

**UNESP- UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA  
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”**

**FEB-FACULDADE DE ENGENHARIA DE BAURU  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**AVALIAÇÃO DE DIAFRAGMA PIEZELÉTRICO NO MONITORAMENTO DAS  
CONDIÇÕES DA SUPERFÍCIE DA PEÇA EM PROCESSO DE RETIFICAÇÃO  
PLANA TANGENCIAL**

**Luiz Felipe Gilli Fabiano**

**Bauru  
2017**

**Luiz Felipe Gilli Fabiano**

**AVALIAÇÃO DE DIAFRAGMA PIEZELÉTRICO NO MONITORAMENTO DAS  
CONDIÇÕES DA SUPERFÍCIE DA PEÇA EM PROCESSO DE RETIFICAÇÃO  
PLANA TANGENCIAL**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia de Bauru da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof<sup>o</sup> Dr. Paulo Roberto de Aguiar

**Bauru**

**2017**

Fabiano, Luiz Felipe Gilli.

Avaliação de diafragma piezelétrico no monitoramento das condições da superfície da peça em processo de retificação plana tangencial / Luiz Felipe Gilli Fabiano, 2017

80 f. : il.

Orientador: Paulo Roberto de Aguiar

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

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

**ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE Mestrado de LUIZ FELIPE GILLI FABIANO, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA, DA FACULDADE DE ENGENHARIA.**

Aos 09 dias do mês de dezembro do ano de 2016, às 14:00 horas, no(a) Anfiteatro da Diretoria Técnica de Informática/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. THIAGO VALLE FRANÇA do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Bauru, Prof. Dr. ARTHUR ALVES FIOCCHI do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Universidade Federal de Uberlândia, sob a presidência do primeiro, a fim de proceder a arguição pública da DISSERTAÇÃO DE Mestrado de LUIZ FELIPE GILLI FABIANO, intitulada **AVALIAÇÃO DE DIAFRAGMA PIEZELÉTRICO NO MONITORAMENTO DAS CONDIÇÕES DA SUPERFÍCIE DA PEÇA EM PROCESSO DE RETIFICAÇÃO PLANA TANGENCIAL**. 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. THIAGO VALLE FRANÇA

Prof. Dr. ARTHUR ALVES FIOCCHI

## **DEDICATÓRIA**

Dedico esse trabalho à minha esposa, família e amigos pelo apoio e compreensão que tiveram nesta jornada, juntamente com admiração constante ao meu esforço.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, pela força espiritual para a realização desse trabalho.

A minha mãe, Gilsa Maria Gilli, pelo eterno orgulho de minha caminhada, pelo apoio, compreensão, ajuda, e, em especial, por todo carinho ao longo deste percurso.

A minha esposa, Gabriela Nojosa Gilli por estar sempre ao meu lado, apoiando durante todos os momentos.

Ao meu orientador Prof. Dr. Paulo Roberto de Aguiar pelos seus ensinamentos e pelas sugestões no decorrer do desenvolvimento deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Eduardo Carlos Bianchi pelos seus ensinamentos durante esta jornada.

Ao amigo César Roberto Cruz, que me incentivou a iniciar este feito na minha vida.

Aos amigos e colegas do Laboratório de Aquisição de Dados e Processamento de Sinais – LADAPS.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, pelos recursos financeiros que proporcionaram o pagamento de despesas em congressos, onde esse trabalho foi apresentado, propagando o programa à comunidade científica.

A CAPES e a FAPESP pela disponibilização de recursos para a pesquisa.

A empresa SENAI “João Martins Coube”, pela utilização dos laboratórios e pela minha liberação quando necessário.

"Os homens perdem a saúde para juntar dinheiro e depois perdem o dinheiro para recuperar a saúde. Por pensarem ansiosamente no futuro, esquecem o presente, e acabam por não viver nem no presente nem no futuro...vivem como se nunca fossem morrer e morrem como se nunca tivessem vivido".

*Dalai Lama*

## RESUMO

Os processos de usinagem são de extrema importância para a fabricação de peças mecânicas, as peças exigem alta precisão dimensional e geométrica e qualidade no acabamento ao serem manufaturadas. Dentre os processos de usinagem, a retificação se destaca por ser um dos processos mais usado, por sua precisão e bom acabamento. É essencial que se conheça bem este processo, já que o mesmo se encontra na última etapa da manufatura. Assim, problemas durante o processo de retificação compromete-se a peça e pode-se perder o trabalho realizado em todas as etapas anteriores, acarretando alto custo na produção e perda de matéria-prima. O presente trabalho tem como objetivo avaliar um método de monitoramento das condições da superfície das peças, realizando um estudo comparativo da integridade superficial de peças retificadas com os sinais captados por um diafragma piezométrico de baixo custo composto por Titanato Zirconato de Chumbo (PZT), bem como por um sensor de emissão acústica (EA). Os ensaios experimentais foram realizados em uma máquina retificadora plana, onde um banco de ensaios foi desenvolvido empregando-se um rebolo de CBN com ligante resinóide e corpos de prova de aço ABNT 1045 e VC131. Posteriormente, para caracterizar a superfície das peças, foi realizada a inspeção visual, medidas de rugosidade ( $R_a$ ), medidas de microdureza Vickers e uma análise metalográfica. Os sinais EA e PZT foram adquiridos através de um osciloscópio de alta amostragem e, posteriormente, tratados com filtros digitais. Na sequência, esses sinais, foram comparados com a queima e a rugosidade de cada peça em suas respectivas condições, através de técnicas de processamento de sinais. Notou-se que o aumento da rugosidade, bem como a ocorrência da queima da peça, possui um relacionamento com aumento do sinal RMS do PZT e da EA, bem como com o índice RMSD. Já o índice CCDM não possuiu correlação com as condições do processo. Verificou-se por meio deste estudo um bom desempenho do diafragma PZT com potencial para concorrer com o sensor de EA visando monitorar a integridade superficial das peças retificadas, de acordo com a análise espectral e o estudo do sinal nas devidas bandas de frequência identificadas.

**PALAVRAS-CHAVE:** Retificação, Monitoramento, Diafragma Piezométrico, Emissão Acústica.

## ABSTRACT

The machining processes are of utmost importance for the manufacture of mechanical parts, the parts require high dimensional and geometric precision and quality in the finishing of the surfaces when being manufactured. Among the machining processes, grinding stands out as one of the most used processes, due to its precision and superior finishing. It is essential that this process is well known, since it is in the last stage of manufacturing. Thus, problems during the grinding process are committed to the part and can be lost the work carried out in all previous stages, resulting in high production costs and loss of raw material. The present work aims to evaluate a method of monitoring the surface conditions of the parts, performing a comparative study of the surface integrity of rectified parts with the signals captured by a low-cost piezoelectric patch composed of Lead Titanium Zirconate (LZT) and as by an acoustic emission sensor (EA). Experimental tests were performed in a flat grinding machine, where a test bench was developed using a CBN grinding wheel with resinoid binder and ABNT 1045 and VC131 steel test bodies. Later, to characterize the surface of the parts, visual inspection, surface roughness ( $R_a$ ), Vickers microhardness measurements and a metallographic analysis were performed. The signals EA and PZT were acquired through a high sampling oscilloscope and later treated with digital filters. These signals were then compared to the firing and roughness of each part under their respective conditions, through signal processing techniques. It was observed that the increase of the roughness, as well as the occurrence of the burning of the parts, has a relationship with increase of the RMS signal of the PZT and the EA, as well as with the RMSD index. The CCDM index had no correlation with the process conditions. A good performance of the PZT patch with potential to compete with the EA sensor was verified to monitor the surface integrity of the rectified parts, according to the spectral analysis and the study of the signal in the appropriate frequency bands identified.

**KEYWORDS:** Grinding, Monitoring, Piezoelectric Patch, Acoustic Emission.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

<b>Figura 1.</b> Monitoramento de Processos de Manufatura (DU et al. 1995). .....	21
<b>Figura 2.</b> Operações básicas na retificação, adaptado (MARINESCU et al.,2006) .....	23
<b>Figura 3.</b> Os seis elementos envolvidos na retificação tangencial plana, adaptado (MARINESCU et al., 2006) .....	24
<b>Figura 4.</b> Esquema ilustrativo de retificação tangencial plana, (KING e HAHN,1987)....	24
<b>Figura 5.</b> Desvio aritmético médio do perfil avaliado (MALKIN, 2008). .....	30
<b>Figura 6.</b> De cima para baixo, peça sem queima e com queima (SILVA, 2016) .....	31
<b>Figura 7.</b> (a) Base quadrada; (b) Angulação; (c) Indentação Vickers (FERREIRA, 2004). .....	32
<b>Figura 8.</b> Aspecto micrográfico da camada superficial do aço SAE 52100 afetada termicamente pelo processo de retificação (INA, 2009). .....	33
<b>Figura 9.</b> Aspecto micro gráfico da camada superficial do aço SAE 52100 afetada termicamente pelo processo de retificação (INA, 2009). .....	34
<b>Figura 10.</b> Trinca após processo de retificação - aço SAE 52100 (INA, 2009).....	34
<b>Figura 11.</b> Estrutura atômica do PZT, (a) estado tetragonal distorcido e (b) estado cúbico, (PHYSIK INSTRUMENTE, 2016) .....	37
<b>Figura 12.</b> Polarização do PZT, (a) material sem polarização, (b) aplicação de campo elétrico e (c) após polarização, (PHYSIK INSTRUMENTE, 2016). .....	38
<b>Figura 13.</b> Aquisição de dados.....	44
<b>Figura 14.</b> Processamentos no MATLAB .....	45
<b>Figura 15.</b> Exemplo de um sinal puro (EA 1). .....	46
<b>Figura 16.</b> Sinal RMS do (EA). Exemplo do ensaio de profundidade 0,02mm. ....	46
<b>Figura 17.</b> Sinal RMS do (PZT). Exemplo do ensaio de profundidade 0,02mm. ....	47
<b>Figura 18.</b> Sinal no domínio da frequência (FFT).....	47
<b>Figura 19.</b> Desvio aritmético médio do perfil avaliado ao longo da peça.....	48
<b>Figura 20.</b> Amostra embutida no baquelite, (a) vista lateral e (b) vista superior.....	49
<b>Figura 21.</b> Distribuição das indentações no ensaio de microdureza. ....	50
<b>Figura 22.</b> Rugosidade média em relação à heq do aço VC 131. ....	51
<b>Figura 23.</b> Inspeção visual das superfícies das peças retificadas do VC 131. ....	53
<b>Figura 24.</b> Microdureza Vickers aço VC 131.....	54
<b>Figura 25.</b> Metalografia VC131, (a) peça 1, (b) peça 2 e (c) peça 3.....	55
<b>Figura 26.</b> Metalografia VC131, (a) peça 4, (b) peça 5 e (c) peça 6.....	56
<b>Figura 27.</b> Metalografia VC131, (a) peça 7, (b) peça 8 e (c) peça 9.....	56

<b>Figura 28.</b> Desvio aritmético médio do perfil avaliado em relação à heq do aço ABNT 1045. ....	57
<b>Figura 29.</b> Inspeção visual das superfícies das peças retificadas do ABNT 1045.....	58
<b>Figura 30.</b> Microdureza Vickers aço ABNT 1045. ....	59
<b>Figura 31.</b> Metalografia ABNT 1045, (a) peça 1, (b) peça 2 e (c) peça 3. ....	60
<b>Figura 32.</b> Metalografia ABNT 1045, (a) peça 4, (b) peça 5 e (c) peça 6. ....	60
<b>Figura 33.</b> Espectro de frequência EA aço VC131.....	62
<b>Figura 34.</b> Espectro de frequência PZT aço VC131.....	62
<b>Figura 35.</b> Espectro de frequência EA aço ABNT 1045. ....	63
<b>Figura 36.</b> Espectro de frequência PZT aço ABNT 1045. ....	63
<b>Figura 37.</b> Zoom na banda de frequência para EA (a)115-121 kHz,(b)146-154 kHz. ....	64
<b>Figura 38.</b> Zoom na banda de frequência para PZT (a)87-95 kHz,(b)152-156 kHz. ....	64
<b>Figura 39.</b> Valor médio RMS sensor EA. ....	65
<b>Figura 40.</b> Valor médio RMS nas bandas selecionadas sensor EA (a) 115-121 kHz, (b) 146-154 kHz. ....	65
<b>Figura 41.</b> Valor médio RMS sensor PZT. ....	66
<b>Figura 42.</b> Valor médio RMS nas bandas selecionadas sensor PZT (a) 87-95 kHz, (b) 152-156 kHz. ....	66
<b>Figura 43.</b> RMSD do sinal EA (a) 115-121 kHz, (b) 146-154 kHz. ....	67
<b>Figura 44.</b> CCDM do sinal EA (a) 115-121 kHz, (b) 146-154 kHz. ....	67
<b>Figura 45.</b> RMSD do sinal PZT (a) 87-95 kHz, (b) 152-156 kHz. ....	68
<b>Figura 46.</b> CCDM do sinal PZT (a) 87-95 kHz, (b) 152-156 kHz. ....	68
<b>Figura 47.</b> Zoom na banda de frequência para EA (a) 68-74 kHz, (b) 130-210 kHz. ....	69
<b>Figura 48.</b> Zoom na banda de frequência para PZT (a) 1-4 kHz, (b) 140-150 kHz. ....	69
<b>Figura 49.</b> Valor médio RMS sensor EA. ....	69
<b>Figura 50.</b> Valor médio RMS nas bandas selecionadas sensor EA (a) 68-74 kHz, (b) 130-210 kHz. ....	70
<b>Figura 51.</b> Valor médio RMS sensor PZT. ....	70
<b>Figura 52.</b> Valor médio RMS nas bandas selecionadas sensor PZT (a) 1-4 kHz, (b) 140-150 kHz. ....	71
<b>Figura 53.</b> RMSD do sinal EA (a) 68-74 kHz, (b) 130-210 kHz. ....	71
<b>Figura 54.</b> CCDM do sinal EA (a) 68-74 kHz, (b) 130-210 kHz. ....	72
<b>Figura 55.</b> RMSD do sinal PZT (a)1-4 kHz, (b)140-150 kHz. ....	72
<b>Figura 56.</b> CCDM do sinal PZT (a)1-4 kHz, (b)140-150 kHz. ....	72

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1:</b> Composição dos materiais (VILLARES, 2016) .....	43
<b>Tabela 2.</b> Profundidades de corte.....	44
<b>Tabela 3:</b> Resultados da caracterização da superfície do aço VC 131.....	52
<b>Tabela 4.</b> Resultados de Microdureza Vickers do aço VC 131.....	54
<b>Tabela 5:</b> Resultados da caracterização da superfície do aço ABNT 1045.....	58
<b>Tabela 6.</b> Resultados de Microdureza Vickers do aço ABNT 1045.....	59

## LISTA DE ABREVIATURAS

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	– Emissão Acústica
FFT	– Transformada Rápida de Fourier
LADAPS	– Laboratório de Aquisição de Dados e Processamento de Sinais
PSD	– Densidade Espectral de Potência
PZT	– Titanato Zirconato de Chumbo
RMS	– Valor Médio Quadrático
RMSD	– Desvio da Raiz do Valor Médio Quadrático.
SAE	– Sociedade dos Engenheiros Automotivos

## LISTA DE SÍMBOLOS

- a – Profundidade de corte [ $\mu\text{m}$ ]
- b – Largura de retificação [mm]
- DC – Tensão Contínua [V]
- $d_s$  – Diâmetro do rebolo
- $F_n$  – Força normal de corte [N]
- $F_t$  – Força tangente de corte [N]
- G – Relação entre volume de material retificado e volume desgastado do rebolo.
- $h_{eq}$  – Espessura equivalente de corte [ $\mu\text{m}$ ]
- HV – Dureza Vickers
- $l_c$  – Comprimento de contato [mm]
- $l_n$  – Altura Máxima [mm]
- $Q_{w'}$  – Taxa de remoção específica de material [ $\text{mm}^3/\text{s}\cdot\text{mm}$ ]
- $R_a$  – Desvio aritmético médio do perfil avaliado [ $\mu\text{m}$ ]
- $R_q$  – Desvio médio quadrático do perfil avaliado [ $\mu\text{m}$ ]
- $R_t$  – Altura total do perfil avaliado [ $\mu\text{m}$ ]
- $V_h$  – Ganho horizontal.
- $V_s$  – Velocidade de corte do rebolo [m/s]
- $V_v$  – Ganho vertical.
- $V_w$  – Velocidade da peça [mm/s]

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	17
2. OBJETIVO.....	19
2.1 Objetivos Específicos .....	19
3. JUSTIFICATIVA .....	20
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	21
4.1 Monitoramentos de sinais.....	21
4.2 Retificação plana tangencial.....	22
4.2.1 Parâmetros na retificação plana .....	23
4.2.1.1 Profundidade de corte ( $a$ ) .....	24
4.2.1.2 Velocidade de corte ( $V_s$ ) .....	25
4.2.1.3 Velocidade da peça ( $V_w$ ).....	25
4.2.1.4 Taxa de remoção de material e específica .....	25
4.2.1.5 Espessura equivalente de corte ( $h_{eq}$ ).....	26
4.2.2 Fluido de corte .....	26
4.2.3 O rebolo durante o processo da retificação .....	27
4.2.3.1 Rebolo superabrasivo de Nitreto de Boro Cúbico (CBN) .....	27
4.2.3.2 A vida do rebolo .....	28
4.3 Caracterização superficial .....	29
4.3.1 Rugosidade na retificação .....	29
4.3.2 Queima na retificação .....	30
4.3.3 Microdureza .....	31
4.3.4 Análise metalográfica.....	32
4.4 Monitoramento na retificação .....	34
4.4.1 Sensor de emissão acústica (EA) .....	36
4.4.2 Diafragma piezolétrico de baixo custo (PZT) .....	36
4.4.3 Filtros digitais .....	38
4.4.4 Transformada Rápida de Fourier (FFT) .....	39
4.4.5 Raiz do valor quadrático médio (RMS) .....	40
4.4.6 Densidade espectral de potência (PSD) .....	41
4.4.7 Índices RMSD e CCDM .....	41
5. MATERIAIS E MÉTODOS.....	43
5.1 Procedimentos dos ensaios .....	43
5.2 Processamento digital dos sinais .....	45

5.3 Caracterizações da superfície .....	48
6. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	51
6.1 Caracterizações da superfície aço VC 131 com rebolo CBN .....	51
6.1.1 Rugosidade aço VC131 .....	51
6.1.2 Queima aço VC131.....	52
6.1.3 Microdureza aço VC131 .....	53
6.1.4 Metalografia aço VC131 .....	55
6.2 Caracterizações da superfície aço ABNT 1045 com rebolo CBN.....	57
6.2.1 Rugosidade ABNT1045 .....	57
6.2.2 Queima aço ABNT 1045.....	57
6.2.3 Microdureza aço ABNT 1045.....	58
6.2.4 Metalografia aço ABNT 1045.....	60
6.3 Processamentos dos sinais dos sensores EA e PZT .....	61
6.3.1 Seleção de bandas de frequência aço VC 131.....	64
6.3.1.1 Análise das bandas com a estatística RMS.....	65
6.3.1.2 Análise das bandas com o índice de danos RMSD e CCDM .....	67
6.3.2 Seleção de bandas de frequência aço ABNT 1045 .....	68
6.3.2.1 Análise das bandas com a estatística RMS.....	69
6.3.2.2 Análise das bandas com o índice de danos RMSD e CCDM .....	71
7. CONCLUSÃO.....	73
8. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	74
REFERÊNCIAS.....	75

## 1. INTRODUÇÃO

A tendência mundial, hoje, é produzir peças sofisticadas com tolerâncias mais apertadas e com acabamento superficial de alta qualidade, e tudo isso com a supervisão e interação total no processo. Estamos falando da INDÚSTRIA 4.0.

