muitos casos são as melhores alternativas por apresentarem menores custos, facilidade de instalação, entre outras vantagens.

2.2.2.1 Dispositivos comercialmente disponíveis

Como uma das características pretendidas para o sistema desenvolvido neste trabalho é o baixo custo, é importante conhecer os dispositivos comercialmente disponíveis assim como obter estimativas de preço.

Considerando a literatura consultada, todos os trabalhos científicos envolvendo medições de força de usinagem que apresentaram especificações dos dinamômetros utilizados, fizeram uso de equipamentos de um mesmo fabricante (KOMATSU et al, 2012; BALDO, 2013; CAMPOS, 2014; CARVALHO, 2015; ZHOU et al, 2015; MOUGO, 2016; TAO et al, 2016).

Já em pesquisas utilizando o mecanismo de busca da empresa *Google*, o único fabricante de sistemas dedicados à medição de forças de usinagem e, mais especificamente, de forças de microfresamento, foi a empresa *Kistler*. Foram pesquisados termos como: "medição", "força de usinagem", "dinamômetro", "microfresamento", "forças em microfresamento", "measurement", "cutting forces", "machining forces", "dynamometer", "micromilling", "measuring system" e "micromilling forces". Os termos também foram usados em combinações do tipo: "medição de força de usinagem", "dinamômetro para medição de forças de usinagem", "medição de força em microfresamento", "dinamômetro para microfresamento", "cutting forces measurement", "machining forces measurement", "dynamometer for cutting forces", "dynamometer for machining forces", "dynamometer for micromilling", "micromilling forces measurement" e "measuring system for cutting forces".

Em seu catálogo de produtos, esta empresa dispõe, em sua linha de equipamentos para medição de força, de dinamômetros que suportam até 60 kN e sensibilidade de até 5 mV/N. A figura 11 apresenta alguns produtos deste fabricante para as mais variadas aplicações.

Figura 11 – Modelos de dispositivos para medição de forças de usinagem da empresa *Kistler*.



Fonte: <https://www.kistler.com/>.

Foi solicitado junto ao representante comercial desta empresa no Brasil uma cotação. As cotações foram para quatro diferentes modelos de sistemas para medição dos três componentes ortogonais de força em microusinagem, cada sistema é composto por dinamômetro, amplificador, dispositivo de aquisição de dados e acessórios básicos. Os conjuntos com faixa de medição de -4 kN a 4 kN e -5 kN a 5 kN custam cerca de US\$ 76 mil, cada. O conjunto com faixa de medição de -30 kN a 30 kN, na versão mais compacta, custa US\$ 88 mil, e na versão mais robusta, custa US\$ 101 mil. As cotações recebidas encontram-se em anexo.

Existem também fabricantes de sistemas de medição de força que não são fabricados especificamente para tal, mas, podem ser utilizados para medições de força em processos de usinagem, contudo, necessitariam de adaptações para atender às características específicas dos processos de usinagem.

Novamente em pesquisas utilizando o mecanismo de busca da empresa *Google*, foram encontrados fabricantes de sistemas para medição de forças em diversas configurações e com sensibilidade para serem utilizados em medições de força de processos de usinagem. Foram pesquisados termos e combinações como: "medição de força", "dinamômetro", "sistema para medição de força", "force measurement", "dynamometer" e " force measurement system ". Um exemplo dos resultados encontrados é a empresa *HBM*, que em seu catálogo de produtos dispõe de uma linha de sensores e transdutores de força e straingages com capacidade de medição de até 5 MN e sensibilidade de até 3 mV/N. A figura 12 mostra exemplares da linha de dispositivos da HBM para medição de força.

Figura 12 – Modelos de dispositivos para medição de forças da *HBM*.

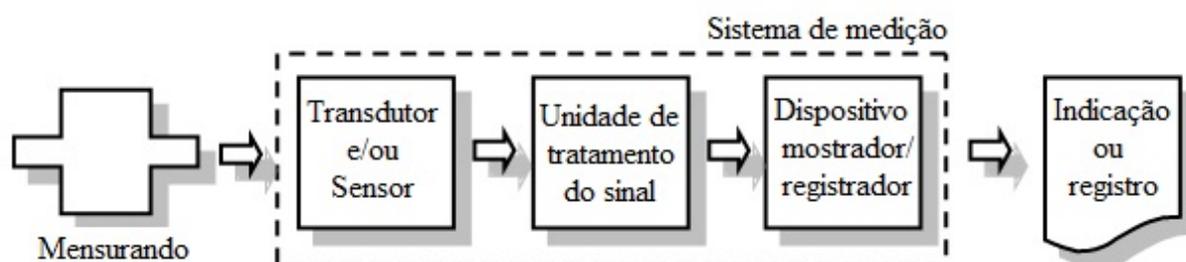


Fonte: <https://www.hbm.com/>.

3 DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO

O capítulo referente ao desenvolvimento do Sistema de Medição foi dividido em três partes, que correspondem às partes essenciais de um sistema de medição, segundo Albertazzi e Sousa (2008), conforme observa-se na figura 13.

Figura 13 – Módulos funcionais de um sistema de medição.



Fonte: Albertazzi e Sousa, 2008.

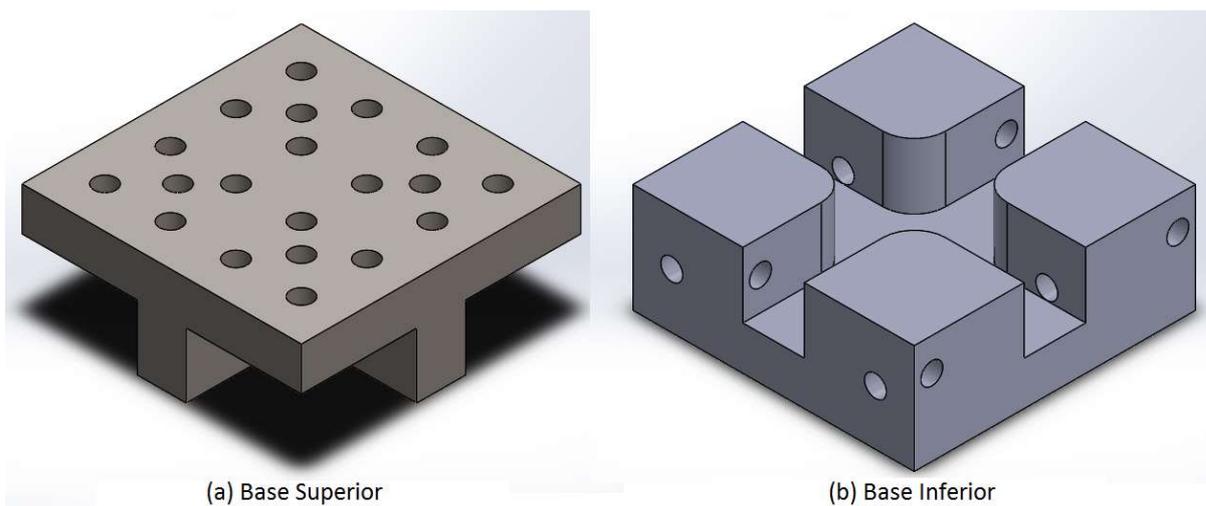
Conforme Albertazzi e Sousa (2008), A primeira parte do sistema de medição, denominada transdutor, diz respeito ao conjunto responsável por converter o evento físico em sinais elétricos proporcionais. A segunda parte descreve os recursos utilizados para aquisição e tratamento dos sinais elétricos captados pelo transdutor. Por último, mas não menos importante, apresenta-se a terceira parte, responsável por disponibilizar os dados em tempo real, bem como registrar e exportar para planilhas de dados.

3.1.1 Transdutor

Um dos requisitos principais do transdutor é que a idealização mecânica do conjunto que atuará para captação dos fenômenos de força de usinagem tenha a mínima interferência possível sobre o processo de microfresamento. Para tanto, o conceito inicial proposto foi projetado como sendo um conjunto de duas peças que se encaixam com folga entre si para conferir mobilidade ao sistema. As peças contêm rasgos e ressaltos que servem para acomodar os sensores e têm sua liberdade de movimento ajustada por um meio elástico, neste caso, batentes de silicone, que entram em contato com os sensores, comprimindo-os de acordo com a força exercida.

As peças do conjunto foram fabricadas a partir de blocos de aço carbono. A figura 14 ilustra a geometria das peças principais. Existem furos laterais para passagem dos fios que se conectarão aos sensores. Na base superior há furos roscados para possibilitar a fixação de peças por meio de parafusos.

Figura 14 – Geometria das peças principais do protótipo do sistema de medição de forças.

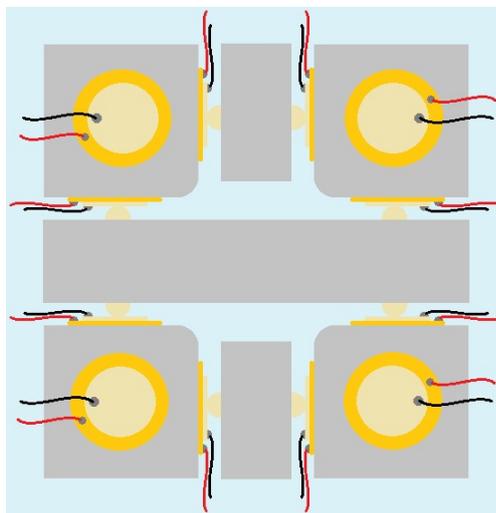


Fonte: Autoria própria.

A base inferior (b) foi idealizada para ser acoplada no dispositivo de fixação próprio para a microfresadora que será utilizada no experimento. Esta peça é dotada de um rasgo em cruz para acoplar os sensores nas superfícies do rasgo. Já a base superior (a) é dotada de furos roscados para fixação da peça e um ressalto em cruz que será encaixado no rasgo em cruz da peça inferior, sendo que entre a cruz e o rasgo serão inseridos os sensores e batentes.

Os elementos sensores que utilizados para captar os sinais de força no transdutor, foram acoplados entre as paredes internas da base inferior do transdutor, sendo comprimidos por batentes de silicone em formato semiesférico, que foram coladas nas paredes opostas aos sensores. A figura 15 traz uma representação esquemática da montagem do transdutor, com os sensores nas paredes internas da base inferior e os batentes de silicone nas paredes internas da base superior.

Figura 15 – Configuração dos sensores e batentes montados.



Fonte: Autoria própria.

Os requisitos necessários definidos para a seleção do elemento sensor estão alinhados com os objetivos deste trabalho e foram:

- Alta disponibilidade comercial: devem ser de fácil aquisição, podendo ser encontrados no país, em lojas de eletrônica ou na internet;
- Baixo custo: os sensores devem custar máximo de poucas dezenas de reais;
- Precisão: os sensores devem ser capazes de dar respostas muito próximas quando se aplica repetidamente o mesmo sinal de entrada;
- Sensibilidade: os sensores devem ser sensíveis ao ponto de captar pequenas variações de força;
- Variedade de tamanhos e modelos: comercialmente, devem ser encontrados com variedade de modo a facilitar a construção dos protótipos;
- Facilidade de implementação: não devem necessitar de muitos acessórios ou arranjos eletrônicos para serem colocados em funcionamento.

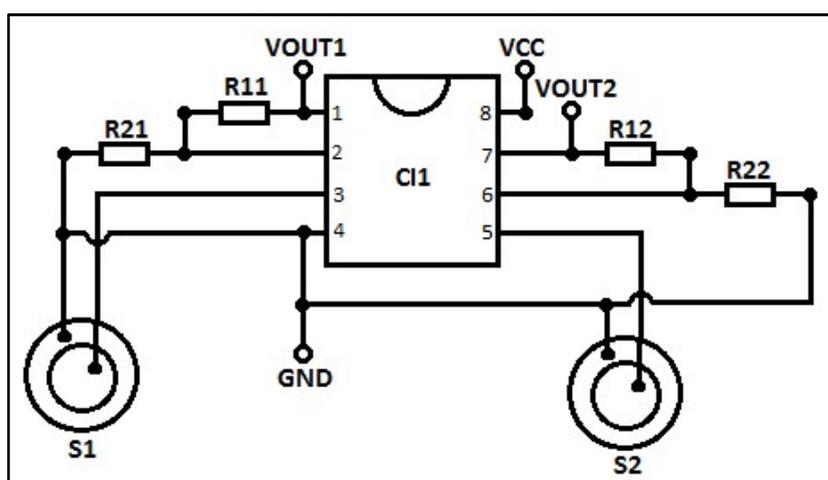
Foi realizada uma análise qualitativo-comparativa com o objetivo de, através de experimentos controlados, justificar a escolha da solução que utilizada como elemento sensor no protótipo do sistema medidor de força para operações de

microfresamento. Tal análise e os experimentos se encontram em detalhes no capítulo 4, e os resultados são detalhados no capítulo 5.

3.1.2 Aquisição e tratamento de sinais

Dada a baixa magnitude das sinais de força captados pelo transdutor, é necessário que se realize um tratamento para amplificação dos tais sinais. Para tanto, foi desenvolvido um circuito eletrônico com o objetivo de amplificar os sinais em 7,8 vezes, disponibilizando sinais compreensíveis para o dispositivo de aquisição de dados (DAQ). O esquema do circuito utilizado é apresentado na figura 16, e cada unidade tem capacidade para amplificar os sinais de dois sensores.

Figura 16 – Circuito amplificador para dois sensores



Fonte: Autoria própria.

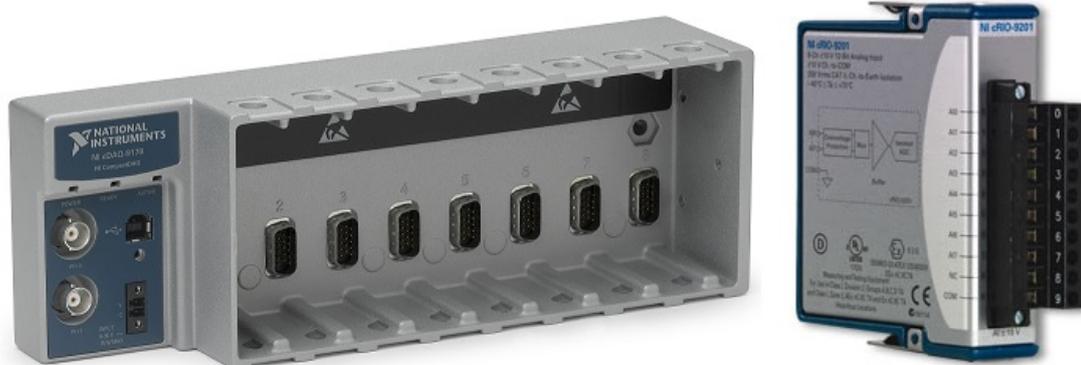
No circuito eletrônico amplificador da figura 16, o CI amplificador operacional LM358P (CI1) deve ser alimentado com 10 V_{CC} pelo pino 8, consoante a tensão máxima de entrada do dispositivo de aquisição de dados. Os resistores de realimentação R11 (15 k Ω 1/4 W) e R21 (2,2 k Ω 1/4 W) para o circuito de amplificação do sensor S1, e R12 (15 k Ω 1/4 W) e R22 (2,2 k Ω 1/4 W) para o circuito de amplificação do sensor S2. Tais resistores definem o ganho do amplificador e o tipo de amplificação, neste caso, através da equação de amplificação não inversora de Pertence Junior (2015), como segue:

$$V_{out} = V_{in} \left(1 + \frac{R1}{R2} \right) \quad (3.1)$$

O pólo de emissão de sinal do sensor S1 é conectado ao pino 3 e o do sensor S2 é conectado ao pino 5 do CI1. Já os pinos 1 e 7 do CI1 são as saídas do sinal amplificado, cada um em seu circuito, e o pino 4 deve ser conectado ao comum ou GND do dispositivo de aquisição de dados. Os terminais VOUT1 e VOUT2 correspondem às saídas dos sinais amplificados dos sensores S1 e S2, respectivamente, e devem ser conectados aos canais do módulo de entrada de tensão do DAQ.

O dispositivo de aquisição de dados utilizado nos experimentos de validação do conceito é uma solução comercial, neste caso, disponibilizada pela empresa National Instruments. Esse dispositivo de aquisição de dados (NI 9172) é um hardware modular dotado de múltiplos canais para acoplagem dos sensores e de fácil integração com demais produtos da linha da National Instruments (Figura 17). A comunicação do DAQ com o computador é realizada por conexão USB.

