

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**TÉCNICAS DE PROCESSAMENTO DIGITAL DE SINAIS DE
SENSOR PIEZELÉTRICO NA DETECÇÃO DE VIBRAÇÕES
AUTO-EXCITADAS (*CHATTER*) NO PROCESSO DE
RETIFICAÇÃO**

ROGÉRIO THOMAZELLA

Tese de doutorado apresentada à Faculdade de Engenharia de Bauru/ FEB da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” - UNESP, para obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Automação

Linha de pesquisa: Mecatrônica

Bauru - SP
Maio/2019

Rogério, Thomazella.

Técnicas de processamento digital de sinais de sensor piezolétrico na detecção de vibrações auto-excitadas (chatter) no processo de retificação/ Rogério Thomazella, 2019

94 f. : il.

Orientador: Paulo Roberto de Aguiar

Tese (Doutorado)-Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru, 2019

1. Vibração auto-excitada. 2. Chatter na retificação. 3. Análise de tempo-frequência. 4. Monitoramento de vibrações. 5. Processamento de sinais
I. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia. II. Título.

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA TESE DE DOUTORADO DE ROGERIO THOMAZELLA, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.

Aos 10 dias do mês de maio do ano de 2019, às 09:00 horas, no(a) Anfiteatro da Diretoria Técnica de Informática da FEB, reuniu-se a Comissão Examinadora da Defesa Pública, composta pelos seguintes membros: Prof. Dr. PAULO ROBERTO DE AGUIAR - Orientador(a) do(a) Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP, Prof. Dr. JOSÉ ALFREDO COVOLAN ULSON do(a) Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP, Prof. Dr. THIAGO VALLE FRANÇA do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP, Prof. Dr. ROSEMAR BATISTA DA SILVA do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Universidade Federal de Uberlândia - UFU, Prof. Dr. BRENO ORTEGA FERNANDEZ do(a) Engenharia / Centro Universitário de Lins - UNILINS, sob a presidência do primeiro, a fim de proceder a arguição pública da TESE DE DOUTORADO de ROGERIO THOMAZELLA, intitulada **TÉCNICAS DE PROCESSAMENTO DIGITAL DE SINAIS DE SENSOR PIEZELÉTRICO NA DETECÇÃO DE VIBRAÇÕES AUTO-EXCITADAS (CHATTER) NO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO**. Após a exposição, o discente foi arguido oralmente pelos membros da Comissão Examinadora, tendo recebido o conceito final: APROVADO _____. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelos membros da Comissão Examinadora.

Prof. Dr. PAULO ROBERTO DE AGUIAR

Prof. Dr. JOSÉ ALFREDO COVOLAN ULSON

Prof. Dr. THIAGO VALLE FRANÇA

Prof. Dr. ROSEMAR BATISTA DA SILVA

Prof. Dr. BRENO ORTEGA FERNANDEZ

À minha esposa Bruna e minha filha Florenza

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por me conceder a vida, as alegrias e nas tristezas, mas, sobretudo por guiar me no caminho da honestidade, da luz e da paz, como diz o evangelho: “Jesus, manso e humilde de coração, fazei nosso coração semelhante ao vosso” (MT 11,29).

À minha família, especialmente aos meus pais Clóvis e Luzia, por todo amor, força e perseverança por toda vida. Aos meus irmãos, cunhadas e sobrinhos (as) e, principalmente, à minha querida e amada esposa Bruna e minha filha Florenza que, com o maior amor do mundo, tanto me apoiaram e me deram forças para trilhar este caminho.

Em especial ao meu orientador, amigo e irmão Prof. Paulo Roberto de Aguiar pela orientação, ensinamentos, conselhos, broncas (e não foram poucas) durante todo curso e, principalmente, pelo companheirismo e cumplicidade adquiridos ao longo destes anos.

Aos amigos e colegas de laboratório aos quais nunca vou esquecer: Fábio Dotto, Wenderson Lopes, Felipe Alexandre, Pedro de Oliveira e tantos outros pela ajuda, conversas e seus aconselhamentos.

Agradeço também a todos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

A Universidade Estadual Paulista (UNESP), FEB - Campus de Bauru, por permitir e tornar possível a realização deste trabalho, aos docentes, funcionários e discentes do Laboratório de Aquisição de Dados e Processamento de Sinais (LADAPS) e do Laboratório de Usinagem por Abrasão (LUA).

A Faculdade de Tecnologia de Bauru – Fatec Bauru e a Anhanguera Educacional – Kroton pelo apoio e pela cessão de horário de forma a possibilitar a realização deste trabalho.

“Bom mesmo é ir à luta com determinação, abraçar a vida com paixão, perder com classe e vencer com ousadia, pois o triunfo pertence a quem se atreve. A vida é muita para ser insignificante.” (Charles Chaplin)

RESUMO

O *chatter* corresponde a movimentos instáveis e caóticos no sistema de usinagem, resultando em flutuação das forças de corte e na impressão de ondulações na superfície da peça usinada. É um fenômeno indesejável ao processo de usinagem, especialmente ao processo de retificação, pois a sua ocorrência acentuada resulta em um produto acabado com tolerâncias dimensionais e geométricas fora dos padrões, ou até mesmo em danos irreversíveis, como por exemplo, alteração na dureza, alta rugosidade e queima superficial da peça usinada. Na literatura, poucos trabalhos tratam da análise e monitoramento do *chatter* com técnicas de processamento digital de sinais, especialmente de aceleração. O objetivo desse trabalho é propor uma nova técnica de processamento digital utilizando os sinais de aceleração baseados no cálculo da STFT - *Short Time Fourier Transform* (Transformada de Fourier de curta duração) e na estatística Relação de Potência (ROP – *ratio of power*), com a finalidade de detecção do fenômeno de *chatter* na retificação tangencial plana com rebolo superabrasivo de nitreto cúbico de boro (CBN) e óxido de alumínio. Para tanto, ensaios de retificação foram realizados em corpos de prova de aço ABNT 1045. Um acelerômetro piezelétrico foi acoplado ao suporte das peças e sinais de aceleração foram coletados à uma frequência de amostragem de 2MHz. Dentre as variáveis de saída, obteve-se a dureza Vickers (HV), rugosidade média (R_a) e a análise microestrutural das peças retificadas. Os sinais de aceleração foram processados por meio técnicas de processamento digital baseadas no cálculo da STFT e da ROP resultando na obtenção das características de tempo e frequência relacionadas ao fenômeno de *chatter*. Os resultados mostraram que, por meio da técnica proposta, foi possível caracterizar, ao longo do tempo, os padrões espectrais de uma determinada banda de frequência diretamente relacionada ao fenômeno *chatter*. Verificou-se que os padrões observados possuíam uma relação direta e significativa com as alterações de rugosidade e de dureza das peças usinadas. Portanto, conclui-se que a metodologia apresentada foi capaz de fornecer diretrizes para um sistema de monitoramento eficaz para a detecção do fenômeno de *chatter* no processo de retificação plana.

Palavras-chave: vibração auto-excitada, *chatter* na retificação, análise de tempo-frequência, monitoramento de vibrações, processamento de sinais.

ABSTRACT

Chatter corresponds to unstable and chaotic movements in the machining system, resulting in fluctuation of the cutting forces. It is a serious and undesired physical phenomenon that occurs in the grinding process during parts manufacturing. The intense occurrence of this phenomenon during machining can generate a finished part outside the dimensional and geometric tolerances or even cause irreversible damage, such as: changes to the hardness, high surface roughness, and thermal damages to the ground part. Few vibration signal processing techniques have been proposed for monitoring chatter during grinding. Thus, the objective of this study is to propose and validate a new vibration signal processing technique based on the short-time Fourier transform (STFT) and the ratio of power (ROP) statistic for the detection of chatter during the tangential surface grinding of ABNT 1045 steel with different grinding wheels. Experimental grinding tests were conducted, and the vibration signals were recorded at 2 MHz. The Vickers hardness (HV), roughness (R_a) and metallography of the ground workpiece surfaces were performed. Subsequently, a digital processing technique based on the STFT and ROP was applied to the vibration signals to extract the characteristics of the chatter in the grinding process. The results show that this technique can be used to characterize over time the spectral patterns of a frequency band related to chatter. The observed patterns have a strong relationship with the changes in the R_a and hardness of the machined workpieces. Therefore, the presented methodology is capable of providing a roadmap for an effective grinding chatter monitoring system.

Keywords: chatter in grinding, time-frequency analyses, ratio of power, vibration signals, monitoring.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	13
1.1 Motivação e justificativa	13
1.2 Objetivos.....	16
1.3 Organização do trabalho.....	16
1.4 Publicações obtidas	17
CAPÍTULO 2 - ESTADO DA ARTE	19
2.1 O processo de retificação.....	19
2.2 Visão geral das operações de retificação.....	21
2.2.1 Rebolos	22
2.2.2 A operação de dressagem	24
2.3 Principais parâmetros do processo de retificação.....	25
2.3.1 Profundidade de corte (a)	26
2.3.2 Velocidade de corte (v_s).....	26
2.3.3 Velocidade da peça (v_w).....	27
2.3.4 Espessura equivalente de corte (h_{eq}).....	27
2.4 Variáveis de saída no processo de retificação	28
2.4.1 Rugosidade	28
2.4.2 Força e potência na retificação	30
2.4.3 Dureza Vickers	31
2.4.4 Metalografia.....	32
2.5 Vibrações no processo de retificação	33
2.5.1 Fenômeno de <i>chatter</i>	35
2.6 Monitoramento do processo de retificação.....	37
2.6.1 Monitoramento indireto por sensores	39
2.6.2 Técnicas de processamento de sinais e tomada de decisão	40
2.7 Razão de potência (ROP)	42
2.8 Transformada de Fourier de curta duração (STFT).....	44
2.9 Monitoramento do fenômeno de <i>chatter</i>	45
2.9.1 Detecção do fenômeno de <i>chatter</i>	46
2.9.2 Medição de vibração.....	48

2.9.3 Acelerômetros.....	49
CAPÍTULO 3 - MATERIAL E MÉTODOS.....	52
3.1 Material e equipamentos.....	52
3.1.1 Procedimentos adotados para realização dos ensaios experimentais	52
3.1.2 Sistema de aquisição de dados	54
3.2 Integridade superficial das peças retificadas	55
3.3 Análise em tempo-frequência via STFT e ROP	57
3.3.1 Potência do sinal para uma dada banda de frequência calculada por meio da SFTF	57
3.3.2 Espectro de frequência baseado na STFT.....	57
3.3.3 A ROP baseada na STFT.....	58
3.4 Aplicação da ROP_{STFT} para o monitoramento do <i>chatter</i>	58
3.5 Verificação experimental do método proposto.....	60
CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES	62
4.1 Resultados dos ensaios experimentais: aço ABNT 1045 e rebolo CBN.....	62
4.1.1 Inspeção visual e análise metalográfica.....	62
4.1.2 Resultados da aplicação da STFT.....	64
4.1.3 Resultados da aplicação da ROP_{STFT}	66
4.2 Verificação do método: aço ABNT 1045 e rebolo de óxido de alumínio	71
4.2.1 Inspeção visual e análise metalográfica.....	71
4.2.2 Resultados da aplicação da STFT para os ensaios de verificação	73
4.2.3 Resultado da aplicação da ROP_{STFT} para os ensaios de verificação do método proposto.....	74
CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	79
5.1 Conclusões.....	79
5.2 Trabalhos futuros.....	81
REFERÊNCIAS	82
ANEXOS	91
ANEXO 1 – Curva de calibração do acelerômetro e módulo amplificador	91

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Decomposição de processos de retificação.....	20
Figura 2-Exemplo do processo de retificação plana.....	21
Figura 3- Composição da retificação plana	22
Figura 4-Fotografia de rebolos (a); principais componentes de um rebolo (b).....	23
Figura 5- Exemplo da operação de dressagem com diamante de ponta única (a); ângulo relativo entre o dressador e o rebolo (b).....	25
Figura 6-Principais parâmetros do processo de retificação	25
Figura 7- Rugosidade média, picos e vales topográficos	28
Figura 8- Forças na retificação	30
Figura 9- Esquema de indentador de diamante Vickers	31
Figura 10- Vibrações no processo de retificação.....	34
Figura 11- Representação esquemática do fenômeno de <i>chatter</i> na retificação.....	35
Figura 12- Ondulações geradas por <i>chatter</i> na superfície de uma peça que sofreu queima e oxidação	36
Figura 13- Sinais mensuráveis no processo de retificação e seus alvos	40
Figura 14-Técnicas de processamento de sinais para extração de características	41
Figura 15- Relação entre velocidade, descolamento e aceleração.....	48
Figura 16- Cadeia de medição da vibração	49
Figura 17- Acelerômetro piezométrico.....	50
Figura 18- Banco de ensaios experimentais	53
Figura 19. Procedimentos para a medição de dureza Vickers, Rugosidade $-R_a$ e, também, para a análise metalográfica das peças.....	56
Figura 20- Imagens digitais e análise metalográfica para as amostras (II) e (VII) com o rebolo CBN: (a) e (f) imagem sem processamento; (b) e (g) imagens processadas e (e) e (j) metalografia.....	63
Figura 21- (a) Sinais originais de aceleração referente a região da peça escolhida para análise; (b) STFT de (a). Os quais são correspondentes às amostras (II) e (VII).....	65
Figura 22. Resultado da ROP_{STFT} para os ensaios com rebolo CBN.....	67
Figura 23- RMSE da ROP_{STFT} e rugosidade em função das profundidades de corte	67
Figura 24- Ângulo de regressão da ROP_{STFT} e rugosidade em função das profundidades de corte	68

Figura 25- RMSE da ROP_{STFT} e dureza em função das profundidades de corte.....	69
Figura 26- Ângulo de regressão da ROP_{STFT} e dureza em função das profundidades de corte	69
Figura 27- Espectros de frequência das ROP_{STFT} para os ensaios com o rebolo CBN.....	70
Figura 28. Imagens digitais e análise metalográfica para as amostras II e VIII com o rebolo de óxido de alumínio: (a) e (f) imagem sem processamento; (b) e (g) imagens processadas e (e) e (j) metalografia.....	72
Figura 29- (a) Sinais originais de aceleração referente a região da peça escolhida para análise; (b) STFT de (a) os quais são correspondentes às amostras (II) e (VIII) para o rebolo de óxido de alumínio.....	73
Figura 30. Resultado da ROP_{STFT} para os ensaios com o rebolo de óxido de alumínio.	74
Figura 31- RMSE da ROP_{STFT} e rugosidade em função das profundidades de corte	75
Figura 32- Ângulo de regressão da ROP_{STFT} e rugosidade em função das profundidades de corte	76
Figura 33- RMSE da ROP_{STFT} e dureza em função das profundidades de corte.....	76
Figura 34- Ângulo de regressão da ROP_{STFT} e dureza em função das profundidades de corte	77
Figura 35- Espectros de frequência das ROP_{STFT} para os ensaios com o rebolo de óxido de alumínio.....	78

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Tipos de medidas de rugosidade (MACHADO et al., 2015)	29
Tabela 2- Parâmetros dos Ensaios de Retificação com rebolo CBN.....	53
Tabela 3- Configuração do módulo de vibração	54
Tabela 4- Parâmetros dos ensaios de retificação com rebolo de óxido de alumínio	61

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT- Associação Brasileira de normas técnicas

CBN - Nitreto cúbico e boro

CIRP – International Academy for Production Engineering (Academia Internacional de Engenharia de Produção)

DFT - Discret Fourier transform (transformada discreta de fourier)

EA – Emissão acústica

FFT- Fast Fourier Transform (transformada rápida de fourier)

HV - Hardness Vichers

IA – Artificial intelligence (inteligência artificial)

OXI - Rebolo de óxido de alumínio

RMS – Root mean Square (valor médio quadrático)

RMSE - Root mean squared error (erro médio quadrático)

ROP - Ratio of power (razão de potência)

SAE - Society of Automotive Engineers

STFT - Sort time fourier transform (transformada de Fourier de curta duração)

TW – Wavelet transform (transformada wavelet)

a Profundidade de corte [μm]

h_{eq} Espessura equivalente de corte [μm]

R_a Rugosidade média aritmética [μm]

R_q Rugosidade média quadrática [μm]

R_t Rugosidade máxima de pico ou vale [μm]

v_{fn}	<i>Velocidade normal [m/s]</i>
v_{fa}	<i>Velocidade axial [m/s]</i>
v_s	<i>Velocidade do rebolo [m/s]</i>
v_w	<i>Velocidade da peça [m/s]</i>
F_t	<i>Força tangencial [N]</i>
F_n	<i>Força normal [N]</i>
F_a	<i>Força axial [N]</i>
U_d	<i>Grau de recobrimento</i>
d_s	<i>Diâmetro externo do rebolo [mm]</i>
n_s	<i>Rotação do rebolo [rpm]</i>
Pot	<i>Potência do processo [watts]</i>
P_{STFT}	<i>Potência calculada a partir da STFT [amostras]</i>
D_1, D_2	<i>Diagonais 1 e 2 oriundas da indentação Vickers</i>
R_1, R_2	<i>Regiões de interesse 1 e 2</i>
m	<i>Amostras</i>
t	<i>Tempo (s)</i>
ω	<i>Frequência angular [rad/s]</i>
$f(t)$	<i>Sinal no domínio do tempo [amostras]</i>
$h(u)$	<i>Função janela no tempo [amostras]</i>
M, N	<i>Número de colunas e de linhas da matriz que descreve a STFT</i>
n_1-n_2	<i>Número de pontos da matriz que descreve a STFT</i>
$X_{n,m}$	<i>K-ésima saída da DTF para cada coeficiente da STFT</i>

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

Esta seção discorre sobre importância da automação no processo de retificação, destacando a motivação e a necessidade de monitorar o fenômeno de chatter. Na sequência, são apresentados os objetivos do trabalho, a organização do documento e uma lista de publicações científicas que foram obtidas com os resultados da presente pesquisa.

1.1 Motivação e justificativa

A abordagem tradicional de controle de qualidade consiste na inspeção de produtos produzidos, geralmente amostrados em intervalos regulares, avaliando as características de interesse do produto. Ao monitorar a evolução dessas características, é possível verificar se o processo está realmente sob controle. O monitoramento feito dessa forma, entretanto, é focado na inspeção do produto, que é o resultado final do processo de manufatura. Esse tipo de abordagem é comumente usado na indústria por meio de observações visuais diretas ou de um diagnóstico empírico, porém, dependendo da aplicação, esse procedimento pode apresentar limitações. No caso de limitações, o resultado é um atraso consequente na resposta a erros de processo, que, entretanto, continuou a produzir peças que podem não ser aceitáveis. Esse atraso leva a um desperdício de tempo e materiais, resultando em aumento de custos e redução de produtividade, (MAGGIONI; MARZORATI, 2013).

Por outro lado, os sistemas de controle e inspeção baseados em tecnologias de monitoramento por sinais de sensores possuem uma longa história de uso bem-sucedido em abordagem científica para processos de manufatura. De fato, em processos de manufatura com operações constantes, como os encontrados nas indústrias de usinagem, a abordagem baseada em sinais de sensores físicos pode ser usada para reduzir a variabilidade. Nos últimos anos, com

o advento da indústria 4.0, o estudo de sistemas de monitoramento indireto, ou seja, tecnologias inovadoras com base na análise de sinais de sensores e dados adquiridos durante o processo, recebeu uma atenção considerável. Isto é principalmente devido a um fator importante: ser mais competitivo. Isso, juntamente ao advento da tecnologia de sensores *online*, da automação industrial, e do aumento da capacidade computacional integrada, levaram a um crescimento contínuo de estudos sobre os sistemas de monitoramento em processos de manufatura.

A análise de sinais adquiridos por sensores durante o processo de usinagem, por exemplo, permite reconhecer rapidamente desvios das condições normais de trabalho, o que pode resultar em custos mais baixos e menos desperdício, graças a possíveis ações corretivas automatizadas aplicadas durante o processo. Nesse sentido, os processos de usinagem por abrasão, principalmente as operações de retificação, são amplamente usados na manufatura de componentes que exigem grande precisão e alta qualidade no acabamento. A retificação é um processo que pode fornecer baixos custos para um determinado número de peças. Entretanto, para obter essas vantagens, é necessário assegurar uma configuração (máquina, ferramenta, refrigeração, etc.) adequada. O monitoramento dos processos de retificação convencionais tem dependido, majoritariamente, das qualificações e da experiência do operador humano que determina o tempo de parada de máquina, bem como, a identificação de falhas no processo usando de meios visuais, auditivos e táteis. Sendo assim, uma solução viável para o monitoramento de vários parâmetros do processo de retificação é o uso dos sinais de sensores. Essa nova abordagem permite um controle da influência dos fenômenos físicos na manufatura do componente, de modo a reduzir o tempo de parada de máquina, aumentar a produção, visando reduzir os custos de manufatura, (MAGGIONI; MARZORATI, 2013; ALEXANDRE et al., 2018).

Nesse contexto, muitas abordagens têm sido propostas no processo de retificação para monitorar danos térmicos (AGUIAR et al., 2006a; RIBEIRO et al., 2017b), rugosidade (OLIVEIRA JUNIOR et al., 2015, 2019a; RIBEIRO et al., 2015) e a condição da ferramenta (rebolo e dressador) (MIRANDA et al., 2015; MOIA et al., 2015; LOPES et al., 2017; OLIVEIRA JUNIOR et al., 2018b, 2018a), usando principalmente algoritmos avançados de processamento de sinal e inteligência artificial. Para tanto, sinais de diversos sensores físicos, tais como: emissão acústica (EA) (AGUIAR et al., 2006a, 2006b), acelerômetros (vibração) (OLIVEIRA JUNIOR et al., 2015, 2016a, 2016b, 2017, 2019a), dinamômetros (força) e sensores de potência (KWAK; HA, 2004; COUEY et al., 2005; AGUIAR et al., 2006a), e recentemente, transdutores piezelétricos de baixo custo do tipo PZT (zirconato e titanato do

chumbo) (FABIANO et al., 2017; RIBEIRO et al., 2017b; OLIVEIRA JUNIOR et al., 2018c, 2018a, 2019b), têm sido aplicados.

A retificação é um processo de acabamento que faz uso de partículas abrasivas fixas e influenciado por diversos fatores estocásticos que são prejudiciais ao processo e um deles é o fenômeno de *chatter*, o qual tem sido pouco reportado pelas abordagens supracitadas. O fenômeno de *chatter* é definido como vibrações autoexcitadas que ocorrem nos processos de usinagem, (SILVA et al., 2013; YAN; XU; WIERCIGROCH, 2015; AHRENS et al., 2016). Alguns fatores como altas taxas de remoção de material, o desbalanceamento e a excentricidade do rebolo podem contribuir para o surgimento do *chatter*, (INASAKI; KARPUSCHEWSKI; LEE, 2001). No processo de retificação, esse fenômeno geralmente surge por meio de vibrações de maior amplitude, próximas das vibrações harmônicas do rebolo, da peça como mostrado por Gradišek et al. (2003) e, ainda, da máquina-ferramenta e do sistema de fixação, quando projetados ou aplicados inadequadamente. A ocorrência do *chatter* no processo de retificação pode acarretar peças fora dos padrões macro/micro geométricos e dimensionais ou, ainda, danos irreversíveis à superfície da peça. Os métodos tradicionais de monitoramento baseados na experiência do operador não são capazes de identificar o fenômeno de *chatter* sem que danos irreversíveis sejam introduzidos à peça. Assim, surge a necessidade da utilização dos métodos de monitoramento indiretos por sinais de sensores citados anteriormente (INASAKI; KARPUSCHEWSKI; LEE, 2001; GRADIŠEK et al., 2003). Entretanto, a confiabilidade de um sistema automático usando tais métodos depende, também, da seleção correta das técnicas de processamento digital de sinais empregados para extração de características do processo, de modo a implantar um sistema eficaz, (WANG et al., 2001).

A detecção do *chatter*, embora aparente ser uma tarefa simples para um operador treinado, consiste em uma tarefa difícil quando se trata do reconhecimento automático desse fenômeno. Ainda assim, alguns trabalhos científicos foram publicados nos últimos 20 anos descrevendo técnicas e abordagens para detecção de *chatter* em máquinas-ferramentas com particular referência para o processo de retificação (INASAKI; KARPUSCHEWSKI; LEE, 2001). Por exemplo, Inasaki, Karpuschewski e Lee (2001), publicaram o trabalho científico intitulado: “*Grinding Chatter – Origin and Suppression*”, onde os principais mecanismos da ocorrência de *chatter* foram esclarecidos, bem como, as principais dificuldades em detectar antecipadamente esse fenômeno foram apontadas. Neste importante e consolidado estudo, o qual foi publicado na revista *CIRP Annals*, os autores mostram o potencial do uso de sensores avançados para minimização do fenômeno de *chatter*. Além disso, conforme relatado por

Kuljanić, Totis e Sortino (2008), os sensores que têm sido mais utilizados na detecção de *chatter* são dinamômetros, sensores de deslocamento e de aceleração. No que diz respeito às tecnologias de processamento e classificação de sinais de sensores, os métodos de análise domínio da frequência e domínio tempo-frequência (densidade espectral de potência - PSD, transformada rápida de Fourier - FFT e transformada wavelet - WT) têm sido os mais comuns.

Neste contexto, o presente trabalho propôs uma nova técnica de processamento de sinais de aceleração baseada em análise tempo-frequência, por meio de ROP (*ratio of power* - razão de potência) e STFT (*short time Fourier transform* - transformada de Fourier de tempo curto), com vista a extrair informações referentes ao *chatter* no processo de retificação de peças de aço com distintos rebolos. Desta forma, pretende-se validar o método para um sistema automático de monitoramento visando contribuir de forma técnica e científica para detecção do fenômeno de *chatter* da indústria da retificação. É importante mencionar que, pesquisadores da área tem extraído características do *chatter* no domínio da frequência a partir de sinais de aceleração (vibração). Porém, o presente trabalho se diferencia dos demais constantes na literatura, como por exemplo os trabalhos de Ahrens et al. (2013, 2016), Gradišek et al. (2003) e Yan et al. (2014, 2015), devido à utilização de uma nova técnica de processamento de sinais de aceleração, baseada na STFT e na ROP para detectar o fenômeno de *chatter* na retificação de peças de aço, portanto, uma abordagem inédita para o monitoramento desse fenômeno.

1.2 Objetivos

O objetivo desse trabalho é correlacionar uma nova técnica de processamento digital de sinais de aceleração com base na STFT e ROP com as variáveis mecânicas de saída, tais como dureza, rugosidade e metalografia, para caracterização do fenômeno de *chatter* durante o processo de retificação tangencial plana de peças de aço.

1.3 Organização do trabalho

A presente tese está organizada em cinco capítulos, sendo que:

- O primeiro capítulo refere-se introdução do trabalho, o qual apresentou a motivação do presente estudo e discorreu sobre a importância do monitoramento do processo de

retificação em termos econômicos. Nesse capítulo, o problema em questão foi abordado, ou seja, a ocorrência do fenômeno de *chatter*. Para minimização deste problema, os objetivos do presente trabalho foram apresentados. Ao final deste capítulo, uma lista de trabalhos científicos publicados, fruto dos resultados do presente estudo, é apresentada.

- O segundo capítulo apresenta uma revisão bibliográfica sobre o estado da arte, bem como, sobre os principais aspectos teóricos do escopo do presente trabalho. Nesse sentido, as principais características e variáveis mecânicas do processo de retificação serão introduzidas, assim como, o princípio de ocorrência do fenômeno de *chatter* será explicado. Uma revisão das principais tecnologias de detecção e monitoramento do fenômeno *chatter* baseadas no processamento de sinais de sensores também será reportada neste capítulo.
- No terceiro capítulo, os materiais e equipamentos utilizados, bem como, a metodologia empregada para realização dos ensaios experimentais de retificação, são detalhados. Nesse sentido, serão descritos os procedimentos adotados para: a coleta dos sinais de aceleração, as medições da rugosidade e dureza Vickers; a análise metalográfica das superfícies das peças; e finalmente, o processamento digital dos sinais de aceleração para a detecção do fenômeno de *chatter* no processo de retificação.
- No quarto capítulo, os resultados para os ensaios experimentais e para os ensaios de verificação do método proposto serão sequencialmente apresentados e discutidos.
- Finalmente, as conclusões do trabalho, bem como as perspectivas para pesquisas futuras, com base nos resultados obtidos até o presente momento, serão apresentadas no quinto capítulo.

