



**Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica**

DANILO MARCUS SANTOS RIBEIRO

**UTILIZAÇÃO DE DIAFRAGMAS PIEZELÉTRICOS PARA O MONITORAMENTO
DA QUALIDADE SUPERFICIAL DE PEÇAS DE AÇO NA RETIFICAÇÃO PLANA**

**Bauru
2017**

DANILO MARCUS SANTOS RIBEIRO

**UTILIZAÇÃO DE DIAFRAGMAS PIEZELÉTRICOS PARA O MONITORAMENTO
DA QUALIDADE SUPERFICIAL DE PEÇAS DE AÇO NA RETIFICAÇÃO PLANA**

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

Área de concentração: Automação

Linha de pesquisa: Mecatrônica

Orientador: Prof. Titular Paulo Roberto de Aguiar

**Bauru
2017**

Ribeiro, Danilo Marcus Santos.

Utilização de diafragmas piezelétricos para o monitoramento da qualidade superficial de peças de aço na retificação plana / Danilo Marcus Santos Ribeiro, 2017

81 f.

Orientador: Paulo Roberto de Aguiar

Dissertação (Mestrado)-Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru, 2017

1. Diafragma piezelétrico. 2. Retificação. 3. Emissão Acústica. 4. Queima. I. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia. II. Título.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Bauru

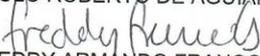


ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE Mestrado de DANILO MARCUS SANTOS RIBEIRO, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.

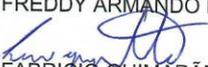
Aos 25 dias do mês de maio do ano de 2017, às 14:00 horas, no(a) Anfiteatro da Seção Técnica de Pós-graduação da FEB, reuniu-se a Comissão Examinadora da Defesa Pública, composta pelos seguintes membros: Prof. Dr. PAULO ROBERTO DE AGUIAR - Orientador(a) do(a) Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP, Prof. Dr. FREDDY ARMANDO FRANCO GRIJALBA do(a) Departamento de Sistemas Integrados (DSI) / Universidade de Campinas, Prof. Dr. FABRÍCIO GUIMARÃES BAPTISTA do(a) Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP, sob a presidência do primeiro, a fim de proceder a arguição pública da DISSERTAÇÃO DE Mestrado de DANILO MARCUS SANTOS RIBEIRO, intitulada **UTILIZAÇÃO DE DIAFRÁGMAS PIEZELÉTRICOS PARA O MONITORAMENTO DA QUALIDADE SUPERFICIAL DE PEÇAS DE AÇO NA RETIFICAÇÃO PLANA**. 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. FREDDY ARMANDO FRANCO GRIJALBA



Prof. Dr. FABRÍCIO GUIMARÃES BAPTISTA

Dedico a minha família que me apoia em tudo que podem para que eu seja feliz.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Aquele que é digno de toda Honra e Glória. Jesus, meu Senhor e Salvador.

Agradeço profundamente a minha querida e amada mãe que sempre me incetivou a estudar e acreditou em mim, mesmo quando eu havia desistido.

Agradeço a minha amada esposa pela paciência e ajuda que sempre precisei. Você sempre esteve ao meu lado me apoiando e acreditando que tudo daria certo.

Ao Professor Titular Paulo Roberto de Aguiar, gostaria de agradecer profundamente pela oportunidade logo no início do mestrado, de poder acompanhar e me tornar parte da equipe de pesquisa do LADAPS. Agradeço pela paciência quando houve momentos difíceis, por toda orientação e ensino durante todo este tempo.

Ao Professor Titular Eduardo Carlos Bianchi, pela disposição e alegria em ensinar e orientar. Obrigado pela sinceridade e por sempre buscar um meio para contribuir.

Ao meu grande amigo Everaldo Freitas, por te me convidado a fazer o mestrado. E por sempre me apoiar e me aconselhar quando precisei. Não posso deixar de agradecer pelos momentos de aprendizado.

Ao Hamilton, sem você esse Mestrado não teria o mesmo desempenho. Ao Rodrigo Ruzzi, pelo tempo que passou tirando dúvidas. Ao professor Gilberto pelo precioso tempo e conhecimento.

Aos professores e funcionários da Faculdade de Engenharia de Bauru – FEB por todo ensino e atendimento prestado durante esse tempo.

Aos meus amigos de laboratório Marcelo Marchi, Rafael Sodário e Pedro Oliveira. Vocês foram simplesmente fantásticos em tudo.

Aos meus amigos do mestrado, Wenderson Nascimento e Felipe Alexandre, por todo apoio e por participar de várias etapas de ensaios. Sua ajuda foi fundamental. Aos amigos Ricardo Zanni, Luiz Gilli, Fabio Isaac por toda contribuição e apoio.

Ao meu amigo Luiz Henrique Pettenazzi e a Rita Andrade pelo amor e preciosos conselhos.

Agradeço a todos que de alguma forma contribuíram e apoiaram.

É muito melhor arriscar coisas grandiosas, alcançar triunfos e glórias, mesmo expondo-se a derrota, do que formar fila com os pobres de espírito que nem gozam muito nem sofrem muito, porque vivem nessa penumbra cinzenta que não conhece vitória nem derrota.

- Theodore Roosevelt

RESUMO

Pesquisadores tem avaliado um grande número de técnicas de monitoramento para controlar a condição superficial de peças. O diafragma piezolétrico de titanato zirconato de chumbo (PZT) é utilizado em muitos campos de pesquisa, mas estes sensores não são comuns no monitoramento dos processos de usinagem. Este trabalho propõe um método para monitorar a condição superficial da peça (usinagem normal e queima) usando um diafragma piezolétrico e técnicas de extração de características. Uma comparação é feita com o sensor convencional de emissão acústica (EA), que é um sensor amplamente utilizado no monitoramento dos processos de usinagem. Os ensaios de usinagem foram realizados em uma máquina de retificação de superfícies utilizando aço ABNT 1045 e rebolo CBN, onde os sinais foram coletados a 2 MHz. As peças foram cuidadosamente analisadas por meio de inspeção visual, rugosidade superficial, medidas de dureza e análises metalográficas. Estudo do conteúdo de frequência de ambos os sinais foi realizado com o objetivo de selecionar bandas estreitamente relacionadas com a condição da superfície da peça. Filtros digitais foram aplicados aos sinais puros e as características foram extraídas e analisadas. Os valores RMS (Root Mean Square) filtrados nas faixas selecionadas para ambos os sensores apresentaram um ajuste melhor à regressão linear, o que é altamente desejável para estabelecer um limiar para detecção da queima e implementação em um sistema de monitoramento. Além disso, os resultados do índice RMSD (Root Mean Square Deviation) mostraram um excelente comportamento para o monitoramento da queima decorrente do processo de retificação para ambos os sensores. O método foi validado usando um rebolo diferente, o que mostra claramente sua eficácia e demonstra o uso potencial do diafragma piezolétrico de baixo custo para o monitoramento da queima no processo de retificação.

Palavras chave: Diafragma piezolétrico, retificação, emissão acústica, queima, rugosidade, monitoramento.

ABSTRACT

Researchers have evaluated a great number of monitoring techniques in order to control the surface condition of ground parts. Piezoelectric diaphragm of lead zirconate titanate (PZT) are used in many fields, but these sensors are not common in the monitoring of machining processes. This paper proposes a method for monitoring the workpiece surface condition (normal grinding and burn) by using a piezoelectric PZT diaphragm transducer and feature extraction techniques. A comparison is made with conventional acoustic emission sensor, which is a traditional sensor in the monitoring of machining processes. Grinding tests were performed in a surface-grinding machine with SAE 1045 steel and CBN grinding wheel, where the signals were collected at 2 MHz. The workpieces were thoroughly analysed through visual inspection, surface roughness and hardness measurements, and metallographic analyses. Study on the frequency content of both signals was carried out in order to select bands closely related to the workpiece surface condition. Digital filters were applied to the raw signals and features were extracted and analyzed. The RMS values filtered in the selected bands for both sensors presented a better fitting to the linear regression, which is highly desirable for setting a threshold to detect burn and implementing into a monitoring system. Also, the RMSD index results show an excellent behavior for grinding burn monitoring for both sensors. The method was validated by using a different grinding wheel, which clearly shows its effectiveness and demonstrates the potential use of the low-cost piezoelectric diaphragm for grinding burn monitoring.

Keywords: Piezoelectric diaphragm, grinding, acoustic emission, burn, surface roughness, monitoring.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	vi
RESUMO	viii
ABSTRACT	ix
SUMÁRIO	x
LISTA DE ILUSTRAÇÕES	xii
LISTA DE TABELAS	xiv
LISTA DE ABREVIACÕES E SÍMBOLOS	xv
Capítulo 1 - INTRODUÇÃO	1
1.1 MOTIVAÇÃO E JUSTIFICATIVA	1
1.2 OBJETIVO	3
1.3 PUBLICAÇÕES OBTIDAS	4
Capítulo 2 - REVISÃO DA LITERATURA	6
2.1 PROCESSO DE RETIFICAÇÃO	6
2.1.1 <i>Rebolo</i>	7
2.1.2 <i>Profundidade corte (a)</i>	9
2.1.3 <i>Velocidade de corte (v_s)</i>	9
2.1.4 <i>Velocidade de peça (v_w)</i>	9
2.1.5 <i>Dressagem</i>	10
2.1.6 <i>Rugosidade</i>	11
2.1.7 <i>Dureza Vickers</i>	12
2.1.8 <i>Espessura equivalente de corte</i>	13
2.2 MONITORAMENTO E PROCESSAMENTO DE SINAIS	13
2.2.1 <i>Monitoramento do processo de retificação</i>	13
2.2.2 <i>Processamento de sinais no monitoramento do processo de retificação</i>	17
2.2.2.1 <i>Valor Médio Quadrático (RMS)</i>	18
2.2.2.2 <i>Transformada Discreta de Fourier (DFT)</i>	18
2.2.2.3 <i>Índices de danos estruturais</i>	19
2.3 MONITORAMENTO DE DANOS TÉRMICOS NA RETIFICAÇÃO	20
2.4 DIAFRAGMAS PIEZELÉTRICOS.....	24
Capítulo 3 -MATERIAIS E MÉTODOS	26
3.1 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS E BANCO DE ENSAIOS.....	26
3.2 AVALIAÇÃO SUPERFICIAL DA PEÇA	30

3.3	PROCESSAMENTO DIGITAL DE SINAIS	31
3.4	VERIFICAÇÃO DO MÉTODO	33
Capitulo 4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO		36
4.1	RESULTADOS DOS ENSAIOS PARA O AÇO ABNT 1045 E REBOLO CBN	36
4.1.1	<i>Inspeção visual da superfície da peça</i>	<i>36</i>
4.1.2	<i>Rugosidade superficial</i>	<i>37</i>
4.1.3	<i>Metalografia e medição de dureza vickers</i>	<i>38</i>
4.1.4	<i>Seleção de bandas de frequência</i>	<i>39</i>
4.1.5	<i>RMS dos sinais filtrados em bandas escolhidas</i>	<i>42</i>
4.1.6	<i>Índices RMSD e CCDM</i>	<i>45</i>
4.2	RESULTADOS DOS ENSAIOS PARA O AÇO ABNT 1045 E REBOLO ÓXIDO DE ALUMÍNIO	46
4.2.1	<i>Inspeção visual da superfície da peça</i>	<i>47</i>
4.2.2	<i>Medição da rugosidade superficial</i>	<i>47</i>
4.2.3	<i>Metalografia e medição de dureza vickers</i>	<i>48</i>
4.2.4	<i>Seleção de bandas de frequência</i>	<i>50</i>
4.2.5	<i>RMS dos sinais filtrados em bandas escolhidas</i>	<i>53</i>
4.2.6	<i>Índices RMSD e CCDM</i>	<i>54</i>
Capitulo 5 –CONCLUSÕES.....		56
5.1	SUGESTÃO PARA OS PRÓXIMOS TRABALHOS.	57
Referências.....		58

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 - Elementos da retificação plana (MARINESCU <i>et al.</i> , 2007).	7
Figura 2.2- Rugosidade Média Aritmética (MALKIN, 1989).	11
Figura 2.3- (a) Base quadrada; (b) Angulação; (c) Indentação Vickers (FERREIRA, 2004).	12
Figura 2.4- Sistema de monitoramento (TÖNSHOFF; FRIEMUTH; BECKER, 2002)	15
Figura 3.1- Diagrama esquemático dos procedimentos experimentais.	26
Figura 3.2- Representação esquemática dos ensaios e coleta dos sinais.	27
Figura 3.3- Sensor PZT modelo 7BB-35-3 e sensor de EA.	28
Figura 3.4- Banco de ensaios para ensaios experimentais.	28
Figura 3.5- Modelo das medições de dureza realizadas na superfície das amostras.	31
Figura 3.6 – Região selecionada do sinal puro	32
Figura 3.7- Esquema do processamento digital.	35
Figura 4.1- Condição superficial das peças usinadas em diferentes profundidades de corte.	36
Figura 4.2- Valores médio de rugosidade para cada peça.	37
Figura 4.3- Metalografia para boa condição (a) e queima (b), peças 2 e 6, respectivamente.	38
Figura 4.4- Dureza vickers para boa condição (a) e queima (b), peças 2 e 6, respectivamente.	39
Figura 4.5- Espectro de (emissão acústica) EA.	40
Figura 4.6- Espectro de (diafragma piezelétrico) PZT.	40
Figura 4.7 - Ampliação das bandas de frequência para sinal EA: (a) 94–100 kHz e (b) 129-135 kHz.	41
Figura 4.8 - Ampliação das bandas de frequência para sinal PZT: (a) 50–65 kHz and (b) 130–140 kHz.	41
Figura 4.9 - RMS para sinal de EA: (a) sem filtro, (b) com filtro.	43
Figura 4.10 - RMS para sinal de PZT: (a) sem filtro, (b) com filtro.	44
Figura 4.11- RMSD obtido de EA na banda 94-100 kHz.	45
Figura 4.12- RMSD obtido de PZT na banda 130-140 kHz.	46
Figura 4.13 - Condição superficial das peças usinadas em diferentes profundidades de corte.	47

Figura 4.14- Valores médio de rugosidade para cada peça.	48
Figura 4.15- Metalografia para boa condição (a) e queima (b), peças 2 e 8, respectivamente.	49
Figura 4.16- Dureza vickers para boa condição (a) e queima (b), peças 2 e 8, respectivamente.	49
Figura 4.17- Espectro de (emissão acústica) EA.	50
Figura 4.18- Espectro de (diafragma piezoelétrica) PZT.	51
Figura 4.19 - Ampliação das bandas de frequência para sinal EA: (a) 38–46 kHz e (b) 60-80 kHz.	52
Figura 4.20 - Ampliação das bandas de frequência para sinal PZT: (a) 27–42 kHz and (b) 107–117 kHz.	52
Figura 4.21 - RMS para sinal de EA: (a) sem filtro, (b) com filtro.	53
Figura 4.22 - RMS para sinal de PZT: (a) sem filtro, (b) com filtro.	54
Figura 4.23- RMSD obtido de EA na banda 38-46 kHz.	55
Figura 4.24- RMSD obtido de PZT na banda 107-117 kHz.	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Condições dos ensaios para o aço ABNT 1045 com rebolo CBN30
Tabela 2: Condições dos ensaios para o aço ABNT 1045 com rebolo óxido34

LISTA DE ABREVIACOES E SÍMBOLOS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CBN	Nitreto Cúbico de Boro
CCDM	Métrica do desvio do coeficiente de correlação
DFT	Transformada Discreta de Fourier
EA	Sensor de emissão acústica
FFT	Transformada Rápida de Fourier
PZT	Diafragma piezelétrico
RMS	Valor médio quadrático
RMSD	Desvio da raiz média quadrática.
HV	Dureza Vickers

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_s	Velocidade de corte do rebolo [m/s]
V_w	Velocidade da peca [m/s]

CAPITULO 1 - INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÃO E JUSTIFICATIVA

Processos de usinagem são amplamente utilizados para a fabricação de componentes que requerem grande precisão e/ou acabamento de alta qualidade na superfície. O monitoramento dos processos de usinagem pode representar economia e praticidade devido ao auxílio em identificar diversos problemas decorrentes do processo como, por exemplo, desgaste de ferramenta, rugosidade superficial e anomalias enquanto o metal é cortado, o que pode provocar danos e outros tipos de problemas (LAURO *et al.*, 2014).

O monitoramento funciona como uma forma de controle para garantir a qualidade das peças e ele visa obter informações relevantes para aperfeiçoar o processo de retificação em termos de tempo e custo do processo. Por meio do monitoramento, é possível reconhecer o estado atual do processo no intuito de interferir sobre o mesmo, para que desse modo, a qualidade esperada seja obtida (LAURO *et al.*, 2014; NAKAI *et al.*, 2012).

Na indústria metal-mecânica a retificação ocorre usualmente no final do processo para acabamento de um componente de precisão. Este processo é utilizado para fabricação de peças dos mais diversos tipos de materiais exigindo resultados como baixa rugosidade superficial, controle dos erros dimensionais e de forma da peça, máxima vida útil da ferramenta; com tempo e custos mínimos (EUZEBIO *et al.*, 2012).

A retificação é um processo de fabricação complexo que sofre influência de muitos fatores como, por exemplo, a peça de trabalho, o rebolo, a máquina de retificação, e os parâmetros do processo. Dentre esses fatores, o rebolo utilizado é um fator distintivo que diferencia o processo de retificação de outros processos de usinagem. A topografia do rebolo bem como as condições em que ele é preparado tem grande influência sobre o desempenho do processo de retificação (MARCHI *et al.*, 2015).

Os custos acarretados por danos na peça de trabalho são extremamente altos, pois todos os processos que foram realizados, inclusive a própria retificação, são perdidos quando uma parte da peça é danificada neste estágio. Os danos mais comuns decorrentes do processo de retificação podem ser queima, trincas e/ou tensões residuais indesejáveis. No caso dos metais, a principal causa de danos é a excessiva entrada térmica na superfície usinada quando ocorre o contato entre a peça e o rebolo (EUZEBIO *et al.*, 2012).

A necessidade de reduzir custos e aumentar a qualidade das peças produzida requer a implementação de sistemas mais adequados em ambientes industriais. Assim sendo, o controle dos danos causados no processo de retificação é de interesse direto de todas as indústrias que dependem desse processo, para que desse modo seja alcançada uma taxa mais baixa de perdas de peças e consequentemente um custo mais baixo de produção (AGUIAR *et al.* 2002).

A retificação automatizada e inteligente é utilizada na indústria, nos processos de fabricação, para produzir peças com alta qualidade de acabamento e geometria. A rugosidade superficial é um dos fatores mais importante para avaliar a qualidade das peças. Ela é influenciada diretamente pelo processo de retificação e é amplamente usada como fator essencial para inspeção em várias aplicações industriais como a produção e processamento de metais, semicondutores, cerâmicas, papel e plástico (DHANASEKAR *et al.*, 2008; SAMHOURI; SURGENOR, 2005).

Métodos indiretos de monitoramento desse processo são utilizados para avaliar a qualidade superficial e estrutural das peças usinadas. O processo envolve a coleta, processamento e análise de dados relacionados com a peça usinada em várias condições experimentais e interpretação dos resultados para as aplicações em situações reais (ELANGO VAN *et al.*, 2011), e contam com alguns sinais sensoriais, tais como forças, energia, vibração e emissão acústica que se correlacionam com a condição da ferramenta (ELANGO VAN *et al.*, 2011; MARTINS *et al.*, 2014; SUTOWSKI; PLICHTA, 2006).

Na região de corte, isto é, do contato entre a peça e o rebolo, existem várias variáveis de processo, tais como forças de corte, vibrações, emissão acústica, ruído, temperatura, acabamento superficial, etc., que são influenciadas pelo estado da ferramenta de corte e pelas condições do processo de remoção do material. As variáveis que são prospectivamente eficazes para o monitoramento do processo de usinagem podem ser medidas pela aplicação de sensores físicos apropriados (TETI *et al.*, 2010; ZENG; FORSSBERG, 1994).

Sinais de emissão acústica e potência de corte combinados têm sido utilizados com sucesso na determinação de parâmetros indicativos da queima. Estes sinais tratados e combinados possibilitam a implementação de um sistema de monitoramento “*on-line*” da queima, otimizando o processo de retificação (AGUIAR *et al.* 2002). A técnica que emprega o sensor de EA e o uso de RMS se apresenta como uma importante ferramenta para o monitoramento do processo de retificação, pois permite correlacionar força, queima da peça, condição da ferramenta e rugosidade superficial (WANG *et al.*, 2001) (MARTINS *et al.*, 2014).

Além do sensor de EA, amplamente utilizado para monitoração de sinais, encontra-se obtendo grande destaque o diafragma piezométrico, que vem sendo aplicado em sistemas SHM

para a detecção de danos estruturais utilizando a técnica de Impedância Eletromecânica (EMI) (DE ALMEIDA; BAPTISTA; DE AGUIAR, 2015) e outras técnicas. Muitas pesquisas mostraram sucesso na aplicação de sensores e atuadores piezoelétricos para o monitoramento da integridade estrutural, ainda mais que tais sensores possuem um baixo custo tornando-o bastante interessante para aplicação (OOIJEVAAR et al., 2012) (CASTRO et al., 2016) (LIANG; WANG, 2015).

Esses diafragmas piezoelétricos são geralmente utilizados em dispositivos de sinalização de áudio, devido à estrutura simples constituída por um disco cerâmico piezoelétrico aderido a uma placa de latão. Eles estão disponíveis em muitos fabricantes, como Murata Manufacturing (Nagaokakyo-shi, Kyoto, Japão), e são facilmente comprados a um baixo custo, variando de centavos a alguns dólares, dependendo do tamanho e fabricante (CASTRO et al., 2016).

A importância deste trabalho se deve pelo fato do uso do diafragma piezoelétrico (PZT) para monitorar a condição superficial de peças. O sensor PZT possui um baixo custo quando comparado com a sensores convencionais de EA. Além disso, estudo no domínio da frequência foi realizado para os sinais do PZT, de modo que sejam encontradas bandas de frequência que estejam relacionadas com as condições de uma peça normal e uma peça com queima. O uso dos índices RMSD (desvio da raiz média quadrática) e CCDM (métrica do desvio do coeficiente de correlação) é novo, quando aplicado aos sensores passivos PZT nesta pesquisa. Finalmente, a avaliação da condição da peça é realizada por ensaios experimentais utilizando dois importantes rebolos e peças de trabalho de aço ABNT 1045 para garantir a eficiência do método proposto.

1.2 OBJETIVO

O objetivo principal deste trabalho foi propor um método para o monitoramento da condição superficial de peças de aço na retificação, por meio do uso de diafragma piezoelétrico e técnicas de extração de características relativas à condição normal e de queima. Um sensor de emissão acústica também foi aplicado no intuito de ser comparado com o diafragma para validar a sua aplicação no monitoramento. Este trabalho também propôs o processamento digital dos sinais utilizando análise no domínio da frequência, RMS e RMSD, além de outras técnicas, no intuito de inferir uma correlação entre as condições das peças e os sinais coletados e, por conseguinte, estabelecer um limiar para a queima, tornando este método capaz de detectar, por meio do diafragma piezoelétrico, a queima no processo de retificação.

1.3 PUBLICAÇÕES OBTIDAS

- ❖ RIBEIRO, D. M. S., MARCHI, M., OLIVEIRA Jr, C. P., SODÁRIO, R. D., AGUIAR, P. R., BIANCHI, C. E. Low-cost piezoelectric transducer applied to work-piece surface monitoring in grinding process. In: ABCM International Congress of Mechanical Engineering, COBEM 2015, Rio de Janeiro- RJ. v. 23, p. 1-10.