Figura 17 – Dispositivos para aquisição de dados (NI 9172 e NI 9201).



Fonte: <http://www.ni.com/>.

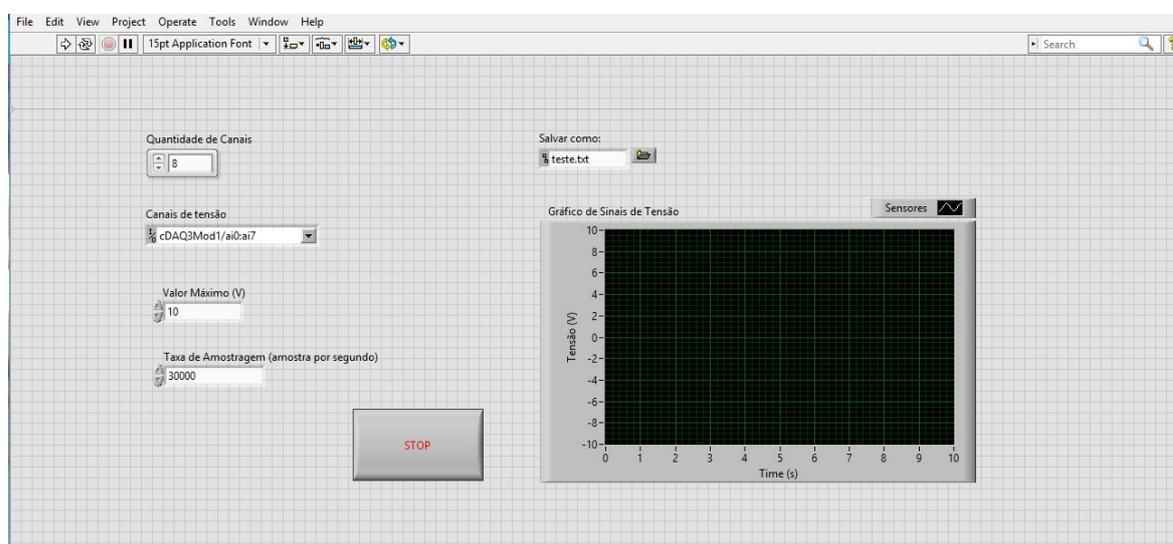
Juntamente com o DAQ, foi utilizado um módulo de entrada de tensão (NI 9201) com oito canais de entrada, e capacidade para 500 mil amostragens por segundo não simultâneas, ou seja, quando se usa os oito canais de entrada a capacidade de amostragens se divide por oito, resultando em 62,5 mil amostragens por segundo em cada canal.

3.1.3 Dispositivo mostrador e registrador

Foi utilizada uma interface desenvolvida pelo ambiente de desenvolvimento integrado LabVIEW para o processamento e análise dos sinais coletados. O ambiente permite o desenvolvimento de aplicações e interfaces, através de uma linguagem de programação própria, como também proporciona a integração efetiva de hardware com software. O software LabVIEW também é produto da fabricante National Instruments e a versão que foi utilizada para esse trabalho é a 8.2.

A interface desenvolvida, que pode ser observada na figura 18, é exibida na tela do computador, e disponibiliza a possibilidade de selecionar os sensores que serão utilizados individualmente, configuração do intervalo de tempo que o DAQ deve realizar as leituras dos sinais, bem como um gráfico de sinais analógicos que fornece o comportamento dos sinais em tempo real no momento da usinagem. O registro dos dados foi programado para ser realizado em um arquivo à parte que é gerado automaticamente na finalização de cada teste, ao clicar no botão "stop".

Figura 18 – Tela do dispositivo mostrador/registorador



Fonte: Autoria própria.

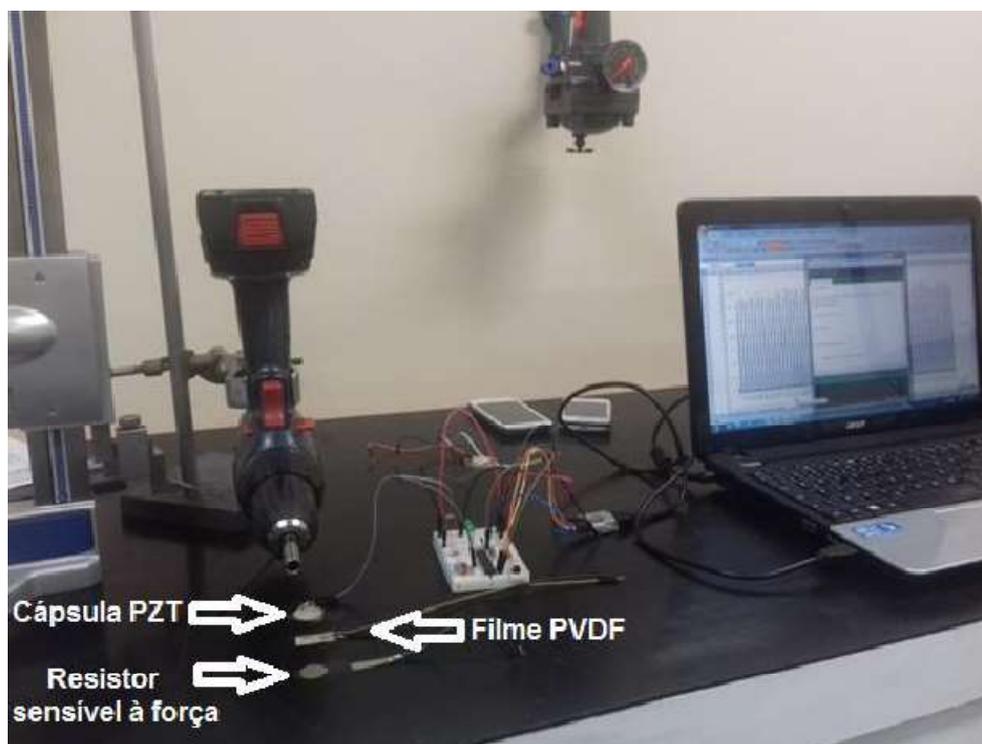
4 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são descritos detalhadamente os procedimentos experimentais utilizados para a seleção do sensor que fora utilizado como recurso de medição do sistema para medição de forças de usinagem em operações de microfresamento, bem como o experimento realizado para avaliar qualitativamente o tempo de recuperação do sensor selecionado. Finalmente são descritos os procedimentos de planejamento e execução do experimento utilizado para validação do conceito através do protótipo construído.

4.1 Experimento de seleção do sensor

Para este experimento, a bancada experimental foi disposta conforme a Figura 19. Um exemplar de três tipos de sensores diferentes foram fixados numa superfície plana, um ao lado do outro, e submetidos ao contato da ponta de uma abraçadeira de nylon que, por sua vez, foi fixada ao eixo rotativo de uma aparafusadeira.

Figura 19 – Bancada experimental do experimento de seleção do sensor.

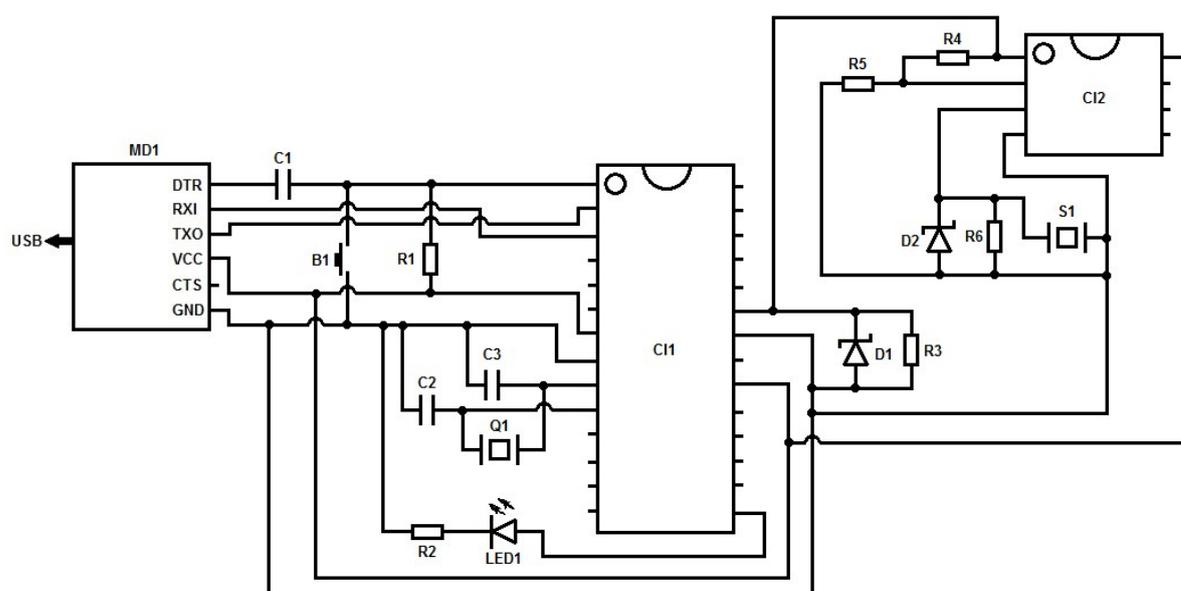


Fonte: Autoria própria.

Assim, esperava-se um pico repentino de força seguido de uma redução gradual da mesma, sinalizando o impacto inicial da ponta da abraçadeira em contato com o sensor e o arraste da ponta até o afastamento total da superfície do sensor. Esse comportamento representa de maneira aproximada o comportamento da força de usinagem durante a remoção de cavacos por um dente de uma fresa em uma situação de corte concordante.

Os sinais gerados pelos sensores foram recebidos e tratados por um circuito eletrônico microcontrolado (figura 20) que converte em sinal analógico (0 a 1024) e envia para um computador.

Figura 20 – Esquema do circuito eletrônico microcontrolado



Fonte: Autoria própria.

Onde o módulo conversor RS232-USB (MD1) possui um CI TT232RT responsável pela conversão dos dados enviados pelo microcontrolador ATmega328P (CI1) com comunicação serial RS-232. O capacitor cerâmico de 100 nF (C1), a chave tátil NA (B1) e o resistor de 10 k Ω 1/4 W (R1) compõem o circuito de reset para o microcontrolador. O oscilador de cristal 16 MHz (Q1) e os capacitores cerâmicos de

22 pF (C2 e C3) atuam no *clock* do microcontrolador. O diodo LED verde (LED1) e o resistor de 1 k Ω 1/4 W (R2) servem para indicar que o microcontrolador está em funcionamento. O diodo zener de 5,1 V (D1) e o resistor de 10 M Ω 1/4 W (R3) são responsáveis por limitar a tensão de entrada em 5 V (sinal analógico lido), que é a tensão máxima suportada pelo microcontrolador. Os resistores de 220 k Ω 1/4 W (R4) e de 10 k Ω 1/4 W (R5) possibilitam o ganho para amplificação do sinal no amplificador operacional LM358P (C12). Finalmente, o diodo zener 5,1 V (D2) e o resistor de 220 k Ω 1/4 W (R6) são responsáveis por limitar a tensão a ser amplificada em 5 V.

Os dados coletados nos experimentos foram inseridos e salvos em planilhas de dados para realização dos cálculos dos parâmetros, geração de gráficos e as análises subsequentes.

4.1.1 Planejamento experimental

O experimento em questão foi classificado como sendo um fatorial completo, onde foram considerados três fatores: a distância entre a superfície do sensor e o eixo em rotação (59 mm ou 61 mm); a velocidade de rotação da aparafusadeira (192 rpm, 348 rpm ou 1044 rpm) e o sensor utilizado (cápsula piezoelétrica, filme piezoelétrico ou resistor sensível a força).

O experimento foi realizado segundo a matriz de condições experimentais da tabela 5, onde os ensaios de cada condição experimental foram replicados duas vezes, com o objetivo de identificar a tendência de dispersão dos dados amostrais para a realização dos cálculos das características de interesse.

Tabela 5 – Matriz de condições experimentais para seleção do sensor

CONDIÇÃO EXPERIMENTAL	SENSOR	VELOCIDADE ROTACIONAL	DISTÂNCIA SENSOR-EIXO
1	Cápsula PZT (S1)	192rpm	59 mm
2	Cápsula PZT (S1)	192rpm	61 mm
3	Cápsula PZT (S1)	348rpm	59 mm
4	Cápsula PZT (S1)	348rpm	61 mm
5	Cápsula PZT (S1)	1044rpm	59 mm
6	Cápsula PZT (S1)	1044rpm	61 mm

7	Filme PVDF (S2)	192rpm	59 mm
8	Filme PVDF (S2)	192rpm	61 mm
9	Filme PVDF (S2)	348rpm	59 mm
10	Filme PVDF (S2)	348rpm	61 mm
11	Filme PVDF (S2)	1044rpm	59 mm
12	Filme PVDF (S2)	1044rpm	61 mm
13	Resistor (S3)	192rpm	59 mm
14	Resistor (S3)	192rpm	61 mm
15	Resistor (S3)	348rpm	59 mm
16	Resistor (S3)	348rpm	61 mm
17	Resistor (S3)	1044rpm	59 mm
18	Resistor (S3)	1044rpm	61 mm

Fonte: Autoria própria.

A ordem dos ensaios foi realizada de forma aleatória, de modo a não sofrer com a influência de vícios que interfiram nos resultados dos ensaios.

As características de interesse para este experimento são descritas como segue:

- Média do sinal: valor médio calculado de todos os valores do sinal analógico medidos ao longo da condição experimental.
- Amplitude entre picos: considera-se a diferença entre o valor do pico máximo e o pico mínimo nos ciclos das leituras dos sinais.
- Repetibilidade da média: é a capacidade do sistema de medição para dar, em condições de utilização definidas, as respostas muito próximas quando se aplica repetidamente o mesmo sinal de entrada. Quanto menor o seu valor maior será a precisão do sistema. Para o experimento, foi utilizada a seguinte equação (Albertazzi e Sousa, 2008):

$$Re = \pm \frac{t \cdot u}{\sqrt{n}} \quad (4.1)$$

Sendo:

Re Repetibilidade da média de "n" indicações de medições repetidas.

n número de medições repetitivas usadas para calcular a média.

t Coeficiente *t* de *Student* para 95,45% de probabilidade e n-1 graus de liberdade.

u incerteza-padrão obtida a partir da amostra com $n-1$ graus de liberdade, dada pela equação:

$$u = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (I_i - \bar{I})^2}{n-1}} \quad (4.2)$$

- Coeficiente de variação: refere-se ao coeficiente relativo à variância encontrada entre os picos dos ciclos sob condições de repetibilidade. Para o experimento, foi utilizada a seguinte equação:

$$Cv = \frac{s}{\bar{I}} \quad (4.3)$$

Sendo:

Cv Coeficiente de variação.

\bar{I} média das leituras.

s desvio-padrão da amostra, dado pela equação (Albertazzi e Sousa, 2008):

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (I_i - \bar{I})^2}{n-1}} \quad (4.4)$$

- Coerência do sinal com o fenômeno: avalia-se a coerência do gráfico gerado pelas medições realizadas com o que se espera do fenômeno reproduzido. Esta característica de interesse é qualitativa, uma vez que os resultados serão classificados como "fraco", "moderado" ou "forte", de acordo com as distribuições dos sinais nos gráficos.
- Integridade do sinal: trata-se do percentual de medições que não foram "perdidas" pelo sistema, considerando como referência a condição similar em que houve a quantidade maior de medições. Este item foi incluído, pois, em um experimento exploratório anterior foi identificado que nem todas as interações são captadas por todos os sensores. Para o experimento, foi utilizada a seguinte equação:

$$\text{Integridade do sinal} = \frac{q}{q_{ref}} \cdot 100 \quad (4.5)$$

Sendo:

q quantidade de medições do sensor em determinada condição experimental.

- q_{ref} quantidade de medições do sensor que obteve mais medições sob a mesma condição experimental. Tempo de recuperação: refere-se à capacidade do sensor de retornar ao seu estado normal de repouso, para leitura de um novo ciclo. Este parâmetro será avaliado visualmente nos gráficos que indicam o comportamento dos sinais, analisando o espaço de tempo em que o sinal demora para retornar ao zero entre ciclos. Trata-se de uma avaliação qualitativa, onde o sensor, sob a condição experimental, será classificado como "lento" ou "rápido".

