

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

**KLELLER ADÃO LIMA BORBA
LEONARDO DE SOUZA SANTOS**

**ANÁLISE DOS SINAIS DE VIBRAÇÕES AO LONGO DA VIDA DA
FERRAMENTA NO PROCESSO DE TORNEAMENTO DO AÇO VTPLUS**

CURITIBA

2022

**KLELLER ADÃO LIMA BORBA
LEONARDO DE SOUZA SANTOS**

**ANÁLISE DOS SINAIS DE VIBRAÇÕES AO LONGO DA VIDA DA
FERRAMENTA NO PROCESSO DE TORNEAMENTO DO AÇO VTPLUS**

**Analysis of vibration signals over the length of the tool in the VTPLUS
steel turning process**

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentada como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador(a): Prof. Dr. Milton Luiz Polli.

Coorientador(a): Prof. Dr. Marcio Henrique de Avelar Gomes.

CURITIBA

2022



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

Esta licença permite download e compartilhamento do trabalho desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es), sem a possibilidade de alterá-lo ou utilizá-lo para fins comerciais. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

**KLELLER ADÃO LIMA BORBA
LEONARDO DE SOUZA SANTOS**

**ANÁLISE DOS SINAIS DE VIBRAÇÕES AO LONGO DA VIDA DA FERRAMENTA
NO PROCESSO DE TORNEAMENTO DO AÇO VTPLUS**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentada como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Mecânica da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 01 de Dezembro de 2022.

Professor Milton Luiz Polli
Doutorado em Engenharia Mecânica
Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Curitiba

Professor Maro Róger Guérios
Bacharelado em Engenharia Mecânica
Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Curitiba

Pedro Luiz Fiad do Amaral
Mestrado em Engenharia Mecânica
Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Curitiba

**CURITIBA
2022**

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Milton Luiz Polli, por toda dedicação ao buscar nos ensinar e orientar, a sua paciência por toda extensão do desenvolvimento desse trabalho, ao senhor cito algo que faz jus a sua forma de lecionar durante esse trabalho, do epistemólogo Piaget: “Professor não é o que ensina, mas o que desperta no aluno a vontade de aprender”.

Ao Professor Marcio Henrique de Avelar Gomes, por orientar, auxiliar e apoiar mesmo quando estava em outro continente.

Aos colegas José Alexandre de Campos e Augusto Cesar Fantinelli de Carvalho por terem disposto de seus tempos pessoais para orientar, colaborar e se dispor em todo processo de obtenção e interpretação dos dados.

Aos professores integrantes da banca examinadora, Professor Maro Rogér Guérios e o Professor Pedro Luiz Fiad do Amaral por toda orientação, atenção e por aceitarem o convite de participar da apresentação desse trabalho.

Aos amigos Isabelly Behlau Spindola, Atilio Rampin Da Silva, Diego Aguiar Martins, Eduardo Ryoichi Kano Saito por todo apoio, companheirismo e por compartilharmos tantas experiências e aprendizados em todos esses anos nessa intensa jornada de vida, a vós cito-lhes Platão “A amizade é uma predisposição recíproca que torna dois seres igualmente ciosos da felicidade um do outro. ”.

Aos demais professores verdadeiramente dedicados pelo ensino da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Curitiba por todo conhecimento, experiências e conselhos durante toda trajetória acadêmica.

As famílias aqui representadas pelos estudantes integrantes desse trabalho, por todo auxílio, apoio inigualável e sempre estarem ao lado nas horas mais difíceis e felizes de nossas vidas.

A UTFPR pela cessão dos laboratórios da universidade.

Por todos amigos e colegas de curso por todas experiências e reciprocidade.

Indubitavelmente que esse breve tópico não irá contemplar a todas pessoas que fizeram parte dessa fase de vida, discorro a vós a íntegra de minha gratidão.

Enfim, a todos os que, mesmo indiretamente, contribuíram de alguma forma para a realização deste trabalho.

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo analisar as vibrações e os sinais de áudio correlacionados ao desgaste da ferramenta no processo de torneamento do aço VTM PLUS. O desgaste da ferramenta ocasiona variações no comportamento do sistema de forças e do sinal de áudio. Testes realizados para obtenção de dados foram feitos utilizando equipamentos de medição como microfone, acelerômetro, martelo de impacto, plataforma piezoelétrica e amplificador de carga. A partir dos dados gerados pela medição durante o processo foram realizadas análises via softwares MatLab e DAQExpress. Os resultados mostraram que há percepção na variação das frequências captadas durante o desgaste durante o processo, podendo ser caracterizadas pela sua variação a partir da análise por transformada rápida de Fourier e capacidade de valor eficaz. Avaliando o sistema após o desgaste houve a equiparação do pico de amplitude na frequência natural do sistema. A partir da análise dos resultados foi apresentado que para ensaios com dados mais precisos a utilização da análise pelas forças traz melhores resultados, porém com maiores complicações de instalação e custeio e por isso o sistema de captação de áudio por smartphone aparece como solução menos precisa, porém economicamente viável.

Palavras-chave: Usinagem, Vibrações, Sinal de Áudio.

ABSTRACT

This study aims to analyze the vibration signals from throughout the tool life in the steel VTPLUS turning process. Tool wear causes variations in the behavior of the forces system and the audio signal. The tests performed to obtain data will employ equipment such as a microphone, accelerometer, impact hammer, piezoelectric platform and charge amplifier. From the data generated by the measurement during the process, analyses were performed via MatLab and DAQExpress software. The results showed that there is perception in the variation of the frequencies picked up during wear during the process, and can be characterized by their variation from the analysis by fast Fourier transform and effective value capability. Evaluating the system after wear there was an equalization of the peak amplitude at the natural frequency of the system. Based on the accuracy of the results, it was shown that for tests with more precise data the use of force analysis brings better results, but with greater complications of installation and cost, and therefore the audio capture system by smartphone appears as a more precise solution, but economically viable.

Keywords: Machining, Vibrations, Audio Signal.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Áreas de conhecimento.....	12
Figura 2 - Classificação dos processos de fabricação	13
Figura 3 - Categorias do processo de usinagem.....	14
Figura 4 - Direção dos movimentos de corte, avanço e efetivo no processo de torneamento.....	17
Figura 5 - Forças resultantes da ação da peça sobre a ferramenta no processo de usinagem	18
Figura 6 - Representação de um sistema com um grau de liberdade	23
Figura 7 - Partes imaginária e real da função transferência.....	25
Figura 8 - Representação gráfica da amplitude de vibração em função da profundidade de corte no processo de torneamento	26
Figura 9 - Mecanismo de Vibração Auto Excitada.....	27
Figura 10 - Modelo de um grau de liberdade para o processo de torneamento	28
Figura 11 - Causas de desgaste na usinagem de peça.....	33
Figura 12 - Critérios de fim de vida para ferramenta de corte.....	35
Fotografia 13 – Rockwell Hardness Tester series 500	36
Fotografia 14 – Barra do material preparado para o ensaio de dureza	38
Fotografia 15 – Amostras de 6mm de espessura	38
Fotografia 16 – Microscópio Olympus SZX 10.....	39
Figura 17 – Estrutura superficial do material base	40
Figura 18 – Centro de torneamento Romi GL 240	41
Figura 19 – TNGA 160404T IN22.....	41
Fotografia 20 – Frente da case com 10 pastilhas TNGA 160404T IN22	42
Figura 21 - Microscópio digital Gastaki (a esquerda) Microscópio Olympus SZX 10 (a direita)	43
Figura 22 – Sistema de captação de esforços	44
Fotografia 23 – Plataforma piezoelétrica.....	44
Fotografia 24 - Amplificador de carga multicanal - Kistler 5070A.....	45
Fotografia 25 - Placa de aquisição de dados USB-6259B.....	45
Fotografia 26 – Porta ferramentas – Posição 5.....	46
Fotografia 27 – Suporte adaptado para fixação da placa	47
Fotografia 28 – Placa piezoelétrica instalada	47
Fotografia 29 – Teste de impacto – Experimental FRF	48
Fotografia 30 – Posição microfone.....	49
Figura 31 – Medição frequência natural horizontal	50
Gráfico 32 – Variação da força de avanço.....	51
Gráfico 33– Variação da força de corte	52
Gráfico 34– Variação da força passiva	52
Gráfico 35 – Variação do RMS -Força.....	54
Fotografia 36 – Superfície principal de folga – 2 e 4 metros de usinagem	55
Fotografia 37 – Superfície de saída – 2, 4 e 5,5 metros de usinagem.....	55
Fotografia 38 – Vista da cratera	56
Fotografia 39 – Vista da ferramenta no estado final	56
Figura 40 – 0,5 e 1 metros de usinagem – Amplitude x Tempo.....	57

Figura 41 – 5 e 5,5 metros de usinagem – Amplitude x Tempo.....	57
Figura 42 – FFT 0,5 metros de usinagem	58
Figura 43 – FFT 4 metros de usinagem	58
Figura 44 – FFT 5,5 metros de usinagem	59
Gráfico 45 – Variação do RMS - Áudio	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Norma brasileira para realização de ensaio de dureza NBR-6671	37
Tabela 2 – Características do TNGA 160404T IN22 (Iscar)	42
Tabela 3 – Parâmetros de corte que serão utilizados durante o torneamento externo	43
Tabela 4 – Amplitude média conforme distância usinada	51

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	9
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
2.1. Usinagem	13
2.1.1. Torneamento.....	14
2.1.2. Movimentos relativos na usinagem	15
2.1.3. Forças de corte	17
2.1.4. Usinagem de aço endurecido.....	20
2.2. Vibrações	20
2.2.1. Origem das vibrações	21
2.2.2. Vibrações no torneamento	22
2.2.2.1. Vibrações livres e forçadas	22
2.2.2.2. Vibrações auto excitadas	25
2.2.3. Detecção de vibrações no torneamento.....	29
2.3. Desgaste da ferramenta de corte	31
2.4. Critérios de fim de vida da ferramenta	34
3. MATERIAIS E MÉTODOS	36
3.1. Análise do material fornecido	36
3.2. Máquina, ferramenta e parâmetros de usinagem	40
3.3. Avaliação do desgaste da ferramenta	43
3.4. Captação dos esforços	44
3.5. Determinação das funções resposta em frequência (FRF's)	48
3.6. Sinais de áudio INAIS DE ÁUDIO	49
4. RESULTADOS	50
4.1. Função resposta em frequência (FRF)	50
4.2. Forças de usinagem	50
4.3. Desgaste da ferramenta	54

4.4. Transformada rápida de Fourier dos áudios	57
5. CONCLUSÕES.....	61
REFERÊNCIAS.....	62

1. INTRODUÇÃO

A usinagem pode ser definida como o processo de fabricação que consiste na remoção de material de uma matéria-prima com a utilização de um sistema máquina-ferramenta com o objetivo de gerar a partir desses uma forma a partir das dimensões, acabamentos e tolerâncias associadas ao projeto pretendido.

Quando a usinagem ao remover material indesejado produz uma superfície de revolução, é conhecida como torneamento, sendo principalmente influenciada pelos parâmetros avanço, profundidade e velocidade de corte (SHAW, 2005).

As vibrações são constituintes inevitáveis dos processos de usinagem, oriundas de várias fontes, como as vibrações externas à máquina, as próprias da máquina, as geradas por interrupções no processo e também as decorrentes devido à falta de homogeneidade da própria peça e o desgaste da ferramenta (PANDA et al. 2018).

O impacto das vibrações na produtividade do processo de usinagem acontece a partir de fatores como evitar a trepidação, onde os operadores podem ser forçados a reduzir as velocidades de corte e avanços bem abaixo da capacidade da ferramenta e além disso, as vibrações com elevadas amplitudes comprometem o acabamento da superfície, aceleram o desgaste da ferramenta e produzem ruído excessivo (SALOKYOVÁ et al. 2016; SIDDHPURA e PAUROBALLY, 2012).

A partir da necessidade da redução de fatores que influenciem negativamente a eficiência dos processos de torneamento, seja pela elevação de tempo e custos e ou pela redução na qualidade das peças produzidas, é dado um grande valor para o monitoramento dos processos de corte para a garantia que a ferramenta seja sempre usada quando esteja em boas condições.

O sistema de monitoramento de usinagem se assemelha muito ao conceito de manutenção preditiva em tempo real, detectando e diagnosticando possíveis defeitos simultaneamente ao processo (MEOLA, 2020).

O monitoramento consiste nas etapas:

- A. Aquisição de dados por sensores
- B. Pré-processamento dos sinais - condicionamento dos dados
- C. Tratamento dos sinais
- D. Avaliação do comportamento dos sinais
- E. Tomada de decisão a partir do diagnóstico

Considerando a utilização de tais processos fabris acima citados na indústria automobilística, dentre uma infinidade de processos existentes, o enfoque deste trabalho dar-se-á pelo processo de torneamento do aço VTM PLUS (Villares Metais, VTPLUS) na produção de componentes como moldes de injeção de alumínio para blocos de motores. O torneamento é necessário para fabricação de pinos extratores empregados para expulsar o produto dos moldes de fundição por injeção.

No Brasil e no mundo, a elevada demanda de produtos da indústria automobilística ocorre a partir de uma grande necessidade social, pois o sistema automobilístico na sociedade carrega fatores de modernização representado na forma de mercadoria. O interesse comum sobre o consumo de tal mercadoria está atrelado ao aprimoramento das relações de tempo hábil de cada portador, correlacionado diretamente sobre os aspectos como a sociabilidade e a autonomia do indivíduo para a forma de vida no cotidiano (SCHOR, 1999).

Este trabalho tem por objetivo a análise dos sinais de vibração ao longo da vida da ferramenta no processo de torneamento do aço VTM PLUS (Villares Metais, VTPLUS) no empenho de obter uma contribuição tecnológica à cadeia automotiva nacional a partir das ferramentarias que apresentam a fabricação dos moldes de fundição sobre pressão de blocos de motores de alumínio.

Para o desenvolvimento do processo de aprimoramento acima citado, foram estabelecidos consecutivos objetivos específicos:

1. Monitorar a distribuição de amplitudes do sinal de áudio emitidas durante o processo de torneamento conforme o desgaste da ferramenta.
2. Avaliar o efeito das forças de corte durante a vida da ferramenta.

A caracterização da oportunidade do trabalho, se deu por meio da fundamentação e alinhamento ao programa Rota 2030 (Lei nº 13.755, 2018), que incentiva a pesquisa e desenvolvimento do setor automotivo nacional em especial as ferramentarias, alicerçado na busca pela ampliação e inserção no mercado global da indústria automotiva brasileira.

Assim como outros estudos desenvolvidos na mesma instituição de ensino, abordando melhorias de processo para a busca do desenvolvimento completo de objetivos do programa, tais como as reduções de custos de projetos, diferenciação tecnológica do setor e até fatores com influências socioeconômicas como a redução

dos riscos como a perda de investimentos no país, perda de postos de trabalho de alta qualificação e a integração passiva às cadeias globais de valor.

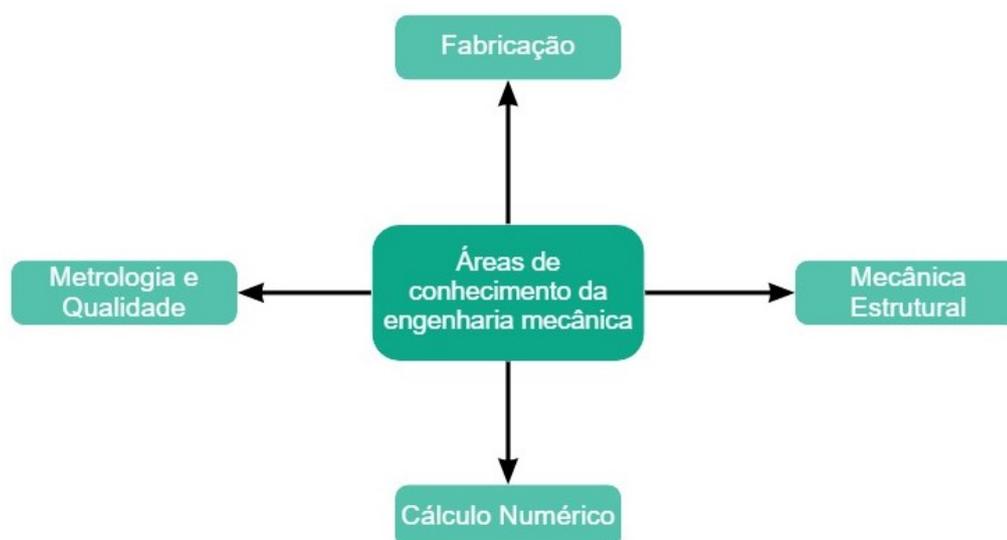
Assim, um estudo sobre um processo de interesse da indústria automotiva nacional cria a oportunidade de contribuição a demais pontos também abordados pelo programa Rota 2030, como a redução da defasagem tecnológica do setor nacional, a menor incidência de capacidade ociosa na indústria, o que atualmente acaba acarretando no redirecionamento da demanda ao mercado global.

Diversas áreas de conhecimento da matriz curricular do curso de engenharia mecânica são utilizadas como fundamentos para o monitoramento do comportamento do sinal das vibrações durante o processo de torneamento do aço VTM PLUS (Villares Metais, VTMLPLUS) para avaliar o processo de usinagem, tal qual é incidente na área de fabricação, com o sistema de vibrações sobre o processo, integrante da área de conhecimento de mecânica estrutural, sendo exemplificados na Figura 01.

Considerando que o tratamento das informações obtidas a partir do monitoramento do processo se dará num software de análise numérica interativa, para a programação do comportamento dos sinais obtidos pelos equipamentos de captação das vibrações, serão utilizados conceitos da área de conhecimento de cálculo numérico.

Assim como, para a análise das propriedades resultantes do processo sobre a peça tais como qualidade superficial e tolerâncias dimensionais, exigirá conceitos área de conhecimento de metrologia e qualidade, sendo assim representadas na Figura 01.

Figura 1 - Áreas de conhecimento



Fonte: Autoria Própria (2022)

Quanto às subdivisões estruturais deste trabalho, inicia-se pelo primeiro capítulo abordando a estruturação dos conceitos sobre as influências de sistemas de vibrações sobre os processos de usinagem apresentados diretamente sobre a sua própria eficiência e também sobre a qualidade dos produtos. Na continuidade, é apresentada a alta demanda do mercado automobilístico no Brasil e agregando a justificativa respaldada ainda por um projeto de lei de incentivo à indústria nacional.