- ❖ OLIVEIRA Jr, C. P., RIBEIRO, D. M. S., MARCHI M., RODRIGUES, A. C., AGUIAR, P. R., BIANCHI, C. E. Monitoramento da retificação de cerâmicas avançadas por sinais de vibração e rugosidade. In: Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, COBEF, 2015, Salvador BA, v. 8, p.1-10.

- ❖ OLIVEIRA Jr, C. P., RIBEIRO, D. M. S., MARCHI, M., RODRIGUES, A. C., AGUIAR, P. R., BIANCHI, C. E. Study of surface roughness of ground ceramics by vibration signal analysis. In: ABCM International Congress of Mechanical Engineering, COBEM 2015, Rio de Janeiro- RJ. v. 23, p. 1-10.

- ❖ OLIVEIRA Jr, C. P., MARCHI, M., RIBEIRO, D. M. S. AGUIAR, P. R., BIANCHI, E. C. Estudo da qualidade superficial de peças de cerâmicas retificadas por sinais de vibração e corrente elétrica do motor de acionamento. In: XXII Simpósio de Engenharia de Produção, SIMPEP 2015, Bauru, SP, v. 22, p.1-10.

- ❖ ALEXANDRE, F. A.; SOUZA, R. V. C. G. ; CONCEIÇÃO, P. O. ; RUZZI, R. S. ; RIBEIRO, D. M. S. ; AGUIAR, P. R. ; Bianchi, E. C. Estudo da resposta em frequência de sinais provenientes de cápsulas piezelétricas para o monitoramento do desgaste do dressador. IX Congresso Nacional de Engenharia Mecânica - CONEM, v. 1, p. 1-8, 2016.

- ❖ LOPES, W. N.; RIBEIRO, D. M. S. ; Junior, P.O.C. ; Martins, C.H.R. ; Ruzzi, R.S. ; Ferreira, F.I. ; Aguiar, P.R. ; Bianchi, E.C. . Investigação do conteúdo harmônico do sinal de emissão acústica quando da dressagem de rebolos de óxido de alumínio com dressador de ponta única. CONEM 2016 - Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, v. 16, p. 1, 2016.

- ❖ OLIVEIRA Jr, P. C.; AGUIAR, P.R. ; BIANCHI, E.C. ; MARCELO MARCHI ; FRANCA, T. V. ; RIBEIRO, D. M. S. . Monitoramento da retificação de cerâmicas avançadas por sinais de vibração e rugosidade. *Maquinas e Metais*, v. 52, p. 28-37, 2016.

Artigo aceito para publicação no IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement (A1 – Engenharias IV):

- ❖ RIBEIRO, D. M. S.; AGUIAR, P. R.; FABIANO, L. F. G.; D’ADDONA, D. M.; BAPTISTA, F.G.; BIANCHI, C. E. Spectra measurements using piezoelectric diaphragms to detect burn in grinding process.

CAPITULO 2 - REVISÃO DA LITERATURA

2.1 PROCESSO DE RETIFICAÇÃO

A retificação é um processo de usinagem que emprega um rebolo abrasivo girando em alta velocidade cujo objetivo é remover o material a partir de um material mais macio. Na indústria moderna, tecnologia de retificação é altamente desenvolvida de acordo com os requisitos particulares do produto e do processo (MARINESCU *et al.*, 2007).

Diferente de outros processos de usinagem, tais como torneamento e fresamento, a ferramenta utilizada na retificação apresenta uma superfície de corte não definida e isso ocorre pelo fato dos grãos abrasivos usados na produção do rebolo não apresentarem arestas de corte regulares. Desse modo, os parâmetros e as configurações aplicadas na retificação são fatores que podem afetar o resultado do processo em termos de qualidade. (KWAK; HA, 2004; REN *et al.*, 2009).

Segundo MARINESCU *et al.*, (2007), o processo de retificação é composto basicamente por seis elementos: máquina-ferramenta, que neste caso é a retificadora; o rebolo; a peça a ser retificada; fluido de corte; atmosfera, isto é, a interação dos gases ambiente com os elementos de retificação e os resíduos provenientes da operação de retificação. Por ser um processo de fabricação complexo, é influenciado por diversos fatores como rebolo, a peça a ser usinada, a máquina retificadora, bem como os parâmetros envolvidos, por exemplo, profundidade de corte e velocidade da peça. Dentre os diversos fatores citados, o rebolo é o que diferencia este dos demais processos de usinagem. O fato é que a topografia do rebolo e as suas características exercem grande influência sobre o desempenho do processo, que pode ser verificado pelas forças de corte, consumo de energia, temperaturas na zona de corte e até mesmo pelo acabamento da superfície da peça (NGUYEN; BUTLER, 2008). De acordo com WARREN LIAO (2010), devido à enorme complexidade decorrente do processo, a escolha de uma série de variáveis é o que dificulta a seleção dos parâmetros ideais para realizar uma retificação do modo mais eficiente.

A retificação é utilizada no acabamento de peças no intuito de se obter produtos com superfícies avançadas e normalmente corresponde à etapa final da cadeia de usinagem, fazendo com que falhas não sejam toleradas nesse processo. É importante citar que para garantir os resultados da retificação é necessário uma alta capacitação do operador e um extenso estudo sobre a dinâmica do processo (MALKIN, S.; GUO, 2008) (DURGUMAHANTI *et al.*, 2010).

Os elementos básicos de uma operação de retificação plana estão ilustrados na Figura 2.1.

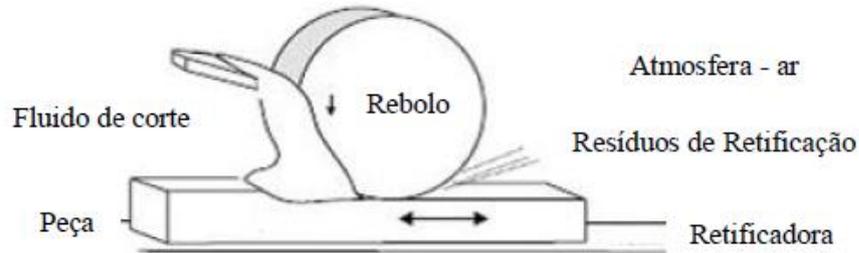


Figura 2.1 - Elementos da retificação plana (MARINESCU *et al.*, 2007).

Há vários tipos de operações de retificação e as diferenças encontradas referem-se à forma do rebolo e da peça a ser retificada, como também pelo movimento cinemático da peça e do cabeçote (MALKIN; GUO, 2008). A interação rebolo-peça no processo de retificação tipicamente possui os seguintes parâmetros de entrada: taxa de remoção, velocidade de corte do rebolo e da peça, agressividade e tempo de centelhamento (*spark-out*) (KING; HAHN, 1992).

Uma vez que uma redução dos custos de produção e um aumento da qualidade das peças são esperados, a detecção automática de avarias no processo de retificação tornou-se de grande interesse dos pesquisadores e das indústrias. Por intermédio da utilização de uma grande variedade de sensores, o monitoramento do processo de retificação representa um passo importante para a redução da baixa qualidade das peças retificadas e, portanto, uma redução de custos (AXINTE *et al.*, 2004).

Um dos problemas mais críticos no processo de retificação é a implementação de um sistema inteligente para detecção automática da queima superficial das peças. A queima ocorre durante o contato do rebolo com a peça, quando a quantidade de energia gerada na zona de contato gera um aumento de temperatura suficiente para produzir uma mudança de fase no material. Tal ocorrência pode ser observada visualmente pela cor azulada na superfície da peça (AGUIAR *et al.*, 2002).

2.1.1 Rebolo

O rebolo é a ferramenta de corte utilizada no processo de retificação. Caracteriza-se como uma ferramenta de corte múltipla, formada por grãos, aglomerantes e porosidades que

cortam os materiais, raspando-os com suas arestas cortantes, ou seja, é composto basicamente de grãos abrasivos de elevada dureza que efetuam o corte, presos a uma matriz aglomerante de um material menos duro (MALKIN, S.; GUO, 2008).

Atualmente, existe uma grande utilização de rebolos de CBN no mercado, em indústrias tais como: as automobilísticas; aeroespaciais; de componentes de motores; etc. Embora o rebolo de CBN tenha um elevado custo inicial, quando comparado com rebolos de óxido de alumínio, sua aplicação é compensada desde que o custo operacional total seja reduzido (OLIVEIRA; SILVA; BIFFI, 2002).

Os grãos abrasivos podem ter como elemento de composição o óxido de alumínio - Al_2O_3 (rebolo convencional) ou grãos de CBN - Nitreto de Boro Cúbico presente nos rebolos superabrasivo, entre outros, unidos por meio de um ligante. Os ligantes mais encontrados no mercado são o resinoide vitrificado, convencional e o resinoide de alto desempenho.

Enquanto o diamante é a substância conhecida como de mais elevada dureza (6000 kg/mm^2), o CBN possui a segunda maior dureza conhecida, a qual é aproximadamente 4500 kg/mm^2 . No entanto, o maior interesse da utilização do CBN como abrasivo é por ele ser mais estável quimicamente que o diamante na presença do ferro. O CBN também é muito mais refratário do que o diamante, e se apresenta estável até aproximadamente 1300°C , enquanto o diamante é estável até 800°C (SHAW, 1996).

Uma vez que o grão superabrasivo de CBN é conhecido pela sua alta resistência ao desgaste, a retificação com o mesmo pode também proporcionar menores temperaturas de operação, resultando em menor tendência de danos térmicos e redução nas indesejáveis tensões residuais.

Na retificação com rebolos superabrasivo, os grãos de CBN - Nitreto de Boro Cúbico apresentam grande resistência ao desgaste, ocasionando menores forças de corte, temperaturas e valores inferiores de rugosidade média. O alto desempenho deste material abrasivo é devido à sua extrema dureza e resistência ao desgaste, aliado à sua alta resistência e sua temperatura e condutibilidade térmica (LI *et al.*, 2016).

Com isso, os danos térmicos gerados na retificação com rebolos super abrasivos de CBN são, geralmente, inferiores aos que ocorrem na retificação com rebolos convencionais (MALKIN, 1985). Utilizando-se rebolos de CBN, a queima da peça raramente ocorre e as tensões residuais são predominantemente de compressão (TÖNSHOFF e GRABNER, 1984). Isto indica que menores temperaturas de retificação são geradas na região de corte. Estas são parcialmente atribuídas à menor energia gasta para a retificação com rebolos de CBN, devido à maior dureza de seus grãos (KOHLI; GUO; MALKIN, 1995).

2.1.2 Profundidade corte (a)

Pode ser definida como a penetração do rebolo na peça que está sendo retificada. É medida como sendo a espessura equivalente de material removido por passagem do rebolo na peça (MARINESCU *et al.*, 2007). A profundidade de corte é denominada por “ a ” dada em [μm] - que é tomada perpendicularmente à direção de avanço da peça ou do rebolo (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2003). Para valores elevados da profundidade de corte ocorre um aumento das forças de corte, as quais são responsáveis pelas deformações causadas entre o rebolo e a peça. Esse parâmetro também deve exercer influência no acabamento dos componentes retificados (LINKE, 2008).

2.1.3 Velocidade de corte (v_s)

O deslocamento de um ponto sobre a superfície de corte do rebolo, por exemplo, um grão, por uma variação de tempo determina a sua velocidade de corte, ou velocidade periférica do rebolo. A partir dessa velocidade pode-se determinar a vida do rebolo, já que ela implica diretamente na alteração da capacidade de remoção dos grãos abrasivos e no acabamento das peças (MALKIN, 2008). A velocidade de corte pode ser expressa pela equação (1) (GRAF, 2004):

$$v_s = \frac{\pi \cdot d_s \cdot n_s}{60 \cdot 1000} \text{ [m/s]} \quad (1)$$

Sendo:

d_s [mm] é o diâmetro externo do rebolo.

n_s [rpm] a rotação do rebolo.

2.1.4 Velocidade de peça (v_w)

Na retificação plana, a velocidade da peça assemelha-se a velocidade da mesa, sendo normalmente expressa em metros por minuto (MARINESCU *et al.*, 2007). Com o aumento da velocidade da peça ocorre uma elevação na taxa de remoção de material, assim, geram-se

cavacos com alta espessura e, conseqüentemente, aumenta a força sobre cada grão do rebolo. Dessa forma, os valores de força tangencial de corte são elevados (GRAF, 2004).

2.1.5 Dressagem

A dressagem é uma operação conjunta de perfilamento e afiação dos rebolos que são usados na retificação (SENA, 2007) (MARINESCU *et al.*, 2007). Ela é concebida para gerar uma topografia particular na superfície de corte do rebolo (JACKSON; ROBINSON; CHEN, 2007). A dressagem é considerada diretamente responsável pela topografia dos rebolos, sendo este um dos fatores de maior importância na formação de cavaco durante os processos de retificação. A vida do rebolo, o tempo do ciclo de retificação e a qualidade final da peça são os itens mais afetados pela operação de dressagem (MARINELLI; COELHO; OLIVEIRA, 1998). Entender a operação de dressagem é um fator crítico para a obtenção de ótimo processo de retificação (MARINESCU *et al.*, 2007).

Após o uso do rebolo na retificação, o mesmo não se encontra em condições adequadas para nova utilização, pois pode perder sua afiação e não estar numa forma geométrica desejada, além dos poros estarem impregnados de cavaco, de modo que a absorção de novos cavacos com sucessiva remoção de material é dificultada. Isto resulta em um atrito excessivo e, conseqüentemente, uma geração de calor muito grande para a peça.

Segundo HASSUI (2002), a definição do momento correto de dressagem do rebolo é fundamental no processo de retificação. Isso pode ser feito de maneira conservadora, ou seja, antes do fim da vida do rebolo. Desta forma, ocorrerá um desperdício de abrasivo e, principalmente, um aumento do tempo de processo pelo maior número de dressagens realizadas. Vale lembrar que o tempo de corte na retificação normalmente é bastante curto em função dos baixos volumes de material removido. Por outro lado, uma utilização do rebolo além da sua vida poderá acarretar na rejeição da peça retificada. Caso isso ocorra, o custo aumentará significativamente, já que as peças quando chegam neste estágio possuem alto valor agregado.

Para que durante a dressagem seja possível a remoção de material do rebolo, os dressadores devem ser mais duros que o material do rebolo. Em decorrência disso, para a dressagem de rebolos convencionais são empregadas ferramentas diamantadas. Além da dressagem do rebolo por corte, também é usual se empregar uma sobrecarga de retificação sobre o rebolo, produzindo um efeito de remoção de material de sua superfície. Este procedimento permite que a retificação de materiais extremamente duros, sob condições extremas de usinagem, pro-

duza grandes forças de cortes nos contornos dos grãos abrasivos. Estas forças fazem com que os grãos abrasivos sem capacidade de corte sejam desprendidos e expulsos do ligante.

2.1.6 Rugosidade

A rugosidade é representada por micro irregularidades geométricas da superfície do material usinado. Segundo HECKER; LIANG (2003), a rugosidade se destaca como um dos mais usados parâmetros de qualificação da topografia de superfícies retificadas. Normalmente é definido pelos valores de rugosidade média aritmética, R_a , rugosidade média quadrática, R_q , e máximo pico ou vale de rugosidade, R_t . Além do tipo de medida realizado, a direção na qual ela é feita também influi no seu valor. Geralmente, a rugosidade medida na direção perpendicular ao corte tem maior valor que da linha longitudinal.

Sua importância nos processos de usinagem reside no fato de que o acabamento superficial de uma peça pode afetar significativamente a resistência dos componentes quando são submetidos a ciclos de fadiga. A rugosidade média é mostrada na Figura 2.2.

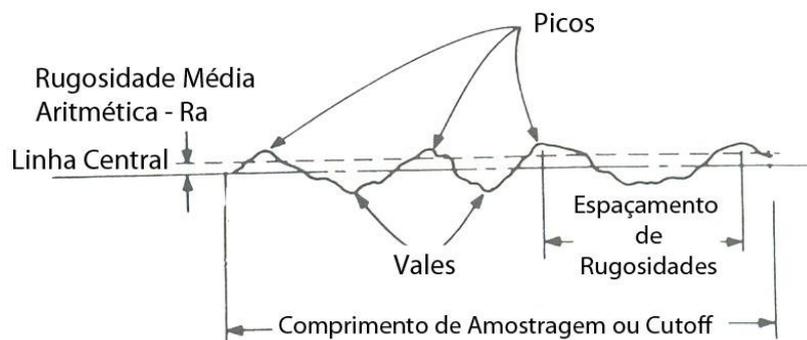


Figura 2.2- Rugosidade Média Aritmética (MALKIN, 1989).

A qualidade superficial é dividida em dois aspectos, de acordo com (MALKIN, S.; GUO, 2008):

- Integridade superficial - influenciada pelas solicitações mecânicas e térmicas que a peça é submetida;
- Textura da superfície - caracterizada pela topografia da peça e está associada à rugosidade.

Há várias formas de diminuir a rugosidade de uma peça. Dentre essas, pode-se enumerar a escolha do tipo de rebolo, das condições de dressagem (afiação), dos parâmetros de usi-

nagem (a taxa de remoção de material, o tempo de centelhamento, entre outros) e do tipo de fluido de corte.

RAMESH *et. al.* (2001) afirmaram que há uma tendência de redução da rugosidade com o aumento da velocidade de corte. Já para HUANG; LIU, (2003), a velocidade de corte não afeta significativamente a rugosidade, quando o modo de remoção dominante é por fratura frágil.

2.1.7 Dureza Vickers

A dureza é uma propriedade mecânica que avalia a resistência à deformação plástica localizada. Esta propriedade é obtida por meio da aplicação de uma carga por meio de um indentador sobre a superfície do material. Dividindo o valor da carga aplicada pela área residual projetada de indentação obtém-se o valor da dureza.

O ensaio de dureza é amplamente aplicado em pesquisas e no ramo industrial, por ser um método barato e de rápida execução, sendo possível utilizar aparelhos portáteis e de fácil manuseio. Existem vários testes qualitativos para a análise de dureza de materiais, entre os quais se pode citar a dureza Rockwell, a Brinell, a Knoop e a Vickers.

A dureza por microindentação Vickers é obtida com um penetrador de diamante em forma de pirâmide, de base quadrada, com um ângulo de 136° entre as faces opostas (Figura 2.3a, Figura 2.3b e Figura 2.3c). É utilizada carga menor que 1kgf, a qual produz uma impressão em forma de losango regular (FERREIRA, 2004).

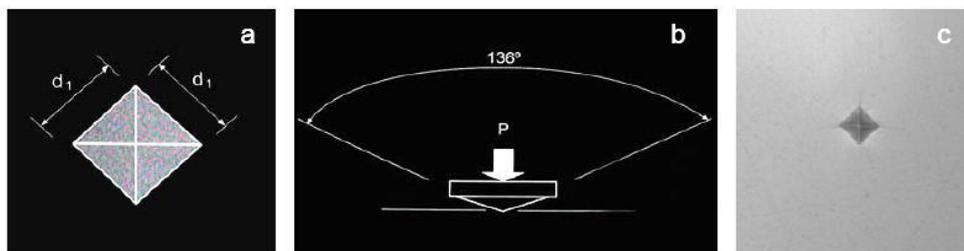


Figura 2.3- (a) Base quadrada; (b) Angulação; (c) Indentação Vickers (FERREIRA, 2004).

Durante a retificação, dependendo da temperatura alcançada no processo de corte pode ocorrer alterações de dureza na peça. A perda de dureza superficial é um fenômeno complexo, relacionado com o revenimento da estrutura martensítica e com a difusão de átomos de carbono, sendo dependente da temperatura e do tempo de corte do processo (MALKIN, S.; GUO, 2008).

2.1.8 Espessura equivalente de corte

Segundo MALKIN; GUO, (2008), a espessura equivalente de corte (h_{eq}) [μm] representa a espessura da camada de material que é removida pelo rebolo numa volta completa. Trata-se de um parâmetro que permite quantificar uma condição de trabalho a partir das variáveis velocidade de corte v_s e velocidade da peça v_w , em determinada profundidade de corte a , sendo, portanto, muito importante no processo de retificação. Por se tratar de uma medida relativa à severidade das condições de corte, a espessura equivalente de corte correlaciona muito bem não somente as forças de retificação e energia, mas também outras características de desempenho, como a rugosidade e o desgaste do rebolo. A espessura equivalente é expressa pela Equação (2):

$$h_{eq} = \frac{v_w}{v_s} \cdot a \quad (2)$$

2.2 MONITORAMENTO E PROCESSAMENTO DE SINAIS

O sistema de monitoramento tem como função processar e interpretar os valores de tensão obtidos pelos sensores determinando o estado do processo. A função do sistema de controle é manipular as variáveis, como velocidade e profundidade de corte para adequar o processo (LANDERS *et al.*, 1999).

Para o monitoramento e controle da operação de usinagem, é necessário conhecer o modelo matemático do processo, sendo este baseado na física das interações do sistema. Porém, devido à complexidade das interações presentes no processo, dificilmente consegue-se obter modelos precisos. Assim, métodos de computação como rede neural artificial e algoritmos genéticos podem ser utilizados para modelar o processo, baseando-se em dados coletados (DAVIM, 2008).

2.2.1 Monitoramento do processo de retificação

Sistemas de monitoramento e controle de processos de usinagem buscam atender a necessidade da indústria, minimizando e/ou auxiliando a atuação do homem nas máquinas ferramentas (BLUM *et al.*, 1998; INASAKI *et al.*, 2001; DINIZ *et al.*, 2003). Além disso, representa economia e praticidade devido a ajuda em identificar desgaste da ferramenta, rugosidade

da superfície e anomalias durante o corte de metal que podem causar desperdício, danos e outros fatores prejudiciais (LAURO *et al.*, 2014).

Muitas estatísticas e ferramentas para monitorar o processo de retificação têm sido utilizadas, como o RMS, a Razão Constante de Alarme Falso (CFAR), desvio de valor médio (MVD), *kurtosis*, *skewness*, modelos de rede neural, modelos *fuzzy*, entre outros (WANG *et al.*, 2001) (MARTINS *et al.*, 2014) (NAKAI *et al.*, 2015) (AGUIAR, BIANCHI, OLIVEIRA, 2002) (MIRANDA *et al.*, 2010) (CRUZ *et al.*, 2012).

Todos os métodos que são utilizados para o monitoramento do processo devem ser capazes de determinar as quantidades quando o processo abrasivo está a decorrer ou durante os tempos auxiliares, por exemplo, tempo de manipulação da peça de trabalho ou tempo de ciclo de dressagem. Do mesmo modo, os sensores para a caracterização da camada abrasiva devem trabalhar enquanto a ferramenta estiver em funcionamento. Os sensores utilizados para o monitoramento do processo de retificação devem se enquadrar dentro das condições limites do processo e dos parâmetros do ambiente (por exemplo, condições de refrigeração, fluxo de cavacos e temperatura) (TÖNSHOFF; FRIEMUTH; BECKER, 2002).

Ainda segundo TÖNSHOFF; FRIEMUTH; BECKER (2002), de forma geral, as tarefas de um sistema de monitoramento ocorrem conforme esquematizado na Figura 2.4. Primeiramente, deve ser capaz de detectar malfuncionamentos inesperados que possam acontecer no processo. Segundo, informações relacionadas aos parâmetros do processo, que são obtidas com o sistema de monitoramento, podem ser utilizadas para otimizar o processo.

KER; LANDERS, 2002). Tendo em vista uma efetiva redução de custos, juntamente com o aumento da qualidade das peças produzidas, a aplicação de sistemas mais inteligentes em ambientes industriais e, portanto, o controle dos danos causados no processo, é crucial e de interesse direto de todos os setores dependentes desse processo.