O termo INDÚSTRIA 4.0 relaciona e articula sistemas virtuais e físicos que, combinados a redes e plataformas digitais com viabilidade de abrangência globais, proporcionam cadeias de valor revolucionárias. Sugere-se que estamos passando pela quarta revolução industrial, sendo esta uma revolução digital. Esta revolução digital seria motivada por tecnologias como internet móvel, inteligência artificial, automação, *machine learning* (robôs que podem se autoprogramar e chegar a soluções ótimas), além do aperfeiçoamento de sensores tornando-os menores e mais potentes, graças à nanotecnologia.

Diante dessa realidade, a retificação ocupa posição de destaque e é uma das mais importantes operações de usinagem empregada na produção de peças com dimensões mais exatas e de ótimo acabamento, pois sua utilização é tanto para remover sobremetal em peças com geometrias especiais quanto para introduzir geometria desejada e propriedades superficiais, que geralmente são difíceis de ser obtidas por outros processos convencionais, com geometria definida, ou até mesmo por processos não convencionais de usinagem. A retificação, que já foi considerada somente como uma operação secundária de acabamento, tem sido amplamente empregada em várias etapas de fabricação (SHAW, 1996).

Sabe-se que o processo de retificação foi responsável por cerca de 25% dos processos de usinagem no ano de 2009. Como é utilizado para obter o acabamento da peça e ocorre, geralmente, nas últimas etapas da fabricação, agrega grande valor ao produto. Desta forma, o processo merece atenção, já que o sucateamento de uma peça nesse estágio resulta num grande prejuízo. Assim, qualquer problema durante o processo de retificação compromete-se a peça e perde-se o trabalho realizado em todas as etapas anteriores, acarretando em alto custo na produção e perda de matéria-prima (SOUZA et al., 2009).

O avanço tecnológico permitiu o desenvolvimento de máquinas, abrasivos e rebolos mais modernos e que apresentam um melhor desempenho, permitindo assim que a retificação substitua outras operações de usinagem na obtenção de

peças cada vez mais próximas da sua forma, dimensão e acabamento final (MAGNANI, 2013).

Um método para melhorar o processo é a estimação das condições da superfície da peça, por meio do monitoramento dos sinais provenientes do processo de retificação. Um dos principais parâmetros para avaliar a eficiência do sistema retificação como um todo é a rugosidade da peça. Tal característica descreve a qualidade da superfície da peça, analisando indiretamente fatores como a eficácia da lubrificação durante o processo, tolerâncias mínimas de corte, entre outras vertentes (HECKER e LIANG, 2003). Assim monitorar a rugosidade é um método para analisar a exatidão e a eficácia do processo de retificação.

A retificação requer de um alto nível de energia por unidade de volume de material removido. Grande parte dessa energia é dissipada na forma de calor, na região de retificação, ou seja, onde a peça interage com o rebolo. Isso gera altas temperaturas que podem causar vários tipos de danos à peça, entre eles a queima (MALKIN e GUO, 2007). O dano por queima é um dos principais fatores que limitam a capacidade de produção do processo de retificação, portanto detectar sua ocorrência é de extrema importância. Sensores que conseguem detectar os fenômenos que ocorrem no processo de retificação são utilizados para monitorar tanto a queima quanto a rugosidade.

Um dos fenômenos que ocorrem durante o processo de retificação é a emissão acústica (EA). Pode-se afirmar que a EA é um tipo de energia elástica liberada devido ao deslocamento forçado de partículas. A EA gera ondas que podem ser detectadas por sensores (LIU et al., 2006). Com esse tipo de técnica o processo pode ser monitorado instantaneamente, sendo possível estimar, por exemplo, a rugosidade e queima.

Outro fenômeno que pode ser analisado do processo de retificação é o efeito piezométrico. Esse efeito pode ser definido como a capacidade de alguns cristais gerarem tensão elétrica em resposta a uma tensão mecânica. O termo piezein vem do grego e significa pressionar. Eles vêm sendo utilizados em diversas áreas como, monitoramento de descarga parcial (DANOUJ et al., 2012), monitoramento da integridade estrutural (NA e LEE, 2013) (ALMEIDA et al., 2015), entre outros. A utilização desses sensores no monitoramento da retificação plana tangencial é uma área nova de pesquisa visando reduzir o custo do monitoramento deste processo, e auxiliar a INDÚSTRIA 4.0 no país.

## 2. OBJETIVO

O presente trabalho tem como objetivo avaliar o funcionamento do diafragma piezolétrico de baixo custo PZT no monitoramento das condições da superfície das peças no processo de retificação plana tangencial por meio de um estudo comparativo de desempenho com um sensor de EA, correlacionando os sinais com a rugosidade, microdureza e queima de peças dos aços VC 131 e ABNT 1045 retificadas com rebolo CBN.

### 2.1 Objetivos Específicos

- Caracterizar a superfície dos dois aços através da rugosidade, microdureza e análise metalográfica.
- Analisar a relação do sinal RMS de PZT com o de EA para os dois aços.
- Selecionar faixas de frequência que melhor representam o processo de retificação.
- Estudar os Índices de danos RMSD e CCDM, para avaliar o funcionamento de PZT em relação à EA.

### 3. JUSTIFICATIVA

O desenvolvimento do presente trabalho se deve a uma crescente necessidade de um mercado cada vez mais competitivo, onde as indústrias devem aumentar a produtividade e diminuir os custos de produção. Este fator extrapola internacionalmente, através do processo de globalização, forçando as indústrias nacionais a se adequar aos produzir novos padrões internacionais de qualidade e desempenho.

As mudanças no sistema de produção, como o aumento na demanda e o alto custo da mão de obra qualificada, faz com que sistemas inteiramente flexíveis e automáticos, capazes de compensar variações nos processos, sejam vitais.

A utilização do PZT se encaixa dentro do conceito de INDÚSTRIA 4.0 em que as máquinas irão se tornar autônomas no futuro. Para isso, é necessário métodos de monitoramento online e em tempo real dos processos produtivos de maneira que baseado nesses valores (comparados a valores referência), a máquina consiga tomar decisões para assegurar a qualidade das peças produzidas.

Os sensores PZT de baixo custo, fácil implementação e sensível aos fenômenos físicos decorrentes do processo caminha no sentido de grande potencial para a automação do processo de retificação, sendo essencial para as indústrias o constante avanço na implementação de sistemas automáticos de produção, de forma a se tornarem cada vez mais competitivas (AGUIAR et al., 2004).

O monitoramento do processo de retificação utilizando o sensor de EA é realizado, e já tem algumas pesquisas sobre essa técnica. Já o monitoramento do processo de retificação utilizando um diafragma piezelétrico está na fase inicial de estudos pelo grupo de Usinagem por Abrasão da UNESP-Bauru, cujos resultados preliminares se mostraram satisfatórios. Sendo o PZT mais barato que o sensor de EA, o aperfeiçoamento de uma técnica que possa substituir o sensor de emissão acústica pelo diafragma piezelétrico contribuirá para o avanço acadêmico e tecnológico do monitoramento do processo de retificação plana para as indústrias reduzirem perdas.

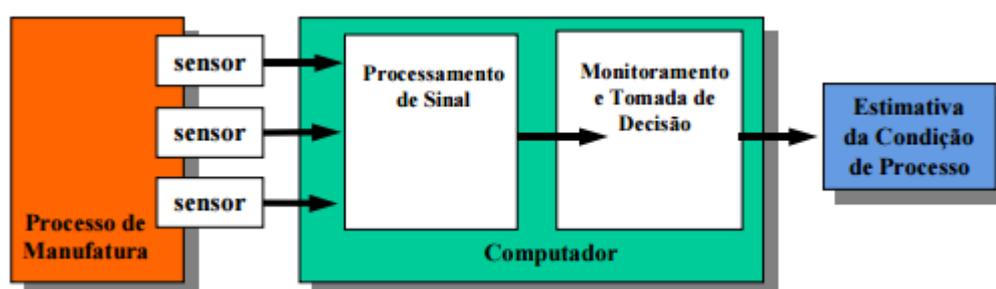
## 4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 4.1 Monitoramentos de sinais

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

Para um monitoramento e controle da operação de usinagem é necessário conhecer o modelo físico e analítico 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 computacionais como rede neural artificial e algoritmos genéticos podem ser utilizados para modelar o processo, se baseando em dados coletados (DAVIM, 2008).

Segundo DU et al. (1995), as tarefas do monitoramento, conforme esquematizado na Figura 1, são principalmente compostas por três partes: aquisição do sinal, processamento do sinal e monitoramento/tomada de decisão.



**Figura 1.** Monitoramento de Processos de Manufatura (DU et al. 1995).

Os sensores são os elementos chaves de muitos sistemas de monitoramento de processos e ferramentas. Muitos tem sido inventados e aplicados em laboratórios, mas somente poucos vem sendo usados comercialmente (JEMIELNIAK, 2001). Segundo DU et al. (1995), processamento do sinal e monitoramento/tomada de decisão pode ser chamado de estratégia de monitoramento.

Existem basicamente duas estratégias. Uma utiliza-se de técnicas de aquisição de sinais, na qual sinais de saída mostram alguma relação com as características do processo. Assim, podem-se determinar sinais que representam um estado normal do processo, e compará-los com posteriores sinais, com o intuito de detecção de inconformidades. A outra se utiliza de modelos que relacionam os sinais de saída com os mecanismos do processo. Assim, juntamente com as informações dos sensores usa-se um modelo matemático para prognosticar o comportamento do processo (BYRNE et al., 1995).

#### **4.2 Retificação plana tangencial**

O processo de retificação se enquadra nos processos de usinagem, nome genérico dado ao processo que remove material na forma de cavacos e consiste na utilização de um rebolo formado por abrasivos, ligante e porosidades girando em torno do próprio eixo e translada sobre a superfície da peça a uma determinada profundidade removendo material.

As principais vantagens da retificação são: elevada exatidão dimensional, geométrica e a rugosidade das peças e a usinagem de materiais duros. Mas apesar dessas vantagens, esse processo não é isento de problemas, sendo os mais comuns nas operações os danos térmicos na peça, difícil controle da rugosidade, vibrações excessivas e desgaste prematuro da ferramenta abrasiva (MARINESCU et al., 2007).

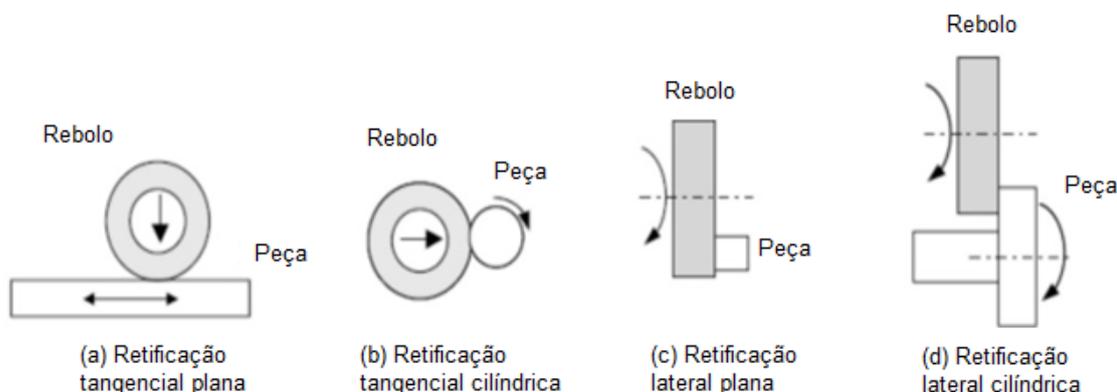
Fathallah et al., (2009) descreveram que as operações de retificação envolvem a geração de grandes forças de corte e fluxo de calor que podem causar efeitos negativos na integridade superficial das peças, como a queima superficial. Em razão disto, as pesquisas relacionadas à retificação aumentam a cada ano.

Ao se comparar a retificação com os processos de ferramenta com geometria definida, uma das principais diferenças que surge tem a ver com a velocidade de remoção do cavaco, sendo que, a velocidade do abrasivo pode chegar a ser até 10 vezes maior quando comparada com a velocidade de corte utilizada no processo de torneamento. Igualmente, a energia total requerida para o processo de retificação é da ordem de 2 a 20 vezes maior que para outros processos de usinagem, para o mesmo volume de cavaco removido na unidade de tempo (DINIZ et al., 2008).

Este fato aliado as altas forças normais e tangenciais do processo geram altas temperaturas de corte (1000 a 1600°C), podendo atingir e superar sua temperatura de fusão, porém sem se fundir, pois o tempo de exposição a essa temperatura é curto (DINIZ et al., 2008).

De uma maneira geral, segundo a severidade do processo de retificação da superfície, são induzidas no componente diferentes características e propriedades físicas, mecânicas, metalúrgicas e químicas que podem levar a alterações no desempenho funcional (GRIFFITHS, 2001).

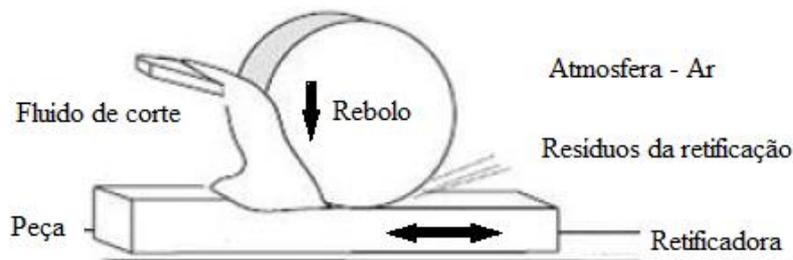
A Figura 2 apresenta as quatro operações básicas da retificação: a (a) retificação tangencial plana e (b) cilíndrica, e a (c) retificação lateral plana e (d) cilíndrica. As operações de retificação são classificadas de acordo com a forma geométrica das superfícies obtidas e são divididas em cilíndrica externa, cilíndrica interna, plana e plana rotativa. Conforme o movimento de avanço, e divide-se em: tangencial de mergulho, tangencial de passagem lateral (ou de face) de mergulho e lateral de passagem. (MARINESCU et al., 2006).



**Figura 2.** Operações básicas na retificação, adaptado (MARINESCU et al.,2006).

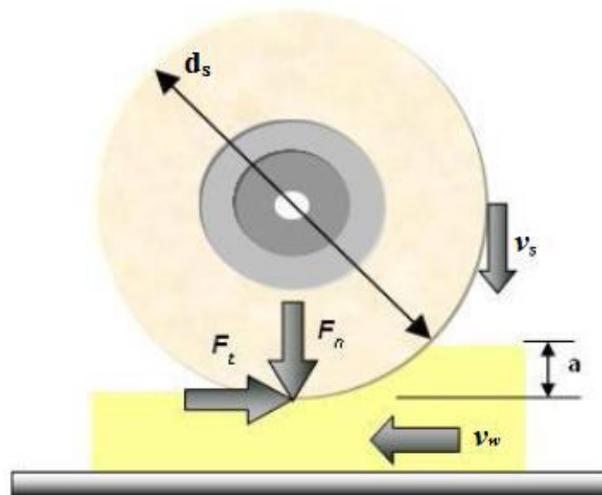
#### 4.2.1 Parâmetros na retificação plana

O processo de retificação é composto por seis elementos básicos: máquina ferramenta, neste caso a retificadora; o rebolo; peça a ser retificada; fluido de corte; atmosfera (ar), isto é, a interação dos gases ambiente com os elementos de retificação e os resíduos provenientes da operação de retificação (MARCHI, 2012; MARINESCU et al., 2006). A Figura 3, ilustra os elementos básicos de uma operação de retificação tangencial plana.



**Figura 3.** Os seis elementos envolvidos na retificação tangencial plana, adaptado (MARINESCU et al., 2006).

A Figura 4, ilustra a configuração da retificação tangencial plana representando a força tangencial ( $F_t$ ), a força normal ( $F_n$ ), a velocidade periférica de corte ( $V_s$ ), velocidade da peça ( $V_w$ ), a profundidade de corte ( $a$ ) e o diâmetro do rebolo ( $d_s$ ) utilizado no processo (KING e HAHN, 1986; MARCHI, 2012).



**Figura 4.** Esquema ilustrativo de retificação tangencial plana, adaptado (KING e HAHN, 1987).

#### 4.2.1.1 Profundidade de corte ( $a$ )

Segundo Marinescu et al. (2007), a profundidade de corte é a penetração do rebolo na peça qual será a medida da espessura de material removido por revolução ou passagem da peça.

A profundidade de corte é a grandeza que representa o quanto a ferramenta penetra em relação ao plano de trabalho, e é medida perpendicularmente à direção de avanço da peça ou rebolo. Este parâmetro é de grande interesse nas operações de fresamento e retificação plana (DINIZ et al., 2003).

De acordo com Rowe e Morgan (1993), a profundidade de corte também pode influenciar na integridade superficial dos componentes retificados.

#### 4.2.1.2 Velocidade de corte ( $V_s$ )

É definido pelo deslocamento de um ponto sobre a superfície de corte do rebolo, por uma variação de tempo. 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 e GUO, 2007). Nesse trabalho a velocidade de corte foi mantida constante e não foram executadas passadas suficientes para atingir a vida útil do rebolo.

#### 4.2.1.3 Velocidade da peça ( $V_w$ )

Na retificação plana, pode-se considerar a velocidade da peça sendo igual à velocidade da mesa (MARINESCU et al., 2006).

Um aumento na velocidade da peça leva a uma elevação na taxa de remoção de material, assim, os valores de força tangencial de corte ( $F_t$ ) tornam-se elevados. Deste modo, busca-se sempre utilizar rebolos cujas ligas suportem elevadas rotações de trabalho, a fim de se melhorar a rugosidade, aumentar a vida útil da ferramenta e diminuir esforços de corte (OIKAWA et al., 2011).

#### 4.2.1.4 Taxa de remoção de material e específica

A taxa de remoção de material  $Q_w$  é a quantidade de material removida por unidade de tempo, expressa em  $\text{mm}^3/\text{s}$  e pode ser calculada através da Equação (1) (MALKIN e GUO, 2007).

$$Q_w = a \cdot V_w \cdot b \quad (1)$$

Onde  $b$  é a largura de contato rebolo-peça [mm].