No segundo capítulo, é apresentado a fundamentação teórica do processo de torneamento de metais endurecidos e também uma conceituação mais aprofundada sobre os sistemas de vibrações presentes no torneamento, a partir da análise e descrição sobre as fontes de tais vibrações para o sistema.

Na sequência, o terceiro capítulo discorre sobre a estruturação esperada sobre a metodologia que a equipe irá dispor para o desenvolvimento do projeto, com a descrição sobre os equipamentos e softwares para captura, registro, monitoramento e avaliação dos dados dos sinais das vibrações incidentes sobre o processo, apresentando também os parâmetros de torneamento, a ferramenta utilizada e também o elemento de testes para retirada de material, composto por VTM PLUS (Villares Metais, VTPLUS).

O quarto capítulo apresenta o cronograma para desenvolvimento do trabalho, considerando o planejamento das etapas do projeto para que as execuções ocorram dentro do tempo hábil da disciplina de trabalho de conclusão 2, considerando riscos e orçamentos para o mesmo.

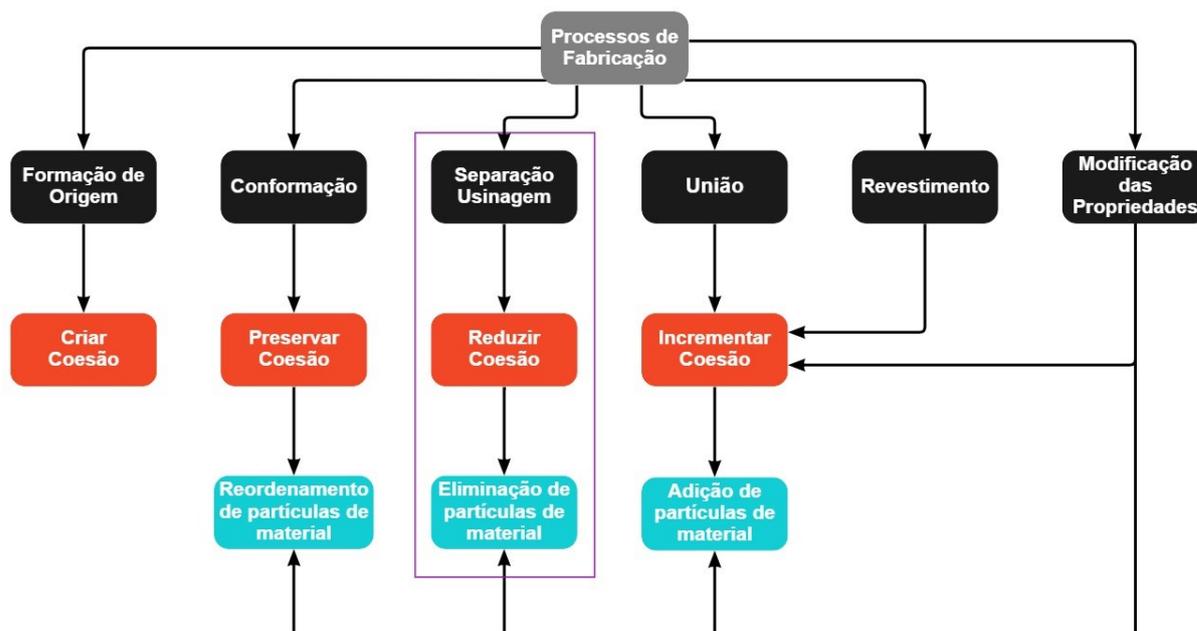
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esta revisão bibliográfica discorre sobre os assuntos relativos ao processo de usinagem, tratando de conceitos como movimentos relativos, forças de corte e conceitos aplicados ao objetivo do trabalho como usinagem de metais endurecidos e origem de vibrações no sistema entre outros, para fundamentar os conceitos teóricos para entendimento exigido para realização dos ensaios e análises de resultados propostos para esse trabalho.

2.1. USINAGEM

De acordo com a norma ABNT NBR 6175, (2015) a usinagem pode ser compreendida como o processo de fabricação que ocorre por meio de movimentos relativos entre a ferramenta e a peça, onde essa sofre um processo de remoção de material sobre a forma de cavaco como apresentado na Figura 02. A finalidade do processo de torneamento é conferir um perfil a partir da especificação de projeto quanto suas dimensões, acabamentos e tolerâncias.

Figura 2 - Classificação dos processos de fabricação

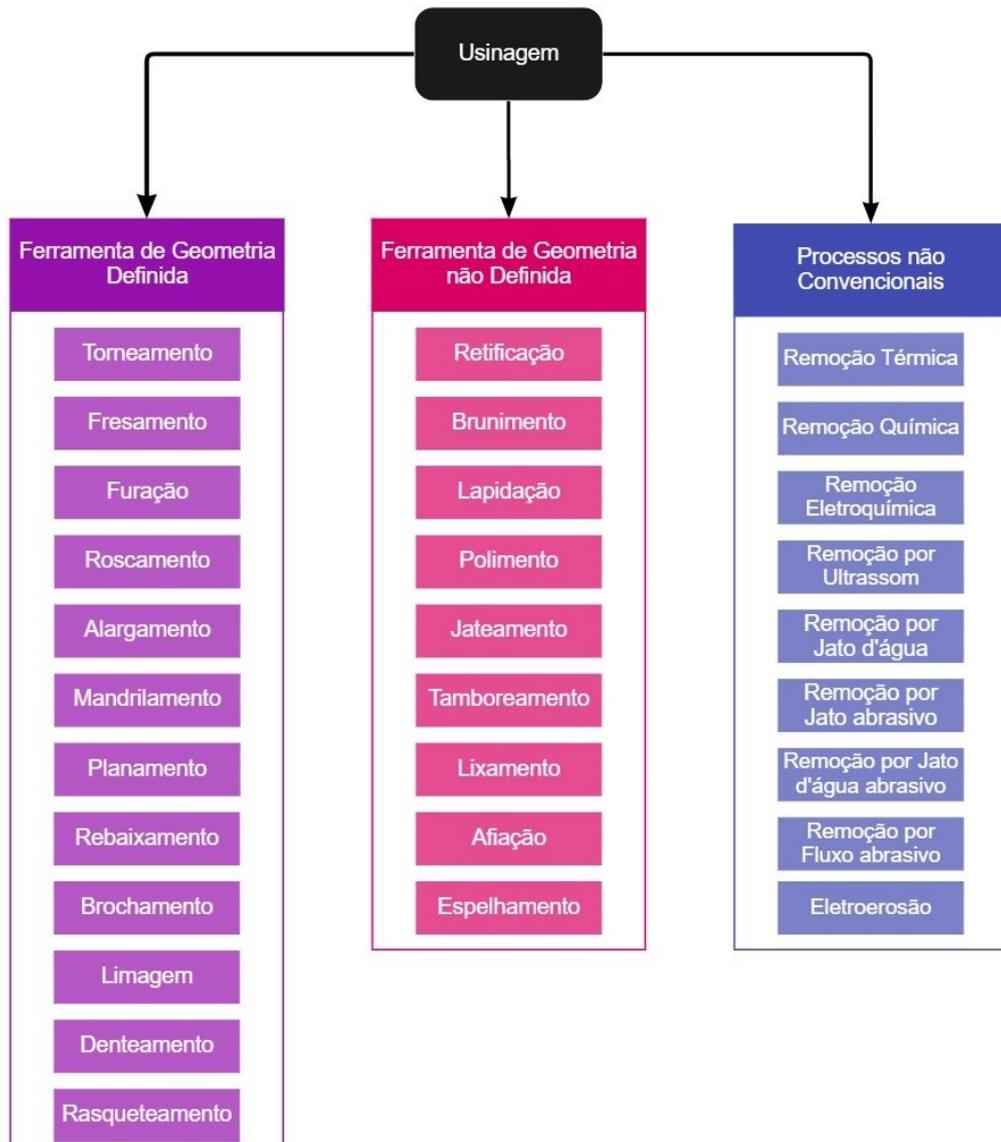


Fonte: Adaptado da NBR 6175 (2015)

2.1.1. TORNEAMENTO

Dentro da grande variedade de processos de usinagem, que podem ser classificados em três categorias como descrito na Figura 03, é apresentado o processo de usinagem por torneamento, definido pela ABNT como “um processo mecânico de usinagem destinado a obter superfícies através de rotações com a ajuda de uma ou mais ferramentas monocortantes. Para isso a peça rotaciona em torno do eixo principal de rotação da máquina e a ferramenta se desloca simultaneamente segundo uma trajetória coplanar com o referido eixo” (ABNT NBR ISO 23125, 2013).

Figura 3 - Categorias do processo de usinagem



Fonte: Adaptado da NBR 6175 (2022)

O processo de torneamento pode ser realizado para desbaste e também para acabamento, onde o primeiro tem como finalidade a remoção de grandes quantidades de material da peça, considerando a menor importância de qualidade superficial nesta etapa e as vantagens econômicas sobre a agilização do processo é utilizado altos valores de avanço e profundidade de corte. Contudo, para o acabamento, a tolerância dimensional é reduzida, é exigido melhor acabamento superficial e conseqüentemente, deve ser realizado com baixos valores de avanço e profundidade de corte (CALABRIA, 2014).

2.1.2. MOVIMENTOS RELATIVOS NA USINAGEM

No sentido que os processos de usinagem requerem a existência de deslocamentos entre a peça e a ferramenta para a remoção de material, é determinado que a relação de movimentos no processo considera a peça estática, conseqüentemente, todo o movimento requerido para o processo de obtenção da forma sobre a matéria prima com objetivo de resultar na peça desejada, é realizado pela ferramenta.

A classificação dos movimentos é determinada a partir dos movimentos ativos, onde ocorre a remoção efetiva de material, assim como os movimentos passivos, que mesmo apresentando suma importância ao processo, não coexistem com a remoção de material (DINIZ, 2008).

Os movimentos ativos são divididos em:

- A. Movimento principal de corte: Relacionado ao movimento entre a ferramenta e a peça para com a remoção do cavaco, porém, caso suceda sem o movimento de avanço durante o processo, ocorreria a remoção do cavaco somente durante uma rotação ou um curso da ferramenta.
- B. Movimento de avanço: Relacionado ao movimento relativo entre a ferramenta e a peça que, simultaneamente para com o movimento de corte, ocasiona na remoção contínua ou repetida do cavaco durante várias rotações ou curso da ferramenta, para processos como o torneamento e a furação esse é contínuo, porém, para o aplainamento um movimento intermitente.
- C. Movimento efetivo de corte: Relacionado ao movimento entre a ferramenta e a peça que resulta no processo de usinagem. Para o processo de torneamento, onde o avanço é contínuo, o movimento efetivo é derivado dos

movimentos de corte e avanço realizados simultaneamente, para processos onde o movimento de avanço é intermitente, o movimento efetivo é equivalente ao movimento de corte.

Quanto aos movimentos passivos, esses são divididos em:

- A. Movimento de ajuste: Relacionado ao movimento entre a ferramenta e a peça, onde é predeterminada a espessura da camada de material a ser removida no processo. Este movimento não ocorre em processos como sangramento, furação e brochamento devido a espessura de remoção do material ser determinada pela própria geometria da ferramenta.
- B. Movimento de correção: Relacionado ao movimento adotado para compensação de variações geométricas no posicionamento no processo, tais como o desgaste da ferramenta, variações térmicas ou deformações plásticas.
- C. Movimento de aproximação: Relacionado ao movimento entre a ferramenta e a peça, onde a ferramenta é aproximada da peça antes do processo.
- D. Movimento de recuo: Relacionado ao movimento entre a ferramenta e a peça, no qual a ferramenta é afastada da peça após a usinagem.

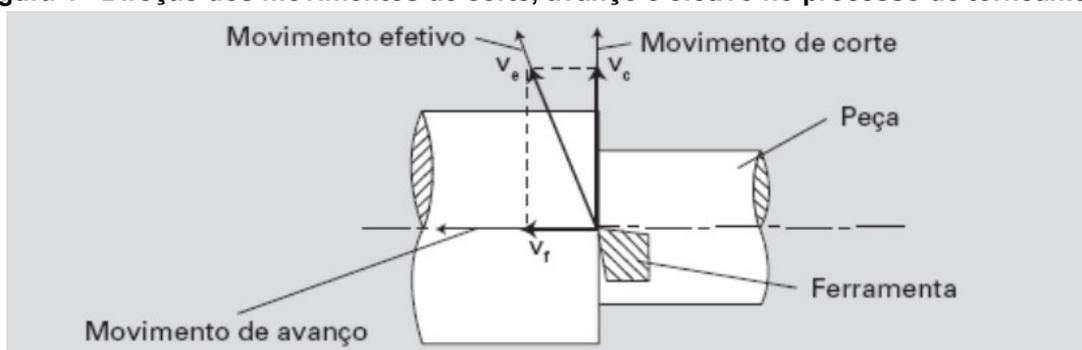
Para todos os movimentos apresentados são associados parâmetros de deslocamento espacial como direção, sentido, velocidade e percursos. A determinação se tais parâmetros se dão pela direção instantânea, sentido resultante sobre a peça parada para com a ferramenta em movimento, velocidade instantânea, e os percursos relacionados as direções de movimentos para determinado tempo de processo.

Dentre os movimentos apresentados, vale destacar alguns como:

- A. Direção efetiva, velocidade efetiva (V_e) e percurso efetivo (l_e)
- B. Direção de corte, velocidade de corte (V_c) e percurso de corte (l_c);
- C. Direção de avanço, velocidade de avanço (V_f) e Percurso de avanço (l_f);

Porém para o contexto do estudo de Diniz, (2008) identificaremos os mais importantes, sendo os três primeiros e que são apresentados na Figura 04.

Figura 4 - Direção dos movimentos de corte, avanço e efetivo no processo de torneamento



Fonte: Machado (2009)

2.1.3. FORÇAS DE CORTE

A partir da compreensão da importância sobre os conceitos sobre o comportamento de atuação e a escala das forças de corte presentes no torneamento, devido a sua direta influência na configuração de parâmetros e resultados para o processo, tais como a potência necessária para o corte, a viabilidade na obtenção de tolerâncias, o desgaste da ferramenta do processo assim como as características térmicas (DINIZ, 2008).

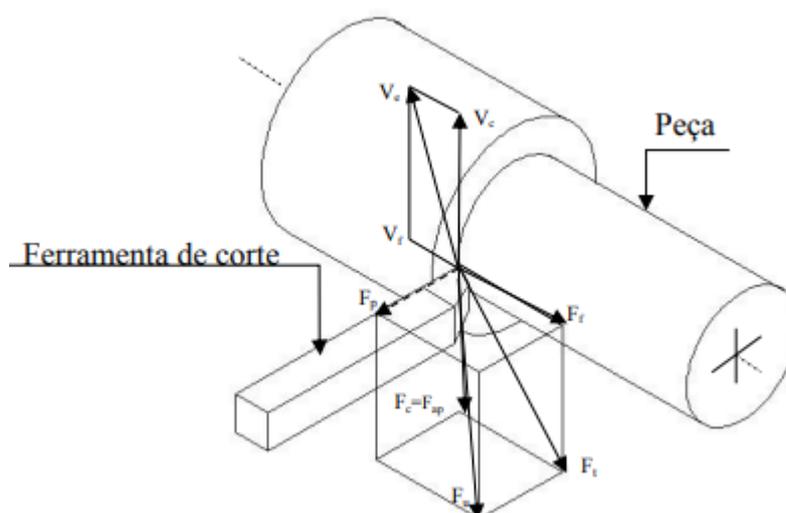
A caracterização de todas as ações que a peça estabelece sobre a ferramenta é dada como esforços de corte, dentre elas, a força de usinagem (F_u) pode ser definida como a força resultante total, a qual atua sobre a cunha cortante durante o processo, porém para determinação de esforços de processo deve-se avaliar o comportamento de suas componentes (DINIZ, 2008).

Consoante a norma ABNT – NBR ISO 3002-1, (2013) que define as grandezas básicas no processo de usinagem e retificação, no determinante a geometria da parte cortante de ferramentas de corte no tocante a termos gerais, sistemas de referência, ângulos de trabalho e quebra de cavacos, esta apresenta que a força de usinagem é projetada por duas componentes: a força ativa F_t e a força de profundidade ou passiva F_p . A força ativa ainda pode ser apresentada a partir da decomposição de outras forças como: a força de avanço F_f e também a força de corte F_c .

A relação entre a força de usinagem e suas componentes: forças de avanço, força de corte e a força passiva pode ser determinada conforme as relações trigonométricas apresentadas na Figura 05 a partir da Equação 01.

$$F_u = \sqrt{(F_c)^2 + (F_p)^2 + (F_f)^2} \quad (01)$$

Figura 5 - Forças resultantes da ação da peça sobre a ferramenta no processo de usinagem



Fonte: SILVA (2014)

Para análises dos esforços de corte, estudos apresentam a medição com a utilização de dinamômetros piezoelétricos, como no estudo de PAWADE, JOSHI, E BRAHMANKAR, (2007) onde fora utilizado um dinamômetro piezoelétrico da KISTLER, modelo 9257 considerando a avaliação de três componentes de força.

Porém em estudos como: TOTIS E SORTINO, (2011) e YALDIZ E ÜNSAÇAR, (2006) houve o desenvolvimento de dinamômetros próprios para cada situação específica decorrente das necessidades particulares de projeto, nos casos citados, foram projetados dinamômetros com a capacidade de executar a medida das três componentes de força de forma simultânea.

No estudo YALDIZ E ÜNSAÇAR, (2006) fora desenvolvido um dinamômetro com capacidade de avaliar e mensurar simultaneamente as três componentes de forças e o torque para esforços de até 5000N com uma precisão de sensibilidade da ordem de 5N.

Quanto à força ativa, derivada da força de usinagem, essa apresenta uma grande influência para com a potência de usinagem devido a coexistir no plano de trabalho, no mesmo plano onde os movimentos de torneamento são realizados. (DINIZ, 2008).

As suas componentes são:

- Força de corte F_c : Projeção de F_u sobre a direção do corte.
- Força de avanço F_f : Projeção de F_u sobre a direção de avanço

- Força de apoio F_{ap} : No mesmo sentido e direção que F_c .

Quanto a força passiva, essa não está correlacionada a potência de usinagem devido ao seu plano ser perpendicular ao plano de trabalho, porém, é a responsável pela existência da deformação elástica da peça e ferramenta durante o processo (DINIZ, 2008).