A retificação automática e inteligente é utilizada por indústrias para a produção de peças com alta qualidade de acabamento e geometria. A rugosidade é um dos fatores mais importantes para se avaliar a qualidade da peça durante o processo de acabamento, pois a qualidade da superfície afeta as características funcionais da peça, tais como a resistência à fratura, fadiga e o atrito (SAMHOURI; SURGENOR, 2005).

O monitoramento inteligente e o controle do processo de retificação e a identificação da rugosidade da peça tem três importantes funções:

- Detectar problemas na rugosidade da peça que podem ocorrer durante o processo de retificação;
- Prover informação para otimizar e controlar o processo em tempo real;
- Contribuir para estabelecer um banco de dados, necessário à determinação das melhores condições de operação (SAMHOURI; SURGENOR, 2005).

Muitos dos fatores que afetam as tolerâncias dimensionais também afetam tolerâncias de forma. Contudo, os erros de forma mais significativos são usualmente associados com desgaste excessivo do rebolo, especialmente quando se retifica formas em seções transversais com canais ou quinas. Melhores formas de controle geralmente necessitam de um rebolo de baixo-desgaste, mas com isso é esperado maiores forças (MALKIN, 1989).

O monitoramento deve ser capaz de detectar qualquer mau funcionamento que possa ocorrer no processo de retificação, além de formar uma base de dados com as informações sobre os parâmetros obtidos do sistema de monitoramento com o objetivo de aperfeiçoar o processo. O sistema de monitoramento possibilita a correlação dos sinais entre a entrada e a saída do processo, estabelecendo assim um banco de dados sobre um processo específico (TONSHOFF *et al.*, 2002).

A implementação de um sistema de monitoramento requer o questionamento de quais grandezas são mais adequadas para o processo a ser monitorado, o que depende de vários critérios. Primeiramente é importante conhecer os objetivos do sistema, isto é, quais as funções a serem realizadas. Devem ser consideradas as variações do processo de retificação, sendo estas de natureza interna, externa ou de superfície, o tipo de material usinado, a sensibilidade em relação à integridade da superfície e a qualidade geométrica a ser atingida.

Diversas propriedades do sistema de medição, tais como a aplicabilidade, a sensibilidade, a robustez, o comportamento durante o tempo e o tempo de resposta, são características importantes que precisam ser analisadas (TONSHOFF *et al.*, 2002). As principais grandezas utilizadas no monitoramento de processos de retificação citadas por TONSHOFF *et al.* (2002) são: força, potência, aceleração (vibração), emissão acústica e temperatura.

Para captar as informações das grandezas durante o processo são utilizados sensores. Inúmeros tipos de sensores estão disponíveis para o monitoramento de fenômenos de usinagem. Os principais utilizados no monitoramento de processos de retificação são de força, potência, emissão acústica, temperatura e posição (TETI *et al.*, 2010).

Ainda conforme, TETI *et al.*, (2010), as técnicas de medição para o monitoramento de operações de usinagem, tradicionalmente, foram categorizadas em duas abordagens:

- Medição direta: onde o valor real da variável a ser medida dá um alto grau de precisão. Este método tem sido amplamente utilizado em laboratórios de pesquisa (devido às limitações práticas de acesso durante a usinagem, iluminação e uso de fluido de corte) para apoiar as investigações de fenômenos mensuráveis fundamentais durante os processos de usinagem;
- Medição indireta: onde o valor real é posteriormente deduzido usando correlações empiricamente determinadas. É menos preciso do que o método direto, mas também é menos complexo e mais adequado para aplicações práticas.

De acordo com TÖNSHOFF; FRIEMUTH; BECKER (2002), o sinal de EA para avaliação do comportamento do processo de usinagem tem sido muito utilizado, monitorando contato entre rebolo e peça, colisões, dentre outros, sendo um dos métodos de monitoramento mais estudado nos últimos anos. O uso de sensores de EA no processo de retificação permite o monitoramento contínuo, sem a necessidade de interferência ou interrupção durante o corte.

2.2.2 Processamento de sinais no monitoramento do processo de retificação

O processamento de um sinal consiste em se aplicar transformações a um sinal analógico ou digital, no intuito de eliminar ruídos e extrair características do mesmo. Algumas das operações normalmente utilizadas no processamento de sinais são: ampliação, filtragem, transformações matemáticas, integração de sinais e conversão de analógico para digital.

Alguns pesquisadores como BIFANO; YI, (1992), BERKOVITS; FANG, (1995) e DOTTO *et al.*,(2004), utilizaram técnicas de aquisição de dados e processamento de sinais em

estudos relacionados ao monitoramento do processo de retificação. A seguir são descritos alguns elementos e técnicas que fazem parte do estudo de sinais realizados por meio do processamento digital.

2.2.2.1 Valor Médio Quadrático (RMS)

O valor médio quadrático (RMS ou *Root Mean Square*) do sinal de emissão acústica ainda tem sido o principal parâmetro estudado em pesquisas sobre queimas na retificação, em um intervalo de frequência previamente selecionado. Este sinal é um parâmetro satisfatório devido aos sinais ricos em ondas sonoras, transportando grande quantidade de informações úteis (AGUIAR *et al.*, 2006). Atualmente, o uso de sinais de emissão acústica é empregado com sucesso por pesquisadores para o monitoramento de operações de engenharia como a retificação (WARREN LIAO, 2010; WEGENER *et al.*, 2011).

O valor RMS (de um sinal puro ou bruto) s pode ser expresso pelas equações (3) e (4), que apresentam as formas contínua e discreta, respectivamente (NILSSON; RIEDEL, 2003).

$$s_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t+T} s^2(t) \cdot dt} \quad (3)$$

$$s_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N s^2(i)} \quad (4)$$

Sendo:

T : intervalo do tempo para o cálculo do valor RMS;

t_0 : ponto de início de análise no tempo para cálculo do valor RMS;

N : número discreto de dados do sinal s no intervalo de tempo T ;

$s(t)$: sinal puro ou bruto;

s_{RMS} : valor RMS.

2.2.2.2 Transformada Discreta de Fourier (DFT)

Quando se deseja obter uma melhor compreensão das ocorrências nos dados, utiliza-se o espectro de frequência, que fornece em muitos casos, a informação detalhada sobre a condi-

ção de sinais que não pode ser obtida no domínio tempo. O conteúdo de frequências pode ser obtido pela aplicação de métodos e ferramentas como as transformadas (SMITH, 1989).

Uma das ferramentas mais poderosas encontrada na área de processamento digital de sinais é a transformada discreta de Fourier (DFT ou *Discrete Fourier Transform*). É um procedimento matemático usado para determinar o conteúdo harmônico ou de frequência de um sinal discreto no tempo.

Embora a DFT seja um dos procedimentos matemáticos mais diretos para determinar o conteúdo de frequência de um sinal discreto, ela é ineficaz devido à lentidão do processo. Uma forma eficiente de se calcular o conteúdo harmônico do sinal é utilizar a Transformada Rápida de Fourier (FFT ou *Fast Fourier Transform*) (YANG; CHEN, 2002).

A FFT é um método de computar a Transformada Discreta de Fourier de maneira eficiente, com menor custo computacional e o menor tempo de processamento (LYONS, 2004). Uma análise do espectro pode ser baseada na seleção de faixas de frequência que caracterizam a variável física que se deseja controlar ou estimar no processo (ZENG; FORSSBERG, 1994).

2.2.2.3 Índices de danos estruturais

O processo de retificação pode causar dano às peças e, em muitos casos, esses danos não poderiam ser detectados por meio do uso de métodos que utilizam sinais de excitação em baixas frequências.

Os índices de caracterização de danos são amplamente utilizados no monitoramento da integridade estrutural juntamente com a técnica de impedância eletromecânica (EMI). Os índices mais comuns são o RMSD (*root mean square deviation* – desvio da raiz média quadrática) e o CCDM (*correlation coefficient deviation metric* – métrica do desvio do coeficiente de correlação), que foram utilizados com a técnica de EMI no processo de retificação para detecção de queima (MARCHI *et al.*, 2015).

Um dos índices mais empregados em monitoramento de integridade estrutural é o RMSD de acordo com SUN *et al.*(1995).

Conforme ALMEIDA; BAPTISTA; AGUIAR (2015), o índice RMSD é baseado em uma norma euclidiana e muitas variações deste índice podem ser encontradas na literatura. Neste trabalho, o índice RMSD foi calculado como apresentado na Equação (5):

$$RMSD = \sum_{k=\omega_I}^{\omega_F} \sqrt{\frac{[X_D(k) - X_H(k)]^2}{X_H^2(k)}} \quad (5)$$

Sendo que os subscritos H e D indicam as condições para a peça sem dano e com dano, respectivamente, em que $X_H(k)$ e $X_D(k)$ são as assinaturas dos espectros de frequência da estrutura sob condições intactas e com danos, respectivamente, e são determinadas em uma faixa de frequência k que vai de ω_I (frequência inicial) a ω_F (frequência final).

O índice CCDM é baseado no coeficiente de correlação (MARCHI *et al.*, 2015) ALMEIDA; BAPTISTA; AGUIAR (2015), e é calculado de acordo com a Equação (6).

$$CCDM = 1 - \frac{\sum_{\omega_i}^{\omega_f} [X_H(k) - \bar{X}_H][X_D(k) - \bar{X}_D]}{\sqrt{\sum_{\omega_i}^{\omega_f} [X_H(k) - \bar{X}_H]^2} \sqrt{\sum_{\omega_i}^{\omega_f} [X_D(k) - \bar{X}_D]^2}} \quad (6)$$

Sendo que $X_H(k)$ e $X_D(k)$ são as assinaturas definidas anteriormente, e \bar{X}_H e \bar{X}_D são as médias das assinaturas sob condições intactas e danificadas, respectivamente, na mesma faixa de frequência.

2.3 Monitoramento de danos térmicos na retificação

De acordo com SAMHOURI; SURGENOR (2005), o monitoramento do processo de retificação serve para detectar problemas, fornecer informações para o aprimoramento e controle do processo e, por último, contribuir para o estabelecimento de parâmetros que são necessários para determinar as melhores condições de funcionamento.

O monitoramento se dá por meio do uso de diversos sensores, por meio dos quais os sinais são coletados para análises a fim de tomadas de decisão. O sensor de EA já é amplamente utilizado, contudo há uma demanda em garantir a qualidade e reduzir o custo de produção, fazendo com que pesquisadores busquem diversas alternativas.

WEBSTER *et al.*, (1994) utilizaram emissão acústica para detectar queima no processo de retificação. O resultado apresentado mostrou que a amplitude do RMS do sinal tinha correlação com a condição de queima da peça. Em 1994, HUNDT *et al.* usaram várias fontes de EA para correlacionar com alguns fenômenos decorrentes do processo de retificação e com isso aplicar uma abordagem de monitoramento.

GRIFFITHS, MIDDLETON e WILKIE (1996) utilizaram dispersão de luz para detec-

tar irregularidade como rugosidade no monitoramento do processo de retificação. Os autores detectaram que a intensidade da luz e o teor de cor estão relacionados com o acabamento da superfície das peças usinadas.

HUNDT; KUSTER; REHSTEINER, (1997) criaram um modelo com base em características extraídas do processo de retificação, e que foram obtidos a partir da análise dos sinais de EA no domínio da frequência. Eles concluíram que para a monitorização e processamento de sinais, a utilização de circuitos analógicos pode ser mais vantajosa do que os métodos digitais devido ao seu preço comparativamente baixo e ao seu desempenho a alta velocidade.

AGUIAR *et al.* (2002) estabeleceu o parâmetro DPO para detecção de danos na retificação. Este parâmetro consiste da relação entre o desvio padrão do sinal RMS de emissão acústica e a potência máxima de corte por passada do rebolo.

O valor médio quadrático (RMS) do sinal de emissão acústica tem sido um dos principais parâmetros estudados em pesquisas sobre queimas na retificação, em um intervalo de frequência previamente selecionado (AGUIAR *et al.*, 1999).

No trabalho de NATHAN, VIJAYARAGHAVAN e KRISHNAMURTHY (1999), dados coletados do processo de retificação foram utilizados para entrada de uma rede neural artificial. Os autores aplicaram a técnica do monitoramento da temperatura do centelhamento, por meio da qual seria detectada a queima da peça, além da variação dessa temperatura. Na conclusão desse trabalho, percebeu-se que tal parâmetro pôde ser considerado como uma boa representação da temperatura na zona de corte e, desse modo, apresentou-se útil para o monitoramento do processo, pois foi possível inferir o tempo total para que a queima ocorra, ou seja, desde o início da retificação até o momento em que a queima ocorre de fato.

TÖNSHOFF *et al.*, (2000) afirmaram que o sinal de EA foi muito utilizado para avaliar o comportamento do processo de usinagem, e era um dos métodos de monitoramento mais estudado.

AGUIAR *et al.* (2002) fizeram uso dos sinais de emissão acústica e potência elétrica do motor de acionamento do rebolo para o monitoramento da queima. Os autores estudaram a aplicação de ferramentas estatísticas e foram obtidos bons resultados com as ferramentas *skew* e *kurtosis* associadas à força tangencial de corte. Eles concluíram que os parâmetros estudados foram sensíveis às variações nas condições de usinagem e, por tanto, se mostrou muito eficiente na detecção da queima superficial da peça.

DOTTO *et al.* (2003) utilizaram uma rede neural artificial perceptron multicamadas para detecção da queima no processo de retificação. Foi utilizado sinal de emissão acústica e potência elétrica do motor de acionamento do rebolo como entradas para a rede neural, e a

variável de saída foi a ocorrência da queima. Por fim, a rede apresentou uma ótima resposta, obtendo-se a convergência em 82% dos pontos.

Uma técnica de rede neural foi utilizada por KWAK e HA (2004) para alcançar um diagnóstico inteligente a respeito de danos como queima e irregularidades quando do momento em que o rebolo retifica a peça e ocorre uma vibração da máquina. Foram utilizados sinais de emissão acústica e potência, obtidos por meio de vários sensores. Os parâmetros aumentavam ou diminuíaam a depender da condição da peça, apresentando uma correlação. A rede neural obteve sucesso em torno de 95% para o diagnóstico de detecção de irregularidades.

Uma técnica de diagnóstico de vibração e queima foi aplicada por KWAK e HÁ (2004) no processo de retificação, empregando um sensor de emissão acústica com resposta em frequência para medir os sinais gerados durante o processo de retificação. Foram calculados os valores do pico máximo do RMS e FFT usando os sinais de EA. Esses valores foram introduzidos em uma rede neural, sendo as saídas do sistema: condição normal, queima e vibração. O percentual de acerto dos dados inferidos para a rede chegou a 90%.

LIAO *et al.*, (2006) extraíram características do sinal de emissão acústica coletados a 1 MHz no processo de retificação da alumina com rebolo diamantado de liga resinóide, e usaram um algoritmo genético adaptativo para extrair características afim de distinguir diferentes estados da ferramenta de corte.

Em 2007, LIAO *et al.*, propuseram um novo método, no qual inicialmente extraiu-se as informações do sinal de emissão acústica por meio de correlação, e depois os dados foram usados em um algoritmo adaptativo. Para uma taxa maior de remoção, o algoritmo conseguiu acertar 97%, e para uma baixa taxa de remoção, a eficiência caiu para 86,7%.

LIAO *et al.*, (2010) monitoraram a condição da ferramenta de corte extraindo características novamente da emissão acústica aplicando em algoritmos que serviram como classificadores. Os resultados mostraram a eficácia da extração e seleção de características da emissão acústica para o monitoramento da queima.

O uso de sinais de emissão acústica foi empregado com sucesso por pesquisadores como WEGENER *et al.*, (2011) para o monitoramento das operações de retificação. Os autores citaram que os elementos (rebolo, etc) inerentes ao processo, refletem de forma significativa no resultado da retificação. Nesse caso específico, eles avaliaram a condição da ferramenta responsável pela remoção de material, o rebolo, no intuito de obter o melhor condicionamento da ferramenta para que se produzam peças com as especificações exigidas.

Em 2012, EUZEBIO *et al.*, (2012) desenvolveram dois modelos usando lógica *fuzzy* para prever vários níveis de queima superficial no processo de retificação. Os autores trans-

formaram dados imprecisos obtidos a partir de EA e potência elétrica em dados confiáveis de predição de queima. Os modelos foram validados e chegou a um resultado de 70,3%.

NETO *et al.*, (2014) implementaram um sistema inteligente para monitorar a queima durante o processo de retificação e para isso foi utilizado os sinais de EA e vibração como entradas do sistema. Os resultados permitiram caracterizar as superfícies das peças para diferentes condições como queima e sem queima. O modelo de redes neurais selecionado apresentou bons resultados para as classificações.

MARCHI *et al.*, (2015) usaram a técnica de EMI para avaliar a integridade superficial da peça na retificação. Este é considerado um método simples e de baixo custo, pois utiliza um sensor piezoeletrico de baixo custo (PZT). Os resultados mostraram que as condições das peças estão relacionadas com as variações da impedância elétrica.

ČILLIKOVÁ *et al.*, (2016) realizaram um monitoramento magnético não destrutivo do processo de retificação. Eles detectaram uma forte correlação entre a emissão de ruídos magnéticos Barkhausen (BN - Barkhausen *noise*) e as superfícies das peças usinadas com ocorrência de queima.

SINHA *et al.*, (2016) realizaram uma investigação de queima superficial decorrente do processo de retificação. No intuito de verificar a integridade superficial das peças, os autores utilizaram técnicas de caracterização de superfície tais como espectroscopia de raios-X por dispersão de energia (EDX), difração de raios X (XRD) e espectroscopia de fotoeletrons excitados por raios X (XPS). Além disso, o comportamento da superfície da peça foi investigado usando imagens microscópicas, testes de micro-dureza e medidas de rugosidade superficial.

NESLUŠAN *et al.*, (2017) fizeram o monitoramento da queima na retificação por meio do uso do efeito Barkhausen ou ruído magnético de Barkhausen (magnetic Barkhausen noise – técnica MBN). Eles concluíram que uma calibração da técnica deve ser feita de acordo com o material a ser usinado bem como o tipo de tratamento térmico ao qual é submetido.

Por outro lado, uma das opções que vem ganhando destaque são os sensores piezoeletricos, capazes de operar com parâmetros físicos que estão na forma de tensão mecânica ou elétrica. Eles vêm sendo utilizados em diversas áreas como, monitoramento de descargas parciais (DANOUI; TAHAN; DAVID, 2013), monitoramento da integridade estrutural (NA; LEE, 2013) (DE ALMEIDA; BAPTISTA; DE AGUIAR, 2015), monitoramento do processo de retificação (RIBEIRO *et al.* 2015), entre outros. Porém, a utilização desses sensores no monitoramento da retificação plana permite que novos estudos sejam realizados.

2.4 Diafragmas piezelétricos

Os materiais piezelétricos têm a propriedade de converter energia mecânica em energia elétrica (efeito piezelétrico direto) e energia elétrica em energia mecânica (efeito piezelétrico reverso). Os diafragmas piezelétricos, que são comumente conhecidos como *buzzers*, são componentes acústicos simples que são amplamente utilizados em uma variedade de dispositivos eletrônicos para produzir um som, como um alarme, bip ou toque (SILVA DE FREITAS; GUIMARÃES BAPTISTA, 2016). De acordo com esses autores, estes componentes acústicos são facilmente obtidos e baratos, o que os torna atraentes para outras aplicações, além de produzir som. Esse trabalho focou em utilizar a técnica de impedância eletromecânica para detecção de dano, utilizando transdutores piezoelétricos pequenos e leves que foram aderidos à estrutura monitorada.

Os diafragmas piezelétricos têm sido estudados referentes à sua utilização em detecção de danos e monitoramento de integridade estrutural (ALMEIDA; BAPTISTA; AGUIAR, 2015) (ALMEIDA; MENDES; BAPTISTA, 2014) (ALMEIDA *et al.*, 2014). De acordo com os autores, há vários tipos de diafragmas e/ou transdutores, como também há várias bandas de frequência em que esses sensores trabalham, o que pode ser adaptado de acordo com a necessidade da aplicação.

De acordo com ALMEIDA; MENDES; BAPTISTA, (2014), os diafragmas piezelétricos (também chamados de *buzzer*) possuem uma boa sensibilidade, e uma faixa de frequência apropriada deve ser escolhida de acordo com a estrutura e o tipo de dano a ser detectado. Os autores apresentaram a detecção de dano baseado na técnica da impedância eletromecânica.

ALMEIDA *et al.*, (2014) analisaram experimentalmente a viabilidade do uso de diafragmas ou pastilhas piezelétricas, sendo usado como transdutores em sistemas de SHM (*Structural health monitoring* - monitoramento de integridade estrutural). Os autores informaram que na detecção de danos estruturais, os transdutores piezelétricos mais utilizados são constituídos de cerâmicas de PZT (Pb-lead Zirconate Titanate – Titanato Zirconato de Chumbo). A sensibilidade dos transdutores para a detecção de danos foi avaliada comparando-se as assinaturas de impedância elétrica em uma faixa de frequência apropriada e usando-se índices de danos. Os autores concluíram que as sensibilidades dos transdutores para detecção de dano são diferentes, entretanto, pelo baixo custo dos diafragmas piezelétricos, eles apresentam uma vantagem sobre os outros.

Diversos estudos têm sido realizados, como por exemplo, a aplicação de diafragmas piezeletréticos (chamados de materiais inteligentes) para o monitoramento de deformação e de

carga em vigas (V. G. M. ANNAMDAS and C. K. SOH). Os autores citaram que, devido à multi-aplicabilidade destes materiais, os mesmos têm sido aplicados em várias áreas, tais como sistemas SHM usando a técnica de EMI. Estes diafragmas já tinham sido utilizados e validados para a detecção de dano usando o domínio da frequência. Entretanto, neste trabalho foi utilizado o domínio do tempo e, também se criou uma rede de sensores sem fio, no intuito de complementar a técnica de EMI, pois o uso de apenas um sensor, ou uma técnica, não seria suficiente para aplicar tais sensores em sistemas SHM de grande porte. Concluiu-se neste trabalho que os sensores piezelétricos podem ser usados para várias aplicações e que o domínio do tempo permitiu realizar o monitoramento em tempo real, ao contrário do domínio da frequência.

O trabalho de LE; HEGAB, (2017) refere-se sobre a fabricação, montagem e teste de um micro compressor de gás de um estágio e de dois estágios, montado em série para demonstrar a eficácia de uma configuração multiestágio com a utilização de diafragmas piezelétricos e microválvulas. Os autores citaram que o micro compressor de dois estágios alcançou melhorias sobre o de um estágio, devido ao fato de cada estágio do compressor ter operado de forma independente na frequência de ressonância do diafragma. Isso possibilitou que este compressor de dois estágios alcançasse um aumento máximo de pressão de 18 kPa em relação aos 10 kPa do outro compressor.

Outro trabalho realizado foi a apresentação e análise da estrutura de um novo modelo a ser aplicada em sensores IMU (Inertial Measurement Unit - Unidade de Medida Inercial) de 6 eixos. IMU é um dispositivo eletrônico que mede e relata a força específica do corpo, a taxa angular e às vezes o campo magnético que circunda o corpo, usando uma combinação de acelerômetros e giroscópios, às vezes também magnetômetros. As IMUs são tipicamente usadas para aeronaves de manobra, veículos aéreos não tripulados, naves espaciais, satélites entre outros. O objetivo dos autores foi a detecção simultânea de todos os possíveis componentes de movimento de seis eixos com um único bloco baseado na abordagem SMSD (Single Mass Spring Damper - Amortecedor de mola de massa única). Nesse trabalho, foi utilizado o efeito piezelétrico, aplicando-o tanto como sensor quanto como atuador, para auxiliar na detecção simultânea dos seis possíveis eixos do sensor IMU. Concluiu-se que a principal vantagem deste novo sensor é a possibilidade de detecção simultânea do movimento inercial usando o mesmo dispositivo (ALMABROUK *et al.* 2016).