1.4 Publicações obtidas

[1] Thomazella, R.; Lopes, W. N. ; Alexandre, F. A.; Dotto, F. R. L. ; Aguiar, P. R. ; Pontes Junior, B. R. ; Bianchi, E. C. ; Vieira, M. A. A. . **“Detecção Do Fenômeno de *Chatter* no Processo De Retificação por meio de Análise Tempo-Frequência”**. In: *X Congresso Nacional de Engenharia Mecânica (CONEM)*,2018, Salvador, BA.

[2] Thomazella, R.; Lopes, W. N.; Alexandre, F. A.; Götz, R.; Aguiar, P. R.; Bianchi, E. C. **“Técnicas De Processamento Digital de Sinais de Aceleração para a detecção de Vibração**

Auto-Excitada no Processo de Retificação". In: XXXVIII *International SODEBRAS Congress and SODEBRAS Journal*, Florianópolis, 2017.

[3] W. N. Lopes *Et Al.*, "**Monitoring of Self-Excited Vibration in Grinding Process Using Time-Frequency Analysis of Acceleration Signals**" *2018 13th IEEE International Conference on Industry Applications (INDUSCON)*, São Paulo, Brazil, 2018, pp. 659-663. DOI: 10.1109/Induscon.2018.8627198.

[4] Thomazella, R.; Lopes, W. N.; Aguiar, P. R.; Alexrandre, F. A.; Fiocchi, A. A.; Bianchi, E. C. "**Digital Signal Processing for Self-Vibration Monitoring in Grinding: A New Approach Based on the Time-Frequency Analysis of Vibration Signals**" *Measurement Journal* (aceito para publicação, 2019).

“Ms. Ref. No.: MEAS-D-19-00413R1

Title: Digital signal processing for self-vibration monitoring in grinding: A new approach based on the time-frequency analysis of vibration signals *Measurement*

I am pleased to confirm that your paper "Digital signal processing for self-vibration monitoring in grinding: A new approach based on the time-frequency analysis of vibration signals" has been accepted for publication in *Measurement*.

Thank you for submitting your work to this journal.

With kind regards,

Luca De Vito, Ph.D.

Editor

Measurement"

Capítulo 2

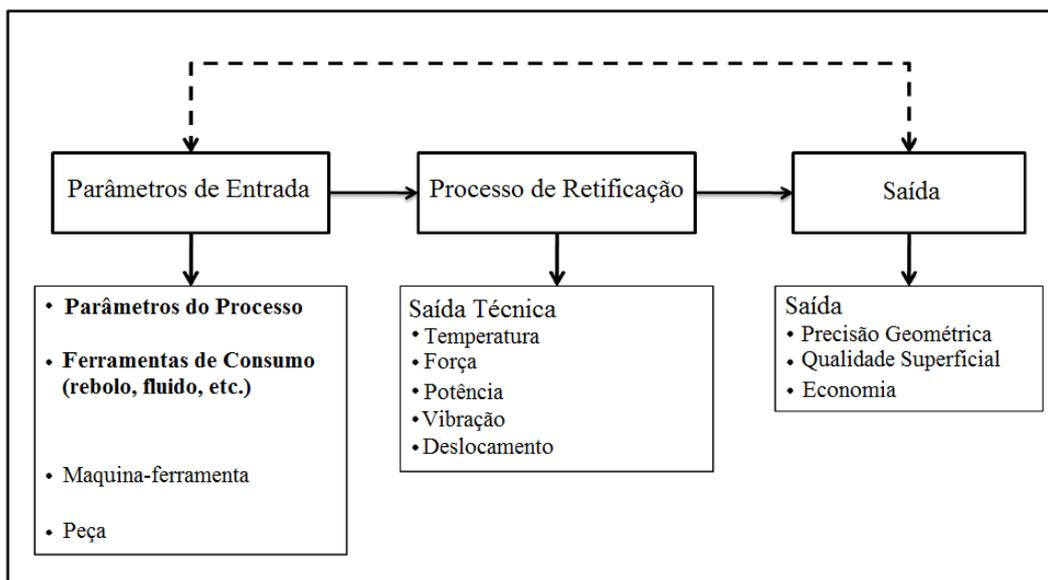
ESTADO DA ARTE

Neste capítulo, uma visão geral sobre o estado da arte e os principais aspectos teóricos do escopo do presente trabalho, será relatada. As principais características e variáveis mecânicas do processo de retificação serão introduzidas, bem como, o princípio de ocorrência do fenômeno chatter será explicado. Uma revisão das principais tecnologias de detecção e monitoramento do fenômeno chatter baseadas no processamento de sinais de sensores também será reportada neste capítulo. Nesse contexto, será destacado as técnicas de processamento de sinais que foram essenciais para fundamentar o método proposto no presente trabalho.

2.1 O processo de retificação

Todas as classes de processos de usinagem subtrativa possuem um fator em comum: remover material indesejado da peça. Nesse contexto, a retificação é frequentemente usada no acabamento, ou seja, é uma das últimas etapas na produção de produtos e representa 25% da despesa total em operações de remoção de material na indústria. De modo geral, um processo de retificação pode ser decomposto em um modelo intrínseco de entrada vs. saída, como ilustrado na Figura 1. Assim, os parâmetros de entrada incluem quatro dobras: os parâmetros do processo, as ferramentas de consumo, a máquina-ferramenta e a peça. A máquina ferramenta determina a rigidez do sistema. A peça traz erros macrogeométricos, variações de dureza etc. As ferramentas de consumo, incluindo ferramentas abrasivas (rebolo), fluido refrigerante e ferramentas de dressagem, também introduzem algumas variáveis do processo. Por exemplo, a especificação e a condição de dressagem do rebolo afetam significativamente o processo de retificação. Os parâmetros do processo incluem: a velocidade da corte, a velocidade da mesa, os parâmetros de acabamento e os métodos de inspeção (HEGEMAN, 2000; TIAN, 2009).

Figura 1- Decomposição de processos de retificação



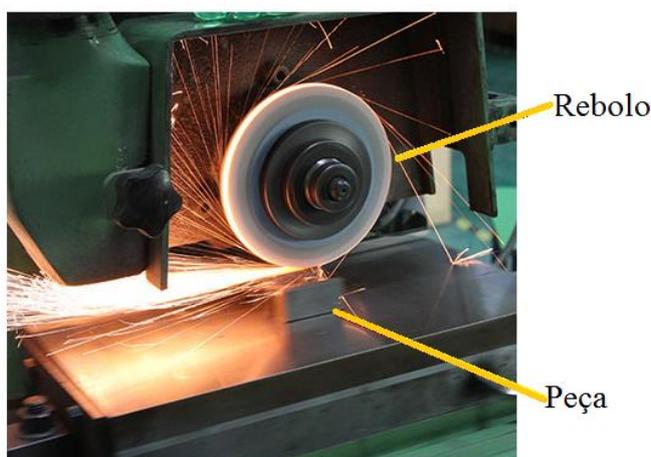
Fonte: (TIAN, 2009)

O resultado do processo de retificação geralmente é a peça retificada, ou seja, a função da retificação é remover uma quantidade designada de material e gerar uma superfície designada. Assim, o desempenho do processo pode ser avaliado a partir de dois aspectos, a precisão geométrica e a qualidade superficial. Segundo Puerto et al., (2013) a rugosidade superficial R_a é uma das características mais importantes resultantes do processo e que, segundo o autor, deve estar compreendida entre $0,1\mu\text{m}$ e $1,6\mu\text{m}$ e com pequena tolerância. Além disso, o aspecto econômico também não pode ser negligenciado. Conforme ilustrado na Figura 1, o processo pode ser medido através do termo saída técnica ou operacional, que inclui, mas não se limita ao movimento relativo do rebolo e da peça, temperatura, força, potência, vibração, etc. Na Figura 1, a linha pontilhada que conecta os parâmetros de entrada com a saída indica que esses dois blocos estão correlacionados. No entanto, essa relação permanece ainda incerta e precisa ser estudada. Uma vez que a retificação é um processo complexo, pode não haver correlação direta entre a entrada e a saída, ou seja, ainda não há um modelo teórico disponível. Portanto, uma solução prática para estudar a saída técnica, é a busca por padrões de comportamento que liguem a entrada e a saída por meio do controle ou monitoramento das variáveis do processo.

2.2 Visão geral das operações de retificação

A retificação é um termo usado nos sistemas modernos de manufatura moderna para descrever a usinagem com rebolos abrasivos. Os rebolos apresentam uma ampla variedade de formas, tamanhos e tipos de grãos abrasivos. A retificação é essencialmente um processo de remoção de cavacos que possui vários grãos abrasivos, onde um único grão abrasivo do rebole é uma ferramenta de corte. No entanto, o processo de retificação não se limita apenas ao acabamento ou à pequena taxa de remoção de material; na verdade, em alguns casos ele pode ser usado para a remoção de quantidades relativamente altas de materiais (MALKIN; GUO, 2008). Dessa forma, é importante separar os dois tipos de retificação: desbaste e acabamento. As operações mais comuns de retificação são: a retificação tangencial plana, a retificação cilíndrica, a retificação interna e a retificação sem centro (do inglês *centerless*) (MAGGIONI; MARZORATI, 2013). A seleção de um processo de retificação para uma determinada aplicação depende do formato e das características da peça, do tamanho, da facilidade de usinagem, da qualidade, dimensional e geométrica, e da taxa de remoção exigida. Cada uma destas tipologias pode ainda ser classificada pela direção do movimento (MALKIN; GUO, 2008). Um exemplo do processo de retificação plana é ilustrado na Figura 2.

Figura 2-Exemplo do processo de retificação plana



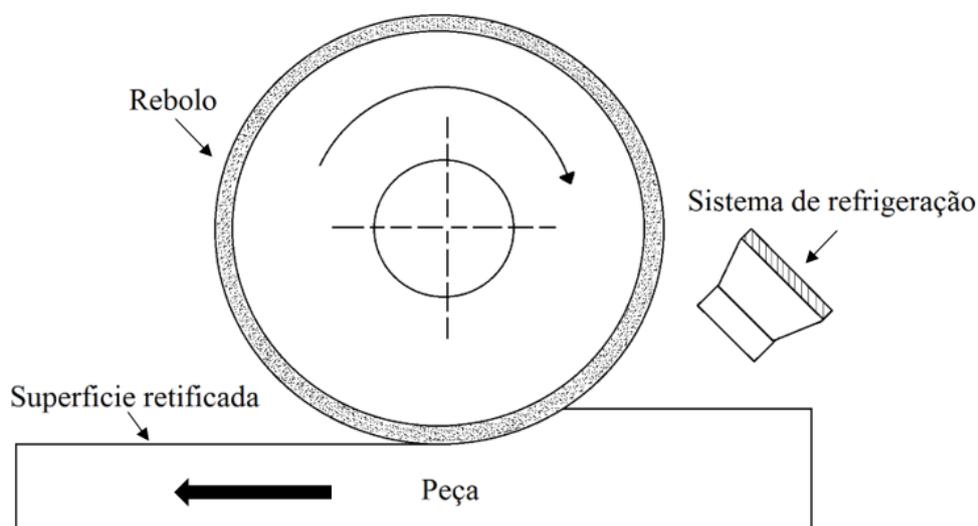
Fonte: (YIZE-MOULD-CO, 2019)

A retificação tangencial plana é uma das operações mais comuns, geralmente envolvendo a retificação de superfícies planas. O processo consiste na retirada de material de uma peça qualquer por meio da ação interferente de um rebole abrasivo com movimento

rotacional e do avanço longitudinal de uma mesa de modo a realizar a usinagem, como ilustrado na Figura 3. O processo conta ainda com a ação do fluido de refrigeração ou corte instalado na atmosfera de trabalho com consequente produção de cavacos, que são os principais rejeitos do processo (HE et al., 2019). O fluido de corte aplicado ao processo de retificação tem como ação a refrigeração e lubrificação da zona de contato entre o rebolo e a peça de forma a dissipar o excesso de calor gerado por atrito que, conseqüentemente, reduz o desgaste do rebolo abrasivo mantendo a capacidade de corte, reduzindo o empastamento e, conseqüente, permitindo uma maior longevidade deste (MADANCHI; WINTER; HERRMANN, 2015; ZHANG et al., 2013).

É importante mencionar que o estudo ininterrupto na área de conhecimento da retificação traz inúmeros benefícios à indústria e à sociedade como um todo, pois visam a redução de consumo de energia, materiais e ferramentas, melhor controle dimensional e geométrico das peças produzidas que implicam em melhor qualidade de produto e, conseqüente, redução do custo global de produção (PAPANIKOLAOU; SALONITIS, 2019).

Figura 3- Composição da retificação plana



Fonte: Autor

2.2.1 Rebolos

Os rebolos são discos cilíndricos com furação concêntrica de dimensões variáveis, produzidos a partir da impregnação de grãos abrasivos e elevada dureza, tais como: óxido de alumínio, carbetos de silício, dentre outros, com resinas silicosas, resinoides, goma-laca,

borracha ou vitrificantes, super-resistentes e altamente impregnantes capazes de ligar o material (MALKIN; GUO, 2008). O rebolo é uma ferramenta de desbaste e acabamento caracterizada pela união de grãos que a tornam uma ferramenta de corte múltiplo devido às arestas cortantes do material impregnado (YU; LU; WANG, 2016). Diversas classes/ categorias de rebolos são encontradas no mercado, alguns com características especiais, como é o caso dos rebolos de material superabrasivo composto por nitreto cúbico de boro (CBN) impregnado com material de alto poder vitrificante (DING et al., 2017). A Figura 4(a) é uma fotografia da aparência e da forma típica e rebolos fornecidos pela empresa SAINT GOBAIN ABRASIVES. Como mostrado na Figura 4(b), os grãos abrasivos do rebolo são unidos por meio de um ligante em uma estrutura composta por folgas (poros) para o alojamento dos cavacos.

Figura 4-Fotografia de rebolos (a); principais componentes de um rebolo (b)



Fonte:(SAINT-GOBAIN, 2019)

O rebolo de CBN tem como característica principal a sua alta resistência ao desgaste, sendo somente 25% menor que a dureza do diamante, tornando o segundo material na escala de dureza. Devido a essa dureza elevadíssima, o CBN torna-se a primeira opção de rebolo de alto desempenho para usinagem do aço carbono, pois com temperaturas elevadas os rebolos diamantados perdem sua dureza e tornam-se alotropicamente instáveis (DING et al., 2017). No caso do CBN, as temperaturas elevadas não alteram sua estrutura, sendo um material com características refratárias e alta condutividade térmica, característica esta desejável ao processo de retificação, proporcionando uma melhor dissipação de calor em processos de retificação (LI et al., 2016). O emprego do rebolo superabrasivo de CBN traz consigo inúmeros benefícios ao processo, dados pela redução de temperatura e consequente redução nos danos térmicos, resistência ao desgaste e consequente redução nas forças de corte, redução de tensões residuais de tração e redução da energia empregada no processo, aliada a uma baixa rugosidade média

da peça (LI et al., 2016). É possível observar na literatura diversos relatos de redução de danos térmicos, significativa redução na perda de peças devido à queima e redução nas tensões residuais inerentes ao processo (HE et al., 2019).

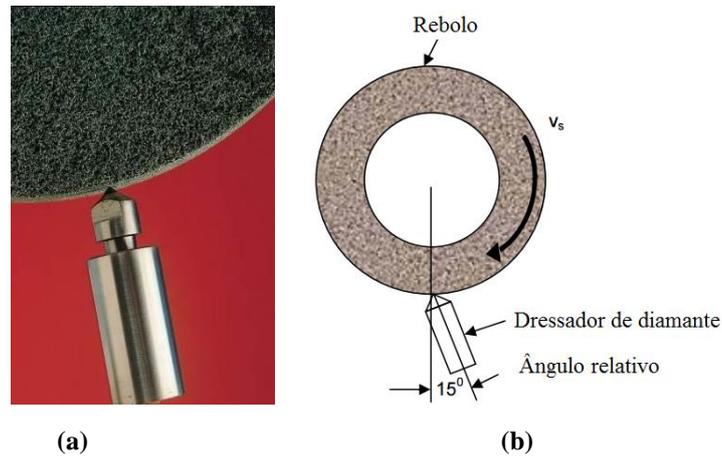
2.2.2 A operação de dressagem

A dressagem é um processo usual do processo de retificação e consiste na afiação e perfilamento do rebolo utilizando para isso um dressador de ponta única, multipontas ou conglomerado (HOCKAUF et al., 2018). O principal propósito da dressagem é a restauração da topografia do rebolo, contribuindo para a correta formação do cavaco durante o processo de retificação de forma a manter a afiação em um padrão aceitável de corte, (XU et al., 2019). Diversos problemas comuns do processo de retificação, tais como empastamento, geração excessiva de calor, corte irregular, etc. podem ser solucionados com as técnicas adequadas de dressagem (MIRANDA et al., 2015). Em contrapartida, a vida útil do rebolo é diretamente afetada pela quantidade de realizações do processo de dressagem, visto que este procedimento faz a remoção de grande quantidade de grãos do rebolo (MARINESCU et al., 2006). O processo de dressagem consiste no emprego de um dressador fabricado com material diamantado que, estando fixo à mesa, tem a sua ponta posta em contato com a superfície do rebolo juntamente com a passagem de fluido de corte, realizando uma movimentação longitudinal, varrendo toda a superfície do rebolo e removendo os grãos abrasivos que perderam a capacidade de corte, regenerando o material por meio de grãos novos de camadas internas (MARINESCU et al., 2006).

A dressagem de ponta única é umas das operações mais comuns e mais simples de se controlar, portanto, mais direta e econômica para processo de retificação. De acordo com Malking; Guo, (2008), a operação de dressagem com dressador de ponta única produz dois principais efeitos sobre a superfície do rebolo, sendo eles o macroefeito e o microefeito. O macroefeito é gerado a partir da forma e profundidade de penetração do dressador e o passo de dressagem. Este fenômeno determina a posição das arestas novas dos grãos abrasivos na superfície do rebolo. Por outro lado, o microefeito é gerado pela retirada dos grãos desgastados, ou seja, aqueles com baixa ancoragem ao ligante. O microefeito também ocorre pela fratura de grãos que não se desgastaram completamente, onde novas arestas de corte são geradas. A dressagem de ponta única é ilustrada na Figura 5(a). O dressador de ponta única geralmente é

instalado em um ângulo relativo entre a ferramenta e a rebolo α_d , que deve ser entre 10° e 15° (MALKIN; GUO, 2008). O ângulo é mostrado na Figura 5(b).

Figura 5- Exemplo da operação de dressagem com diamante de ponta única (a); ângulo relativo entre o dressador e o rebolo (b)

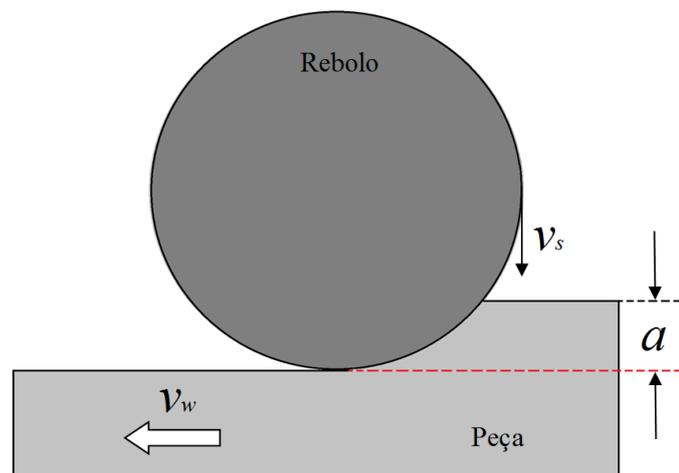


Fonte: (FREIRE, 1984; LACH-DIAMANT, 2019)

2.3 Principais parâmetros do processo de retificação

Conforme ilustrado na Figura 6, os principais parâmetros do processo de retificação são: a velocidade de corte (v_s), a profundidade de corte (a) e a velocidade da peça (v_w).

Figura 6-Principais parâmetros do processo de retificação



Fonte: Autor

A partir da combinação deles, novos parâmetros, tais como a espessura de corte equivalente (h_{eq}), podem ser definidos. A relação entre os parâmetros do processo de retificação pode ser otimizada visando o controle da qualidade superficial da peça, bem como, a minimização de efeitos térmicos (queima, derretimento superficial, etc.). Uma descrição detalhada desses parâmetros é apresentada a seguir.

2.3.1 Profundidade de corte (a)

A profundidade de corte (a) dada em [μm] é a medida que expressa a penetração do rebolo na peça a ser retificada, representando a camada de material removido durante o processo de movimentação relativa rebolo-mesa (MARINESCU et al., 2006). A profundidade de corte relaciona-se diretamente com as forças de usinagem existentes no processo, pois quanto maior essa profundidade, maior será a força de corte, o consumo energético do processo e o desbaste na peça. Porém uma profundidade inadequada poderá resultar em danos irreversíveis na peça, provocando deformações, queima e outros fenômenos diretamente relacionados ao acabamento da peça (YAN et al., 2019).

2.3.2 Velocidade de corte (v_s)

A velocidade de corte (v_s) dada em [m/s] ou em [m/min] é dada pela Equação 1, (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013) e representa a velocidade instantânea da superfície periférica do rebolo, ou seja, a velocidade da aresta cortante deste (MACHADO et al., 2015).

Como na profundidade de corte, a velocidade de corte, ou seja, periférica do rebolo, interfere de maneira representativa no desgaste, acabamento / rugosidade, vibrações de todas as naturezas, possibilidade de queima da peça e principalmente nas forças de corte que serão mostradas mais adiante (BIANCHI et al., 1997).

$$v_s = \frac{\pi \cdot d_s \cdot n_s}{1000} \text{ [m / min]} \quad \text{ou} \quad v_s = \frac{\pi \cdot d_s \cdot n_s}{60000} \text{ [m / s]} \quad (1)$$

onde:

d_s [mm] é o diâmetro externo do rebolo

n_s [mm] é a rotação do rebolo

2.3.3 Velocidade da peça (v_w)

A velocidade da peça (v_w), dada em [m/s] ou em [mm/min], representa a velocidade de deslocamento da mesa em relação ao rebolo (MARINESCU et al., 2006). Também, a velocidade da peça é influenciada pelos impactos dos grãos abrasivos do rebolo no ataque da peça (BIANCHI et al., 1997). No processo de retificação, a taxa de remoção de material está diretamente relacionada com a velocidade da peça, pois quanto maior a velocidade da peça/mesa, maior será a taxa de remoção de material, aumentando, por consequência, as forças de corte, e impactando em um maior desgaste do rebolo (GRAF, 2004). A velocidade da peça (v_w) é calculada pela na Equação 2;

$$v_w = \frac{f \cdot n}{60000} [mm/min] \quad (2)$$

sendo:

f = avanço [mm/revolução]

n = número de rotações por minuto

2.3.4 Espessura equivalente de corte (h_{eq})

A espessura equivalente de corte (h_{eq}), dada em [μ m], é um parâmetro da retificação que representa a espessura de material que é removida pelo rebolo em uma revolução completa (MALKIN; GUO, 2008). A Equação 3 relaciona a espessura equivalente de corte com a velocidade da peça (v_w), a velocidade de corte (v_s) e a profundidade de corte (a):

$$h_{eq} = \frac{v_w}{v_s} \cdot a \quad (3)$$

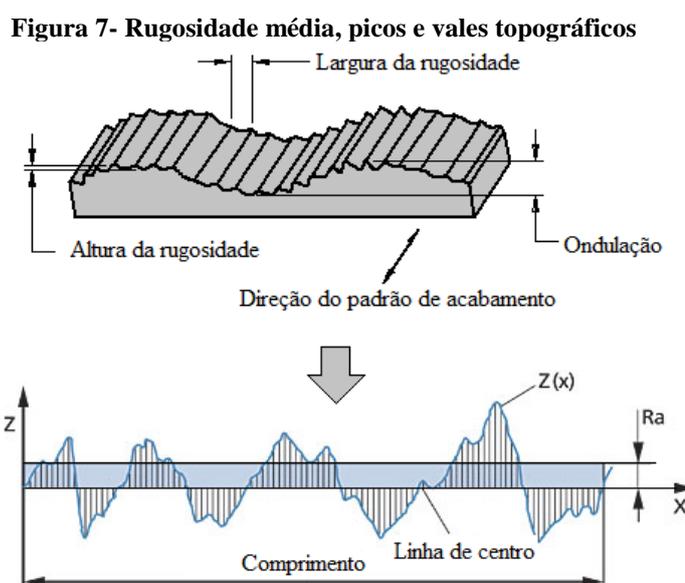
A espessura equivalente é uma medida amplamente utilizada por representar as condições relativas à severidade de corte e, indiretamente, pode ser um indicativo de energia dissipada no processo, desgaste de rebolo devido ao maior esforço e, ainda, a inferência de rugosidade média da peça (ROWE, 2014).

2.4 Variáveis de saída no processo de retificação

Esta seção destina-se a fornecer uma breve visão geral das variáveis de saída provenientes do mecanismo de remoção de material durante o processamento de retificação. Nesse contexto, variáveis como a força e potência na retificação, a rugosidade, a dureza e a caracterização microestrutural do corpo de prova desempenham um papel dominante no processo. A medição dessas variáveis resulta em informações apuradas sobre a qualidade superficial da peça, bem como a configuração correta dos parâmetros do processo de retificação descritos na seção 2.3.

2.4.1 Rugosidade

A rugosidade é uma medida que representam as magnitudes das irregularidades existentes em uma superfície qualquer. É um parâmetro de caracterização de topografia de superfície importantíssimo e comumente utilizado nos processos de retificação, usinagem, etc., (RABIEY; ZHI WEI, 2018). A Figura 7 ilustra uma amostra com picos e vales topográfico, juntamente a rugosidade média (R_a) obtida neste exemplar.



Fonte: (NSI/ASME-B46.1, 1985)

O rugosímetro é o principal instrumento para medição da rugosidade superficial; nesta medição, é necessário determinar o parâmetro de rugosidade a ser obtido pelo equipamento, ou

seja, o tipo de medida a ser realizado, que pode ser: rugosidade média - R_a , rugosidade média quadrática - R_q , e rugosidade máxima de pico ou vale - R_t , dentre outras elencadas na Tabela 1 (MACHADO et al., 2015). Além do tipo de parâmetro a ser realizado, deve-se também aplicar as técnicas adequadas de medição, realizando-a na direção perpendicular ao corte, de forma a obter os valores mais expressivos desta variável (HECKER; LIANG, 2003). Fisicamente a rugosidade, além da caracterização da natureza topográfica da superfície (acabamento superficial), afeta diretamente a resistência da peça à carregamentos e, conseqüente, a fadiga em sua utilização. A rugosidade é relevante para vários problemas fundamentais (atrito, a deformação de contato, o aquecimento, a condução de corrente elétrica, etc) e seu controle nas operações de retificação é realizado pelo gerenciamento e otimização dos processos e suas condições. A irregularidade é gerada pela interação da topografia da superfície do rebolo com a peça sob movimentos cinemáticos impostos pela máquina. Assim, o resultado obtido depende da configuração dos parâmetros de retificação, condição do rebolo (criticamente dependente da operação de dressagem) e das forças de corte geradas no processo (OLIVEIRA JUNIOR et al., 2015).

Tabela 1- Tipos de medidas de rugosidade (MACHADO et al., 2015)

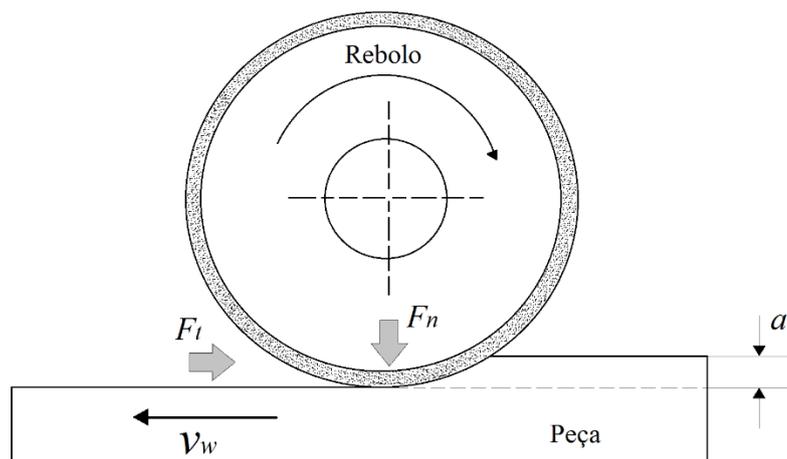
Símbolo	Nome	Definição
R_a	Desvio aritmético médio	Média aritmética dos valores absolutos das ordenadas no comprimento de amostragem.
R_q	Desvio médio quadrático	Raiz quadrática da média dos valores das ordenadas no comprimento de amostragem.
R_t	Altura total do perfil	Soma da maior altura de pico do perfil e da maior profundidade de vale do perfil no comprimento de avaliação.
R_z	Altura máxima do perfil	Soma da altura máxima dos picos e a maior das profundidades dos vales no comprimento de amostragem.
R_{sk}	Fator de assimetria do perfil (skewness)	Quociente entre o valor médio dos valores das ordenadas e R_q ao cubo, no comprimento de amostragem.
R_{ku}	Fator de achatamento do perfil	Quociente entre o valor médio dos valores das ordenadas à quarta potência e o valor de R_q à quarta potência no comprimento de amostragem.