Ainda é necessário citar que há fatores que podem exercer algum tipo de influência nos resultados, mas que, nesse experimento não foi possível controlar ou considerar, como:

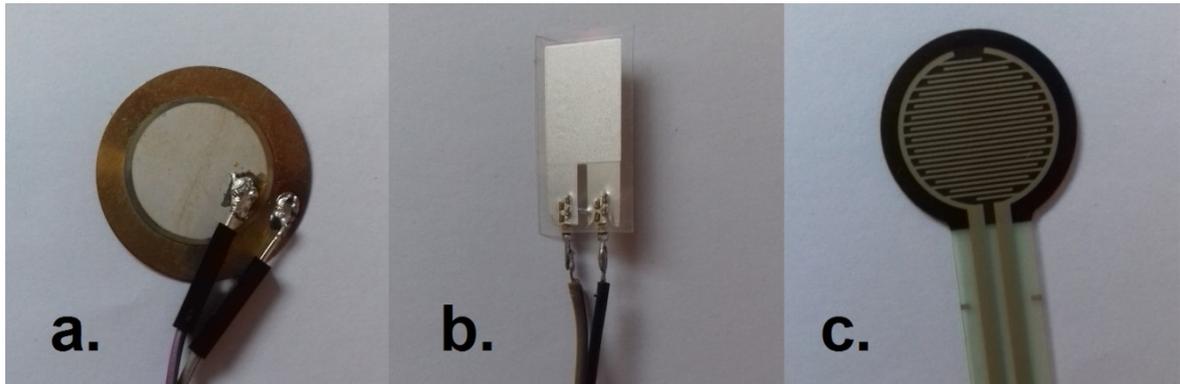
- Sensibilidade;
- Tempo de recuperação do material do sensor;
- Tempo de resposta do sensor;
- Ruídos advindos do circuito eletrônico;
- Excentricidade do eixo da aparafusadeira;
- Instabilidade da fixação da aparafusadeira;
- Influência da degradação do sensor advinda do uso;

4.1.2 Sensores e equipamentos

Os sensores utilizados são de alta disponibilidade comercial, de baixo custo e são descritos a seguir:

- Cápsula piezoelétrica que contém material cerâmico cristalino (titanato zirconato de chumbo – PZT) com a capacidade de gerar tensão elétrica ao ser comprimido por uma força externa (figura 21(a));
- Filme piezoelétrico é fabricado em material polimérico (fluoreto de polivinilideno – PVDF) possui propriedades piezoelétricas ao ser flexionado, gerando sinais de tensão elétrica (figura 21(b));
- Resistor sensível à força: trata-se de um componente que varia de resistência conforme sofre a atuação de uma força externa (figura 21(c)).

Figura 21 – Sensores



Fonte: Autoria própria.

Os demais componentes e equipamentos utilizados na montagem do experimento podem ser visualizados na figura 19 e são listados a seguir:

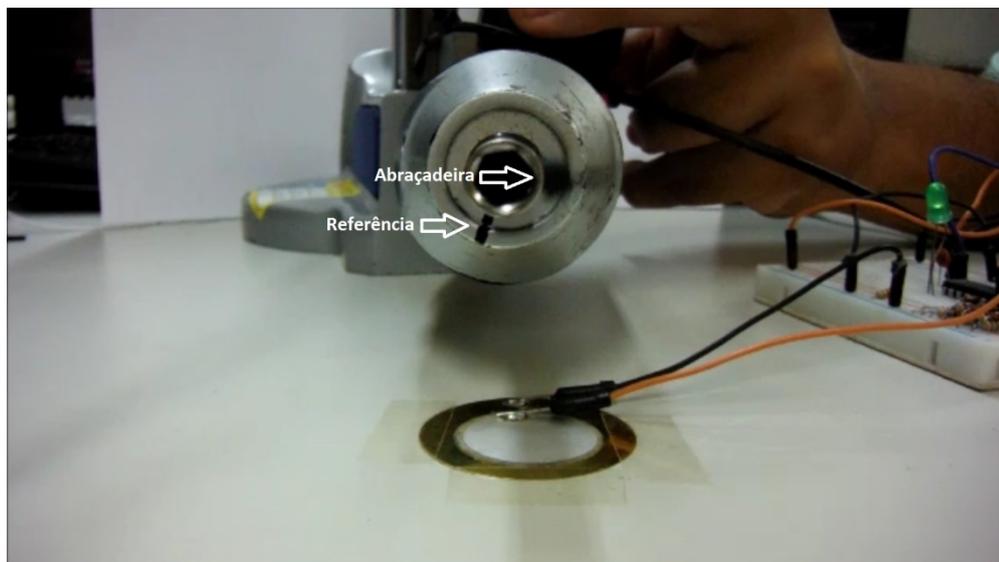
- Aparafusadeira modelo BOSCH GSR1080-LI;
- Aparafusadeira modelo SKIL TWISTER 2000;
- Abraçadeira de nylon 6.6 – 200 mm x 3,6 mm;
- Medidor de alturas;
- Acessório para fixação e ajuste de altura da aparafusadeira;
- Computador portátil com processador Intel Core i5-4210U e memória RAM de 8 GB.
- Arduino IDE;
- Placa de circuito eletrônico microcontrolado;
- Circuito divisor de tensão;
- Módulo de conversão RS232 para USB;
- Temporizador.

4.2 Análise de tempo de recuperação

Uma vez que a escolha do sensor se deu para a cápsula piezoelétrica (conforme relatado no subcapítulo 5.1), se fez necessária uma análise visual simples para quantificar melhor o seu tempo de recuperação. Foram feitas marcações no eixo e na parte fixa da aparafusadeira, esta foi rotacionada com 185 rpm e a interação do sensor com a abraçadeira foi filmada em HD com 30 frames por segundo, onde cada frame ilustra o posicionamento da abraçadeira naquele momento da rotação. A

figura 22 apresenta, como exemplo, a imagem de um dos dez frames que capturaram uma rotação completa da abraçadeira.

Figura 22 – Exemplo de frame



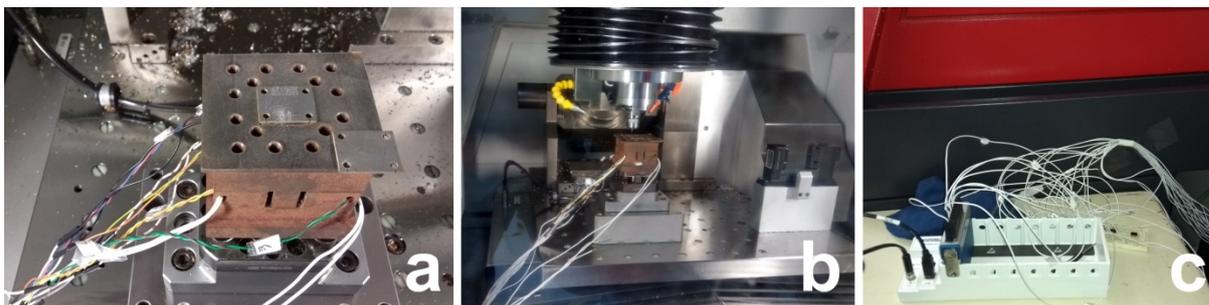
Fonte: Autoria própria.

4.3 Experimento de validação do conceito

Uma vez concluído o processo de desenvolvimento do conjunto do primeiro protótipo, foi preciso que este tivesse seu funcionamento avaliado com o objetivo de qualificar sua capacidade de detecção e medição de sinais de forças originários do contato ferramenta (fresa) e material da peça no fenômeno de formação e remoção de cavacos ao longo de operações de microfresamento.

O experimento em questão foi concebido com a configuração de aparato experimental ilustrada na figura 23, onde foram usinados microcanais em diferentes níveis de parâmetros de velocidade de corte, avanço por dente e profundidade de corte. Observa-se na figura 23 a montagem do experimento de validação conceitual, a peça colada no dinamômetro e os cabos dos sensores à amostra (a), o conjunto do protótipo do dinamômetro fixado no centro de usinagem (b), bem como os circuitos de amplificação de sinais e dispositivo de aquisição de dados com os cabos que conectam ao computador (c).

Figura 23 – Configuração da montagem experimental de validação de conceito.



Fonte: Autoria própria.

No procedimento experimental foram realizados cortes de canais em cheio com penetração de trabalho igual ao diâmetro da fresa, em um recorte de chapa de aço inoxidável AISI 304. Os canais foram usinados com 4 mm de comprimento, sendo o corte iniciado a uma distancia de 1 mm da peça. Cada canal foi usinado em três passes com as mesmas configurações de parâmetros, sendo o primeiro passe feito na cota zero do eixo Z e o segundo e o terceiro passes com igual a_p , conforme planejamento experimental. O primeiro passe tinha como objetivo garantir que o segundo passe não resultasse em sobrecarga para a ferramenta, uma vez que removia todo o material acima da cota zero. O segundo passe tinha como objetivo nivelar e homogeneizar a superfície do canal, mas, também foi considerado como útil para as análises, embora sua profundidade fosse não homogênea, uma vez que desvios de planeza da superfície bruta entrando na peça, ou seja, abaixo da cota zero em Z, reduzissem pontualmente a profundidade de corte. O terceiro passe tinha como objetivo fazer o corte em condições homogêneas de a_p .

A amplificação de sinais e aquisição de dados foi realizada com o uso do circuito eletrônico de amplificação e o DAQ com software *Labview*, respectivamente, ambos descritos no capítulo 3.

4.3.1 Aparato experimental

Os equipamentos, ferramentas e recursos utilizados no experimento constituem o aparato experimental e são descritos como seguem:

- Centro de usinagem CNC Kern Pyramid Nano, dotado de um sistema de sondagem de apalpação com transmissão infravermelha sem fio para a medição da peça de trabalho a ser usinada e um preset laser para verificar o comprimento, o raio e precisão concêntrica da ferramenta mesmo em altas velocidades do fuso.
- Ferramenta fresa de topo reto inteiriça com 0,45 mm de diâmetro e dois dentes, fixada num porta-ferramenta por meio de pinça de fixação de fresa.
- Sistema de fixação com *pallet* da System 3R, com amortização de vibração de peças de trabalho, para fixação do protótipo.
- Protótipo do dispositivo de medição de força (dinamômetro) montado com as cápsulas piezoelétricas na mesma configuração expressa na figura 15.
- Peça de chapa de aço inox AISI 304, fixada no centro da plataforma do dinamômetro por meio de supercola.
- Dispositivo modular para aquisição de dados NI 9172, com um módulo de entrada de sinal de tensão NI 9201 acoplado.
- Computador com interface para ajuste de taxa amostral, seleção dos canais de entrada analógica de tensão e visualização gráfica dos sinais, desenvolvida no software *Labview* versão 8.2.
- Circuito eletrônico para amplificação dos sinais dos sensores em 7,8 vezes.
- Cabos de cobre com diâmetros e comprimentos variados.

4.3.2 Planejamento experimental

Conforme anteriormente mencionado a usinagem dos canais foi realizada com cortes em cheio, sendo a penetração de trabalho igual ao diâmetro da ferramenta fresa. O experimento é classificado como fatorial completo, os fatores controláveis são avanço por dente, velocidade de corte e profundidade de corte, variados em dois níveis. Portanto, as combinações possíveis são as apresentadas na tabela 6, foram usinados oito canais em condições experimentais diferentes, com uma réplica cada, para quantificar a erro experimental.

Tabela 6 – Matriz de condições experimentais para usinagem dos canais

Canal	Avanço por Dente (f_z)	Velocidade de Corte (v_c)	Profundidade de Corte (a_p)
1	2 μ m/dente	50 m/min	30 μ m
2	2 μ m/dente	50 m/min	60 μ m
3	2 μ m/dente	20 m/min	30 μ m
4	2 μ m/dente	20 m/min	60 μ m
5	4 μ m/dente	50 m/min	30 μ m
6	4 μ m/dente	50 m/min	60 μ m
7	4 μ m/dente	20 m/min	30 μ m
8	4 μ m/dente	20 m/min	60 μ m

Fonte: Autoria própria

O objetivo de se variar os parâmetros de usinagem é verificar a coerência do que está sendo medido, uma vez que os resultados de estudos experimentais apresentados por diversas referências nesta área permite esperar um comportamento de variação de força de usinagem para cada parâmetro alterado. O comportamento esperado é de aumento de força para sempre que as grandezas de penetração (a_p e f_z) aumentam. As condições com variação de v_c tem como objetivo verificar a robustez na identificação do comportamento citado acima.

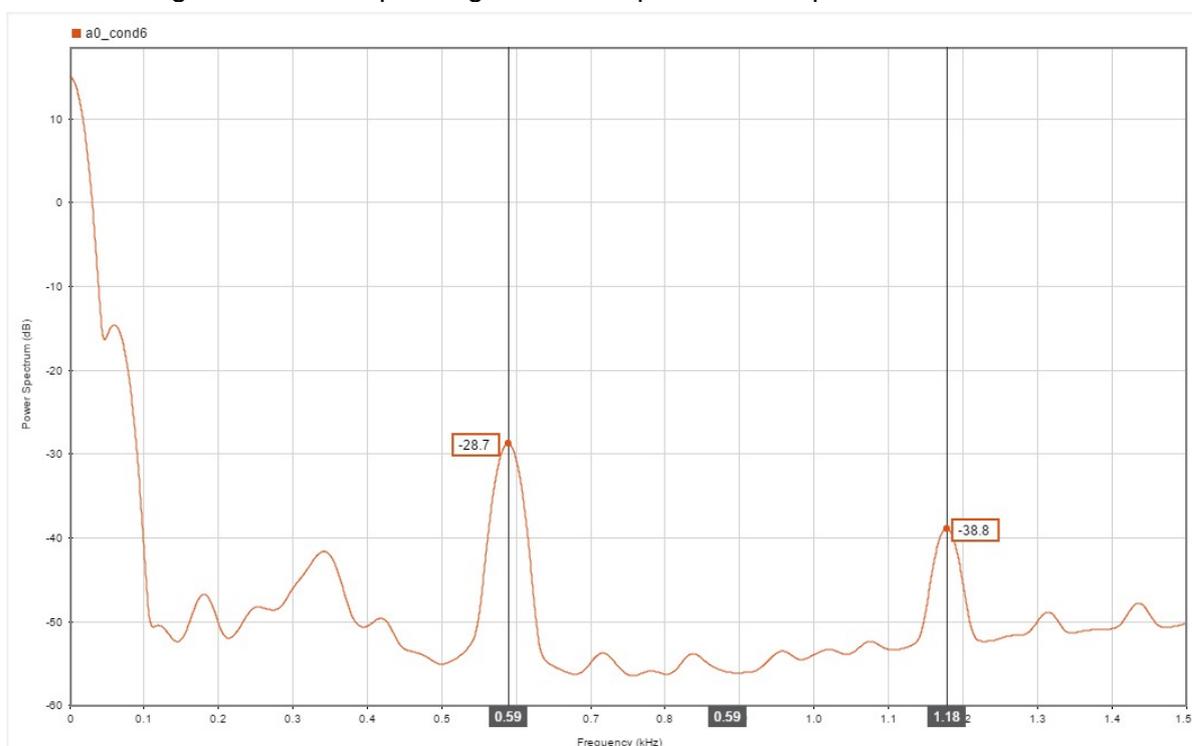
4.3.3 Procedimento de análise de dados

A análise dos dados do experimento foi realizada utilizando o software de processamento de dados *Matlab* em sua versão *R2017b*, pois, trata-se de uma ferramenta poderosa de amplas aplicações que disponibiliza um ambiente de alta performance voltado para análises numéricas, matriciais, processamentos, gráficos, dentre outros. Foi utilizado o aplicativo *Signal Processing Toolbox*, com o qual é possível analisar e comparar sinais nos domínios de tempo, frequência e tempo-frequência, identificar padrões e tendências, extrair recursos e desenvolver e validar algoritmos personalizados para obter informações sobre os dados.

No domínio do tempo, os comportamentos dos sinais foram analisados com a criação e interpretação de gráficos para relacionar o valor de tensão dos sensores com o fenômeno de usinagem que foi medido, com o objetivo de captar a influência das variações dos parâmetros das condições experimentais.

No domínio da frequência, os dados foram analisados com a criação de gráficos que simbolizam o espectro das frequências dos sinais captados pelos sensores, através do algoritmo da transformada rápida de Fourier (FFT) que converte um sinal de seu domínio original do tempo para uma representação no domínio da frequência. Foram avaliadas as intensidades associadas aos picos de frequências de passagens dos dentes da fresa na peça, para um e dois dentes, também, com o objetivo de evidenciar a influência das variações dos parâmetros das condições experimentais. A figura 24 ilustra um exemplo de gráfico do espectro de frequências de sinais com o destaque para os picos de intensidades associadas às frequências do fenômeno identificados.