Capítulo 3 -MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados os procedimentos utilizados para a montagem do banco de ensaios, módulos e sensores, bem como se deu a aquisição de dados e os procedimentos realizados, a fim de se obter as medições da rugosidade, dureza Vickers e análise metalográfica das peças de aço. Em seguida, descreve-se sobre a metodologia dos ensaios e do processamento digital dos sinais oriundos do diafragma piezelétrico e do sensor de EA. Houve a preparação do rebolo, checagem dos parâmetros inerentes ao processo, realização dos ensaios e caracterização das peças. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Usinagem por Abrasão (LUA) da Faculdade de Engenharia de Bauru (FEB) da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (UNESP).

3.1 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS E BANCO DE ENSAIOS

Os ensaios experimentais foram realizados em uma retificadora plana, do fabricante SULMECÂNICA, modelo 1055. Alguns detalhes dos ensaios são apresentados na Figura 3.2 por meio de um diagrama esquemático.

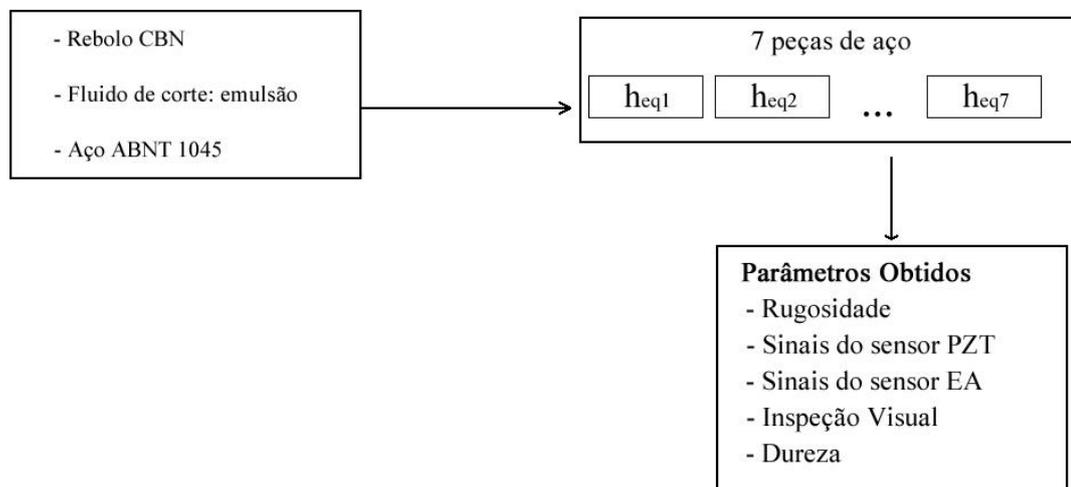


Figura 3.1- Diagrama esquemático dos procedimentos experimentais.

A representação dos ensaios, passando pela coleta dos sinais e, por conseguinte, o processamento digital desses sinais é mostrado na Figura 3.2- Representação esquemática dos ensaios e coleta dos sinais..

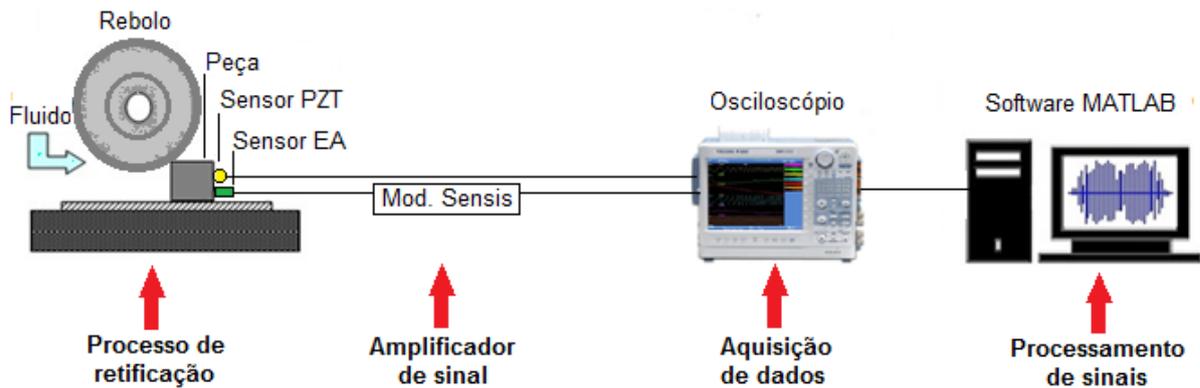


Figura 3.2- Representação esquemática dos ensaios e coleta dos sinais.

Cada ensaio consistiu de apenas uma passada de retificação ao longo da superfície da peça. Antes de realizar a retificação, o rebolo foi devidamente dressado utilizando um dressador conglomerado. Também é importante citar que ajustes como balanceamento do rebolo e sua fixação no suporte da máquina foram feitas adequadamente, garantindo assim a qualidade do processo.

A respeito do monitoramento, um sensor de emissão acústica e uma unidade de processamento de sinal, da companhia Sensis, modelo DM-42, foi empregado nos ensaios. Adicionalmente, um diafragma piezelétrico de baixo custo (PZT ou Pb-lead Zirconate Titanate), da fabricante Murata, modelo 7BB-35-3, foi usado, constituído de um disco com uma base de latão e elemento ativo piezocerâmico. As dimensões principais do PZT são o diâmetro externo de 35 mm, espessura da base de latão de 0,30 mm, diâmetro do elemento cerâmico de 25 mm, e espessura do elemento cerâmico de 0,23 mm. O sensor PZT e sensor de EA são mostrados na Figura 3.3.

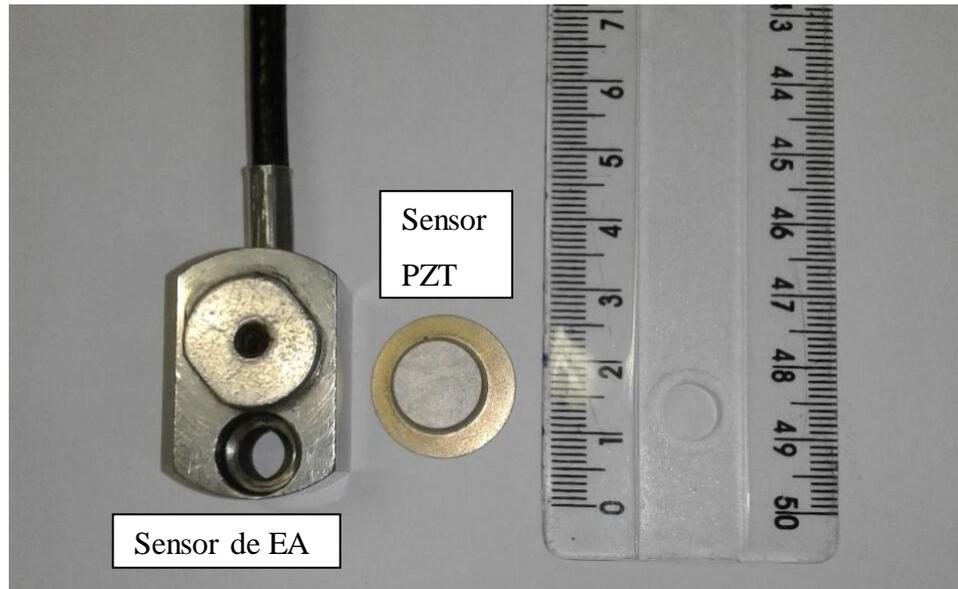


Figura 3.3- Sensor PZT modelo 7BB-35-3 e sensor de EA.

O sensor de EA foi fixado no suporte da peça, já o sensor PZT foi colado usando uma fina camada de cola instantânea a base de cianoacrilato. Adicionalmente, o PZT foi coberto com uma camada de cola gel de silicone no intuito de proteger o sensor contra a influência de partículas externas e umidade. Ambos os sensores foram testados em relação à sua sensibilidade para gerar os sinais com boa qualidade e sem saturação. A ilustração da montagem dos ensaios experimentais pode ser conferida na Figura 3.4.

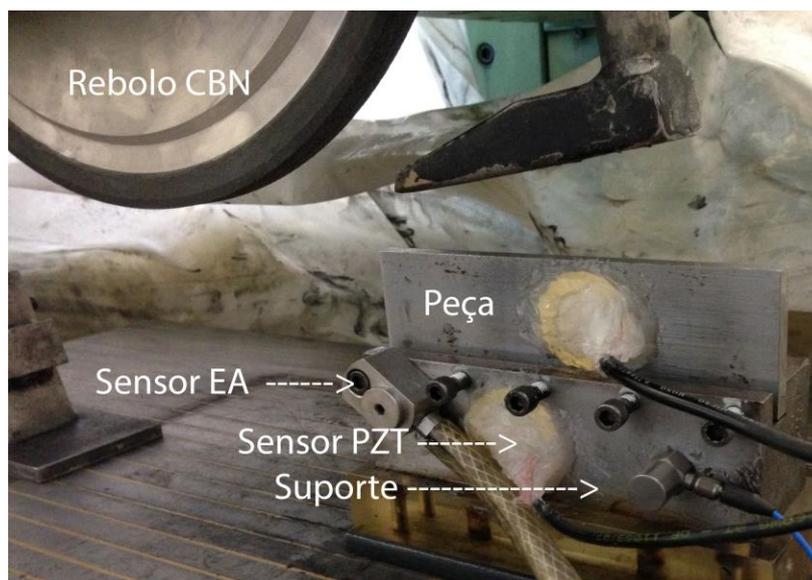


Figura 3.4- Banco de ensaios para ensaios experimentais.

O sensor PZT abocado na peça, bem como o sensor de vibração preso ao suporte da peça não foram considerados neste trabalho, portanto seus sinais não são citados. Um osciloscópio da Yokogawa, modelo DL850, foi utilizado para coletar os sinais puros de ambos os sensores, EA e PZT, a uma taxa de amostragem de 2 milhões de amostras por segundo. As peças utilizadas foram de aço ABNT 1045, temperado e revenido, cuja composição é (peso em %): C: 0.43-0.50, Si: 0.17, Mn: 0.52, S: 0.031, P: 0.032 e Fe balanceado). No primeiro conjunto de ensaios para a aplicação do método usou-se sete peças, e estas foram retificadas por meio de um rebolo de CBN, com ligante resinoide, modelo 2684 01-0262 B151. No conjunto de ensaios para a verificação no método aplicado, utilizou-se outro rebolo, juntamente com outras peças do mesmo aço, e será explicado posteriormente. O fluido de corte foi empregado em todos os ensaios, sendo do tipo água/óleo de 4%, com a pressão de 0,4 MPa e a taxa de vazão de 84 l/min. A temperatura medida próxima dos sensores foi aproximadamente constante e igual a 24 °C.

Referente às peças do aço ABNT 1045 retificadas com rebolo CBN, um total de sete peças foi utilizado, sendo uma peça para cada ensaio, selecionando diferentes profundidades de corte e, conseqüentemente, diferentes espessuras equivalentes de corte (h_{eq}), como mostra a Tabela 1. Nota-se que, nessa mesma tabela, é possível perceber as variações nas condições na superfície da peça, fatos estes que serão melhores discutidos mais a frente. Os parâmetros da retificação usados e mantidos constantes em todos os setes ensaios são descritos a seguir:

- velocidade periférica do rebolo: 32.2 m/s;
- velocidade de avanço da mesa: 0.124 m/s;
- diâmetro do rebolo: 344.0 mm;
- largura do rebolo: 10.0 mm;
- dimensões da peça: comprimento= 150.0 mm, largura= 7.0 mm.

O ensaio de retificação de cada peça, conforme citado, foi realizado com apenas uma passada do rebolo sobre a peça em uma direção, e com uma determinada profundidade de corte, no intuito de se atingir diferentes condições de usinagem. A medição da rugosidade superficial, medição de dureza Vickers e análise metalográfica foram realizadas visando avaliar as condições superficiais das peças com mais propriedades.

Como os parâmetros utilizados nos ensaios tais como velocidade de corte (v_s) e velocidade de avanço da mesa (v_w) foram mantidos constantes durante todos os ensaios, o h_{eq} , foi expresso como uma função da profundidade de corte (a).

Tabela 1: Condições dos ensaios para o aço ABNT 1045 com rebolo CBN

	Profundidade de corte (μm)	heq (μm)
1	5 μm	0,0193
2	10 μm	0,0385
3	20 μm	0,0770
4	40 μm	0,1540
5	80 μm	0,3081
6	120 μm	0,4621
7	140 μm	0,5391

3.2 AVALIAÇÃO SUPERFICIAL DA PEÇA

Seguindo com os experimentos, a rugosidade média da superfície (R_a) de cada peça foi medida por meio do uso de um rugosímetro de precisão da Taylor Hobson, modelo Surtronic 3+, usando-se um comprimento de amostragem de 1,6 mm a cada 0,8 mm, seguindo as recomendações da norma ISO 4288-1996.

O comprimento da superfície de cada peça foi igualmente dividido em 30 partes, onde para cada parte foram realizadas 3 medições de rugosidade. Com isso, obteve-se o cálculo da média e do desvio padrão das três medidas de rugosidade feitas em cada parte, permitindo-se avaliar a superfície da peça em relação a este importante parâmetro. A inspeção visual das peças foi feita de forma cuidadosa, como também foram digitalizadas para análises posteriores.

Visando obter uma análise aprofundada da microestrutura das peças, foi efetuada a metalografia e medição de dureza Vickers. Para a análise metalográfica, amostras das regiões de interesse foram seccionadas através de uma máquina de corte metalográfico. Cada amostra foi montada, sendo encapsulada com baquelite e, então, processada por uma máquina de embutimento metalográfico, modelo EM30D, da marca TECLAGO, na qual se utilizou uma pressão em torno de 100 kg.

Sequencialmente, lixamento e polimento foram feitos nas amostras para tornar as superfícies planas e reduzir os danos causados pelo corte abrasivo. No lixamento, utilizaram-se as seguintes lixas d'água, ordenadas pela granulometria, como se segue: 80, 120, 220, 320, 400, 500 e 600. O polimento foi realizado utilizando alumina 1,0 μm e água destilada. O uso

de cada lixa durou em torno de 2 a 3 minutos, enquanto que o polimento durou em torno de 4 minutos.

Após o polimento, foi feito um ataque químico nas amostras usando Nital 2%, no intuito de permitir uma melhor análise ao utilizar o microscópio ótico responsável pela análise metalográfica. Por meio desta análise, foi possível visualizar características microestruturais das amostras, além de capturar imagens de regiões que pudessem caracterizar alterações na sua microestrutura. Para essa análise e captura de imagens, foi empregado um microscópio Olympus, modelo BX51M.

Em relação à medição de dureza vickers, foi utilizando um aparelho da companhia Mitutoyo, modelo HM211. Os testes de dureza vickers foram realizados em todas as amostras da seguinte maneira: a superfície usinada da peça foi seccionada em 11 partes igualmente dividida; em cada parte 3 indentações foram realizadas utilizando uma carga de 500 gramas. É importante referenciar que as distâncias entre as três indentações de cada parte da peça foram espaçadas com base na norma ASTM E92. As medições de dureza que foram realizadas na superfície de cada peça usinada foi de acordo com o apresentado na Figura 3.5.

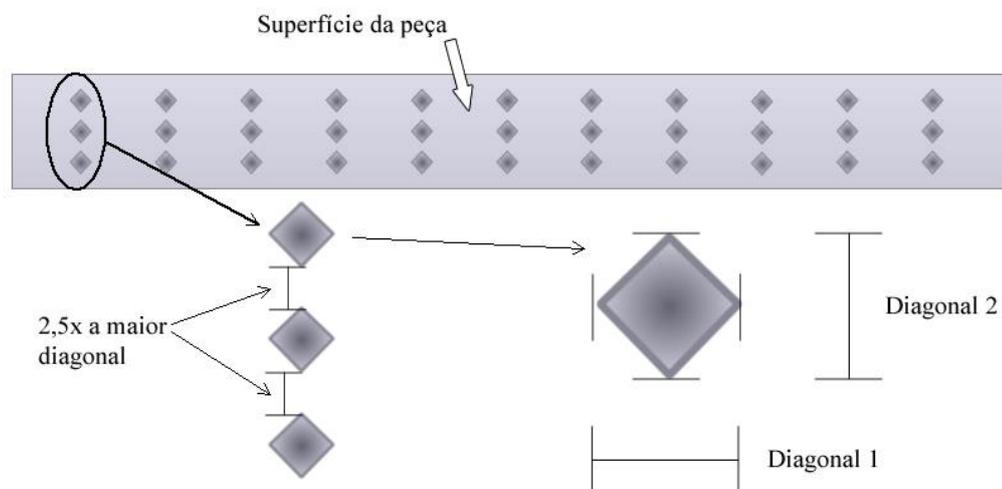


Figura 3.5- Modelo das medições de dureza realizadas na superfície das amostras.

3.3 PROCESSAMENTO DIGITAL DE SINAIS

Os dados coletados por meio dos sensores EA e PZT foram processados digitalmente por meio do software MATLAB. Um estudo sobre os espectros dos sinais puros foi executado objetivando a identificação de bandas de frequência que estejam mais relacionadas com as

condições encontradas na superfície de cada peça retificada, podendo ser boa condição, alta rugosidade e queima, ou seja, três peças de condições diferentes foram selecionadas.

Todo o processamento digital realizado nos sinais puros se deu por meio da utilização da região onde ocorreu o contato entre a peça e o rebolo, sendo ignorado todo o resto, por não estar relacionado ao processo de retificação em si. De modo geral, o formato do sinal puro pode ser conferido na Figura 3.6 – Região selecionada do sinal puro sendo a área definida pelo retângulo como a duração da passada. A partir dessas regiões selecionadas de todos os sinais, foram feitos os processamentos com filtros digitais, obtenção de estatísticas RMS, média, desvio padrão, bem como a geração da transformada rápida de Fourier (FFT).

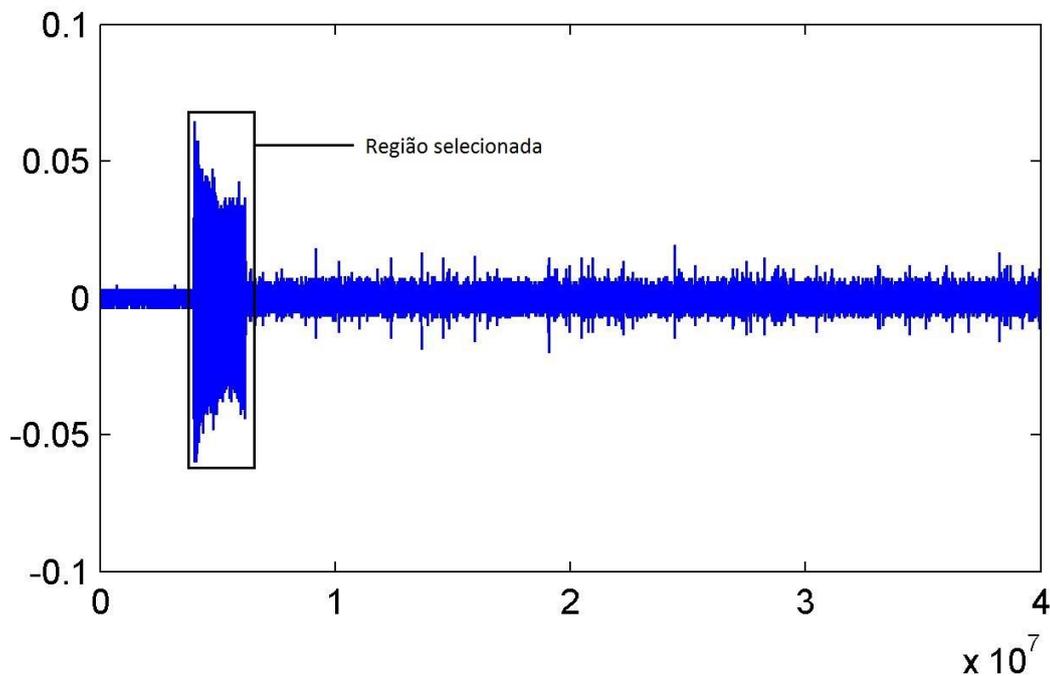


Figura 3.6 – Região selecionada do sinal puro

Para cada peça, três pontos equidistantes ao longo da passada foram selecionados. Para cada ponto, calculou-se o espectro de cada sinal, EA e PZT, usando-se um bloco de dados de 8192 pontos e uma janela de *Hanning* para a FFT. Após a obtenção dos 3 espectros, foi feita a média desses espectros, e esta média foi considerada para a análise. A partir desses espectros, bandas de frequências foram escolhidas.

O critério usado para a seleção de bandas de frequência foi baseado na busca por janelas de frequências cujas magnitudes apresentassem uma diferença entre os sinais de cada condição que foi observada. Adicionalmente, buscou-se um valor mínimo de amostras sobrepostas para os três espectros. Filtros digitais passa-faixa do tipo *Butterworth*, de ordem 6, para

cada banda de frequência previamente escolhida, foram aplicados nos sinais puros e, conseqüentemente, novos vetores filtrados foram obtidos.

A raiz do valor quadrático médio (RMS) foi obtida usando um bloco de 2048 amostras a partir dos vetores filtrados para cada peça. Este total de pontos foi escolhido por representar o tempo aproximado de 1 ms recomendado por (WEBSTER; DONG; LINDSAY, 1996). A partir desses vetores, obteve-se a média e o desvio padrão para cada ensaio, considerando apenas o momento da passada, isto é, do contato entre peça e rebolo, conforme exibido na Figura 3.6.

O uso de índices RMSD e CCDM também esteve presente neste estudo, e foram obtidos a partir da densidade espectral de potência (PSD - *Power Spectral Density*), na banda em que foram filtrados, usando a primeira peça como índice base, pois sofreu a menor condição de corte sem nenhum dano. Esta escolha foi feita porque estes índices refletem a correlação com estruturas saudáveis e danificadas quando a técnica de EMI é aplicada, como pode ser verificado, por exemplo, em MARCHI *et al.*, (2015) e DE ALMEIDA; BAPTISTA; DE AGUIAR, (2015).

3.4 VERIFICAÇÃO DO MÉTODO

O conjunto de ensaios realizado com o rebolo CBN e as sete peças de aço ABNT 1045 foram definidos para a avaliação do método proposto neste trabalho com o uso do sensor PZT e do tradicional sensor de EA. Contudo, visando confirmar o método proposto, um novo conjunto de ensaios foi realizado, utilizando desta vez um rebolo totalmente diferente, a saber, com material de óxido de alumínio, e novas peças de aço, em um total de oito, foram selecionadas para estes novos ensaios.

O rebolo de óxido de alumínio empregado foi o de modelo 38A150 LVH, da fabricante NORTON. Ambos os rebolos são importantes no processo de retificação e bem aplicados na indústria. Os ensaios com o rebolo de óxido de alumínio são identificados neste trabalho como ensaios de verificação. O rebolo foi devidamente dressado antes de iniciar os ensaios e, para este caso, utilizou-se um dressador de ponta única.

Os parâmetros da retificação, usados e mantidos constantes em todos os oito ensaios, são descritos a seguir:

- velocidade periférica do rebolo: 29,0 m/s;
- velocidade de avanço da mesa: 0,124 m/s;

- diâmetro do rebolo: 307,8 mm;
- largura do rebolo: 25,4 mm;
- dimensões da peça: comprimento= 150,0 mm; largura= 7,0 mm.