2.4.2 Força e potência na retificação

As forças existentes no processo de retificação são originárias dos fenômenos físicos presentes e possuem grande expressividade no cálculo da potência e energia do processo (BIANCHI et al., 1997). A potência do processo pode ser inferida calculando ou mensurando as três forças principais do processo que são: força tangencial (F_t), força axial (F_a) e força normal (F_n). A componente F_a é decomposta ao longo da direção de avanço longitudinal, que não possui muita significância. A

ilustra a configuração da retificação tangencial plana, representando a força tangencial (F_t), a força normal (F_n). A potência do processo pode ser obtida basicamente pela multiplicação entre força e velocidade, como descrito nas Equações 4 e 5, (ROWE, 2014).

Figura 8- Forças na retificação



Fonte: Autor

$$F \cdot v = \text{potência} \quad (4)$$

$$Pot_{\text{processo}} = F_a \cdot v_{fa} + F_n \cdot v_{fn} + F_t \cdot (v_s \pm v_m) \quad (5)$$

sendo:

v_{fn} = velocidade normal [m/s]

v_{fa} = velocidade axial [m/s]

v_s = velocidade do rebolo [m/s]

v_w = velocidade da peça [m/s]

F_t = Força tangencial [N]

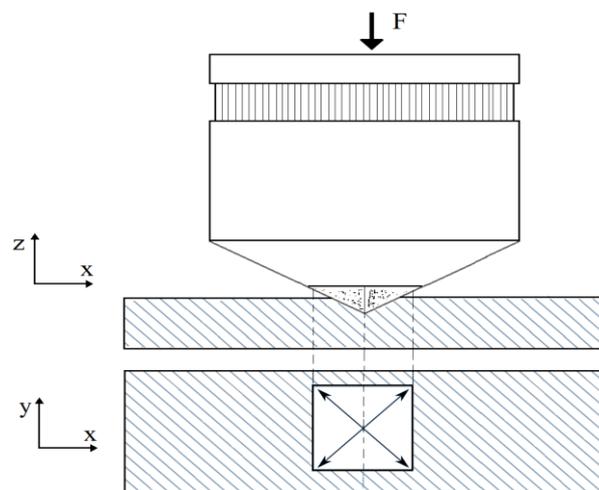
F_n = Força normal [N]

F_a = Força axial [N]

2.4.3 Dureza Vickers

A dureza é uma propriedade mecânica de um material que indica sua resistência permanente à deformação plástica causada por uma indentação. Sua magnitude é obtida por meio de ensaios realizados através da penetração de um indentador de diamante com forma e carga específicas (ZHOU et al., 2019). Na Figura 9 é ilustrado o método de obtenção de dureza Vickers.

Figura 9- Esquema de indentador de diamante Vickers



Fonte: Adaptado de (BLACK; KOHSER, 2011)

Devido à possibilidade de alteração de formas e cargas, a dureza é uma grandeza que pode ser aferida por diversos métodos, e não é uma característica fundamental da matéria. É possível elencar na literatura ao menos cinco métodos distintos de obtenção de dureza que são: dureza Brinell, dureza Rockwell, dureza Vickers, dureza Knoop e dureza Shore (TANAKA; KAMIYA, 2006). Conforme ilustra a Figura 9, no método de obtenção de dureza Vickers utiliza-se um microindentador penetrante de diamante, em forma piramidal de base quadrada,

com ângulo de 136° entre faces, cuja aplicação de carga de compressão varia de 1 a 120 kgf (\vec{F} na Figura 9**Erro! Fonte de referência não encontrada.**). A escala atribuída a este método é a *Hardness* Vickers (HV), e representa indiretamente a unidade de quilograma força por milímetro quadrado (BLACK; KOHSER, 2011).

2.4.4 Metalografia

A metalografia, ou análise metalográfica, é um mais um procedimento de caracterização do material de uma determinada peça ou produto. Diferentemente das técnicas quantitativas que envolvem a verificação de rugosidade, dureza, controle dimensional e geométrico, a metalografia preocupa-se com a qualidade do material da peça, principalmente pela sua composição e propriedades físicas de microestrutura do material. A metalografia é realizada por meio de um ensaio metalográfico que seguem alguns parâmetros metodológicos para sua realização, dentre eles a escolha e preparação de amostras. Neste ensaio, procura-se obter as características e propriedades físicas do material sob a ótica macrográfica e micrográfica, (SOULAMI et al., 2009).

Na análise macrográfica, tem-se como procedimento padrão o exame a olho nu ou com pequena ampliação (até 50 vezes), devendo a superfície da peça estar devidamente polida e com ataque de agente químico, geralmente Alder (3 g cloreto de cobre II amoniacal, 25 ml água destilada, 15g cloreto de ferro III, 50 ml ácido clorídrico concentrado), Oberhoffer (0,5 g cloreto de estanho II, 1 g cloreto de cobre II, 30 g cloreto de ferro III, 42 ml ácido clorídrico concentrado, 500 ml água destilada, 500 ml álcool etílico) ou Nital 2% que é uma solução de 2 ml de ácido nítrico (HNO_3) em 98 ml de etanol que é mais utilizado na micrografia. Este último é um reagente químico capaz de revelar os contornos de grãos em aços carbono, de forma a exibir com clareza a diferença entre a perlita e a ferrita e cementita. Adicionalmente ele evidencia os contornos de ferrita, diferenciando-os de martensita. Esse resultado é investigado, posteriormente, de forma representativa durante a análise micrográfica (VANDER VOORT, 2004).

Na análise micrográfica, utiliza-se o auxílio de um microscópio com capacidade de observação das fases presentes na amostra, identificando os contornos de grãos, suas orientações e tamanhos, podendo-se determinar com precisão as alterações de fases do material, analisando quais interferências e alterações microestruturais foram causadas pelo processo de retificação (FUKUGAUCHI, 2010).

Para análise metalográfica com amostras pequenas e com a necessidade de se melhorar o manuseio das amostras, realiza-se o processo de embutimento das amostras em uma resina ou outro material, geralmente em formato cilíndrico, de forma que a amostra e a resina tornem-se um corpo único. O embutimento pode ser realizado de duas maneiras, a frio ou a quente. No embutimento a frio utiliza-se resinas sintética poliméricas de secagem rápida e catalisáveis. Neste processo utiliza-se um molde, geralmente plástico para contenção da resina e da amostra. Como a reação catalisadora é exotérmica, a amostra pode ser submetida a altas temperaturas nesta cura, chegando a valores da ordem de 120° C por um período de até 14 horas. No caso do embutimento a quente, a amostra é prensada em um material termoplástico aquecido até que haja o embutimento e o endurecimento deste material. A desvantagem deste método é a exposição da face da amostra com a prensa, que pode gerar danos e alterações no teste, se realizados de forma incorreta, (MAMANI, 2013) e (BOEKEL, 2013).

Os processos de lixamento e polimento do embutido também representam uma fonte de erros à análise metalográfica, toda e qualquer geração de calor excessiva ao processo deve ser criteriosamente controlada de forma que a amostra não venha a ter alteração microestrutural em sua preparação, (BOEKEL, 2013).

2.5 Vibrações no processo de retificação

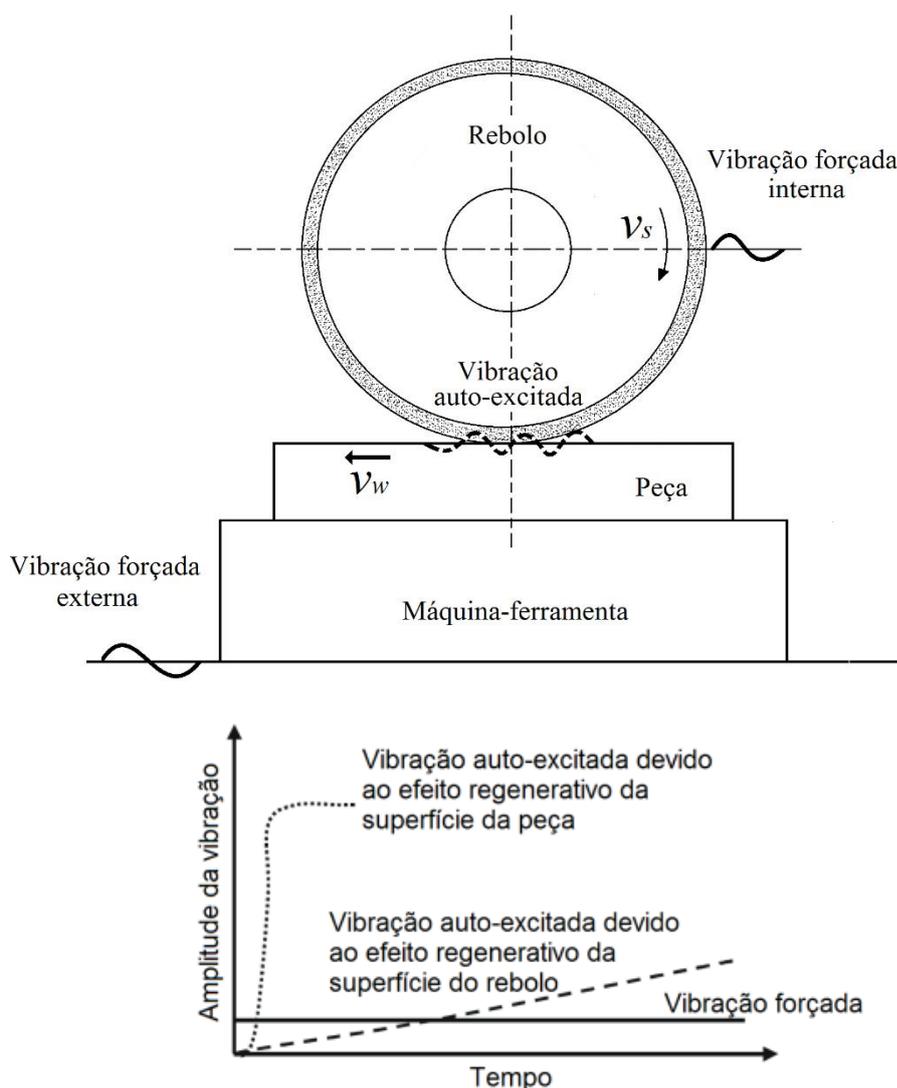
A vibração é definida como a inversão periódica do sentido de movimento de um corpo ou a oscilação do seu centro de massa. Assim, o estudo da vibração diz respeito aos movimentos oscilatórios de corpos, bem como as forças que são associadas a esses movimentos. Nesse contexto, como é denotado que qualquer movimento periódico é composto por uma série de movimentos harmônicos simples, cada um deles pode ser descrito por uma função senoidal. Dessa forma, são realizados estudos para diagnosticar vibrações em máquinas e equipamentos, almejando caracterizar as formas de vibração e suas causas (BRAND; MATHIAS, 2010; VIEIRA, 2011).

As vibrações afetam significativamente o processo de retificação, pois deterioram as condições do rebolo, diminuindo seu desempenho e afetando diretamente o acabamento superficial. No processo de retificação estão envolvidos basicamente dois tipos de vibrações que são dadas pelas forças associadas diretamente ao processo (vibrações forçadas) e as vibrações autoexcitadas, conforme ilustrado na Figura 10. Geralmente, a principal causa destas

vibrações está associada a problemas de desbalanceamento e excentricidade do rebolo (INASAKI; KARPUSCHEWSKI; LEE, 2001). Além disso, a própria operação de retificação pode causar vibrações no processo, e esse fenômeno específico é chamado de *chatter* regenerativo. Esse tipo de *chatter* é uma das principais causas de vibração, gerado por uma excitação do sistema na frequência natural do rebolo e da peça, (INASAKI; KARPUSCHEWSKI; LEE, 2001; MAGGIONI; MARZORATI, 2013).

A vibração forçada geralmente ocorre devido a excentricidade e ao desbalanceamento do rebolo. No entanto, não faz parte do escopo do presente trabalho o estudo desse tipo de vibração. Dessa forma, os esforços são concentrados na compreensão da vibração auto-excitada, ou seja, do fenômeno de *chatter*, o qual será descrito a seguir.

Figura 10- Vibrações no processo de retificação



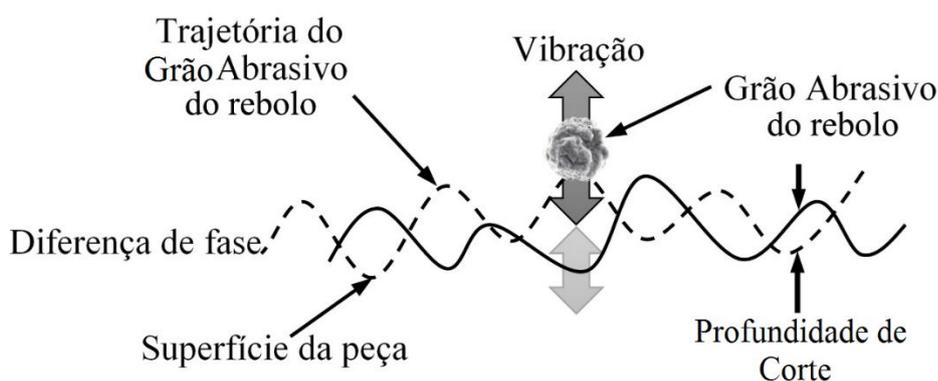
Fonte: Adaptado de (INASAKI; KARPUSCHEWSKI; LEE, 2001; CHEN et al., 2018)

2.5.1 Fenômeno de *chatter*

As vibrações autoexcitadas estão relacionadas com a vibração natural do sistema máquina-ferramenta e sua amplitude aumenta ao longo do tempo. Arnold, citado por Stone (2014), publicou na década de 50 a primeira referência sobre o fenômeno de *chatter*. Desde então, esse fenômeno característico dos processos de usinagem tem sido intensivamente alvo de diversas pesquisas. De acordo com Sun et al., (2018), a vibração auto-excitada, no inglês “*chatter*”, tem sido identificada e estudada por muitos pesquisadores ao longo dos anos. A modelagem matemática do fenômeno foi inicialmente realizada por (SNOEYS; BROWN, 1969). Neste estudo, os autores mostraram que o fenômeno está relacionado com a rigidez do rebolo e, por essa razão, as técnicas de minimização do fenômeno de *chatter* utilizam-se do aumento da rigidez do rebolo, bem como da variação da velocidade de corte deste. A ocorrência de *chatter* no processo de retificação é um dos problemas mais críticos deste processo, pois sua ocorrência implicará em perdas das características geométricas da peça e a consequente perda desta (STONE, 2014).

Na Figura 11 é representada a interface do contato peça e rebolo. A cinemática do processo promove variação da espessura equivalente do cavaco, modificando constantemente a força de retificação em intensidade, direção e sentido (ENRWISTLE; STONE, 2013).

Figura 11- Representação esquemática do fenômeno de *chatter* na retificação.



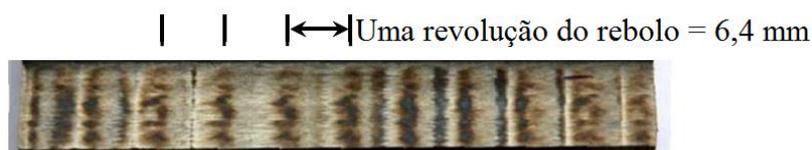
Fonte: Adaptado de (STONE, 2014)

Uma das consequências da vibração autoexcitada são as marcas periódicas de ondulação que podem ser visíveis a olho nu. Esses desvios são caracterizados por superfícies multifacetadas e opacas na peça, os quais foram destacadas por (SIDDHPURA; PAUROBALLY, 2012). Durante a remoção de material ocorrem variações da penetração de trabalho e da profundidade de corte efetiva das partículas abrasivas em função da cinemática,

assim como das ondulações criadas na superfície da peça oriundas da amplitude da vibração relativa rebolo-peça, de modo que a diferença de fase entre essas ondulações macrogeométricas torna o processo instável (YAN; XU; WIERCIGROCH, 2017). Em consequência deste efeito regenerativo do par tribológico, considerado como principal causa do *chatter* e mencionada por (CHIOU; CHUNG; LIANG, 1995), as amplitudes das ondulações geradas na superfície da peça aumentam rapidamente, diferentemente do observado no rebolo, uma vez que em função da sua maior resistência ao desgaste, as ondulações geradas em sua superfície aumentam lentamente. Destaca-se que essas ondulações estão diretamente ligadas à vida do rebolo, sua agressividade e capacidade de autoafiação, como foi reportado nos trabalhos de (OTTO; RADONS, 2015; LACERDA; LIMA, 2004).

Conforme apresentado na Figura 12, no estudo experimental de Badger, Murphy, e Odonnell (2011), ensaios de retificação em corpos de prova de aço foram realizados com um rebolo com alta excentricidade. Assim, a Figura 12 apresenta as fotos obtidas da superfície dos corpos de prova após a usinagem. As ondulações produzidas pelo fenômeno de *chatter* podem ser observadas na Figura 12, as quais ocorreram a cada revolução do rebolo (6,4 mm). Observa-se, por exemplo, a ocorrência de queima superficial, evidenciada pelas ondulações em tonalidade escura na superfície da peça. Adicionalmente, de acordo com os autores, os períodos sem contato entre peça e rebolo indicam a ocorrência de oxidação devido a excentricidade do rebolo.

Figura 12- Ondulações geradas por *chatter* na superfície de uma peça que sofreu queima e oxidação



Fonte: (BADGER; MURPHY; ODONNELL, 2011)

O *chatter* também está associado à variação na taxa de empastamento (entupimento ou carregamento) do rebolo, a qual provoca alterações nas forças de retificação (SWEENEY; LAMB; LIMB, 1970). Algumas abordagens foram aplicadas para reduzir as vibrações autoexcitadas e melhorar o desempenho dinâmico do sistema mecânico. O aumento da rigidez e amortecimento do sistema, por exemplo, minimizam o *chatter*, conforme relatado por (SEXTON; HOWES; STONE, 1982), (MCFARLAND; E. BAILEY; D. HOWES, 1999) e (WARNECKE; BARTH, 1999). Rebolos suberabrasivos comerciais têm sido desenvolvidos

com uma camada de ligação com propriedades de amortecimento mecânico entre o núcleo da ferramenta (metálico ou de material compósito) e a região externa abrasiva (BZYMEK et al., 1994). Idealmente, a frequência natural dos rebolos deve ser $> 1000\text{Hz}$ (MARINESCU et al., 2006). O uso de materiais compósitos como o granito polimérico ou granito sintético melhoram consideravelmente o amortecimento das vibrações, sendo um dos materiais empregados em substituição ao ferro fundido nas máquinas-ferramentas de precisão e ultraprecisão atuais (TYROLIT, 2001).

2.6 Monitoramento do processo de retificação

É extremamente difícil modelar o processo de retificação a fim de prever sua qualidade na saída, uma vez que os processos abrasivos são complexos, de natureza não estacionária e possuem um grande número de parâmetros. Um artigo de revisão intitulado “*Modelling and Simulation of Grinding Processes*” publicado por Tönshoff et al., (1992), apresentou diferentes modelos de topografia do rebolo, força e energia do processo, temperatura, integridade superficial e rugosidade. A maioria desses modelos geravam relações empíricas entre os parâmetros de entrada, tais como a profundidade de corte, velocidade de corte, espessura de corte equivalente, força de corte, etc., com algum coeficiente que deve ser identificado experimentalmente. Por outro lado, uma compreensão dos fenômenos da retificação é necessária não apenas para definir os parâmetros de corte para maximizar a produção, mas também para garantir a segurança do operador. Uma maneira fácil de identificar esses fenômenos é monitorando as operações de retificação, por meio da medição das forças de corte, temperatura e vibração, ao invés de modelar tais variáveis.

A literatura reporta um longo histórico de pesquisas e publicações nos últimos 30 anos sobre o monitoramento do processo de retificação. A consolidação dessa tarefa foi inicialmente discutida entre especialistas do comitê técnico-científico (STC – *scientific and technical committee*) em “processos abrasivos” da Academia Internacional de Engenharia de Produção (CIRP – *International Academy for Production Engineering*). Dentre os tópicos discutidos, destacam-se: a condição da ferramenta, a condição do processo, a condição da máquina-ferramenta, a integridade superficial e a detecção de *chatter*. Nesse contexto, conceitos, pontos de vista, bem como, elementos indispensáveis para o monitoramento do processo de retificação, foram concebidos inicialmente por: Professor E. Brinksmeier, Universidade de Bremen;

Professor I. Inasaki, Universidade de Keio; Professor H. K. Tönshoff, Universidade de Hannover; Professor J. Webster, Universidade de Connecticut; Professor D. Dornfeld, Universidade da Califórnia; Professor J. F. Gomes de Oliveira, Universidade de São Paulo, e Professor R. Teti, Universidade de Nápoles, (INASAKI, 1991; TETI, 1995; WEBSTER; DONG; LINDSAY, 1996; BRINKSMEIER et al., 1998; OLIVEIRA; DORNFELD, 2001; TONSHOFF; FRIEMUTH; BECKER, 2002). Atualmente, pesquisas e estudos de casos coordenados pelo Professor P. R. Aguiar, Universidade Estadual Paulista, são desenvolvidos nesse escopo. Dessa forma, roteiros são elaborados para resolver deficiências em operações de retificação, bem como para fornecer tecnologias de monitoramento inovadoras baseadas em dispositivos inteligentes e de baixo custo. As atividades científicas contam com suporte de agências de fomento brasileiras (FAPESP e CNPq) e parceiros internacionais.

De acordo com Teti et al., (2010), as técnicas de medição para o monitoramento de operações de usinagem foram tradicionalmente classificadas em duas abordagens: diretas e indiretas. Na abordagem direta, a quantidade da variável é medida, por exemplo: o desgaste da ferramenta. Exemplos de medição direta, neste caso, são o uso de câmeras para inspeção visual, feixes de laser e resistência, microscópios, etc. Muitos dos métodos diretos só podem ser usados com auxílio de técnicas de laboratório. Isso se deve em grande parte às limitações práticas causadas por problemas de acesso durante a usinagem, iluminação e uso de fluido de corte. No entanto, a medição direta tem um alto grau de precisão e tem sido amplamente utilizada para pesquisas em laboratórios de apoio às investigações de fenômenos mensuráveis durante os processos de retificação. Por outro lado, nas abordagens de monitoramento indireto, quantidades auxiliares podem ser medidas, tal como os componentes da força de corte no processo. Na sequência, a quantidade real é deduzida por meio de correlações. Métodos indiretos são menos precisos do que os diretos, no entanto, são menos complexos e mais adequados para aplicações práticas. Em contraste com a detecção convencional, os processos de usinagem, incluindo operações de retificação, estão sendo monitorados continuamente via sensores, os quais são aptos a quantificar desempenho do processo ou fornecer informações para sua otimização. Os sensores e as técnicas que são comumente usadas para o monitoramento indireto são descritos a seguir.

2.6.1 Monitoramento indireto por sensores

Qualquer operação de manufatura pode ser considerada um processo de conversão de material, energia e informação. O processo deve ser monitorado cuidadosamente para produzir a qualidade requerida. Quando o processo é operado por humanos, o monitoramento é feito por meio de órgãos sensoriais, como visão, audição, olfato, tato e gosto. Às vezes, as informações são obtidas por meio da combinação de múltiplos órgãos sensoriais para uma tomada de decisão. Além disso, o cérebro como o centro sensorial desempenha um papel importante em processar a informação obtida por meio dos órgãos sensoriais. Por outro lado, para se obter monitoramento automático, os órgãos sensoriais devem ser substituídos por sensores, uma vez que alguns sensores podem detectar sinais que não podem ser detectados com os órgãos dos sentidos humanos (TONSHOFF; FRIEMUTH; BECKER, 2002).

O termo sensor vem do latim “*sentire*”, que significa "perceber" e é definido como: um dispositivo que detecta uma mudança em um estímulo físico e o transforma em um sinal que pode ser medido ou gravado. Em outras palavras, uma característica essencial da percepção sensorial é a conversão de um tipo de energia para outro. Na prática, portanto, a maioria dos sensores possuem elementos de sensoriamento auxiliar, bem como circuitos associados (TONSHOFF; FRIEMUTH; BECKER, 2002). Os sensores e sistemas de sensoriamento mais comuns utilizados para monitoramento de processos de usinagem são:

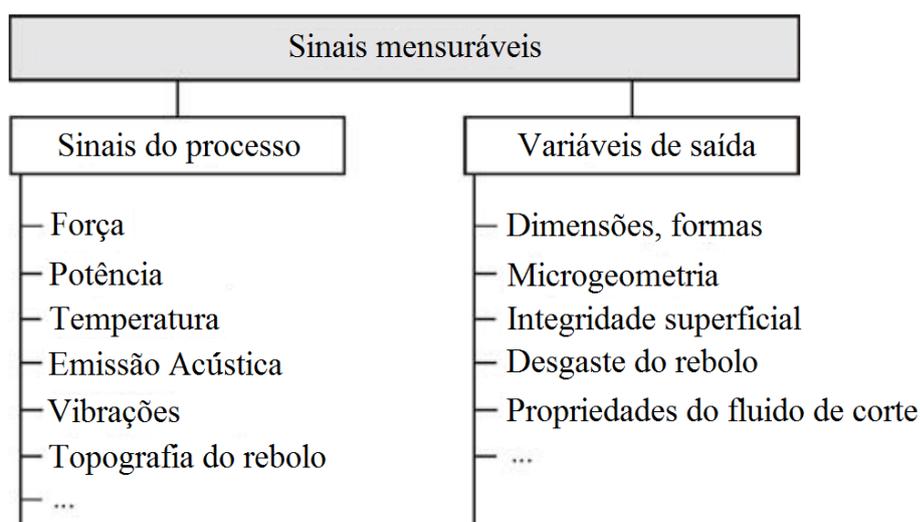
- Potência e corrente do motor
- Força e torque (sensor piezométrico, *strain gauge*)
- Emissão acústica (sensor piezométrico de alta frequência)
- Vibrações (aceleração, velocidade, deslocamento)
- Outros tipos de sensores (ópticos, temperatura, etc.)

Mais informações sobre sensores e sistemas de sensoriamento para monitoramento de processos de usinagem pode ser encontrado em (TETI et al., 2010; TETI, 2015). Em relação ao monitoramento do processo de retificação, os vários sinais dos sensores mencionados anteriormente são observados para inferir diferentes alvos, como ilustra a Figura 13.

Diferentes abordagens usando os sensores listados na Figura 13, bem como, seus diferentes alvos, foram reportadas na literatura (AGUIAR et al., 2006a; RIBEIRO et al., 2017b; OLIVEIRA JUNIOR et al., 2015, 2019a; RIBEIRO et al., 2015; MIRANDA et al., 2015; MOIA et al., 2015; LOPES et al., 2017; OLIVEIRA JUNIOR et al., 2018b, 2018a; KWAK; HA, 2004; COUEY et al., 2005). Além de otimizar o processo de retificação em relação ao tempo, custos

ou qualidade, o monitoramento indireto por sinais de sensores também é destinado a coletar informações do processo para fins de rastreabilidade e documentação. Essa medida se faz necessária nos casos em que os parâmetros de entrada e as condições do processo devem ser completamente arquivados em bases de dados, as quais irão servir como layout do processo, bem como para atender leis e normas de responsabilidade (TONSHOFF; FRIEMUTH; BECKER, 2002).