Quanto a força de corte, essa pode ser apresentada pela relação

$$F_c = k_s \cdot A \quad (02)$$

K_s está relacionado a pressão específica de corte e A a área da seção de corte, para o processo de torneamento pode ser obtida a partir da relação

$$A = f \cdot a_p \quad (03)$$

Onde f se dá pelo avanço e a_p pela profundidade de corte no processo.

A literatura apresenta os fatores que apresentam impacto direto sobre a dimensão das forças de corte, além dos acima apresentados, a velocidade de corte e a rotação da peça, segundo STEMMER, (1993) a seção de cavaco se apresenta como o fator de maior influência para tal força e por consequência direta, na própria potência necessária para realização do processo de usinagem.

Ainda segundo STEMMER, (1993) outros fatores como as condições de usinagem, material da peça, correlacionado as suas características de microestrutura e fator de encruabilidade, e a geometria da ferramenta, influenciado a partir da dimensão dos ângulos de saída axial γ_a e radial γ_r , são aplicados sobre os valores dos esforços de corte.

A grandeza de K_s está relacionada a fatores como quando o material apresenta elevada dureza, conseqüentemente, maior pressão específica no corte, com exceção a materiais que apresentam planos com baixa resistência ou até para materiais com inclusões de característica lubrificante na interface cavaco-superfície, neste caso, reduzindo a pressão específica de corte no processo (DINIZ, 2008).

Para os ângulos existentes no processo, conforme a diminuição do ângulo de folga α_0 , acarretando num maior atrito entre a peça e a ferramenta e por consequência o valor de K_s também aumenta; conforme o aumento do valor do ângulo de saída γ_0 e do ângulo de inclinação λ_s acarretam numa redução da grandeza de K_s (CABAU e COSSICH, 2015).

A pressão específica diminui com o aumento da área de seção do corte, em consequência direta ao aumento do valor de avanço f , porém, alterações na profundidade de corte não apresentam significância sobre a variação de K_s em decorrência que, o aumento de a_p ocasionar apenas no aumento do contato entre a peça e a ferramenta e por isso, com exceção a processos com baixos valores de profundidade de corte, não acarreta no aumento das velocidades no sistema (DINIZ, 2008).

2.1.4. USINAGEM DE AÇO ENDURECIDO

Quanto ao processo de torneamento de materiais endurecidos, estes conquistaram uma grande visibilidade na indústria a partir da busca por tolerâncias e especificações cada vez mais precisas quanto ao acabamento superficial das peças aliado a redução de custos do próprio processo, sendo assim, houve um grande desenvolvimento em pesquisas para busca por processos de produção por usinagem de materiais endurecidos que apresentassem cada vez mais resultados de maior eficiência (PEREIRA et al. 2006).

A sua aplicabilidade se dá no torneamento para fabricação de matrizes, punções e moldes, para esse processo, as geometrias em baixa escala deve ser fabricadas por meio de diferentes ferramentas (OLIVEIRA e DINIZ, 2008).

No processo de usinagem de aços endurecidos ocorrem interações complexas entre a ferramenta de corte e a peça, ocasionando em altas temperaturas no processo e também forças de alta grandeza que provocam o desgaste e conseqüentemente, a quebra da ferramenta, tais fatores acabam influenciado diretamente sobre a precisão do processo e também sobre as características mecânicas da peça (LIPATOV, 2008).

Em situações que o processo de torneamento duro é realizado em peças em que possuem o corte interrompido, tais desgastes se tornam agravantes e conseqüentemente causam uma redução no tempo de vida útil das ferramentas.

2.2. VIBRAÇÕES

Considerando que a existência de sistemas de vibrações entre a peça e ferramenta se dá de forma inevitável no processo de usinagem, os limites quanto a grandeza da amplitude das vibrações sobre o processo é determinado diretamente conforme a aplicação do mesmo. Na etapa operacional de desbaste, o fator

determinante se dá majoritariamente a partir do comportamento das vibrações sobre a vida útil da ferramenta, porém na etapa de acabamento, a determinação da escala das vibrações admissíveis é dada a partir de fatores de qualidade da peça, tais como a qualidade na superfície e na precisão dimensional (CHILDS, 2000).

Por isso, para determinação da eficiência de um processo fabril real, a tolerância quanto a máxima amplitude do sinal das vibrações, isto é, o nível de estabilidade do sistema, é dependente da exigência quanto a qualidade da superfície e precisão dimensional da peça, acarretando sobre o efeito que a própria vibração ocasiona para com a vida da ferramenta. Para casos de amplitudes excessivas, tais vibrações podem acarretar em complicações do processo de usinagem tais como quebra da ferramenta de corte, redução da vida útil e até em casos mais graves causar danos ao eixo-árvore da máquina -ferramenta (ALTINTAS e BER, 2001).

2.2.1. ORIGEM DAS VIBRAÇÕES

Nos processos de usinagem, as vibrações podem ser oriundas de uma única fonte ou até mesmo de múltiplas fontes, tais como as vibrações ocasionadas pelo próprio sistema máquina ferramenta, vibrações de característica externa ao sistema máquina ferramenta, vibrações decorrentes da falta de homogeneidade da peça, vibrações causadas pela existência do corte interrompido e até mesmo as vibrações provocadas diretamente pelo próprio processo de usinagem (POLLI, 2005).

A. Vibrações decorrentes do sistema máquina ferramenta

As vibrações causadas pelo sistema máquina ferramenta advêm do acionamento de componentes que apresentam movimento rotativo ou movimento translativo, ocorrendo sob a forma de vibrações livres ou vibrações forçadas, as livres sendo ocasionadas por choques no processo de corte e as forçadas a partir de aspectos não ideais sobre elementos de transmissão de movimento, tais como a rotação de massa desbalanceada, acionamentos realizados por engrenagens e correias, rolamentos que apresentam irregularidades.

B. Vibrações externas ao sistema máquina ferramenta

As vibrações existentes por meios externos comumente advêm de outros maquinários situados dentro de um layout industrial com proximidade a máquina do processo em questão, tais como aplainadoras, máquinas de perfuração, retificadoras, serras mecânicas, compressores, prensas entre outras.

Considerando que a frequência natural de cada máquina operatriz estará contida na caracterização da máquina do processo em questão, essas ocasionam em uma faixa de frequências muito grande, podendo apresentar níveis elevados de vibrações e conseqüentemente ocasionar em resultados negativos para o processo.

C. Vibrações decorrentes da falta de homogeneidade da peça

A partir da presença de regiões de diferentes durezas sobre uma peça causa pequenos choques sobre a ferramenta e ocasionando em sistemas de vibrações. Estes impactos são absorvidos e não apresentam efeitos de danos consideráveis a eficiência do processo, fazendo parte apenas do “ruído de fundo” durante a usinagem. Porém, se estes choques não forem rapidamente amortecidos acarretam na origem de vibrações com grande amplitude e muito prejudiciais ao processo.

D. Vibrações decorrentes do corte interrompido

No processo de usinagem com corte interrompido, a ferramenta sofre impactos consideráveis e podendo resultar a um aumento indesejado sobre a amplitude do comportamento de vibrações.

2.2.2. VIBRAÇÕES NO TORNEAMENTO

No processo de torneamento, as vibrações podem ser subdividas em três categorias: as vibrações livres, as vibrações forçadas e as vibrações auto excitadas (LEE, 2001).

2.2.2.1. VIBRAÇÕES LIVRES E FORÇADAS

Para uma fundamentação mais representativa, explica-se as vibrações a partir de um sistema de um grau de liberdade, podendo ser alterado a partir da combinação de valores da massa (m), constante elástica da mola (k) e fator de amortecimento (c), e para a situação que exista uma força externa $F(t)$ aplicada para o sistema estrutural, a sua mobilidade é descrita a partir da seguinte equação diferencial:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F(t) \quad (04)$$

O sistema da Figura 06, apresenta o comportamento de vibrações livres para a situação que este recebe um impacto ou para o caso que o mesmo está em repouso e é estaticamente deslocado do seu equilíbrio e posteriormente liberado, amplitude

das vibrações decai com o tempo em conformidade a constante de amortecimento apresentada no sistema e a frequência das vibrações é majoritariamente definida pela rigidez e massa e pouco influenciada pela constante de amortecimento viscoso, pois este é muito pequeno para estruturas mecânicas.



Fonte: EWINS (1984)

Para a situação que a constante de amortecimento é nula, ou seja, C é igual a zero, o sistema oscila na sua frequência natural, definida pela equação:

$$\omega_n = \frac{\sqrt{k}}{m} \quad (05)$$

Onde é representada a frequência natural (ω_n) massa (m) e rigidez do material (k).

A razão de amortecimento é definida por:

$$\zeta = \frac{c}{2\sqrt{km}} \quad (06)$$

Para estruturas metálicas, comumente o valor de $\zeta < 0,05$ (ALTINTAS, 2001).

A frequência natural amortecida da estrutura é definida pela equação:

$$\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2} \quad (07)$$

Onde é representada a frequência amortecida do sistema ω_d . Segundo (ALTINTAS, 2000) para o processo de usinagem, as excitações externas geralmente apresentam o comportamento periódico, porém, não harmônicas. Mas a partir da literatura, sabe-se que qualquer força periódica pode ser representada por suas devidas componentes harmônicas.

As funções harmônicas complexas são majoritariamente utilizadas para representação de vibrações forçadas, a força harmônica pode ser expressa por:

$$F(t) = F_0 e^{i\alpha} e^{i\omega t} \quad (08)$$

Onde é representada a fase medida α , a partir da determinação de um tempo de referência ou podendo ser a posição angular em um plano complexo (ALTINTAS, 2000).

A determinação harmônica correspondente pode ser expressa por:

$$x(t) = X e^{i(\omega t + \Phi)} \quad (09)$$

Quando a Equação 09 é substituída na Equação do movimento 04 o resultado pode ser apresentado pela equação:

$$(k - \omega^2 m + j\omega x) X e^{i\Phi} e^{i\omega t} = F(t) = F_0 e^{i\alpha} e^{i\omega t} \quad (10)$$

A partir disso é possível representar a amplitude das vibrações harmônicas:

$$|\Phi(\omega)| = \left| \frac{X}{F_0} \right| = \frac{1}{k \sqrt{(1-r^2)^2 + (2\zeta r)^2}} \quad (11)$$

E também determinar a fase das vibrações harmônicas por:

$$\emptyset = \tan^{-1} \frac{-2\zeta r}{1-r^2} + \alpha \quad (12)$$

Conforme a relação entre a frequência de excitação e a frequência natural é representada a partir da equação:

$$r = \frac{\omega}{\omega_n} \quad (13)$$

A equação da amplitude das vibrações harmônicas pode ser denominada de função transferência, função resposta em frequência ou até de admitância da estrutura. Esta função ainda pode ser separada conforme suas componentes (ALTINTAS, 2001).

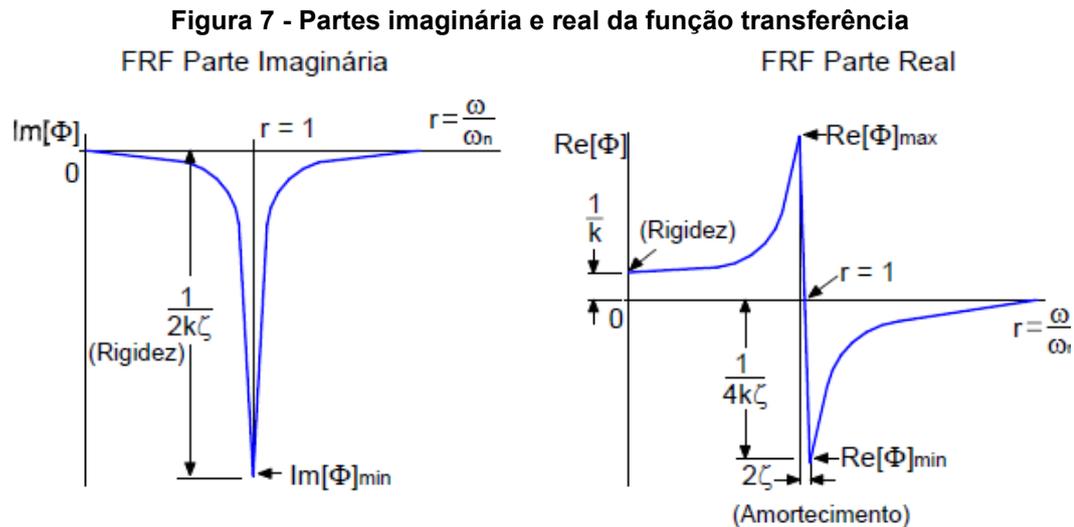
A componente real:

$$Re[\Phi] \quad (14)$$

E também pela componente imaginária:

$$Im[\Phi] de \frac{x}{F_0} e^{i(\Phi - \alpha)} \quad (15)$$

O sistema é apresentado na Figura 07.



Fonte: ALTINTAS (2001)

A estimativa de fatores como a razão de amortecimento, rigidez, frequência natural pode ser realizada a partir da função transferência. Para situações de sistemas com múltiplos graus de liberdade, as funções de transferência são identificadas a partir de testes dinâmicos estruturais, e para tal prática, existe instrumentos de excitação como os “shakers” eletromagnéticos ou eletro hidráulicos, capazes de gerar forças por uma larga faixa de frequências contendo modos naturais dominantes das estruturas testadas, e também, martelo de impacto, o qual está associado a um transdutor de força piezoelétrico (EWINS, 1984)

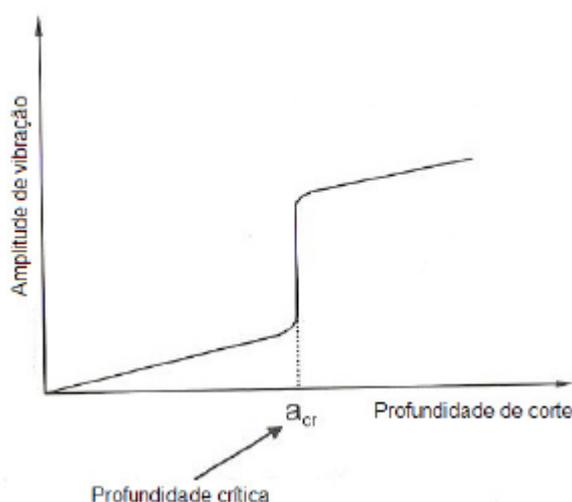
2.2.2.2. VIBRAÇÕES AUTO EXCITADAS

As vibrações mais prejudiciais ao processo de torneamento são caracterizadas como auto-excitadas (HARRIS, CREDE e DEN HARTOG, 1962), apresentadas como complexas, porém facilmente discernidas por seu ruído produzido e pelas decorrentes marcas de vibração acarretadas sobre o acabamento superficial das peças e também pela variação da espessura dos cavacos. Tais marcas são decorrentes da variação da força de corte, que pode, com o tempo, ocasionar em uma possível quebra da ferramenta ou de alguma parte do sistema da máquina (HUANG, 2006).

Considerando que o comportamento de vibração auto excitada é oriundo de instabilidade dinâmica existente no processo de torneamento, comumente determinado pelo efeito regenerativo, que pode ser definido pela excitação da ferramenta a partir das ondulações produzidas na superfície da peça devido aos esforços do próprio corte, por isso, um fator de grande valia sobre o comportamento

da vibração de auto excitação é determinado pela profundidade de corte a_p , está determinada por uma função que apresenta um, valor crítico no processo, acima disto ocorrem instabilidades durante o corte (CABAU, 2015) como pode ser visto na Figura 08.

Figura 8 - Representação gráfica da amplitude de vibração em função da profundidade de corte no processo de torneamento



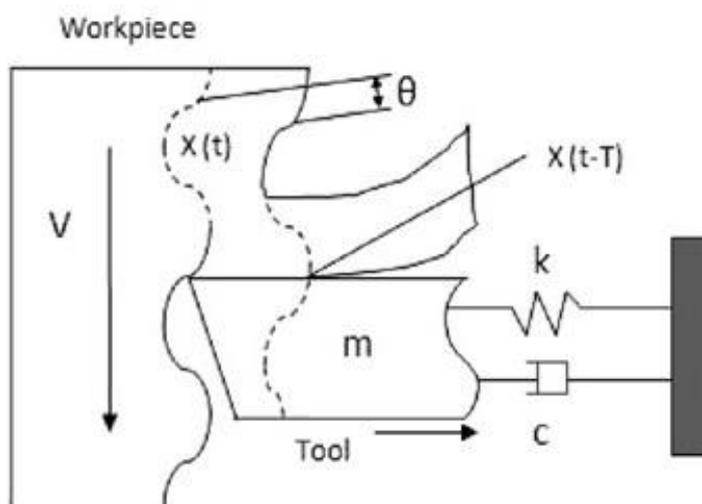
Fonte: CABAU (2015)

Considerando o comportamento do sistema de vibração e os esforços de corte por meio de um mecanismo de retroalimentação, apresentando um sistema dinâmico com ciclo fechado e apresentando a frequência natural da vibração auto excitada com proximidade na grandeza ou superior a escala da frequência natural do sistema como apresentado na Figura 09 (SALOKYOVÁ et al. 2016; SIDDHPURA e PAUROBALLY, 2012).

Nas operações de usinagem, uma das partes estruturais do sistema máquina ferramenta é excitada a partir de forças de corte, com isso, uma superfície ondulada, conseqüente da passagem do gume, é removida pelo próximo gume de corte na conforme o decorrer do tempo (t) e também resulta em outra superfície ondulada em decorrência das vibrações estruturais no processo.

O comportamento das vibrações torna-se variado a partir da avaliação da diferença da fase entre duas ondulações sucessivas, apresentando vibrações atenuadas ou vibrações ampliadas.

Figura 9 - Mecanismo de Vibração Auto Excitada



Fonte: SALOKYOVÁ et al. (2016)

A Figura 09 é caracterizada por meio do sistema de massa (m), constante elástica da mola (k) e fator de amortecimento (c) e parâmetros relacionados a ferramenta como a velocidade de corte da peça (V), a função da onda gerada para a atual revolução $x(t)$ e a onda gerada na revolução anterior da peça $X(t-T)$ (CABAU e COSSICH, 2015).

O fator variação entre as ondas entre revoluções (θ) apresenta-se como determinante na ocorrência de vibrações no processo de torneamento.

Para a situação de duas ondas coexistirem sobre a mesma fase, ou seja, ($\theta=0$), a grandeza sobre as ondulações não sofrerá crescimento e o processo se determinará num comportamento estável, por razões da ordem de grandeza da variação da espessura do cavaco ser insignificante e por isso, não apresenta variação de força sobre a ferramenta.