Todos os procedimentos e medições realizados previamente também foram aplicados para as novas peças usinadas, bem como todo o processamento digital, seleção de bandas e comparação entre os sinais EA e PZT. A sumarização das condições de usinagem utilizadas para este conjunto de ensaios é apresentada na Tabela 2.

Tabela 2: Condições dos ensaios para o aço ABNT 1045 e rebolo de óxido de alumínio

	Profundidade de corte (μm)	heq (μm)
1	5 μm	0,0214
2	10 μm	0,0428
3	15 μm	0,0641
4	20 μm	0,0855
5	25 μm	0,1069
6	35 μm	0,1497
7	45 μm	0,1924
8	55 μm	0,2352

Conforme citado, o processamento digital de sinais foi feito para todos os sinais coletados. A Figura 3.7- Esquema do processamento digital. mostra o esquema de como esse processamento foi feito.

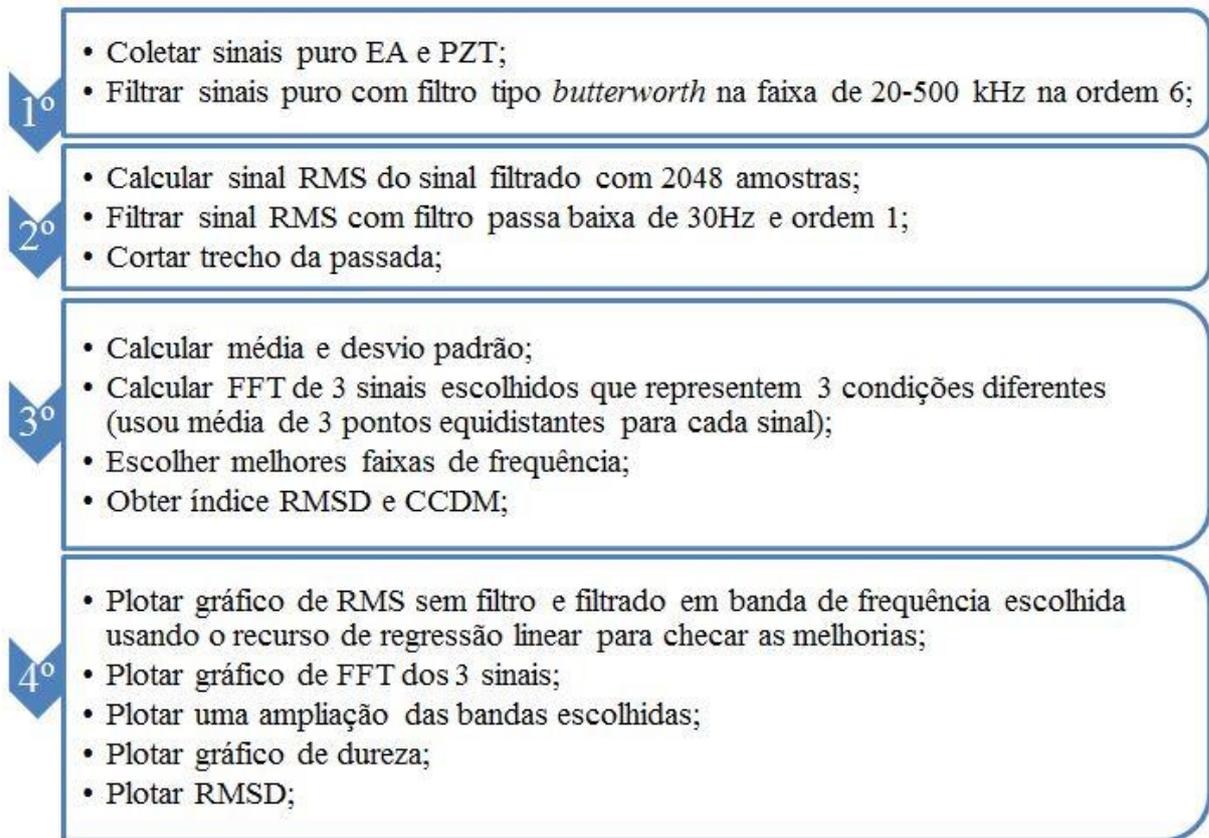


Figura 3.7- Esquema do processamento digital.

Os resultados iniciais obtidos para o conjunto dos ensaios referentes ao método, assim como os resultados advindos do conjunto dos ensaios utilizados para a verificação do método são descritos e explicados no Capítulo 4, para ambos os sensores EA e PZT.

CAPITULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo aborda os resultados obtidos a partir dos procedimentos experimentais, sendo consideradas duas etapas, isto é, dois conjuntos de ensaios. Inicialmente, são apresentados e discutidos sobre os ensaios realizados com aço ABNT 1045 e rebolo CBN, os quais foram usados na aplicação do método. Em seguida, apresentam-se os resultados e discussão com base nos ensaios de verificação do método, em que se utilizou um rebolo de óxido de alumínio e peças de aço ABNT 1045. Para as duas etapas, são mostradas respostas em frequência dos sinais, resultados de RMS, rugosidade superficial, metalografia, dureza Vickers, além do índice de dano RMSD. À medida que os resultados são exibidos, há uma comparação entre os sensores empregados para o monitoramento, EA e PZT, sendo que a eficácia do método é comprovada na etapa de verificação.

4.1 RESULTADOS DOS ENSAIOS PARA O AÇO ABNT 1045 E REBOLO CBN

Nesta sessão são apresentados os resultados referente ao primeiro conjunto de ensaios realizado com 7 peças de aço ABNT 1045 e rebolo CBN.

4.1.1 Inspeção visual da superfície da peça

As superfícies das peças foram digitalizadas após a retificação, no intuito de avaliar as imagens e detectar as diferentes condições, tais como queima e condição normal. A Figura 4.1 mostra as superfícies das peças para cada profundidade de corte.

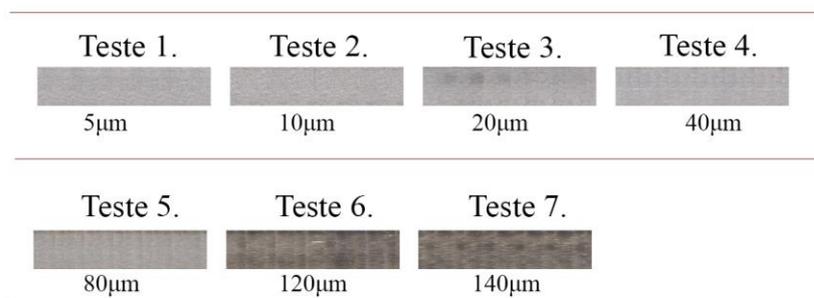


Figura 4.1- Condição superficial das peças usinadas em diferentes profundidades de corte.

Pode-se observar, de acordo com a Figura 4.1, que a coloração mais escura indica a presença de queima superficial, presente nas duas últimas peças, ou seja, nas peças 6 e 7, onde as condições de usinagem foram as mais severas. As peças dos ensaios 1 e 2 não apresentaram queima visível, enquanto que nas peças dos ensaios 3 a 5 uma leve alteração de cor é perceptível. Contudo, conforme cita MALKIN; GUO (2008), este aspecto cosmético não é suficiente para determinar a ocorrência de queima. Neste caso, isso pode ser observado por meio da utilização de determinados métodos como, por exemplo, metalografia e medição de dureza.

4.1.2 Rugosidade superficial

Os valores de rugosidade superficial e seu desvio padrão obtidos para cada peça são mostrados na Figura 4.2. Cada valor representa a média do valor de rugosidade medido transversalmente ao longo do comprimento da peça. As peças estão numeradas de 1 a 7 para melhor compreensão do comportamento de crescimento para cada ensaio à medida que aumenta a severidade do processo.

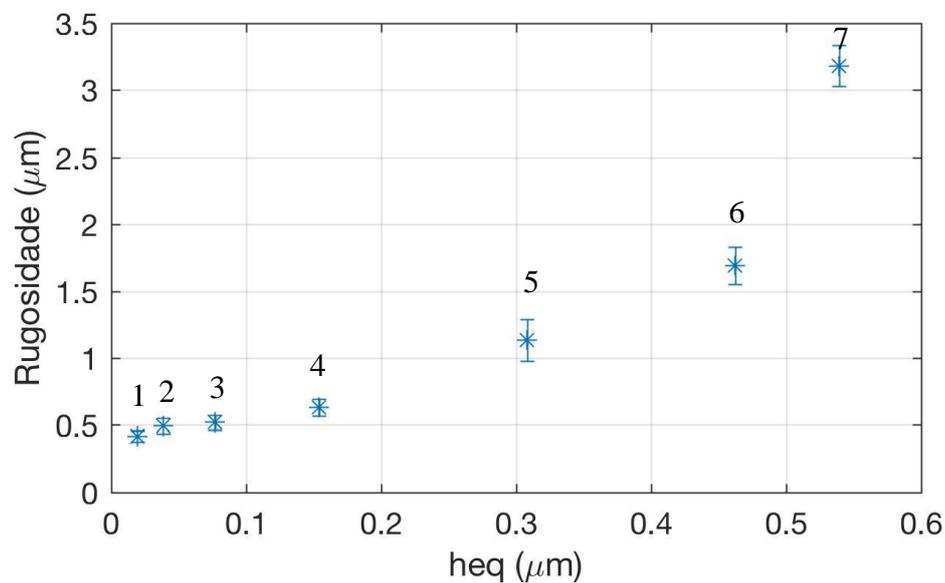


Figura 4.2- Valores médio de rugosidade para cada peça.

Pode-se observar que o valor da rugosidade aumenta à medida que a condição de usinagem se torna mais severa e o rebolo se torna mais desgastado (HASSUI *et al.*, 1998). Adicionalmente, os valores de desvio padrão para as peças 1 a 4 são menores, pois elas fazem parte da condição de usinagem branda e média. No entanto, um valor maior de desvio padrão

pode ser observado para as peças 5 a 7, onde neste caso as condições de usinagem foram de média a mais severa, assim levando a ocorrência de alta irregularidade superficial e queima da peça. De acordo com KALPAKJIAN e SCHMID (2013), a faixa de rugosidade superficial obtida no processo de retificação para aplicações médias é de 0,1-1,6 μm . Deste modo, apenas as peças 6 ($heq = 0,4621$) e 7 ($heq = 0,5391$) estão fora deste intervalo.

4.1.3 Metalografia e medição de dureza vickers

A Figura 4.3 ilustra o resultado da metalografia para as peças 2 e 6, que foram escolhidas como uma forma de comparar as diferenças entre as duas condições distintas de usinagem, ou seja, quando a peça apresenta boa condição e condição de queima.

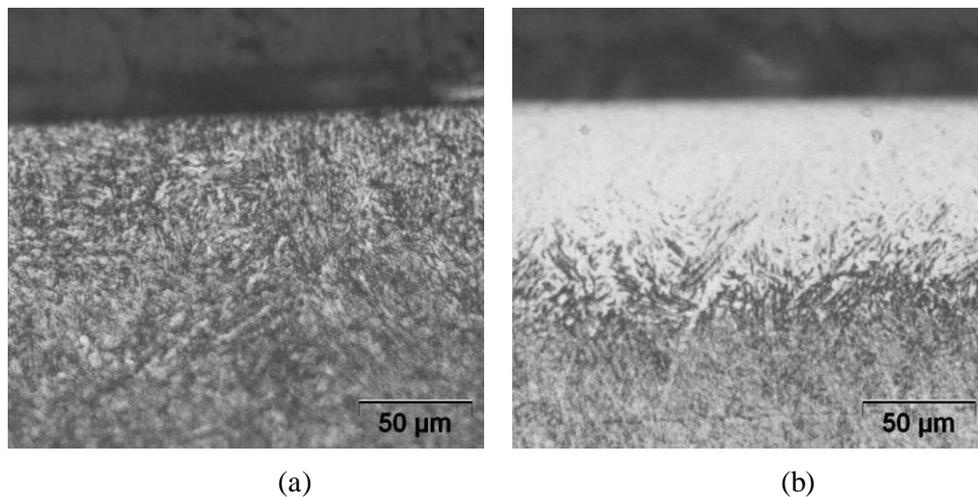


Figura 4.3- Metalografia para boa condição (a) e queima (b), peças 2 e 6, respectivamente.

Pode ser visto claramente na Figura 4.3a a estrutura martensítica, que caracteriza a estrutura normal da peça de aço que não sofreu micro alteração devido à ocorrência de altas temperaturas na zona de corte, causando a formação de camada branca. Contudo, na Figura 4.3b, uma camada branca é observada na subsuperfície, que é causada pelo significativo aumento de temperatura, fazendo a superfície da peça se tornar altamente dura e frágil e, desse modo, provando a ocorrência da queima (DEIVA NATHAN; VIJAYARAGHAVAN; KRISHNAMURTHY, 1999; KLOCKE; BRINKSMEIER; WEINERT, 2005).

Medições de dureza Vickers foram realizadas para todas as peças. Entretanto, apenas as medições exibidas são aquelas referentes às peças 2 e 6, cuja metalografia foi apresentada na Figura 4.3. O gráfico de dureza para as peças 2 e 6, respectivamente, é mostrado na Figura 4.4.

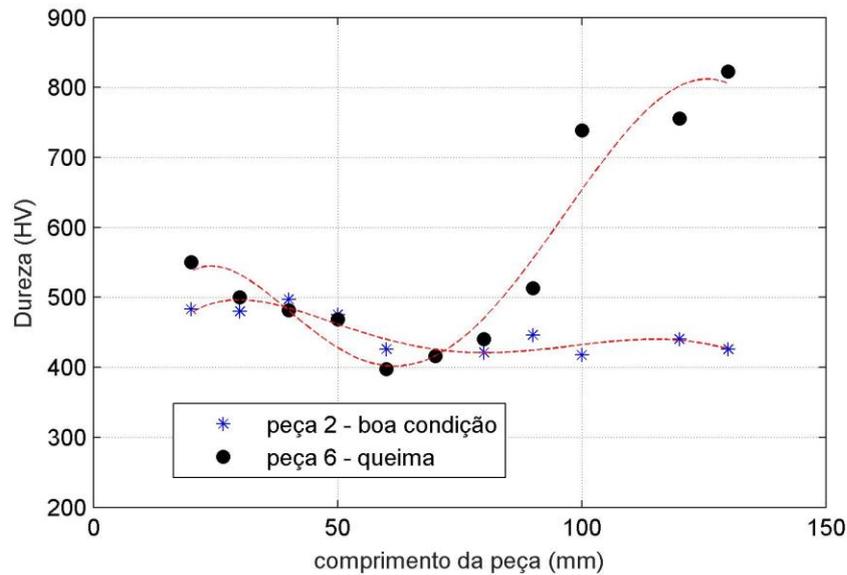


Figura 4.4- Dureza vickers para boa condição (a) e queima (b), peças 2 e 6, respectivamente.

Pode ser observado na Figura 4.4, que não há mudança significativa nos valores de dureza vickers para as peças com boa condição, pois a dureza normalmente encontrada para esse tipo de aço temperado e revenido é de 600 HV. A tendência da dureza é de reduzir à medida que a peça é usinada, o que pode ser observado para ambas as peças. E isso ocorre devido ao processo de retificação produzir alta temperatura na zona de contato entre a peça e o rebolo. No entanto, quando a superfície da peça sofre um dano como queima, a formação de uma camada branca causa uma elevada dureza, alcançando valores até maiores de 800 HV, conforme pode ser conferido na Figura 4.4 (DEIVA NATHAN; VIJAYARAGHAVAN; KRISHNAMURTHY, 1999).

4.1.4 Seleção de bandas de frequência

A seguir, apresenta-se nas Figuras 4.5 e 4.6, os espectros para os sinais de emissão acústica (EA) e do diafragma piezelétrico (PZT), respectivamente. Pode-se observar que o sinal de EA tem uma faixa de frequência de 1 – 300 kHz e o PZT de 0,2 – 200 kHz. Por outro lado, a magnitude do sinal de EA é maior que o sinal de PZT, que pode ser explicado devido ao uso de um módulo amplificador para o sinal de EA, enquanto que nenhum módulo é usado para o sinal do PZT.

Pode-se observar nestas curvas que as magnitudes do sinal mostram características diferentes no domínio da frequência de acordo com a condição da superfície da peça. Existem

mais atividades de sinal à medida que a condição de usinagem se torna mais severa para a maioria das faixas de frequências. Por outro lado, o comportamento oposto também pode ser notado para determinadas faixas. No entanto, é necessária uma ampliação destes espectros para selecionar uma banda de frequência adequada e que esteja relacionada com a condição de usinagem.

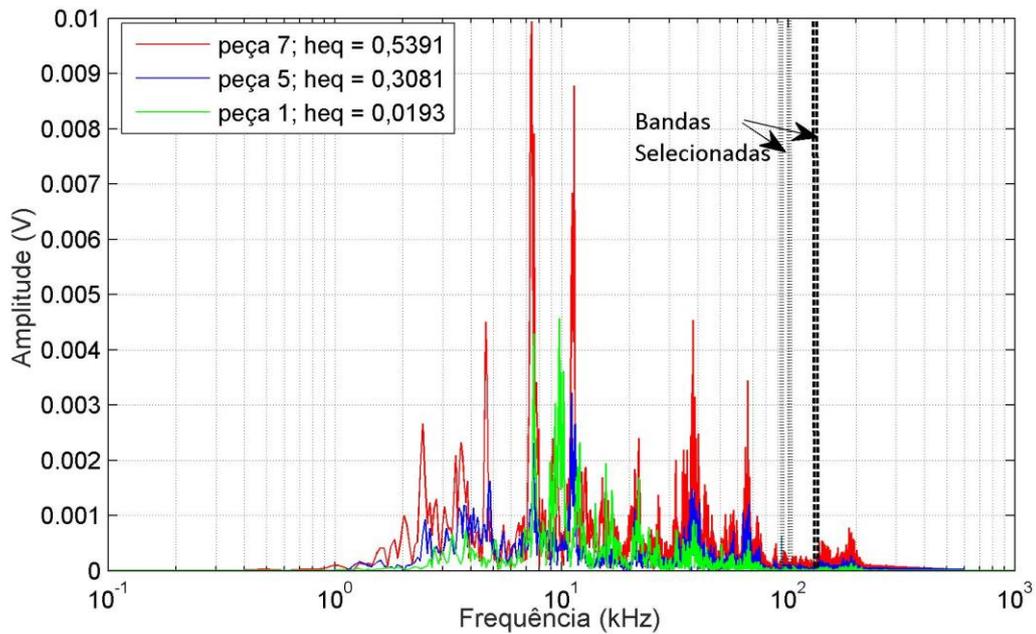


Figura 4.5- Espectro de (emissão acústica) EA.

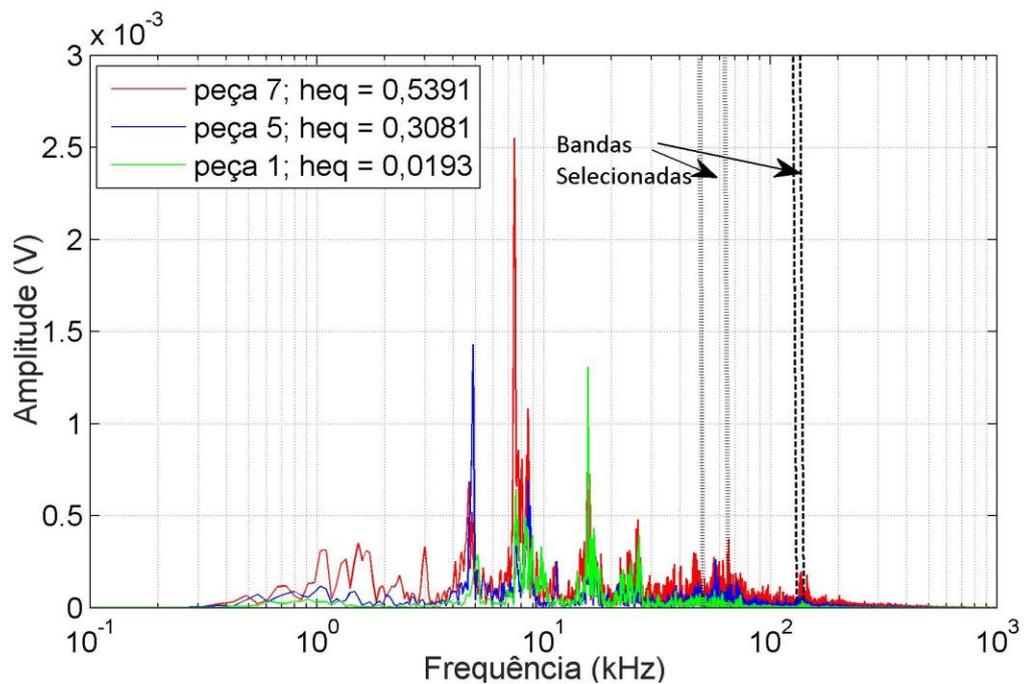


Figura 4.6- Espectro de (diafragma piezométrico) PZT.

Várias bandas de frequência foram analisadas a partir do espectro de cada sinal, e duas bandas de frequência que melhor representavam as condições da superfície da peça (boa condição e queima) foram escolhidas para os sinais de EA e PZT.

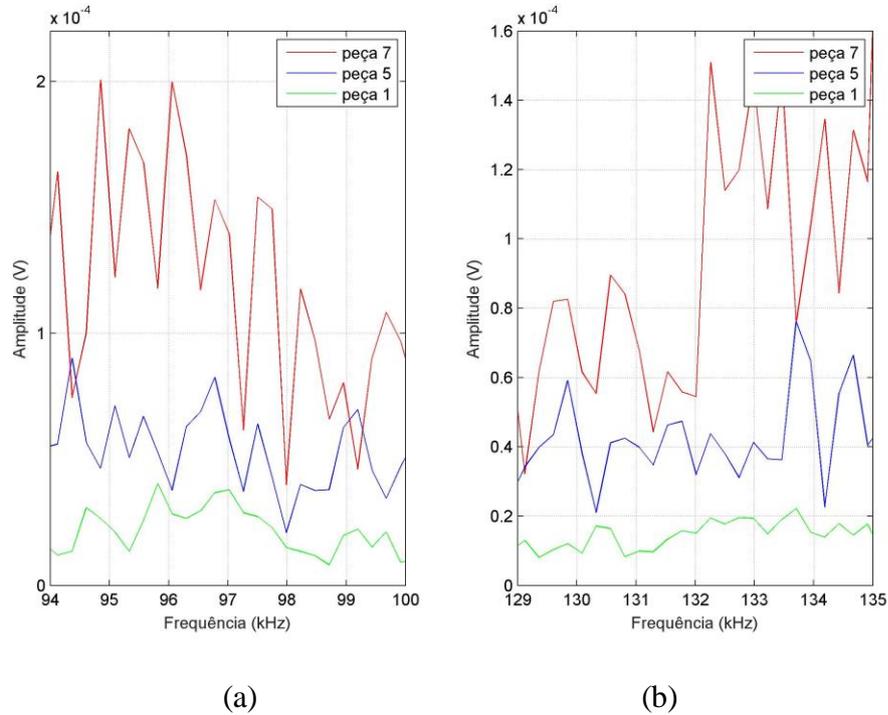


Figura 4.7 - Ampliação das bandas de frequência para sinal EA: (a) 94–100 kHz e (b) 129–135 kHz.