Figura 24 – Exemplo de gráfico do espectro de frequências de sinais.



Fonte: Autoria própria.

Com o objetivo de padronizar a quantidade amostral nas condições experimentais foi estabelecido que, em todas as condições, os gráficos dos espectros de frequências de sinais foram gerados por 350 ciclos do fenômeno ocorridos na parte central do intervalo de tempo de corte de cada condição experimental. Deste modo, foram calculados tempos amostrais diferentes para cada velocidade de corte, conforme tabela 7.

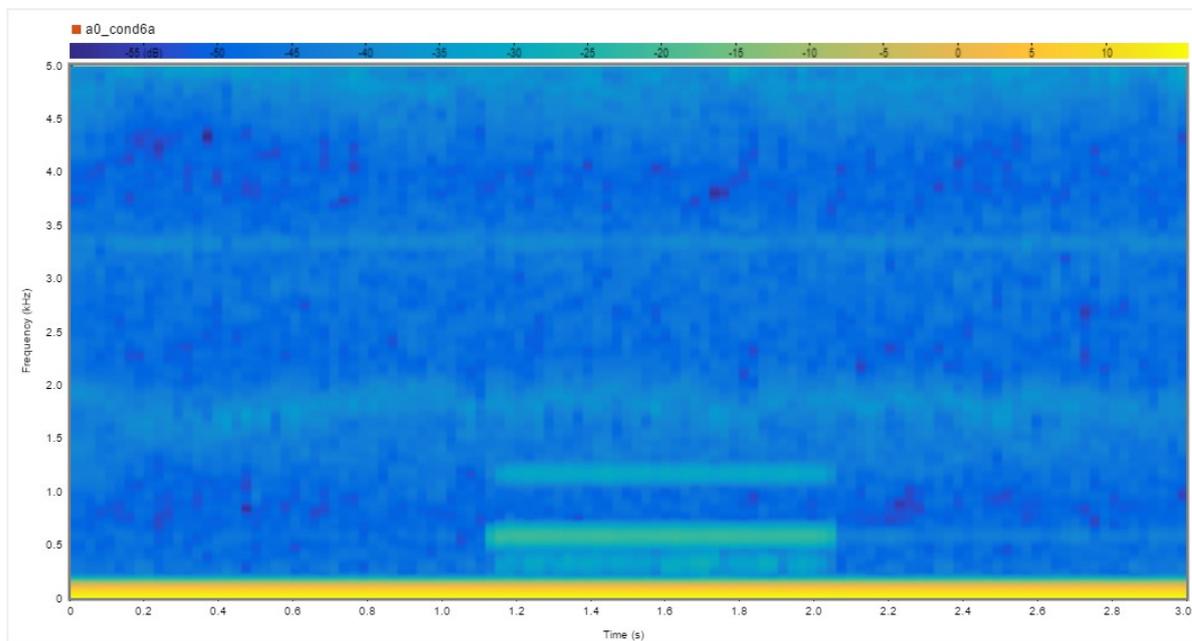
Tabela 7 – Parâmetros utilizados para cálculos dos tempos amostrais

Condição	n (rpm)	V_f (mm/min)	Tempo total do corte (s)	Ciclos em 4 mm	Tempo amostral (s)
1	35367,77	141,47	1,70	1000	0,59
2	35367,77	141,47	1,70	1000	0,59
3	14147,11	56,59	4,24	1000	1,48
4	14147,11	56,59	4,24	1000	1,48
5	35367,77	282,94	0,85	500	0,59
6	35367,77	282,94	0,85	500	0,59
7	14147,11	113,18	2,12	500	1,48
8	14147,11	113,18	2,12	500	1,48

Fonte: Autoria própria.

Foi utilizado o espectrograma das frequências dos sinais para identificar o trecho do sinal coletado onde houve a usinagem do canal. O espectrograma é um recurso do aplicativo de análise de sinais do software *Matlab*. E se trata de um gráfico onde no eixo vertical são impressas as intensidades associadas às frequências conforme sua magnitude, seguindo um gradiente de cores que tem como extremos a cor azul escura e a cor amarela amarelo, sendo magnitudes baixas e altas, respectivamente. Já o eixo horizontal do gráfico apresenta o tempo das intensidades associadas às frequências dos sinais. Deste modo, é possível observar no exemplo da figura 25, que apresenta o espectrograma da condição experimental de número 6, as intensidades associadas aos espectros de frequência do fenômeno de usinagem do canal que ocorreu entre o tempo de 1,1 segundos e 2,1 segundos, em frequências perto de 0,5 kHz e 1,0 kHz, com intensidades próximas de -25 dB e -35 dB, respectivamente.

Figura 25 – Exemplo de espectrograma de frequência de sinais



Fonte: Autoria própria.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Esta seção analisa os dados obtidos por meio dos experimentos, balizando algumas decisões de projeto e evidenciando a interpretação dos resultados parciais.

5.1 Seleção do elemento sensor

O experimento utilizado para seleção do sensor que será utilizado no projeto apresentou diversos elementos que apontam para a escolha da cápsula piezoelétrica. A tabela 8 apresenta os resultados dos valores das características de interesse encontrados em cada condição experimental testada.

Tabela 8 – Resultados das condições experimentais da seleção do sensor

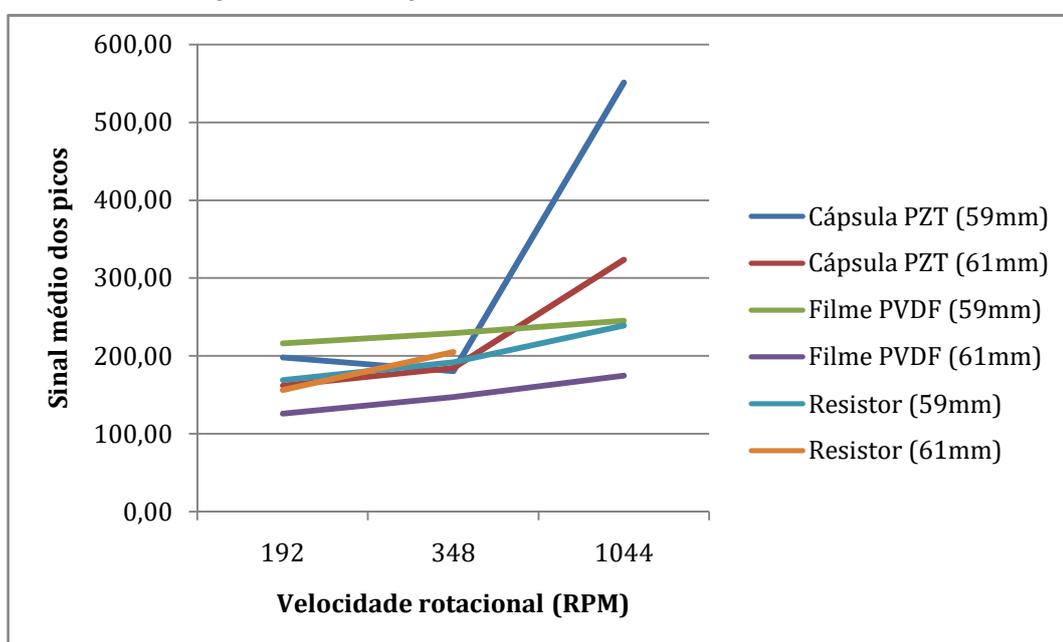
COND.	SENSOR	mm	rpm	MÉDIA DO SINAL	AMPLITUDE ENTRE PICOS	Re	Cv	COERÊNCIA SINAL-FENÔMENO	INTEGRIDADE DO SINAL	TEMPO DE RECUPERAÇÃO
1	Cápsula PZT	59	192	198,36	14,00	1,14	3%	FORTE	97,5%	LENTO
2		61	192	161,88	32,67	3,17	9%	FORTE	94,6%	LENTO
3		59	348	180,69	30,00	1,74	6%	FORTE	90,7%	LENTO
4		61	348	184,28	25,00	3,11	11%	FORTE	89,6%	LENTO
5		59	1044	551,16	247,33	4,39	9%	FORTE	74,0%	LENTO
6		61	1044	323,55	186,00	7,84	27%	FORTE	85,6%	LENTO
7	Filme PVDF	59	192	216,26	17,00	1,39	3%	FRACO	96,0%	RÁPIDO
8		61	192	126,11	97,67	6,61	25%	FRACO	95,6%	RÁPIDO
9		59	348	229,35	65,00	2,74	8%	FRACO	95,1%	RÁPIDO
10		61	348	147,51	116,00	6,23	28%	FRACO	95,5%	RÁPIDO
11		59	1044	245,43	309,67	6,00	28%	FRACO	93,5%	RÁPIDO
12		61	1044	174,77	198,33	4,32	28%	FRACO	100,0%	RÁPIDO
13	Resistor	59	192	169,14	34,33	4,31	12%	MODERADO	100,0%	RÁPIDO
14		61	192	156,49	74,00	3,88	12%	MODERADO	100,0%	RÁPIDO
15		59	348	192,25	44,33	2,17	7%	MODERADO	100,0%	RÁPIDO
16		61	348	204,97	54,67	3,37	11%	MODERADO	100,0%	RÁPIDO
17		59	1044	239,19	432,67	9,18	44%	MODERADO	100,0%	RÁPIDO
18		61	1044	-	-	-	-	-	-	-

Fonte: Autoria própria.

Média e Amplitude

De uma forma geral, foi constatado que os valores de sinais médios medidos foram diretamente proporcionais às velocidades rotacionais, para todos os sensores. Como também as amplitudes entre picos apresentam a mesma relação. Conforme pode-se observar nos gráficos das figuras 26 e 27.

Figura 26 – Relação entre velocidade e valor de sinais

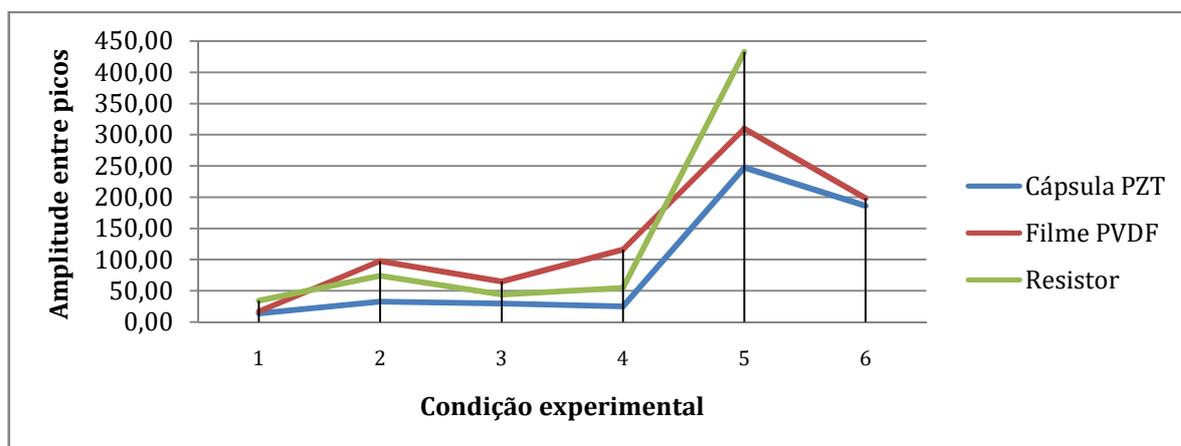


Fonte: Autoria própria.

Foi verificado que a menor distância entre sensor e atuador, quase sempre, apresenta uma força maior, considerando as mesmas condições.

Ao observar a figura 27, a seguir, nota-se que os valores de amplitude entre picos dos sinais dos sensores sendo submetidos às mesmas condições de velocidade e distância possuem comportamentos similares. Entretanto, evidenciou-se que a cápsula PZT por possui os menores valores de amplitude entre picos.

Figura 27 – Amplitude entre picos dos sinais nas mesmas condições



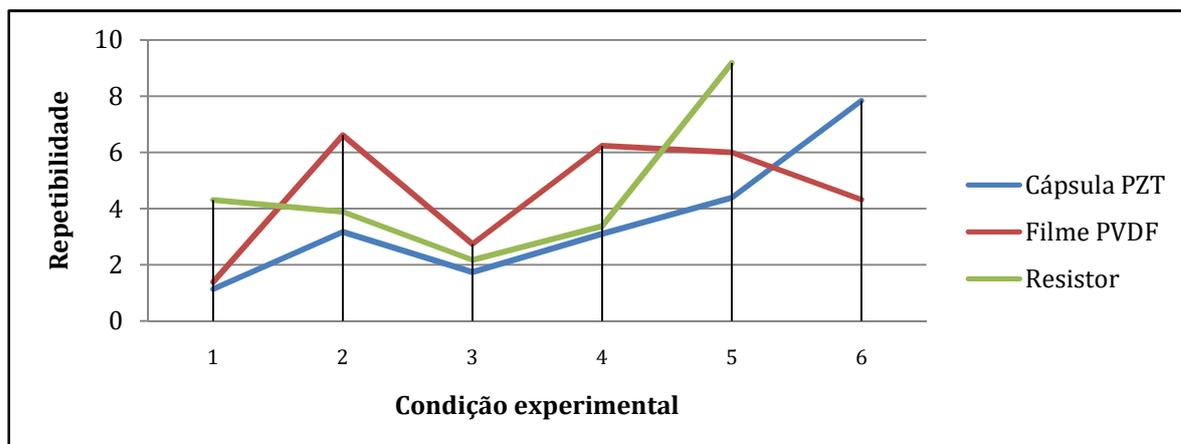
Fonte: Autoria própria.

Repetibilidade

Através da repetibilidade da média das medições pode-se extrair informações acerca do comportamento do erro aleatório proveniente das medições dos sensores testados, uma vez que o valor calculado para repetibilidade denota a precisão do sistema, conforme descrito anteriormente, quanto menor o valor de repetibilidade maior será a precisão do sistema em questão. Para tanto, fica evidente no gráfico da figura 28, que o sensor tipo cápsula PZT mais uma vez dispõe de características superiores por apresentar os menores valores para repetibilidade na maioria das comparações com os outros sensores sob as mesmas condições experimentais de velocidade e distância.

Enquanto o sensor resistor sensível à força quase acompanha os mesmos valores de repetibilidade do sensor tipo cápsula PZT em alguns casos, em outros casos o sensor resistor apresenta valores maiores que o dobro dos valores da cápsula PZT. Ao passo que o sensor tipo filme PVDF apresenta um comportamento imprevisível e inferior aos demais, no quesito repetibilidade.

Figura 28 – Repetibilidade de diferentes sensores nas mesmas condições

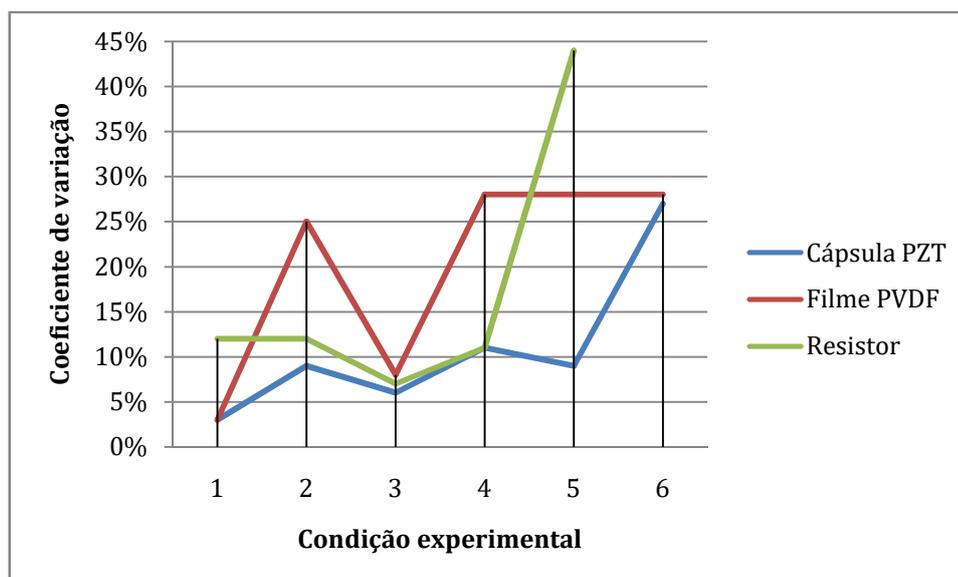


Fonte: Autoria própria.