A taxa de remoção específica  $Q'_w$  (taxa de remoção volumétrica de material por unidade de largura do rebolo) pode ser obtida pela Equação (2) (MALKIN e GUO, 2007).

$$Q'_w = a \cdot V_w \quad (2)$$

#### 4.2.1.5 Espessura equivalente de corte ( $h_{eq}$ )

A espessura equivalente de corte corresponde à espessura de material removido pelo rebolo com a velocidade de corte deste. É a razão entre a taxa específica de remoção material ( $Q'_w$ ) e a velocidade de corte ( $V_s$ ), mostrado pela Equação (3):

$$h_{eq} = \frac{Q'_w}{V_s} \cdot a \quad (3)$$

#### 4.2.2 Fluido de corte

Na retificação, o atrito entre o rebolo e a peça que está sendo retificada produz uma zona localizada de calor, o aquecimento pode causar maior desgaste do rebolo, danificar a peça e inviabilizar o processo. As funções específicas do fluido de corte são proporcionar: lubrificação, reduzindo o atrito do rebolo com a peça; refrigeração, removendo o calor gerado pelo atrito; remoção do cavaco gerado pelo processo e proteção dos elementos contra corrosão e oxidação (OIKAWA et al., 2011).

A temperatura gerada no processo de retificação tem relação direta com os parâmetros utilizados no processo. O atrito entre o rebolo e a peça na retificação faz com que calor seja gerado aquecendo todo o sistema (NAKAI et al., 2015).

#### 4.2.3 O rebolo durante o processo da retificação

O rebolo é a ferramenta de corte utilizada no processo de retificação. Caracteriza-se como uma ferramenta de múltiplas arestas, formada por abrasivos, aglomerantes e porosidades que cortam os materiais, raspando-os com suas arestas cortantes, ou seja, é composto basicamente de abrasivos de elevada dureza que efetuam o corte, presos a uma matriz aglomerante de um material menos duro (MALKIN e GUO, 2007).

##### 4.2.3.1 Rebolo superabrasivo de Nitreto de Boro Cúbico (CBN)

Atualmente, existe uma grande utilização de rebolos de CBN no mercado, abrangendo indústrias tais como a automobilística; aeroespacial; 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 et al., 2002).

Os abrasivos podem ter como elemento de composição o óxido de alumínio -  $Al_2O_3$  (rebolo convencional) ou 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 resinóide, vitrificado, convencional e o resinóide de alto desempenho.

O CBN é um material sintético obtido através da transformação alotrópica do nitreto de boro hexagonal, mediante elevadas pressões e temperaturas, na presença de catalisadores, como metais alcalinos, antimônio, chumbo, lítio, magnésio e nitretos (MARINESCU et al., 2004).

Enquanto o diamante é a substância conhecida como de mais elevada dureza ( $6000 \text{ kg/mm}^2$ ), o CBN possui a segunda maior dureza conhecida, a qual é aproximadamente  $4500 \text{ kg/mm}^2$ . 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. Sendo que os dois são refratários e se estabilizam em altas temperaturas (SHAW, 1996).

O CBN gera menores forças de corte, temperaturas e valores inferiores de rugosidade média. O alto desempenho deste material abrasivo é devido à sua

dureza a quente e resistência ao desgaste, aliado à sua alta resistência mecânica 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; VANSEVENANT, 1989). 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 et al., 1995).

#### 4.2.3.2 A vida do rebolo

O desgaste do rebolo pode ser classificado em três tipos: abrasão da partícula, fratura da partícula e fratura do ligante. Todos os tipos de desgaste ocorrem simultaneamente em maior ou menor grau. O desgaste total pode ser expresso em termos da relação  $G$ , que é a taxa volumétrica de material removido em contraposição ao desgaste volumétrico do rebolo. Para operações típicas de retificação de precisão com rebolos convencionais (óxido de alumínio ou carbetto de silício) o custo do rebolo é geralmente menor e mais rebolo pode ser consumido pela dressagem do que pelo processo de retificação em si. Em tais casos, o menor desgaste do rebolo com a maior relação  $G$  pode não ser a melhor situação, pois pode exigir maiores forças e energias, e isso conduz a temperaturas excessivas (MALKIN e GUO, 2007).

As restrições de desgaste do rebolo são frequentemente associadas à rugosidade e tolerâncias necessárias. Com taxas de remoção maiores, a relação  $G$  tende a decrescer, levando a uma mais rápida deterioração na forma e no acabamento da superfície. Se maiores forças de corte e altas temperaturas podem ser toleradas, estas restrições de produção podem ser relaxadas usando um rebolo de desgaste lento, que usualmente significa uma menor friabilidade. Um fluido de corte melhor deve aumentar a relação  $G$ , diminuindo as forças e a temperatura (MALKIN e GUO, 2007).

O desgaste total do rebolo aumenta com o tempo de corte. Ele pode ser dividido em uma perda do diâmetro ou desgaste radial e em desgaste de quina do

rebolo. Se o desgaste radial não é compensado durante a retificação por um sistema de medição adequado, pode-se ter um erro de medida ou eventualmente surgir vibrações na superfície da peça (MARCHI, 2012).

### 4.3 Caracterização superficial

A implementação de um sistema de monitoramento requer a análise 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 ou de superfície, o tipo de material usinado, a sensibilidade em relação à integridade da superfície e a qualidade geométrica a ser atingida. Dois parâmetros muito utilizados para monitorar e avaliar a retificação como um todo são a rugosidade, a queima e a microdureza (MARCHI, 2012).

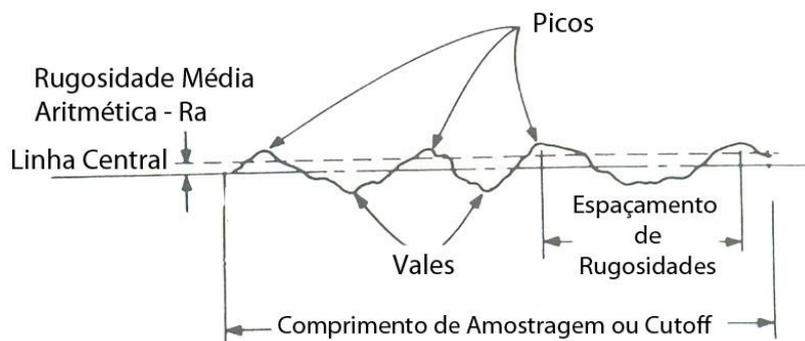
#### 4.3.1 Rugosidade na retificação

A rugosidade é representada por micro irregularidades geométrica da superfície do material usinado. Hecker e Liang (2003) afirmam que ela é representada em função da distância entre os picos e vales existentes na superfície. Assim, pode-se medir a rugosidade pelo desvio aritmético médio do perfil avaliado (rugosidade  $R_a$ , mais utilizada), pelo desvio médio quadrático do perfil avaliado (rugosidade  $R_q$ ) ou ainda pela altura total do perfil avaliado (rugosidade  $R_t$ ).

Hecker e Liang (2003) afirmam que a rugosidade é um parâmetro eficiente e indispensável para mensurar a qualidade superficial produzida. 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.

Hecker e Liang (2003) relatam que a rugosidade se destaca como um dos mais usados parâmetros de qualificação da topografia de superfícies retificadas. 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, de acordo com o processo de fabricação empregado. O desvio aritmético médio do perfil avaliado é mostrado na Figura 5.



**Figura 5.** Desvio aritmético médio do perfil avaliado (MALKIN, 2008).

Malkin (2008) define que a qualidade superficial é dividida em dois aspectos:

- 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 rebolo, das condições de dressagem (afiação), dos parâmetros de usinagem (a taxa de remoção de material, o tempo de centelhamento, entre outros) e do tipo e forma de aplicação do 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 (1994), a velocidade de corte não afeta significativamente a rugosidade quando o modo de remoção dominante é por fratura frágil.

#### 4.3.2 Queima na retificação

Malkin (2008) identifica como queima da peça os danos térmicos na retificação, que provocam as modificações das características físicas e ou químicas da superfície retificada, como também das regiões que se encontram abaixo desta superfície. Ela ocorre durante o processo de corte, quando a quantidade de energia

gerada na zona de contato produz um aumento na temperatura suficientemente elevada para provocar uma mudança de fase no material usinado (MARCHI, 2012).

Segundo Silva (2016), a queima visível com aços é caracterizada por têmperas e colorações azuladas sob a superfície da peça, porém a ausência de coloração na superfície usinada não significa necessariamente que a queima da peça não ocorreu. Abaixo na Figura 6, segue um exemplo de uma peça que apresenta queima e outra que não apresenta.



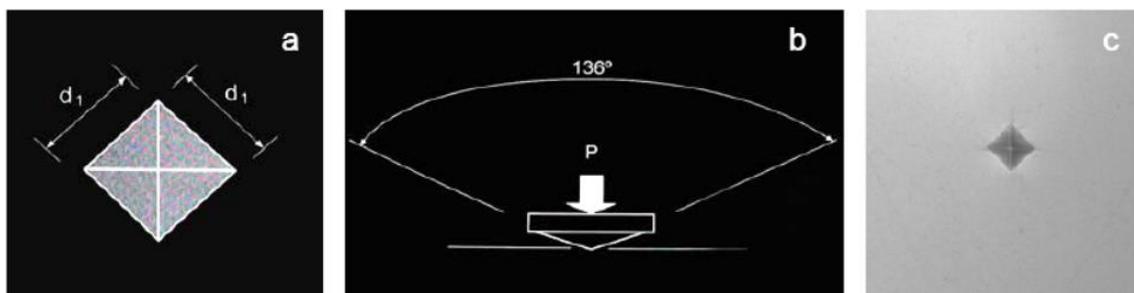
**Figura 6.** De cima para baixo, peça sem queima e com queima (SILVA, 2016).

#### 4.3.3 Microdureza

A operação de retificação gera calor excessivo na zona de corte elevando a temperatura da peça durante a remoção de material. A temperatura elevada seguida por uma rápida ação de arrefecimento do fluido de corte induz a transformação de fase CFC para CCC na superfície e subsuperfície da peça, afetando o perfil de microdureza (KUMAR et al., 2011).

A microdureza é um método importante de análise para avaliar as possíveis alterações microestrutural, induzida durante o processo de usinagem (MAO et al., 2010; GRINKO, 2006). Este método reflete a condição estrutural de todas as camadas próximas à superfície retificada. A superfície da peça e as camadas que estão perto da superfície que foram afetadas pela carga de calor durante o processo de retificação podem apresentar alterações da microestrutura, que resultam em variações de dureza (MARINESCU et al., 2004).

A dureza por micro indentação Vickers é obtida com um penetrador de diamante em forma de pirâmide, de base quadrada conforme a Figura 7 (a), com um ângulo de  $136^\circ$  entre as faces opostas, visto na Figura 7(b), e é utilizada uma carga menor que 1 kgf, a qual produz uma impressão em forma de losango regular mostrado na Figura 7 (c) (FERREIRA, 2004).



**Figura 7.** (a) Base quadrada; (b) Angulação; (c) Indentação Vickers (FERREIRA, 2004).

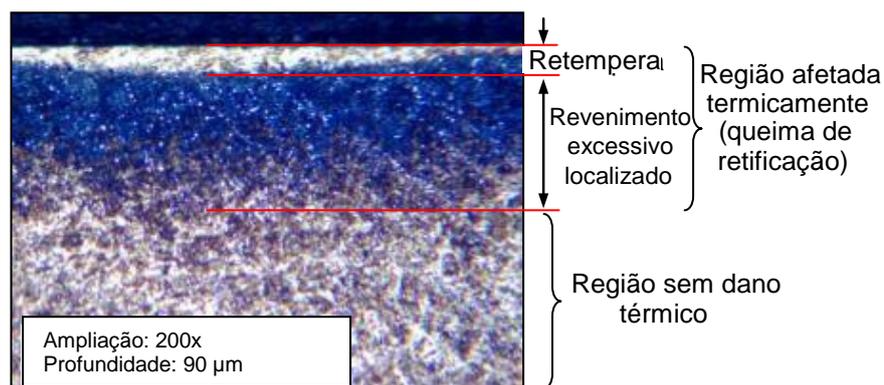
A perda de dureza superficial é um fenômeno complexo, que pode estar relacionado com o revenimento da estrutura martensítica e com a difusão de átomos de carbono, sendo dependente da temperatura e do tempo de corte do processo (MALKIN, 2008).

#### 4.3.4 Análise metalográfica

Nas ligas metálicas, a microestrutura é caracterizada pelo número de fases presentes, por suas proporções e pela maneira segundo a qual elas estão distribuídas ou arranjadas (CALLISTER, 2010). Conforme Griffiths (2001) a análise metalográfica é uma técnica para realizar uma avaliação da superfície de componentes retificados, para caracterizar as mudanças que ocorrem durante a operação de usinagem. Segundo Callister (2010), a revelação dos detalhes da microestrutura é obtida mediante a preparação (lixamento e polimento) da superfície, seguido de um ataque químico que emprega um reagente apropriado. O ataque químico produz uma textura diferente para cada fase, de modo que as diferentes fases podem ser distinguidas umas das outras com auxílio de um microscópio óptico.

O efeito termomecânico da retificação de materiais endurecidos por tratamento térmico pode provocar uma transformação microestrutural, tendo como consequência a formação de uma camada superficial branca dura e frágil (martensita não revenida, retempera), seguida de uma região escura (revenimento excessivo localizado) com dureza relativamente inferior ao centro do material onde não sofreu alteração microestrutural (ALAGUMURTHI et al., 2006), conforme mostra a Figura 8.

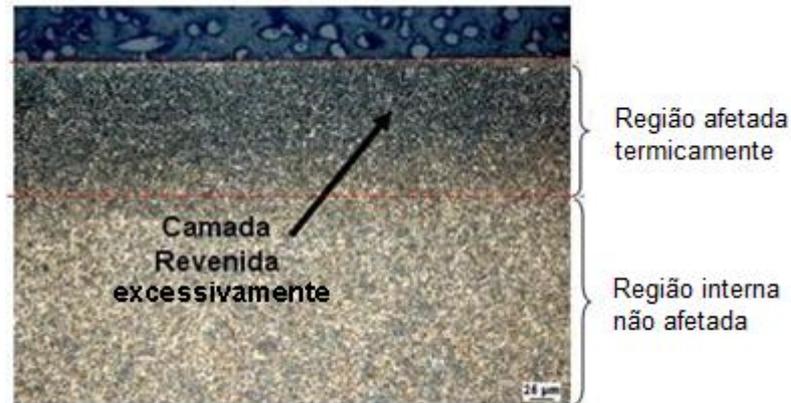
A camada branca é prejudicial à integridade da peça, pois a superfície endurecida torna-se frágil. Além disso, pode estar associada à formação de tensões residuais de tração tornando o material suscetível a formação e propagação de trincas, reduzindo consideravelmente a resistência à fadiga dos componentes (MARINESCU et al., 2004 e MALKIN, 2008).



**Figura 8.** Aspecto micrográfico da camada superficial do aço SAE 52100 afetada termicamente pelo processo de retificação (INA, 2009).

Os aços geralmente são retificados após o tratamento térmico. O chamado “revenimento” serve, quando usado corretamente após a têmpera, para aumentar a resistência à tração e a tenacidade do material. Este processo sempre está ligado a uma redução da dureza e é obtido através do aquecimento controlado do aço até a chamada “temperatura de revenimento” (CALLISTER, 2010). Entretanto, em função do aquecimento do material durante a retificação e também da taxa de resfriamento proporcionada pelo refrigerante, pode ocorrer o revenimento excessivo localizado e perda de dureza superficial, conforme mostrado na figura 9.

Conforme Malkin (2008), a perda de dureza superficial é um fenômeno complexo, relacionado com o revenimento da estrutura martensítica e com a difusão de carbono, e depende da temperatura e tempos envolvidos no processo de remoção de material.



**Figura 9.** Aspecto micro gráfico da camada superficial do aço SAE 52100 afetada termicamente pelo processo de retificação (INA, 2009).

O aquecimento da superfície da peça durante o processo de remoção de material é acompanhado pela expansão e contração térmica no resfriamento. A expansão da superfície aquecida seguido de um resfriamento brusco propiciado pelo fluido de corte pode provocar alterações micro estruturais e promover a formação de tensões residuais de tração (MARINESCU et al., 2004). Dependendo da severidade, as tensões provocadas na superfície do material podem ultrapassar o limite de resistência do material e causar a formação e propagação de trincas, conforme figura 10.



**Figura 10.** Trinca após processo de retificação - aço SAE 52100 (INA, 2009).

#### 4.4 Monitoramento na retificação

O desenvolvimento de um sistema de monitoramento e controle em tempo real é de fundamental importância para automação do processo de usinagem, na

tentativa de que seja possível estabelecer o momento da troca de uma ferramenta, realizar mudanças nos parâmetros de operação e, portanto, visar à otimização do processo (AGUIAR, 2009).

Segundo Malkin (2008), a retificação gera uma grande quantidade de energia. Parte dessa energia resulta em ondas de tensão mecânica que se propagam através do material. EA pode ser explicada como sendo ondas elásticas transientes geradas por uma rápida liberação de energia de uma fonte localizada no material, quando submetido a um estado de tensão (RAVINDRA et al., 1997). Inasaki (1990) relata ainda que uma das fontes de EA pode ser a interação entre o abrasivo e a peça. Desse modo, ela pode ser relacionada com a energia específica de retificação, a qual também é uma forma de energia associada ao processo.

Com isso, é possível caracterizar a atividade de remoção de material e obter a condição da ferramenta e da qualidade da peça (STEPHENSON et al., 2006). Aguiar (1997) afirma ainda que a técnica de EA pode ser usada para detectar o desgaste, queima e colisão do rebolo.

De acordo com Xue e Naghdy (2002), confirma-se através de uma série de experimentos, que o sensor de EA é um mecanismo eficiente no monitoramento da dressagem tanto quanto para o processo de retificação, além de ajudar na obtenção de uma superfície topograficamente uniforme do rebolo.

Os sistemas de monitoramento da retificação devem ser capazes de detectar com elevada confiabilidade os problemas (vibração, queima e deterioração da rugosidade superficial do rebolo) que podem ocorrer durante o processo, de modo que a produção de peças fora do padrão especificado possa ser minimizada (INASAKI et al., 2001).

O monitoramento do processo de retificação utilizando sinais de EA é objeto de estudo desde 1984. Entretanto o monitoramento utilizando diafragma piezelétrico vem se destacando para esse tipo de aplicação. Porém, ensaios recentes realizados no Laboratório de Aquisição de Dados e Processamento de Sinais – Ladaps, UNESP - Bauru, nos quais se utilizou uma microretífica com diafragma piezelétrico de baixo custo, demonstraram que este tipo de sensor tem boa sensibilidade (AUTOR).