Figura 13- Sinais mensuráveis no processo de retificação e seus alvos

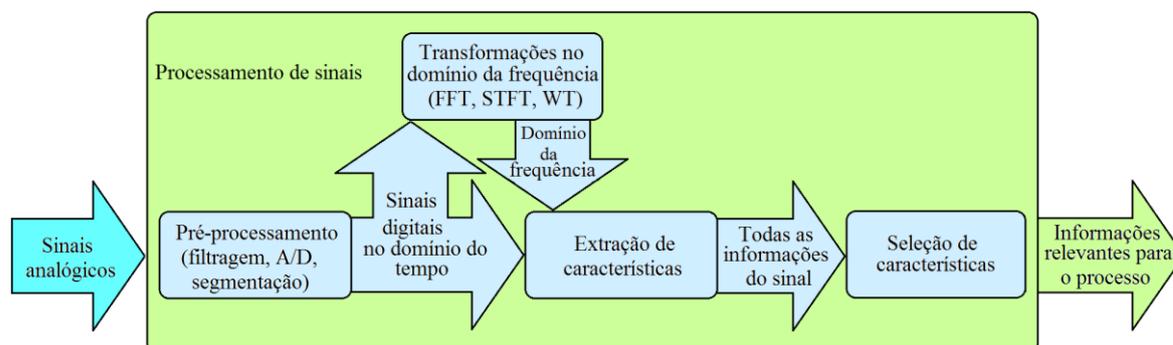


Fonte: Adaptado de (TONSHOFF; FRIEMUTH; BECKER, 2002)

2.6.2 Técnicas de processamento de sinais e tomada de decisão

Os sensores e sistemas de sensoriamento mencionados anteriormente, normalmente, emitem sinais analógicos, que necessitam de condicionamento e/ou pré-processamento, por exemplo: amplificação, filtragem, polarização, conversão analógica para digital, segmentação, etc. Na sequência, um sinal digital no domínio do tempo é obtido, o qual é submetido a algoritmos de processamento de sinais para extração de características, tais como valor médio quadrático (RMS), contagem de eventos, correlação e autocorrelação, variância, e curtose, a fim de reduzir a alta dimensionalidade dos dados sensoriais e obter uma caracterização sintética dos sinais para correlação com as condições do processo de retificação. A Figura 14 ilustra os procedimentos para a extração de características usando métodos de condicionamento e processamento de sinais (TETI et al., 2010).

Figura 14-Técnicas de processamento de sinais para extração de características



Fonte: Adaptado de (TETI et al., 2010)

De acordo com a Figura 14, o sinal no domínio de tempo também pode ser transformado em um sinal no domínio da frequência ou no domínio tempo-frequência, por meio de algoritmos como a transformada rápida de Fourier (FFT), a transformada de Fourier de tempo Curto (STFT), e a transformada wavelet (TW). Além disso, esses sinais também podem ser submetidos a procedimentos adicionais, como sistemas inteligentes de tomada de decisão. Dessa forma, informações importantes podem ser obtidas, permitindo a seleção das características mais relevante para o monitoramento das condições do processo (TETI, 2015).

As características relevantes para o escopo de monitoramento do processo de retificação, obtidas por meio da aplicação dos métodos detalhados anteriormente, podem ser combinadas em funcionalidade com algoritmos avançados que implementam sistemas cognitivos baseados em técnicas de inteligência artificial (IA). Os sistemas cognitivos podem mapear as informações alimentadas por vetores com as características relevantes sobre o processo de retificação para determinar classificações ou regressões exploráveis na saída do processo, inferindo diretamente na tomada de decisão, incluindo a adoção de ações corretivas. Os sistemas cognitivos mais recorrentemente utilizados na literatura para reconhecimento de padrões e tomada de decisão no monitoramento de retificação são (TETI, 2015):

- Redes neurais artificiais
- Sistemas especialistas
- Lógica Fuzzy
- Sistemas neuro-Fuzzy
- Algoritmos genéticos
- Sistemas híbridos

Ao medir uma variável específica de uma operação de retificação, uma única fonte sensorial para essa variável pode não ser capaz de atender a todas as especificações de desempenho

necessárias. Uma solução para este problema é a tecnologia de fusão de sensores, cuja finalidade é combinar dados sensoriais de fontes diferentes, de forma que as informações resultantes sejam melhores do que seria possível se essas fontes fossem usadas individualmente (TETI, 2015). Por outro lado, pode-se citar alguns dos trabalhos de monitoramento do processo de retificação desenvolvidos pelo Laboratório de Aquisição de Dados e Processamento de Sinais, Universidade Estadual Paulista, como aqueles com aplicações em:

- Monitoramento de danos térmicos superficiais em peças de aço ABNT 1045
- Monitoramento do desgaste de rebolos de óxido de alumínio e determinação do tempo de dressagem
- Monitoramento da condição da ferramenta de dressagem
- Monitoramento da integridade superficial de componentes cerâmicos
- Monitoramento do fenômeno *chatter*

2.7 Razão de potência (ROP)

A razão de potência, do inglês *ratio of power* (ROP), é uma técnica de processamento de sinais usada para analisar uma determinada faixa de frequência em relação a todo o conteúdo espectral do sinal. Assim, para cada bloco de dados a ROP é definida na Equação (6) por Martins et al. (2013) e Wang et al. (2001).

$$ROP = \frac{\sum_{k=n_1}^{n_2} |X_k|}{\sum_{k=0}^{N-1} X_k} \quad (6)$$

sendo N o comprimento do segmento de dados do sinal amostrado durante a usinagem, n_1 e n_2 definem a faixa de frequências a ser analisada, e X_k representa a k -ésima saída da Transformada de Fourier. De acordo com a Equação (6), para obter a ROP para o sinal no domínio do tempo discreto $x[n]$, o mesmo é seccionado em várias janelas de curta duração e, então, para cada seguimento um espectro de frequência é calculado utilizando a FFT. Assim, para cada espectro, um valor de ROP é obtido em um determinado instante de tempo. Entretanto, a resolução no tempo obtida, por meio da aplicação dessa técnica de processamento de sinais, pode não ser

suficiente para permitir a localização dos transitórios que ocorrem ao longo do sinal $x[n]$. Nesse sentido, a ROP calculada com base nos coeficientes da STFT surge como alternativa para ampliar a faixa de resoluções no domínio do tempo. Deste modo, as limitações de resolução tempo-frequência da ROP são definidas pelas limitações de resolução tempo-frequência da STFT.

A métrica ROP tem sido aplicada para caracterizar sinais de emissão acústica (EA) e de vibração advindos do processo de retificação, (AGUIAR et al., 2006b). No trabalho de Martins et al., (2014) a ROP foi uma das métrica utilizadas para entrada dos modelos neurais propostos para caracterizar a condição de desgaste de um dressador a partir de sinais de emissão acústica. Os autores desenvolveram um estudo do conteúdo harmônico dos sinais de EA e selecionam bandas de frequência que possuem maior relação com as condições de desgaste do dressador. Posteriormente, eles aplicaram as estatísticas em cada banda selecionada e utilizam seus resultados nos modelos neurais e concluíram que, a combinação de diversas bandas de frequência caracterizou o nível de desgaste do dressador de forma significativamente melhor.

No trabalho de Miranda et al., (2015), os resultados das estatísticas de ROP e valor médio quadrático (RMS) foram utilizados como entradas em modelos *fuzzy* para prever o nível de desgaste do dressador de ponta única. Os autores realizaram diversos testes experimentais usando um dressador de diamante sintético em uma máquina de retificação equipada com rebolo de óxido de alumínio. Posteriormente, os sinais de EA e vibração foram coletados, sendo que os autores constituíram um estudo profundo sobre o espectro em frequência desses sinais, selecionando as bandas de frequência que melhor se correlacionam com o desgaste do diamante. Em seguida, a partir da banda selecionada a estatística ROP foi aplicada nos sinais. Desta forma, os autores concluíram que os modelos *fuzzy* usando como entradas ROP e RMS foram efetivos para prever o nível de desgaste do dressador, considerando as faixas de vibração (0-13 kHz) e emissão acústica entre (210-260 kHz).

No trabalho de Alexandre et al., (2018), a estatística ROP foi aplicada em sinais EA advindos de ensaios experimentais de dressagem, com dressador de ponta única, e um rebolo de óxido de alumínio. Os autores estudaram o conteúdo harmônico dos sinais de EA e selecionam uma faixa de frequência de 25 a 40kHz que melhor descreveu as condições da superfície de corte do rebolo. Os resultados da ROP são utilizados como entrada de modelos *fuzzy* para avaliar a uniformidade da superfície de corte do rebolo e sua condição de dressagem. Os autores concluem que o modelo *fuzzy* foi eficaz no diagnóstico das condições da superfície do rebolo.

No que diz respeito à aplicação da estatística ROP para o monitoramento do fenômeno de *chatter* na retificação tangencial plana, com exceção do trabalho de Alexandre et al., (2018), nenhuma outra menção ao tema foi relatada na literatura, tornado este tema inovador e com possibilidade de depósito de patente, pois neste trabalho a ROP é utilizada em conjunto com a STFT para se detectar danos em peças de aço ABNT 1045 na ocorrência do fenômeno de *chatter*.

2.8 Transformada de Fourier de curta duração (STFT)

A transformada de Fourier de curta duração do inglês *short time Fourier transform*, (STFT) é um dos métodos mais antigos e mais básicos utilizados para análise de tempo-frequência. A otimização do comprimento da janela é crucial para o STFT, pois determina as resoluções em tempo e frequência. À medida que o comprimento da janela diminui, a resolução do tempo aumenta e a resolução de frequência diminui. A resolução de frequência pode ser mantida por preenchimento de zeros como exposto por (SHARMA et al., 2013).

A STFT é um algoritmo bem estabelecido que foi introduzido para superar a restrição de tempo da transformada rápida de Fourier segundo (SUBHASHREE; PREETHI; SUPRIYA, 2016). Essa técnica oferece uma compreensão entre as resoluções espectrais e temporais. Enquanto a transformada rápida de Fourier (do inglês *fast Fourier transform* – FFT) é adequada para o estudo de sinais estacionários, os quais não variam ao longo do tempo, como funções senoidais, a STFT é adequada para sinais não estacionários. Neste caso, os parâmetros como amplitude, frequência e fase podem variar ao longo do tempo, como ilustrado por (GARRIDO, 2016). Na Equação (7) é mostrada a STFT citada nos trabalhos de Kim et al. (2007) e Kim; Melhem (2003) e Shimauchi et al. (2017).

$$STFT(t, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} h(u) f(t+u) e^{-j\omega u} du \quad (7)$$

onde t é o tempo, ω é a frequência angular, $f(t)$ é um sinal no domínio do tempo, e $h(u)$ é uma função janela no tempo como retangular, *Gaussiana*, *Blackman*, *Hanning*, *Hamming*, *Kaiser*, dentre outras. A STFT pode ser calculada usando o algoritmo “*spectrogram*” (JIANMING et al., 2016), o qual é fornecido por meio do software Matlab®.

2.9 Monitoramento do fenômeno de *chatter*

A ocorrência do fenômeno de *chatter* pode ser diagnosticada em algumas condições por um operador da máquina retificadora treinado e experiente, entretanto, consiste em uma tarefa desafiadora quando se trata do reconhecimento automático desse fenômeno, conforme demonstrado por (GRADIŠEK et al., 2003). Segundo Sun et al., (2018), o monitoramento da ocorrência do *chatter* no processo de retificação deve ser realizado na observação das forças envolvidas no processo, vibração da peça, ondulações e problemas de circularidade do rebolo, aliado a rugosidade da peça. A ocorrência do fenômeno de *chatter* pode ser estudada em duas formas distintas: (1) analisando a contribuição das características dinâmicas da máquina retificadora; e (2) analisando a dureza do material abrasivo e seu contato com a peça (YAN; XU; WIERCIGROCH, 2017).

Gradišek et al., (2003), comparam o desempenho de dois indicadores diferentes de vibração: o indicador de taxa de informação de granulação grosseira (CIR), calculado a partir de flutuações da força normal (F_n) na retificação, e o indicador de entropia, calculado a partir de um espectro de potência. Na conclusão do estudo, os autores mostraram que o desempenho dos indicadores propostos era comparável e ambos foram adequados para detecção de *chatter*. Em contraste, o cálculo dos sinais RMS de emissão acústica indicaram apenas os casos de ocorrência de *chatter* severo, ao passo que os indicadores CIR e de entropia detectaram o *chatter* já em seu estágio inicial na operação de retificação, mesmo antes de a peça ter sido danificada.

Uma abordagem similar foi proposta por Gonzalez-Brambila et al., (2006) onde os autores apresentaram uma técnica para detecção de *chatter* por meio de medição *online* de ondulações no processo. Nesse caso, a ondulação foi medida com um perfilador mecânico com ponta de diamante, onde o sinal de saída é posteriormente convertido para a forma digital e transformado para o domínio tempo-frequência por meio da transformada wavelet, permitindo que seus coeficientes cresçam em função de defeitos superficiais e destacando marcas de trepidação. O método foi validado por meio de ensaios experimentais com peças de produção reais. Os autores afirmam que o método proposto pode ser facilmente integrado ao processo de manufatura para promover o controle de qualidade. Essa abordagem, no entanto, não monitora a intensidade de *chatter*, mas apenas a presença real do fenômeno.

Uma outra abordagem que também usou a transformada wavelet foi proposta por Yao et al., (2010). Diferente do trabalho anterior, neste caso, a identificação do *chatter* foi baseada em dados de acelerômetros e, em seguida, um modelo baseado em quantidades de processo foi considerado. Assim, os autores apresentaram um sistema inteligente para detecção de *chatter* baseado na análise de sinais por meio da decomposição wavelet, bem como por meio da identificação da condição de *chatter* usando máquina de vetores de suporte (SVM). Dos resultados obtidos, verificou-se, por meio de fases de treinamento e teste, que o sistema proposto apresentou uma taxa de precisão de 95% para o reconhecimento da condição do *chatter*.

O trabalho de Alexandre et al., (2017), propôs o monitoramento do fenômeno de *chatter* usando a estatista ROP, para extrair informações relevantes do conteúdo espectral de sinais de vibração no decorrer da retificação do aço SAE 1045 com rebolo de óxido de alumínio. Os autores executaram testes experimentais de retificação, coletaram e processaram os sinais de vibração para a faixa de frequência de 1,2 a 1,5 kHz para duas regiões de uma determinada peça: (1) com ocorrência visual de *chatter* e (2) sem ocorrência de *chatter*. Os autores concluíram que as amplitudes das frequências próximas de 30Hz (frequência de rotação do rebolo) mudavam quando o fenômeno de *chatter* ocorria. Os autores destacaram ainda que, faixas de frequências, como, por exemplo, a faixa de 1,2 a 1,5kHz, que possuíam frequências múltiplas da frequência de rotação do rebolo, também eram sensíveis à ocorrência desse fenômeno. Assim, a ROP aplicada na banda de frequência previamente selecionada permitiu classificar as áreas na superfície da peça com e sem a ocorrência de *chatter*. Os autores afirmaram que não há nenhuma menção na literatura sobre a utilização dessa estatística para extrair informações desse fenômeno.

Diferente do trabalho de Alexandre et al., (2017), que utilizou ferramentas somente no domínio da frequência para a extração de características do *chatter*, o presente trabalho utiliza-se de análises tanto no tempo quanto na frequência para obter informações do referido fenômeno. Mais detalhes sobre ferramentas usadas na presente pesquisa são apresentados a seguir.

2.9.1 Detecção do fenômeno de *chatter*

O principal propósito do estudo da detecção de *chatter* é desenvolver sistemas de monitoramento capazes de detectar com eficiência o início do fenômeno durante a retificação.

Dessa forma, quando vibrações anormais tal como o *chatter* são detectadas, contramedidas adequadas podem ser aplicadas para suprimi-las. No entanto, segundo Kuljanić; Totis; Sortino (2008), a aplicação de métodos para detecção de *chatter* em condições industriais implica no atendimento dos seguintes requisitos:

- Nenhuma influência nos parâmetros modais do sistema de usinagem, e em particular nenhuma redução significativa da rigidez do sistema;
- Nenhuma restrição na seleção de parâmetros de corte ou qualquer outra condição de usinagem (dimensões da ferramenta, dimensões da peça de trabalho, geometria da ferramenta e outros);
- Compatível para troca de ferramentas;
- Funcionamento independente do conhecimento das condições reais de corte e do conhecimento prévio da dinâmica do sistema de usinagem;
- Insensibilidade ao ruído ambiental.

Nos últimos anos, muitos pesquisadores investigaram a aplicação de sensores para detecção de *chatter* em operações de usinagem. Os sensores mais aplicados são dinamômetro de placa, microfones, sensores de deslocamento e aceleração. Nesse contexto, Inasaki et al., (2001), ilustrou as diferentes ferramentas de medição que podem ser usadas para detectar o fenômeno da *chatter*. Uma distinção entre diferentes sensores é feita da seguinte forma:

- Sensores para grandezas de processo: força e aceleração estão entre os mais apropriados para detecção de *chatter* por meio de análise em frequência usando FFT.
- Sensores para o rebolo: durante o processo, é possível monitorar a condição do rebolo com um sensor de triangulação a laser. Além disso, a macrogeometria do rebolo desempenha um papel importante na ocorrência de *chatter*.
- Sensores para a peça: para monitorar a geração de vibração, muitas abordagens para medir diretamente a ondulação do rebolo durante a retificação são estudadas. Devido à complexidade, algumas abordagens introduzem métodos inovadores de medição por contato, enquanto outros estudos propõem abordagens de medição óptica.

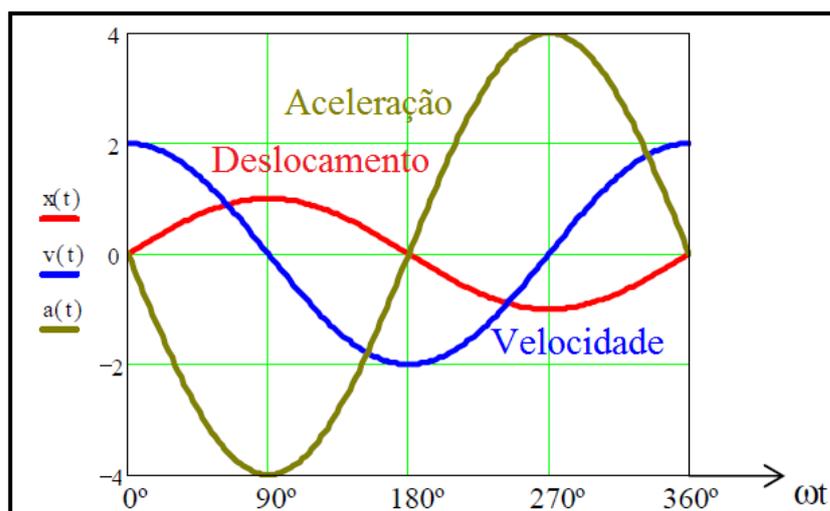
De acordo com Kuljanić; Totis; Sortino (2008), em relação aos métodos de processamento e classificação de sinais, os métodos de análise no domínio da frequência baseados em FFT e WT são os mais comuns para detecção de *chatter*. Tais métodos são baseados na análise da distribuição de energia no espectro do sinal. É importante mencionar que na identificação de *chatter*, tanto a largura de banda de frequência do sensor, bem como a sua localização são cruciais. Especificamente, a largura de banda de frequência do sensor deve ser suficiente para

detectar a faixa de frequência de *chatter*. A regra geral para a localização do sensor é que quanto mais próximo da fonte de vibração, mais confiável será suas medições.

2.9.2 Medição de vibração

Sinais de vibração fornecem informações sobre o tipo de vibração que o sistema a ser monitorado está sofrendo e, por meio de sua análise, uma falha emergente ou em desenvolvimento pode ser detectada. No caso do presente trabalho, o alvo é a detecção do fenômeno de *chatter*, conforme mencionado anteriormente. Nesse contexto, a vibração pode ser descrita principalmente pelas seguintes grandezas: deslocamento, velocidade e aceleração. Essas três variáveis se correlacionam matematicamente, ou seja, não importa qual variável foi escolhida para descrever o comportamento vibracional, a diferença é uma questão de escala e mudança no tempo (fase). Na Figura 15 é ilustrado a relação entre velocidade, deslocamento e aceleração. De acordo com a Figura 15, o intervalo de frequência de interesse é um dos fatores que determinam o tipo de valor medido. Assim, a velocidade é usada para medições comuns na faixa de frequência de 10 Hz a 1000 Hz, a aceleração é preferida para frequências mais altas do que essa faixa e o deslocamento é preferido para frequências mais baixas (BILISOVÁ; BILOS, 2012).

Figura 15- Relação entre velocidade, deslocamento e aceleração

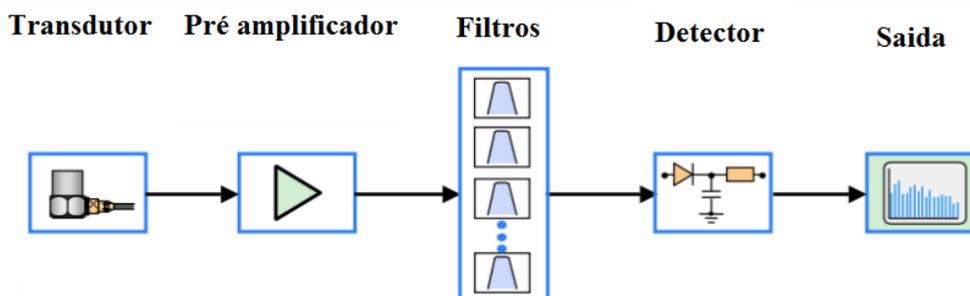


Fonte: (BILISOVÁ; BILOS, 2012).

No presente trabalho a atenção é dada para os acelerômetros. Além do custo mais baixo em relação aos dinamômetros e sensores de emissão acústica, de acordo com Badger, Murphy,

Odonnell, (2011) um acelerômetro, aliado a técnicas de processamento de sinais, é uma ferramenta satisfatória para determinar o fenômeno de *chatter*. Com relação a medição de vibração, o esquema básico para esse propósito é ilustrado na Figura 16.

Figura 16- Cadeia de medição da vibração



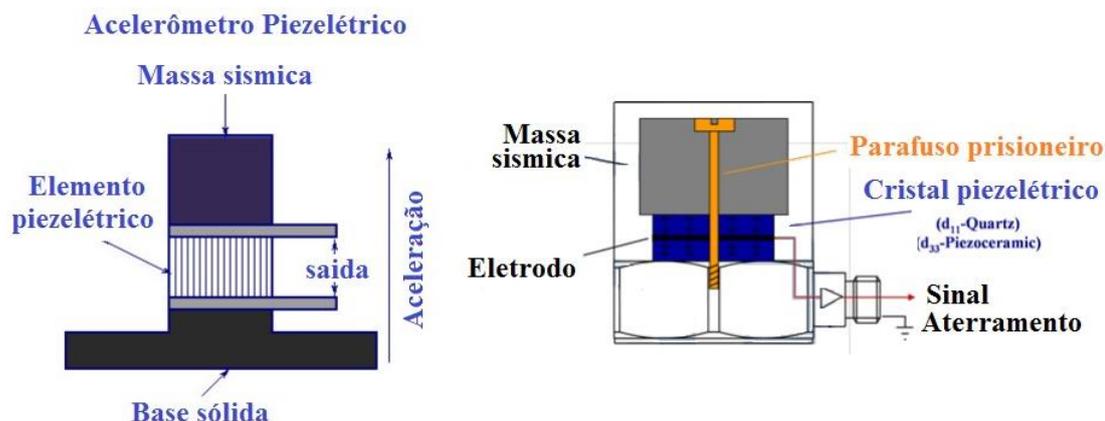
Fonte: (KJÆR, 1998)

Dessa forma, de acordo com a Figura 16, o sinal analógico do transdutor de vibração passa por etapas de pré amplificação, filtragem anti-aliasing e detecção. Esse processo envolve a conversão A/D (analógica-digital), onde o sinal é amostrado e digitalizado. Na saída, o sinal pode ser exibido como uma forma de onda de tempo ou pode ser processado pela FFT para se obter o espectro de frequência do mesmo. Posteriormente, os métodos de extração de características para detecção do fenômeno de *chatter*, descritos nas seções anteriores, podem ser empregados (BILISOVÁ; BILOS, 2012).

2.9.3 Acelerômetros

Acelerômetros são usados como transdutores básicos para medição de vibração, especialmente para medição em partes estacionárias do equipamento (máquinas rotativas), já que esses transdutores possuem desvantagens mínimas em comparação com outros tipos (transdutores de velocidade e deslocamento). De acordo com a Figura 17, o princípio da operação do acelerômetro é baseado na deformação de uma placa de material piezelétrico que resulta em uma carga elétrica, cuja magnitude é diretamente proporcional à deformação. Uma massa sísmica é fixada sobre o material piezelétrico cerâmico (ou quartzo) sintetizado que, por sua vez, é fixado na base do sensor. A sua resposta é proporcional à aceleração e, portanto, devido a sua grande faixa de frequência podem ser empregados para medir vibração senoidal, randômica ou transitória (BILISOVÁ; BILOS, 2012).

Figura 17- Acelerômetro piezolétrico



Fonte: (MTS-SYSTEMS-CORPORATION)

Uma parte integrante do acelerômetro é a sua curva de calibração, a partir da qual a sensibilidade do transdutor e a faixa de frequência de sua aplicabilidade podem ser lidas. Assim, se a estrutura monitorada vibrar em uma frequência abaixo do limite de frequência mais baixa do acelerômetro usado, a massa se move junto com a carcaça do transdutor e nenhuma carga elétrica é gerada. Este limite de frequência mais baixa do transdutor é dado pela rigidez do suporte elástico, pelo amortecimento do material e pelo peso da massa sísmica. Na curva de calibração, este limite é indicado pela diminuição da sensibilidade nominal em 3 dB. Geralmente, quanto maior o sensor, melhor é a sua sensibilidade para medir frequências mais baixas. Por outro lado, o limite da frequência mais alta do acelerômetro em geral é um terço da sua frequência de ressonância. Na curva de calibração, é indicado pelo aumento da sensibilidade nominal em 3 dB. Quanto maior o peso da massa sísmica, maior a sensibilidade e menor a frequência de ressonância (BILISOVÁ; BILOS, 2012).

O projeto do acelerômetro permite flexibilidade em relação a sua fixação na máquina a ser monitorada. No entanto, é importante que o elemento piezolétrico do transdutor não seja exposto a qualquer outra forma de movimento que não seja vibrações, ou seja, deve se evitar choques, impactos, etc. A superfície onde o transdutor será fixado deve ser plana e lisa para evitar deformações da base de fixação. Além disso, mudanças de temperatura e torque excessivo no parafuso de fixação podem causar deformação na base e, portanto, um sinal com diagnóstico de vibração falso. Um aspecto importante a ser considerado é que o transdutor deve ser fixado o mais próximo possível da fonte de vibração a ser monitorada, de forma que se monitore apenas a região de interesse. As diversas formas e recomendações para fixação dos acelerômetros são detalhadas na norma ISO 5348, (ISO-5348, 1998). De acordo com a norma

ISO 5348, os principais métodos de fixação são: parafuso, cola (adesivo), fita adesiva dupla face, imã e agulha de toque. No entanto, a fixação por parafuso é uma das mais comuns e mais usadas devido a confiabilidade superior em relação aos outros métodos. Outra parte essencial no processo de medição de vibração por meio de acelerômetros é o cabeamento. Por meio do cabeamento, o sinal do acelerômetro é transmitido para o analisador. Efeitos indesejáveis, os quais podem afetar significativamente os dados medidos, também podem ocorrer nessa fase. Dessa forma, os sinais devem ser transmitidos por cabos blindados especiais com malha devidamente aterrada, principalmente em ambientes hostis como os industriais.

Capítulo 3

MATERIAL E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados os seguintes itens: materiais e equipamentos utilizados; metodologia empregada para realização dos ensaios de retificação; coleta dos sinais de aceleração; procedimentos realizados para as medições da rugosidade e dureza; análise metalográfica da superfície das peças; e, finalmente, processamento digital dos sinais de aceleração para a detecção e monitoramento do fenômeno chatter no processo de retificação.