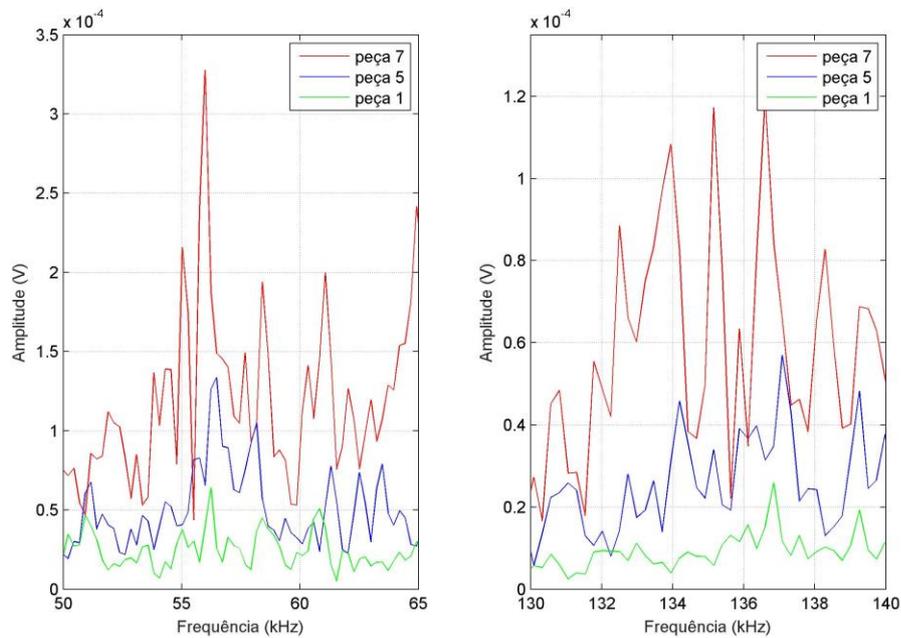


Figura 4.8 - Ampliação das bandas de frequência para sinal PZT: (a) 50–65 kHz and (b) 130–140 kHz.

As bandas de frequência de 94-100 kHz e 129-135 kHz foram escolhidas para o sinal de EA, e para o PZT foram escolhidas as bandas de 50-65 kHz e de 130-140 kHz. As Figuras 4.7 e 4.8 mostram uma ampliação das bandas de frequência para EA e PZT, respectivamente. É importante mencionar que existem outras bandas de frequência que também poderiam ser investigadas, porém sugere-se que isto seja feito em estudo posterior.

É possível ver claramente nos gráficos das Figuras 4.7 e 4.8 que as amplitudes dos sinais aumentam à medida que as condições de usinagem se tornam mais severas, e com o mínimo de sobreposição observada. Este comportamento é de grande importância para selecionar bandas de frequência e possivelmente extrair características do RMS e índices previamente apresentados que possuam uma correlação com a superfície da peça.

4.1.5 RMS dos sinais filtrados em bandas escolhidas

Após a seleção das bandas, filtro passa-faixa do tipo *Butterworth* foi aplicado no sinal puro, e o valor de RMS para cada teste foi obtido, juntamente com o seu desvio padrão (apenas para a passada). Pode-se observar nas Figuras 4.9 e 4.10 o valor do RMS em função de cada peça testada para as bandas de frequência consideradas para os sensores EA e PZT, respectivamente. Essas Figuras apresentam o RMS referente ao processamento dos sinais puros com e sem filtro nas bandas escolhidas. A linha contínua exibida nos gráficos representa a regressão linear dos dados e as linhas pontilhadas externas são as regiões de confiança, o que permite visualizar melhor o comportamento do RMS antes e depois da filtragem, possibilitando uma comparação mais adequada.

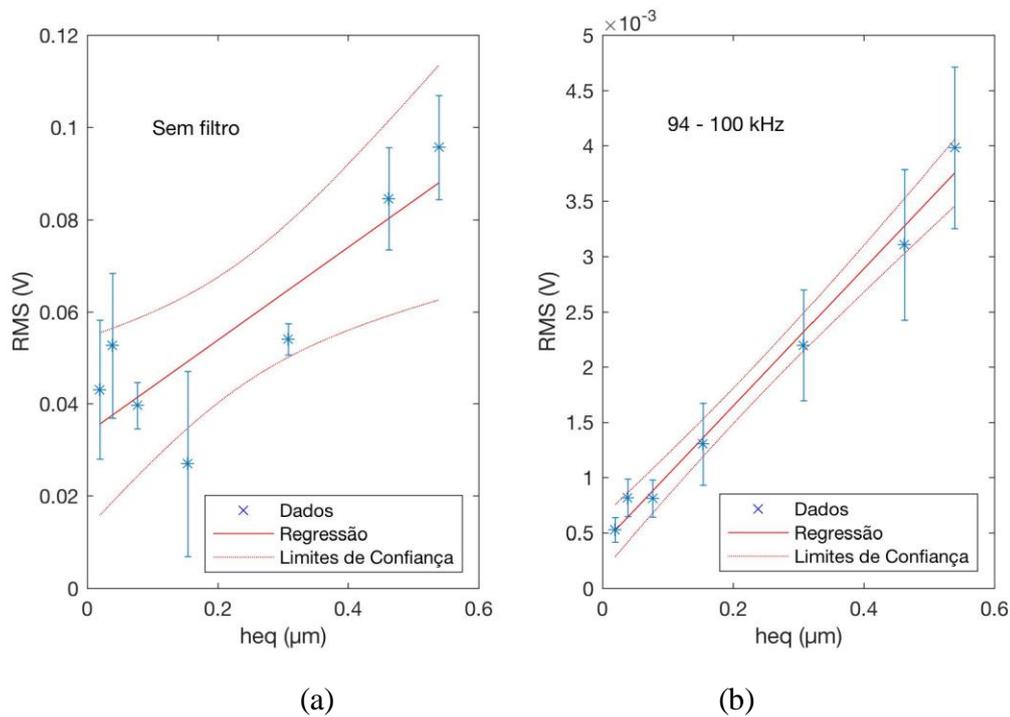


Figura 4.9 - RMS para sinal de EA: (a) sem filtro, (b) com filtro.

Na Figura 4.9a, pode-se observar que o valor RMS de EA sem filtro algum aplicado no sinal puro apresenta uma tendência de crescimento quando a condição de usinagem se torna mais severa. Contudo, o comportamento dos dados não se ajusta bem na reta de regressão (valor R-squared de 0,736), bem como ultrapassam os limites das regiões de confiança. Esta característica dos valores médios do sinal EA RMS está, de certo modo, correlacionada com a rugosidade superficial das peças, como apresentado na Figura 4.2- Valores médio de rugosidade para cada peça. A correlação da rugosidade superficial com a relação de força normal e EA RMS foi verificada experimentalmente em WEBSTER *et al.* (1994) com respeito apenas aos valores médios. Também pode ser observado aqui grandes valores de desvio padrão. Por outro lado, um bom ajuste dos valores de dados com a regressão linear é claramente observado para o sinal filtrado, que é um comportamento desejável para monitorar o processo, porque um limiar pode ser facilmente estabelecido para detectar a ocorrência de queimas. O valor R-squared para a regressão linear no sinal de EA, após a filtragem na banda de 94-100 kHz, é de 0,987. Pode-se observar claramente que existe um comportamento linear entre os valores médios EA RMS e heq quando o sinal é filtrado. Além disso, os limites de confiança são estreitos, o que indica um encaixe muito bom dos coeficientes.

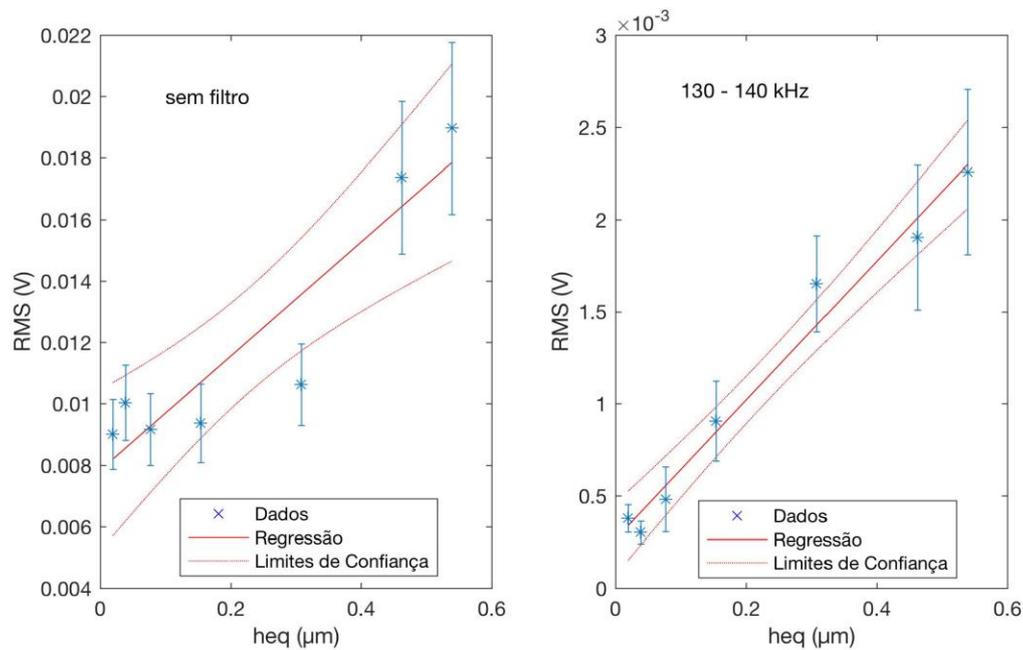


Figura 4.10 - RMS para sinal de PZT: (a) sem filtro, (b) com filtro.

No caso dos valores médios do PZT RMS, apresentados na Figura 4.10a, o comportamento do sinal não filtrado apresentou uma tendência de crescimento linear muito melhor quando comparado com EA (valor R-squared de 0,857). Ao observar os valores RMS do sinal puro filtrado na banda de frequência de 130-140 kHz, pode-se perceber que os valores médios do RMS ficaram mais alinhados com a reta de regressão. Isso é representado pelo valor R-squared de 0,978 e região de confiança mais estreita.

Verificou-se que os valores de desvio padrão se tornam maiores quando a condição de usinagem é mais severa até a ocorrência da queima, característica utilizada em AGUIAR, BIANCHI e OLIVEIRA (2002) para o parâmetro proposto. Embora o RMS sem filtro não represente isso tão precisamente para o sensor EA, o sinal filtrado mostra uma melhoria neste aspecto para a banda 94-100 kHz. No caso do PZT, o sinal não filtrado apresenta um melhor comportamento de desvio padrão quando comparado com EA não filtrado em relação à condição de corte. Quando o sinal de PZT é filtrado na banda de 130-140 kHz, pode também ser observada uma melhoria em relação ao sinal não filtrado no que diz respeito ao desvio padrão e à condição de usinagem.

Com base nestas observações, ambos os sensores se comportam de maneira quase linearmente quando os sinais são filtrados numa banda de frequência cuidadosamente selecionada e, por sua vez, se tornam mais interessantes para monitorar a condição da superfície da peça. Assim, o comportamento característico dos sensores demonstra a importância de encon-

trar faixas de frequência que melhor representem as diferenças de cada condição de superfície da peça.

4.1.6 Índices RMSD e CCDM

Conforme foi proposto, os índices RMSD e CCDM foram obtidos para várias bandas de frequência. O índice CCDM não apresentou correlação entre os sinais e as condições das peças usinadas, isto é, o comportamento desse índice se mostrou inconsistente e, com base nisso, não foi considerado neste estudo. Já em relação ao RMSD, algumas bandas adequadas foram selecionadas para monitorar a condição da peça, mas apenas uma banda foi considerada neste estudo, ou seja, 94-100 kHz para o sensor de EA e 130-140 kHz para o diafragma piezoelétrico. Os resultados do índice RMSD são apresentados nas Figuras 4.11 e 4.12, para EA e PZT, respectivamente.

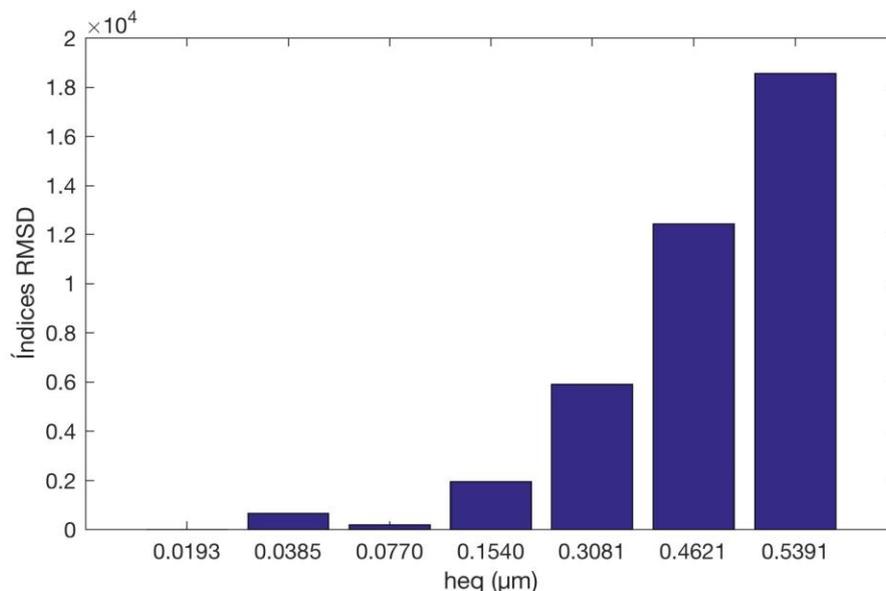


Figura 4.11- RMSD obtido de EA na banda 94-100 kHz.

Os índices nas Figuras 4.11 e 4.12 foram calculados considerando a densidade espectral de potência dos sinais, e a peça com a menor profundidade de corte foi considerada como referência ou linha de base, que foi a condição de usinagem mais branda usada nos ensaios de retificação. Esta peça foi identificada como condição normal ou peça boa, de acordo com análises realizadas após a retificação. Pode-se observar nestas figuras uma clara tendência de aumento à medida que a condição de usinagem se torna mais severa. Este comportamento é de grande importância para estabelecer um limiar no intuito de monitorar a condição da super-

fície da peça e detectar a ocorrência de queima ou mesmo peça com alto valor de rugosidade superficial. Vale ressaltar que a queima ocorreu nas peças 6 ($heq = 0,4621 \mu\text{m}$) e 7 ($heq = 0,5391 \mu\text{m}$).

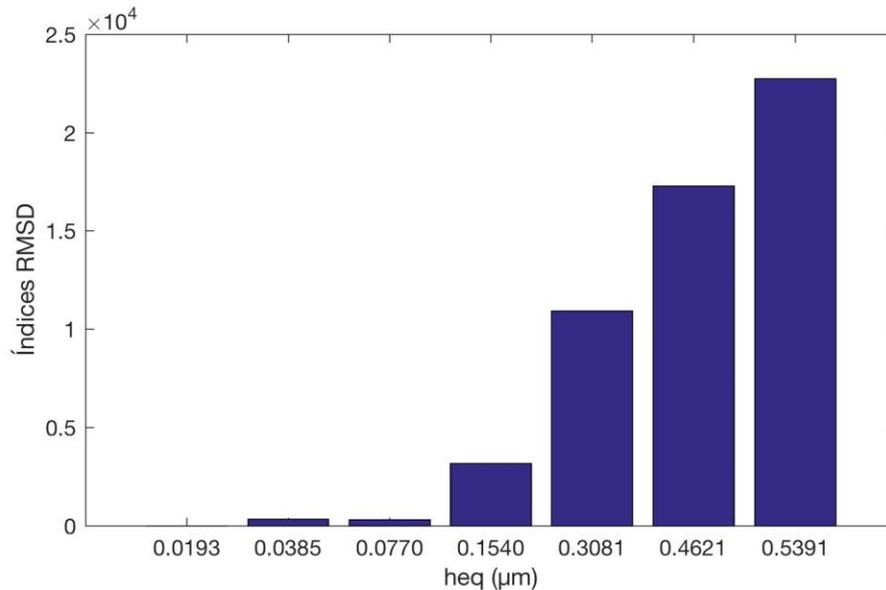


Figura 4.12- RMSD obtido de PZT na banda 130-140 kHz.

Os resultados apresentados foi referente ao conjunto dos ensaios realizados para demonstrar a metodologia, onde se utilizou sete peças de aço ABNT 1045 com rebolo CBN. Conforme descrito anteriormente, um novo conjunto de ensaios foi realizado, no intuito de verificar o método proposto, onde se utilizou oito peças novas de aço ABNT 1045 e um rebolo de óxido de alumínio.

4.2 RESULTADOS DOS ENSAIOS PARA O AÇO ABNT 1045 E REBOLO ÓXIDO DE ALUMÍNIO

A seguir, os resultados deste novo conjunto de ensaios são descritos e explicados, sabendo que, assim como se deu com o conjunto de ensaios anteriores, os parâmetros e as configurações definidas foram mantidos a fim de se estabelecer um padrão, exceto para as profundidades de corte, em que o objetivo era obter diferentes condições de superfície na peça. Todo o processamento digital aplicado nos sinais já realizados anteriormente também foi utilizado nesta etapa de verificação do método.

A ordem utilizada para exibir os resultados anteriores também é aplicada aqui, facilitando a compreensão do trabalho.

4.2.1 Inspeção visual da superfície da peça

As superfícies das peças também foram digitalizadas após a retificação, e novamente no intuito de avaliar as imagens e detectar as diferentes condições, ou seja, queima e condição normal. Os resultados da inspeção visual podem ser conferidos na Figura 4.13.

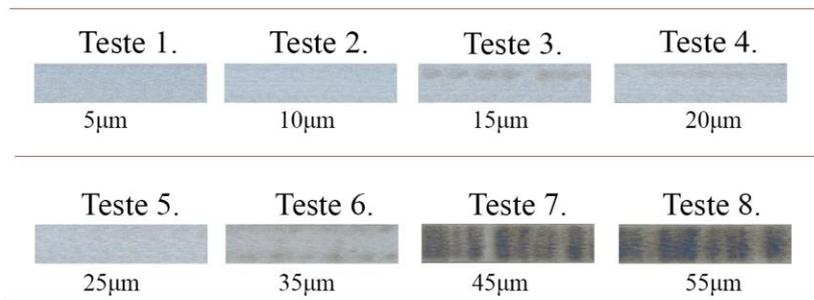


Figura 4.13 - Condição superficial das peças usinadas em diferentes profundidades de corte.

É possível observar a alteração de cor na superfície das peças apresentadas na Figura 4.13. Nos ensaios 1, 2 e 5, as superfícies não apresentam alteração de cor, as quais se encontram visualmente como condição normal de usinagem; nos ensaios 3 e 4, podem ser observadas ligeiras ocorrências de alteração de cor na parte superior das peças; uma alteração mais significativa pode ser vista por toda a superfície do teste 6; e, finalmente, uma alteração expressiva ocorreu nos ensaios 7 e 8, pois uma cor escura aparece ao longo da superfície da peça. Conforme mencionado anteriormente, apenas a coloração na superfície das peças não determina a ocorrência de queima, sendo necessário a análise por meio da aplicação de outras técnicas.

4.2.2 Medição da rugosidade superficial

Os valores de rugosidade superficial com seus respectivos desvios padrão podem ser conferidos na Figura 4.14. Cada peça numerada de 1 a 8 representa a média e desvio padrão do valor de rugosidade em função do *heq*.

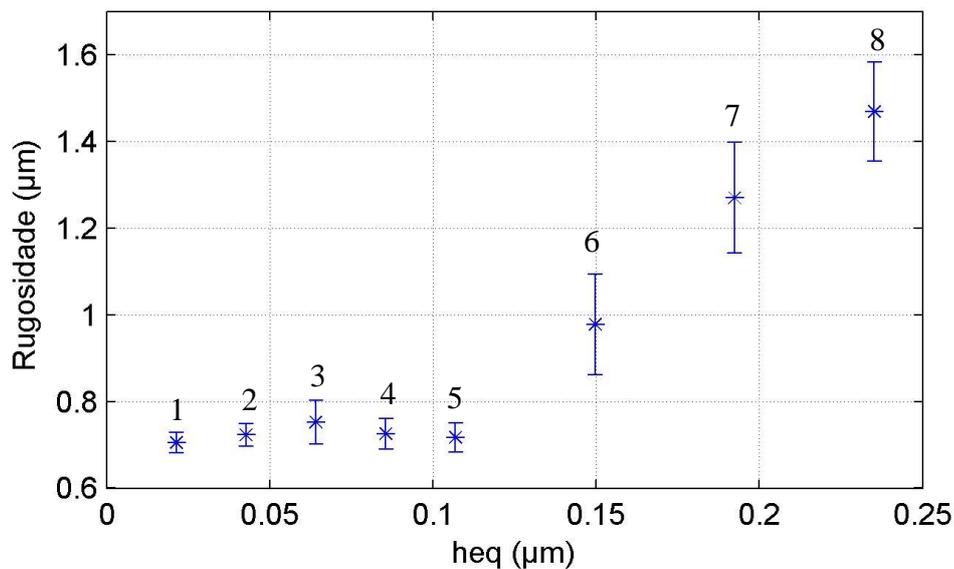


Figura 4.14- Valores médio de rugosidade para cada peça.

Pode-se observar que os valores de rugosidade estão relacionados à condição de usinagem (*heq*), como também foi observado para os demais experimentos apresentados no item 4.1, e essa tendência pode ser verificada em KLOCKE; BRINKSMEIER; WEINERT (2005). Além disso, apenas as peças 7 ($heq = 0,1924 \mu\text{m}$) e 8 ($heq = 0,2352 \mu\text{m}$) podem ser consideradas fora da faixa de aplicações médias (KALPAKJIAN e SCHMID, 2013). Além disso, os valores de desvio padrão para as peças 1 a 5 são pequenos quando comparados aos maiores valores observados para as peças 6 a 8. Esse comportamento é esperado, porque quanto mais agressiva for a condição de usinagem, maior será a variação nas irregularidades superficiais ao longo da peça, o que também pode ser verificado em NASCIMENTO *et al.* (2015). Este aspecto é aumentado quando ocorre a queima. A rugosidade superficial é um parâmetro fundamental para avaliar o acabamento da superfície da peça. No entanto, ela não pode ser suficiente para detectar danos, uma vez que uma peça com danos pode mostrar valores aceitáveis de rugosidade superficial como verificado em NASCIMENTO *et al.* (2015). Portanto, outras técnicas são necessárias para este fim.

4.2.3 Metalografia e medição de dureza vickers

Embora a metalografia de todas as peças tenha sido feita, apenas duas, representando boa condição e queima, foram escolhidas para apresentar os resultados principais, ou seja, a peça 2 ($heq = 0,0428$) e a peça 8 ($heq = 0,2352$), e podem ser conferidas na Figura 4.15.

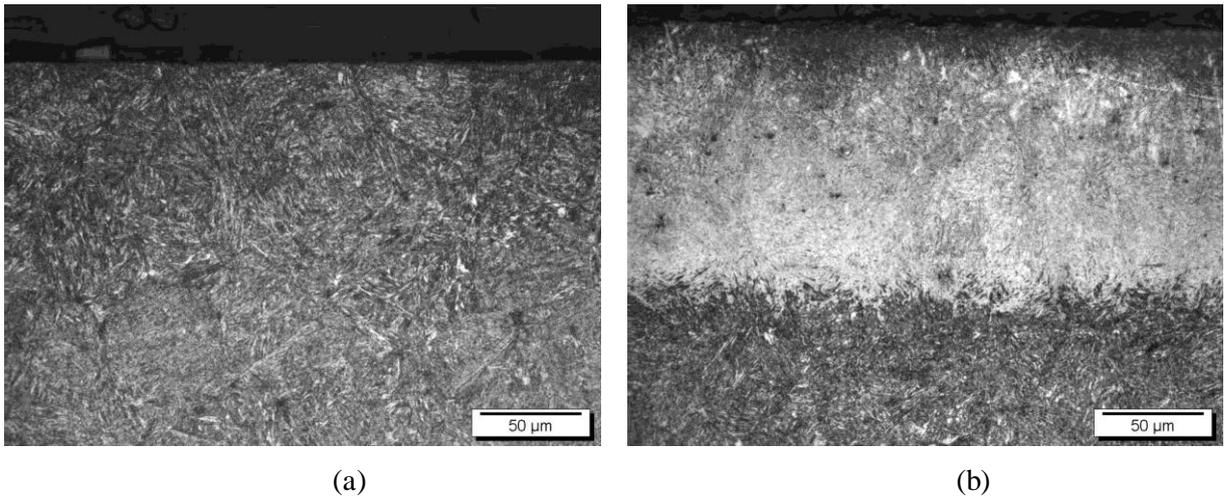


Figura 4.15- Metalografia para boa condição (a) e queima (b), peças 2 e 8, respectivamente.