Para uma avaliação considerando os fatores de transferência de energia do sistema de torneamento, o surgimento de vibrações no sistema pode ser equivalente ao limite de estabilidade do mesmo, para o qual, a energia fornecida é igual à energia dissipada.

Para a situação de ondas sobre a mesma fase ($\theta=0$), não ocorre excedentes de energia sobre o sistema e por consequência, apresenta um processo estável. Porém, quando as ondas não se apresentam na mesma fase ($\theta \neq 0$), as ondulações $x'(t)$ crescem devido a somatória da energia a ser fornecida a ferramenta de corte e a energia dissipada ser menor que a energia fornecida (CABAU e COSSICH, 2015).

A partir dessa variação de energia, ocorre um processo de corte instável, apresentando variações na espessura do cavaco resultante do processo e por consequência, gera forças de corte dinâmicas numa escala de frequência próxima a de um dos modos naturais e excita ainda mais o próprio sistema.

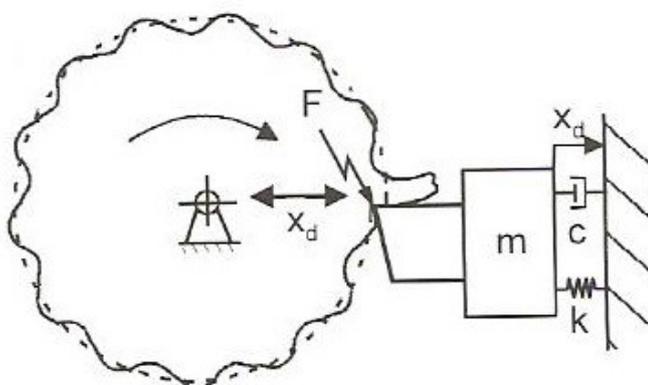
Uma representação do efeito auto regenerativo ocorrido durante um processo de corte ortogonal é apresentada por meio da Figura 09, considerando a relação de vibração da ferramenta para com a espessura do cavaco formado devido a influência deste último sobre as forças de corte no sistema (apud SALOKYOVÁ et al. 2016 CABAU e COSSICH, 2015; SIDDHPURA e PAUROBALLY, 2012).

Na Figura 09, as direções do deslocamento da ferramenta são apresentadas por $x(t)$ e $y(t)$, a velocidade de corte V e o período para uma revolução da peça.

A partir do estudo realizado por Thomas e Beauchamp (2003) foi confirmada a possibilidade de monitoramento exclusivo do efeito da força de corte a partir de medições da frequência natural da ferramenta, foi examinado que o comportamento de vibração da ferramenta apresenta-se de forma idêntica a um sistema de um grau de liberdade para cada coordenada para uma avaliação em uma faixa de frequência limitada, como representado na figura 10.

Na Figura 10, o deslocamento da ferramenta na direção radial é representado por x_d , força de usinagem F , massa equivalente m , parâmetro de amortecimento do sistema c e parâmetro de elasticidade do sistema k .

Figura 10 - Modelo de um grau de liberdade para o processo de torneamento



Fonte: WECK (2006)

No estudo de Dimla, (2004) foram observadas relações no comportamento dos parâmetros amplitude e frequência das vibrações comparativamente entre o sinal de

vibração e as variações de forças dinâmicas, a partir disto, pode ser correlacionada a influência das forças oscilatórias no sistema sobre o grau de oscilação da ferramenta.

Em decorrência disso, pode se determinar a correspondência da frequência do movimento vibratório da ferramenta, na direção radial, para com a frequência de oscilação da força passiva, a qual apresenta grande influência sobre a frequência de formação de cavacos e efeito regenerativo no sistema.

Tobias, (1961) apresentou o desenvolvimento de modelos lineares, e também, definiu a variação dos efeitos ocasionados sobre a vibração da ferramenta, cada qual ocasionadas por forças correlacionadas, sendo subdivididos por:

- A. Efeito na frequência por meio do efeito regenerativo causado pela variação de espessura do cavaco.
- B. Efeito na amplitude a partir da variação do amortecimento da ferramenta decorrente de uma força de grandeza proporcional a velocidade causada pela condição de atrito do sistema.
- C. Efeito na amplitude a partir da variação do amortecimento da ferramenta decorrente da variação da velocidade de corte.
- D. Efeito na frequência natural e na amplitude a partir da formação de uma força de grandeza proporcional ao deslocamento da ferramenta e a velocidade causada pela variação da taxa de penetração.

A partir do desenvolvimento tecnológico e intensivas pesquisas na área, foi possível definir que as configurações dos parâmetros de cortes influenciam diretamente sobre a tendência a vibrações do sistema, onde o avanço e a profundidade de corte apresentam maior influência comparativamente para com a velocidade de corte (DAS e HAZARIKA, 2019).

2.2.3. DETECÇÃO DE VIBRAÇÕES NO TORNEAMENTO

No processo de detecção e controle de vibrações de um processo, os parâmetros dados pelo intervalo de frequência captado pelo sensor e a sua localização relativa para com o objeto de estudo são fundamentais para o monitoramento do comportamento das vibrações. Outro aspecto importante na escolha de sensores se dá por sua capacidade de detecção de vibrações oriundas de múltiplas fontes, considerando que o sinal pode ser resultado de vibrações da peça, ferramenta, eixo árvore e até da estrutura da máquina.

Para obtenção de resultados de maior confiabilidade deve-se ser menor a distância relativa dos sensores para com a região de corte, porém, a utilização de fluidos de corte ou até mesmo a formação de cavaco podem causar danos aos sensores que apresentam alta sensibilidade a estes eventos, tais como os modelos de sensores por deslocamento por capacitância ou sensores ópticos (SMITH e TLUSTY, 1992).

Foi apresentada no estudo de Cabau e Cossich, (2015) que o monitoramento das vibrações em processos de usinagem pode ocorrer a partir da utilização de microfones, pois este apresenta um sinal aceitável para tais situações, capazes de detectar sinais de vibrações oriundas da ferramenta, peça e da máquina abrangendo até situações com cortes de pequenas seções de usinagem.

Os microfones ainda apresentam uma banda de frequência adequada e permite um posicionamento relativamente distante da zona de corte sem apresentar perda de sensibilidade, mesmo que, apresentem problemas significativos em utilizações em ambiente com diversas fontes de ruído. Também existem técnicas de direcionamento com objetivo de isolamento da acústica do processo para com outras fontes potenciais de ruídos (DELIO, 1992).

A utilização de acelerômetros, sensores de deslocamento óptico ou sensores por impedância para um ponto distante da aplicação da força de corte podem estar localizados próximos a um ponto nodal de um dos modos de vibração. O posicionamento de um transdutor para todos modos de vibrações possíveis na usinagem exige conhecimento prévio do comportamento dinâmico comparativo a faixa de operação da máquina (DUARTE, 2018).

Elementos como fixações, as geometrias possíveis de peça e a variedade de ferramentas no sistema ocasionam em uma grande variedade de frequências e modos de vibração no processo, sendo necessário a utilização de sensores em dois eixos ortogonais para uma medição confiável das vibrações atuantes no plano de corte devido aos graus de liberdade que ferramenta pode apresentar modos de vibrações. Considerando ainda que o posicionamento sobre algum dos componentes acima citados ocasionaria em problemas de transmissibilidade no processo (DELIO, 1992).

Segundo Müller, (2002) os sistemas máquina-ferramenta que apresentam eixos-árvores com mancais magnéticos permitem a identificação de comportamentos de vibrações a partir do monitoramento por meio dos seus sensores e posicionamento.

A análise é realizada a partir das órbitas do eixo que correspondem a curvas descritas pelo rotor em um plano perpendicular ao seu eixo de rotação.

Se durante o processo não houver vibrações, o processo pode ser determinado de comportamento suave e o eixo descreve aproximadamente a mesma curva para duas rotações consecutivas em contrapartida, quando ocorrem vibrações, o eixo apresenta a descrição de uma curva diferente para cada rotação (MÜLLER, 2002).

No estudo de Thomas e Beauchamp, (2003) foi avaliadas as características de ferramentas de cortes para o torneamento a seco, as forças de corte foram identificadas a partir de extensômetros para direção radial e direção tangencial. Para identificação da aceleração nas direções de avanço, sorte e sobre a direção radial foi utilizado um acelerômetro de três eixos montado sobre a ferramenta.

2.3. DESGASTE DA FERRAMENTA DE CORTE

Nos processos de usinagem, diversos fenômenos acarretam ao fim de vida da ferramenta. A partir do contato da ferramenta e a peça, os mecanismos de desgaste aparecem, estando estes correlacionados ao grau de usinabilidade do material e os parâmetros utilizados (EZUGWU e OKEKE, 2001). Conforme STEMMER, (2008) alguns fatores são destacados, como o desgaste rápido da ferramenta, superaquecimento da ferramenta e aderência de material da peça sobre as arestas de corte acarretando em uma maior potência de corte requerida e pior acabamento superficial.

Segundo MILLS e REDFORD, (1983) existem 5 mecanismos básicos de desgaste de ferramenta, sendo divididos em:

- A. Desgaste por abrasão
- B. Desgaste por aderência
- C. Desgaste difusivo
- D. Desgaste eletroquímico
- E. Desgaste por fadiga superficial

O desgaste por abrasão é causado pelo movimento relativo entre a superfície da inferior do cavaco e a superfície de saída da ferramenta e também entre a nova superfície de corte e aresta de corte da ferramenta.

Este mecanismo comumente gera desgaste de flanco devido ao movimento relativo entre a aresta de corte e a nova superfície da peça e desgaste de cratera em consequência ao movimento entre o cavaco e a superfície de saída (AMORIM, 2002).

Para este mecanismo, os materiais que apresentam inclusões duras e afiadas são mais prejudiciais que os materiais que apresentam inclusões endurecidas e esféricas pois estes tendem a deformar plasticamente a superfície da ferramenta.

O de desgaste por aderência ocorre na região onde ocorre a união do cavaco e a superfície de saída da ferramenta, denominada de zona de aderência, causado a partir da ocorrência de aresta postiça de corte instável. Este mecanismo de desgaste, devido a dependência do aparecimento da aresta postiça de corte, costuma ocorrer para processos com baixas velocidades de corte.

A aresta postiça de corte é composta por uma camada de cavaco que, ao aderir à aresta de corte acarreta na modificação de seu comportamento para com força de corte, desgaste de ferramenta e acabamento superficial da peça. A aresta postiça de corte instável ocorre quando esta é periodicamente arrancada da ferramenta e carrega pequenas quantidade do material da ferramenta.

A definição do desgaste difusivo pode ser determinada a partir da transferência de átomos de um material para outro, acarretando a variação de propriedades da camada superficial da ferramenta. Este mecanismo é altamente dependente da temperatura e da solubilidade dos elementos presentes na zona de fluxo e comumente maior para processos com altas velocidade de corte e avanço (AMORIM, 2002).

A difusão ocorre na zona de aderência, e considerando a velocidade da camada inferior do cavaco como zero, proporciona o tempo necessário para que esta ocorra e apresente a renovação constante do material devido as camadas do cavaco acima da interface estarem em movimento constante. A forma mais eficiente de prevenção do desgaste difusivo se dá pela utilização de ferramentas compostas de materiais que apresentem maior inércia química ou que apresente revestimento que dificultem a difusão ou a formação de carbonetos complexos de baixa resistência ao cisalhamento.

A maior aparição do desgaste eletroquímico se dá em processos que utilizam fluidos de corte, que, segundo MILLS e REDFORD, (1983) acarretam em condições adequadas para ocorrência de reação eletroquímica no sistema entre a ferramenta e

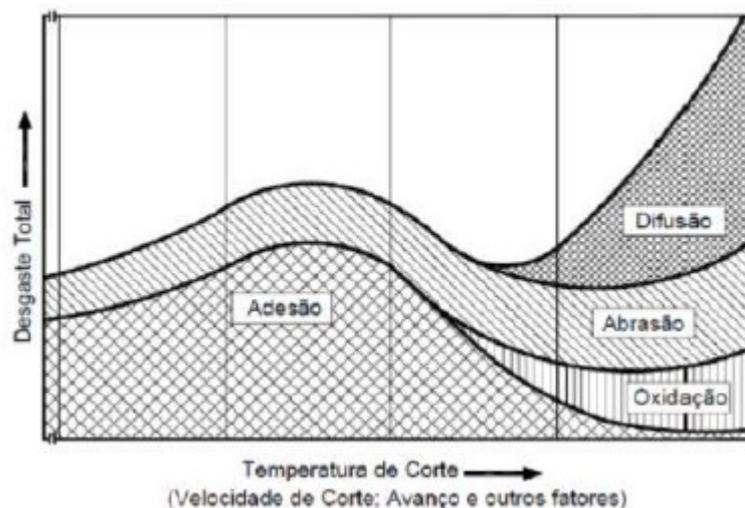
a peça, resultando numa camada de baixa resistência ao cisalhamento na superfície de saída da ferramenta.

Segundo MILLS e REDFORD, (1983) quando ocorre a redução de forças de cortes em consequência da redução do atrito na camada de baixa resistência em conjunto a redução do desgaste abrasivo e até do desgaste adesivo, devido a ação do fluido de corte na redução da temperatura, estes valores compensam o desgaste de ferramenta devido a reação eletroquímica.

O desgaste por fadiga é determinado na falha superficial devido a carregamentos mecânicos e ou térmicos repetidos, sendo mais propício em processos de corte interrompido ou em corte contínuo de força de corte instável e também quando a dureza relativa entre a peça e o material da ferramenta não é elevado. Atualmente, existem modelos que relacionam as emissões acústicas com o desgaste da ferramenta (DIMLA et. al. 2002; JEMIELNIAK e OTMAN, 1998).

Também KÖNIG e KLOCKE, (1997) apresentam que a principal causa de desgaste da ferramenta são as propriedades do material e que os danos aos gumes ocorrem a partir de solicitações mecânicas e fadiga térmica excessiva, abrasão, adesão, difusão e oxidação como apresentado na Figura 11.

Figura 11 - Causas de desgaste na usinagem de peça



Fonte: KÖNIG e KLOCKE (1997)

O monitoramento do desgaste progressivo da ferramenta deve ser considerado pois possibilita a previsão do número de arestas necessárias à fabricação de determinado lote (KÖNIG, 1997).

2.4. CRITÉRIOS DE FIM DE VIDA DA FERRAMENTA

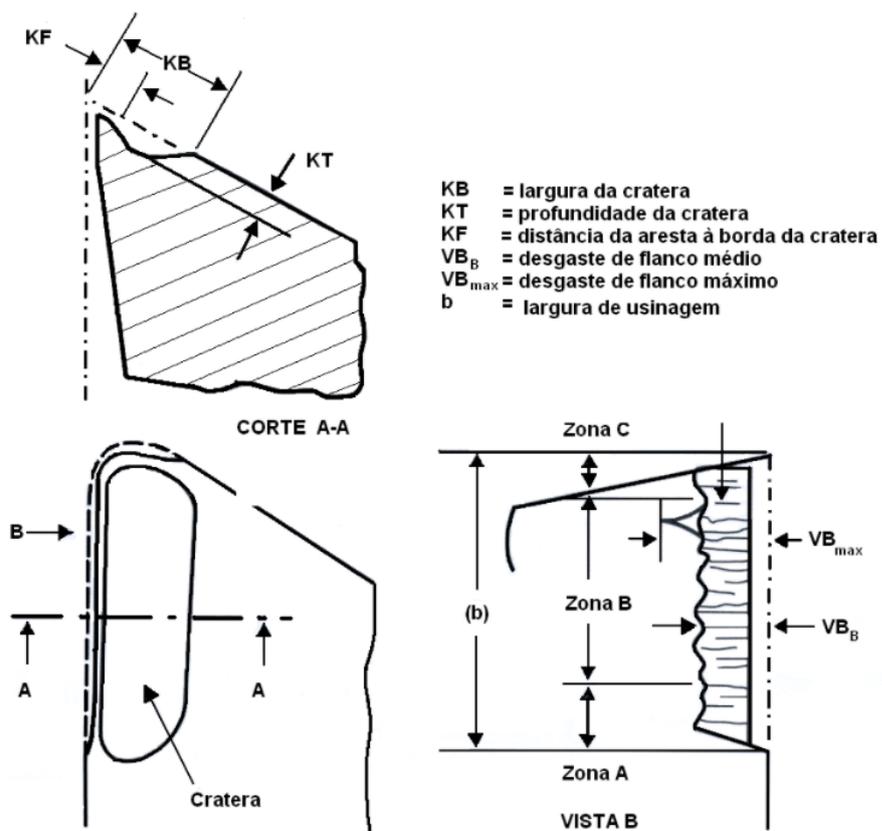
A norma ISO 3685, 2017 estabelece ensaios de usinabilidade para determinar o período de tempo de trabalho de uma ferramenta de corte até sua devida substituição como representado na Figura 12 determinado como tempo de vida da ferramenta de corte considerando o tempo de trabalho necessário para que apresente um defeito crítico.

Para ferramentas de aço rápido e cerâmica, os critérios utilizados são relativos ao desgaste de flanco médio e desgaste de flanco máximo.

Para ferramentas de metal duro, os critérios utilizados se dão pelo desgaste de flanco médio, desgaste de flanco máximo, profundidade de cratera e distância frontal entre cratera e flanco.

A norma ainda determina fatores de troca a partir da rugosidade superficial a partir do crescimento repentino das forças de usinagem como critério de fim de vida de ferramentas em operações de acabamento. Para a utilização do fator de rugosidade média, os valores indicados são 0,4; 0,8, 1,6; 3,2; 6,3 e 12,5 μ m e determinados conforme a tolerância estabelecida para o projeto. Sendo que já é possível prever o acontecimento de defeitos relacionados ao fim da vida útil da ferramenta (JOHANSSON, et. al. 2017).

Figura 12 - Critérios de fim de vida para ferramenta de corte



Fonte: Adaptado de ISO 3685 (2017)

3. MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia empregada nesse trabalho foi baseada no desenvolvimento de ensaios sistemáticos em laboratório, com isso foi planejado inicialmente ensaios de metalografia para caracterizar o estado de fornecimento do material utilizado.

3.1. ANÁLISE DO MATERIAL FORNECIDO

Inicialmente foi realizado o ensaio de dureza, para avaliar a conformidade e estado do material fornecido, utilizando o durômetro da Fotografia 13 no modelo Rockwell Hardness Tester series 500.