3.1 Material e equipamentos

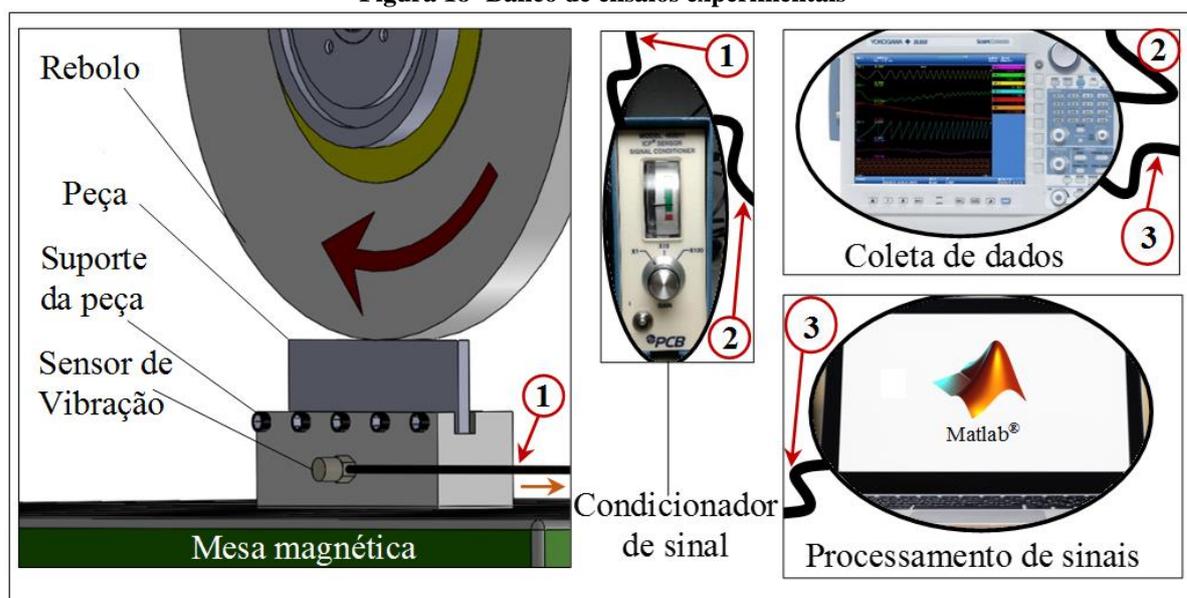
Dois bancos de ensaios experimentais foram projetados para levar a cabo o propósito do presente trabalho e verificar sua eficácia para diferentes situações. Inicialmente, realizou-se ensaios experimentais para detectar a ocorrência de *chatter* no processo de retificação usando um rebolo de CBN. Posteriormente, realizou-se ensaios para verificação do método, usando um rebolo com uma configuração diferente daquele usado nos ensaios experimentais. Assim, um rebolo de óxido de alumínio foi usado para verificação do método proposto no presente trabalho. Essa seção descreve procedimentos adotados na realização dos ensaios experimentais. Os procedimentos adotados para os ensaios de verificação serão descritos ao final deste capítulo.

3.1.1 Procedimentos adotados para realização dos ensaios experimentais

Os ensaios de retificação foram realizados em uma máquina retificadora plana tangencial, modelo RAPH 1055, do fabricante SULMECÂNICA, equipada com um rebolo de CBN do fabricante NORTON, com ligante resinoide, especificação 2684 01-0262 B151 e com dimensões de 344 mm x 10 mm x 127 mm (diâmetro externo, largura, diâmetro interno). O

rebolo foi condicionado para a retificação por meio da operação de dressagem usando um dressador conglomerado e profundidade de dressagem de 2 μm em cada passada do dressador na superfície de corte do rebolo. Para a dressagem foi adotado configuração e parâmetros similares aqueles adotados nos trabalhos de (MARTINS et al., 2014; OLIVEIRA JUNIOR 2018a). Após o condicionamento adequado do rebolo, sucessivos ensaios de retificação foram realizados em peças de aço ABNT 1045, temperado e revenido, cuja composição era (peso em %): (C: 0,43-0,50; Si: 0,17; Mn: 0,52; S: 0,031; P: 0,032 e F_e balanceado) e com dimensões: 150 mm de comprimento e 7 mm de largura, as quais foram empregadas para a realização dos testes. Para cada teste de retificação, uma única passada tangencial à superfície da peça foi efetuada para cada condição proposta. A Figura 18 ilustra a disposição e montagem dos ensaios experimentais. Na Tabela 2 são apresentados alguns dos principais parâmetros adotados nos ensaios.

Figura 18- Banco de ensaios experimentais



Fonte: Autor

Tabela 2- Parâmetros dos Ensaios de Retificação com rebolo CBN

Teste N°	Profundidade de corte (μm)	Espessura de corte equivalente h_{eq} (μm)
I	5	0,0193
II	10	0,0385
III	20	0,0770
IV	40	0,1540
V	80	0,3081
VI	120	0,4621
VII	140	0,5391

Durante os ensaios, empregou-se velocidade de corte (v_s) e velocidade de avanço da mesa (v_w) iguais a 32,2 m/s e 0,124 m/s, respectivamente. Na Tabela 2 foram apresentados os parâmetros de retificação: profundidade de corte (a) e espessura de corte equivalente (h_{eq}) para todos os sete experimentos realizados com o rebolo CBN. É importante mencionar que condições que são consideradas excessivas para a retificação com rebolo CBN (80 μm , 120 μm e 140 μm) foram propositalmente adotadas para simular condições extremas do processo. Nestes ensaios foram utilizadas um total de sete peças de aço, como numerados na Tabela 2. Empregou-se em todos os ensaios fluido de corte do tipo emulsão água/óleo com aproximadamente 4% de óleo, sendo a pressão e a vazão iguais a 0,4 MPa e 8,4 l/min, respectivamente

3.1.2 Sistema de aquisição de dados

Os sinais de aceleração foram detectados por um acelerômetro piezelétrico, modelo 353B03 ICP, faixa de frequência de 1 Hz a 7 kHz ($\mp 5\%$), da fabricante PCB PIEZOTRONICS, o qual foi fixado ao suporte da peça por meio de um parafuso e conectado a um módulo amplificador de mesmo fabricante, modelo 482B11, com ganho x10. A especificação do acelerômetro e módulo amplificador em termos de sensibilidade, resolução, faixa de medição, entre outras características, são detalhadas na curva de calibração disponibilizada pelo fabricante, a qual é apresentada no Anexo 1 do presente documento. A configuração do módulo amplificador é dada na Tabela 3. Para a coleta dos sinais, conectou-se o módulo do sensor de aceleração a um osciloscópio, da marca Yokogawa, modelo DL850, sendo empregada uma taxa amostragem de 2 MHz para essa aquisição. A medição da vibração conta com um módulo que têm como função amplificar, limpar ruídos, processar e transferir os sinais para o osciloscópio que realiza a aquisição deste sinal. Na sequência os sinais foram transferidos para um computador, com objetivo de processá-los digitalmente.

Tabela 3- Configuração do módulo de vibração

Sinal de vibração	
Sinal de saída utilizado	Puro
Ganho	X10

3.2 Integridade superficial das peças retificadas

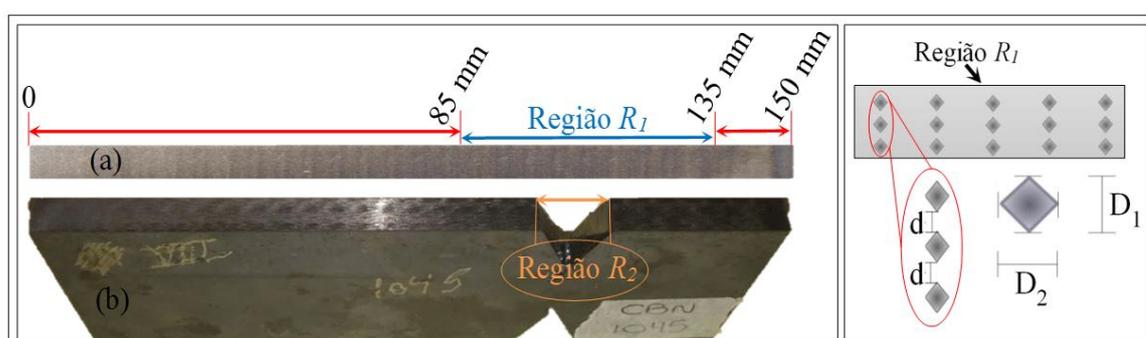
Após os ensaios de retificação, foram obtidas as imagens digitalizadas destas para a inspeção visual de suas respectivas superfícies por meio de um scanner do fabricante HP, modelo *Scanjet G4050*. Posteriormente, realizou-se um processamento digital das imagens, melhorando a visualização das transformações topográficas ocasionadas pelo rebolo na superfície das peças. Para tal, utilizou-se um software específico de processamento de imagens desenvolvido pelo grupo de usinagem por abrasão, o qual faz o uso de bibliotecas livres de processamento de imagens “*Open CV*” e chamado *Ladaps hi-Pro*. Assim, após a digitalização das imagens, realizou-se o processamento gráfico delas, por meio deste software, contribuindo para a melhora no balanço de cores e adequando o histograma da imagem para facilitar a estimativa do período de ocorrência do *chatter*. A determinação gráfica do período do *chatter* é importante para a avaliação e análise dos resultados obtidos por meio de métodos de processamento de sinais de aceleração, sendo, também, uma novidade externada pelo presente trabalho via software dedicado.

Após análise das superfícies retificadas por meio da inspeção visual para todas as peças usinadas, escolheu-se uma região de interesse a fim de se investigar a ocorrência do fenômeno de *chatter*. Essa região com aproximadamente 50 mm de comprimento, denominada de R_1 , estende-se da cota 85mm até 135mm em todas as superfícies das peças retificadas, sendo a posição inicial 0 mm e final 150mm (dimensões extremas da peça), tendo o contato inicial e final do rebolo nestas cotas respectivamente. Este procedimento é ilustrado pela Figura 19.

Posteriormente, realizou-se doze (12) medidas equidistantes de rugosidade superficial ao longo da região R_1 perpendicular à direção de avanço do rebolo. Nestas medidas utilizou-se o comprimento de amostragem de 1,6 mm dividido em sub-regiões de 0,8 mm, seguindo as recomendações da norma NBR/ISO 4288 (1996). Ainda nessa região, foram realizadas dezoito (18) medições de dureza Vickers em seis (06) pontos equidistantes. Na direção perpendicular ao avanço do rebolo foram realizadas 3 indentações utilizando uma carga de 0,5 kgf por 60 segundos, sendo 15 segundos de aproximação e retirada e 30 segundos de contato constante. É importante salientar que as distâncias de espaçamento entre as três indentações seguiram a norma ASTM E92-17 (2017). Na Figura 19 é exemplificado o procedimento para a medição de dureza Vickers, rugosidade superficial média e análise metalográfica das peças, sendo “(a)” a imagem da superfície digitalizada, “(b)” a imagem da peça após o corte da região R_2 para a

análise metalográfica, “ d ” a distância entre as indentações (no mínimo duas vezes a maior diagonal) e “ D_1/D_2 ” são as diagonais oriundas da indentação. Um rugosímetro da fabricante TAYLOR HOBSON, modelo Surtronic 3+ e um equipamento da marca MITUTOYO, modelo HM211, foram utilizados nas medições de rugosidade R_a e dureza Vickers, respectivamente. Após as medições, para cada ensaio, obteve-se valores médios dos parâmetros de R_a e de dureza Vickers.

Figura 19. Procedimentos para a medição de dureza Vickers, Rugosidade - R_a e, também, para a análise metalográfica das peças.



Fonte: Autor

A fim de observar a microestrutura e identificar possíveis danos térmicos gerados nas peças, entre os intervalos que determinam a região R_1 , seccionou-se uma região R_2 dentro de R_1 , a qual se estende da posição 100 mm até a posição 115 mm, e realizou-se a análise metalográfica dessa região para todas as peças retificadas, usando um microscópio Olympus, modelo BX51M. O lixamento e polimento foram efetuados nas amostras para tornar as superfícies planas e reduzir os danos causados pelo corte abrasivo realizado na região R . Em seguida, realizaram-se lixamentos com as seguintes lixas d'água, nas seguintes granulometrias: 80, 120, 220, 320, 400, 500 e 600. Por último, foi realizado o polimento utilizando alumina 1.0 μm e água destilada. Após o polimento, foi realizado um ataque químico nas amostras usando imersão em *nital* 2% por 14 segundos, no intuito de permitir a identificação dos grãos na análise com o microscópio ótico, responsável pela análise metalográfica.

3.3 Análise em tempo-frequência via STFT e ROP

Nesta seção será apresentada a técnica de processamento de sinais proposta para correlacionar os sinais de aceleração com as variáveis mecânicas de saída dos ensaios experimentais (dureza, rugosidade e metalografia), a fim de caracterizar a ocorrência do fenômeno de *chatter* no processo de retificação do aço ABNT 1045.

3.3.1 Potência do sinal para uma dada banda de frequência calculada por meio da STFT

A potência do sinal, no domínio discreto, para uma determinada banda de frequência ao longo do tempo, foi calculada com base nos coeficientes da STFT por meio da Equação (8).

$$P_{STFT}[m] = \frac{1}{n_2 - n_1} \sum_{n=n_1}^{n_2} |X_{nm}|^2 \quad (8)$$

Sendo $X_{n,m}$ a k -ésima saída da transformada discreta de Fourier (DFT) para cada coeficiente da STFT; $m=1,2,3,\dots,M$, em que M é o número de colunas da matriz que descreve a parte real dos coeficientes da STFT discreta no domínio da frequência e o intervalo $n_1 - n_2$ é o número de linhas da matriz que descreve a parte real dos coeficientes da STFT discreta para uma banda de frequência selecionada.

3.3.2 Espectro de frequência baseado na STFT

O espectro médio de frequência de um sinal discreto $x[n]$ baseado na STFT foi calculado pela Equação (9).

$$\overline{STFT}(m) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M |X_{nm}| \quad (9)$$

sendo M o número de colunas da matriz que descreve o domínio do tempo da STFT; $n=1,2,3,\dots,N$ onde N é o número de linhas da parte real dos coeficientes da STFT discreta no domínio da frequência, e $X_{n,m}$ representa a k -ésima saída da transformada discreta de Fourier (DFT) para cada coeficiente da STFT.

3.3.3 A ROP baseada na STFT

Com base nas Equações (7), (8) e (9), para uma banda de frequência que se deseja analisar, a relação de potência de cada coeficiente da STFT em relação a seu espectro médio foi calculada pela Equação (10), a qual descreve a técnica de processamento de sinais proposta para o presente trabalho.

$$ROP_{STFT}[m] = \frac{\sum_{n=n_1}^{n_2} |X_{nm}|^2}{\frac{1}{M} \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M |X_{nm}|^2} \quad (10)$$

sendo $X_{n,m}$ a k -ésima saída da DFT para cada coeficiente da STFT; M e N o número de colunas e de linhas da matriz que descreve a parte real dos coeficientes da STFT discreta no domínio do tempo e da frequência, respectivamente, e o intervalo $n_1 - n_2$ é o número de pontos da matriz que descreve a parte real dos coeficientes da STFT discreta para uma banda de frequência em análise.

A utilização dessa técnica de processamento de sinais, proposta no presente estudo, tem como objetivo analisar os padrões espectrais de uma faixa de frequência ao longo do tempo. Esses padrões, possivelmente, podem ser relacionados com o fenômeno de “*chatter*”, sendo uma hipótese a ser testada e confirmada com essa pesquisa.

3.4 Aplicação da ROP_{STFT} para o monitoramento do *chatter*

A sequência de atividades que contemplam o método proposto no presente estudo é dada na seguinte ordem: (i) os sinais de aceralção são inicialmente obtidos à uma taxa de amostragem de 2 MHz; (ii) os sinais são reamostrados à 20 kHz; (iii) calcula-se a STFT na parte útil do sinal (trecho da passada de retificação) reamostrado; (iv) uma banda de frequência é escolhida experimentalmente; (v) calcula-se a ROP a partir da STFT (ROP_{STFT}) na banda de frequência escolhida; (vi) a partir do passo (v) obtêm-se as métricas: RMSE e ângulo de regressão, bem como a DFT; (vi) por fim os resultados são relacionados com as variáveis mecânicas de saída do processo: rugosidade, dureza e metalografia.

O fabricante do sensor de aceleração utilizado nos ensaios garante sua calibração para uma faixa de frequência de até 7 kHz (vide seção 3.1.2 e Anexo 1). Por isso, fez-se a reamostragem dos sinais de aceleração, inicialmente coletados a uma taxa de 2 MHz, visando diminuir a massa de dados a ser processada. Antes da reamostragem, os sinais de aceleração foram filtrados por meio de um filtro digital do tipo *butterworth*, de ordem 5, com frequência de corte de 7,5 kHz atendendo a faixa de operação do sensor fornecida pelo fabricante.

Após o processo de reamostragem, foram obtidos sinais de aceleração correspondentes à região R_I de cada teste e, então, calculou-se um espectro de frequência via FFT. Os espectros foram analisados e várias bandas de frequência foram experimente consideradas para seleção daquela mais que se mostrou mais expressiva em termos de energia (amplitude) com base na STFT. Nessa etapa, a banda de frequência que se destacou foi de 3 kHz a 4 kHz, sendo esse intervalo selecionado para o estudo. Posteriormente, para cada teste, calculou-se a STFT por meio do algoritmo *spectrogram* disponível no *software* Matlab®, onde os seguintes parâmetros foram empregados:

- Janela retangular abrangendo 1024 amostras do sinal;
- Utilização da reamostragem anteriormente descrita em 20 kHz;
- Máxima sobreposição permitida para a configuração proposta, a qual corresponde a 97,95% e equivale a 1.003 amostras;
- Uma janela de 4096 amostras foi usada para cálculo da DFT.

Desta forma, obteve-se resoluções de tempo-frequência de aproximadamente 1,05 ms e 39 Hz, respectivamente. A resolução tempo-frequência foi obtida por meio das Equações (11) e (12), respectivamente, conforme (SHARMA et al., 2013).

$$\Delta t = N * T_s \tag{11}$$

$$\Delta F = m \frac{F_s}{N} \tag{12}$$

Em que: N é o tamanho da janela; T_s o período de amostragem; F_s a frequência de amostragem e m o coeficiente da janela. O período de amostragem é o inverso da frequência de amostragem e o coeficiente de janela depende do tipo de janela utilizada, por exemplo, $m = 2$ para uma janela retangular.

A resolução tempo-frequência obtida, permitiu, por meio da aplicação da ROP_{STFT} na banda de 3 kHz a 4 kHz, a extração de informações referente aos padrões espectrais dos sinais de aceleração que estão relacionados ao fenômeno de *chatter*.

Posteriormente ao cálculo da ROP_{STFT} , foram estimadas as retas de tendência em relação ao tempo por meio da técnica de regressão linear e, então, obteve-se a inclinação de cada reta em relação ao eixo de tempo e o erro médio quadrático (RMSE – *root mean squared error*) da ROP_{STFT} em relação às suas retas de regressão a fim de relacionar essas informações com os valores médios de rugosidade R_a e de dureza Vickers. O período de amostragem obtido para cada valor de ROP_{STFT} foi equivalente à resolução de tempo obtida para a STFT; deste modo, a frequência de amostragem da ROP_{STFT} foi de mil amostras por segundo (1 kS/s). Assim, obteve-se também um espectro de frequência para cada ROP_{STFT} por meio da FFT com o objetivo de verificar qual a relação do conteúdo espectral da ROP_{STFT} com o fenômeno de *chatter*.

3.5 Verificação experimental do método proposto

Os ensaios de verificação do método proposto neste trabalho foram realizados usando um rebolo de óxido de alumínio, especificação 38A150LVH do fabricante NORTON, com dimensões iguais a 307,8mm x 25,4mm x 127mm. O rebolo de óxido de alumínio possui ampla utilização na indústria de manufatura, entretanto, possui características completamente opostas as do rebolo de CBN. O rebolo de óxido de alumínio foi dressado usando um dressador de ponta única e profundidade de dressagem de 40 μm em cada passada do dressador na superfície de corte do rebolo. Após o condicionamento adequado desse rebolo, sucessivos ensaios de retificação foram realizados em outras oito peças de aço ABNT 1045 também com dimensões de 150 mm de comprimento e 7 mm de largura. Foi utilizado o mesmo fluido de corte empregado nos ensaios experimentais descritos anteriormente. Nestes ensaios de verificação foram empregadas velocidade de corte (v_s) e velocidade de avanço da mesa (v_w) iguais a 29,0 m/s e 0,124 m/s, respectivamente. Na Tabela 4 são apresentados os parâmetros de retificação: profundidade de corte (a) e espessura de corte equivalente para cada teste realizado, os quais foram utilizados nos ensaios definitivos.

Os procedimentos realizados anteriormente com rebolo CBN para os ensaios experimentais, para a inspeção visual das peças e para o processamento digital dos sinais de aceleração realizados, também foram igualmente empregados nos ensaios com rebolo de óxido de alumínio.

A banda de frequência de 3kHz a 4kHz usada para calcular a ROP via STFT para os ensaios com o rebolo CBN também foi preservada para comparação dos resultados.

Tabela 4. Parâmetros dos ensaios de retificação com rebolo de óxido de alumínio

Teste N°	Profundidade de corte (μm)	h_{eq} (μm)
<i>I</i>	5	0,0214
<i>II</i>	10	0,0428
<i>III</i>	15	0,0641
<i>IV</i>	20	0,0855
<i>V</i>	25	0,1069
<i>VI</i>	35	0,1497
<i>VII</i>	45	0,1924
<i>VIII</i>	55	0,2352

Capítulo 4

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo os resultados para os ensaios experimentais realizados com o rebolo CBN, bem como para os ensaios de verificação do método proposto que foram realizados usando o rebolo de óxido de alumínio, serão apresentados e discutidos.

4.1 Resultados dos ensaios experimentais: aço ABNT 1045 e rebolo CBN

Os resultados e discussões são dispostos nesta seção considerando os seguintes tópicos: (4.1.1) inspeção visual da superfície da peça para definir a frequência de *chatter*, a partir do processamento digital de imagens e análise metalográfica; (4.1.2) aplicação da STFT nas amostras II e VII, bem como análise dos sinais originais de aceleração correspondentes a região R_I ; (4.1.3) aplicação da estatística ROP_{STFT} nos sinais de aceleração para identificar as frequências características de *chatter*.

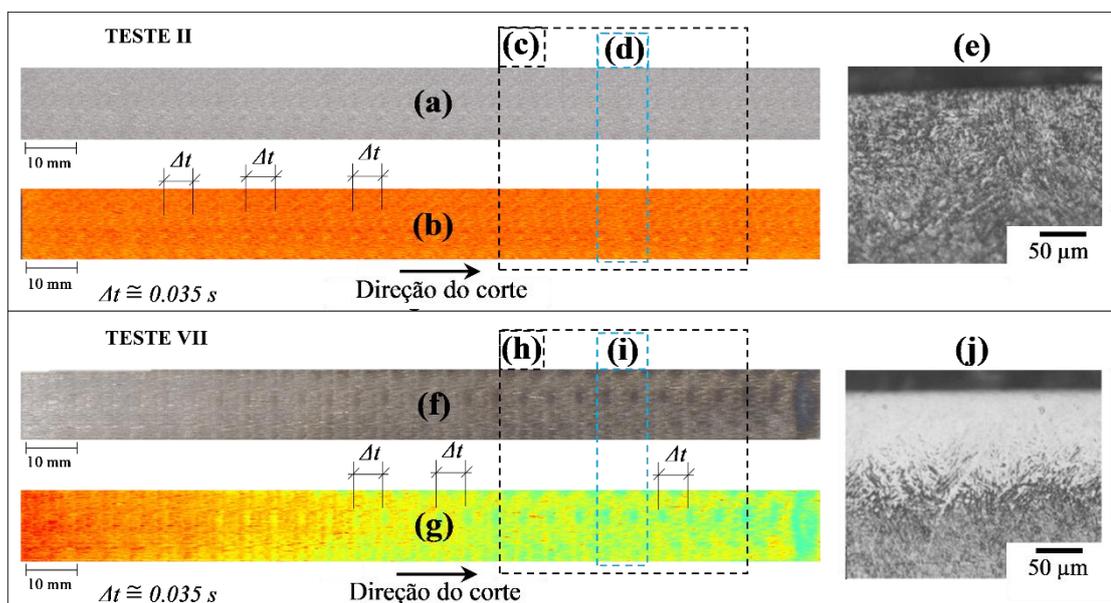
4.1.1 Inspeção visual e análise metalográfica

Os resultados obtidos por meio da inspeção visual e análise metalográfica são mostrados na Figura 20. Devido à não ocorrência do fenômeno de *chatter* na amostra (I), optou-se em utilizar a amostra (II) para marcação do início do fenômeno e a amostra (VII) para marcação da ocorrência mais severa do *chatter*, ou seja, os extremos desse conjunto de ensaios.

Para a amostra (II), ilustrada nas Figura 20 (a) e Figura 20 (b), a imagem de índice (a) representa a superfície da peça sem processamento e o índice (b) representa a imagem da superfície obtida após o processamento digital por meio do software *Ladaps hi-Pro*. Ainda na Figura 20, é possível observar que o item (c), que representa a seção referente à região R_I ; e o

item (d), que representa a seção delimitada pela região R_2 , utilizada para análise metalográfica. Adicionalmente, na Figura 20 (e) é ilustrada a análise metalográfica realizada na região R_2 da amostra (II). Analogamente, para a amostra (VII) ilustrada nas Figura 20 (f) e Figura 20 (g), a imagem de índice (f) representa a superfície da peça também sem processamento e o índice (g) representa a imagem da superfície da peça também obtida após o processamento digital pelo software *Ladaps hi-Pro*. O item (h) representa a seção referente à região R_1 ; e o item (i) representa a seção delimitada pela região R_2 , utilizada para análise metalográfica. Enquanto que, na Figura 20 (j) é ilustrada a análise metalográfica realizada na região R_2 da amostra (VII).

Figura 20- Imagens digitais e análise metalográfica para as amostras (II) e (VII) com o rebolo CBN: (a) e (f) imagem sem processamento; (b) e (g) imagens processadas e (e) e (j) metalografia.



Fonte: Autor

Observa-se que a análise metalográfica para a amostra (II), realizada com uma profundidade de corte de $10 \mu\text{m}$, não indicou alteração microestrutural significativa na superfície da peça. Em contrapartida, essa análise para o teste (VII), a qual foi realizada com uma penetração de trabalho de $140 \mu\text{m}$, detectou uma camada branca na superfície da peça de aproximadamente $139 \mu\text{m}$, assim, infere-se que, para este ensaio, gerou-se danos térmicos na superfície da peça que, conforme mostrado na análise metalográfica, acarretou em sua alteração microestrutural, como observado em (RIBEIRO et al., 2017a).

Infere-se que com uma profundidade de corte excessiva de $140 \mu\text{m}$, pode-se observar claramente o fenômeno de *chatter* que contribuiu juntamente com outros fatores para a

ocorrência de danos térmicos à peça e, conseqüente, alteração microestrutural da superfície da peça usada no teste (VII) e mostrada na Figura 20 (j). Observa-se também que na Figura 20 (b) e Figura 20 (g), que o fenômeno de *chatter* produziu nas superfícies das peças retificadas um padrão de danos com repetição regular na direção do corte. O período (Δt) de repetição apurado foi de aproximadamente 35 ms, o que equivale a uma frequência aproximada de 28 Hz, ou seja, muito próxima da frequência de rotação do rebolo, de acordo com (GRADIŠEK et al., 2003).

No entanto, na Figura 20 (b), para a região R_I da amostra (II), esse padrão é brando e uniforme, não sendo detectados danos na superfície da peça. Ao contrário do padrão observado para a região R_I da amostra (VII), o qual é mais acentuado e irregular. Isso aconteceu porque o volume de material removido da peça na amostra (VII) foi significativamente maior que o volume de material removido na amostra (II), uma vez que a profundidade de corte usada na amostra (VII) foi 14 vezes maior do que aquela utilizada na amostra (II), bem como, caracterizada como excessiva para o rebolo de CBN. Assim, o volume de material removido da peça pode ser superior ao volume de poros do rebolo levando ao empastamento dos mesmos e, conseqüentemente, ao empastamento irregular de material na superfície de corte do rebolo. Por essa razão, o fenômeno de *chatter* e a temperatura na zona de corte aumentaram significativamente, o que resultou em danos irreversíveis à superfície da peça retificada.