Os sinais advindos dos sensores de EA do diafragma piezelétrico fornecem variadas informações sobre o processo de retificação. Porém, para extrair claramente essas informações é necessário que ocorra um processamento desses

sinais, correlacionando-os com os fenômenos de estudo. Esse processamento inclui o tratamento estatístico, análise no domínio da frequência, no domínio do tempo, filtragem, dentre outras ferramentas (AUTOR).

De acordo com Moia (2012), na manufatura, os sistemas inteligentes podem ser comparados a um operador qualificado, que emprega seu conhecimento para operar a máquina ferramenta. Assim, esses sistemas necessitam de sensor com boa precisão e exatidão, baixo custo e implementação e ferramentas computacionais eficientes, desenvolvida através de algoritmos otimizados que possam reproduzir o processo de tomada de decisões do operador.

#### 4.4.1 Sensor de emissão acústica (EA)

A EA gera ondas elásticas que quando se propagam pelo material de ensaio pode ser detectada por sensores de emissão acústica (LIU et al., 2006).

A vantagem dessa técnica é que o processo pode ser monitorado instantaneamente. A deformação plástica, a fratura e o atrito são fortes fontes de energia de EA, o que gera um grande potencial de monitoramento. Além disso, embora a EA seja um meio indireto de sensoriamento, seu sensor é bastante robusto, sendo adequado para o uso em ambientes industriais. Isso faz com que, apesar de haver outras técnicas para monitoramento da usinagem, EA seja a mais usada e a mais conveniente. O problema em utilizar a EA para monitoramento do processo está na sensibilidade associada à localização do sensor, uma vez que quanto mais próximo o sensor da região de corte, melhor a leitura dos dados, sendo que essa proximidade pode prejudicar a ergonomia do processo (LEE et al., 2006).

#### 4.4.2 Diafragma piezelétrico de baixo custo (PZT)

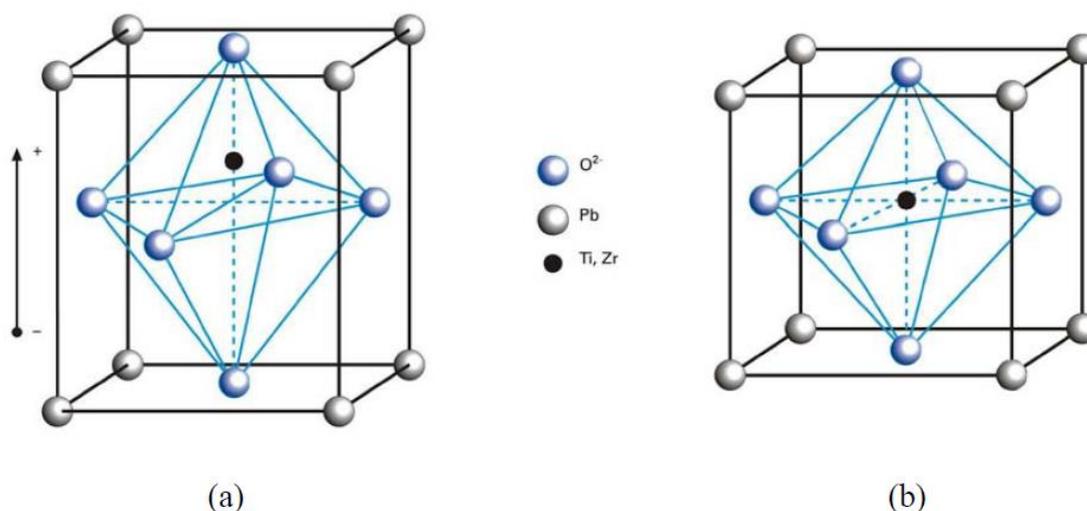
O efeito piezelétrico é o surgimento de um campo elétrico em um material submetido a uma tensão mecânica. O contrário também é verdadeiro, uma tensão elétrica entre as extremidades de um material piezelétrico produz uma deformação mecânica. O termo piezelétrico vem do grego *piezin* que significa pressionar.

Os sensores piezelétricos mensuram determinados parâmetros físicos, que estão na forma de tensão mecânica ou variações de cargas elétricas. São constituídos de cerâmicas piezelétricas que têm uma elevada constante dielétrica e

são fabricadas por dois processos principais, sendo que o primeiro consiste em um aquecimento em alta temperatura (sinterização) e o segundo consiste na polarização dessas placas através da aplicação de um campo elétrico DC intenso. Após esses dois processos, as cerâmicas se tornam piezelétricas. Esses transdutores são cortados na forma e tamanho desejados e colados na estrutura a ser monitorada. (BAPTISTA, 2010).

Kino (1987) relata que Cristais de Quartzo, Turmalina, sal de Rochelle, Topázio, etc. exibem efeito piezelétrico em seu estado natural. Mas também existem materiais piezelétricos sintéticos, pode-se citar como exemplos o Titanato Zirconato de Chumbo (PZT), Titanato de Chumbo ( $\text{PbTiO}_2$ ), Zirconato de Chumbo ( $\text{PbZrO}_3$ ) e Titanato de Bário ( $\text{BaTiO}_3$ ).

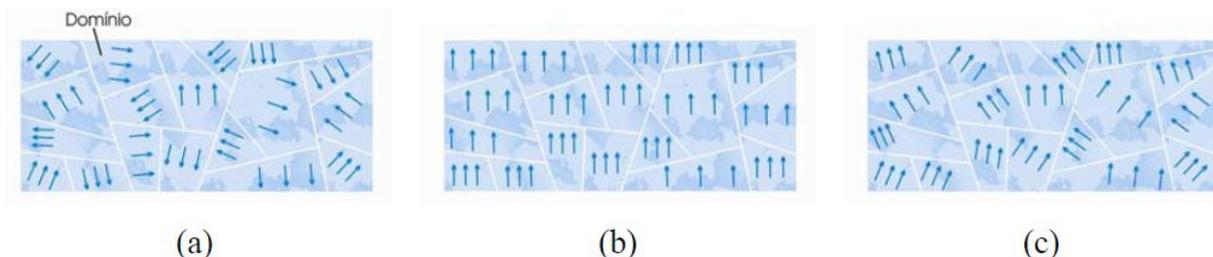
O PZT é formado por blocos microscópicos chamados domínios que, por sua vez, são formados por células unitárias tetragonais distorcidas quando se encontram abaixo da temperatura Curie, conforme Figura 11(a).



**Figura 11.** Estrutura atômica do PZT, (a) estado tetragonal distorcido e (b) estado cúbico, (PHYSIK INSTRUMENTE, 2016).

A célula unitária forma um dipolo elétrico devido à posição deslocada do íon de titânio ou zircônio e, dentro de um domínio, as células apresentam polarização e orientação na mesma direção. Como os domínios encontram-se distribuídos aleatoriamente, o PZT não apresenta propriedades piezelétricas macroscópicas, como mostra a Figura 12 (a). Entretanto, é possível polarizar o PZT de maneira que este passe a proporcionar o efeito piezelétrico. Este procedimento é realizado aquecendo-se o material acima da temperatura Curie, de forma que o estado das

células unitárias do material passa a apresentar simetria cúbica, como ilustrado na Figura 11 (b) (PHYSIK INSTRUMENTE, 2016).



**Figura 12.** Polarização do PZT, (a) material sem polarização, (b) aplicação de campo elétrico e (c) após polarização, (PHYSIK INSTRUMENTE, 2016).

Com o material aquecido, aplica-se um campo elétrico intenso (acima de 2 kV/mm) e as células unitárias se expandem na direção deste campo, como mostrado na Figura 12 (b). Após o resfriamento do material e a retirada do campo elétrico, as células unitárias mantêm o alinhamento, porém não completamente Figura 12 (c). Contudo o alinhamento remanescente é suficiente para que PZT passe a exibir o efeito piezoeétrico (PHYSIK INSTRUMENTE, 2016).

As principais vantagens destes sensores em relação aos sensores de deformação tradicionais é a sua alta sensibilidade à deformação, o suprimento de energia não é necessário (cristais piezoeétricos são autogeradores) e podem operar a altas temperaturas. Sua excelente sensibilidade permite que deformações inferiores a  $0,1\mu\epsilon$  possam ser facilmente percebidas. Laskovski et al., (2011) em seu trabalho com transdutores a base de cerâmicas piezoeétricas conseguiu respostas lineares para deformações na ordem de 10 *picostrain*.

#### 4.4.3 Filtros digitais

De acordo com Smith (1999), filtros digitais é uma parte muito importante do Processamento Digital de Sinais (DSP). Na realidade, seu extraordinário desempenho é uma das razões chave que levou o DSP a se tornar tão popular.

Os filtros são responsáveis por reduzir a amplitude de sinal de uma ou mais faixas de frequência determinadas (OPPENHEIM e WILLSKY, 1996).

Eles que realizam operações matemáticas sobre um sinal amostrado em tempo discreto para reduzir ou ampliar certos aspectos deste mesmo sinal (ANTONIOU, 1993).

Um filtro é um sistema que seleciona perfeitamente as frequências desejadas e rejeita perfeitamente as frequências indesejadas em um sinal de entrada. No caso dos filtros não ideais há uma banda intermediária entre a banda de passagem e a de rejeição, chamada de banda de transição (HAYKIN e BARRY, 2001).

Os filtros analógicos são baratos, rápidos e tem uma grande abrangência em amplitude e frequência. Os filtros digitais, em comparação, são amplamente superiores em termos de desempenho, podendo se tornar milhares de vezes melhores em desempenho que os filtros analógicos (MARCHI, 2012).

Existem duas categorias básicas de filtros digitais: os filtros recursivos e os filtros não recursivos, que são normalmente referidos como filtros de resposta ao impulso de duração infinita (IIR) e filtros de resposta finita ao impulso (FIR), respectivamente (ANTONIOU, 1993).

#### 4.4.4 Transformada Rápida de Fourier (FFT)

Quando se deseja obter uma melhor compreensão dos fenômenos envolvidos, utiliza-se o espectro de frequência, que fornece em muitos casos, a informação detalhada sobre a condição 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 (KJAER, 1998). Uma análise do espectro de vibração pode ser baseada na seleção de faixas de frequência que caracterizam a variável física que se deseja controlar ou estimar no processo (ZENG e FORSSBERG, 1994).

Um dos métodos utilizados na análise em frequência do sinal é a Transformada Rápida de Fourier (FFT - *Fast Fourier Transform*). A FFT é um método de computar a Transformada Discreta de Fourier (DFT - *Discrete Fourier Transform*) de maneira eficiente, com menor custo computacional e menor tempo de processamento (LYONS, 2001).

Embora a transformada discreta de Fourier (DFT) seja a técnica matemática mais direta para se determinar o conteúdo em frequência de uma sequência no

domínio do tempo, ela é ineficiente. A implementação direta da DFT de um conjunto de N dados, requer  $N^2$  operações complexas, e o processo se torna bem demorado.

Um artigo publicado em 1965 por Cooley e Tukey descreve um algoritmo muito eficiente para implementar a DFT, o qual é conhecido por FFT (“*Fast Fourier Transform*”). Antes do advento da FFT, o cálculo de milhares de pontos da DFT levava muito tempo, o que tornava o seu uso apenas para grandes centros computacionais.

Quando o tamanho da amostra (N) de um sinal é em potência de 2 (128, 256, 512 etc.), o número de cálculos da DFT pode ser reduzido a aproximadamente  $(N/2) \cdot \log_2(N)$ , tornando o processo computacional da DFT muito mais rápido.

Muito tem sido escrito sobre a FFT, e o desenvolvimento desse algoritmo tornou a disciplina Processamento Digital de Sinais muito mais acessível com o uso da análise de Fourier (CHUGANI et al., 1998 e LYONS, 2001).

#### 4.4.5 Raiz do valor quadrático médio (RMS)

O estudo de Hassui et al., (1998) mostrou que o valor RMS (do inglês *Root Mean Square*) do sinal de vibração se correlaciona melhor com o desgaste do rebolo do que o valor RMS do sinal de EA. Além disso, a sensibilidade do sensor de vibração se equipara à sensibilidade do sensor de EA tanto na detecção do momento de contato entre o rebolo e a peça quanto na detecção do fim deste.

O valor RMS (de um sinal puro S pode ser expresso pela Equação (5), que apresenta a forma contínua (NILSSON e RIEDEL, 2016).

$$S_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} s^2(t) \cdot dt} \quad (5)$$

Onde:

$T$ : 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.

#### 4.4.6 Densidade espectral de potência (PSD)

Por meio da Transformada de Fourier é possível obter a Densidade Espectral de potência (PSD – *Power Spectral Density*) de um sinal, que mostra justamente como a potência do mesmo está distribuída ao longo de todas as suas componentes de frequência. A estimação espectral clássica consiste nos métodos de obtenção da estimativa da PSD sem parametrizar o espectro do sinal. O estimador da PSD por um método direto é conhecido como periodograma, tomando-se o valor esperado das Transformadas de Fourier do sinal. Contudo, os métodos de estimação da PSD clássicos, apresentam em alguns casos inconsistência na relação entre a quantidade de amostras e o resultado estimado (CONCEIÇÃO JUNIOR, 2016).

O método Welch surgiu para resolver esse problema, sendo um método de periodogramas usado para determinar a densidade de potência dos componentes de frequência de um sinal, baseado na FFT que permite a sobreposição dos segmentos de dados e passando cada segmento por uma janela, Welch propôs o uso da janela de Hanning com 50% de sobreposição e a sua variância do periodograma é inversamente proporcional ao número de segmentos no qual o sinal é dividido (SEMMLOW, 2004).

Para obter o PSD de um sinal pelo método Welch, dividem-se em blocos de 64, 128 e 256 unidades, que são potências de dois. Para avaliar o espectro de potência, este método separa os dados em vários segmentos sobrepostos, calcula um espectro de potência usando uma FFT sobre cada segmento e, em seguida, as médias destes espectros (SEMMLOW, 2004). O periodograma de Welch é dado pela média dos periodogramas originais de todos os  $P$  segmentos do sinal ponderados por uma janela. Mais informações sobre o método são encontradas em (WELCH, 1967; ALKAN e YILMAZ, 2007; ZHANG et al., 2014).

#### 4.4.7 Índices RMSD e CCDM

A fim de comparar das diversas condições de superfície de peça foi utilizado alguns dos índices de falha métrica. De acordo com Baptista (2010), os índices mais usados na literatura são o desvio da raiz média quadrática, RMSD (*Root Mean*

*Square Deviation*) e a métrica do desvio do coeficiente de correlação, CCDM (*Correlation Coefficient Deviation Metric*).

O índice RMSD é baseado na norma euclidiana. Algumas modificações nesse índice foram sugeridas por vários pesquisadores, sendo um dos mais utilizados dado pela Equação (6) (ALMEIDA et al., 2015):

$$RMSD = \sum_{k=\omega_l}^{\omega_f} \sqrt{\frac{[Re(XE,D(k)) - Re(XE,H(k))]^2}{Re^2(XE,H(k))}} \quad (6)$$

Onde os subscritos  $H$  e  $D$  indicam a condição saudável e com dano, respectivamente, e são as características da impedância elétrica (ou seja, o módulo, a parte real ou parte imaginária) para a estrutura sem dano e com dano respectivamente, e são medidas na frequência  $k$  que varia da frequência inicial até a frequência final.

Já o índice CCDM é baseado no coeficiente de correlação e é calculado como na Equação (7) (ALMEIDA et al., 2015):

$$CCDM = 1 - C_c \quad (7)$$

Onde,  $C_c$  é o coeficiente de correlação calculado utilizando a parte real das assinaturas impedância elétrica para a estrutura sob condições sem dano e com dano, em uma mesma faixa de frequência.

## 5. MATERIAIS E MÉTODOS

Para realizar o estudo do processo foi utilizado o aço VC 131 (ABNT D6) e o aço ABNT 1045, conforme a Tabela 1.

**Tabela 1: Composição dos materiais (VILLARES, 2016)**

	Composição Química					Dureza Vickers (HV)
	C %	Mn %	Cr %	W %	V %	
<b>VC 131</b>	2,10	0,30	11,50	0,70	0,20	615 - 745
<b>ABNT 1045</b>	0,45	0,75	-	-	-	515 - 595

A escolha destes aços foi devido ao aço VC131, possuir características de alta estabilidade dimensional e excelente resistência ao desgaste, especialmente em condições abrasivas. E o aço ABNT 1045, ser classificado como aço para construção mecânica e especial. Esta última consideração deve-se às exigências de ensaio de impacto no estado temperado e revenido (VILLARES, 2016).

### 5.1 Procedimentos dos ensaios

Os ensaios experimentais foram realizados em uma retificadora tangencial plana, modelo 1055E da Sulmecânica, onde um banco de ensaios foi desenvolvido, empregando-se um rebolo de CBN com ligante resinóide, 14AI V180 B126 fabricante Nikkon, e nove peças de aço VC131 e seis peças do aço ABNT 1045, com dimensões de 150x48x7 mm, sendo respectivamente comprimento, largura e altura.

O fluido de corte utilizado foi emulsão água-óleo na proporção de 39:1, sendo o óleo, do fabricante Quimatic, tipo ME-1, com uma vazão de 27,5 l/min e uma pressão de 0,2 kgf/cm<sup>2</sup> de forma abundante no contato da peça com o rebolo. Para o processo de dressagem do rebolo empregou-se um dressador do tipo conglomerado, ou seja, de múltiplas pontas de diamante para perfilamento do mesmo.

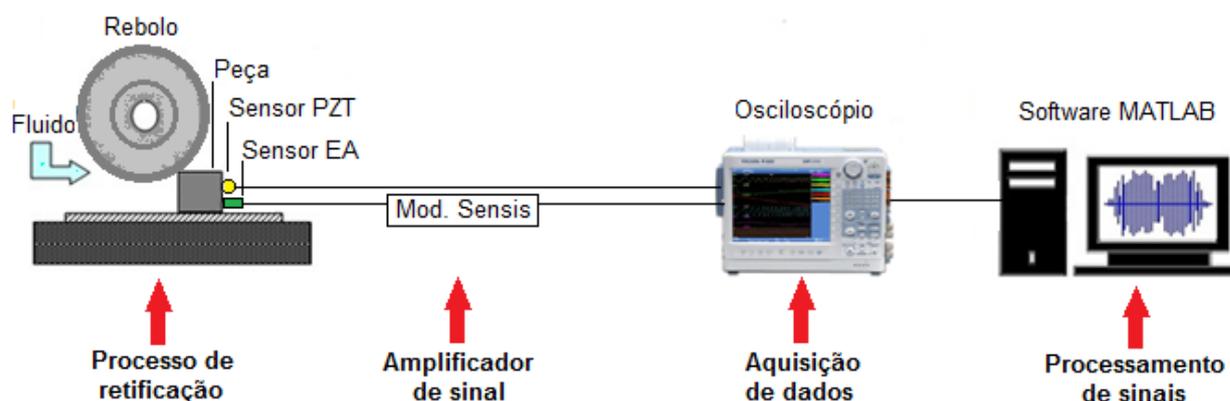
Durante os ensaios foram adotadas diferentes profundidades de corte ( $a$ ) para o processo de retificação dos aços, de acordo coma Tabela 2, onde foi realizado um passe para cada uma das profundidades. A velocidade do rebolo ( $V_s$ ) e das peças ( $V_w$ ) foram mantidas constantes, respectivamente, 32,42 m/s e 124 mm/s.