Fotografia 13 – Rockwell Hardness Tester series 500



Fonte: A autoria própria (2022)

Considerando que o material fornecido se tratava de um aço endurecido em barra com diâmetro de 35 mm, seguindo a NBR-6671, 1992 apresentada na Tabela 01 a escala utilizada seria Rockwell C – HRC, com carga de aplicação 150 e ponteira de diamante cone 120°.

Tabela 1 – Norma brasileira para realização de ensaio de dureza NBR-6671

ESCALA DE DUREZA ROCKWELL NORMAL E APLICAÇÕES						
ESCALA	COR DA ESCALA	CARGA M PENETRADOR			FAIXA DE UTILIZAÇÃO	CAMPO DE APLICAÇÃO
A	preta	60	diamante	cone 120°	20 a 88 HRA	Carbonetos, forças de aço com fina camada superficial endurecida
C	preta	150	diamante	cone 120°	20 a 70 HRC	Aço, titânio, aços com camada endurecida profunda, materiais com HRB>100
D	preta	100	diamante	cone 120°	40 a 77 HRD	Chapas finas de aço com média camada endurecida
B	vermelha	100	esfera aço	1,5875mm	20 a 100 HRB	Ligas de cobre, aços brandos, ligas de alumínio, ferro maleável etc.
E	vermelha	100	esfera aço	3,175mm	70 a 100 HRE	Ferro fundido, ligas de alumínio e de magnésio
F	vermelha	60	esfera aço	1,5875mm	60 a 100 HRF	Ligas de cobre recozidas, folhas finas de metais moles
G	vermelha	150	esfera aço	1,5875mm	30 a 94 HRG	Ferro maleável, ligas de cobre-níquel-zinco e de cobre-níquel
H	vermelha	60	esfera aço	3,175mm	80 a 100 HRH	Alumínio, zinco, chumbo
K	vermelha	150	esfera aço	3,175mm	40 a 100 HRK	Metais de mancais e outros muito moles ou finos

Fonte: Adaptado de NBR-6671 (1992)

A partir da definição de escala e setup do durômetro, o próximo passo foi preparar a superfície do material para o ensaio, utilizando lixa na superfície para friccionar a amostra até apresentar um certo nível de homogeneidade como apresentado na Fotografia 14.

Fotografia 14 – Barra do material preparado para o ensaio de dureza



Fonte: Autoria própria (2022)

Realizando o ensaio de dureza em 12 pontos visualmente equidistantes no material, o resultado apresentado pelo durômetro foi constante para todos os pontos em uma dureza de 54HRC.

Na sequência, seria necessária a caracterização da microestrutura do material fornecido, para isso o material precisou passar por uma preparação metalográfica onde inicialmente foram cortadas amostras menores que permitissem a avaliação em um microscópio, onde a barra foi cortada numa espessura de 8mm e repartida em 4 partes iguais a partir da sua face frontal, cada pedaço equivalente a 90° da barra original com mesma espessura de 8 mm como representado na Figura 15.

Fotografia 15 – Amostras de 6mm de espessura



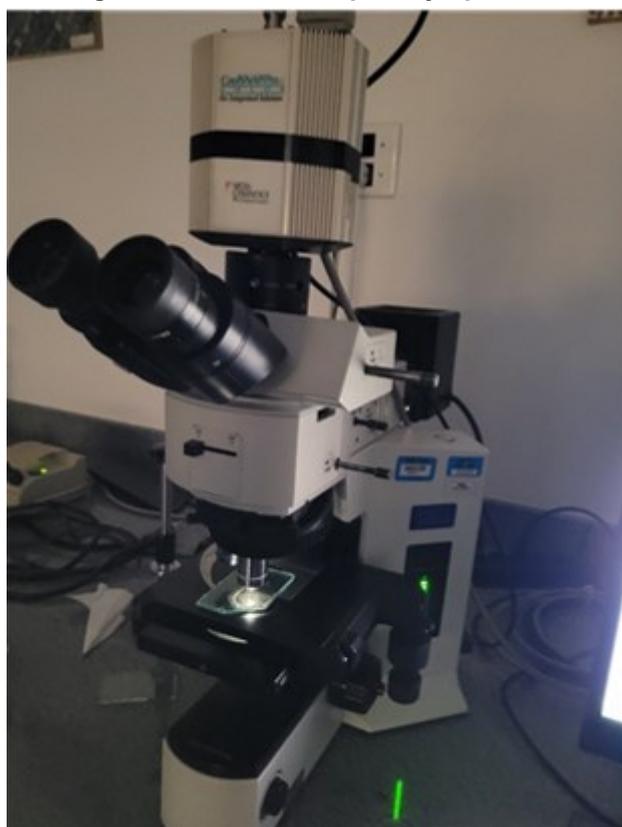
Fonte: Autoria própria (2022)

A partir disso, a próxima etapa seria o lixamento das faces para análise, sendo aqui determinado que duas amostras seriam analisadas a partir da face paralela a face de corte e outras duas amostras na face ortogonal a face de corte.

A preparação por lixamento foi realizada em lixas d'água de granulometria inicial de 320 e em sequência 400, 600 e 1200, após isso, o polimento das amostras foi feito utilizando alumina em suspensão de alta concentração.

E após o polimento das amostras estar concluído, foi necessário o ataque químico por solução ácida de Nital 2% por 20 segundos para destaque da superfície a ser analisada no microscópio Olympus SZX 10 apresentado na Figura 16.

Fotografia 16 – Microscópio Olympus SZX 10

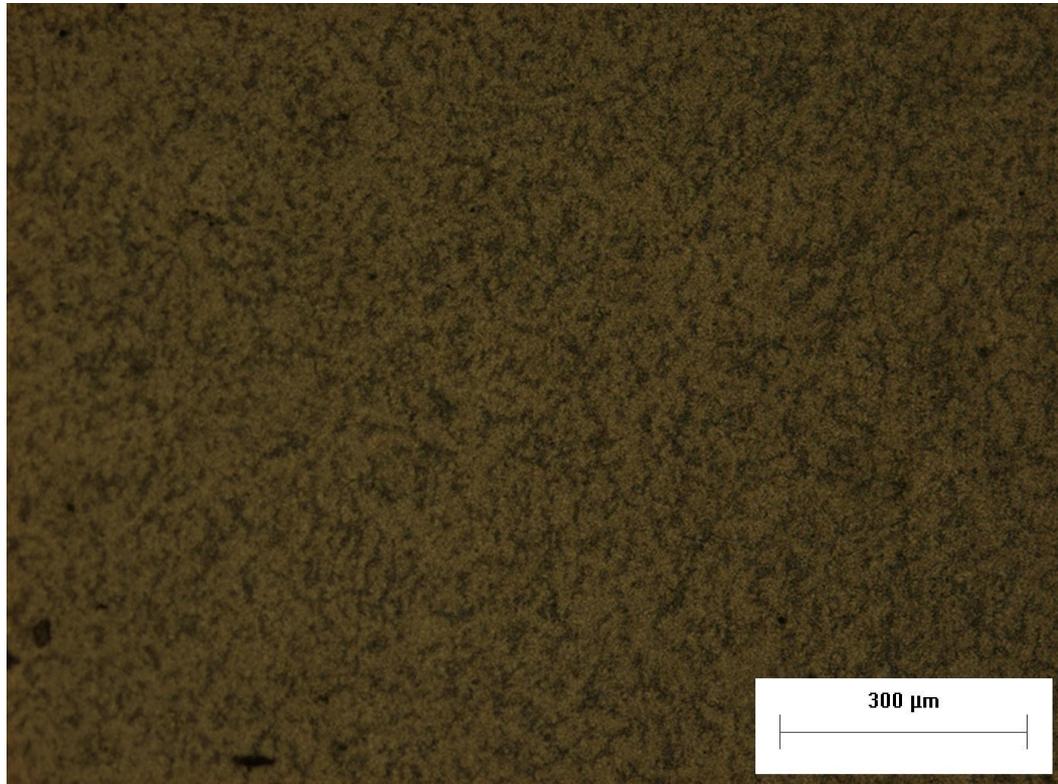


Fonte: A autoria própria (2022)

Considerando que o microscópio Olympus SZX 10 é equipado com um cabeçote de visualização trinocular ergonômico com lentes WHN10x/22 F0V, porta objetivas de dupla posição com lentes auxiliares DF PLAP0 1x e DF PL 1.5x, com base de luz transmitida de contraste de alto nível Olympus SZX1-ILLB configurado a uma placa de captura e um microcomputador de processamento dos dados como e apresenta filtros para seleção das imagens, foi selecionado o filtro amarelo e assim

apresentou a microestrutura superficial da amostra para lente objetiva 50X representada na Figura 17.

Figura 17 – Estrutura superficial do material base



Fonte: Autoria própria (2022)

A partir da avaliação da microestrutura, baseada em conhecimentos e experiência na caracterização por meio de vivência anterior a projetos designados na área de engenharia dos materiais além de referências como a tabela de propriedades e tratamentos de materiais fornecidos pela Villares, e foi determinado que o material fornecido em questão é o VTPLUS.

3.2. MÁQUINA, FERRAMENTA E PARÂMETROS DE USINAGEM

A usinagem foi realizada no centro de torneamento ROMI GL 240, apresentado na Figura 18 e localizado no laboratório de CNC do Departamento de Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Curitiba.

Figura 18 – Centro de torneamento Romi GL 240



Fonte: MGU (2022)

A ferramenta utilizada no processo foi a pastilha TNGA 160404T IN22 da fabricante iscar como apresentada na Figura 19 e Fotografia 20. As suas características de inserção são apresentadas na Tabela 02.

Durante o processo, houve a marcação de partes do processo para delimitar os momentos de aferição dos dados, no registro dos dados de áudio e forças, foram divididos cada medição a cada etapa/parte e equivalente a 0,5 metros de comprimento de material usinado e para a análise do desgaste da ferramenta a cada 4 partes, equivalente a 2 metros de comprimento de material usinado.

Figura 19 – TNGA 160404T IN22



Fonte: Autoria própria (2022)

Fotografia 20 – Frente da case com 10 pastilhas TNGA 160404T IN22



Fonte: Autoria própria (2022)

Tabela 2 – Características do TNGA 160404T IN22 (Iscar)

Parâmetro	Valor nominal
Diâmetro do círculo inscrito [mm]	9,525
Aresta de corte efetiva [mm]	16,0978
Arestas de corte	6
Raio de canto [mm]	0,3969
Espessura [mm]	4,7626
Revestimento	PVD TiN

Fonte: Adaptado de: ISCAR, TNGA-Ceramic (2022)

Durante o processo, a barra do material VTMPPLUS tinha diâmetro inicial de 31,75 mm, porém foi retirado dois passes de 0,1 mm para remoção da camada superficial, para o torneamento foi utilizado profundidade de corte também de 0,1 mm por todo comprimento livre da barra equivalente a 250 mm, durante o processo foi definido que o diâmetro limite seria de 12 mm em decorrência do balanço identificado em aproximadamente 24 mm e pela variação do comportamento das forças e áudio para essa condição. Os demais parâmetros utilizados no processo foram iguais aos recomendados pelo fabricante da ferramenta, representados na Tabela 03.

Tabela 3 – Parâmetros de corte que serão utilizados durante o torneamento externo

Parâmetro	Valor nominal	Faixa Recomendada
Velocidade de corte [m/min]	160	120 - 170
Profundidade de corte [mm]	0,1	0,1 – 0,5
Avanço [mm/rot]	0,1	0,05 – 0,2

Sem fluido de corte

Fonte: Autoria própria (2022)

3.3. AVALIAÇÃO DO DESGASTE DA FERRAMENTA

Durante o processo foram realizadas análises do desgaste da ferramenta conforme a distância usinada no processo. Para avaliar os desgastes na ferramenta foi utilizado o microscópio digital Gastaki apresentado na Figura 21.

Figura 21 - Microscópio digital Gastaki (a esquerda) Microscópio Olympus SZX 10 (a direita)

Fonte: Amazon Brasil e Olympus (2022)

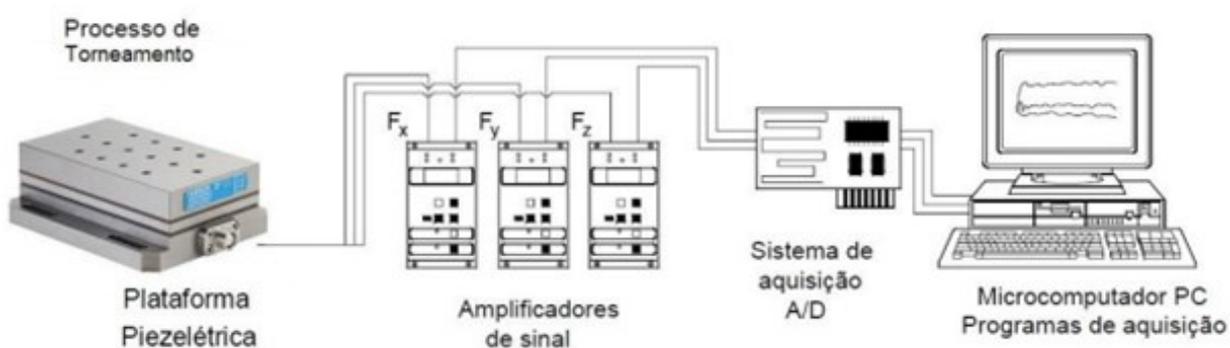
Porém, devido a sua simplicidade, a qual limita o campo de percepção e captura de dados a planos paralelos ao conjunto de LED e câmera, durante a análises de testes da ferramenta de inserto TNGA 160404T, a qual apresenta faces chanfradas, houve a falsa percepção quanto ao desgaste da ferramenta, pois, sombreamentos distorciam as imagens capturadas.

Devido à limitação do equipamento proposto, foi utilizada a segunda opção proposta, o microscópio Olympus SZX 10 apresentado na Figura 22.

3.4. CAPTAÇÃO DOS ESFORÇOS

Durante os ensaios, o sistema para medição das forças de usinagem apresentado na Figura 22 foi composto por plataforma piezoelétrica Kistler tipo 9265B representada na Fotografia 23, Amplificador de carga multicanal Kistler tipo 5070A representado na Fotografia 24, Placa de aquisição de dados USB-6259B representada na Fotografia 25 integrado ao monitoramento pelo software NI DAQExpress instalado em um notebook privado.

Figura 22 – Sistema de captação de esforços



Fonte: Adaptado de Polli (2005)

Fotografia 23 – Plataforma piezoelétrica



Fonte: Autoria própria (2022)

Fotografia 24 - Amplificador de carga multicanal - Kistler 5070A

Fonte: Autoria própria (2022)

Fotografia 25 - Placa de aquisição de dados USB-6259B

Fonte: Autoria própria (2022)

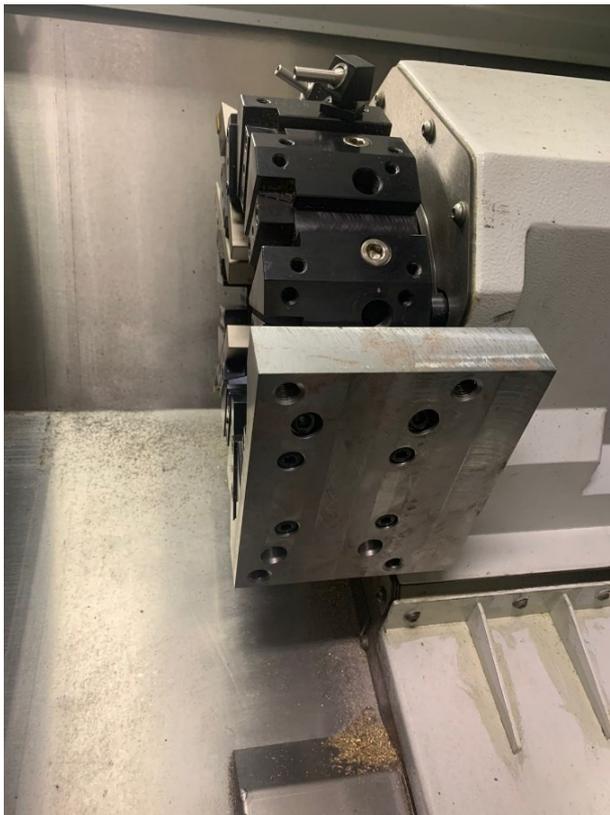
A placa piezoelétrica foi instalada no porta ferramentas, posição 5, como apresentado na Fotografia 26 por meio de um suporte furado apresentado na Fotografia 27 e assim fixado como apresentado na Fotografia 28.

Fotografia 26 – Porta ferramentas – Posição 5



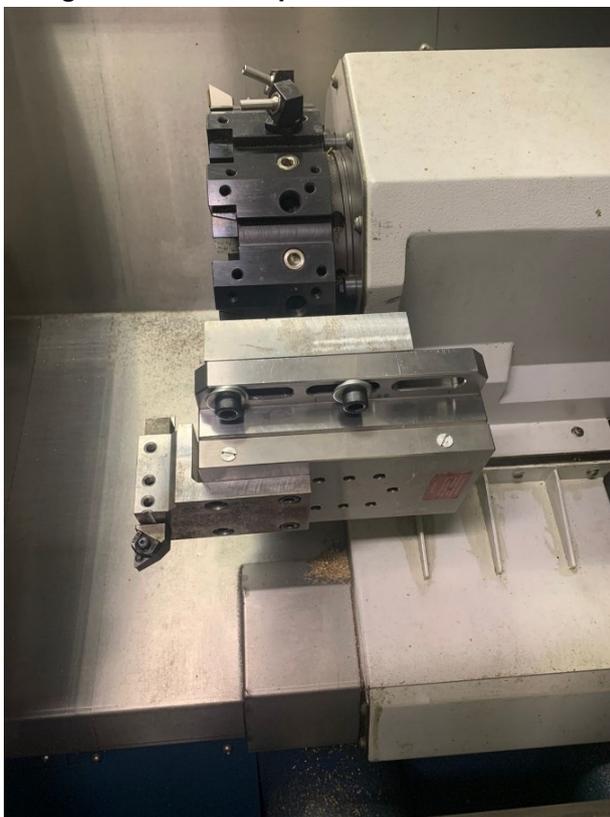
Fonte: Autoria própria (2022)

Fotografia 27 – Suporte adaptado para fixação da placa



Fonte: Autoria própria (2022)

Fotografia 28 – Placa piezoelétrica instalada



Fonte: Autoria própria (2022)

3.5. DETERMINAÇÃO DAS FUNÇÕES RESPOSTA EM FREQUÊNCIA (FRF'S)

Testes de impacto foram efetuados para adquirir funções resposta em frequência. Os impactos foram feitos na ponta da peça com um martelo de impacto PCB Piezotronics tipo ICP 086C03 munido de um transdutor de força piezoelétrico tipo ICP 086C03 e dois condicionadores de sinal PCB Piezotronics como representado na Fotografia 29.