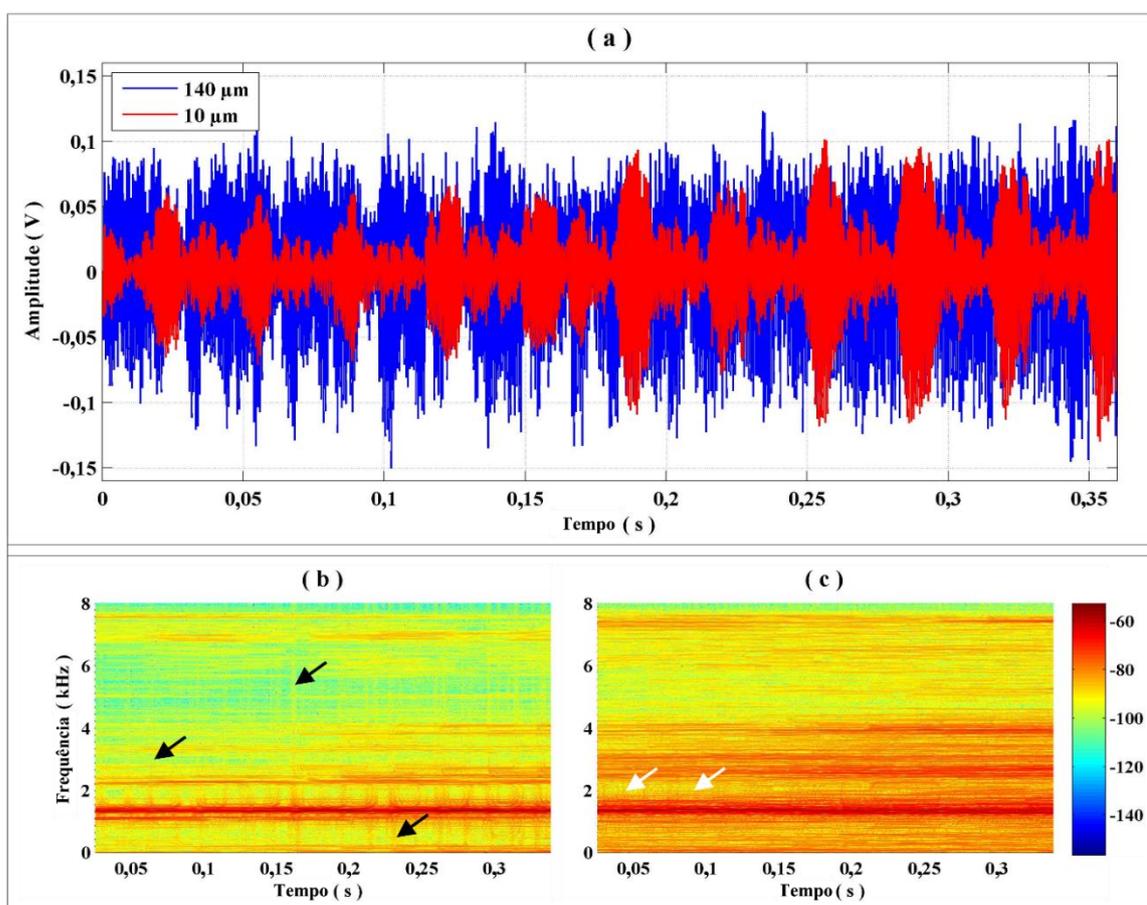
4.1.2 Resultados da aplicação da STFT

Na Figura 21 (a) é apresentada a amplitude dos sinais de aceleração em volts (V) (equivalente a aceleração em m/s^2) em função do tempo, para as amostras (II) 10 μ m em vermelho e (VII) 140 μ m em azul, as quais foram correspondentes a região R_I escolhida para estudo da eficiência da técnica ROP_{STFT} na detecção do fenômeno de *chatter*. Nas Figura 21(b) e Figura 21(c) foram apresentados os resultados do cálculo da STFT aplicada nas amostras (II) e (VII), as quais foram correspondentes às profundidades de corte de 10 μ m e 140 μ m, respectivamente.

Nos espectrogramas, mostrados na Figura 21(b) e Figura 21(c), pode-se observar frequências acima de 7 kHz, entretanto, as frequências mais significativas para análise (as quais se relacionam com as vibrações no processo de retificação) se encontram-se abaixo de 7 kHz. Na amostra (II), linhas perpendiculares (exemplificadas pelas setas pretas) ao eixo de tempo, as quais se repetem periodicamente, foram observadas na faixa de frequências de 0 a 8 kHz.

Por outro lado, para o espectrograma mostrado na Figura 21(c), nota-se um comportamento oposto ao observado na Figura 21(b), ou seja, não se identifica a mesma densidade de linhas perpendiculares ao eixo da frequência, ficando restritas a poucas marcas em frequências próximas a 1.980 kHz e 2.010 kHz (exemplificadas pelas setas brancas), as quais são frequências múltiplas da frequência de rotação do rebolo.

Figura 21- (a) Sinais originais de aceleração referente a região da peça escolhida para análise; (b) STFT de (a). Os quais são correspondentes às amostras (II) e (VII)



Fonte: Autor

Percebe-se também que, para a faixa de frequência de 0 a 7 kHz, há uma diferença significativa de energia entre o conteúdo espectral mostrado na Figura 21(b) para a amostra (II), e o conteúdo espectral mostrado na Figura 21(c) para a amostra (VII). Isso ocorreu, porque para um mesmo período de tempo, o volume de material removido da peça na amostra (VII) foi 14 vezes maior do que o volume de material removido na amostra (II), como discutido anteriormente. Logo, a magnitude da força de retificação também foi maior com o aumento da profundidade de corte, como descrito por Malkin; Guo (2008) e Patnaik Durgumahanti et al.

(2010), de modo que, com a maior remoção de material da peça ocasiona-se a alta incidência de *chatter*, que por sua vez, contribui para o aumento de energia nas frequências que compõem o sinal de aceleração característico da retificação do aço ABNT 1045, similar aos trabalhos descritos por Alexandre et al., (2017); Quintana; Ciurana (2011); Tangjitsicharoen; Senjuntichai (2015). Tal fenômeno dificulta a análise dos padrões espectrais por meios visuais. Por isso, para analisar melhor esses padrões espectrais da STFT dos sinais de aceleração, necessita-se do desenvolvimento de técnicas de processamento de sinais, como a ROP_{STFT} , presentes neste trabalho.

4.1.3 Resultados da aplicação da ROP_{STFT}

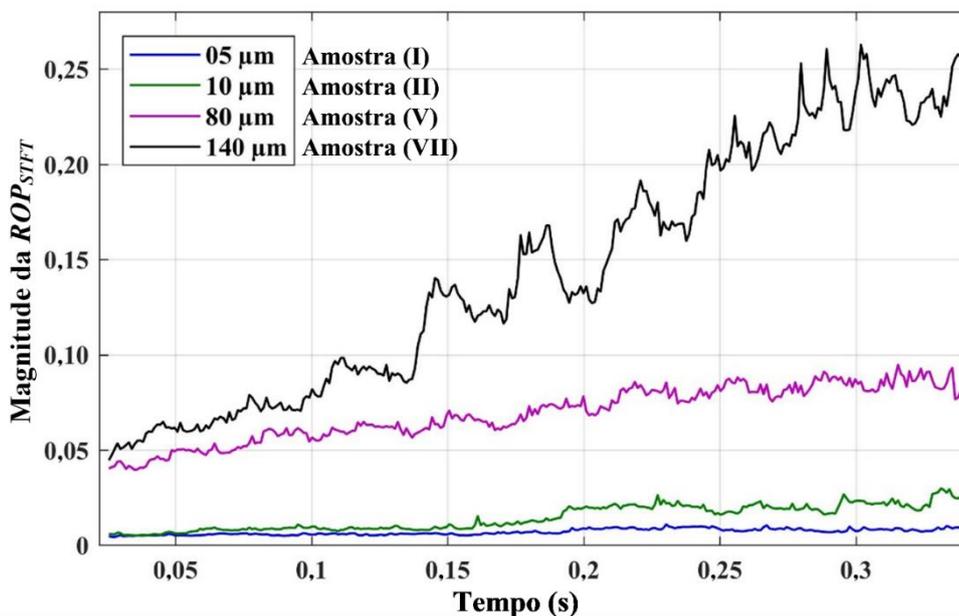
Os resultados da ROP_{STFT} , são mostrados na Figura 22, e correspondem às amostras (I), (II), (V) e (VII) para as profundidades de corte de 5 μm , 10 μm , 80 μm e 140 μm , respectivamente. Observa-se na Figura 22 que o aumento da penetração de trabalho acarreta no aumento crescente da relação de potência obtida por meio da ROP_{STFT} . Isso deve-se ao acúmulo de cavaco na região de corte, tendo como consequência, o aumento da força de corte Aguiar et al., (2007) e Oliveira Junior et al., (2015), ocasionando assim, uma incidência maior de *chatter* e, conseqüentemente, resultando em um aumento significativo nas amplitudes das frequências relacionadas à esse fenômeno.

Nota-se ainda na

Figura 22 que, ao se comparar os valores máximos das ROP_{STFT} para as amostras (II) e (V) com o valor máximo da ROP_{STFT} obtida na amostra (VII), é possível observar a existência de uma diferença significativa entre esses valores. A exemplo disso, o pico máximo da ROP_{STFT} calculada para a amostra (VII) é 930% maior que a amostra (II) e 190 % maior para a amostra (V). Isso é devido à penetração de trabalho ser maior e conseqüentemente uma quantidade maior de material sendo cisalhada e deformada plasticamente, juntamente ao acúmulo de cavaco na região de corte e nos poros do rebolo, que ocasionam uma elevação da força de corte e a alta incidência de *chatter*, resultando no aumento constante de energia das frequências que compõe a banda espectral em análise.

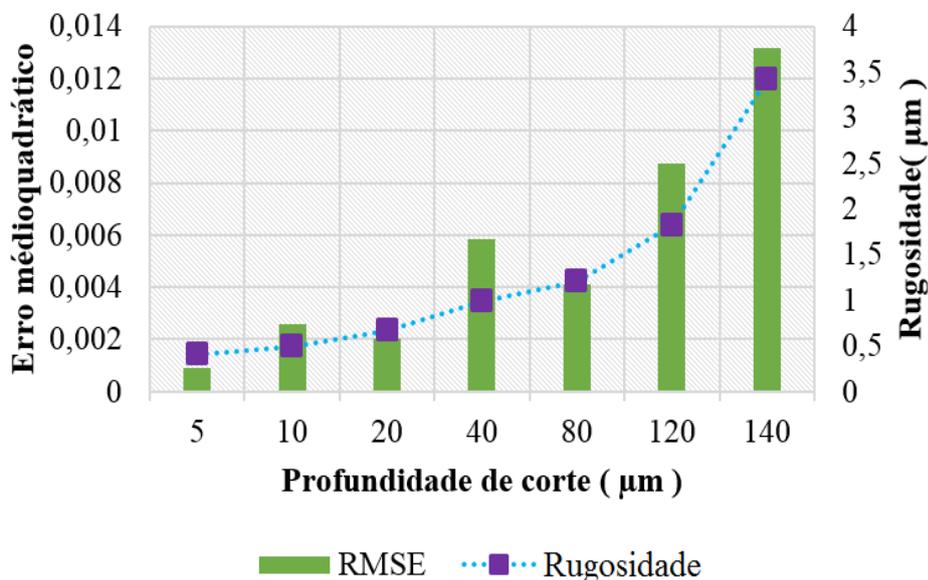
O coeficiente angular (em graus) referente ao erro médio quadrático das ROP_{STFT} em relação as suas retas de tendência, bem como os valores de R_a e dureza são apresentados nas Figuras 23, 24, 25, e 26.

Figura 22. Resultado da ROP_{STFT} para os ensaios com rebolo CBN



Fonte: Autor

Figura 23- RMSE da ROP_{STFT} e rugosidade em função das profundidades de corte

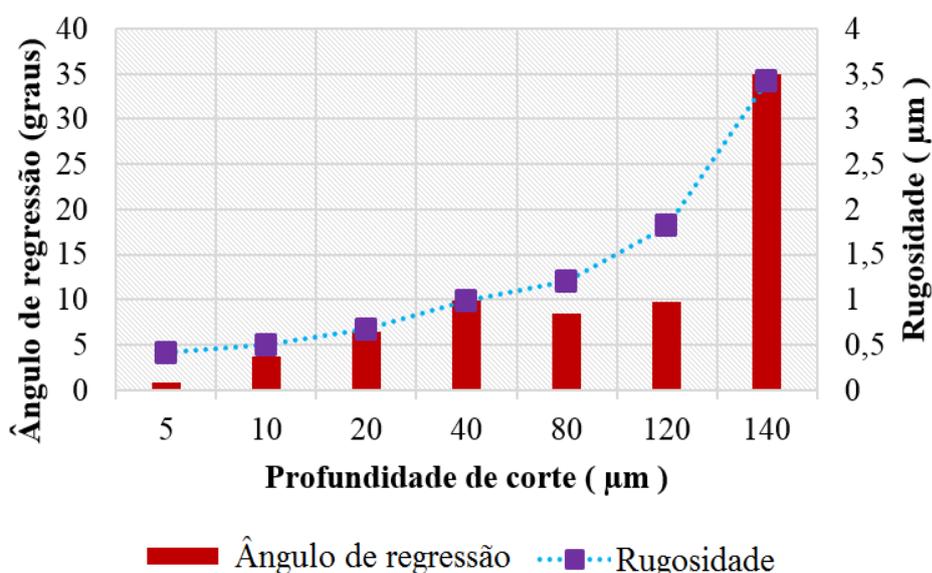


Fonte: Autor

Observa-se nas Figura 23 e Figura 24 que mantendo a velocidade de corte constante e aumentando a profundidade de corte, o resultado observado é o aumento da rugosidade, similar aos resultados descritos por Aguiar et al. (2007) e Oliveira Junior et al. (2015). Observa-se também, que tanto o ângulo de inclinação das retas de regressão quanto os valores de erro médio

quadrático (RMSE) acompanham a tendência dos valores de rugosidade. Deste modo, infere-se que a rugosidade pode ser monitorada aplicando o cálculo da ROP_{STFT} em uma banda de frequência nos sinais de aceleração, demonstrando que esta banda de frequência possui relação direta e significativa com o fenômeno em análise.

Figura 24- Ângulo de regressão da ROP_{STFT} e rugosidade em função das profundidades de corte



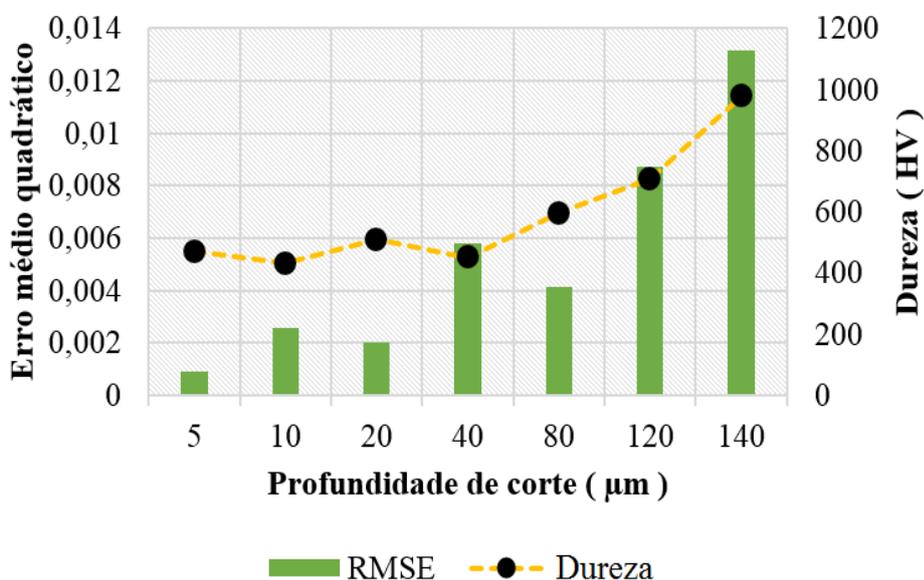
Fonte: Autor

Por outro lado, de acordo com a Figura 25 e Figura 26, a dureza para as profundidades de corte de 5 μm , 10 μm , 20 μm , 40 μm e 80 μm manteve-se na faixa de 400 HV a 600 HV, enquanto o ângulo de inclinação das retas de regressão e os valores RMSE se elevaram conforme o aumento da profundidade de corte. Observa-se então que, conforme a análise metalográfica mostrada na Figura 23, Figura 24, Figura 25 e Figura 26 que não houve alteração microestrutural de superfície da peça para valores de inclinação da reta de regressão e de erro abaixo de, aproximadamente, 15 graus e 0,006, respectivamente. Nota-se também uma relação direta entre as curvas de tendências de rugosidade e dureza com as tendências de inclinação da reta e do erro.

Assim, infere-se que, definindo-se um limiar de máxima inclinação para a reta de regressão e para o erro médio quadrático, ambos calculados a partir da ROP_{STFT} , é possível evitar que danos ocorram a peça durante a retificação, demonstrando que esse método desenvolvido pode auxiliar um sistema de controle baseado nestes índices e, então, permitindo realizar o

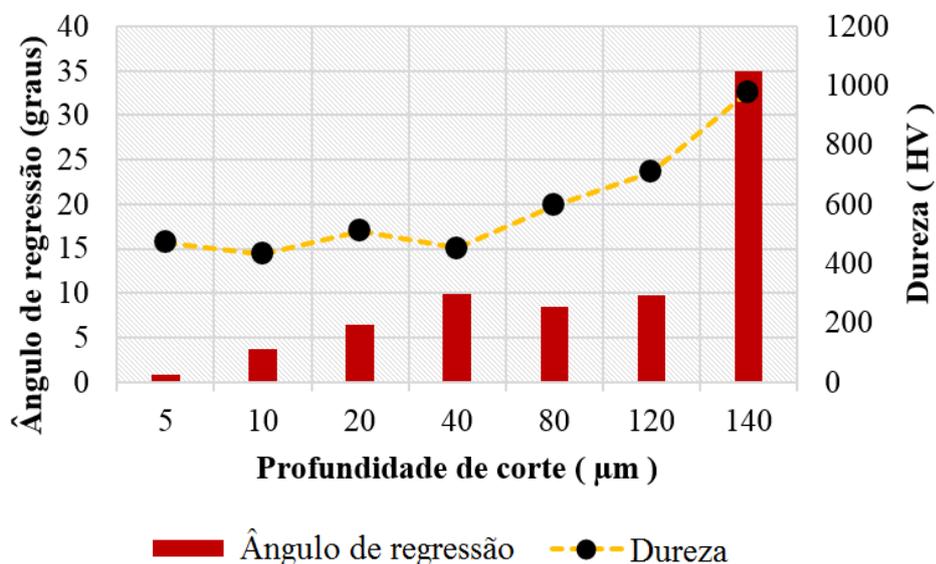
monitoramento online do processo. Neste caso, os limiares são 15 graus para a máxima inclinação da reta de regressão e 0,006 o maior erro médio quadrático permitido.

Figura 25- RMSE da ROP_{STFT} e dureza em função das profundidades de corte



Fonte: Autor

Figura 26- Ângulo de regressão da ROP_{STFT} e dureza em função das profundidades de corte

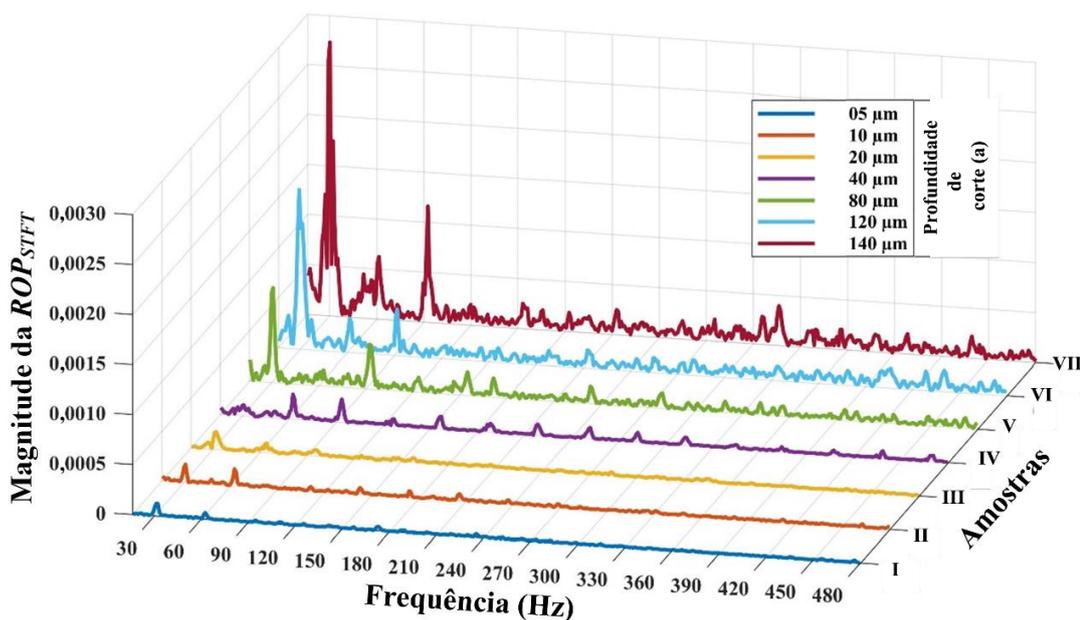


Fonte: Autor

Para a profundidade de corte de 140 μm , observou-se nas Figuras 23, 24, 25 e 26, que a inclinação da reta de regressão e o valor de erro médio quadrático, respectivamente, aumentaram em aproximadamente 250 % e 116 % quando comparado com os valores obtidos para a profundidade de corte de 80 μm , por exemplo. A dureza na região R_1 para a profundidade

de corte de 140 μm aumentou aproximadamente 90 % em relação à dureza para a mesma região, quando a profundidade de corte foi de 80 μm , mostrando que a dureza também pode ser monitorada por meio de sinais de aceleração, utilizando esta metodologia. Esse aumento de dureza na região R_I para a profundidade de corte de 140 μm está relacionada a alta incidência do fenômeno de *chatter*, bem como a excessiva penetração de trabalho que pode ser melhor analisada a partir da Figura 27, a qual mostra a FFT das ROP_{STFT} para todas as amostras. Nota-se na Figura 27, que a frequência fundamental observada para os espectros da ROP_{STFT} encontra-se na faixa de 25 Hz a 35 Hz, sendo que o pico máximo foi de aproximadamente 29 Hz, ou seja, muito próximo da frequência de rotação angular do rebolo, a qual é 30 Hz. Isso significa que a frequência de rotação do rebolo está diretamente relacionada com o padrão espectral dos sinais de aceleração, como observado em (GRADIŠEK et al., 2003). E esse padrão, por sua vez, está relacionado ao fenômeno de *chatter*. Nota-se ainda que Figura 27, a amplitude da frequência fundamental aumenta em consonância com a profundidade de corte e, conseqüentemente, com a progressão do *chatter*.

Figura 27- Espectros de frequência das ROP_{STFT} para os ensaios com o rebolo CBN



Fonte: Autor

A amplitude da frequência fundamental para o espectro referente à profundidade de corte de 140 μm da amostra (VII), ilustrada na Figura 27 foi de aproximadamente, 370% maior em relação a amplitude da frequência fundamental para a profundidade de corte de 80 μm da amostra (V), por exemplo. Adicionalmente, o conteúdo harmônico gerado pela profundidade

de corte de 140 μm foi bem mais elevado quando comparado com o conteúdo harmônico gerado para as outras profundidades de corte, principalmente, se comparado com as profundidades de corte de 5 μm e 10 μm , onde houve baixa incidência do fenômeno de *chatter*. Esse resultado demonstra que os padrões espectrais observados na STFT possuem uma relação expressiva com o fenômeno de *chatter*, o qual possui relação direta com a frequência de rotação do rebolo, como descrito por (GRADIŠEK et al., 2003). Nota-se também, que o conteúdo espectral da ROP_{STFT} teve relação direta e significativa com o parâmetro de rugosidade e com a dureza Vickers da região analisada.

4.2 Verificação do método: aço ABNT 1045 e rebolo de óxido de alumínio

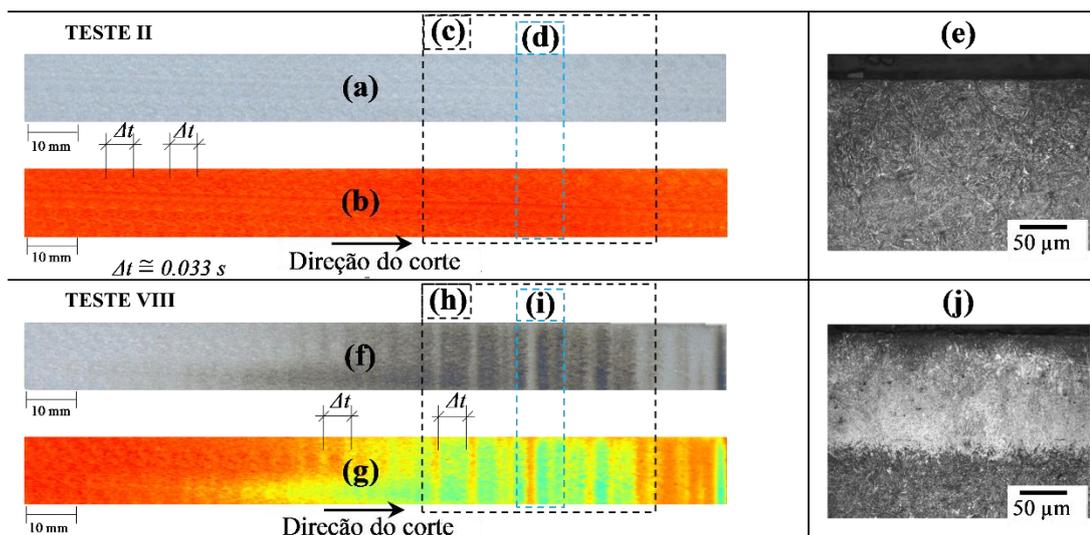
Esta seção elenca os resultados obtidos para os ensaios de verificação do método proposto, o qual usou um rebolo de óxido alumínio. Dessa forma, os resultados são apresentados e discutidos de maneira similar aqueles expostos anteriormente para o rebolo de CBN, ou seja: a inspeção visual e análise metalográfica é reportada no tópico 4.2.1; os resultados da aplicação da STFT para os ensaios de verificação são apresentados e discutidos no tópico 4.2.2; e, finalmente, os resultados da aplicação da ROP_{STFT} são explicados no tópico 4.2.3.

4.2.1 Inspeção visual e análise metalográfica

Os resultados obtidos por meio da inspeção visual e análise metalográfica são mostrados na Figura 28. Também, devido à fraca ocorrência de *chatter* na amostra (I), optou-se por utilizar a amostra (II) como amostra inicial para a análise, bem como, a amostra (VIII) como amostra final com predominância do efeito de *chatter*, sendo considerados os extremos das amostras. Para a amostra (II) ilustrada nas Figura 28(a) e Figura 28(b), a imagem de índice (a) representa a superfície da peça sem processamento e o índice (b) representa a imagem da superfície obtida após o processamento digital. Ainda na Figura 28, é possível observar o item (c) que representa a seção referente à região R_1 ; e o item (d) que representa a seção delimitada pela região R_2 , utilizada para análise metalográfica. Adicionalmente, a Figura 28(e) ilustra a análise metalográfica realizada na região R_2 , da amostra (II). Analogamente para a amostra (VIII), ilustrada pela Figura 28(f) e Figura 28(g), a imagem de índice (f) representa a superfície da peça sem processamento e o índice (g) representa a imagem da superfície da peça obtida após o

processamento digital. Na Figura 28, também é possível observar que o item (h) representa a seção referente à região R_1 e o item (i) representa a seção delimitada pela região R_2 , utilizada para a análise metalográfica. Adicionalmente, a Figura 28(j) ilustra a análise metalográfica realizada na região R_2 da amostra (VIII).

Figura 28. Imagens digitais e análise metalográfica para as amostras II e VIII com o rebolo de óxido de alumínio: (a) e (f) imagem sem processamento; (b) e (g) imagens processadas e (e) e (j) metalografia.