Na caracterização da superfície das peças foram realizadas a inspeção visual, rugosidade, análise metalográfica e microdureza Vickers.

**Tabela 2: Profundidades de corte**

Peça	Profundidades de corte [ $\mu\text{m}$ ]	
	Aço VC131	Aço ABNT 1045
1 <sup>a</sup>	5	10
2 <sup>a</sup>	15	20
3 <sup>a</sup>	20	40
4 <sup>a</sup>	25	80
5 <sup>a</sup>	35	120
6 <sup>a</sup>	45	140
7 <sup>a</sup>	65	
8 <sup>a</sup>	120	
9 <sup>a</sup>	175	

Conforme a figura 13, a coleta dos sinais puros foi realizada através de um sensor de emissão acústica (EA) da empresa Sensis, consistindo de um sensor fixo ao suporte da peça com módulo amplificador e processador de sinais do mesmo fabricante, modelo DM-42, juntamente com um diafragma piezelétrico de baixo custo composto por Titanato Zirconato de Chumbo (PZT) com um diâmetro de 34 mm, o qual foi colado no suporte com uma cola de alta aderência e protegido com silicone. O PZT é considerado de baixo custo, pois o mesmo pode ser encontrado em sites de compra a um valor de cinquenta centavos de real em média.



**Figura 13.** Aquisição de dados

A partir disso os sinais foram adquiridos através de um osciloscópio de alta amostragem, modelo DL850, da empresa Yokogawa, com frequência de amostragem de 2 MHz para ambos os sensores resultando em 30 arquivos sendo 15 sinal EA e 15 sinal PZT e posteriormente tratados com filtros digitais e processados em software MATLAB, conforme Figura 14.

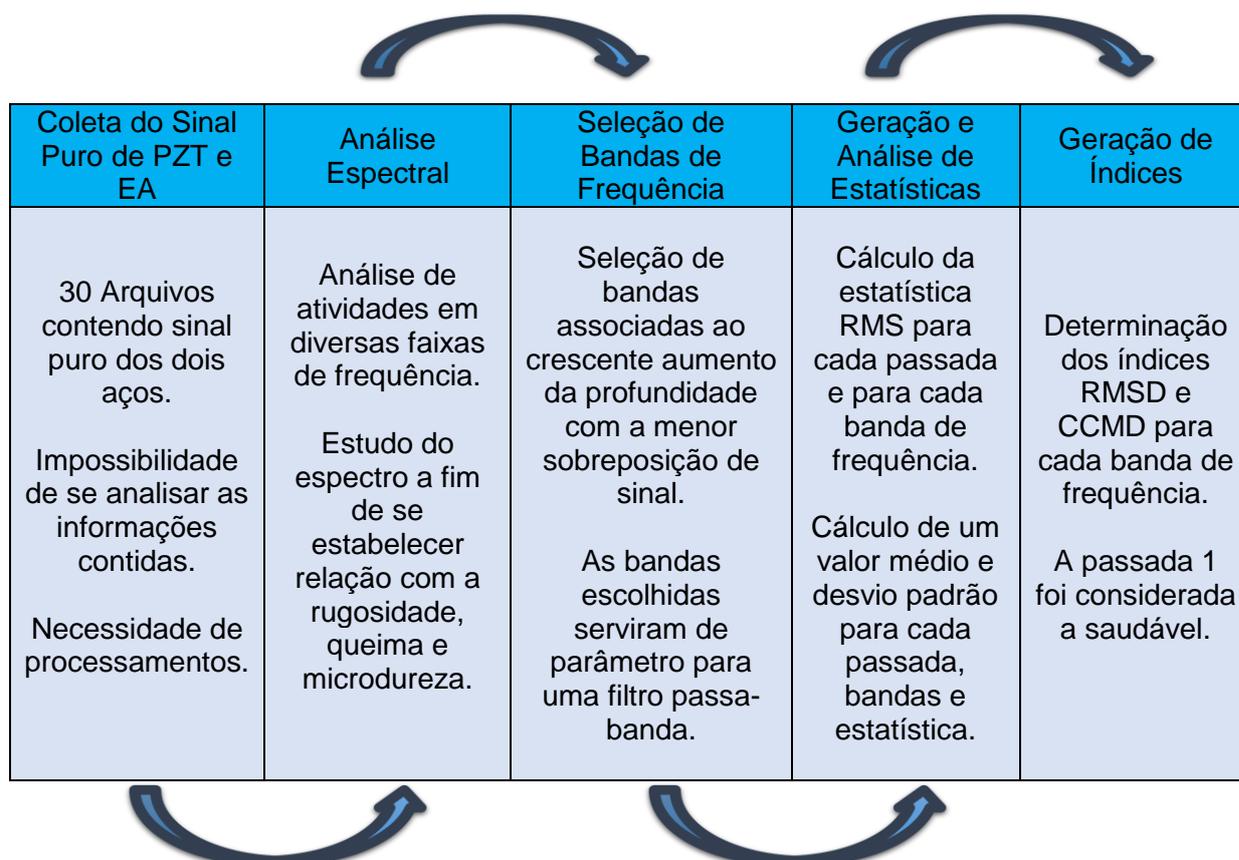
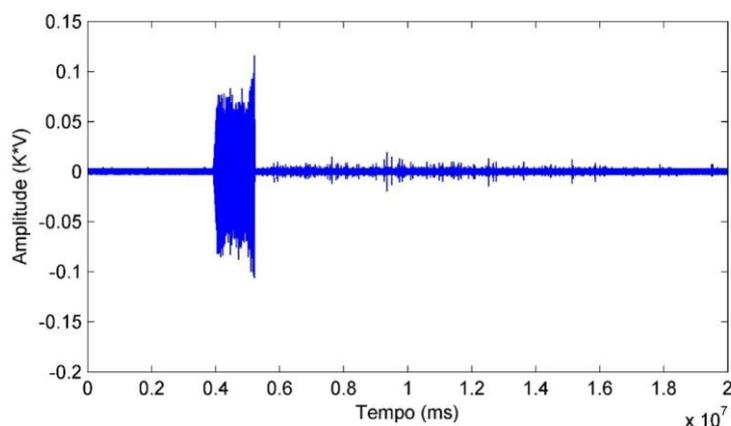


Figura 14. Processamentos no MATLAB

## 5.2 Processamento digital dos sinais

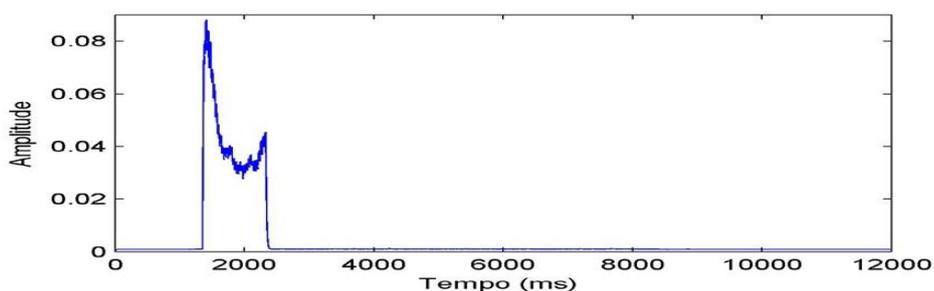
Os sinais de EA e do diafragma piezelétrico de baixo custo (PZT) foram coletados em cada uma das passadas dos ensaios no osciloscópio gerando um arquivo binário para cada ensaio. Obteve-se assim 30 arquivos binários (9 arquivos EA e 9 arquivos PZT para o aço VC131 e 6 arquivos EA e 6 arquivos para o aço ABNT 1045, os quais foram abertos no software MATLAB e analisados com sinal puro, de acordo com a Figura 15.



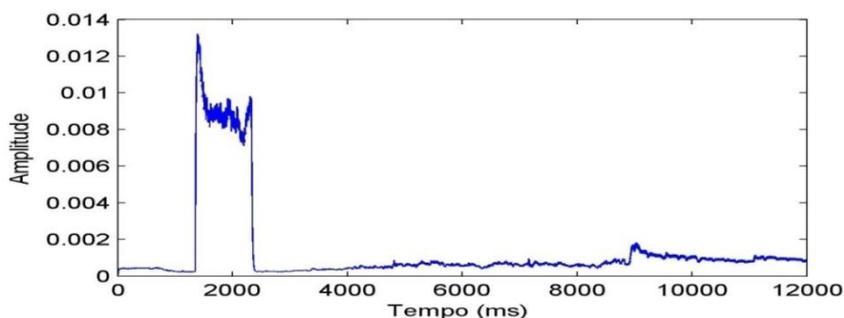
**Figura 15.** Exemplo de um sinal puro (EA 1).

Realizou-se através do MATLAB o processamento digital dos sinais filtrados, com um filtro digital *Butterworth*, passa-baixa de quinta ordem, cuja frequência de corte foi de 300 kHz, devido às amplitudes a partir de 300 kHz serem baixas e ter pouca representação do ensaio realizado, de acordo com estudos preliminares do LADAPS. Obteve-se o valor RMS para cada passada de usinagem em intervalos de 2048 amostras dos sinais, o que equivale ao cálculo de um valor RMS para cada 1 milissegundo, mostrado nas Figuras 16 e 17.

Fica evidente a passada do rebolo sobre a superfície da peça (aumento e diminuição da amplitude do sinal). Através disto consegue-se correlacionar o as condições das superfícies com as amplitudes do sinal, que vai ser mais bem demonstrada pelos parâmetros estatísticos.

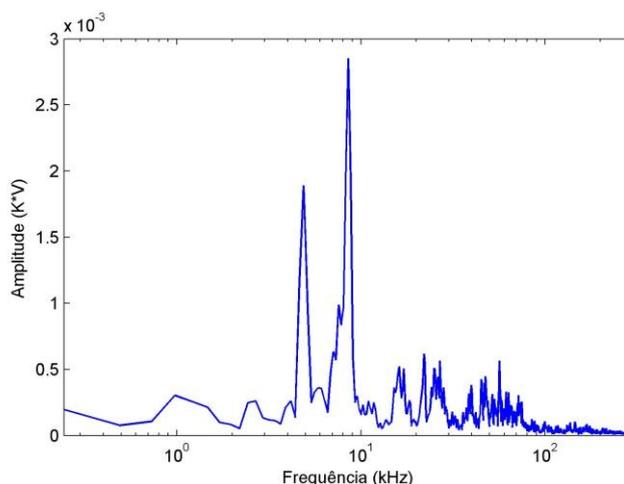


**Figura 16.** Sinal RMS do (EA). Exemplo do ensaio de profundidade 0,02 mm.



**Figura 17.** Sinal RMS do (PZT). Exemplo do ensaio de profundidade 0,02 mm.

Na sequência, foram calculados a FFT para que possa ser realizada uma análise no domínio da frequência das condições de corte relacionadas com as condições da superfície quanto à rugosidade e a queima, ilustrado na Figura 18, bem como as médias e desvios padrão do sinal RMS relacionados somente à região de corte.



**Figura 18.** Sinal no domínio da frequência (FFT).

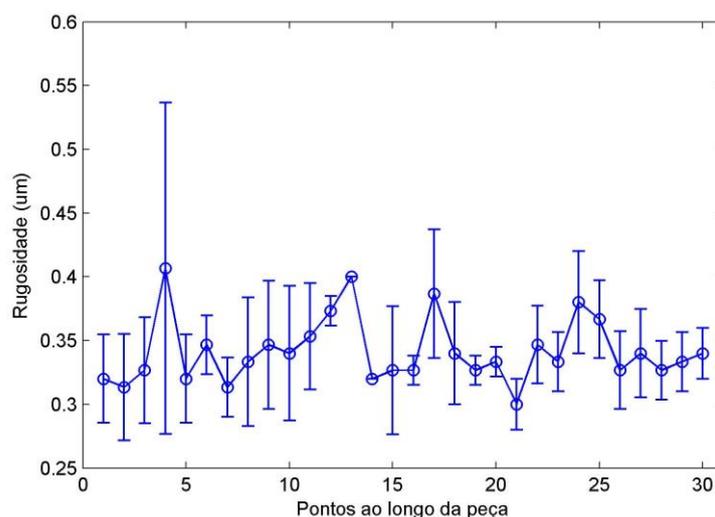
Em seguida, foi calculado o PSD, pelo método Welch, por meio da função Pwelch do software MATLAB, com a mesma janela da FFT, a fim de se comparar os resultados. Assim, obtiveram-se as curvas de amplitude e magnitude em função da frequência dos sinais filtrados de EA e PZT, para as profundidades de corte em ambos os aços utilizados no experimento. O objetivo foi encontrar a melhor faixa de frequência que pode estar associada ao comportamento mecânico do processo. Foram escolhidas faixas de frequência que apresentavam o comportamento

crecente das profundidades de corte, além se ser selecionado um trecho com pouca sobreposição dos sinais.

Um novo filtro digital passa faixa foi aplicado no sinal puro, contudo, desta vez na frequência selecionada. Foi obtido o valor RMS, no sentido de encontrar um relacionamento entre o sinal de EA e PZT e a integridade estrutural da peça usinada, foram gerados os índices de danos RMSD e CCDM, considerando como referência a primeira peça sem dano. Os gráficos obtidos bem como a discussão dos resultados são mostrados no Capítulo 6.

### 5.3 Caracterizações da superfície

Para a medição da rugosidade  $R_a$  foi utilizado um rugosímetro digital, modelo Surtronic 3+, fabricado pela Taylor Robson, os valores de rugosidade foram medidos ao longo da superfície das peças em 30 pontos. Foi calculado a média e desvio padrão referente a três medidas em cada ponto, para representar estatisticamente a superfície a fim de se estudar o seu comportamento ao longo das profundidades de corte empregadas, como se pode ver um exemplo na Figura 19.



**Figura 19.** Desvio aritmético médio do perfil avaliado ao longo da peça.

Para uma análise de possíveis danos na estrutura da peça foi realizada a análise metalográfica, bem como micro dureza Vickers de cada peça.

Para estes ensaios são necessários produzir pequenas amostras das peças na região da usinagem a ser analisada e embutir as mesmas posteriormente.

Através de uma inspeção visual foi detectada a região de queima ao longo da peça, com esta região definida em 75% do início da peça, preparou-se uma amostra para cada uma das 15 peças. O corte foi realizado com uma máquina de corte metalográfica e o embutimento das amostras com baquelite e uma arruela cortada para pode estabilizar a planeza da peça, a uma pressão de aproximadamente  $100\text{kgf/cm}^2$ , numa temperatura de  $160^\circ\text{C}$  conforme mostra a Figura 20, onde temos a amostra no centro do baquelite (coloração preta) e as arruelas ao seu redor.



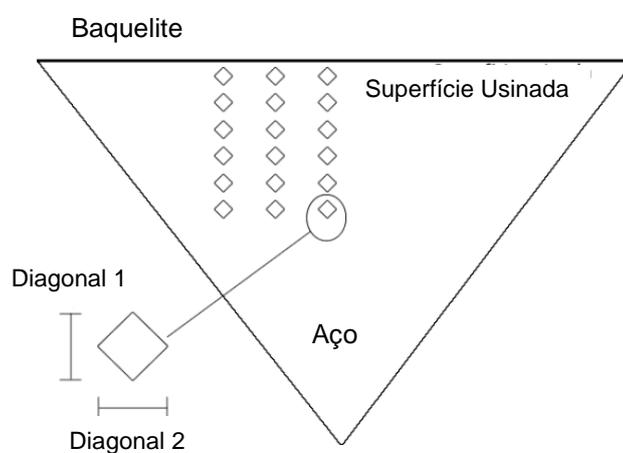
**Figura 20.** Amostra embutida no baquelite, (a) vista lateral e (b) vista superior.

Para as amostras serem analisadas tiveram que passar por um processo de lixamento e polimento, a fim de garantir a planeza da amostra e remover imperfeições da mesma. O processo de lixamento consistiu na utilização das lixas d'água com granulometria de 80, 120, 220, 320, 400, 500 e 600 em uma placa de vidro com jato de água. No polimento utilizou-se uma máquina de polimento metalográfico com solução aquosa de 1:10 de alumina de  $1\ \mu\text{m}$  e água destilada com uma duração de três a quatro minutos.

Então foi realizado um ataque químico com Nital 2% por imersão durante aproximadamente 3 segundos para aço ABNT 1045 e de 5 segundos para o aço VC131, até que a superfície da amostra ficasse opaca, e para cessar o ataque a mesma foi limpa em água abundante e posteriormente seca.

Através de um microscópio óptico Olympus com uma ampliação de 500x foi obtida as imagens das estruturas de cada uma das amostras, onde foram analisadas as ocorrências de camadas escuras e brancas na superfície da amostra, tendo como base a interface do baquelite.

Para a microdureza foi utilizado um microdurômetro Vickers Mitutoyo, Série HM 200 – Modelo HM 211, onde foram realizadas 18 indentações com uma carga de 500 g, em 3 colunas com uma distância entre elas de 200  $\mu\text{m}$  e cada coluna com 6 indentações com um espaço entre si de 100  $\mu\text{m}$ , de acordo com a norma ABNT NBR 6672 e como pode ser visualizado na Figura 21. Com os resultados deste ensaio foi realizada uma análise e gerado um gráfico de microdureza para cada aço.



**Figura 21.** Distribuição das indentações no ensaio de microdureza.

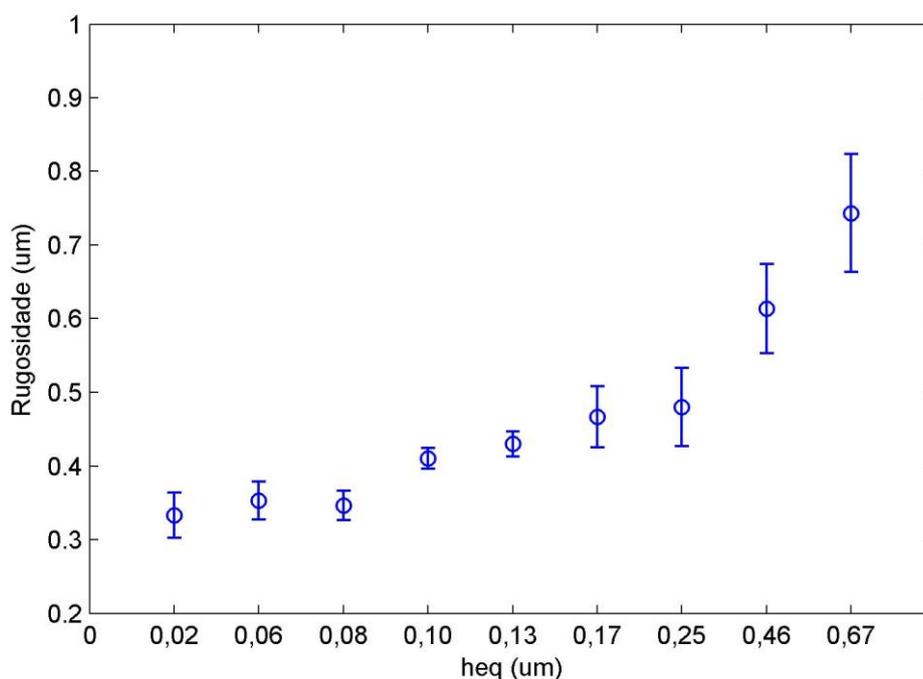
## 6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após o término dos ensaios foi realizada uma análise para a caracterização das superfícies das peças a fim de saber o que havia ocorrido durante a retificação e para auxiliar na interpretação dos processamentos.