A resposta foi captada pelo acelerômetro PCB Piezotronics 352C68 SN77121 fixado na extremidade da ferramenta. Obteve-se a frequência natural do sistema. Os dados coletados foram averiguados diretamente no software DAQExpress.

Fotografia 29 – Teste de impacto – Experimental FRF



Fonte: Aatoria própria (2022)

A partir do teste de impacto as frequências naturais do conjunto foram identificadas e utilizadas para interpretação dos resultados experimentais.

3.6. SINAIS DE ÁUDIO

Para captação dos sinais de áudio no processo de torneamento foi escolhido um microfone para atuar como sensor de detecção de sinais de vibrações provenientes do sistema ferramenta, peça ou máquina-ferramenta, o microfone utilizado foi proveniente de um aparelho celular Samsung S20F, com modelos SM G986U R0.5G e SM-9818AL MIC, sendo posicionado próximo a porta no retângulo vermelho indicado na Fotografia 30.

Fotografia 30 – Posição microfone



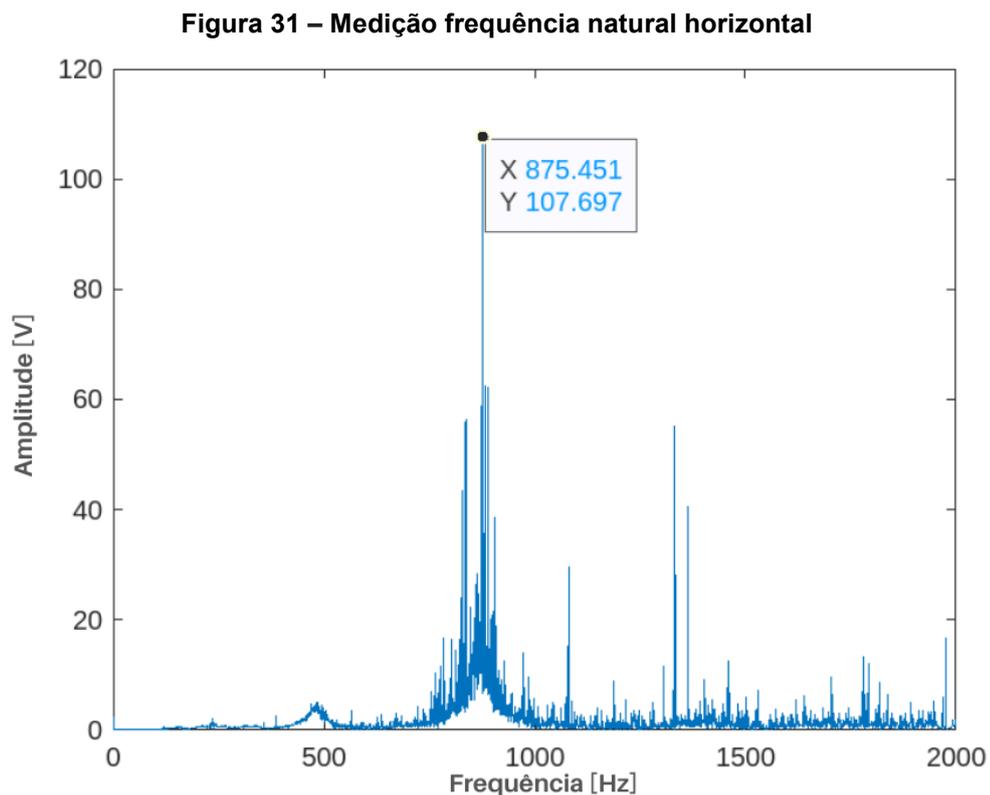
Fonte: Autoria própria (2022)

4. RESULTADOS

4.1. FUNÇÃO RESPOSTA EM FREQUÊNCIA (FRF)

Utilizando um martelo de medição, em conjunto a um acelerômetro fixado na ferramenta, foram realizados testes de impacto com o objetivo de definir a função resposta em frequência (FRF). Obtendo a FRF foi possível determinar a frequência natural do porta-ferramenta.

Além disso, no ambiente do MatLab foram efetuadas as transformadas rápidas de Fourier (FFT) da aceleração e da força para cada uma das cinco medições (MatLab, 2022). Ao dividir a FFT da força pela FFT da força obteve-se os gráficos para análise da frequência natural. Como representado na Figura 31, o pico da magnitude ocorre na frequência natural e corresponde a 875kHz



Fonte: Autoria própria (2022)

4.2. FORÇAS DE USINAGEM

Por meio da análise das forças, realizada com o auxílio do software National (DAQ Express) onde a média e amplitude de cada força foi coletada, o melhor recurso para identificar comportamentos de maiores esforços por parte da ferramenta é a partir

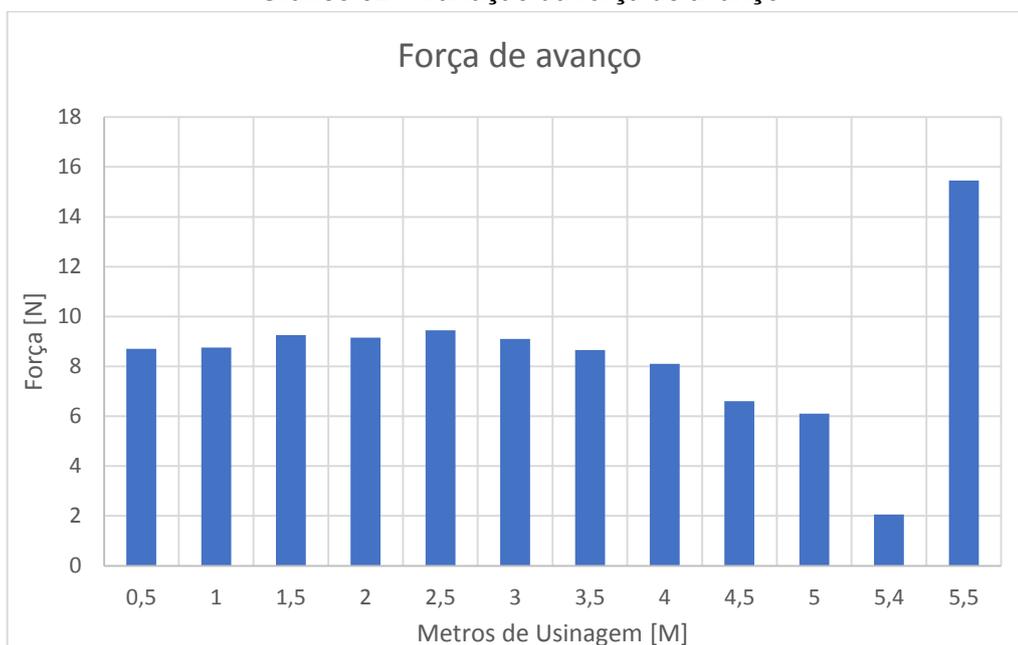
da amplitude pois, o aumento da amplitude está diretamente proporcional ao aumento do esforço como é exemplificado na Tabela 04 e do Gráfico 32 ao Gráfico 34.

Tabela 4 – Amplitude média conforme distância usinada

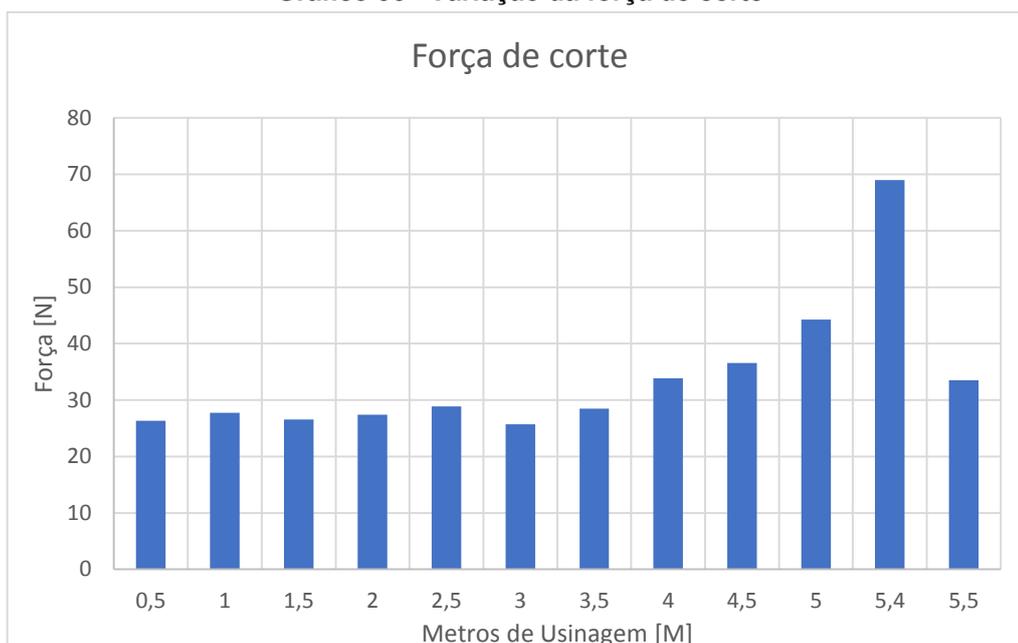
Metros de Usinagem [M]	Força de avanço		Força de corte		Força passiva	
	Média	Amplitude (N)	Média	Amplitude (N)	Média	Amplitude (N)
0,5	8,7	19,15	26,3	22,05	12,85	19,35
1	8,75	17,3	27,75	22,75	13,2	17,7
1,5	9,25	17,75	26,55	19,9	14,05	16,2
2	9,15	18,65	27,4	22,35	14,1	19,25
2,5	9,45	17,75	28,9	20,8	14,1	19,55
3	9,1	16,95	25,7	21,85	22,75	19,35
3,5	8,65	19	28,5	21,85	22,2	23,45
4	8,1	15,65	33,85	22,8	36,25	22
4,5	6,6	31,6	36,55	46,95	41	33,3
5	6,1	28,25	44,25	33,65	61	35,7
5,4	2,06	76	69	103,15	97	72,95
5,5	15,45	199,65	33,5	499,75	45,8	393,85

Fonte: Autoria própria (2022)

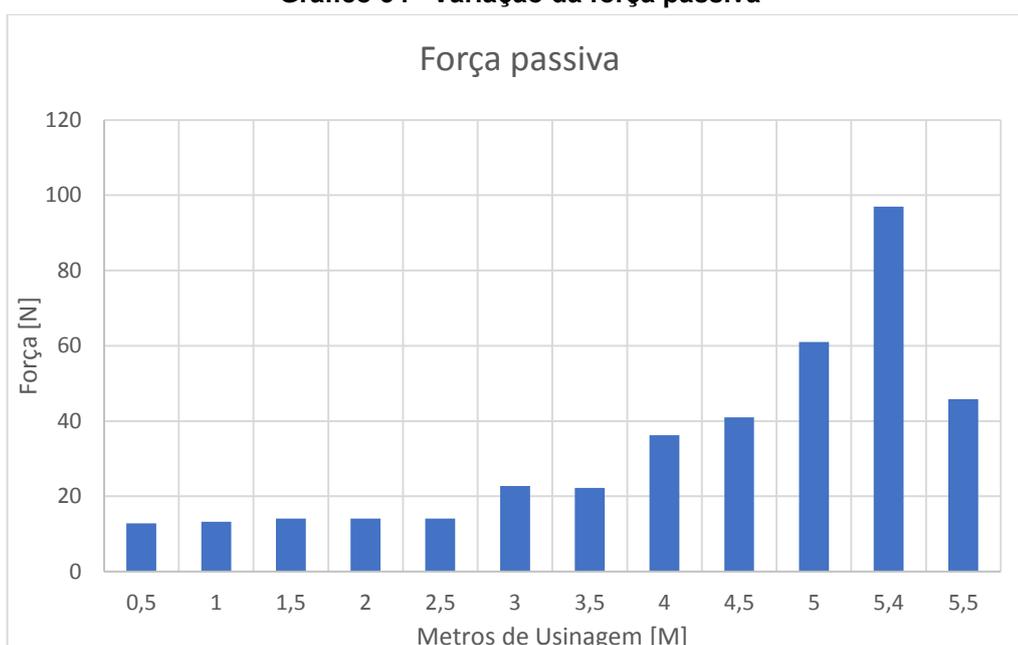
Gráfico 32 – Variação da força de avanço



Fonte: Autoria própria (2022)

Gráfico 33– Variação da força de corte

Fonte: Autoria própria (2022)

Gráfico 34– Variação da força passiva

Fonte: Autoria própria (2022)

No decorrer do processo houve dois momentos com grande aumento na amplitude: No desgaste da ferramenta, que ocorreu no final do passe após 5,5 metros de material usinado e no início do passe de 4,5 metros de usinagem.

Em decorrência do balanço que a ponta da peça estava submetida, estimado em duas vezes o diâmetro de 12 milímetros no passe a partir da análise do comportamento e variação de forças e áudio, a vibração foi mais agravada na parte

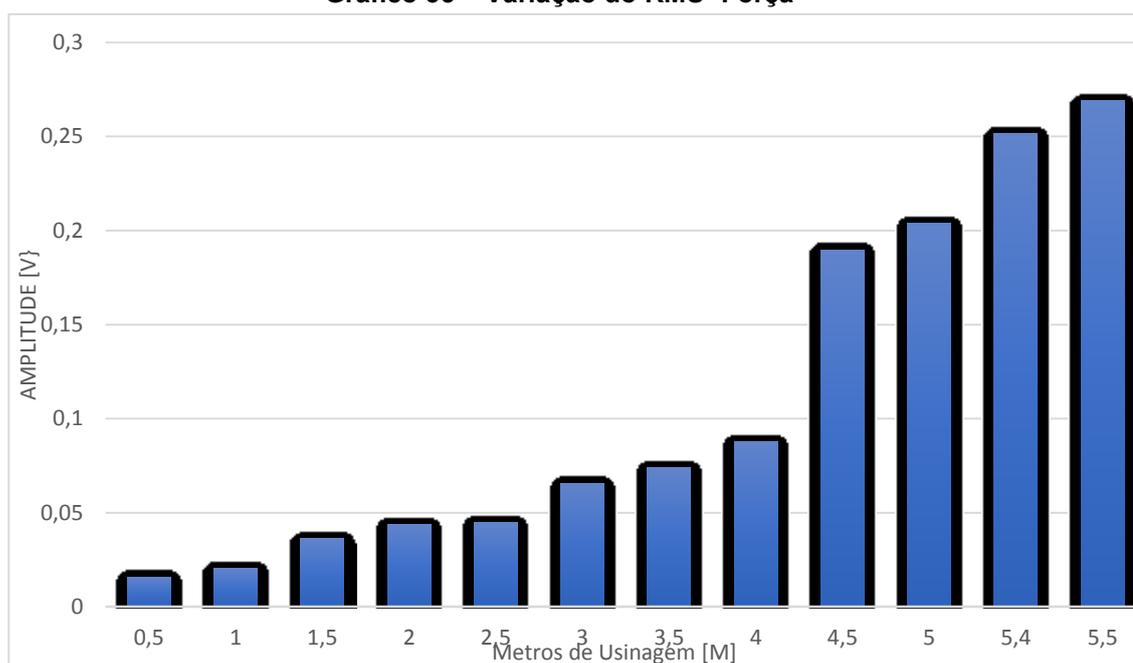
inicial após 4,5 metros de usinagem e conforme o prosseguir do processo de usinagem o diâmetro do corpo de prova era reduzido e a relação da distância até o apoio consequentemente aumentou.

Após 5 metros de material usinado, inverteu-se o lado do corpo de prova para o torneamento, e com isso, houve o aumento do diâmetro a ser usinado e diminuindo a relação da distância até o apoio, e houve uma redução clara na amplitude das forças após essa troca.

Os dados obtidos no começo da medição de 4,5 metros de usinagem foram desconsiderados, pois foram afetados por uma vibração auto excitada, oriunda do balanço da ponta do corpo de prova, que aumentou conforme o processo de usinagem da peça e por consequência o seu diâmetro diminuía, porém, a média das forças seguiu a tendência esperada.

Avaliando a tendência observada é possível determinar que logo antes do desgaste, a força de avanço diminui e as forças passiva e de corte aumentam. Porém após o desgaste a força de avanço aumenta e as forças passiva e de corte diminuem.

Para evidenciar as análises da amplitude por FFT da força de avanço, foi realizado o cálculo da Raiz Média Quadrada (RMS) para comparar a variação deste ao longo do processo de torneamento. Sendo apresentado no Gráficos 35 a variação do RMS para cada meio metro de material usinado.

Gráfico 35 – Variação do RMS -Força

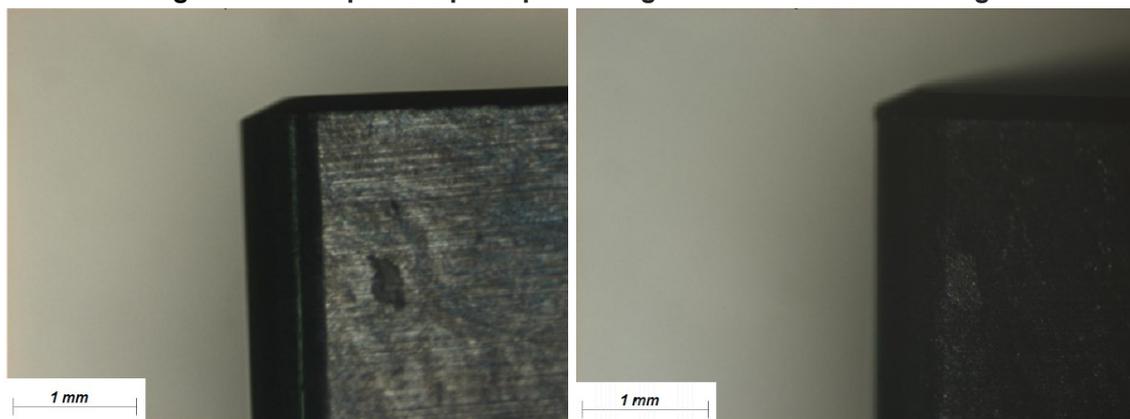
Fonte: Autoria própria (2022)

Analisando o Gráfico 35, nota-se que o nível de emissão sonora até 4 metros de usinagem apresenta valores muito próximos uns dos outros devido a estabilidade do valor do RMS. Para as partes seguintes, o RMS apresentou um aumento significativo, representando um aumento progressivo do nível de energia do sinal sonoro, sendo condizente com a avaliação de desgaste não perceptível visualmente antes de 4 metros de comprimento de material usinado.