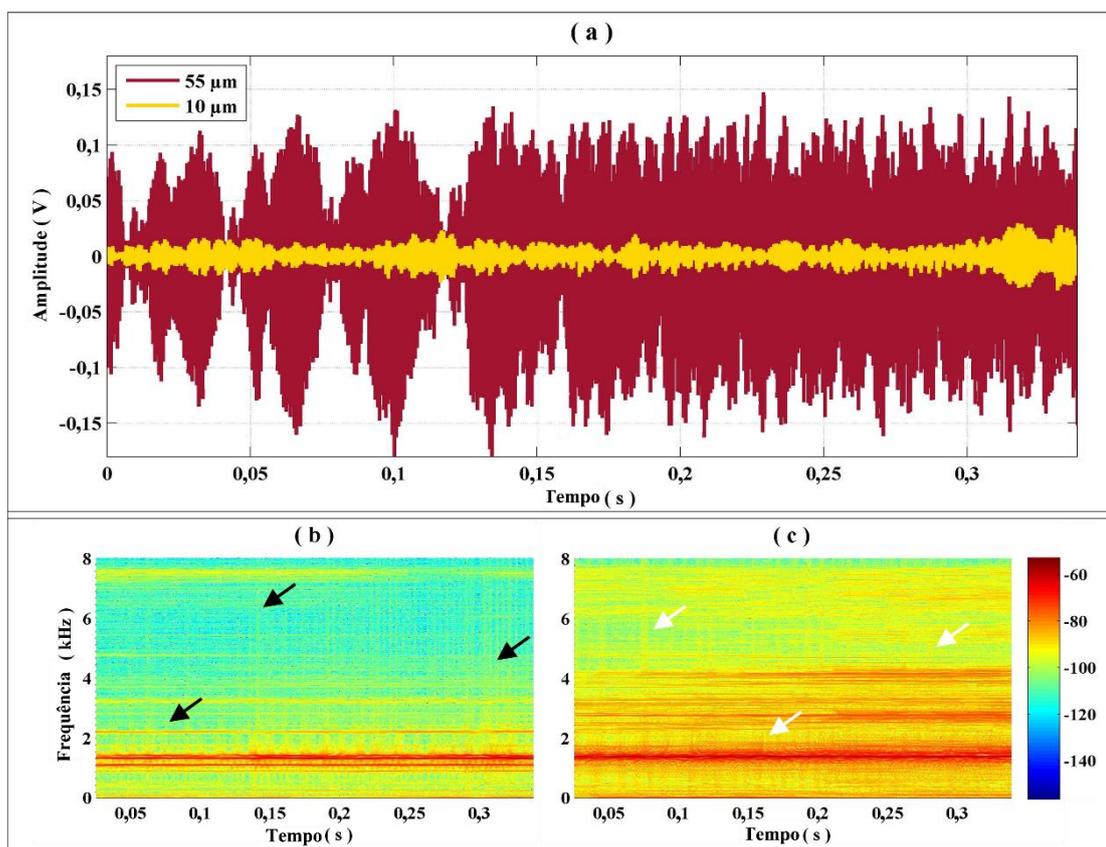
Fonte: Autor

Observou-se que na análise metalográfica da Figura 28 para a amostra (II), realizada com uma profundidade de corte de 10 μm e rebolo de óxido de alumínio, indicou que esta não teve alteração microestrutural, ou seja, de forma análoga ao ocorrido com a amostra (II) do ensaio com rebolo de CBN (Figura 20). Nota-se que a ocorrência de alteração microestrutural foi visualizada na amostra (VIII) com uma profundidade de corte de 55 μm , ou seja, comparativamente 150% menor do que a profundidade de corte utilizada anteriormente no teste (VII) para o rebolo de CBN. Inere-se que esta ocorrência de alteração microestrutural em uma amostra com menor profundidade de corte está relacionada ao empastamento e a menor capacidade de corte do rebolo de óxido de alumínio em relação ao rebolo de CBN. Uma vez que o rebolo CBN possui capacidade de condutibilidade térmica superior ao rebolo de óxido de alumínio, a ferramenta usada nos ensaios experimntais teve a capacidade de remover maior volume de material sem ocasionar alterações microestrutural na peça.

4.2.2 Resultados da aplicação da STFT para os ensaios de verificação

Na Figura 29(a) é apresentada a amplitude dos sinais de aceleração em volts (V) em função do tempo para as amostras (II) 10 μm em amarelo e (VIII) 55 μm em vermelho, as quais foram correspondentes a região R_I escolhida para verificar a eficiência da técnica ROP_{STFT} na detecção do fenômeno de chatter. Nas Figuras 29(b) e 29(c) são apresentados os resultados da STFT aplicada nas amostras (II) e (VIII), as quais foram correspondentes às profundidades de corte de 10 μm e 55 μm , respectivamente.

Figura 29- (a) Sinais originais de aceleração referente a região da peça escolhida para análise; (b) STFT de (a) os quais são correspondentes às amostras (II) e (VIII) para o rebolo de óxido de alumínio.



Fonte: Autor

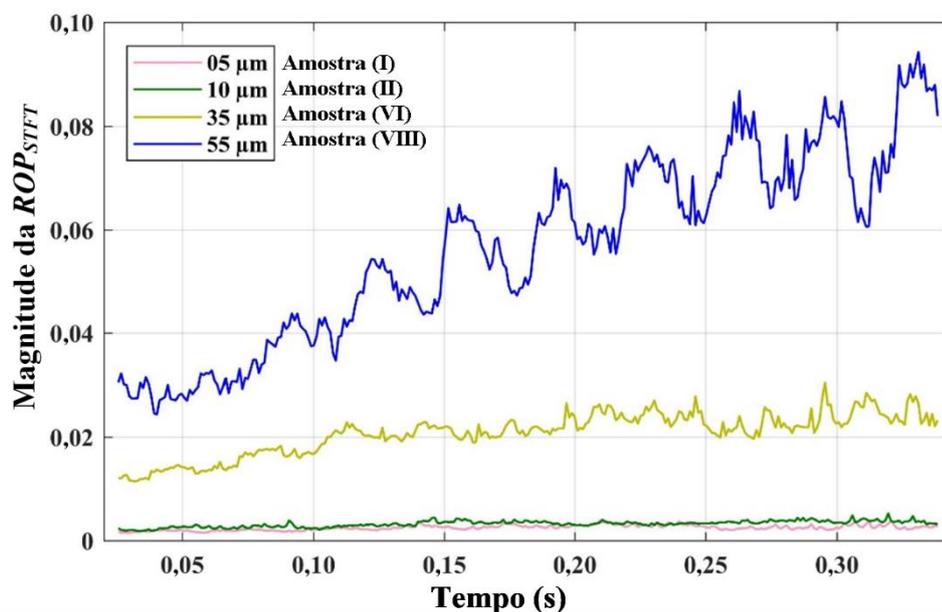
Os resultados do cálculo da STFT apresentados na Figura 29 para as amostras (II) e (VIII), com rebolo de óxido de alumínio, indicam comportamentos semelhantes aos resultados obtidos anteriormente para as amostras (II) e (VII) nos ensaios experimentais usando rebolo CBN (Figura 21). Entretanto, diferentemente do espectrograma apresentado na Figura 21 para

a amostra (VII), a amostra (VIII) para o rebolo de óxido de alumínio, apresentada no espectrograma da Figura 29(c), indica tanto linhas horizontais quanto linhas verticais (exemplificadas pelas setas brancas) que surgem com maior visibilidade ao longo do eixo de tempo para a faixa de frequências de 0 a 8 kHz. Os comportamentos observados anteriormente na Figura 21 para os ensaios com rebolo CBN, bem como observados na Figura 29 para os ensaios de verificação (óxido de alumínio) estão relacionados com as ferramentas de corte que possuem características distintas uma da outra.

4.2.3 Resultado da aplicação da ROP_{STFT} para os ensaios de verificação do método proposto

Os resultados da ROP_{STFT} correspondentes às amostras (I), (II), (VI) e (VIII) para as profundidades de corte de 5 μm , 10 μm , 35 μm e 55 μm , respectivamente, são mostrados na Figura 30.

Figura 30. Resultado da ROP_{STFT} para os ensaios com o rebolo de óxido de alumínio.



Fonte: Autor

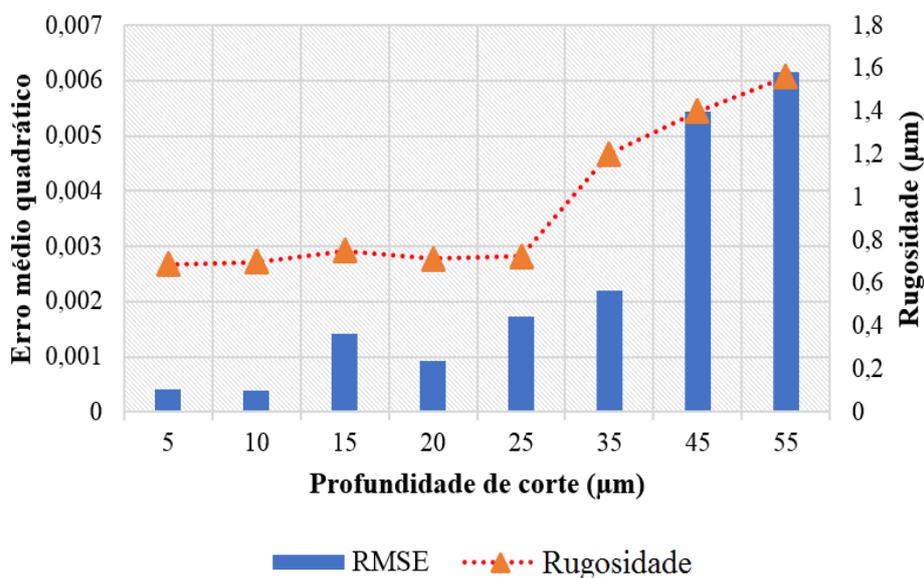
De acordo com a Figura 30, ao comparar-se os valores máximos da ROP_{STFT} para as amostras (II) e (VI), com o valor máximo da ROP_{STFT} obtida para a amostra (VIII), observa-se uma diferença significativa entre esses valores. O pico máximo da ROP_{STFT} calculada para o

teste (VIII) foi 870 % maior do que os valores obtidos na amostra (II) e 388 % maior do que os picos máximos observados para as curvas de ROP_{STFT} obtidas para a amostra (VI). Esse resultado é similar ao resultado obtido anteriormente para os ensaios experimentais, o qual evidência que a metodologia proposta pode ser utilizada para monitorar o *chatter* em diferentes condições de usinagem. Observa-se na Figura 30, que o pico máximo da ROP_{STFT} para a amostra (VIII) é, aproximadamente, 170% menor que o pico máximo da ROP_{STFT} observado anteriormente na Figura 22, para a amostra (VII) do ensaio experimental com rebolo de CBN. Por outro lado, as curvas das ROP_{STFT} de ambos os conjuntos ensaiados apresentam comportamento similares, em termos de tendência, ao aumentar a profundidade de corte.

Destaca-se ainda que, analogamente aos resultados obtidos anteriormente para os ensaios experimentais com rebolo CBN, os valores obtidos de erro médio quadrático e de ângulo de regressão, que são apresentados na Figura 31, Figura 32, Figura 33, e

Figura 34, estão fortemente relacionados com os valores de rugosidade R_a , dureza Vickers e profundidade de corte.

Figura 31- RMSE da ROP_{STFT} e rugosidade em função das profundidades de corte

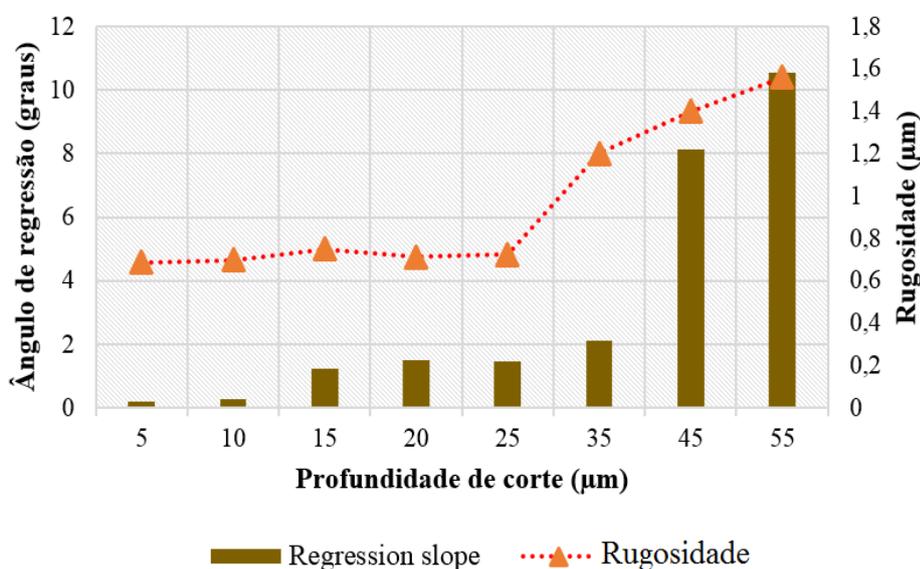


Fonte: Autor

Os valores pontuais de RMSE e de ângulo de regressão obtidos nas Figuras 31, 32, 33 e 34, diferem dos valores obtidos anteriormente para os ensaios com rebolo CBN, entretanto, possuem tendência similar. Percebe-se também que, para os ensaios de verificação, a dureza Vickers nas profundidades de corte de 5 μm até 35 μm manteve-se na faixa de 400 a 600 HV,

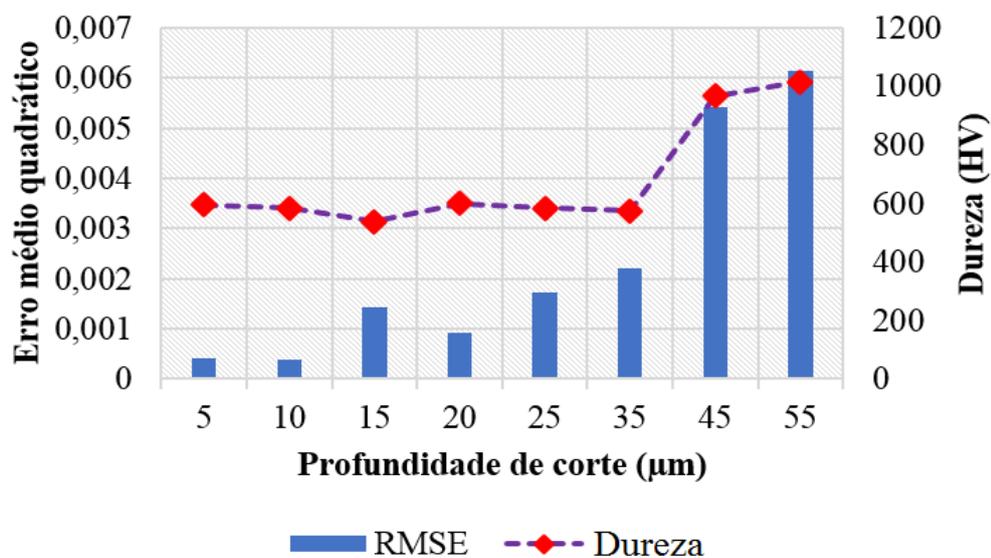
ou seja, similar aos valores de dureza obtidos anteriormente para os ensaios com rebolo CBN nas mesmas profundidades de corte. Por outro lado, os valores de RMSE e do ângulo de regressão tiveram um acréscimo significativo, aumentando a profundidade de corte. Conforme a propagação do chatter, notou-se também para os ensaios de verificação que o RMSE apresentou maior sensibilidade quanto a mudanças de rugosidade e de dureza na superfície das peças. Essa progressão pode ser mais bem analisada na Figura 35, a qual ilustra a FFT das ROP_{STFT} dos ensaios com o rebolo de óxido de alumínio.

Figura 32- Ângulo de regressão da ROP_{STFT} e rugosidade em função das profundidades de corte



Fonte: Autor

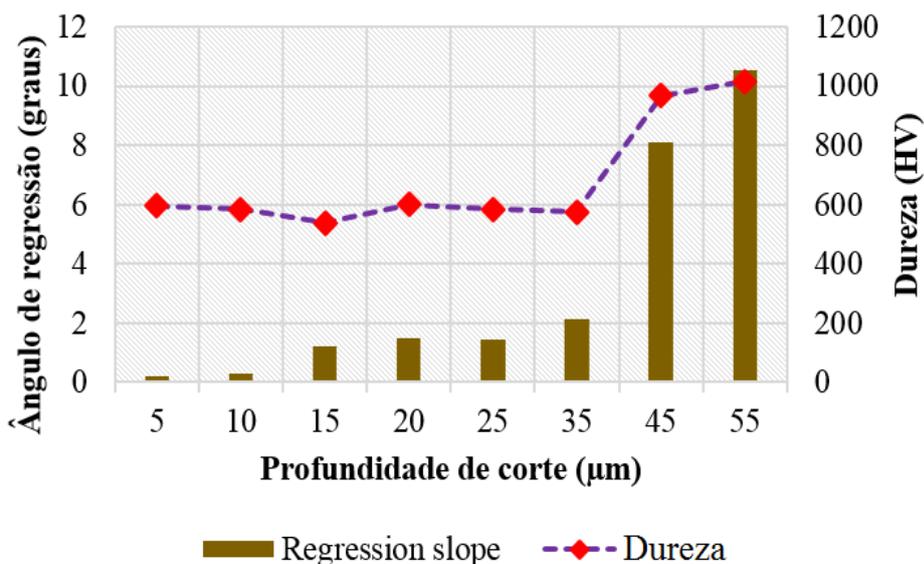
Figura 33- RMSE da ROP_{STFT} e dureza em função das profundidades de corte



Fonte: Autor

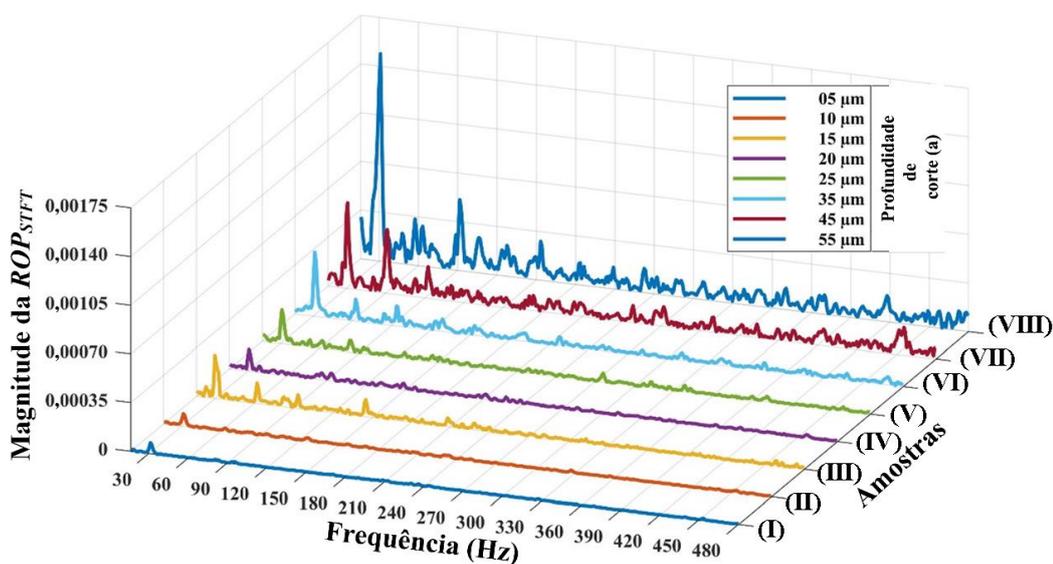
De maneira similar aos resultados obtidos anteriormente para o rebolo CBN, observa-se que na frequência fundamental do espectro encontra-se na faixa de 25 Hz a 35 Hz, com um pico máximo de aproximadamente 29,5 Hz, ou seja, um valor muito próximo da frequência de rotação do rebolo, como observado anteriormente e também demonstrado por (GRADIŠEK et al., 2003).

Figura 34- Ângulo de regressão da ROP_{STFT} e dureza em função das profundidades de corte



Fonte: Autor

Figura 35- Espectros de frequência das ROP_{STFT} para os ensaios com o rebolo de óxido de alumínio



Fonte: Autor

Nota-se na Figura 35, assim como observado anteriormente na Figura 27, que a amplitude da frequência fundamental, para todos os espectros, se manteve em aproximadamente 29,5 Hz e, conforme a propagação do *chatter*, houve um aumento significativo na amplitude dessa frequência e de suas harmônicas. Isso significa que essa técnica pode ser utilizada para analisar e monitorar o *chatter* no processo de retificação do aço ABNT 1045 usando diferentes tipos de rebolos.

Capítulo 5

CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Este capítulo apresenta as conclusões do trabalho, bem como, as perspectivas para pesquisas futuras com base nos resultados obtidos até o presente momento.

5.1 Conclusões

O objetivo do presente trabalho foi correlacionar uma nova técnica de processamento digital de sinais de aceleração com base na STFT e ROP com as variáveis mecânicas de saída, tais como dureza, rugosidade e metalografia, buscando a caracterização do fenômeno de *chatter* durante o processo de retificação tangencial plana de peças de aço. A metodologia utilizada foi baseada em ensaios experimentais de retificação tangencial plana de peças de aço ABNT 1045. Nesse contexto, sinais de aceleração foram coletados durante os experimentos por meio de um acelerômetro piezelétrico fixado na máquina. Para caracterização das peças após a retificação, diversos testes foram realizados, tais como: rugosidade, dureza Vickers e análise metalográfica. Para extração de características, foi realizado o processamento digital dos sinais de aceleração por meio da nova técnica proposta: ROP_{STFT} . Com auxílio da FFT e das métricas RMSE e ângulo de regressão, a técnica proposta foi capaz de detectar com sucesso a ocorrência de *chatter* durante o processo de retificação. O método proposto foi verificado para um rebolo diferente daquele usado nos ensaios experimentais a fim de avaliar a eficácia da técnica para uma situação diferente. A faixa de frequência de 3 kHz a 4 kHz apresentou uma forte correlação com as variáveis de mecânicas de saída do processo (rugosidade, dureza e metalografia), as quais caracterizaram a ocorrência de *chatter*. Assim, foram identificadas por meio da

metalografia, para ambos ensaios de com rebolo CBN e rebolo de óxido de alumínio (ensaios de verificação), alterações microestruturais nas peças devido a ocorrência do *chatter* conforme a profundidade de corte aumentava. As marcas características do *chatter* impressas na superfície das peças seguiram um padrão de repetição temporal regular de aproximadamente 35 ms, o que era equivalente à frequência angular do rebolo de 28 Hz. Esse padrão de comportamento pode ser comprovado por meio do cálculo da ROP_{STFT} em ambos ensaios de com rebolo CBN e rebolo de óxido de alumínio (ensaios de verificação), ou seja, para diferentes situações, obtendo a frequência de 29,5 Hz. Com isso, o erro percentual representado foi de aproximadamente 5,36%.

Por meio do cálculo da STFT, foi possível observar que as frequências que influenciam o processo de retificação, ou seja, as frequências que se mostraram mais expressivas em termos de energia, foram múltiplas da fundamental (de rotação do rebolo). Dentre as frequências mais expressivas pode-se destacar as harmônicas de 1.980 kHz e 2.010 kHz. A métrica ROP trouxe resultados significantes, pois demonstrou que o aumento da razão de potência do sinal de aceleração está diretamente relacionado com as variáveis de mecânicas de saída do processo (rugosidade, dureza e metalografia) que caracterizaram a ocorrência do *chatter*. Dessa forma, ao aumentar a profundidade de corte, foi constatado que ocorria a elevação da força de corte, bem como, um conseqüente aumento na incidência de *chatter*.

O aumento da rugosidade está diretamente relacionado com o aumento da profundidade de corte; porém, observou-se no presente estudo que tanto o ângulo de inclinação das retas de regressão quanto os valores de RMSE acompanharam a tendência dos valores de rugosidade, de modo que se pode inferir que a rugosidade pode ser monitorada aplicando-se a ROP_{STFT} em uma banda de frequência apropriada para os sinais de aceleração. Foi demonstrando ainda, que esta banda de frequência possuía relação direta e significativa com as outras variáveis mecânicas (dureza e metalografia) que caracterizaram o fenômeno de *chatter*. Por outro lado, a dureza das peças manteve-se na faixa de 400 HV a 600 HV em ambos ensaios de com rebolo CBN e rebolo de óxido de alumínio (ensaios de verificação), enquanto o ângulo de inclinação das retas de regressão e os valores de RMSE se elevaram conforme a profundidade de corte aumentava. Logo, infere-se que, ao definir um limiar (que varia de acordo com o ensaio de retificação, tipo de rebolo, etc) de máxima inclinação para a reta de regressão e para o RMSE, é possível evitar que danos ocorram nas peças durante a retificação. Essa inferência demonstra que o método proposto é capaz de auxiliar um sistema de monitoramento online do processo de

retificação, tornando a operação mais robusta, confiável e, conseqüentemente, contribuindo para a otimização dela.

É importante ressaltar que, em aplicações que demandem alta resoluções tanto no tempo quanto na frequência, como por exemplo: a identificação de transitórios, a ROP_{STFT} não é indicada, uma vez que a técnica proposta possui as limitações de resoluções tempo-frequência da STFT. Entretanto, para esses casos de dinâmica muito rápida, a ROP pode ser computada a partir dos coeficientes de transformadas que não possuem essas limitações, como exemplo, a transformada *wavelet*. É importante mencionar também que não pode ser afirmado que as frequências mais expressivas, obtidas a partir da ROP_{STFT} , foram as responsáveis pela detecção do fenômeno de *chatter*, uma vez que as frequências naturais do sistema (conjunto máquina, rebolo e peça) não foram levantadas no presente estudo. Porém, foi constatado uma forte correlação entre a técnica de processamento de sinais proposta (ROP_{STFT}) e as variáveis mecânicas de saída (rugosidade, dureza e metalografia), as quais caracterizaram de fato a ocorrência do *chatter*.

5.2 Trabalhos futuros

Em trabalhos futuros pode-se investigar a eficiência da técnica proposta para monitorar o fenômeno do *chatter* em altas frequências (frequências acima de 20kHz). Ou seja, uma vez que a banda de frequência analisada seja múltipla da frequência de rotação do rebolo e possua relação direta com a ocorrência do fenômeno de *chatter*, sensores de emissão acústica, por exemplo, poderão ser utilizados para o caso de frequências mais altas com base na técnica proposta. Ressalta-se que a abordagem relatada nesse trabalho é inicial e não pode ser generalizada. Para uma verificação mais ampla da técnica proposta, estudos adicionais em outras condições de usinagem se fazem necessários, tal como na análise de textura superficial, por exemplo. Além disso, as frequências naturais do sistema a ser estudado deverão ser levantadas a fim de se obter as frequências de *chatter* quando esse fenomeno ocorrer e correlaciona-las com as frequências obtidas a partir da ROP_{STFT} .

REFERÊNCIAS

ABNT-NBR-ISO-4288. Especificações geométricas de produto (GPS) Rugosidade: Método do perfil. **Regras e procedimentos para avaliação de rugosidade**, 1996.

AGUIAR, P. R. De; DOTTO, F. R. L.; BIANCHI, E. C.; SERNI, P. J. A.; THOMAZELLA, R. Automatic System for Thermal Damage Detection in Manufacturing Process With Internet Monitoring. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 28, n. 1, 2006a.

AGUIAR, P. R.; CRUZ, C. E. D.; PAULA, W. C. F.; BIANCHI, E. C.; THOMAZELLA, R.; DOTTO, F. R. L. Neural network approach for surface roughness prediction in surface grinding. In: The IASTED International Conference on Artificial Intelligence and Applications (AIA 2007), **Anais...**2007.

AGUIAR, P. R.; SERNI, P. J. A.; DOTTO, F. R. L.; BIANCHI, E. C. In-process grinding monitoring through acoustic emission. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 28, n. 1, p. 1–4, 2006b. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1678-58782006000100014&lng=en&nrm=iso&tlng=en>.

AHRENS, M.; DAGEN, M.; DENKENA, B.; ORTMAIER, T. An Active Damping Method for Chatter Vibration in Plunge Grinding Using Electromagnetic Actuators. **Procedia CIRP**, v. 46, p. 197–200, 2016.

AHRENS, M.; FISCHER, R.; DAGEN, M.; DENKENA, B.; ORTMAIER, T. Abrasion monitoring and automatic chatter detection in cylindrical plunge grinding. **Procedia CIRP**, v. 8, p. 374–378, 2013.

ALBIZURI, J.; FERNANDES, M. H.; GARITAONANDIA, I.; SABALZA, X.; URIBE-ETXEBERRIA, R.; HERNÁNDEZ, J. M. An active system of reduction of vibrations in a centerless grinding machine using piezoelectric actuators. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 47, n. 10, p. 1607–1614, ago. 2007.

ALEXANDRE, F. A.; LOPES, W. N.; DOTTO, F. R. L.; FERREIRA, F. I.; AGUIAR, P. R.; BIANCHI, E. C.; LOPES, J. C.; AGUIAR, P. R. Tool condition monitoring of aluminum oxide grinding wheel using AE and fuzzy model. **The Internacional Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 96, p. 67–79, 2018.