Coeficiente de variação

Os valores médio calculados como coeficientes de variação de cada sensor foram de 11%, 20% e 17%, para o sensor cápsula PZT, filme PVDF e resistor, respectivamente. São valores interessantes considerando que existe uma porção de fatores que não foram possíveis de controlar ou mensurar. Na figura 29, observa-se na comparação dos valores dos sensores submetidos às mesmas condições experimentais de velocidade e distância que os coeficientes aumentam proporcionalmente às velocidades.

Figura 29 – Coeficiente de variação de diferentes sensores nas mesmas condições



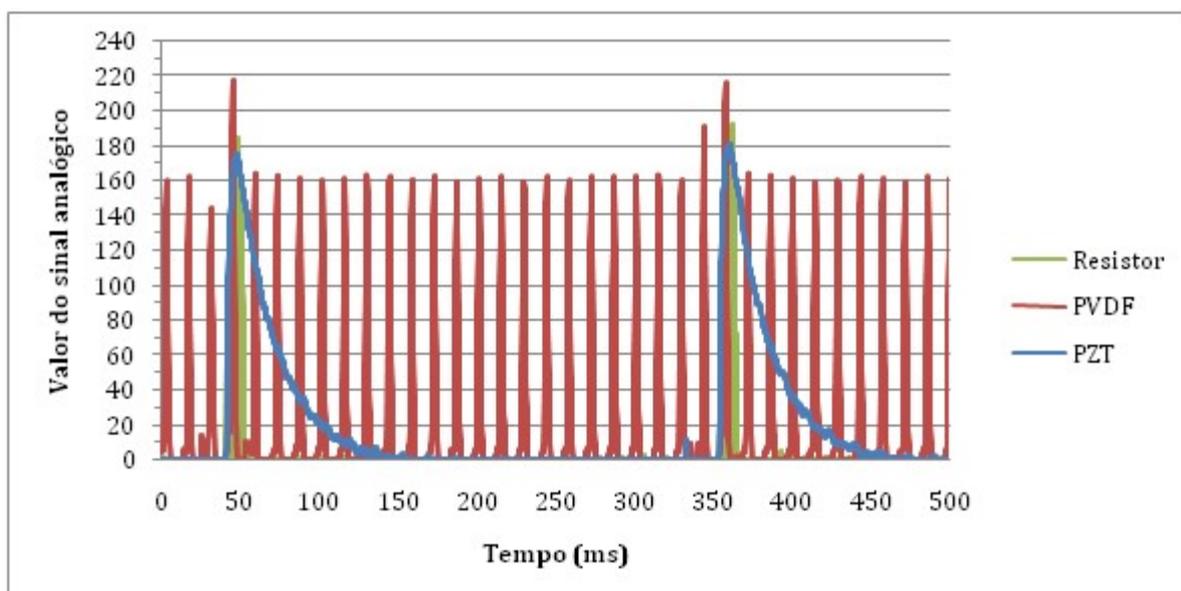
Fonte: Autoria própria.

Mais uma vez, o sensor tipo cápsula piezoelétrica apresenta os menores valores de variação em todas as situações. O filme PVDF praticamente se mantém com o mesmo valor de coeficiente de variação nas três últimas condições. O resistor apesar de se manter em valores admissíveis nas primeiras condições, assume um valor de 44% na última condição experimental em que foi possível medir nos ensaios.

Coerência entre sinal e fenômeno

Para análise da coerência entre sinal e fenômeno foram gerados gráficos dos valores de um ciclo de medição de cada sensor. Um exemplo representativo é apresentado na figura 30. O comportamento esperado para o sinal dado o fenômeno seria de um pico brusco seguido de uma queda gradual do sinal até próximo a zero, evidenciando o momento em que a abraçadeira colide com a superfície do sensor e em seguida é arrastada até perder o contato com o mesmo gradualmente.

Figura 30 – Comparação entre ciclos diferentes nas mesmas condições



Fonte: Autoria própria.

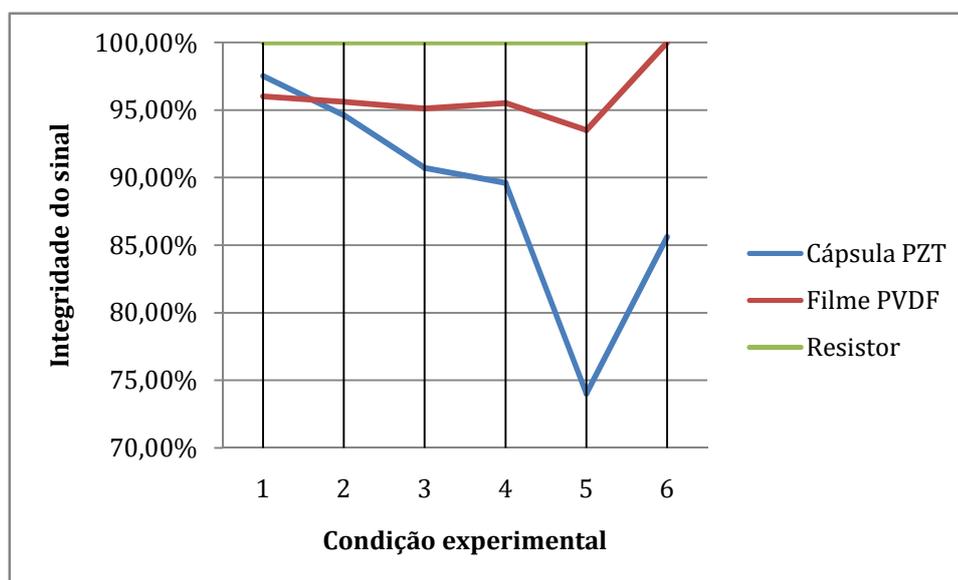
Na figura 30 é possível identificar que o sensor tipo cápsula PZT é o que melhor se aproxima com do comportamento ideal esperado para o critério coerência sinal-

fenômeno. O sensor resistor sensível à força apresenta um comportamento similar, com a diferença da queda do sinal que não é tão gradual quanto esperado. Já o sensor filme PVDF apresenta um comportamento totalmente inesperado, com diversos picos em momentos onde não deveriam haver excitações.

Integridade do sinal

De modo geral os sensores demonstram poucas perdas de sinais nas leituras, cerca de 10% na maioria dos casos. Porém, a figura 31 ilustra que nas condições experimentais de maiores velocidades foram identificadas maiores perdas, possivelmente a quantidade de medições efetuadas bem como os valores dos sinais medidos guardem relação com a integridade dos sinais. Os casos das condições experimentais 5 dos sensores cápsula PZT e filme PVDF, foram as condições que apresentaram o maior valor médio do sinal para o sensor e resultaram no menor valor de integridade de sinal.

Figura 31 – Integridade do sinal de diferentes sensores nas mesmas condições



Fonte: Autoria própria.

O sensor resistor sensível a força apresentou os melhores resultados para integridade do sinal, sendo referência na comparação com os outros sensores no

questo integridade do sinal. Porém, foi constatado que o mesmo, graças à sua robustez, é limitado na sensibilidade ao medir pequenas variações nos sinais de força, como evidencia a condição experimental 18 que não apresentou sinais significativos para identificação dos ciclos de medições.

Tempo de recuperação

Ainda conforme a figura 30, observa-se que o comportamento dos sinais diverge bastante consoante o sensor utilizado. Apenas por análise visual qualitativa é possível observar que o sensor em cápsula PZT não dispõe de capacidade suficiente para recuperar sua condição normal, que não deveria gerar sinal por não haver contato algum com a abraçadeira. Para tanto, o sensor piezoelétrico em cápsula foi classificado como "lento" no quesito tempo de recuperação, enquanto que os demais sensores foram classificados com capacidade de recuperação "rápida".

Elemento sensor selecionado

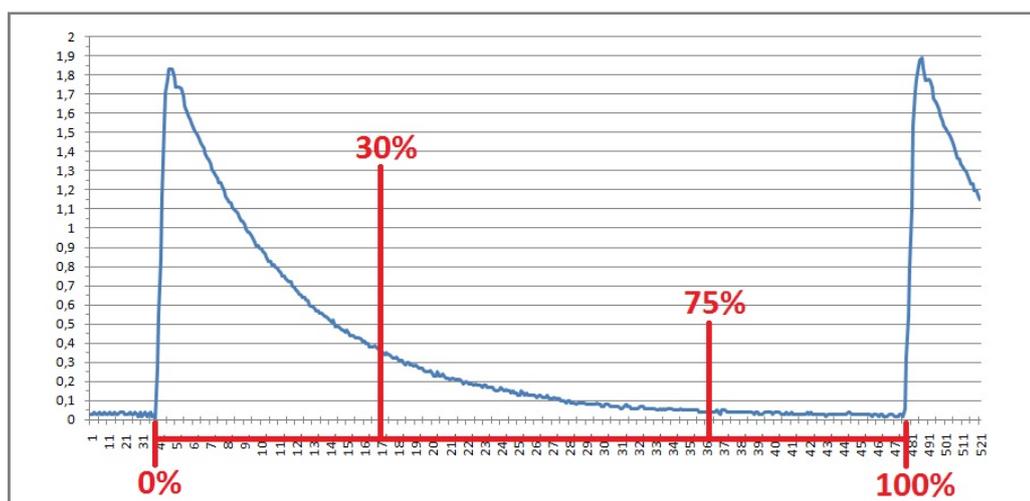
O experimento realizado para seleção do elemento sensor do transdutor a ser utilizado no protótipo do sistema de medição de forças resultou na escolha da cápsula piezoelétrica por esta apresentar a melhor precisão e confiabilidade de medição, evidenciado através do desempenho superior nas características de interesse amplitude entre picos, repetibilidade, coeficiente de variação e coerência sinal-fenômeno.

5.2 Tempo de recuperação da cápsula piezoelétrica

A partir de uma análise visual das filmagens realizadas foi observado que uma rotação completa do eixo se dá em cerca de dez frames, sendo que, em no máximo três desses dez frames, percebe-se o contato entre o sensor e a abraçadeira. Considerando 360° como sendo 100% de uma rotação e que a rotação foi dividida em dez frames, cada frame representa 36° ou 10% de cada rotação, ou seja, o

contato abraçadeira-sensor se dá em, no máximo, 108° (30%) da rotação completa da abraçadeira ou 97,3 ms. O gráfico da figura 32 apresenta uma sobreposição dessas duas informações.

Figura 32 – Percentual em que há contato entre sensor e atuador no ciclo.



Fonte: Autoria própria.

A curva em azul é a medição de tensão elétrica emitida pela cápsula piezelétrica, a barra vermelha na parte inferior do gráfico representa um ciclo do fenômeno (uma rotação da abraçadeira) iniciado com o início do pico de tensão (início de contato abraçadeira-sensor) e a barra vertical vermelha indica 30% deste ciclo, que é o momento em que o contato abraçadeira-sensor cessa.

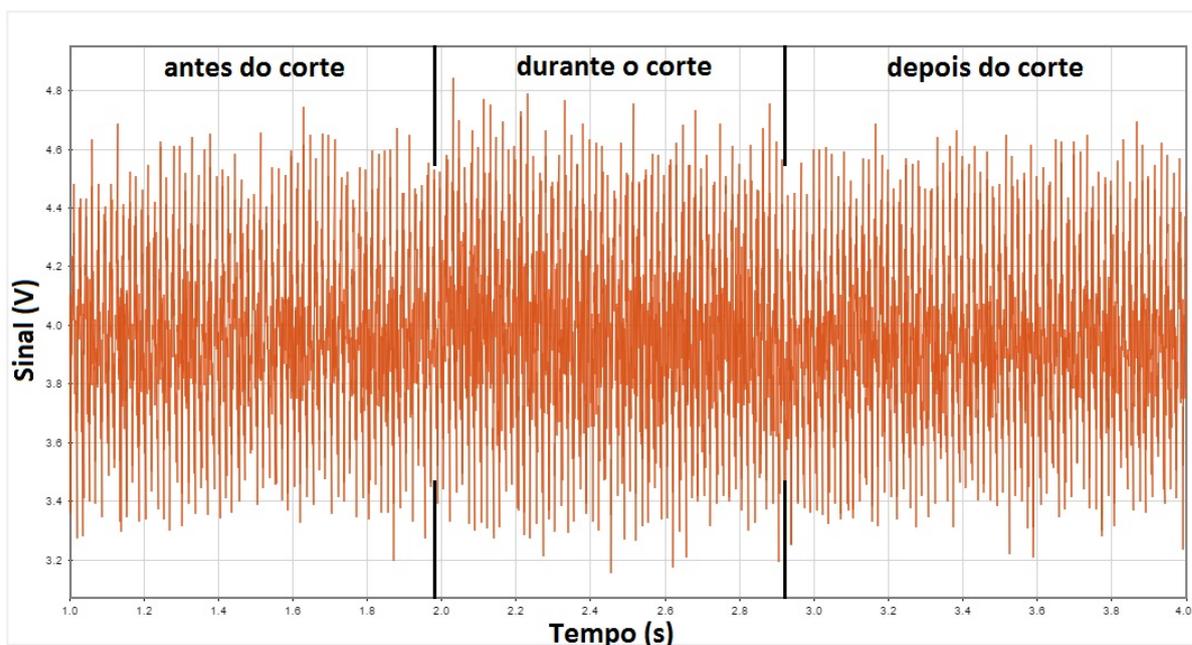
Como após 30% do ciclo já não há mais contato identificável abraçadeira-sensor, em uma situação hipotética em que o sensor se recuperasse imediatamente, o sinal de tensão medido deveria retornar a um valor próximo de zero nas imediações da marca. Conclui-se, portanto, que o sinal de tensão medido além da barra vertical corresponde ao fenômeno de recuperação do sensor. Outras informações importantes que podem ser extraídas deste gráfico é a de que a recuperação da cápsula piezelétrica utilizada se encerra em cerca de 75% do ciclo e que, quando o novo contato acontece, o sensor já se recuperou. Isso significa que, a medição de tensão deveria retornar a um valor próximo de zero nas imediações da marca de

30%. Portanto, o sensor em questão apresenta no máximo cerca de 45% ou 145,9 ms de seu ciclo como tempo de recuperação, conforme apresentado.

5.3 Validação do protótipo do conceito

O gráfico da figura 33 ilustra o comportamento de um dos sensores numa das condições experimentais em que foram usinados os canais. O tamanho total da amostra exibida no gráfico foi de 3 segundos, onde não é possível evidenciar mudanças significativas no comportamento do sinal antes, durante ou depois do corte.

Figura 33 – Comportamento do sinal de um sensor, antes, durante e depois do corte.

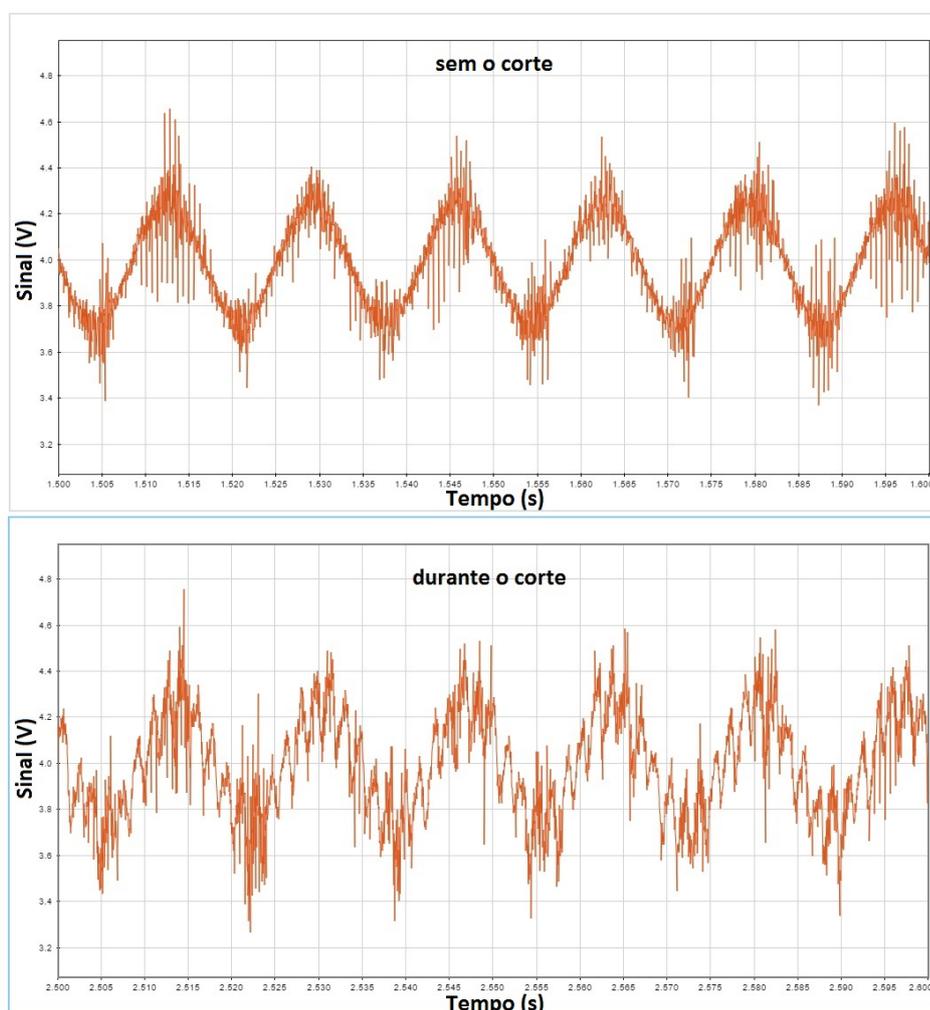


Fonte: Autoria própria.