### 6.1 Caracterizações da superfície aço VC 131 com rebolo CBN

#### 6.1.1 Rugosidade aço VC131

Analisando a Figura 22, constata-se para as condições analisadas o desvio aritmético médio do perfil avaliado ( $R_a$ ) ficou abaixo de  $1 \mu\text{m}$ . De acordo com Diniz et al., (2003), o valor padrão de rugosidade das peças retificadas deve ser abaixo de  $1,6 \mu\text{m}$ . Sendo assim, a rugosidade em todas as peças está dentro do padrão, mesmo que conforme o aumento da espessura equivalente de corte ( $h_{eq}$ ) nota-se o crescimento de  $R_a$  devido ao aumento da remoção de material e ao aumento dos esforços de cortes.



**Figura 22.** Desvio aritmético médio do perfil avaliado em relação à  $h_{eq}$  do aço VC 131.

### 6.1.2 Queima aço VC131

A análise da queima para as 9 condições de retificação está descrita na Tabela 3, onde "sem queima" significa retificação branda, e "queima leve" refere-se a peças com aumento do valor de rugosidade da superfície, mas abaixo do limite de  $1\mu\text{m}$  e já apresentando pontos de queima. Peças com "queima severa" são peças com rugosidade próximas ao especificado e com queima aparente ao longo da peça.

**Tabela 3. Resultados da caracterização da superfície do aço VC 131.**

	<b>Profundidade de corte [<math>\mu\text{m}</math>]</b>	<b><math>h_{eq}</math> [<math>\mu\text{m}</math>]</b>	<b>Inspeção Visual</b>
1	5	0,02	Sem queima
2	15	0,06	Sem queima
3	20	0,08	Sem queima
4	25	0,10	Queima leve
5	35	0,13	Queima leve
6	45	0,17	Queima leve
7	65	0,25	Queima severa
8	120	0,46	Queima severa
9	175	0,67	Queima severa

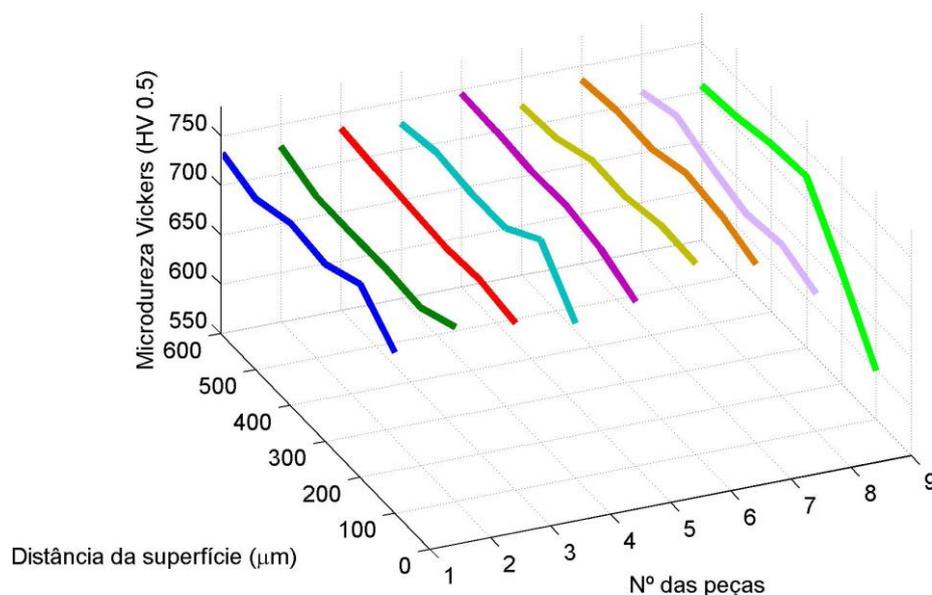
Observa-se na figura 23 que as peças de 1 à 3 não apresentaram queima e foi verificado que a rugosidade das peças se manteve dentro de uma faixa de  $0,35 - 0,45 \mu\text{m}$  compreendida entre as peças 1 e 5. A partir da peça 4 começou a ocorrer queima leve com rugosidade ainda dentro da faixa mencionada. Os valores de rugosidade começaram a sair dessa faixa a partir da peça 6. Observa-se, no entanto, que as peças 4 a 6 já houve a ocorrência de queima, embora leve, com valores de rugosidade considerados relativamente baixos. Assim, a partir desta análise infere-se que a queima leve não leva necessariamente a um valor alto de rugosidade. Isto não ocorre para a queima severa, peças 7 à 9, pois os valores de rugosidades observados são significativamente mais altos. A queima se deve a maior remoção de material e maiores esforços com o aumento da profundidade, gerando maior exposição a altas temperaturas na peça retificada.



**Figura 23.** Inspeção visual das superfícies das peças retificadas do VC 131.

### 6.1.3 Microdureza aço VC131

O ensaio de micro dureza Vickers mostrou o comportamento da dureza a medida que vai se afastando da superfície retificada de cada uma das 9 condições do aço VC 131. A perda de dureza superficial está relacionada 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, caso essa temperatura seja maior ainda atinge-se o ponto de retempera gerando a queima da peça e formação de uma camada branca a qual possui dureza elevada.



**Figura 24.** Microdureza Vickers aço VC 131.

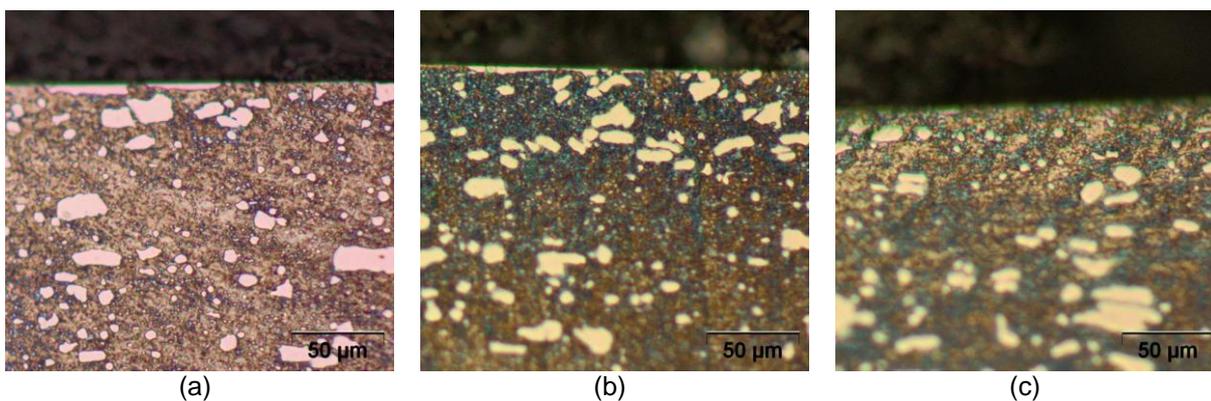
A Figura 24 acima e a Tabela 4 abaixo, mostram o comportamento das 9 condições do aço VC 131 em uma distância da superfície de 100 à 600  $\mu\text{m}$ . Pode ser visto que a influência da temperatura na peça a tendência da microdureza é decair na superfície e ir aumentando em direção ao centro da peça onde se manteve intacta. A peça de número 9 foi a que teve maior alteração, sabendo que a dureza de trabalho desse aço é de 56-62 HRC aproximadamente 615-745 HV (VILLARES 2016).

**Tabela 4. Resultados de microdureza Vickers do aço VC 131.**

Profundidade [ $\mu\text{m}$ ]	Microdureza (HV)								
	1 <sup>a</sup>	2 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>	4 <sup>a</sup>	5 <sup>a</sup>	6 <sup>a</sup>	7 <sup>a</sup>	8 <sup>a</sup>	9 <sup>a</sup>
100	713,3	671,3	726,8	719,2	717,3	743,8	731,4	689,8	599,9
200	745,8	699,6	710,4	725,9	734,2	746,2	744,5	703,8	665,3
300	729,6	694,0	713,9	723,1	742,1	738,2	750,8	697,9	723,8
400	734,8	716,8	713,7	726,4	740,5	739,8	739,2	709,1	719,9
500	723,3	688,8	714,1	729,7	744,4	725,2	741,6	724,0	711,2
600	735,2	698,6	727,9	734,2	745,9	722,0	735,9	711,8	706,2

#### 6.1.4 Metalografia aço VC131

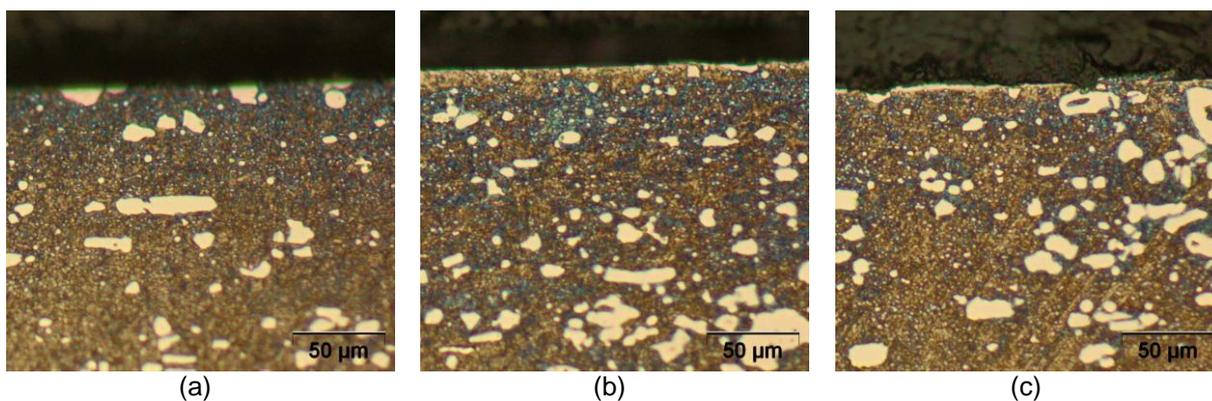
A análise metalográfica mostra possíveis danos térmicos provocados pela remoção de material durante o processo de retificação. Além de possibilitar a identificação do tipo de queima ainda é possível verificar a profundidade da camada afetada termicamente pelo processo de retificação. As figuras 25, 26 e 27 mostram o que ocorreu em cada uma das peças do aço VC 131.



**Figura 25.** Metalografia VC131, (a) peça 1, (b) peça 2 e (c) peça 3.

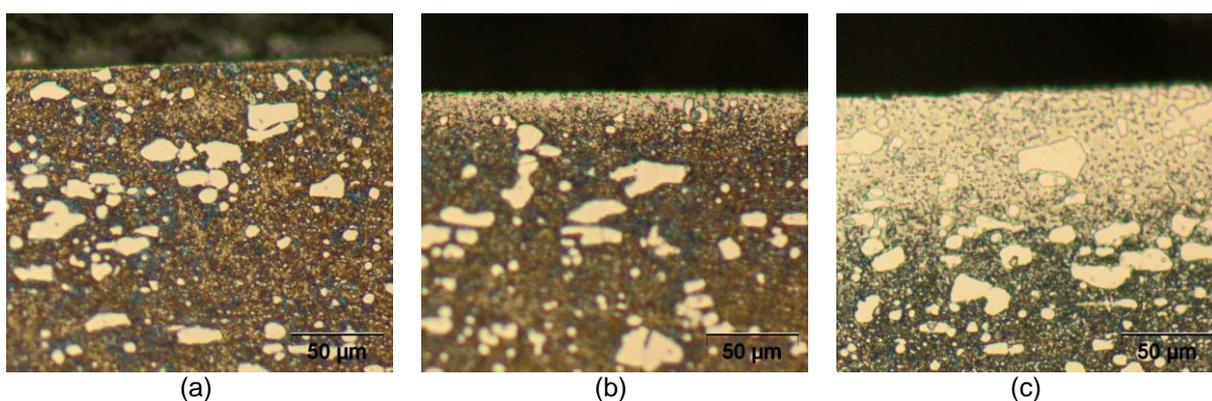
Na Figura 25a, pode ser visualizado a análise metalográfica da peça 1 que apresenta a estrutura da superfície do aço VC 131 retificada sem nenhuma alteração estrutural, considerando assim a peça 1 sem queima, com uma dureza média de 727 HV.

As peças 2 e 3 sofreram pouca variação na estrutura apresentando uma camada escura (super revenimento) de aproximadamente 75 µm nas peças, conforme pode ser visto nas Figuras 25b e 25c. A micro dureza para estas peças se manteve de forma linear ao longo que se afastava da superfície, com uma dureza média de 714 HV para a 2 e 726 HV para a 3.



**Figura 26.** Metalografia VC131, (a) peça 4, (b) peça 5 e (c) peça 6.

As peças 4, 5 e 6 apresentam uma camada escura (super revenimento) em sua superfície. A camada para as peças 4 e 5 nas figuras 26 (a) e 26 (b) ultrapassam 100 µm o que explica o decaimento da dureza apresentado no tópico anterior. A peça 6 possui menos alterações se assemelhando as peças 2 e 3.



**Figura 27.** Metalografia VC131, (a) peça 7, (b) peça 8 e (c) peça 9.

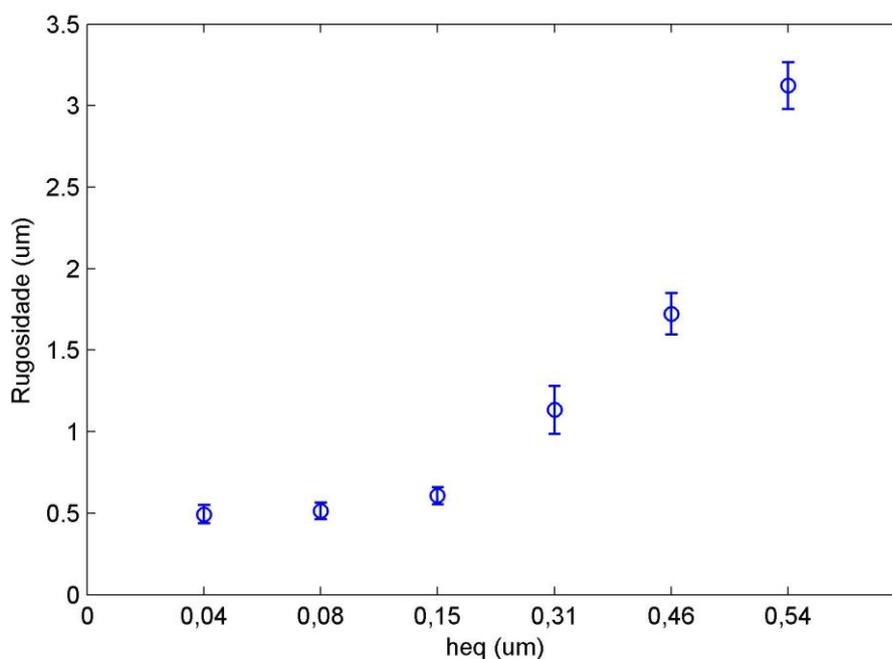
A figura 27 (a), (b) e (c), mostra o que ocorreu na estrutura das peças que apresentaram visualmente queima severa. As três peças sofreram influências da temperatura durante a usinagem, a peça 7 apresenta sua estrutura com camada escura o que indica o fenômeno de super revenimento e a temperatura nas peças 8 e 9 foi ainda maior, pois as mesmas apresentam a camada branca em suas superfícies indicando que houve retempera, sendo assim a microdureza peça 8 variou de até 689 HV e a peça 9 até 599 HV.

Esses tipos de danos térmicos podem comprometer de forma significativa a integridade superficial da peça retificada, reduzindo a vida útil e dependendo da aplicação, a falha do componente durante a aplicação.

## 6.2 Caracterizações da superfície aço ABNT 1045 com rebolo CBN

### 6.2.1 Rugosidade ABNT1045

Assim como os achados para o aço VC 131, foi constatado que os valores de  $R_a$  aumentaram à medida que a profundidade de retificação cresceu para o aço ABNT 1045. Além disso, os valores de desvio-padrão para as  $h_{eq}$  de 0,04 – 0,15  $\mu\text{m}$  são pequenos, uma vez que apresentaram uma boa condição de superfície. No entanto, um maior valor de desvio padrão é observado para as  $h_{eq}$  de 0,31 – 0,54  $\mu\text{m}$ , em que as condições de retificação foram mais graves, e, portanto, levando a níveis mais elevados de irregularidades da superfície da peça de trabalho e queima, conforme a Figura 28.



**Figura 28.** Desvio aritmético médio do perfil avaliado em relação à  $h_{eq}$  do aço ABNT 1045.

### 6.2.2 Queima aço ABNT 1045

A análise da queima dos 6 ensaios está descrita na Tabela 5, onde "sem queima" significa retificação normal, e "alta rugosidade" refere-se as peças com valor de rugosidade superior a 1,0 mm e nenhuma queima visível. Peças com queima visível e com rugosidades elevadas foram consideradas como queima severa.

**Tabela 5. Resultados da caracterização da superfície do ABNT 1045.**

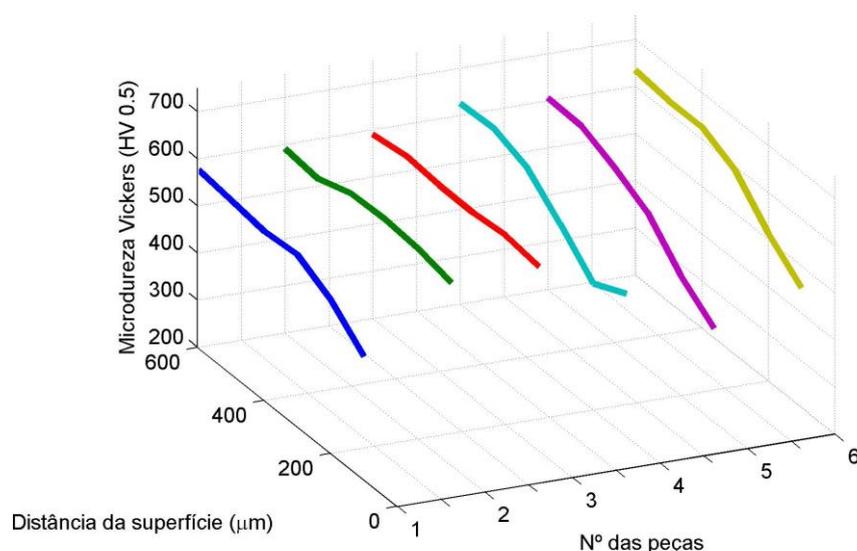
	Profundidade de corte [ $\mu\text{m}$ ]	$h_{eq}$ [ $\mu\text{m}$ ]	Inspeção Visual
1	10	0,04	Sem queima
2	20	0,08	Sem queima
3	40	0,15	Sem queima
4	80	0,31	Alta rugosidade/Queima leve
5	120	0,46	Alta rugosidade/Queima severa
6	140	0,54	Alta rugosidade/Queima severa

A análise de queima da superfície da peça retificada, conforme mostra a Figura 29. Observou-se que as peças de 1 a 3 não apresentaram queima e foi verificado que a rugosidade das peças se manteve próxima a  $0,5 \mu\text{m}$ . A partir da peça 4 começou a ocorrer queima leve com alta rugosidade ultrapassando  $1 \mu\text{m}$ . Os valores de rugosidade começaram a aumentar e na peça 5 e 6 existe ocorrência de queima severa.