Pode ser observado na Figura 4.15a que a estrutura martensítica permanece intacta, indicando uma boa condição superficial. Já na Figura 4.15b, nota-se que o aumento excessivo de temperatura na zona de corte provocou alteração micro estrutural, que pode ser conferida por meio da formação da camada branca e, assim, novamente provando que a queima ocorreu.

A medição de dureza Vickers também foi realizada para todas as peças, no entanto, apenas as peças 2 e 8 foram selecionadas e mostradas na Figura 4.16.

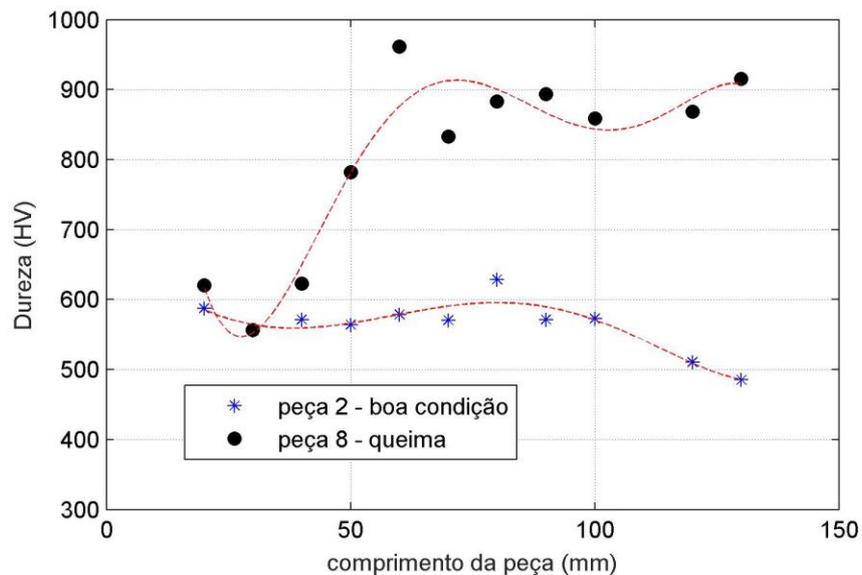


Figura 4.16- Dureza vickers para boa condição (a) e queima (b), peças 2 e 8, respectivamente.

É possível observar na Figura 4.16 que a faixa de medições de dureza Vickers para a peça com boa condição se encontra dentro dos valores estabelecidos pela indústria, conforme já citado. Por outro lado, a peça 8 alcançou valores acima dos 900 HV, que é justificado pela formação de camada branca, conforme verificado pela análise metalográfica mostrada na Figura 4.15- Metalografia para boa condição (a) e queima (b), peças 2 e 8, respectivamente.

Portanto, com base nas análises metalográficas e medidas de dureza, a ocorrência de queima se deu somente para a peça 7 ($heq = 0,1924$) e peça 8 ($heq = 0,2352$).

4.2.4 Seleção de bandas de frequência

A seguir, a Figura 4.17- Espectro de (emissão acústica) EA. e Figura 4.18- Espectro de (diafragma piezoelétrica) PZT. mostram os espectros da emissão acústica e do diafragma piezoelétrico, respectivamente, para três condições distintas de usinagem. Pode-se perceber que a faixa dos espectros é semelhante quando comparada com os ensaios anteriores realizados com um rebolo diferente, o que demonstra a qualidade do diafragma em comparação com o sensor EA.

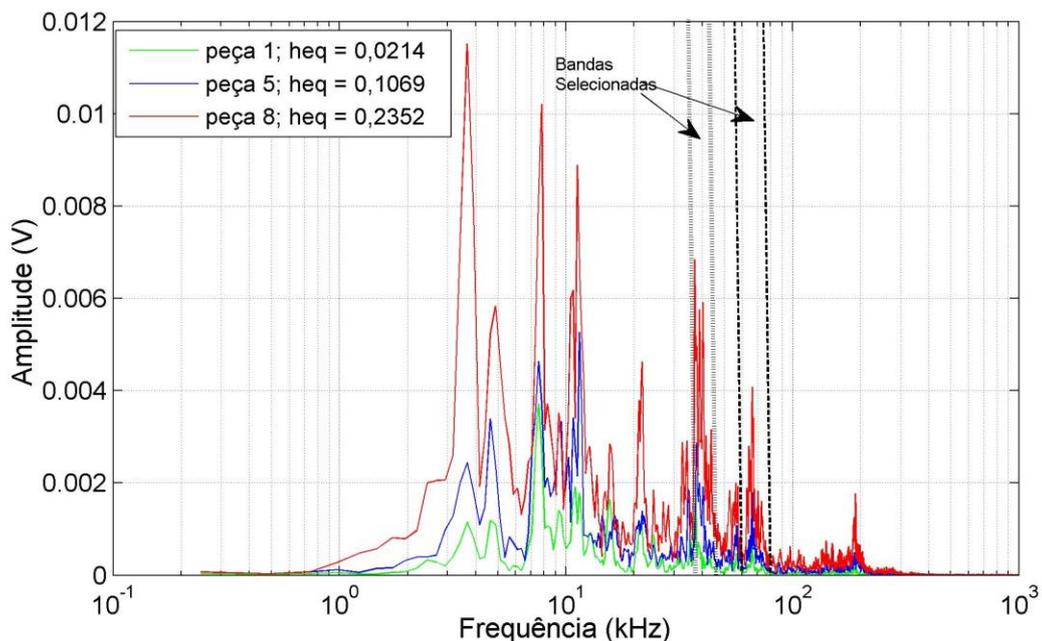


Figura 4.17- Espectro de (emissão acústica) EA.

O comportamento característico do espectro para a peça 8, que sofreu queima, apresenta de modo geral as maiores amplitudes. Por outro lado, o comportamento do espectro para

as peças 1 e 5 apresentou amplitudes menores de acordo com sua condição de usinagem, ou seja, quanto maior for o *heq*, mais severo será o processo de retificação e, conseqüentemente, maior a amplitude. No entanto, em algumas regiões podem ser observadas sobreposições, desse modo, uma ampliação destes espectros se torna necessária para se selecionar as melhores bandas de frequência relacionadas com a condição de superfície das peças.

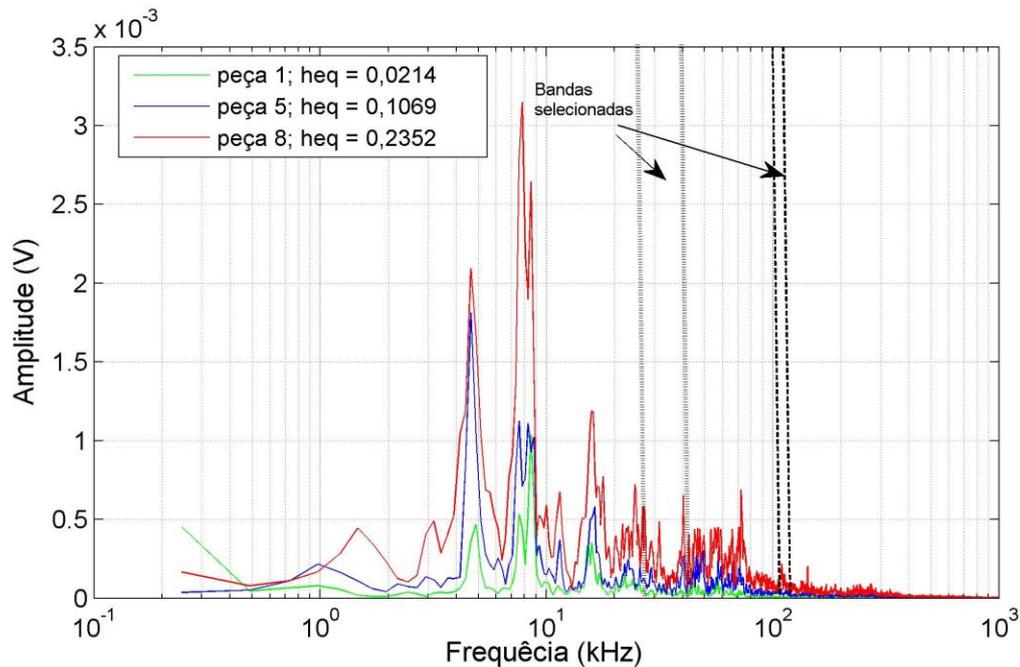


Figura 4.18- Espectro de (diafragma piezoelétrica) PZT.

Assim, os espectros foram analisados minuciosamente de forma a se encontrar bandas de frequência estreitamente relacionadas com a condição de superfície das peças. As bandas de frequência de 38-46 kHz e 60-80 kHz foram encontradas para EA, e de 27-42 kHz e 107-117 kHz para PZT. A ampliação de duas bandas de frequência para cada sensor é apresentada na Figura 4.19 - Ampliação das bandas de frequência para sinal EA: (a) 38-46 kHz e (b) 60-80 kHz e na Figura 4.20 - Ampliação das bandas de frequência para sinal PZT: (a) 27-42 kHz and (b) 107-117 kHz..

Pode-se observar nas Figura 4.19 - Ampliação das bandas de frequência para sinal EA: (a) 38-46 kHz e (b) 60-80 kHz e 4.20 que quando a banda de frequência é ampliada, um comportamento distinto de cada espectro está presente. Esta observação permite a escolha de bandas de frequência nas quais as amplitudes aumentam à medida que a condição de usinagem se torna mais severa. Além disso, busca-se por uma sobreposição mínima entre as curvas.

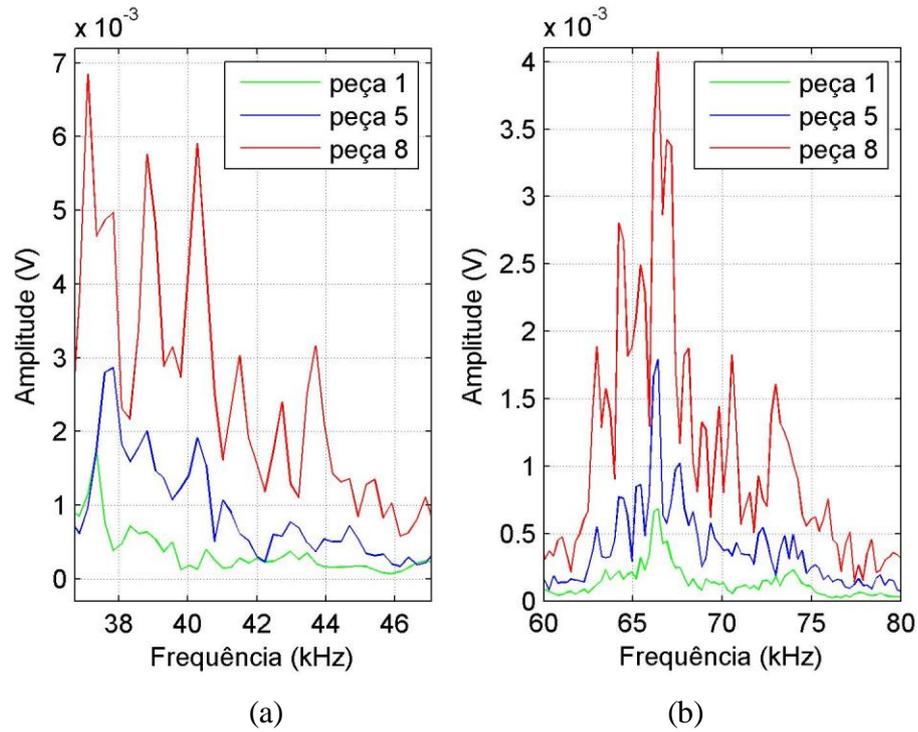


Figura 4.19 - Ampliação das bandas de frequência para sinal EA: (a) 38–46 kHz e (b) 60–80 kHz.

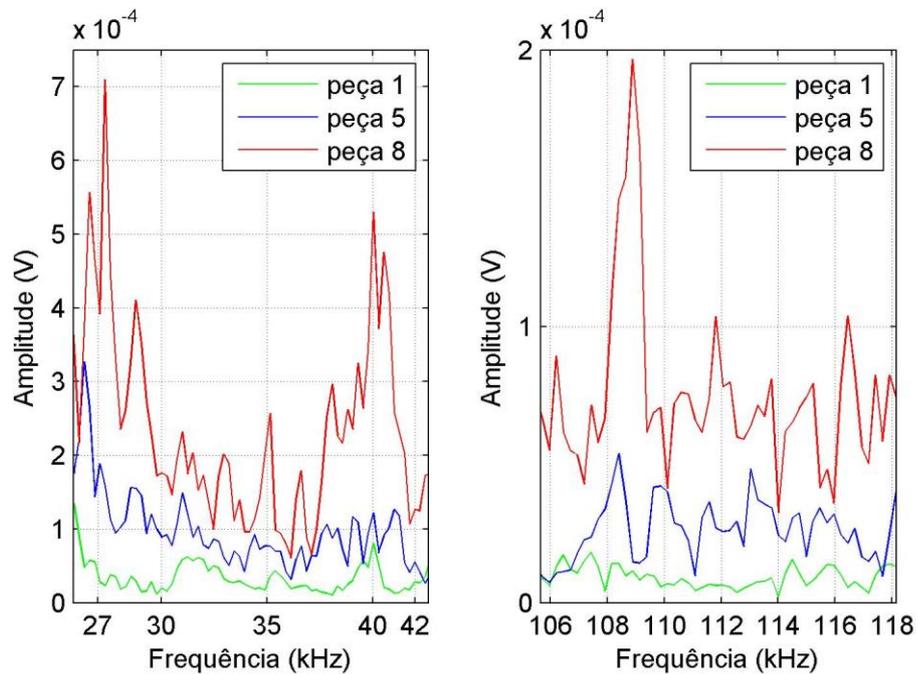


Figura 4.20 - Ampliação das bandas de frequência para sinal PZT: (a) 27–42 kHz and (b) 107–117 kHz.

4.2.5 RMS dos sinais filtrados em bandas escolhidas

A Figura 4.21 - RMS para sinal de EA: (a) sem filtro, (b) com filtro. e a Figura 4.22 - RMS para sinal de PZT: (a) sem filtro, (b) com filtro. mostram os valores RMS obtidos a partir de sinais não filtrados e filtrados para os sensores EA e PZT, respectivamente. Os sinais filtrados são mostrados apenas para bandas de frequência de 38-46 kHz e 107-117 kHz para EA e PZT, respectivamente. A tendência de aumento desses valores mostra que existe também uma relação entre o RMS e a condição de corte (*heq*) e, desse modo, isso pode ser usado como ferramenta para monitorar o processo. Além disso, os valores RMS se ajustam bem linearmente para sinais não filtrados e filtrados. No entanto, os sinais filtrados apresentaram uma regressão muito ajustada, cujos valores de *R-squared* de 0,978 e 0,984 foram encontrados para EA e PZT, respectivamente.

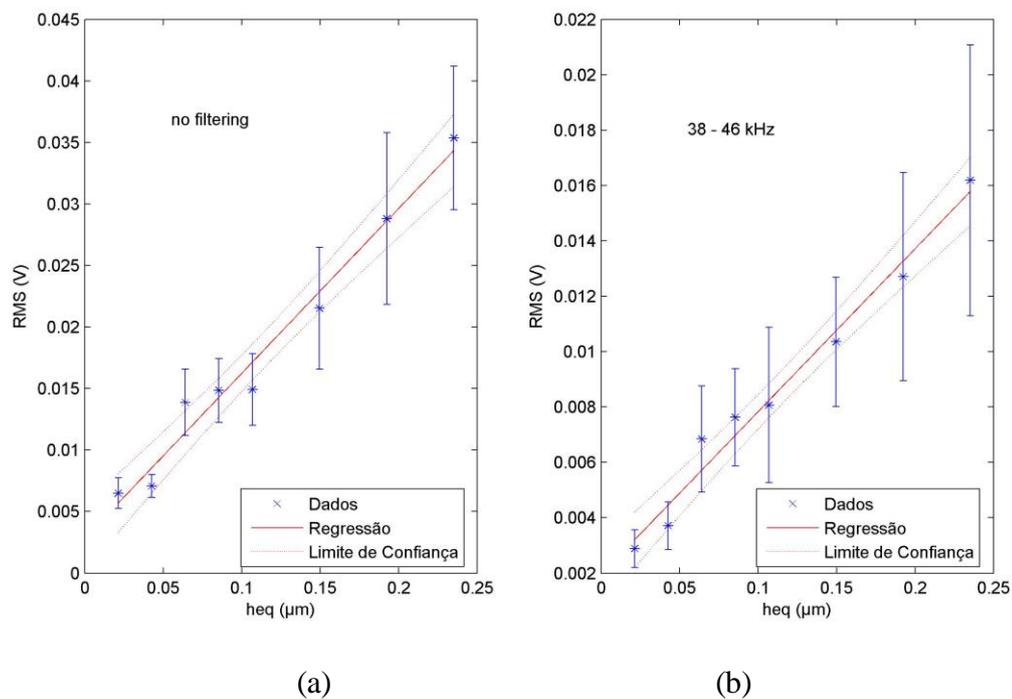


Figura 4.21 - RMS para sinal de EA: (a) sem filtro, (b) com filtro.

Os limites de confiança da regressão linear para EA e PZT filtrados e não filtrados são quase os mesmos, mostrando um bom ajuste em ambos os casos. No entanto, os desvios padrão são mais pronunciados para PZT e EA filtrados, o que melhor reflete o comportamento da condição da superfície da peça, como observado anteriormente no item 4.1. Por conseguinte, este comportamento característico dos sinais é de grande importância para um sistema de monitoramento, onde um limiar pode ser facilmente definido para detectar a ocorrência de

queima na retificação, e até mesmo para determinar um limite de rugosidade superficial no intuito de atender as especificações de qualidade superficial da peça.

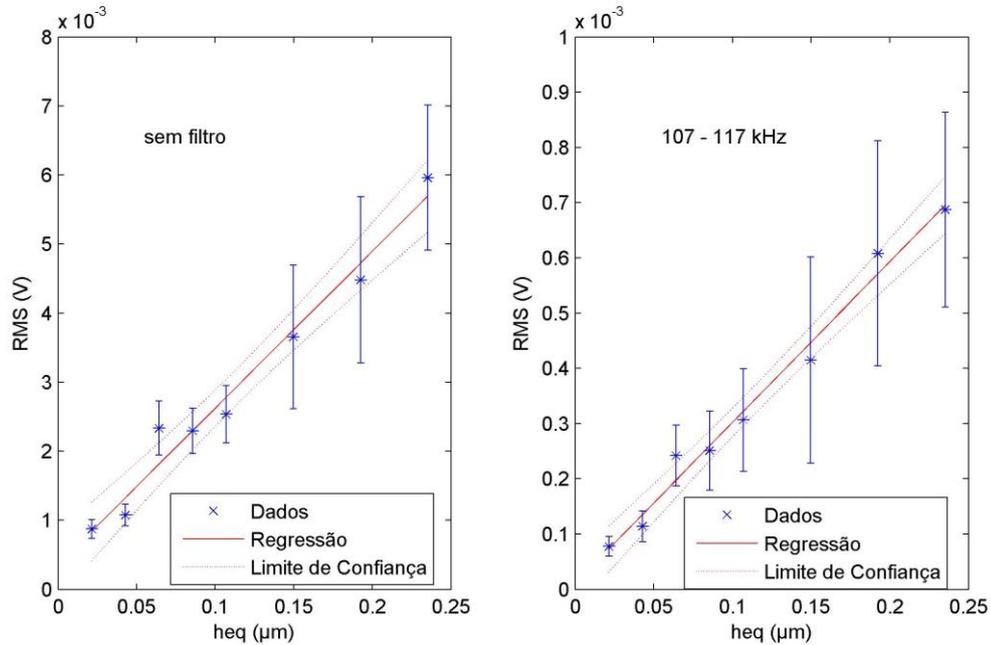


Figura 4.22 - RMS para sinal de PZT: (a) sem filtro, (b) com filtro.

4.2.6 Índices RMSD e CCDM

Os índices CCDM não apresentaram uma boa relação com as condições das superfícies da peça para estes novos ensaios e, portanto, não foram considerados. Os índices RMSD foram obtidos para várias faixas de frequência. No entanto, apenas os resultados para a banda de frequência de 38-46 kHz para EA e 107-117 kHz para PZT são mostrados nas Figuras 4.23 e 4.24, respectivamente. Pode ser claramente observado nestas figuras a tendência de aumento do valor do índice à medida que a condição de usinagem se torna mais severa para ambos os sensores. Além disso, os valores de índice para peças 7 (heq = 0,1924) e 8 (heq = 0,2352), em que a queima decorrente da retificação foi verificada, são muito mais elevados do que os de outras peças. Por conseguinte, o índice RMSD revelou ser um indicador muito bom para monitorar os danos da peça em relação à queima.

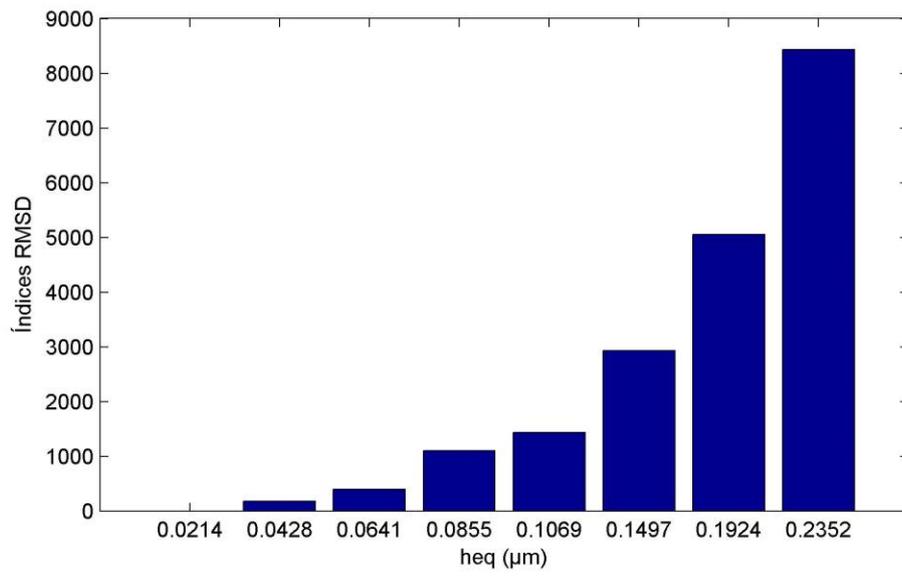


Figura 4.23- RMSD obtido de EA na banda 38-46 kHz.