ALEXANDRE, F.; LOPES, W.; FERREIRA, F.; DOTTO, F.; AGUIAR, P.; BIANCHI, E. Chatter vibration monitoring in the surface grinding process through digital signal processing of acceleration signal. In: Proceedings of 4th International Electronic Conference on Sensors and Applications, Basel, Switzerland. **Anais**. Basel, Switzerland: MDPI, nov. 2017.

ASTM-E92. Standard test methods for vickers hardness and knoop hardness of metallic

materials. [s.l.] **ASTM International**, West Conshohocken, PA, 2017.

BADGER, J.; MURPHY, S.; O'DONNELL, G. The effect of wheel eccentricity and run-out on grinding forces, waviness, wheel wear and chatter. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 51, n. 10–11, p. 766–774, 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2011.06.006>>.

BZYMEK, M. Z.; SONG, G.; D. HOWES, T.; E. GARRETT, R. **Design of flexible grinding wheel with variable hub thickness**. *Journal of Engineering for Industry* 116(2):260. 1994.

BIANCHI, E. C.; FERNANDES, O. C.; MOGAMI, O.; DA SILVA JR., C. E.; VALARELLI, I. de D.; AGUIAR, P. R. Behavior analysis of conventional grinding wheel in brittle and ductile steels machining. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences**, v. 19, p. 410–425, 1997.

BILISOVÁ, A.; BILOS, J. **Vibration diagnostics**. [s.l.] Investments in education development - European, 2012.

BLACK, J. T.; KOHSER, R. A. **De garmo's materials and processes in manufacturing**. Wiley, 2011.

BOEKEL, A. M. Van. Caracterização dos Ciclos Térmicos em Soldagem Circunferencial de Aços da classe API X100. p. 8, 2013.

BRAND, G. T.; MATHIAS, M. H. Vibrações mecânicas. In: 2010.

BRINKSMEIER, E. H. K.; TONSHOFF, C.; CZENKUSCH, C.; HEINZEL, C. Modelling and optimization of grinding processes. **Journal of Intelligent Manufacturing**, v. 9, n. 4, p. 303–314, 1998.

CHEN, Y.; CHEN, X.; XU, X.; YU, G. Effect of Energy Consumption in the Contact Zone on Machining Condition Optimization in Precision Surface Grinding. **Journal of Mechanical Engineering**, v. 64, n. 4, p. 233–244, 2018.

CHIOU, Y. S.; CHUNG, E. S.; LIANG, S. Y. Analysis of Tool Wear Effect on Chatter. **Science**, v. 37, n. 4, p. 391–404, 1995.

OLIVEIRA JUNIOR, P. C.; RIBEIRO, D. M. S.; MARCHI, M.; RODRIGUES, A. C.; FRANÇA, T. V.; AGUIAR, P. R.; BIANCHI, E. C. STUDY OF SURFACE ROUGHNESS OF GROUND CERAMICS BY VIBRATION SIGNAL ANALYSIS. **ABCM International Congress of Mechanical Engineering**, v. 23, p. 1–10, 2015.

COUEY, J. a.; MARSH, E. R.; KNAPP, B. R.; VALLANCE, R. R. Monitoring force in precision cylindrical grinding. **Precision Engineering**, v. 29, n. 3, p. 307–314, jul. 2005. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0141635905000061>>. Acesso em: 25 ago. 2014.

DING, W.; LINKE, B.; ZHU, Y.; LI, Z.; FU, Y.; SU, H.; XU, J. Review on monolayer CBN superabrasive wheels for grinding metallic materials. **Chinese Journal of Aeronautics**, v. 30,

n. 1, p. 109–134, fev. 2017.

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. 8ª edição ed. [s.l.] Ed. Artliber, 2013.

ENRWISTLE, R.; STONE, B. FUNDAMENTAL ISSUES IN SELF-EXCITED CHATTER IN GRINDING. **Journal of Machine Engineering**, v. 13, n. 3, p. 26–50, 2013.

FABIANO, L. F. G.; RIBEIRO, D. M. S.; OLIVEIRA JUNIOR, P. C.; DA SILVA, K. L. O.; DE AGUIAR, P. R.; BIANCHI, E. C. Low-cost piezoelectric diaphragm evaluation in the monitoring of the flat tangential grinding process. **Revista Materia**, v. 22, n. 4, 2017.

FREIRE, J. M. **Máquinas limadoras e retificadoras**. Editora S. 1975.

FUKUGAUCHI, C. S. F. **Metodologia Para Caracterização Metalográfica De Um Aço Trip Por Microscopia Óptica**. Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá Guaratinguetá. [s.n], 122 f, 2010.

GARRIDO, M. The Feedforward Short-Time Fourier Transform. **IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs**, v. 63, n. 9, p. 868–872, set. 2016.

GONZÁLEZ-BRAMBILA, O.; RUBIO, E.; JÁUREGUI, J. C.; HERRERA-RUIZ, G. Chattering detection in cylindrical grinding processes using the wavelet transform. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 46, n. 15, p. 1934–1938, 2006. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0890695506000253>>.

GRADIŠEK, J.; BAUS, A.; GOVEKAR, E.; KLOCKE, F.; GRABEC, I. Automatic chatter detection in grinding. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 43, n. 14, p. 1397–1403, nov. 2003.

GRAF, W. **Cylindrical grinding**. [s.l.] WST Winterthur Schleiftechnik AG, 2004.

HE, B.; WEI, C.; DING, S.; SHI, Z. A survey of methods for detecting metallic grinding burn. **Measurement**, v. 134, p. 426–439, fev. 2019.

HECKER, R. L.; LIANG, S. Y. Predictive modeling of surface roughness in grinding. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 43, n. 8, p. 755–761, jun. 2003. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0890695503000555>>. Acesso em: 27 ago. 2014.

HEGEMAN, J. **Fundamentals of grinding: surface conditions of ground materials**. 2000. Groningen, 2000.

HOCKAUF, R.; ASADI, E.; DENKENA, B.; GROVE, T.; WURZ, M. Grinding of riblets with “beaver tooth” multi-layer tools. **Procedia CIRP**, v. 71, p. 155–159, 2018.

INASAKI, I. Monitoring and Optimization of Internal Grinding Process. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 40, n. 1, p. 359–362, 1991.

INASAKI, I.; KARPUSCHEWSKI, B.; LEE, H.-S. Grinding Chatter – Origin and Suppression. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 50, n. 2, p. 515–534, 2001.

JIANMING, S.; YONGXIANG, L.; GONG, W.; MENGYING, Z. Milling tool wear monitoring through time-frequency analysis of sensory signals. **2016 IEEE International Conference on Prognostics and Health Management, ICPHM 2016**, p. 1–5, 2016.

KIM, B. S.; LEE, S. H.; LEE, M. G.; NI, J.; SONG, J. Y.; LEE, C. W. A comparative study on damage detection in speed-up and coast-down process of grinding spindle-typed rotor-bearing system. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 187–188, p. 30–36, 2007.

KIM, H.; MELHEM, H. Fourier and Wavelet Analyses for Fatigue Assessment of Concrete Beams. **Experimental Mechanics**, v. 43, n. 3, p. 131–140, 2003.

KJÆR, B. &. Vibration Measurement and Analysis. In: [s.l: s.n.]785.

KULJANIĆ, E.; TOTIS, G.; SORTINO, M. Vibrations and Chatter in Machining: State of the Art and New Approaches. **Advanced Manufacturing Systems and Technology**, v. 15, n. 36, 2008.

KWAK, J.; HA, M. Detection of dressing time using the grinding force signal based on the discrete wavelet decomposition. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 23, n. 1, p. 87–92, 2004.

LACERDA, H. B.; LIMA, V. T. Evaluation of Cutting Forces and Prediction of Chatter Vibrations in Milling. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. XXVI, n. 1, p. 74–81, 2004.

LACH-DIAMANT. **Diamond Dressing Tools Catalogues**.

LI, Z.; DING, W.; SHEN, L.; XI, X.; FU, Y. Comparative investigation on high-speed grinding of TiCp/Ti–6Al–4V particulate reinforced titanium matrix composites with single-layer electroplated and brazed CBN wheels. **Chinese Journal of Aeronautics**, v. 29, n. 5, p. 1414–1424, out. 2016.

LOPES, W. N.; ISAAC FERREIRA, F.; APARECIDO ALEXANDRE, F.; SANTOS RIBEIRO, D. M.; CONCEIÇÃO JUNIOR, P. de O.; DE AGUIAR, P. R.; BIANCHI, E. C. Digital signal processing of acoustic emission signals using power spectral density and counts statistic applied to single-point dressing operation. **IET Science, Measurement & Technology**, v. 11, n. 8, p. 631–636, 21 mar. 2017. Disponível em: <<http://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/iet-smt.2016.0317>>.

MACHADO, A. R.; ABRÃO, A. M.; SILVA, M. B.; COELHO, R. T. **Teoria da usinagem dos materiais**. 3a Edição ed. São Paulo: Editora Blucher, 2015.

MADANCHI, N.; WINTER, M.; HERRMANN, C. Cutting Fluid Drag-out and Exhaust Air in Grinding Processes: Influence on the Eco-efficiency. **Procedia CIRP**, v. 29, p. 329–334, 2015.

MAGGIONI, M.; MARZORATI, E. **In-process quality monitoring via sensor data fusion: chatter control in grinding**. 2013. Politecnico di Milano, 2013.

MALKIN, S.; GUO, C. **Grinding technology: theory and applications of machining with abrasives**. 2^a ed ed. New York: Industrial Press Inc, 2008.

MAMANI, J. D. S. **QUANTIFICAÇÃO por microscopia digital do microconstituente austenita-martensita em aço de baixa liga**. 2013. PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO DE JANEIRO, Rio de Janeiro, Brazil, 2013.

MARINESCU, I.; HITCHINER, M.; UHLMANN, E.; BRIAN ROWE, W.; INASAKI, I. **Handbook of machining with grinding wheels**. 1a ed ed. [s.l.] CRC Press, 2006. v. 20061850

MARTINS, C. H. R.; AGUIAR, P. R.; FRECH, A.; BIANCHI, E. C. **Neural networks models for wear patterns recognition of single-point dresser**. [s.l.] IFAC, 2013. v. 46

MARTINS, C. H. R.; AGUIAR, P. R.; FRECH, A.; BIANCHI, E. C. Tool Condition Monitoring of Single-Point Dresser Using Acoustic Emission and Neural Networks Models. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. 63, n. 3, p. 667–679, 2014. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/6632902/>>.

MCFARLAND, D.; E. BAILEY, G.; D. HOWES, T. **The design and analysis of a polypropylene hub cbn wheel to suppress grinding chatter**. Journal of Manufacturing Science and Engineering 121(1), 1999.

MIRANDA, H. I.; ROCHA, C. A.; OLIVEIRA JUNIOR, P.; MARTINS, C.; AGUIAR, P. R.; BIANCHI, E. C. Monitoring single-point dressers using fuzzy models. In: Procedia CIRP 33, 2015, 281-286.

MOIA, D. F. G.; THOMAZELLA, I. H.; AGUIAR, P. R.; BIANCHI, E. C.; MARTINS, C. H. R.; MARCHI, M. Tool condition monitoring of aluminum oxide grinding wheel in dressing operation using acoustic emission and neural networks. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 37, n. 2, p. 627–640, 2015. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s40430-014-0191-6>>.

MTS-SYSTEMS-CORPORATION. **The Modal Shop - Accelerometer Internal Structure**. Disponível em: <<http://www.modalshop.com/calibration.asp?ID=176>>. Acesso em: 31 mar. 2019.

NSI/ASME-B46.1, “Surface Finish Metrology Tutorial.” **NIST**, pp. 1–153, 1985.

OLIVEIRA, J. F. G. de; DORNFELD, D. A. Application of AE Contact Sensing in Reliable Grinding Monitoring. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 50, n. 1, p. 217–220, 2001.

OLIVEIRA JUNIOR, P.; AGUIAR, P. R.; FOSCHINI, C. R.; FRANÇA, T. V.; RIBEIRO, D. M. S.; FERREIRA, F. I.; LOPES, W. N.; BIANCHI, E. C. Feature extraction using frequency spectrum and time domain analysis of vibration signals to monitoring advanced ceramic in grinding process. **IET Science, Measurement & Technology**, v. 13, n. 1, p. 1–8, 1 jan. 2019

OLIVEIRA JUNIOR, P. C.; MARCUS, D. M.; FRANÇA, T. V.; AGUIAR, P. R.; BIANCHI, E. C. Study of Surface Roughness Of Ground Ceramics By Vibration Signal Analysis. **ABCM International Congress of Mechanical Engineering**, v. 23, p. 1–10, 2015.

OLIVEIRA JUNIOR, P.; CONTE, S.; M.D'ADDONAB, D.; R.AGUIAR, P.; G.BAPTISTA, F.; C.BIANCHI, E.; TETI, R. Damage patterns recognition in dressing tools using PZT-based SHM and MLP networks. **Procedia CIRP**, v. 79, p. 303–307, 2019.

OLIVEIRA JUNIOR, P.; D'ADDONA, D.; AGUIAR, P.; TETI, R. Dressing Tool Condition Monitoring through Impedance-Based Sensors: Part 2—Neural Networks and K-Nearest Neighbor Classifier Approach. **Sensors**, v. 18, n. 12, p. 4453, 16 dez. 2018a. Disponível em: <<http://www.mdpi.com/1424-8220/18/12/4453>>.

OLIVEIRA JUNIOR, P.; MARCHI, M.; AGUIAR, P. R.; BIANCHI, E. C.; FRANCA, T. V. The correlation of vibration signal features in grinding of advanced ceramics. **IEEE Latin America Transactions**, v. 14, n. 9, 2016a.

OLIVEIRA JUNIOR, P.; MARCHI, M.; MARTINS, C. H. R.; D'ADDONA, D.; DE AGUIAR, P. R.; BIANCHI, E. C. Spectral estimation of vibration signal for monitoring the wear of single-point dresser. **Revista Materia**, v. 21, n. 4, 2016b.

OLIVEIRA JUNIOR, P. O.; FERREIRA, F. I.; AGUIAR, P. R.; BATISTA, F. G.; BIANCHI, E. C.; DADDONA, D. M. Time-domain Analysis Based on the Electromechanical Impedance Method for Monitoring of the Dressing Operation. In: *Procedia CIRP 67*, 2018, 319-324.

OLIVEIRA JUNIOR, P.; RUZZI, R. de S.; LOPES, W. N.; ALEXANDRE, F. A.; BAPTISTA, F. G.; AGUIAR, P. R. de; CARLOS, B. E. A New Approach For Dressing Operation Monitoring Using Voltage Signals Via Impedance-Based Structural Health Monitoring. **KnE Engineering**, p. 942–952, 2018c.

OLIVEIRA JUNIOR, P.; SOUZA, R. V; MARTINS, C. H.; AGUIAR, P. R.; FERREIRA, F. I.; BIANCHI, E. C. Wear Monitoring of Single-Point Dresser in Dry Dressing Operation Based on Neural Models. **Proceedings of the IASTED International Conference Modelling, Identification and Control (MIC 2017)**, v. 36, n. Mic, p. 178–185, 2017.

OTTO, A.; RADONS, G. **The influence of tangential and torsional vibrations on the stability lobes in metal cutting**. *Nonlinear Dynamics* 82(4), 2015.

PAPANIKOLAOU, M.; SALONITIS, K. Fractal roughness effects on nanoscale grinding. **Applied Surface Science**, v. 467–468, p. 309–319, fev. 2019.

PATNAIK DURGUMAHANTI, U. S.; SINGH, V.; VENKATESWARA RAO, P. A New Model for Grinding Force Prediction and Analysis. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 50, n. 3, p. 231–240, mar. 2010.

PUERTO, P.; FERNÁNDEZ, R.; MADARIAGA, J.; ARANA, J.; GALLEGO, I. Evolution of surface roughness in grinding and its relationship with the dressing parameters and the radial wear. **Procedia Engineering**, v. 63, n. 1996, p. 174–182, 2013. Disponível em:

<<http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2013.08.181>>.

QUINTANA, G.; CIURANA, J. Chatter in machining processes: A review. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 51, n. 5, p. 363–376, maio 2011.

RABIEY, M.; ZHI WEI, J. L. Simulation of workpiece surface roughness after flat grinding by electroplated wheel. **Procedia CIRP**, v. 77, p. 303–306, 2018.

RIBEIRO, D. M. S.; AGUIAR, P. R.; FABIANO, L. F. G.; D'ADDONA, D. M.; BAPTISTA, F. G.; BIANCHI, E. C. Spectra Measurements Using Piezoelectric Diaphragms to Detect Burn in Grinding Process. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. 66, n. 11, p. 3052–3063, nov. 2017

RIBEIRO, D. M. S.; OLIVEIRA JUNIOR, P. O.; SODÁRIO, R. D.; MARCHI, M.; AGUIAR, P. R.; BIANCHI, E. C. Low-Cost Piezoelectric Transducer Applied To Workpiece Surface Monitoring in Grinding Process. **ABC International Congress of Mechanical Engineering - COBEM**, v. 23, n. 1–10, 2015.

ROWE, W. **Principles of modern grinding technology**. 2a Edição ed. [s.l.] Elsevier, 2014.
SAINT-GOBAIN. **Abrasives company website, internet resource**.

SEXTON, J. S.; HOWES, T. D.; STONE, B. J. The Use of Increased Wheel Flexibility to Improve Chatter Performance in Grinding. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers**, v. 196, n. 1, p. 291–300, jun. 1982.

SHARMA, G. K.; KUMAR, A.; BABU RAO, C.; JAYAKUMAR, T.; RAJ, B. Short time Fourier transform analysis for understanding frequency dependent attenuation in austenitic stainless steel. **NDT & E International**, v. 53, p. 1–7, jan. 2013.

SHIMAUCHI, S.; KUDO, S.; KOIZUMI, Y.; FURUYA, K. On relationships between amplitude and phase of short-time Fourier transform. In: 2017 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), **Anais...IEEE**, mar. 2017.

SIDDHPURA, M.; PAUROBALLY, R. A review of chatter vibration research in turning. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 61, p. 27–47, 2012.

SILVA, L. R.; CORREA, E. C. S.; BRANDÃO, J. R.; ÁVILA, R. F. Behavior analysis of minimum quantity of lubricant - MQL in grinding process. **Journal of Cleaner Production**, 2013.

SNOEYS, R.; BROWN, D. Dominating parameters in grinding wheel and workpiece regenerative chatter. In: Proceedings of the 10th International Machine Tool Design and Research Conference, **Anais...1969**.

SOULAMI, A.; SIL CHOI, K.; LIU, W. N.; SUN, X.; A. KHALEEL, M. **Characterization of the fracture toughness of trip 800 sheet steels using microstructure-based finite element analysis**. SAE Technical Papers. 2009.

STONE, B. **Chatter and machine tools**. Cham: Springer International Publishing, 2014.

SUBHASHREE, R.; PREETHI, C. S.; SUPRIYA, P. Fault distance identification in transmission line using STFT algorithm. In: 2016 International Conference on Computer Communication and Informatics (ICCCI), **Anais...IEEE**, jan. 2016.

SUN, C.; DENG, Y.; LAN, D.; XIU, S. Modeling and predicting ground surface topography on grinding chatter. **Procedia CIRP**, v. 71, p. 364–369, 2018a.

SUN, C.; DUAN, J.; LAN, D.; LIU, Z.; XIU, S. Prediction about ground hardening layers distribution on grinding chatter by contact stiffness. **Archives of Civil and Mechanical Engineering**, v. 18, n. 4, p. 1626–1642, set. 2018b.

SWEENEY, G.; LAMB, E. J.; LIMB, M. E. A rig to investigate both cylindrical and external grinding under steady and vibrational conditions and some preliminary results appertaining to vibrational grinding as a production technique. **International Journal of Machine Tool Design and Research**, v. 10, n. 2, p. 161–178, jun. 1970.

TANAKA, M.; KAMIYA, H. Analysis of the grinding of toner sheets using Vickers hardness as an index of grindability. **Powder Technology**, v. 164, n. 2, p. 82–88, maio 2006.

TANGJITSITCHAROEN, S.; SENJUNTICHAI, A. In-Process Chatter Detection in Surface Grinding. **MATEC Web of Conferences**, v. 28, p. 02001, out. 2015.

TETI, R. A Review of Tool Condition Monitoring Literature Database. **CIRP Annals**, v. 44, n. 2, p. 659–666, 1995.

TETI, R. Advanced IT Methods of Signal Processing and Decision Making for Zero Defect Manufacturing in Machining. **Procedia CIRP**, v. 28, p. 3–15, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.procir.2015.04.003>>.

TETI, R.; JEMIELNIAK, K.; O'DONNELL, G.; DORNFELD, D. Advanced monitoring of machining operations. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 59, n. 2, p. 717–739, jan. 2010. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0007850610001976>>. Acesso em: 16 jul. 2014.

TIAN, W. **Signature analysis of od grinding processes with applications in monitoring and diagnosis**. 2009. Worcester Polytechnic Institute, 2009.

TONSHOFF, H. K.; FRIEMUTH, T.; BECKER, J. C. Process Monitoring in Grinding. In: Annals of the CIRP 51 (2), **Anais...2002**.

TÖNSHOFF, H. K.; PETERS, J.; INASAKI, T.; PAUL, T. Modelling and Simulation of Grinding Processes. **Annals of the CIRP**, v. 41, n. 2, p. 677–688, 1992.

VANDER VOORT, G. **Color metallography vol. 9 asm handbook**. 2004.

VIEIRA, F. Métodos e técnicas de análise de vibração. 2011. p. 1–22.

WANG, W.; LIU, F.; LIU, Z.; YUN, C. Prediction of depth of cut for robotic belt grinding. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 91, n. 1–4, p. 699–

708, jul. 2017.

WANG, Z.; WILLETT, P.; DEAGUIAR, P. R.; WEBSTER, J. Neural network detection of grinding burn from acoustic emission. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 41, n. 2, p. 283–309, 2001.

WARNECKE, G.; BARTH, C. Optimization of the Dynamic Behavior of Grinding Wheels for Grinding of Hard and Brittle Materials Using the Finite Element Method. **CIRP Annals**, v. 48, n. 1, p. 261–264, 1999.

WEBSTER, J.; DONG, W.; LINDSAY, R. Raw acoustic emission signal analysis of grinding process. **CIRP Annals-Manufacturing Technology**, v. 45, n. 1, p. 335–340, 1996.

XU, L. M.; FAN, F.; ZHANG, Z.; CHAO, X. J.; NIU, M. Fast on-machine profile characterization for grinding wheels and error compensation of wheel dressing. **Precision Engineering**, v. 55, p. 417–425, jan. 2019.

YAN, S.; XU, X.; YANG, Z.; ZHU, D.; DING, H. An improved robotic abrasive belt grinding force model considering the effects of cut-in and cut-off. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 37, p. 496–508, jan. 2019.

YAN, Y.; XU, J.; WIERCIGROCH, M. Chatter in a transverse grinding process. **Journal of Sound and Vibration**, v. 333, n. 3, p. 937–953, fev. 2014.

YAN, Y.; XU, J.; WIERCIGROCH, M. Non-linear analysis and quench control of chatter in plunge grinding. **International Journal of Non-Linear Mechanics**, v. 70, p. 134–144, 2015.
YAN, Y.; XU, J.; WIERCIGROCH, M. Influence of Workpiece Imbalance on Regenerative and Frictional Grinding Chatters. **Procedia IUTAM**, v. 22, p. 146–153, 2017.

YAO, Z.; MEI, D.; CHEN, Z. On-line chatter detection and identification based on wavelet and support vector machine. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 210, n. 5, p. 713–719, 2010.

YIZE-MOULD-CO. **Professional production of high precision mould components: Surface Grinding.**

YU, H.; LU, Y.; WANG, J. Study on wear of the grinding wheel with an abrasive phyllotactic pattern. **Wear**, v. 358–359, p. 89–96, jul. 2016.

ZHANG, J.-Z.; TAN, X.-M.; LIU, B.; ZHU, X.-D. Investigation for convective heat transfer on grinding work-piece surface subjected to an impinging jet. **Applied Thermal Engineering**, v. 51, n. 1–2, p. 653–661, mar. 2013.

ZHOU, K.; DING, H. H.; WANG, W. J.; WANG, R. X.; GUO, J.; LIU, Q. Y. Influence of grinding pressure on removal behaviours of rail material. **Tribology International**, fev. 2019.

ANEXOS

ANEXO 1 – Curva de calibração do acelerômetro e módulo amplificador

~ *Calibration Certificate* ~
Per ISO 10063-21

Model Number: 353B03
 Serial Number: 134267
 Description: ICP® Accelerometer Method: Back-to-Back Comparison (AT401-3)
 Manufacturer: PCB

Calibration Data

Sensitivity @ 100.0 Hz	10.06 mV/g	Output Bias	8.8 VDC
	(1.026 mV/m/s ²)	Transverse Sensitivity	0.8 %
Discharge Time Constant	0.8 seconds	Resonant Frequency	55.4 kHz

Sensitivity Plot

Temperature: 74 °F (23 °C) Relative Humidity: 52 %

Data Points

Frequency (Hz)	Dev. (%)	Frequency (Hz)	Dev. (%)	Frequency (Hz)	Dev. (%)
10.0	0.3	300.0	0.1	7000.0	3.1
15.0	-0.2	500.0	0.2		
30.0	-0.2	1000.0	0.2		
50.0	-0.2	3000.0	0.8		
REF. FREQ.	0.0	5000.0	2.0		

Mounting Surface: Stainless Steel w/Silicone Grease Coating Fastener: Stud Mount Fixure Orientation: Vertical
 Acceleration Level (ms²): 100 g (981 m/s²)
 *The acceleration level may be limited by shaker displacement at low frequencies. If the load level cannot be obtained, the calibration system uses the following formula to set the vibration amplitude: Acceleration Level (g) = 4.00 x (Fmag)²
 *The gravitational constant used for calculations by the calibration system is: 1 g = 9.80665 m/s²

Condition of Unit

As Found: n/a
 As Left: New Unit, In Tolerance

Notes

1. Calibration is NIST Traceable thru Project 822/277342 and PTB Traceable thru Project 1254.
2. This certificate shall not be reproduced, except in full, without written approval from PCB Piezotronics, Inc.
3. Calibration is performed in compliance with ISO 9001, ISO 10012-1, ANSI/NCSL Z540-1-1994 and ISO 17025.
4. See Manufacturer's Specification Sheet for a detailed listing of performance specifications.
5. Measurement uncertainty (95% confidence level with coverage factor of 2) for frequency ranges tested during calibration are as follows: 5-9 Hz; +/- 2.0%, 10-99 Hz; +/- 1.5%, 100-1999 Hz; +/- 1.0%, 2-10 kHz; +/- 2.5%.

Technician: Joseph Rogerson Date: 06/23/09

ACCREDITED
CALIBRATION CERT #188200

PCB PIEZOTRONICS™
VIBRATION DIVISION
Headquarters: 3425 Walden Avenue, Depew, NY 14043
Calibration Performed at: 10869 Highway 903, Halifax, NC 27839
TEL: 888-684-0013 FAX: 716-645-3886 www.pcb.com

4848 - 31106186-01.07

Page 1 of 1

~Certificate of Calibration~

Model Number: 482B11	PCB Control #: QC214/QC184/ QC198/CA514
Serial Number: 1977	Calibration Date: 07/28/2009
Description: Signal Conditioner	Recalibration Date:
Test Procedure: AT-104-9	Calibration Technician: Gene Siejak <i>GS</i>
Temperature: 74°F 23°C	Relative Humidity: 50%

PASS

Volts	Current (mA)	Gain X1	Gain X10	Gain X100
24.0	4.03	1.00	10.00	99.92

As Received; N/A

As Left: New unit in tolerance.

Special Notes:

This document certifies that the equipment referenced above meets published specifications. The calibration procedure is in compliance with ISO 10012-1, and former MIL-STD-45662A and is traceable to NIST. Measurement uncertainty (95% confidence level wicoverage factor of 2) for scale factors is +/- 0.2%.

This certificate may not be reproduced, except in full, without written approval of
PCB Piezotronics, Inc.

Calibration Station 21 3331633148.72



PCB PIEZOTRONICS™

3425 Walden Avenue Depew, New York, USA 14043-2495

For any questions concerning this certificate, please call PCB at (716) 684-0001 and ask for an application engineer.