O corte se inicia perto dos 2 segundos e termina perto dos 2,9 segundos, porém, com a análise do gráfico da figura 33 observa-se que não existe possibilidade de obter conclusões significativas acerca da capacidade de sensibilidade do sensor em perceber os sinais do fenômeno diante da enorme quantidade de ruídos captados pelo mesmo.

Entretanto, ao reduzir o tamanho da amostra para 100 ms, no gráfico sem o corte da figura 34 é possível se observar que o sistema consegue registrar as ondulações de frequência da rede elétrica, que se dimensiona em cerca de 60 Hertz, percebida no gráfico por 6 ciclos oscilatórios. Já na região do gráfico em que ocorre o corte, evidencia-se uma nítida perturbação dos sinais se comparado com o gráfico onde não ocorre corte, tal situação demonstra que o sistema tenha sim capacidade de captar os sinais gerados pelo fenômeno de usinagem.

Figura 34 – Sinal parcial de um sensor, sem e com a ocorrência de corte.



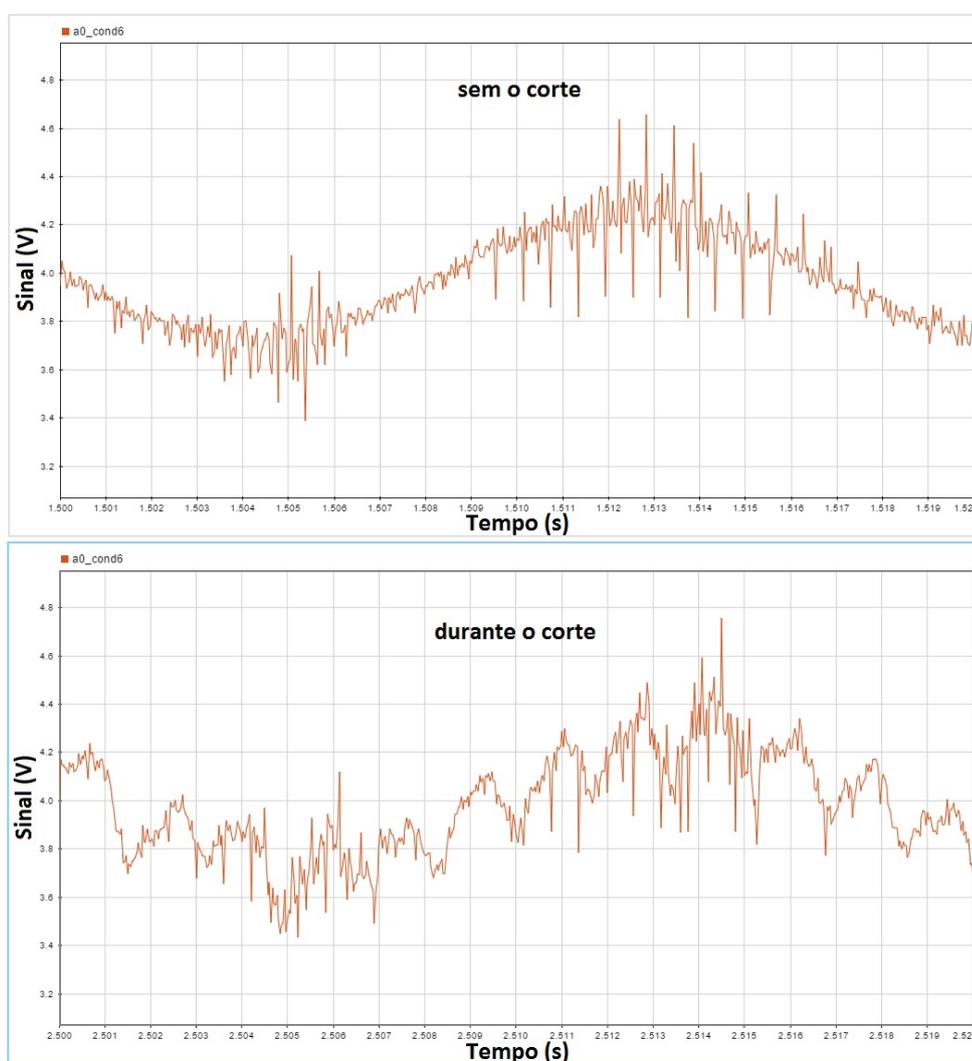
Fonte: Autoria própria.

A contagem de picos das perturbações do sinal dentro de cada ciclo de frequência da rede elétrica (10 picos) bem como a contagem de picos totais das perturbações do sinal dentro da amostragem (59 picos) guardam relação com a velocidade

rotacional utilizada para o experimento, uma vez que a velocidade rotacional utilizada foi de 35368 rpm, o que significa que no espaço amostral de 100 ms ocorreriam cerca de 59 rotações, exatamente conforme a quantidade de picos do gráfico.

Os gráficos da figura 35 apresentam os comportamentos do sinal sem que haja corte e durante a ocorrência do corte num intervalo de tempo de 20 ms, o que seria o tempo equivalente a 12 rotações da ferramenta de usinagem conforme os parâmetros configurados na condição experimental em questão.

Figura 35 – Amostra parcial do sinal de um sensor equivalente a 12 rotações da fresa.



Fonte: Autoria própria.

Aqui fica evidente que o sistema é capaz de captar os sinais do fenômeno, porém, devido à quantidade de ruídos captados, eventualmente não existe padrão com confiabilidade suficiente para se realizar uma validação do conceito através da análise dos sinais no domínio do tempo.

Diante da enorme quantidade de ruídos e da falta de confiabilidade para se realizar uma análise com os dados dos sinais relacionados no domínio do tempo, a maior parte da análise para validação da capacidade do conceito foi realizada no domínio da frequência.

5.3.1 Resultados das análises no domínio da frequência

Os resultados apresentados na tabela 9 foram coletados em gráficos dos espectros de frequências de sinais de cada condição experimental, e quantificam as intensidades associadas aos espectros de frequência em três sensores nas frequências de passagens de um e dos dois dentes de corte da ferramenta. Tratam-se dos valores das frequências de maiores intensidades em cada condição experimental, bem como dos valores médios, das condições experimentais e réplicas, das maiores intensidades associadas às devidas frequências de passagem de um ou dois dentes da ferramenta na usinagem dos canais. Na relação de intensidade utilizada, as maiores intensidades associadas aos espectros de frequência são as que mais se aproximam de zero decibel (dB).

Tabela 9 – Resultados das intensidades de sinal nas frequências de excitação das condições experimentais.

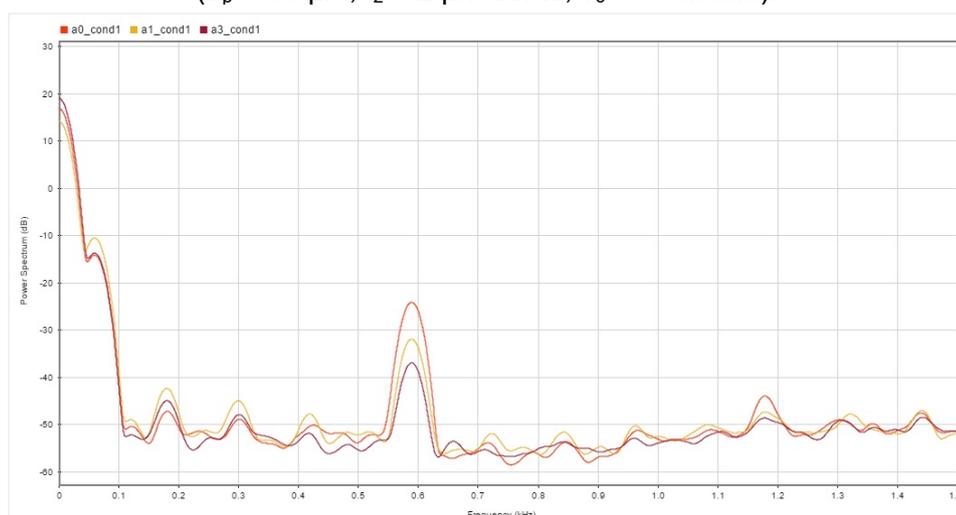
Condição	Frequência um dente (kHz)	Intensidade (dB)			Frequência dois dentes (kHz)	Intensidade (dB)		
		S1	S2	S3		S1	S2	S3
1	0,59	-24,6	-32,5	-37,5	1,18	-45,1	-48,5	-49,3
2	0,59	-20,0	-26,5	-31,8	1,18	-35,5	-43,2	-39,9
3	0,24	-17,6	-19,0	-28,7	0,47	-17,3	-20,8	-28,1
4	0,24	-13,7	-19,1	-27,0	0,47	-20,1	-24,1	-32,5
5	0,59	-21,2	-33,4	-33,9	1,18	-40,1	-45,2	-46,3
6	0,59	-21,4	-24,1	-34,8	1,18	-31,1	-37,4	-36,1
7	0,24	-15,0	-19,5	-28,7	0,47	-22,3	-24,4	-36,8
8	0,24	-20,0	-19,3	-31,1	0,47	-18,2	-23,6	-30,5

Fonte: Autoria própria.

Observa-se que em todas as condições as frequências calculadas para a ocorrência do fenômeno com um ou dois dentes estão de acordo com os dados que foram coletados pelos gráficos dos espectros de frequências de sinais. Também é possível evidenciar que os valores de intensidade de sinal captados são divergentes nos três sensores, na maioria dos casos.

O gráfico dos espectros de frequências de sinais da figura 36 ilustra as intensidades de sinal nas frequências atuantes em 350 ciclos de rotações da ferramenta fresa, sob os parâmetros da condição experimental número 1. Percebe-se que as maiores intensidades (dB) estão situadas num pico equivalente a 0,59 kHz, o que, possivelmente indica que a ferramenta esteja cortando com apenas um de seus dentes, pois, se os dois dentes da ferramenta estivessem atuando, o pico de maior intensidade deveria estar situado perto de 1,18 kHz. Também é possível observar que os sensores apresentam intensidades associadas aos espectros de frequências diferentes uns dos outros.

Figura 36 – Gráfico dos espectros de frequências de sinais da condição experimental 1 ($a_p = 30 \mu\text{m}$; $f_z = 2 \mu\text{m/dente}$; $v_c = 50 \text{ m/min}$).

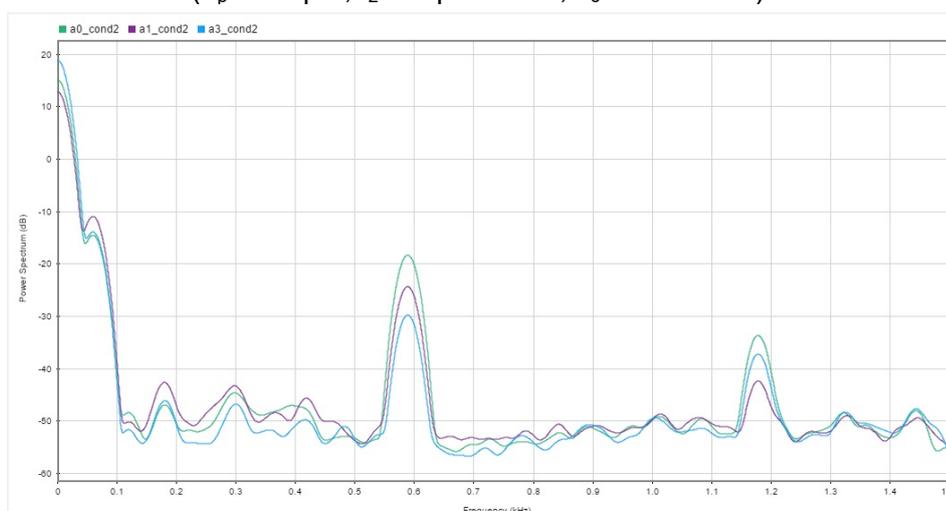


Fonte: Autoria própria.

A condição experimental de número 2 resultou no Gráfico dos espectros de frequências de sinais da figura 37. Neste pode-se observar que a frequência

equivalente ao corte com um dentes e destaca, seguindo a mesma tendência da condição anterior, apesar dos picos serem mais altos e significativos do que para a condição anterior, além do pico da frequência equivalente ao corte com dois dentes (1,18 kHz) se apresentar em mais destaque. As intensidades associadas aos espectros de frequência também variam de acordo com o sensor.

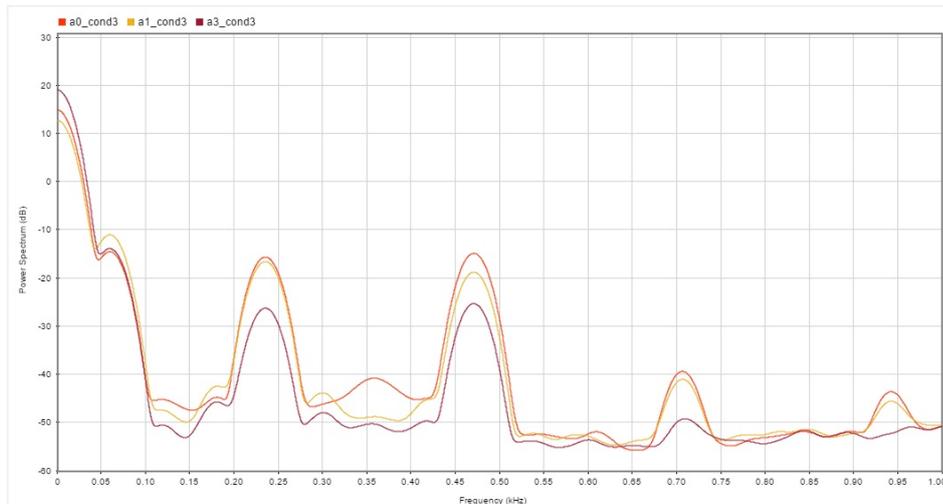
Figura 37 – Gráfico dos espectros de frequências de sinais da condição experimental 2 ($a_p = 60 \mu\text{m}$; $f_z = 2 \mu\text{m/dente}$; $v_c = 50 \text{ m/min}$).



Fonte: Autoria própria.

O Gráfico dos espectros de frequências de sinais da condição experimental de número 3, exibido na figura 38, se diferencia dos demais pois a frequência de maior intensidade associada equivale à frequência de corte com dois dentes da ferramenta. Este fenômeno, para esta condição, tem frequência de 0,47 kHz, enquanto a frequência de passagem de cada dente separadamente é de 0,235 kHz, justamente os picos em destaque no gráfico. Existem outras frequências de intensidades associadas destacadas das demais e certamente são harmônicas, pois, estão situadas em valores múltiplos das frequências de maiores intensidades associadas. Mais uma vez as intensidades associadas à frequência dos sinais dos sensores são variadas.