**Figura 29.** Inspeção visual das superfícies das peças retificadas do ABNT 1045.

### 6.2.3 Microdureza aço ABNT 1045

Do mesmo modo o ensaio de microdureza Vickers nos mostra o que ocorreu com a dureza a medida que vai se afastando da superfície retificada de cada uma das 6 condições do aço ABNT 1045. Durante a retificação deste aço ocorreram temperaturas mais elevadas, conseqüentemente, alterações maiores de dureza nas peças podem ser vistas, na figura 30.



**Figura 30.** Microdureza Vickers aço ABNT 1045.

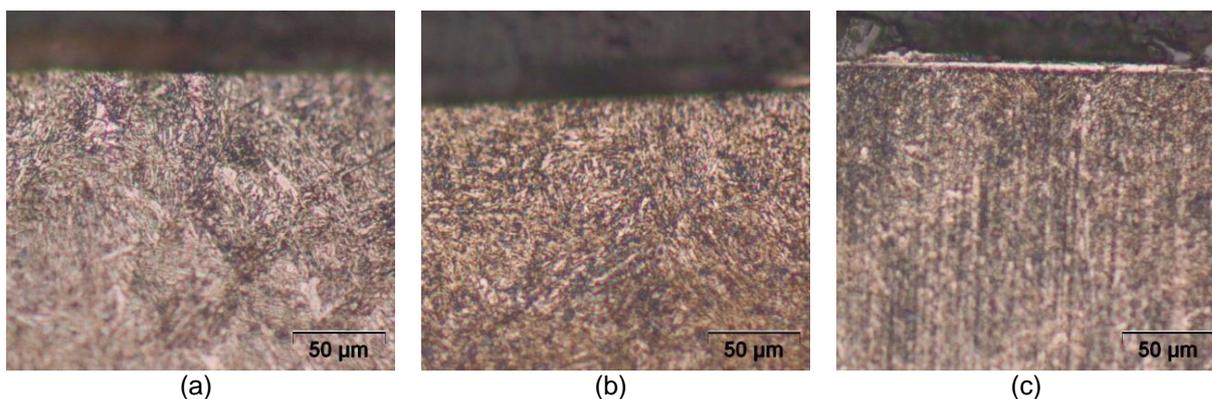
Sabendo que a dureza de trabalho do aço ABNT 1045 é de 50-55 HRC aproximadamente 515-595 HV (VILLARES 2016), apenas as peças 2 e 3 não sofreram alterações devido a temperatura do processo, apresentando pouca variação na dureza. As demais peças atingiram a temperatura de revenimento e à uma distância da superfície de 100 à 600  $\mu\text{m}$ , pode ser visto que de acordo com que ocorre a influência da temperatura na peça a tendência da microdureza é decair na superfície e ir aumentando até chegar ao centro da peça onde se manteve intacta. A peça de número 4 ultrapassou essa temperatura na região de 100  $\mu\text{m}$  o que explica a dureza ter aumentado neste ponto, pois ocorreu uma retempera nesta superfície, que pode ser vista na figura 30 e na Tabela 6 abaixo.

**Tabela 6.** Resultados de microdureza Vickers do aço ABNT 1045.

Profundidade [ $\mu\text{m}$ ]	Microdureza (HV)					
	1 <sup>a</sup>	2 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>	4 <sup>a</sup>	5 <sup>a</sup>	6 <sup>a</sup>
100	462,5	588,1	591,5	503,7	399,1	454,5
200	527,1	604,1	601,7	468,4	454,5	513,5
300	566,5	610,5	594,1	539,5	532,0	591,9
400	559,7	607,7	595,4	603,0	572,9	626,6
500	569,9	582,9	601,8	629,7	604,0	626,3
600	579,1	591,5	590,7	625,5	606,5	634,7

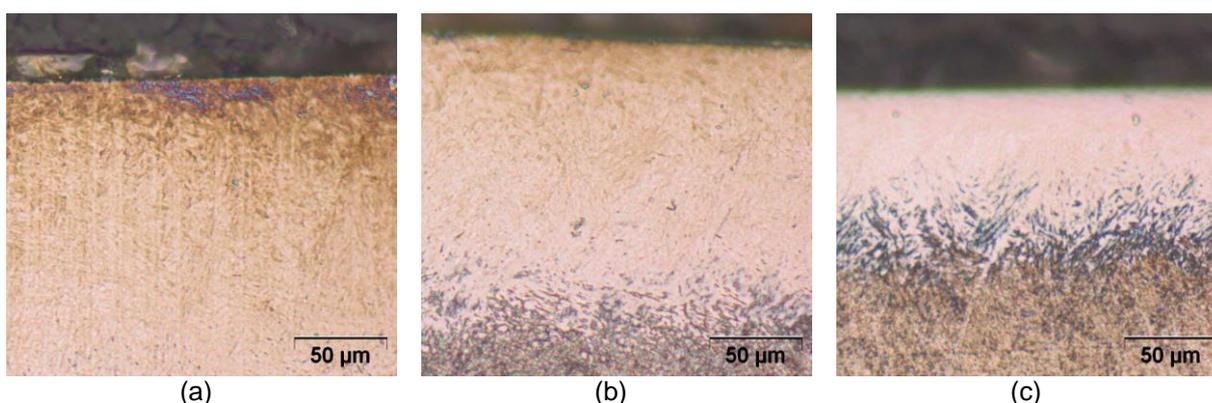
#### 6.2.4 Metalografia aço ABNT 1045

A seguir podem ser analisados os danos térmicos provocados pela remoção de material durante o processo de retificação no aço ABNT 1045 de acordo com as respectivas condições de usinagem de cada peça.



**Figura 31.** Metalografia ABNT 1045, (a) peça 1, (b) peça 2 e (c) peça 3.

A figura 31 (a), (b) e (c), nos mostra a análise metalográfica das peças 1, 2 e 3 as quais sofreram pouca variação na estrutura martensítica das peças apresentando uma camada escura (super revenimento) pequena, o que pode ser observado no gráfico de microdureza da figura 30, onde as peças 2 e 3 mantiveram seus valores em aproximadamente 596 e 591 HV, respectivamente.



**Figura 32.** Metalografia ABNT 1045, (a) peça 4, (b) peça 5 e (c) peça 6.

As três peças da figura 32 (a), (b) e (c) onde a retificação foi mais severa sofreram influências da temperatura durante a usinagem, apresentando a camada banca em suas superfícies evidenciando o fenômeno de retempera nas peças 4, 5 e

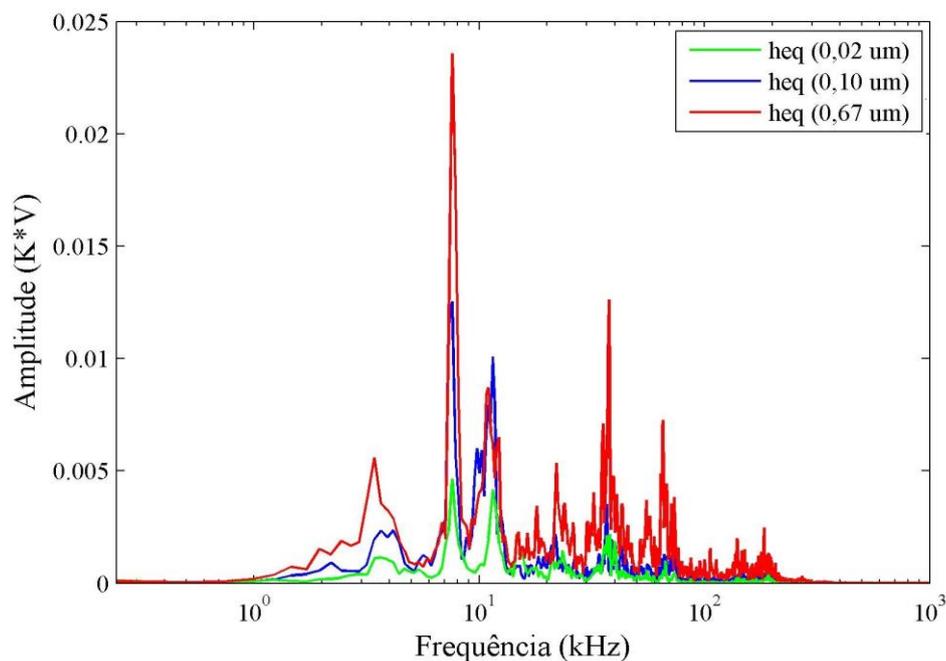
6. A peça 4 (a), foi a que sofreu maior influência, apresentando a maior camada branca o que explica o endurecimento visto no gráfico da microdureza na região de 100  $\mu\text{m}$  afastado da superfície. A peça 5 (b), apresentou uma camada branca menor de 150  $\mu\text{m}$  e na peça 6 (c) foi de aproximadamente de 75  $\mu\text{m}$ . Todas seguidas de uma camada escura (super revenimento) o que ocasionou o decaimento posterior da dureza.

### **6.3 Processamentos dos sinais dos sensores EA e PZT**

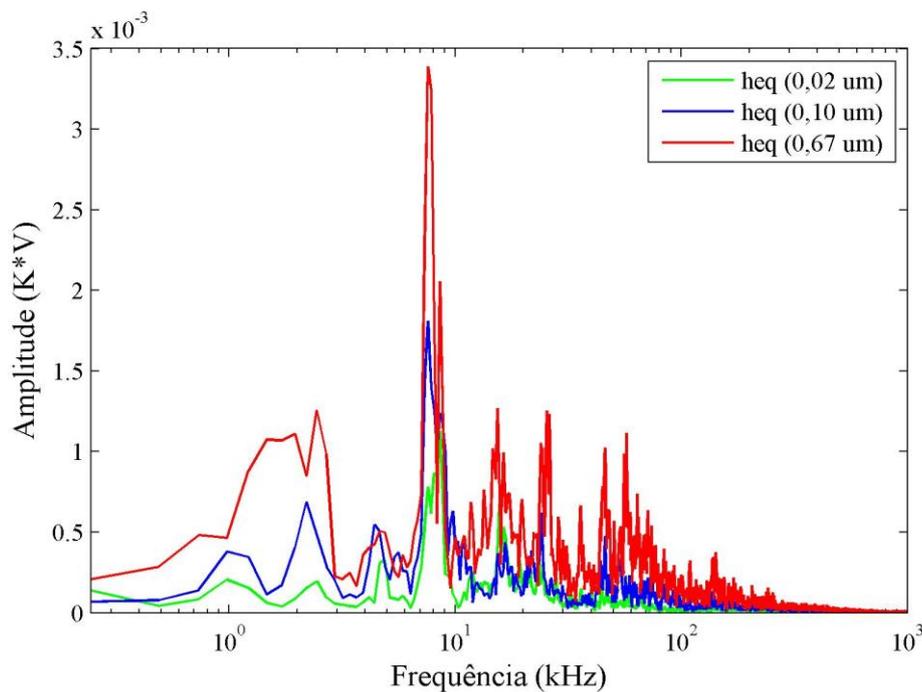
Com a caracterização completa e a partir do estudo dos sinais do sensor piezelétrico de baixo custo e do sensor de EA, amplamente utilizado, foi possível identificar bandas de frequência que melhor indicam o fenômeno da queima. Por meio do uso de filtros digitais associados a parâmetros estatísticos como o RMS, RMSD e CCDM, foi possível classificar os níveis de queima em leve e severa para os aços ABNT1045 e VC131, retificados com rebolo CBN.

O processamento digital dos sensores resultou em gráficos que mostram os espectros em frequência do sensor EA (figura 33) e do sensor PZT (figura 34) para o Aço VC 131, bem como os espectros do sensor EA (figura 35) e do sensor PZT (figura 36) para o aço ABNT 1045.

Pode ser visto nas figuras 33 e 34 que o sinal EA e PZT tem uma gama de frequência que vai de 0 à 300 kHz. Por outro lado, a amplitude da EA é aproximada ao PZT, onde K é uma constante do processamento do sinal, o que pode ser explicado pela utilização de um módulo de amplificação para o sinal de EA e sem amplificação para o sinal de PZT.

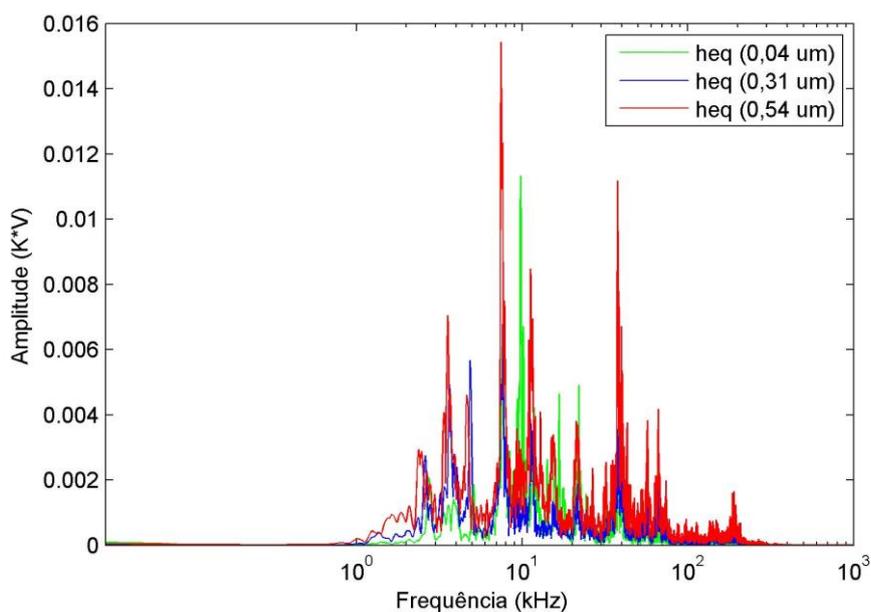


**Figura 33.** Espectro de frequência EA aço VC131.

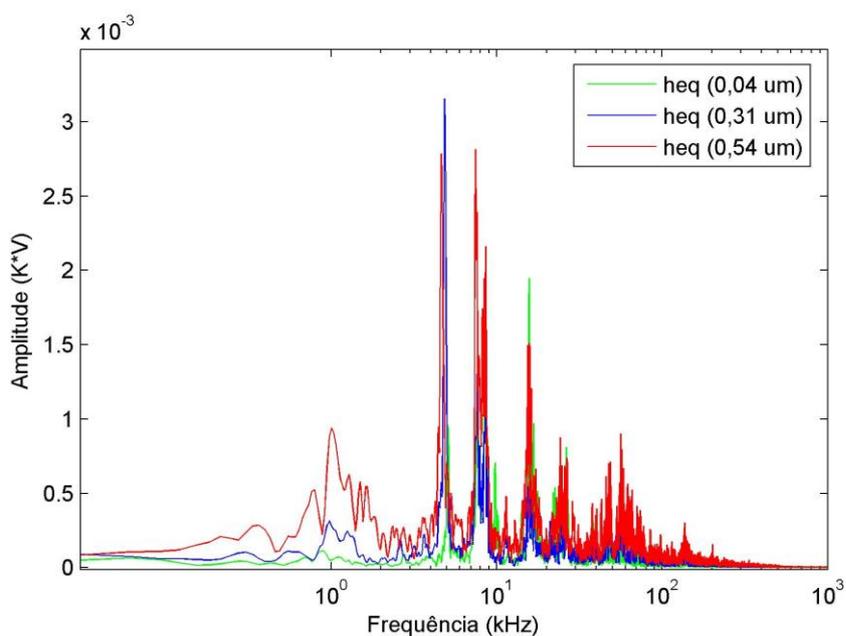


**Figura 34.** Espectro de frequência PZT aço VC131.

O mesmo ocorre para o aço ABNT 1045, onde os sinais de EA e PZT possuem frequências de 0 à 300 kHz com amplitudes semelhantes, de acordo com as figuras 35 e 36.



**Figura 35.** Espectro de frequência EA aço ABNT 1045.



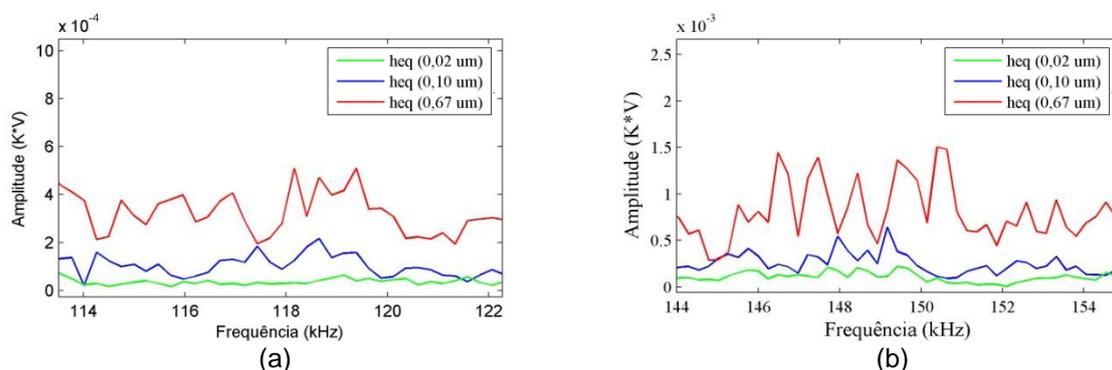
**Figura 36.** Espectro de frequência PZT aço ABNT 1045.

A partir desta análise dos espectros de frequência de ambos os sensores, várias bandas de frequências foram analisadas a partir do espectro de cada sinal, e as duas melhores foram escolhidas para os sinais EA e PZT. A justificativa para a seleção banda de frequência é baseada em obter a melhor extração de características que representa a condição da superfície da peça estudada (sem queima, queima leve e queima severa).