4.3. DEGASTE DA FERRAMENTA

A análise da evolução do desgaste da ferramenta apresenta que para até 4 metros de comprimento de material usinado não houve desgastes perceptíveis, as representações analisadas via microscópio se resumem vistas da face de topo e do flanco principal dos insertos como apresentado da Fotografia 36 e Fotografia 37.

Fotografia 36 – Superfície principal de folga – 2 e 4 metros de usinagem



Fonte: Autoria própria (2022)

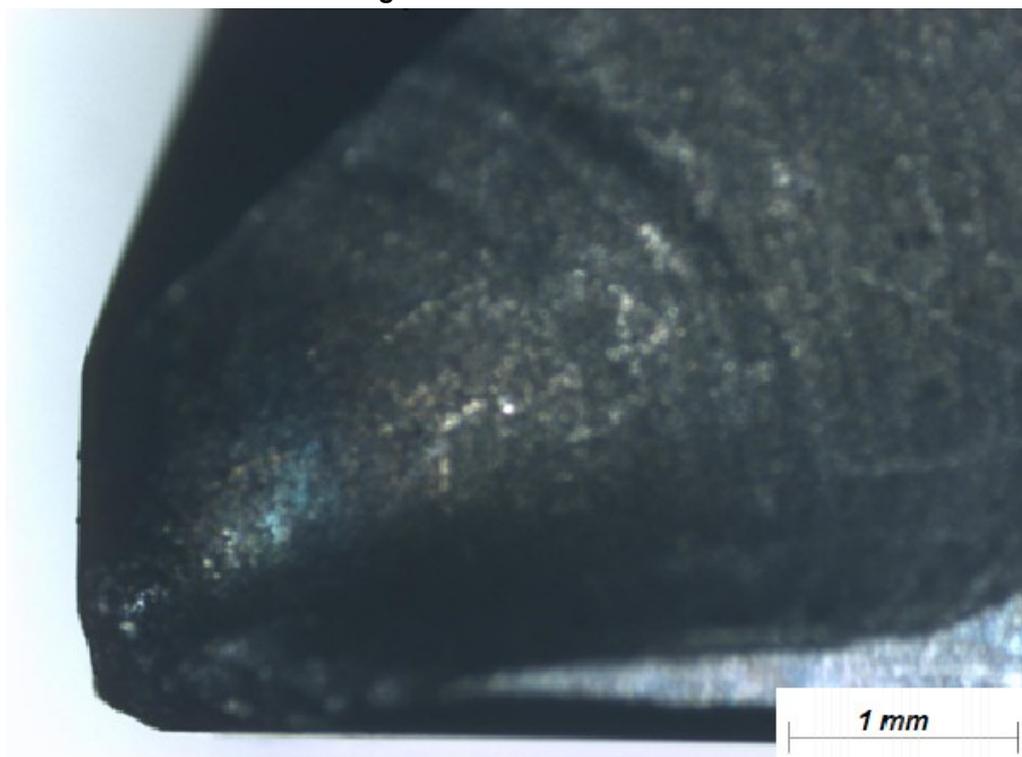
Fotografia 37 – Superfície de saída – 2, 4 e 5,5 metros de usinagem



Fonte: Autoria própria (2022)

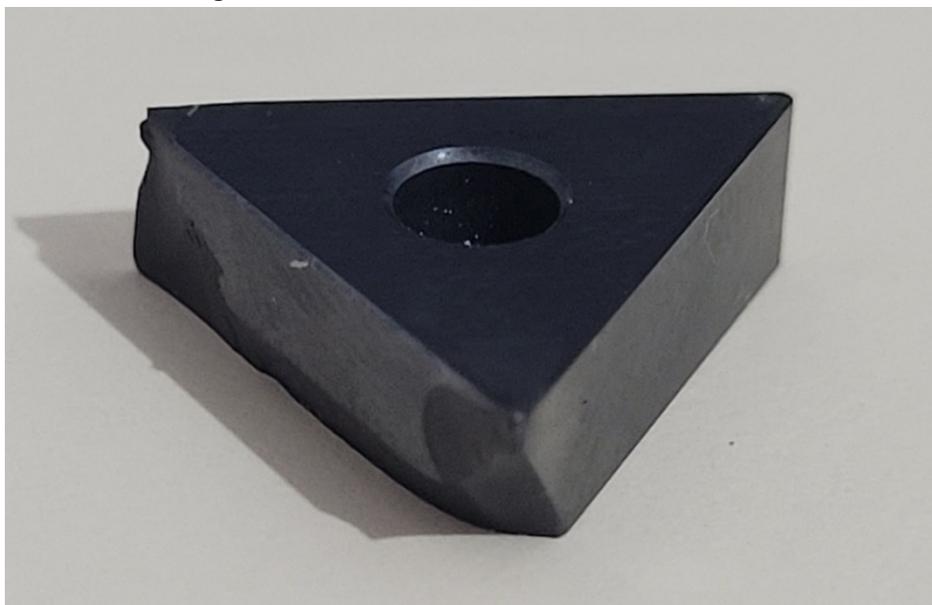
Para análise do desgaste da ferramenta para 5,5 metros de comprimento de material usinado houve quebra na ferramenta, com avaria bem visível e representado nas Fotografias 38 e 39.

Fotografia 38 – Vista da cratera



Fonte: Autoria própria (2022)

Fotografia 39 – Vista da ferramenta no estado final



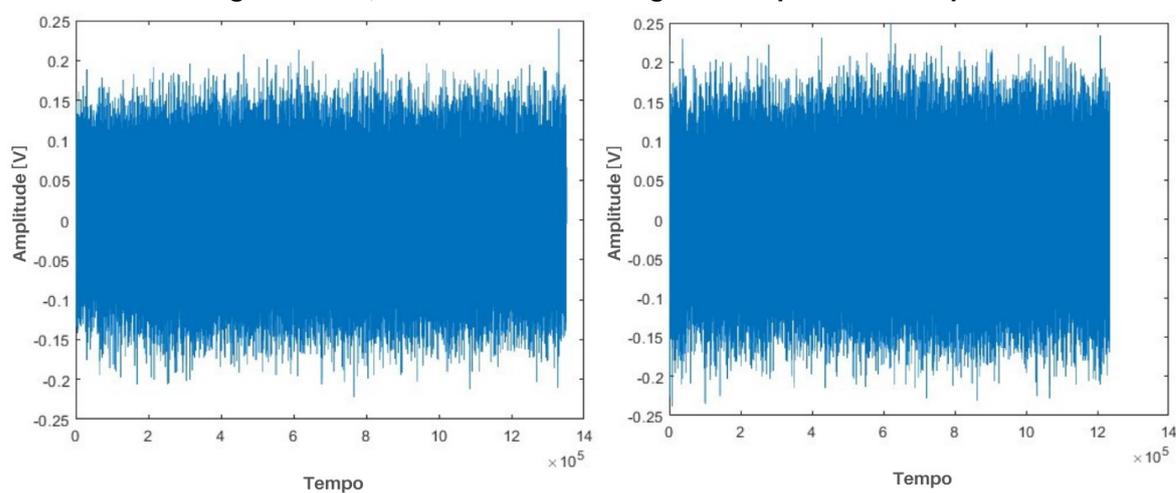
Fonte: Autoria própria (2022)

4.4. TRANSFORMADA RÁPIDA DE FOURIER DOS ÁUDIOS

A partir da gravação dos áudios, gerado em forma de onda no domínio do tempo como apresentado nos Gráficos 39 a 40 e posteriormente, avaliando a partir do domínio da frequência (FFT) via MatLab como apresentado nos Gráficos 40 a 44.

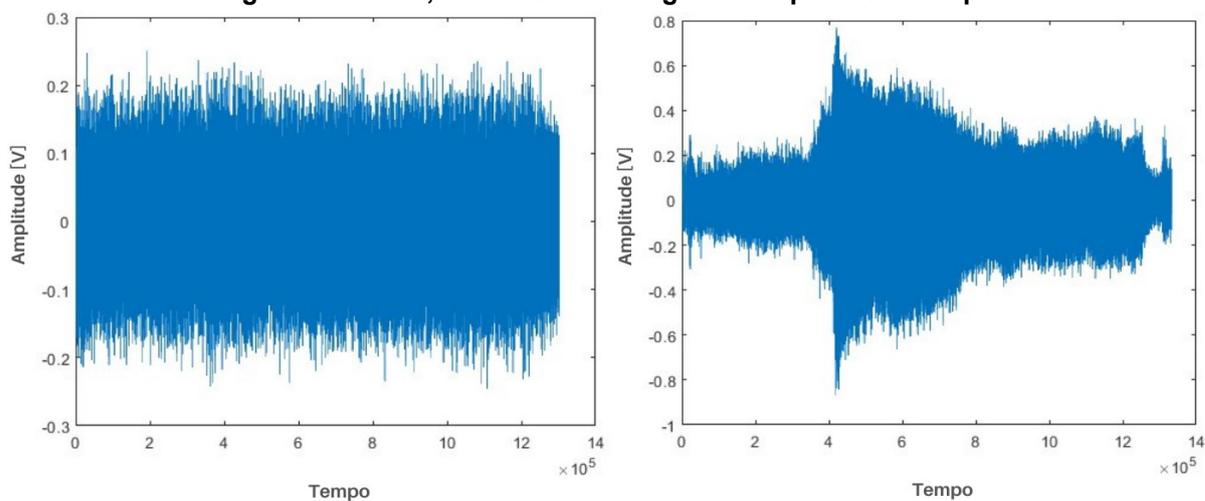
Na análise das FFT, houve apenas mudança significativa no comportamento na última etapa do processo, onde apareceu pico na frequência de 476 kHz e também em 911 kHz como apresentado no Gráfico 44, sendo esta última frequência bem próxima a frequência natural anteriormente indicada.

Figura 40 – 0,5 e 1 metros de usinagem – Amplitude x Tempo



Fonte: Autoria própria (2022)

Figura 41 – 5 e 5,5 metros de usinagem – Amplitude x Tempo



Fonte: Autoria própria (2022)

Figura 42 – FFT 0,5 metros de usinagem

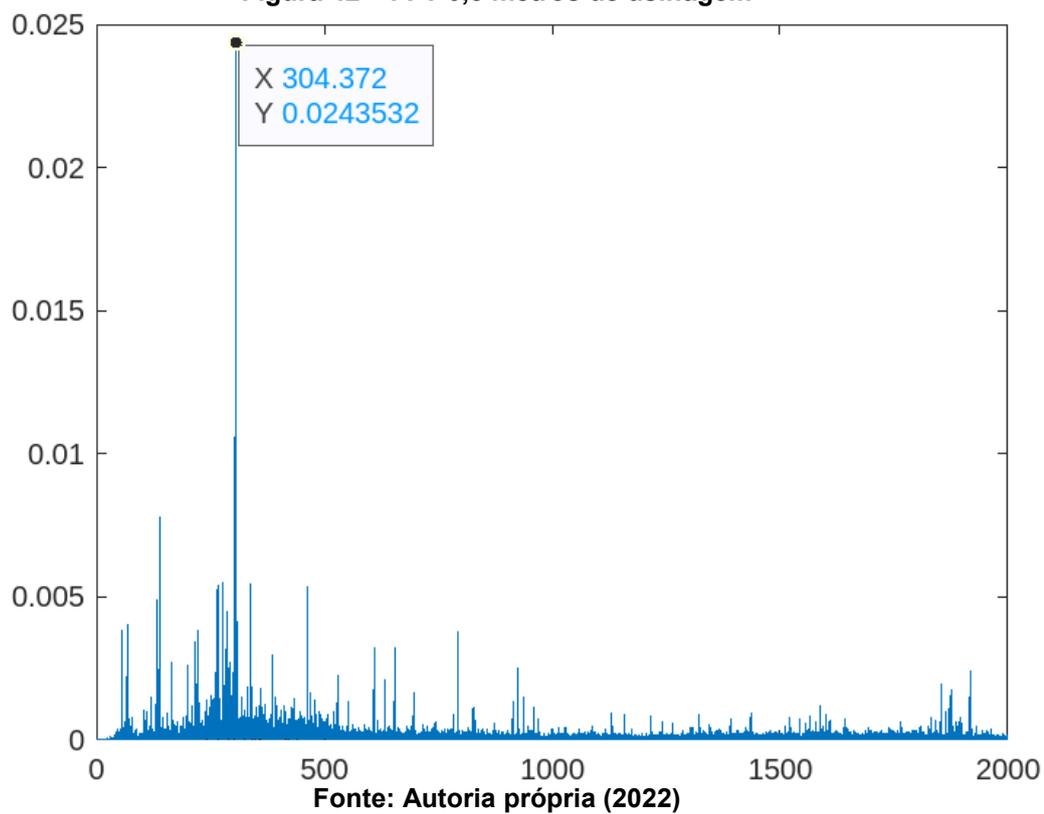
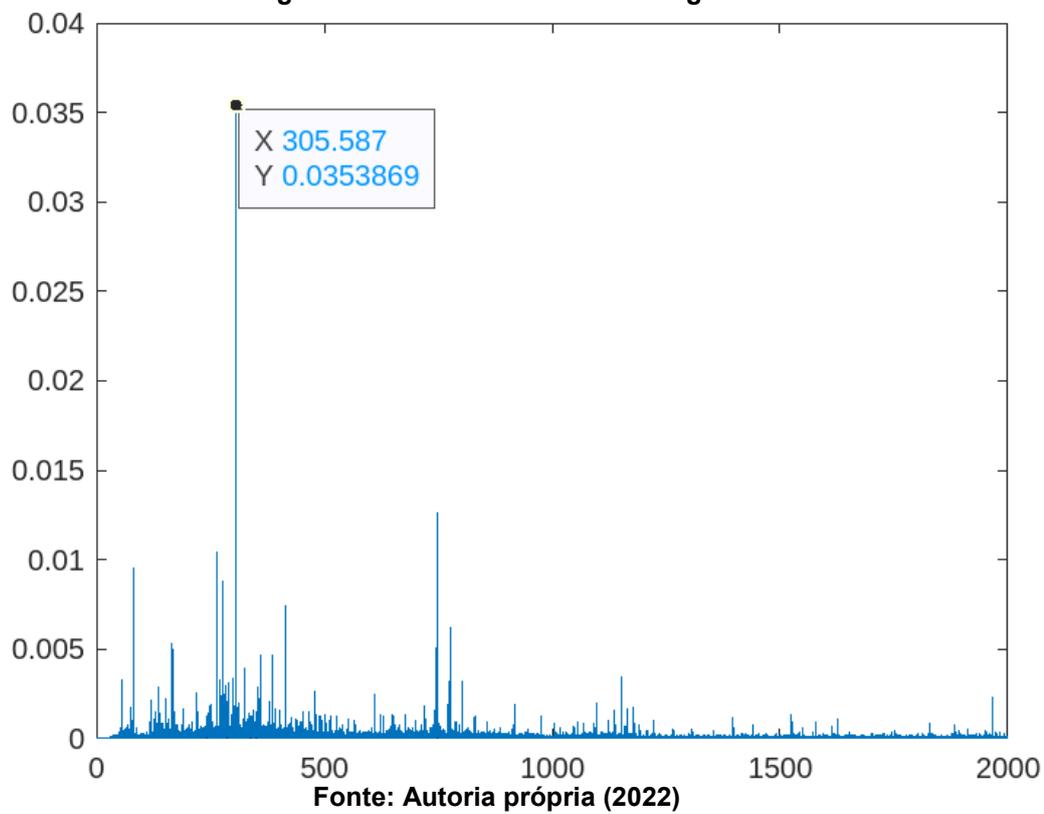
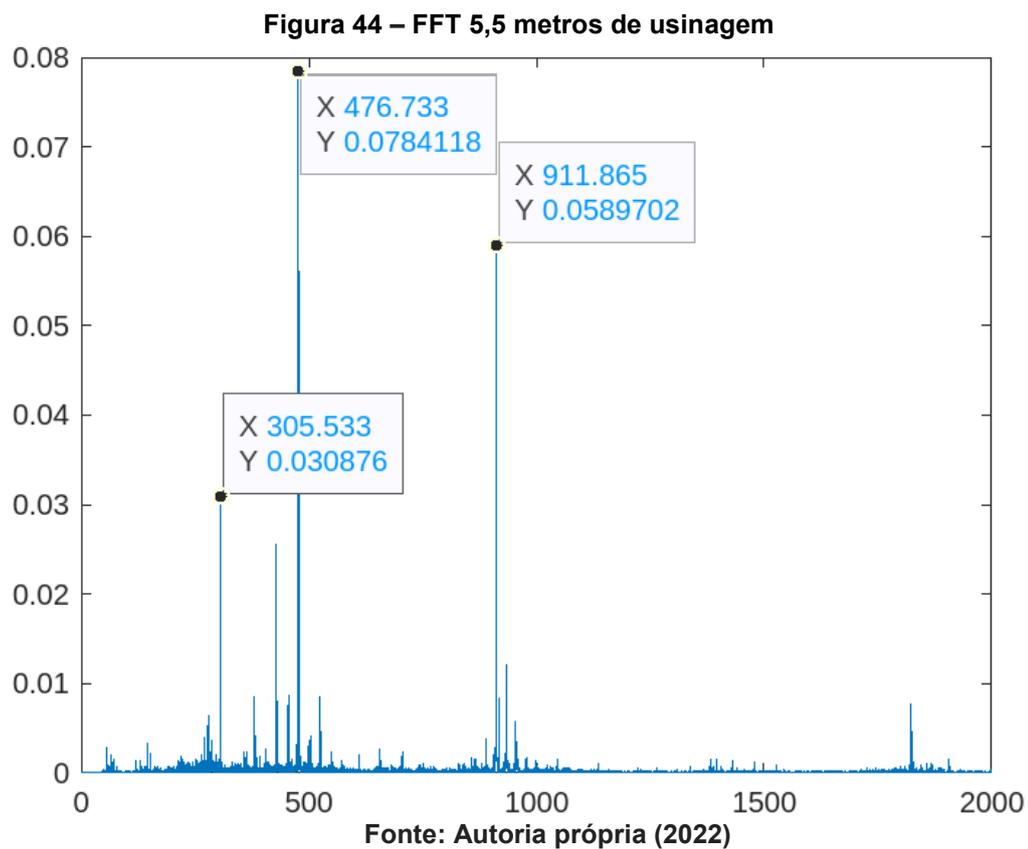