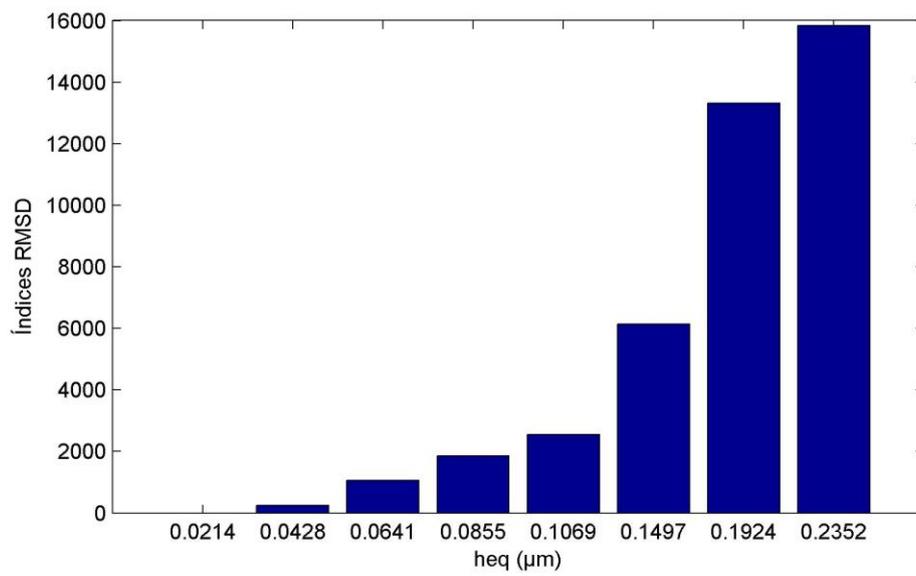


Figura 4.24- RMSD obtido de PZT na banda 107-117 kHz.

Capítulo 5 –CONCLUSÕES

Neste trabalho, o diafragma piezelétrico passivo (PZT) de baixo custo foi aplicado no monitoramento do processo de retificação, buscando avaliar a superfície de peças de aço ABNT 1045. O PZT também foi comparado com o sensor de EA, que já é amplamente usado na indústria.

Estatísticas e avaliações das peças foram usadas neste trabalho, tais como rugosidade, metalografia e dureza vickers. Adicionalmente, processamento digital foi usado para obter vetores de RMS, FFT, RMSD e CCDM. Apenas o CCDM não apresentou bom resultado. Com o processamento digital, foi possível obter sinais filtrados de modo a relacionar as condições das peças com os respectivos sinais.

Os sinais foram filtrados digitalmente no intuito de eliminar frequências indesejadas e facilitar a extração de características. A FFT foi obtida e usada para selecionar bandas de frequência melhor relacionadas com as condições. Por meio das bandas selecionadas, obteve-se sinais filtrados nas bandas escolhidas, o que proporcionou obter um melhor relacionamento dos sinais com as condições das peças.

Os sinais filtrados relacionados com as condições superficiais de cada peça permitiram identificar peças com boa condição e peças com queima. A rugosidade também mostrou seguir um comportamento com base nas condições de usinagem, embora deva ser usado em conjunto com outros parâmetros.

O índice RMSD foi calculado a partir de algumas bandas escolhidas e se apresentou relacionado com as condições citadas, permitindo inclusive determinar um possível limiar para separar peças de boa condição de peças com dano superficial. O sensor PZT se mostrou muito eficiente na detecção da queima quando comparado com o EA, pois apresentou boa relação com as condições de corte.

Os resultados dos dois conjuntos de ensaios, tanto com rebolo CBN quanto com rebolo de óxido de alumínio, apresentaram muitas similaridades quanto ao uso do sensor PZT, pois para ambos os conjuntos de ensaios, os sinais obtidos foram adequados para a detecção da queima, que pôde ser comprovado com a metalografia e a medição de dureza vickers.

Com base em todos os resultados obtidos, pode-se assim concluir que o sensor PZT é uma ótima alternativa ao sensor de EA no monitoramento do processo de retificação.

5.1 Sugestão para os próximos trabalhos.

- ❖ Ampliar as investigações no intuito de se encontrar bandas de frequência que permitam alcançar resultados ainda melhores, bem como o emprego de combinação com outros parâmetros;
- ❖ Investigar o monitoramento por bandas de frequência para outros materiais e rebolos, e se incluir o estudo de tensões residuais nas peças usinadas;
- ❖ Estudar o efeito da temperatura nos sinais do PZT e EA quando da retificação a seco e com fluido, de forma a se obter um sistema que compense as diferenças;
- ❖ Proposição de um sistema de inteligência computacional para a estimação da condição da qualidade das peças retificadas usando-se o valor RMS e índice RMSD como entradas, para vários tipos de aços e rebolos.

REFERÊNCIAS

AGARWAL, S.; VENKATESWARA RAO, P., **Modeling and prediction of surface roughness in ceramic grinding**. International Journal of Machine Tools and Manufacture, v. 50, n. 12, pp. 1065–1076, 2010.

AGUIAR P. R., WILLETT P., WEBSTER J., **Acoustic emission applied to detect workpiece burn during grinding**, in: S. Vahaviolos (Ed.), Acoustic Emission: Standards and Technology Update, vol. STPB53, ASTM, West Conshohocken, Pennsylvania, pp. 107–124, 1999.

AGUIAR, P.R.; BIANCHI, E.C.; OLIVEIRA, J., “**A method for burning detection in grinding process using acoustic emission and effective electrical power signal**”, CIRP J. Manuf. Syst., vol. 31, no. 3, pp. 253–257, 2002.

AGUIAR, P. R. *et al.*, **In-process grinding monitoring through acoustic emission**. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, v. 28, n. 1, pp. 118–124, mar. 2006.

AGUIAR, P. R. *et al.*, **Monitoramento da queima superficial no processo de retificação plana por intermédio de sinais de emissão acústica e força de corte**. 2º Congresso Nacional de Engenharia Mecânica. pp. 12-16, ago. 2002.

ALMABROUK, H.; KHARROUBI, M.; TOUNSI, F., *et al.*, “**Macro model analysis of a single mass 6-DOF inertial measurement unit system**”, in Proc. of 11th Design & Test Symposium (IDT), Hammamet, Tunisia, pp. 290-295, 2016.

ALMEIDA, V. A. D. D. *et al.*, **Experimental Analysis of Piezoelectric Transducers for Impedance-Based Structural Health Monitoring**. In Proceedings of the 1st Int. Electron. Conf. Sens. Appl., 1–16 June 2014; Sciforum Electronic Conference Series, Vol. 1, f004; doi:10.3390/ecsa-1-f004, 2014.

ALMEIDA, V. A. D.; MENDES, L. C.; BAPTISTA, F. G., **Deteção de dano baseada na impedância E/M com transdutores piezelétricos de baixo custo**. XX Congresso Brasileiro de Automática, pp. 385–390, 2014.

ANTONIOU, A., **Digital Filters: Analysis, Design, and Applications**. Nova Iorque: McGrawHill, 1993.

AXINTE, D. A. *et al.*, **Process monitoring to assist the workpiece surface quality in machining**. International Journal of Machine Tools and Manufacture, v. 44, n. 10, pp. 1091–1108, 2004.

BERKOVITS, A.; FANG, D., **Study of fatigue crack characteristics by acoustic emission**. Engineering Fracture Mechanics, v. 51, n. 3, pp. 401–416, 1995.

BIFANO, T. G.; YI, Y., **Acoustic emission as an indicator of material-removal regime in glass micro-machining**. Precision Engineering, v. 14, n. 4, pp. 219–228, 1992.

BLUM, T.; SUZUKI, I.; INASAKI, I. **Development of a condition monitoring system for cutting tools using an acoustic emission sensor**. Bulletin of the Japan Society of Precision Engineering, v. 22, 1998.

CASTRO, B. *et al.*, **Partial Discharge Monitoring in Power Transformers Using Low-Cost Piezoelectric Sensors**. Sensors (Basel), v. 16, n. 8, p. 1266, 2016.

CRUZ, C. E. D.; AGUIAR, P. R.; MACHADO, Á. R.; BIANCHI, E. C.; CONTRUCCI, J. G.; and NETO, F. C.; “**Monitoring in precision metal drilling process using multi-sensors and neural network**” Int. J. Adv. Manuf. Technol., vol. 66, no. 1–4, pp. 151–158, Jun. 2012.

ČILLIKOVÁ, M. *et al.*, **Nondestructive Magnetic Monitoring of Grinding Damage**. Procedia Materials Science, v. 12, pp. 54–59, 2016.

DANOUIJ, B.; TAHAN, S. A.; DAVID, E. **Using a new generation of piezoelectric sensors for partial discharge detection**. Measurement, v. 46, n. 1, pp. 660–666, 2013.

DAVIM, J. P., **Machining: fundamentals and recent advances**. 2nd ed. London: Springer Verlag, 2008.

DE ALMEIDA, V. A. D.; BAPTISTA, F. G.; DE AGUIAR, P. R., **Piezoelectric transducers assessed by the pencil lead break for impedance-based structural health monitoring**. IEEE Sensors Journal, v. 15, n. 2, pp. 693–702, 2015.

DEIVA NATHAN, R.; VIJAYARAGHAVAN, L.; KRISHNAMURTHY, R. **In-process monitoring of grinding burn in the cylindrical grinding of steel**. Journal of Materials Processing Technology, v. 91, n. 1, pp. 37–42, 1999.

DHANASEKAR, B. *et al.*, **Evaluation of surface roughness based on monochromatic speckle correlation using image processing**. Precision Engineering, v. 32, pp. 196 – 206., 2008.

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**. 4a ed. Campinas, SP: Artiber Editora Ltda, 2003.

DOTTO, F. R. L. *et al.*, **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. 2, pp. 153–160, 2006.

DURGUMAHANTI, U. S. P.; VIJAYENDER, P. S.; VENKATESWARA, R. A. **New model of grinding force prediction and analysis**. *International Journal of Machina Tools & Manufacture*, v. 50, pp. 231–240, 2010.

ELANGO VAN, M. *et al.*, **Evaluation of expert system for condition monitoring of a single point cutting tool using principle component analysis and decision tree algorithm**. *Expert Systems with Applications*, v. 38, n. 4, pp. 4450–4459, 2011.

EUZEBIO, C. D. G. *et al.*, **Monitoring of grinding burn by fuzzy logic**. *ABCM Symposium Series in Mechatronics*, v. 5, pp. 637–645, 2012.

FERREIRA, M. C., **Apostila de preparo de amostras para a realização do teste de microdureza**, UFSC. Florianópolis, 2004.

GRAF, W., **Cylindrical Grinding**. Copyright WST Winterthur Schleiftechnik AG, Suíça, 87p., 2004.

GRIFFITHS, B. J.; MIDDLETON, R. H.; WILKIE, B. A., **Condition monitoring of the grinding process using light scattering**. *Wear*, v. 198, n. 1–2, pp. 39–45, out. 1996.

HASSUI, A. *et al.*, **Experimental evaluation on grinding wheel wear through vibration and acoustic emission**. *Wear*, v. 217, n. 1, pp. 7–14, 1998.

HASSUI, A., **Estudo de vibração durante o corte e centelhamento na retificação cilíndrica de mergulho**, Tese de Doutorado, Unicamp, Campinas/SP, 2002.

HAYKIN, S; BARRY, V., **Sinais e Sistemas**. Porto Alegre: Bookman, 668 p., 2001.

HECKER, R. L.; LIANG, S. Y. **Predictive modeling of surface roughness in grinding**. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, v. 43, n. 8, pp. 755–761, 2003.

HUANG, H.; LIU, Y., **Experimental investigations of machining characteristics and removal mechanisms of advanced ceramic sin high speed deep grinding**. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, v. 43, pp. 811–823, 2003.

HUNDT, W. *et al.*, **An approach to monitoring of the grinding process using acoustic emission (ae) technique**. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, v. 43, n. 1, p. 295–298, 1994.

HUNDT, W.; KUSTER, F.; REHSTEINER, F., **Model-based AE monitoring of the grinding process**. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, v. 46, n. 1, pp. 243–247, 1997.

INASAKI, I.; KARPUSCHEWSKI, B.; LEE, H. S., **Grinding chatter - origin and suppression**. *Annals of the CIRP*, v. 50, n. 2, pp. 515–534, 2001.

JACKSON, M. J.; ROBINSON, G. M.; CHEN, X., **Laser Surface Preparation of Vitrified Grinding Wheels**. Journal of Materials Engineering and Performance, v. 15, pp. 247–250, 2007.

KALPAKJIAN, S.; SCHMID, S., **Manufacturing Engineering and Technology**, 7th ed., Pearson, 1224 p., 2014.

KING, R. I.; HAHN, R. S., **Handbook of modern grinding technology**. 3a ed. New York: Chapman and Hall, 1992.

KLOCKE, F.; BRINKSMEIER, E.; WEINERT, K., **Capability Profile of Hard Cutting and Grinding Processes**. CIRP Annals - Manufacturing Technology, v. 54, n. 2, pp. 22–45, 2005.

KOHLI, S. P.; GUO, C. e MALKIN, S., **Energy partition for grinding with aluminum oxide and CBN abrasive wheels**. ASME Journal of Engineering for Industry, v.117, pp.160-168, 1995.

KWAK, J. S.; HA, M. K., **Neural network approach for diagnosis of grinding operation by acoustic emission and power signals**. Journal of Materials Processing Technology, v. 147 n1, pp. 65–71, 2004.

LANDERS, R.G.; ULSOY, A.G.; FURNESS, **Analysis of mechanical systems**, CRC Press R.J, 1999.

LAURO, C. H. *et al.*, **Monitoring and processing signal applied in machining processes - A review**. Measurement, vol 58, pp. 73-86, 2014.

LE, S.; HEGAB, H., **"Investigation of a multistage micro gas compressor cascaded in series for increase pressure rise"**, Sens. Actuators A: Phys., vol. 256, pp. 66-76, Apr. 2017.

LI, Z. *et al.*, **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, pp. 1414–1424, 2016.

LIAO, T.W., HUA, G., QU, J., BLAU, P.J., **Grinding Wheel Conditions Monitoring eith Hidden Markov Model-Based Clustering Methods**. Machining Science and Technology, vol 10, pp. 511-538, 2006.

LIAO, T.W. *et al.*, **A wavelet-based methodology for grinding wheel condition monitoring**. International Journal of Machine Tools and Manufacture, v. 47, n. 3–4, pp. 580–592, 2007.

LIAO, T.W., **Feature extraction and selection from acoustic emission signals with an application in grinding wheel condition monitoring**. Engineering Applications of Artificial Intelligence, v. 23, n. 1, pp. 74–84, 2010.

LIANG, R.; WANG, Q. M., **High sensitivity piezoelectric sensors using flexible PZT thick-film for shock tube pressure testing**. Sensors and Actuators, A: Physical, v. 235, pp. 317–327, 2015.

LIANG, S. Y., HECKER, R. L., LANDERS, R. G. **Machining Process Monitoring and Control: The State-of-the-Art**. ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Manufacturing, pp. 599-610. doi:10.1115/IMECE2002-32640, 2002.

LINKE, B., **Dressing process model for vitrified bonded grinding wheels**. CIRP Annals - Manufacturing Technology, v. 57, pp. 345–348, 2008.

LYONS, R. G., **Understanding Digital Signal Processing**. 2 ed., Prentice Hall, 2004.

MALKIN, S., **Current trends in CBN grinding technology**. Annals of the CIRP, v.34/1, pp. 557-560, 1985.

MALKIN, S.; GUO, C., **Theory and Applications of Machining with Abrasives**. 2a ed., New York: Society of Manufacturing Engineers, 2008.

MARCHI, M. *et al.*, **Grinding process monitoring based on electromechanical impedance measurements**. Measurement Science and Technology, v. 26, n. 4, p. 45601, 2015.

MARINELLI, N., COELHO, R. T., OLIVEIRA, J. F. G., **Emissão acústica no monitoramento da dressagem de rebolos de alumina**, Revista Máquinas e Metais, pp. 56 – 73, 1998.

MARINESCU, I. D. *et al.*, **Handbook of machining with grinding wheels**. 1a ed. Taylor & Francis Group, 2007.

MARTINS, C. H. R. *et al.* **Tool condition monitoring of single-point dresser using acoustic emission and neural networks models**. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, v. 63, n. 3, pp. 667–679, 2014.

MIRANDA, Hugo I.C. *et al.*, **Fuzzy logic to predict thermal damages of ground parts**. Proceedings of the 10th IASTED International Conference on Artificial Intelligence and Applications, AIA, pp. 434-441, 2010.

NASCIMENTO, W. R. do; YAMAMOTO, A. A.; MELLO, H. J. de; CANARIM, R. C.; AGUIAR, P. R. de; BIANCHI, E. C. **“A study on the viability of minimum quantity**

lubrication with water in grinding of ceramics using a hybrid-bonded diamond wheel,” Proc. Inst. Mech. Eng. Part B J. Eng. Manuf., pp. 1–9, abril, 2015.

NA, S.; LEE, H. K. **Neural network approach for damaged area location prediction of a composite plate using electromechanical impedance technique**. Composites Science and Technology, v. 88, pp. 62–68, 2013.

NAKAI, M. E. ; MARCELINO, A. ; GUILLARDI JUNIOR, H. ; AGUIAR, P. R. ; BIANCHI, E. C., **Modelos Neurais na estimação da rugosidade e do desgaste da ferramenta em retificação**. In: VII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica - CONEM2012, São Luís - Maranhão. v. 1. pp. 1-10, 2012.

NAKAI, M. E. *et al.*, **Evaluation of neural models applied to the estimation of tool wear in the grinding of advanced ceramics**. Expert Systems with Applications, v. 42, n. 20, pp. 7026–7035, 2015.

NESLUŠAN, M. *et al.*, **Monitoring of grinding burn via Barkhausen noise emission in case-hardened steel in large-bearing production**. Journal of Materials Processing Technology, v. 240, pp. 104–117, 2017.

NETO, R. F. G. *et al.*, **Monitoring of Grinding Burn by AE and Vibration Signals**. Proceedings of the 6th International Conference on Agents and Artificial Intelligence, v. 1, pp. 272–279, 2014.

NGUYEN, A. T.; BUTLER, D. L., **Correlation of grinding wheel topography and grinding performance: A study from a viewpoint of three-dimensional surface characterisation**. Journal of Materials Processing Technology, v. 208, n. 1, pp. 14–23, 2008.

NILSSON, J. W.; RIEDEL, S. A., **Circuitos Eléctricos**. 6. ed., LTC, 680 p., 2003.

OLIVEIRA, J. F. G.; SILVA, E. J.; BIFFI, M. *et al.*, **New architecture control system for an intelligent high speed grinder**. Abrasives Magazine, USA, n. 06, pp. 4-11, 2002.

OOIJEVAAR, T. H. *et al.*, **Vibration based damage identification in a composite T- beam utilising low cost integrated actuators and sensors**. 6th European Workshop on Structural Health Monitoring (EWSHM 2012), pp. 232–239, 2012.

OPPENHEIM, A. V.; WILLSKY, A., **Signals and Systems**. 2 ed., Pearson, 957 p., 1996.

RAMESH K.; YEO S. H.; GOWRI S.; ZHOUL L., **Experimental evaluation of super high speed grinding of advanced ceramics**, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 17, pp. 87–92, 2001.

REN, Y. H.; ZHANG, B.; ZHOU, Z. X. **Specific energy in grinding of tungsten carbides of various grain sizes**. CIRP Annals - Manufacturing Technology, v. 58, pp. 299–302, 2009.

RIBEIRO, D. M. S., MARCHI, M., OLIVEIRA Jr, C. P., SODÁRIO, R. D., AGUIAR, P. R., BIANCHI, C. E. **Low-cost piezoelectric transducer applied to workpiece surface monitoring in grinding process**. In: ABCM International Congress of Mechanical Engineering, COBEM 2015, Rio de Janeiro- RJ. v. 23, pp. 1-10, 2015.

SAMHOURI, M. S.; SURGENOR, B. W., **Surface roughness in grinding : on-line prediction with adaptive neuro-fuzzy inference system**. Transactions of NAMRI / SME. v. 33, p. 57–64, Jan. 2005.

SENA, L., **Avaliação do sistema de posicionamento do carro porta-rebolo numa retificadora CNC Flexa 600-L com o auxílio de sinais de emissão acústica**. (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

SHAW, M. C., **Principles of abrasives processing**. Oxford Science on Advanced Manufacturing, New York, USA, 1996.

SILVA DE FREITAS, E.; GUIMARÃES BAPTISTA, F., **Experimental analysis of the feasibility of low-cost piezoelectric diaphragms in impedance-based SHM applications**. Sensors and Actuators, A: Physical, v. 238, pp. 220–228, 2016.

SINHA, M. K. et al. **An investigation on surface burn during grinding of Inconel 718**. Journal of Manufacturing Processes, v. 21, pp. 124–133, 2016.

SMITH, S. W., **The scientist and engineer's guide to digital signal processing**, Second Edition, California Technical Publishing, San Diego, California, 1999.

SMITH, J. D., **Vibration Measurement and Analysis**. Butterworths, 166 p., 1989.

SUN, F. *et al.*, **Truss structure integrity identification using PZT sensor-actuator**. Journal of Intelligent Material Systems and Structure, v. 6, pp. 134–139, 1995.

SUTOWSKI, P.; PLICHTA, S., **An investigation of the grinding wheel wear with the use of root-mean-square value of acoustic emission**. Archives of Civil and Mechanical Engineering, v. 6, n. 1, pp. 87–98, 2006.

TETI, R. *et al.*, **Advanced monitoring of machining operations**. CIRP Annals - Manufacturing Technology, v. 59, n. 2, pp. 717–739, 2010.

TÖNSHOFF, H. K.; FRIEMUTH, T.; BECKER, J. C., **Process Monitoring in Grinding**. CIRP Annals - Manufacturing Technology, v. 51, n. 2, pp. 551–571, 2002.

WANG, Z. et al. **Neural network detection of grinding burn from acoustic emission**. International Journal of Machine Tools and Manufacture, v. 41, n. 2, pp. 283–309, 2001.

TÖNSHOFF, H. K. e GRABNER, T., **Cylindrical and profile grinding with boron nitride wheels**. Proceedings of the 5th International Conference on Production Engineering, Tóquio, pp. 326-343, 1984.

V. G. M. ANNAMDAS and C. K. SOH, "**Load monitoring using a calibrated piezo diaphragm based impedance strain sensor and wireless sensor network in real time**", Smart Mater. Struct., vol. 26, no. 4, pp. 1-16, Mar. 2017.

WEBSTER, J. *et al.*, **Acoustic emission for process control and monitoring of surface integrity during grinding**. CIRP Annals - Manufacturing Technology, v. 43, n. 1, pp. 299–304, 1994.

WEBSTER, J.; DONG, W. P.; LINDSAY, R., **Raw Acoustic Emission Signal Analysis of Grinding Process**. CIRP Annals - Manufacturing Technology, v. 45, n. 1, pp. 335–340, 1996.

WEGENER, K. *et al.*, **Conditioning and monitoring of grinding wheels**. CIRP Annals - Manufacturing Technology, v. 60, n. 2, pp. 757–777, 2011.

YANG, J.-F.; CHEN, F.-K. **Recursive discrete Fourier transform with unified IIR filter structures**. Signal Processing, v. 82, n. 1, pp. 31–41, Jan. 2002.

ZENG, Y.; FORSSBERG, E. **Monitoring Grinding Parameters By Vibration Signal Measurement - A Primary Application**. Minerals Engineering, v. 7, n. 4, pp. 495–501, Apr. 1994.

ZHOU, J. H. *et al.*, **Tool wear monitoring using acoustic emissions by dominant-feature identification**. IEEE Trans. Instrum. Meas, v. 60, pp. 547–559, 2011.