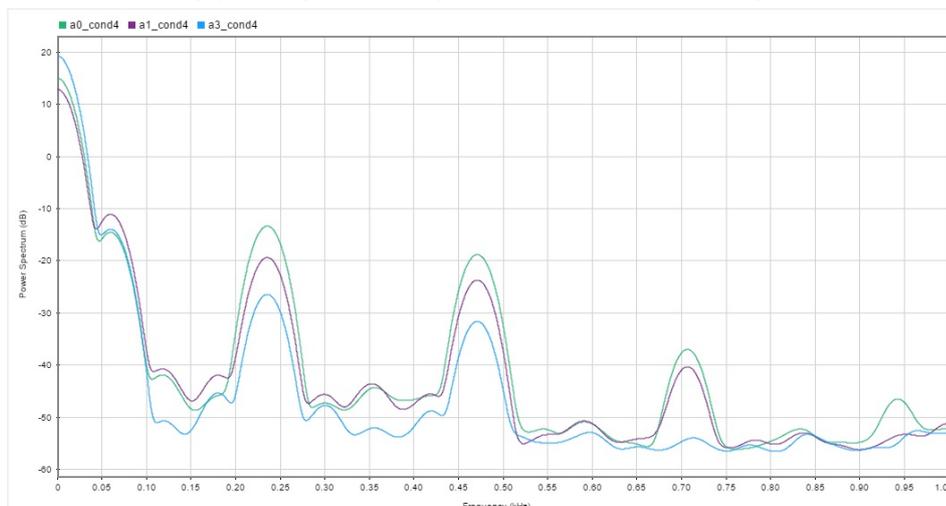
Figura 38 – Gráfico dos espectros de frequências de sinais da condição experimental 3 ($a_p = 30 \mu\text{m}$; $f_z = 2 \mu\text{m/dente}$; $v_c = 20 \text{ m/min}$).



Fonte: Autoria própria.

Novamente, observa-se no Gráfico dos espectros de frequências de sinais da condição experimental número 4, na figura 39, que os picos das intensidades de sinal para as frequências referentes as passagens de um ou dois dentes da ferramenta estão em condições quase similares, mas a frequência correspondente a um dente por rotação ainda prevalece superior. E novamente existem outros picos de menores intensidades que sugerem ser harmônicas da frequência principal, de maior intensidade. Os sensores mantêm o comportamento parecido ao captarem intensidades diferentes nas mesmas frequências.

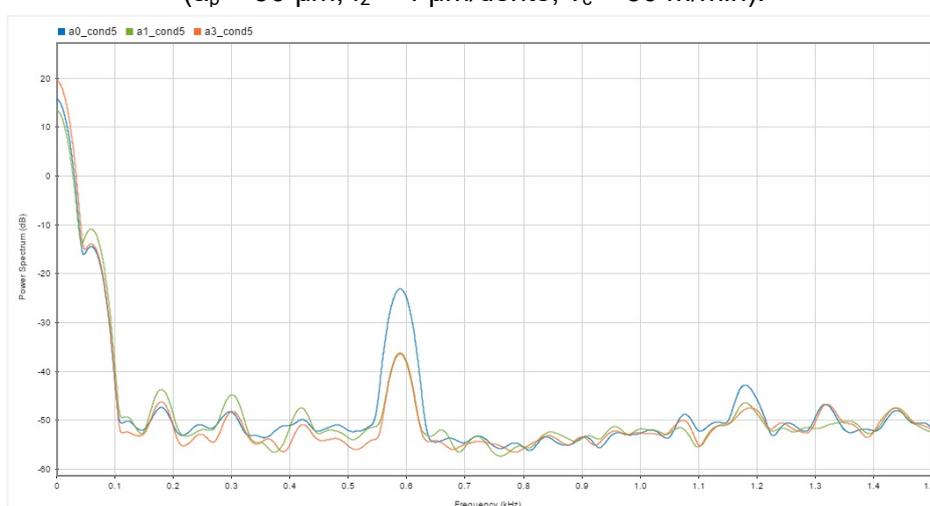
Figura 39 – Gráfico dos espectros de frequências de sinais da condição experimental 4 ($a_p = 60 \mu\text{m}$; $f_z = 2 \mu\text{m/dente}$; $v_c = 20 \text{ m/min}$).



Fonte: Autoria própria.

A condição experimental de número 5, representada no domínio da frequência na figura 40, exibe frequência de maior intensidade associada posicionada perto dos 0,59 kHz, o que significa que houve uma perturbação por ciclo de rotação no experimento, muito possivelmente isso tenha ocorrido, pois, mais uma vez a ferramenta estaria efetuando o corte com apenas um de seus dentes.

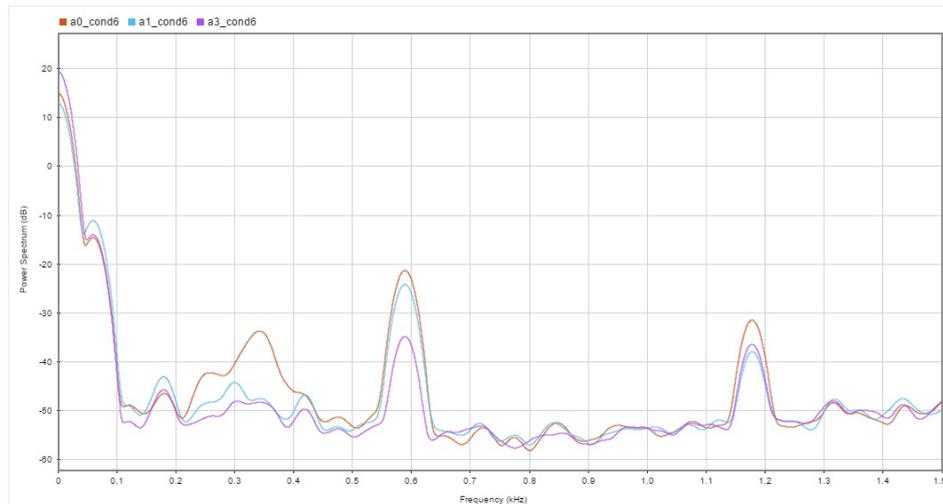
Figura 40 – Gráfico dos espectros de frequências de sinais da condição experimental 5 ($a_p = 30 \mu\text{m}$; $f_z = 4 \mu\text{m/dente}$; $v_c = 50 \text{ m/min}$).



Fonte: Autoria própria.

De acordo com o gráfico dos espectros de frequências de sinais da figura 41, traçado com os dados da condição experimental de número 6, a frequência de maior intensidade associada se situa na ordem dos 0,59 kHz, seguida de outra com intensidade menor de cerca 1,18 kHz. Tais picos ilustram a incidência do fenômeno experimentado. O gráfico em questão se distingue dos demais por apresentar uma perturbação irregular de intensidade associada à frequência entre 0,2 kHz e 0,4 kHz, uma vez que tal perturbação não tem causa conhecida.

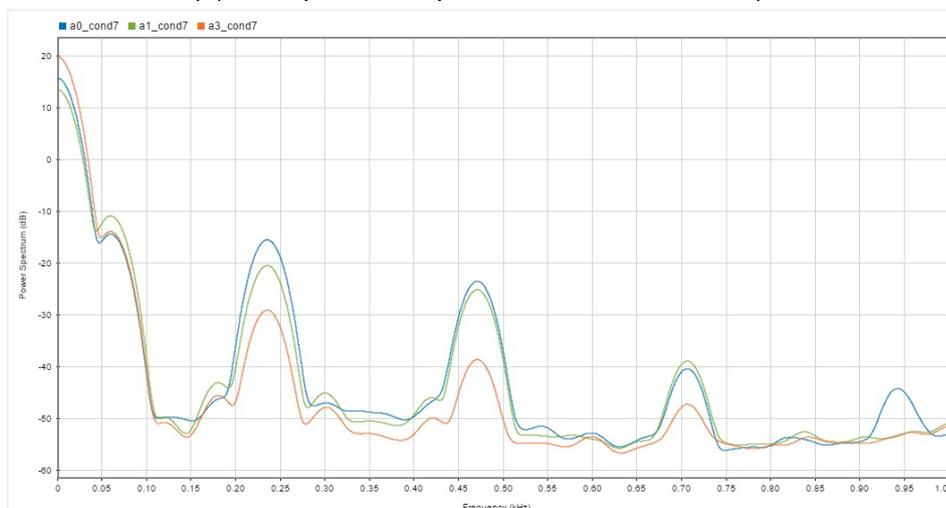
Figura 41 – Gráfico dos espectros de frequências de sinais da condição experimental 6 ($a_p = 60 \mu\text{m}$; $f_z = 4 \mu\text{m/dente}$; $v_c = 50 \text{ m/min}$).



Fonte: Autoria própria.

Ao considerar o comportamento dos gráficos anteriores na análise do Gráfico dos espectros de frequências de sinais da condição experimental de número 7, figura 42, pode-se concluir que em menores velocidades de corte, geralmente, as intensidades associadas às frequências que comportariam as frequências de um ou dois dentes da ferramenta denotam uma maior homogeneidade no corte com cada dente, uma vez que os valores são mais parecidos.

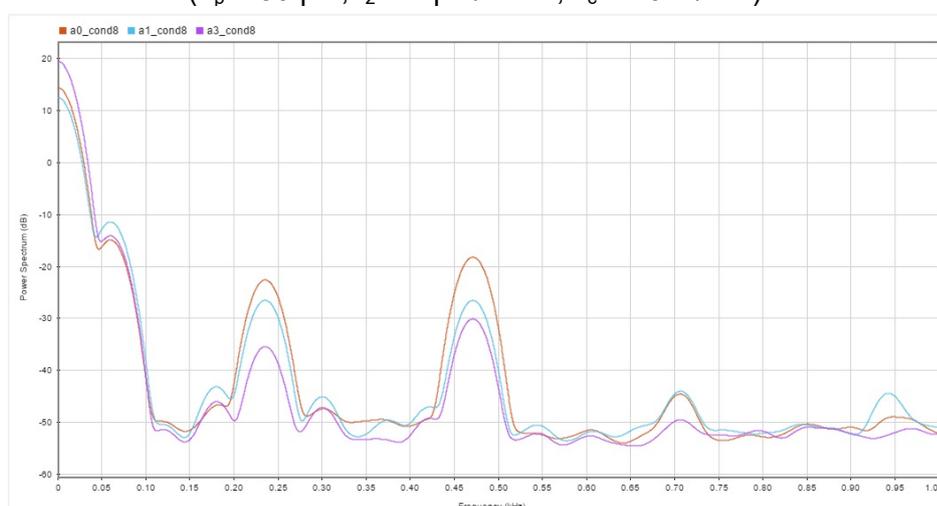
Figura 42 – Gráfico dos espectros de frequências de sinais da condição experimental 7 ($a_p = 30 \mu\text{m}$; $f_z = 4 \mu\text{m/dente}$; $v_c = 20 \text{ m/min}$).



Fonte: Autoria própria.

Já o gráfico dos espectros de frequências de sinais da condição experimental de número 8, na figura 43, apresenta em dois dos três sensores a maior frequência, que é justamente a frequência de 0,47 kHz, o equivalente ao fenômeno de usinagem com os dois dentes em atuação. Observa-se também que um dos sensores apresenta intensidades similares nas frequências de atuação de um ou dois dentes.

Figura 43 – Gráfico dos espectros de frequências de sinais da condição experimental 8 ($a_p = 30 \mu\text{m}$; $f_z = 4 \mu\text{m/dente}$; $v_c = 20 \text{ m/min}$).



Fonte: Autoria própria.

5.3.2 Análise da influência da variação dos parâmetros de usinagem

Com o objetivo de evidenciar a influência da variação no nível dos parâmetros de usinagem nos valores de intensidade de sinal no espectro de frequência dos fenômenos das condições experimentais, foram gerados os gráficos das figuras 44, 45 e 46, considerando os dados médios coletados em três sensores. Nestes gráficos é possível analisar as interações das maiores intensidades associadas às frequências dos sinais com cada parâmetro das condições experimentais. Cada condição experimental é ilustrada por uma linha de uma cor. A linha azul claro tracejada corresponde a média dos valores de intensidades medidos. Os eixos horizontais dos gráficos correspondem aos valores dos níveis do parâmetro avaliado

e os eixos verticais são correspondentes aos valores de intensidades associadas aos espectros de frequências. Já a legenda, apresenta os valores dos outros parâmetros de usinagem utilizados nas respectivas condições experimentais.

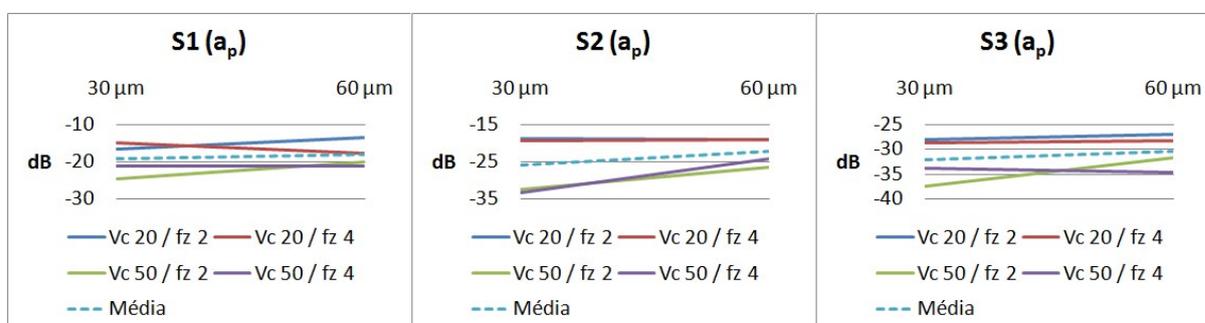
Profundidade de corte (a_p)

O parâmetro profundidade de corte (a_p) foi variado nos experimentos em dois níveis, o primeiro com 30 μm e o segundo com 60 μm , em vários cortes de canais usinados, conforme consta nos gráficos da figura 44.

Na análise isolada dos sinais do sensor 1, que são os sinais de maiores intensidades, é possível sugerir uma inversão nas variações de intensidades, que indicam proporcionalidade direta nas condições com avanço por dente (f_z) igual a 2 μm e quando o avanço por dente é 4 μm a proporcionalidade se torna inversa.

De maneira geral, observa-se que existe um certo padrão de aumento nas intensidades associadas às frequências dos sinais dos sensores com a mudança de valor de profundidade de corte, mas em três condições a intensidade é reduzida e em alguns casos os valores de intensidade aparentam indiferença quanto a mudança de nível do parâmetro profundidade de corte. Porém, as linhas de médias apresentam intensidades diretamente proporcionais à profundidade de corte em todos os três sensores.

Figura 44 – Intensidade de sinal (dB) em função da variação de a_p .



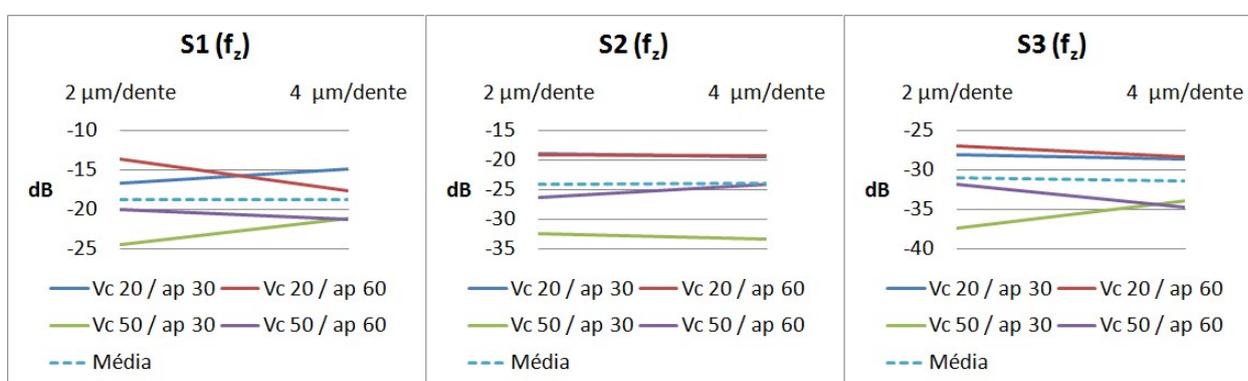
Fonte: Autoria própria.

Avanço por dente (f_z)

O parâmetro avanço por dente (f_z) foi variado nos experimentos em dois níveis, o primeiro com 2 μm e o segundo com 4 μm , conforme consta nos gráficos da figura 45.

A análise dos gráficos da figura revelam comportamentos variados, de modo a não existirem padrões claros de influência da mudança de valor de avanço por dente no comportamento nas intensidades associadas às frequências dos sinais dos sensores, como também, na maioria dos casos os valores de intensidade aparentam indiferença quanto à mudança de nível do parâmetro, inclusive nas linhas de médias em todos os três sensores.

Figura 45 – Intensidade de sinal (dB) em função da variação do f_z .



Fonte: Autoria própria.