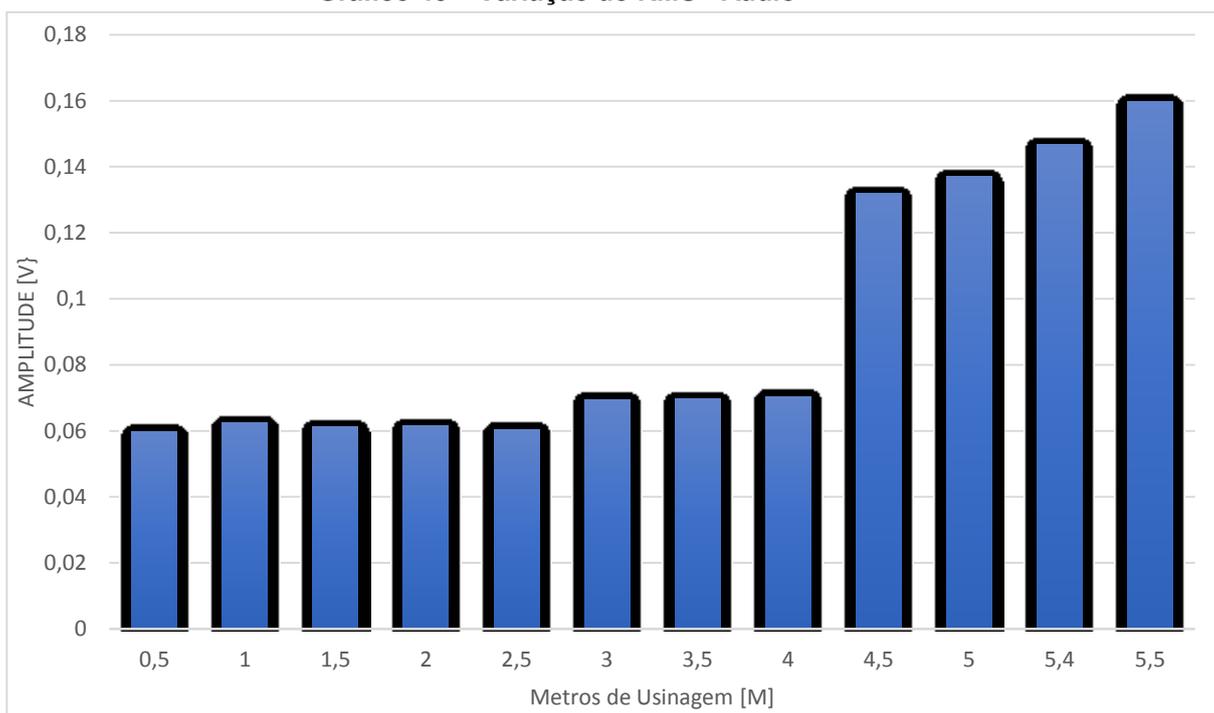
Figura 43 – FFT 4 metros de usinagem





Para evidenciar as análises da amplitude por FFT do sinal de áudio, foi realizado o cálculo da Raiz Média Quadrada (RMS) para comparar a variação deste ao longo do processo de torneamento. Sendo apresentado nos Gráfico 45 a variação do RMS para cada parte equivalente no processo equivalente a meio metro de comprimento de material usinado

Gráfico 45 – Variação do RMS - Áudio



Fonte: Autoria própria (2022)

Analisando o Gráfico 45 relacionado ao nível das forças de avanço no processo, houve um aumento constante no valor do RMS até 4 metros de usinagem, para 4,5 metros de usinagem ocorreu um salto no aumento do valor do RMS, sendo 87,50% maior que o RMS do meio metro anterior, sendo condizente com a ocorrência da quebra na ferramenta. Entre 4,5 e 5,5 metros de usinagem houve um aumento não linear do RMS.

5. CONCLUSÕES

Avaliando o comportamento do desgaste da ferramenta no processo, foi notório que por ser composta de material cerâmico, houve o desgaste da ferramenta caracterizado por micro lascamentos e por ser um material frágil, houve a quebra na ferramenta, o que aumenta a dificuldade do ensaio e da determinação exata do ponto de análise do limite de desgaste tolerado da ferramenta.

Quanto a análise dos resultados, a avaliação por RMS demonstrou ser adequada para análise direta da variação do comportamento das forças e sinal de áudio, apresentando claramente a variação das forças e sinal de áudio durante os ensaios.

É notório observar que por meio da análise da FFT do sinal de áudio, quando a ferramenta falhou, houve o surgimento de um pico em 911 kHz, sendo este próximo a frequência natural no sinal de áudio.

Quanto a utilização de um sensor de sinal de áudio de baixo custo, o microfone de um smartphone para monitorar o processo de torneamento, foi possível perceber que o mesmo se apresentou capaz de detectar o comportamento que caracteriza o momento que o desgaste da ferramenta é proeminente, porém mesmo que acessível devido a popularização do mercado de smartphones, os equipamentos de análise pelas forças apresentaram dados mais precisos para caracterização do desgaste da ferramenta mas, os equipamentos necessários para realizar esse tipo de monitoramento exigem uma complexidade para aplicação específica na máquina a ser monitorada e conseqüentemente exige um investimento maior.

REFERÊNCIAS

- ALTINTAS Y. **Manufacturing Automation: Metal Cutting Mechanics, Machine Tool Vibrations, and CNC Design**. New York: 1. ed. Cambridge University Press, 288 p. 2000.
- ALTINTAS, Yusuf; BER, A. A. **Manufacturing automation: metal cutting mechanics, machine tool vibrations, and CNC design**. Appl. Mech. Rev., v. 54, n. 5, p. B84-B84, 2001.
- AMORIM, Heraldo José. **Estudo da relação entre velocidade de corte, desgaste de ferramenta, rugosidade e forças de usinagem em torneamento com ferramenta de metal duro**. 2002.. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 23125: Máquinas-ferramenta – segurança - tornos**. Rio de Janeiro, p. 12. 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 3002-1: Grandezas básicas em usinagem e retificação. Parte 1: Geometria da parte cortante das ferramentas de corte – Termos gerais, sistemas de referência, ângulos da ferramenta e de trabalho e quebra-cavacos**. Rio de Janeiro, p. 02. 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6175: Processos mecânicos de usinagem**. Rio de Janeiro, p. 83. 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 3685: Ensaio de vida da ferramenta de ponta única para torneamento**. Rio de Janeiro, p. 11. 2017.
- AZOUZI, R., GUILLOT, M., **On-line optimization of turning process using an inverse process Neuro controller**, J. Manuf. Sci. Eng. 120, p.101–108. 1998.
- BRASIL. **Lei nº 13.755**, de 10 de dezembro de 2018. Institui o Código Civil. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, n. 237, p. 1, 11 dez. 2018.
- CABAU, Augusto Ferreira; COSSICH, Luiz Gustavo. **Análise de vibração no torneamento interno utilizando ferramentas com relação comprimento diâmetro alta**. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. 2015.
- CALABRIA, R. **Análise do desempenho das ferramentas de metal duro e metal duro polido nos processos de fresamento de alumínio**. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade de Caxias do Sul, Centro de ciências exatas e tecnologia, Caxias do sul, 2014.
- CHILDS, T. H. C. et al. **Metal machining: theory and applications**. London: ButterworthHeinemann, 2000, 408 p.
- DAS, Rupam; HAZARIKA, Manjuri. **A study on effect of process parameters on vibration of cutting tool in turning operation**. In: Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, p. 012086. 2019.

DELIO, T.; TLUSTY, J.; SMITH, S. **Use of Audio Signals for Chatter Detection and Control.** *Journal of Engineering for Industry.* Transactions of the ASME, v. 114, p. 146-157, 1992.

DIMLA SR., D. E. **The impact of cutting conditions on cutting forces and vibration signals in turning with plane face geometry inserts.** *Journal of Materials Processing Technology*, v.155-156, p.1708-1715, 2004.

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da usinagem dos materiais.** 6.ed. São Paulo: Artliber Editora, 2008.

DUARTE, Wallacy Rodrigues. **Avaliação do incremento de medições na estimação de parâmetros modais para análise do diagrama de estabilidade no processo de fresamento.** 2018. 77 f. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2018.

EWINS, D. J. **Modal Testing Theory and Practice.** Letchworth: 1. ed. Research Studies Press, 268 p. 1984.

EZUGWU, E. O.; OKEKE, C. I.; MACHADO, A. R. **High speed threading of inclusion-modified steels with coated carbide tools,** *Journal of Materials Processing Technology* 86 (1999) 216 - 225.

FANG, X.D., JAWAHIR, IS. **Previsão do desempenho total de usinagem em torneamento de acabamento usando modelos integrados de conjuntos fuzzy dos parâmetros de usinabilidade,** *Int. J. Prod. Res.* v. 32 n. (4) p. 833-849. 1994.

FERRARESI, D. **Fundamentos da Usinagem dos Metais,** Editora Edgard Blücher Ltda, São Paulo, 1977.

GÖKKAYA, H., NALBANT, M., **The effects of cutting tool coating on the surface roughness of AISI 1015 steel depending on cutting parameters.** *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*, Vol. 30, pp. 307- 316. 2006.

HARRIS, C. M.; CREDE, C. E.; DEN HARTOG, J. P. **Shock and Vibration Handbook,** Vols. I, II, and III. 1962.

HUANG, C.Y. **Analysis of Process Damping and System Dynamics in Milling.** Ph.D. Thesis, 2006.

INCE, Mehmet Alper; ASILTÜRK, I. **Effects of cutting tool parameters on surface roughness.** *International Refereed Journal of Engineering and Science*, v. 4, n. 8, p. 15-22, 2015.

ISCAR. **TNGA-Ceramic - TNGA 160404T: Triangular double-sided ceramic inserts for machining super alloys and hardened steel.** Disponível em: <www.sandvik.coromant.com/en-gb/products> Acesso em: 20 out. 2022.

JEMIELNIAK, K.; OTMAN, O. **Tool failure detection based on analysis of acoustic emission signals.** *Journal of Materials Processing Technology*, v. 76, n. 1-3, p. 192-197, 1998.

JOHANSSON, Daniel et al. **Assessment of commonly used tool life models in metal cutting.** *Procedia manufacturing*, v. 11, p. 602-609, 2017.

KIBBOU, El Mehdi et al. **Prediction of surface quality based on the non-linear vibrations in orthogonal cutting process: time domain modeling.** Journal of Manufacturing and Materials Processing, v. 3, n. 3, p. 53, 2019.

KOPAČ, J., BAHOR, M., **Interaction of the technological history of a workpiece material and the machining parameters on the desired quality of the surface roughness of a product,** Journal of Materials Processing Technology, Vol. 92-93, No. 30, pp. 381-387.1999.

KÖNIG, W.; KLOCKE, F. **Fertigungsverfahren - drehen, fräsen, bohren,** Springer Verlag. 7^a Edição. Berlin, 2002.

LEE, E. C.; NIAN, C. Y.; TARNG, Y. S. **Design of a dynamic vibration absorber against vibrations in turning operations.** Journal of Materials Processing Technology, v. 108, p. 278-285, 2001

LIPATOV, A. A. **Instability of Chip Formation and the Wear of a Hard Alloy Tool in Cutting Austenitic Steel** ISSN 1068-798X, Russian Engineering Research, Vol. 28, No. 9, pp. 904-905.2008.

LUO, Xichun; CHENG, Kai; WARD, Robert. **The effects of machining process variables and tooling characterisation on the surface generation.** The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v. 25, n. 11, p. 1089-1097, 2005.

LX, Máquinas. **Torno convencional nardini mascote ms 205.** Disponível em: <www.lxmaquinas.com> Acesso em: 20 mai. 2022.

MACHADO, Álisson Rocha; ABRÃO, Alexandre Mendes; COELHO, Reginaldo Teixeira; SILVA, Márcio Bacci da. **Teoria da usinagem dos materiais.** [S.l.: s.n.], 2009.

MATHWORKS. **Fast Fourier Transform.** Disponível em: <www.mathworks.com/help/matlab/ref/fft> Acesso em: 20 out. 2022.

MEOLA, Tatiana. **Monitoramento em tempo real da qualidade de sinais de vibrações, utilizando inteligência artificial.** 2005. 118 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2020.

MERITT, H. E. **The theory of self-excited machine-tool chatter.** Journal of Engineering for Industry, v. 87, p. 447-454, 1965.

MESQUITA, N. G. M.. **Avaliação e escolha de uma superfície segundo sua função e fabricação.** 1992. 142 f. Tese (Doutorado em Eng. Mecânica) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1992.

MGU, Usinagem de precisão. **Torno CNC ROMI GL240.** Disponível em: <tornoromigl240> Acesso em: 20 mai. 2022.

MILLS, B. REDFORD, A. H., **Machinability of engineering materials.** Applied Science Publishers, London. 1983.

MQS, Metrology and Quality Services. **Taylor Hobson S100 Series Surtronic-S128 Portable Surface Finish Gauge. 400 micron range, 50nm resolution, 25mm travel, code 112-4574.** Disponível em: <www.mqs.co.uk/taylor-hobson-s100-surtronic-s100> Acesso em: 25 mai. 2022.

MÜLLER, K. M. **On-line Process Monitoring in High Speed Milling with an Active Magnetic Bearing Spindle.** Zurique, 2002. 163 p. Tese (Doutorado em Engenharia) – ETH Zürich, 2002.

NOVASKI o. **Introducao a engenharia de fabricacao mecanica.** Sao paulo, edgar blucher, 119 p., 1994.

OLIVEIRA, A. J., DINIZ, A. E.& URSOLINO, D.J. **Hard turning in continuous and interrupted cut with PCBN and whisker-reinforced cutting tools,** Journal of Materials Processing Technology 209, pp. 5262-5270, 2008.

OLYMPUS, Life Science **Microscópio estereoscópico versátil com zoom amplo SZX10.** Disponível em: <<https://www.olympus-lifescience.com/pt/>> Acesso em: 25 mai. 2022.

PANDA, Anton et al. **Monitoring of the condition of turning machine bearing housing through vibrations.** The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v. 97, n. 1, p. 401-411, 2018.

PAWADE, R. S., JOSHI, S. S., BRAHMANKAR, P. K., et al., **Na investigation of cutting forces and surface damage in high-speed turning of Inconel 718,** Journal of Materials Processing Technology, v. 192-193, n. 0, pp, 139, 2007.

PEIXOTO, Mariana et al. **Análise de estabilidade dinâmica do fresamento de topo de placas considerando o amortecimento do processo.** 2013.

PEREIRA, Jean Carlo Cescon et al. **Determinação de modelos de vida de ferramenta e rugosidade no torneamento do aço ABNT 52100 endurecido utilizando a metodologia de superfície de resposta (DOE).** 2006.

POLLI, Milton Luiz. **Análise da Estabilidade Dinâmica do Processo de Fresamento a Altas Velocidades de Corte.** Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Florianópolis, 2005.

RISBOOD, K. A.; DIXIT, U. S; SAHASRABUDHE, A. D.. **Prediction of surface roughness and dimensional deviation by measuring cutting forces and vibrations in turning process.** Journal of Materials Processing Technology, v. 132, n. 1-3, p. 203-214, Jan. 2003.

SALOKYOVÁ, Štefánia et al. **Research on impacts of mechanical vibrations on the production machine to its rate of change of technical state.** Advances in mechanical engineering, v. 8, n. 7, 2016.

SANDVIK. **T-Max® P insert for turning: TNGA 160404S01525 6050.** Disponível em: <www.sandvik.coromant.com/en-gb/products> Acesso em: 20 mai. 2022.

SCHOR, Tatiana. **O automóvel e o desgaste social.** São Paulo em perspectiva, v. 13, p. 107-116, 1999.

SHAW, Milton Clayton; COOKSON, J. O. **Metal cutting principles**. New York: Oxford university press, 2005.

SIDDHPURA, M.; PAUROBALLY, Roshun. **A review of chatter vibration research in turning**. International Journal of Machine tools and manufacture, v. 61, p. 27-47, 2012.

SILVA, Francisco Valdenor Pereira da. **Forças de corte geradas por torneamento: um estudo de caso das ligas Cu-Al-Be e Cu-Al-Be-Nb-Ni passíveis do efeito memória de Forma**. 2014. 124 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2014.

SMITH, S.; TLUSTY, J. **Stabilizing chatter by automatic spindle speed regulation**. CIRP annals, v. 41, n. 1, p. 433-436, 1992.

STEMMER, C. E., **Ferramentas de corte I**. 3 ed. Florianópolis, Editora da UFSC, 1993.

THOMAS, M.; BEAUCHAMP, Y. **Statistical investigation of modal parameters of cutting tools in dry turning**. International Journal of Machine Tools & Manufacture, v. 43, p. 1093-1106, 2003.

TOBIAS, S. A. **Schwingungen an Werkzeugmaschinen**. München: C. Hanser, 332S, 1961.

TOTIS, G. & SORTINO, Marco. **Development of a modular dynamometer for triaxial cutting force measurement in turning**. International Journal of Machine Tools and Manufacture. n. 51. p. 34-42, 2011.

VILLARES, Metals. **VH13ISO: Aço ferramenta para trabalho a quente**. Disponível em: <www.villaresmetals.com.br/VH13ISO-pt.pdf> Acesso em: 20 mai. 2022.

VILLARES, Metals. **VTMPLUS: Aço ferramenta para trabalho a quente**. Disponível em: <www.villaresmetals.com.br/VTMPLUS-pt.pdf> Acesso em: 20 set. 2022.

WECK, M.; BRECHER, C. **Werkzeugmaschinen 5 – Messtechnische Untersuchung und Beurteilung, dynamische Stabilität**. 7. Aufl. Berlin: Springer Verlag, 2006. 474S.

YALDIZ, S. ÜNSAÇAR, F., SAGLAM, H., et al., **Design, development and testing of four-component milling dynamometer for the measurement of cutting force and torque**. Mechanical Systems and Signal Processing, v. 21, n. 3, pp. 1499. 2007