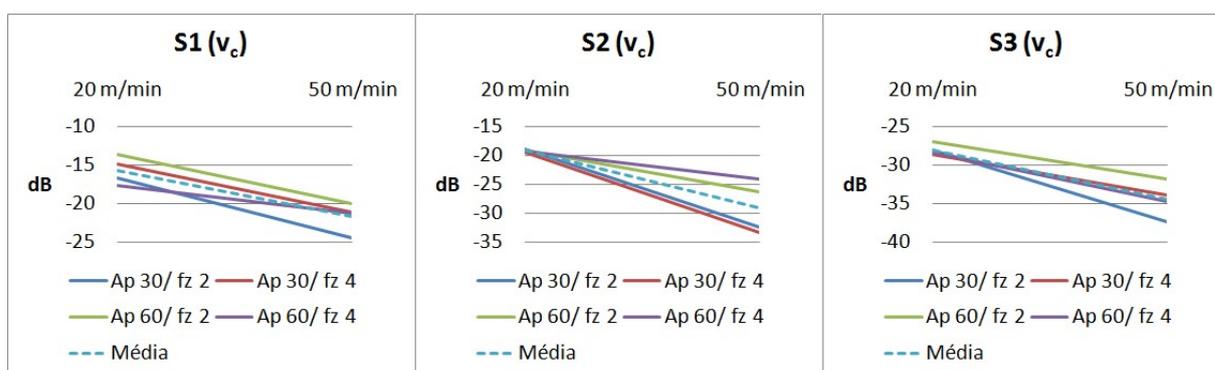
Velocidade de corte (v_c)

O parâmetro velocidade de corte (v_c) foi variado nos experimentos em dois níveis, o primeiro com 20 m/min e o segundo com 50 m/min.

É notório nos gráficos da figura 46 que a variação do nível de velocidade de corte exerce um padrão visível de comportamento nas intensidades associadas às frequências dos sinais emitidos pelos fenômenos, em todos os três sensores considerados. Tal padrão, aponta para uma tendência de que o parâmetro de usinagem velocidade de corte seja inversamente proporcional à intensidade de sinal no espectro de frequência, ou seja, com o aumento da velocidade de corte há uma redução nas intensidades de sinal. Também é possível observar que o valor médio das intensidades associadas às frequências nos sensores S2 e S3 se situam muito

próximas da mesma magnitude, quando a velocidade de corte assume o valor de 20 m/min.

Figura 46 – Intensidade de sinal (dB) em função da variação da v_c .



Fonte: Autoria própria.

5.3.3 Considerações acerca da validação do conceito

Foi evidenciado que o Sistema de Medição desenvolvido apresenta capacidade para reconhecer o fenômeno de usinagem de canais em microfresamento, através da captação de sinais de força e vibração medidos na peça de trabalho, apesar da imensa quantidade de ruídos igualmente captados. Os resultados dos sinais filtrados por FFT não apresentam confiabilidade, no domínio do tempo, uma vez que o próprio filtro atenua as condições dos sinais. Entretanto, no domínio da frequência, foi possível uma análise mais apurada que constatou que as maiores intensidades associadas aos espectros de frequências se situam exatamente nas frequências de ocorrência dos cortes de um e/ou dois dentes da ferramenta. Também evidenciado que os valores de intensidades associadas aos espectros de frequência crescem com o aumento da profundidade de corte e diminuem com a redução da velocidade de corte.

O Sistema de Medição pode ser útil tanto para análises qualitativas de forças e vibrações em operações de microfresamento quanto para supervisão de operações de microfresamento em tempo real. Porém, o mesmo necessita de uma reestruturação conceitual das partes mecânicas de modo a garantir um travamento

para movimentação vertical para não permitir vibrações indevidas, também é preciso buscar tecnologias de sensores com melhores capacidades metrológicas, para apresentar melhores precisões e confiabilidades nas medições.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho conseguiu cumprir todos os objetivos inicialmente propostos ao evidenciar que é possível desenvolver uma solução de baixo custo para análises comparativas qualitativas de forças de usinagem em processos de microfresamento, através da utilização de componentes encontrados facilmente no mercado. A revisão teórica forneceu subsídios acerca de conceitos e pesquisas importantes nos temas de microfresamento e forças de usinagem.

Foi realizado um procedimento experimental exploratório para balizar a escolha pelo tipo de sensor que foi utilizado no protótipo do conceito, a cápsula piezoelétrica foi a escolhida dentre os três sensores testados, por apresentar melhores resultados nos quesitos precisão e confiabilidade metrológica, através das características de interesse analisadas. A cápsula piezoelétrica também foi submetida a uma análise para quantificar o tempo de recuperação dos cristais de cerâmica após uma excitação, que conduziu a conclusão de que nas condições ensaiadas 45% do ciclo do sensor apresenta sinais de recuperação. Entretanto, também foi observado que quanto menor o valor da excitação menor será o tempo que o sensor levará para se recuperar.

O sistema foi concebido seguindo o conceito de três partes essenciais, transdutor, unidade de tratamento do sinal e dispositivo mostrador e registrador. O transdutor foi composto com sensores em cápsulas piezoelétricas montados em bases de aço carbono que se encaixam, os elementos elásticos responsáveis por excitarem os sensores foram batentes de silicone. A unidade de tratamento do sinal foi composta por um circuito amplificador de sinais desenvolvido e um dispositivo de aquisição de dados comercial. Já o dispositivo mostrador e registrador foi desenvolvido através de diagrama de blocos com funções de conversão e interface com gráfico da aquisição de dados em tempo real.

A validação do conceito ocorreu de acordo com um procedimento experimental, através do microfresamento de canais em condições de parâmetros de usinagem variados em dois níveis. Verificou-se a captação de sinais do fenômeno juntamente com muitos outros sinais de ruído em diversas frequências, o que impossibilitou uma análise fidedigna do comportamento dos sinais no domínio do tempo. Mas, no domínio da frequência, os sinais foram filtrados por FFT, e as maiores intensidades

associadas às frequências eram, justamente, nas frequências referentes às passagens de um e/ou dois dentes da ferramenta, em todas as condições experimentais. Também foi possível constatar que pelo menos os parâmetros profundidade de corte e velocidade de corte influenciam significativamente nos valores das intensidades associadas às frequências dos sinais.

6.1 Trabalhos futuros

O protótipo do conceito do modo que foi concebido neste trabalho necessita de melhorias que possam contribuir para a aquisição de sinais de força, através de uma reestruturação no design das peças do conjunto que compõe a parte do transdutor do sistema de medição, de modo que diminua a influência de vibrações indevidas e possibilite o travamento da movimentação excessiva em todas as direções. É possível testar o comportamento do conjunto com o uso de outros tipos de materiais como elementos elásticos, além das batentes semi-esféricas de silicone. Deve ser pensado outro meio de fixação e contato dos condutores nos sensores no conjunto, de preferência algo que não necessite de soldas com procedimentos térmicas, pois, estes podem afetar, de alguma forma, as características do material cerâmico cristalino no interior dos sensores em cápsulas. Como também, é de grande valia que sejam testados outros tipos de sensores com materiais cristalinos mais nobres, com propriedades piezoelétricas, por exemplo o quartzo, que são encontrados através de importação em configurações similares, condicionados nos mesmos tipos de cápsulas metálicas. No tocante à aquisição e tratamento dos sinais, para reduzir ainda mais o custo, podem ser desenvolvidas placas eletrônicas para substituir o DAQ da solução comercial que foi utilizada. Finalmente, seria interessante que o dispositivo desenvolvido fosse submetido a uma calibração, tendo seus resultados comparados aos resultados de um equipamento, considerado padrão, que já se encontra em fase de comercialização no mercado. Onde, a calibração teria o objetivo de analisar a compatibilidade dos resultados, considerando as devidas incertezas de medição, para definir e aplicar os ajustes finais no sistema criado.

REFERÊNCIAS

- ALBERTAZZI, A.; SOUSA, A. R. **Fundamentos da metrologia científica e industrial**. 1 ed. São Paulo. Editora Manole. 2008. 407 p.
- ARAMCHAROEN, A.; MATIVENGA, P. T. **Evaluation of critical parameters in micro machining of hardened tool steel**. International Journal of Nanomanufacturing, pp. 100-111, 2009.
- ASSIS, C. L. F. **Microfresamento de aços com grãos ultrafinos**. 82p. 2013. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.
- BALDO, D. **Estudo do microfresamento da liga de titânio Ti-6Al-4V utilizando análise de sinais de força e emissão acústica**. 2013. 127p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de São João del-Rei, São João del-Rei, 2013.
- BAO, W. Y.; TANSEL, I. N. **Modeling micro-end-milling operations. Part I: analytical cutting force model**. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 40(15), pp. 2155-2173, 2000.
- BODZIAK, S. **Estudo do microfresamento aplicado à indústria de moldes e matrizes como alternativa à usinagem por eletroerosão**. 118p. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Instituto Superior Tupy, Joinville, 2011.
- CAMPOS, F. O. **Estudo das forças de corte no microfresamento da liga de alumínio 6351-t6**. 2014. 114p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.
- CARVALHO, T. A. **Modelagem das forças de usinagem no microfresamento de topo em materiais com revestimento**. 2015. 66p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.
- CERVELIN, J. E. **Estudo teórico-experimental das forças de corte no processo de torneamento**. 117p. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.
- CHILDS, T. H. C.; MAEKAWA, K.; OBIKAWA, T.; YAMANE, Y. **Metal machining: theory and applications**. Londres: Arnold, 2000.
- DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. DIN 8580: **Manufacturing Process – Terms and Definitions**. Berlin, 2003.
- DIB, M. H. M. **Fundamentos do fresamento: uma aplicação em microfresamento**. 2013. 140p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

- DIMOV, S.; PHAM, D.T.; IVANOV, A.; POPOV, K.; FANSEN, K. **Micromilling strategies: Optimization issues**. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, pp. 731-736, 2004.
- DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**. 1. ed. São Paulo: Editora Artliber, 1999.
- DORNFELD, D.; MIN, S; TAKEUCHI, Y. **Recent advances in mechanical micromachining**. CIRP Annals Manufacturing Technology, vol. 55, nº 2, pp. 745-768, 2006.
- FERRARESI, D.; **Fundamentos da Usinagem dos Metais**. 1. Ed. São Paulo, Edgard Blucher, 1977.
- FLEISCHER, J.; DEUCHERT, M.; RUHS, C.; KÜHLEWEIN, C.; HALVADJIYSKY, G; SCHMIDT, C. **Design and manufacturing of micro milling tools**. Microsystem Technologies, vol. 14, nº 9-11, pp. 1771-1775, 2008.
- HEANEY, P. J.; SUMANT, A. V.; TORRES, C. D.; CARPICK, R. W.; PFEFFERKORN, F. E. **Diamond coatings for micro end mills: enabling the dry machining of aluminium at the micro-scale**. Diamond and Related Materials, pp. 223-233, 2008.
- HEANEY, P. J.; SUMANT, A. V.; TORRES, C. D.; CARPICK, R. W.; PFEFFERKORN, F. E. **Diamond coatings for micro end mills: enabling the dry machining of aluminium at the micro-scale**. Diamond and Related Materials, pp. 223-233, 2008.
- KALPAKJIAN, S.; SCHMID, S.R. **Manufacturing Engineering and Technology**.4. Ed. New Jersey: Prentice Hall, 2001.
- KEXUAN, L.; KUNPENG, Z.; TAO, M. **A generic instantaneous undeformed chip thickness model for the cutting force modeling in micromilling**. International Journal of Machine Tools and Manufacture, nº 10, pp. 10-34, 2016.
- KLINE, W.; DEVOR, R.; LINDBERG, J. **The prediction of cutting forces in end milling with application to cornering cuts**. International Journal of Machine Tool Design and Research,, v. 22, pp. 7–22, 1982.
- KLOCKE, F.; ADAMS, O.; AUERBACH, T.; GIERLINGS, S.; KAMPS, S.; REKERS, S.; VESELOVAC, D.; ECKSTEIN, M.; KIRCHHEIM, M.; BLATTNER, M.; THIEL, R.; KOHLER, R. **New concepts of force measurement systems for specific machining processes in aeronautic industry**. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, nº 9, pp. 31-38, 2015.
- KOENIGSBERGER, F.; SABBERWAL, A.J. P. **An investigation into the cutting force pulsations during milling operations**. International Journal of Machine Tool Design and Research, 1:15 – 33, 1961.

KOMATSU, T.; YOSHINO, T.; MATSUMURA, T.; TORIZUKA, S. **Effect of crystal grain size in stainless steel on cutting process in micromilling**. Procedia CIRP, vol. 1, pp. 150-155, 2012.

LAURO, C. A. **Análise numérica com validação experimental das forças de corte no processo de microfresamento de aços endurecidos com variação do tamanho de grão austenítico**. 2011. 82p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de São João del-Rei, São João del-Rei, 2011.

LI, K. M.; CHOU, S. Y. **Experimental evaluation of minimum quantity lubrication in near micro-milling**. Journal of Materials Processing Technology, vol. 210, nº 15, pp. 2163-2170, 2010.

MACHADO, A. R.; ABRÃO, A. M.; COELHO, R. T.; SILVA, M. B. **Teoria da Usinagem dos Materiais**. 1. ed. São Paulo. Edgard Blucher. 2009. 371 p.

MOUGO, A. L. **Microfresamento do aço superduplex: uma comparação mecanística com os aços inoxidáveis austenítico e ferrítico para as forças de usinagem e avaliação da superfície usinada**. 2016. 209p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

NATARAJAN, U.; PERIYANAN, P. R.; YANG, S. H. **Multiple-response optimization for micro-end milling process using response surface methodology**. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 56, nº 1-4, pp. 177-185, 2011.

NEWBY, G.; VENKATACHALAM, S.; LIANG, S. **Empirical analysis of cutting force constants in micro-end-milling operations**. Journal of Materials Processing Technology, v. 192-193, pp. 41–47, 2007.

OLIVEIRA, F. B. **Estudo dos mecanismos governantes do efeito de escala na microusinagem**. 92p. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2012.

PERTENCE JUNIOR, A. **Eletrônica analógica: Amplificadores operacionais e filtros ativos**. 8. ed. Porto Alegre. Editora Bookman, 2015. 304p.

PICARELLI, T. C. **Microfresamento: estudo e aplicação do processo**. 2015. 118p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Metodista de Piracicaba, Santa Bárbara d'Oeste, 2015.

RAHMAN, M.; ASAD, A. M. T.; SALEH, T.; WONG, Y. S. K. A. **A multiprocess machine tool for compound micromachining**. International Journal of Machine Tools and Manufacture, vol. 50, nº 4, pp. 344-356, 2010.

ROSSI, G. C. **Estudo das forças de corte no processo de fresamento de bordas de chapas utilizadas para a fabricação de tubos de aço com costura**. 135p. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

SANDVIK. **Catálogo de produtos**. SANDVIK. 2012.

SCHMIDT, J.; SPATH, D.; ELSNER, J.; HÜNTRUP, V.; TRITSCHLER, H. **Requirements of an industrially applicable microcutting process for steel micro structures**. *Microsystem Technologies*, pp. 402-408, 2002.

SCIPPA, A.; SALLESE, L.; GROSSI, N.; CAMPATELLI, G. **Improved dynamic compensation for accurate cutting force measurements in milling applications**. *Mechanical Systems and Signal Processing*, nº 54-55, pp. 314-324, 2014.

TLUSTY, J.; MACNEIL, P. **Dynamics of cutting forces in end milling**. *Annals of CIRP*, 24(1), pp. 21-25. 1975.

TSAI, M. Y.; CHANG, S. Y.; HUNG, J. P.; WANG, C. C. **Investigation of milling cutting forces and cutting coefficient for aluminum 6060-T6**. *Computers and Electrical Engineering*, pp. 1-11, 2015.

TSUZUKI, M. S. G.; MOSCATO, L. A. **Gerando o Caminho de Corte de Reentrâncias: Utilizando Diagramas de Voronoi**. 15p. Escola politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

WU, T. **Tooling Performance in Micro Milling: Modelling, Simulation and Experimental Study**. 2012. 209p. Tese (PhD em Engenharia Mecânica) - Brunel University, Londres, 2012.

ZHOU, L.; PENG, F. Y.; YANA, R.; YAO, P. F.; YANG, C. C.; LI, B. **Analytical modeling and experimental validation of micro end-milling cutting forces considering edge radius and material strengthening effects**. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, nº 97, pp. 29-41, 2015.