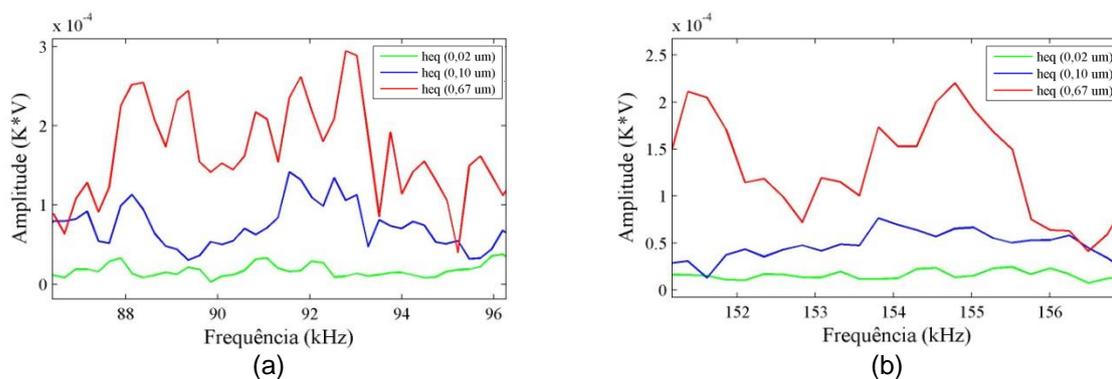
### 6.3.1 Seleção de bandas de frequência aço VC 131

O critério utilizado na seleção banda de frequência foi identificar as janelas de frequência que as amplitudes do sinal para cada condição apresentavam sobreposição mínima. Para o aço VC 131 estas bandas de frequência, em kHz, do sinal EA são: 115-121 e 146-154. As bandas de frequência selecionadas, em kHz, do sinal PZT são: 87-95 e 152-156.

As figuras 37 e 38 mostram um zoom nas faixas de frequências para a EA e PZT, respectivamente. Pode-se perceber o comportamento dos sinais em cada uma das bandas, onde: o sinal na coloração verde está representando uma peça sem queima, o sinal na coloração azul está representando uma peça com queima leve e o sinal vermelho uma peça com queima severa. Nota-se ainda que nestas frequências as características dos sinais não se sobrepuseram garantindo que cada condição de usinagem tem amplitude de sinal diferente.



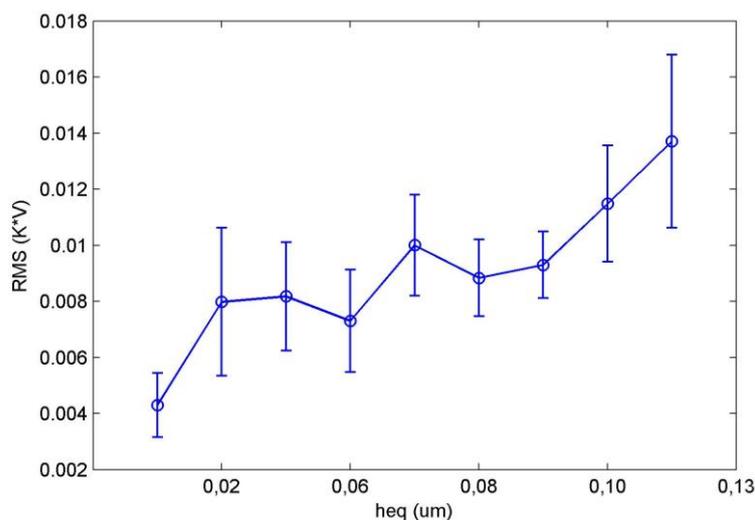
**Figura 37.** Zoom na banda de frequência para EA (a) 115-121 kHz, (b) 146-154 kHz.



**Figura 38.** Zoom na banda de frequência para PZT (a) 87-95 kHz, (b) 152-156 kHz.

### 6.3.1.1 Análise das bandas com a estatística RMS

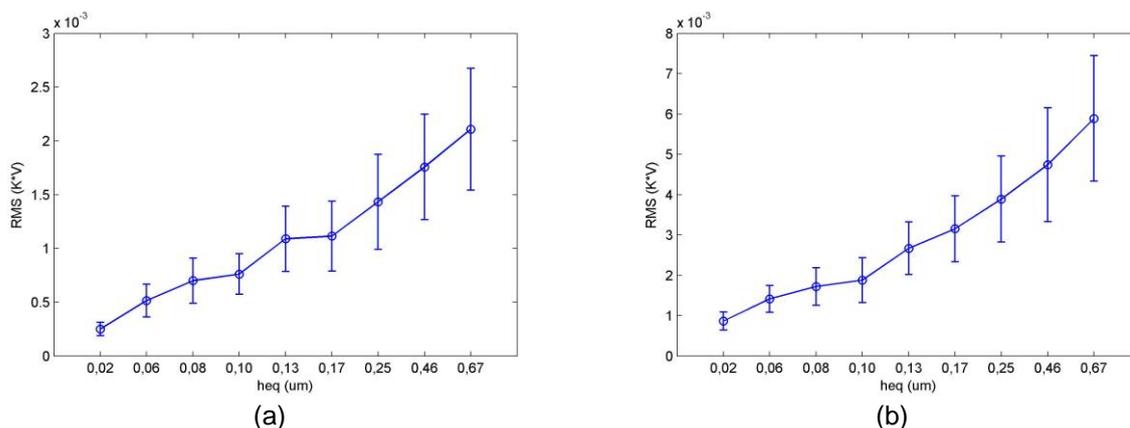
Para analisar se as bandas escolhidas atendem aos requisitos foi calculado o parâmetro estatístico RMS para cada banda de frequência e comparado com o resultado do sinal puro de EA.



**Figura 39.** Valor médio RMS sensor EA.

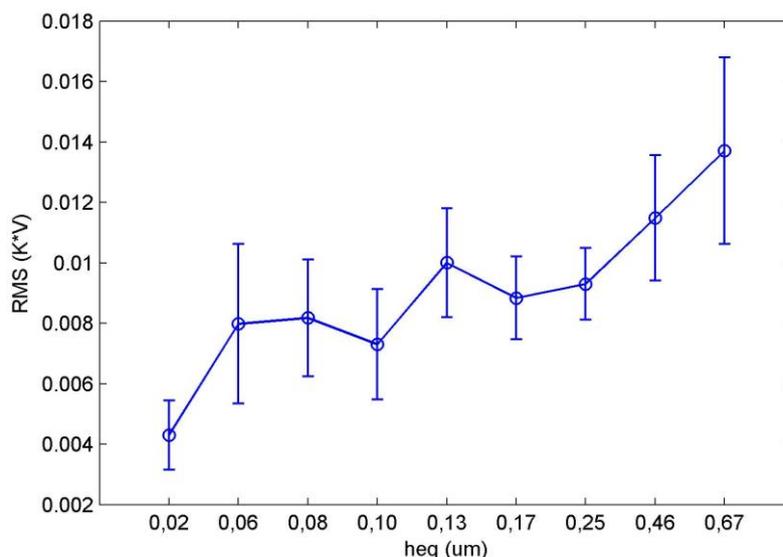
O sinal do RMS apresentado na figura 39 mostra uma tendência de crescimento conforme se torna mais severa a retificação, isto se deve ao aumento das vibrações no interior da peça de acordo com o aumento da  $h_{eq}$ .

Com a seleção das bandas de frequência que melhor representam estes fenômenos do processo de retificação torna-se um sinal com definições claras das condições da superfície da peça anteriormente estudadas, representados através da linearidade no crescimento da amplitude, mostrados na figura 40.

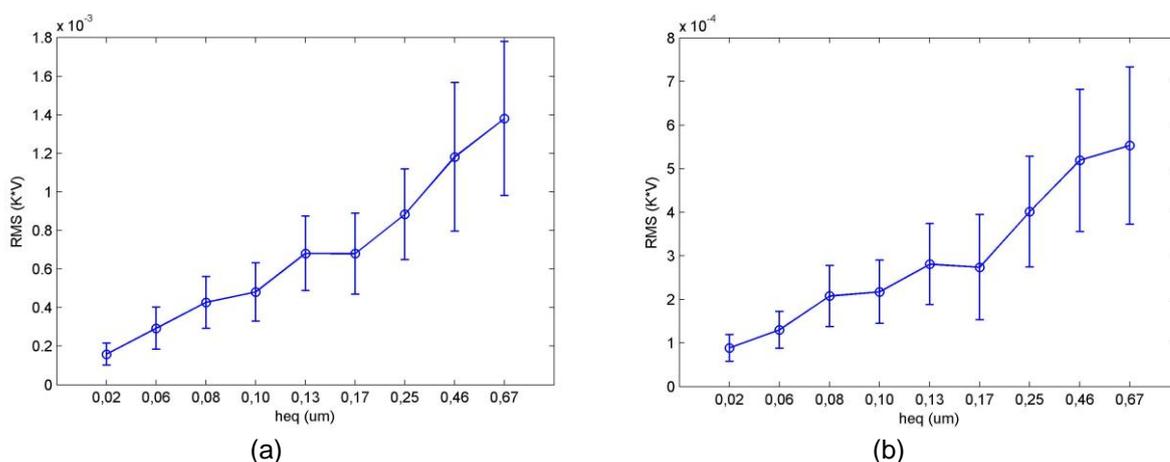


**Figura 40.** Valor médio RMS nas bandas selecionadas sensor EA (a) 115-121 kHz, (b) 146-154 kHz.

O sinal do PZT estudado para o monitoramento também apresenta na figura 41, uma tendência de crescimento conforme se torna mais severa a retificação, e com a seleção das bandas torna-se um sinal com características próximas ao sinal do sensor EA, mostrando na figura 42, um crescimento na amplitude evidenciando as condições antes analisadas das superfícies.



**Figura 41.** Valor médio RMS sensor PZT.

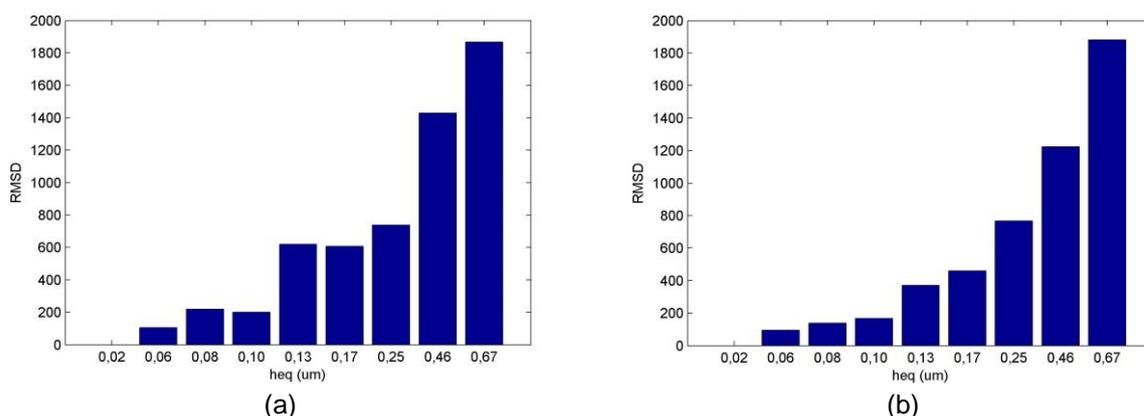


**Figura 42.** Valor médio RMS nas bandas selecionadas sensor PZT (a) 87-95 kHz, (b) 152-156 kHz.

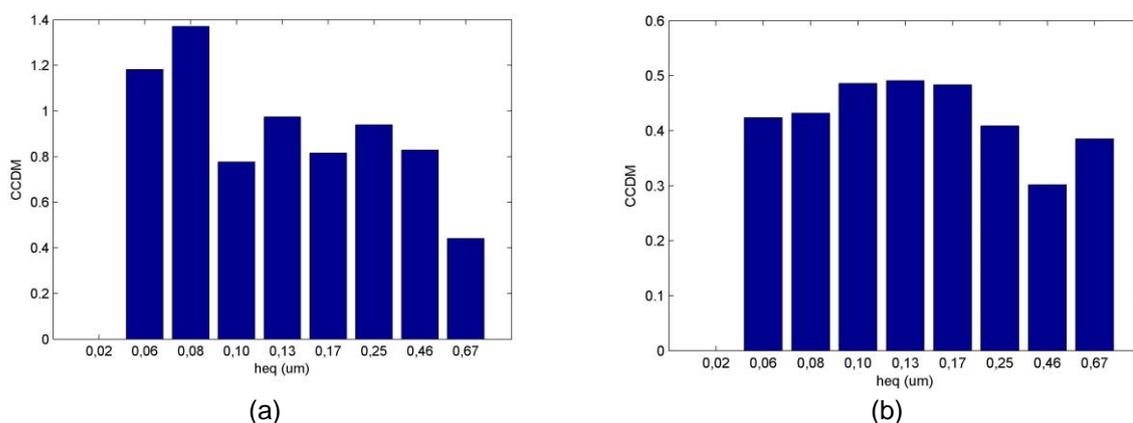
De acordo com a estatística RMS o sinal do diafragma piezelétrico é correspondente com as condições das peças de aço VC131 retificadas, reproduzindo um comportamento semelhante ao sensor de EA. Os dois sinais conseguem captar as energias que ocorrem durante o processo, com potencial para serem utilizados nas condições estudadas.

### 6.3.1.2 Análise das bandas com o índice de danos RMSD e CCDM

Outros dois parâmetros estatísticos foram aplicados nas bandas selecionadas frequência e comparados, o índice RMSD e o índice CCDM. A figura 43 mostra os valores do RMSD nas bandas selecionadas para o sensor EA e a figura 44, mostram os valores do CCDM nas bandas selecionadas para o sensor EA, pode-se observar que os valores RMSD das bandas aumentam à medida que a condição de retificação torna-se mais severa, provando que a amplitude do aumento da FFT é compatível, no sensor EA. Por outro lado, os valores CCDM apresentaram uma tendência a ter uma pequena variação, que mostra que à medida que as condições de retificação tornam-se mais graves os sinais tem pouca variação na mudança de fase nos espectros, para o sensor EA.



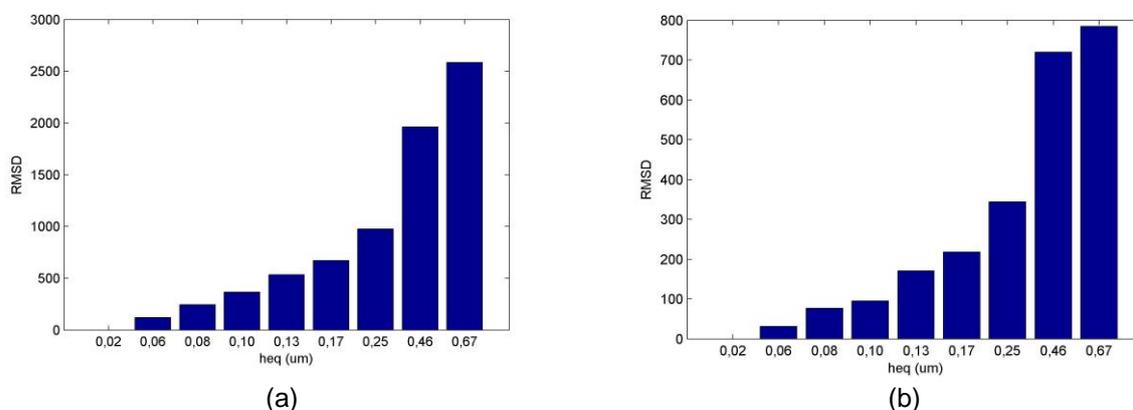
**Figura 43.** RMSD do sinal EA (a) 115-121 kHz, (b) 146-154 kHz.



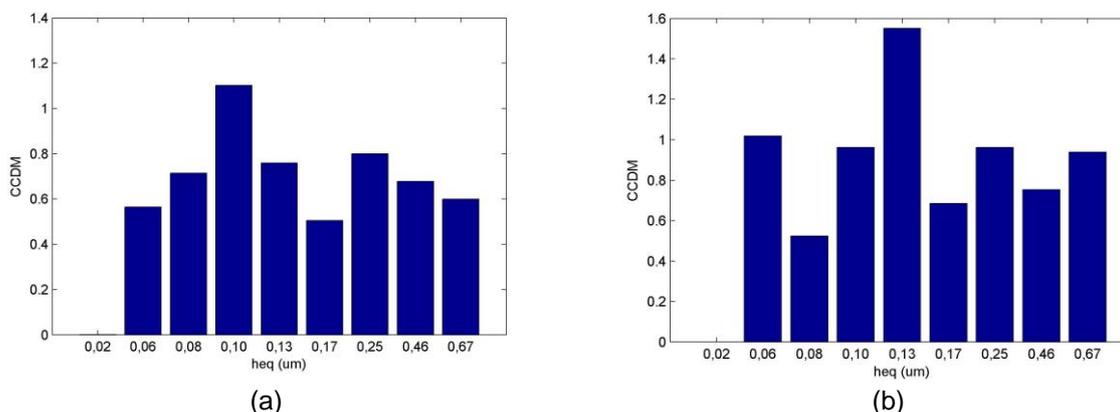
**Figura 44.** CCDM do sinal EA (a) 115-121 kHz, (b) 146-154 kHz.

Estes índices também foram aplicados para o sensor PZT, o qual apresentou um comportamento semelhante ao sensor EA no que se diz respeito ao índice RMSD, de acordo com a figura 45. Já o índice CCDM não apresentou a

mesma tendência do sensor EA, o mesmo para o sensor PZT apresenta variação, porém sem nenhuma correlação com as condições de usinagem, como pode ser visto na figura 46.



**Figura 45.** RMSD do sinal PZT (a) 87-95 kHz, (b) 152-156 kHz.

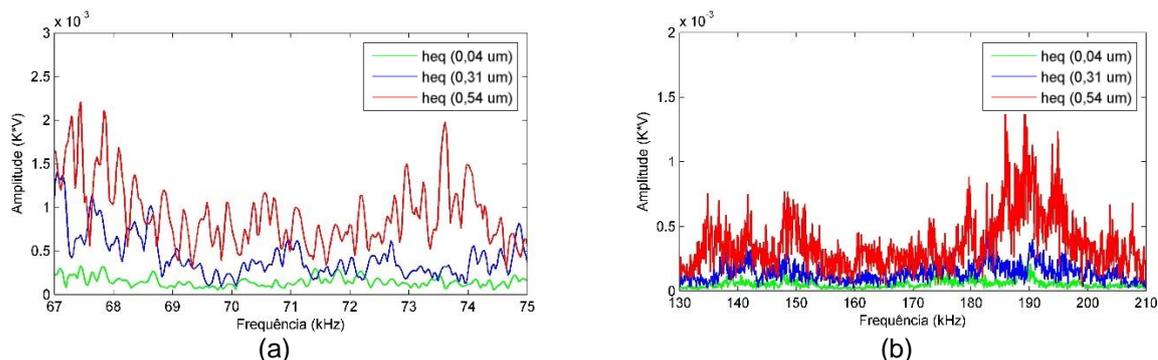


**Figura 46.** CCDM do sinal PZT (a) 87-95 kHz, (b) 152-156 kHz.

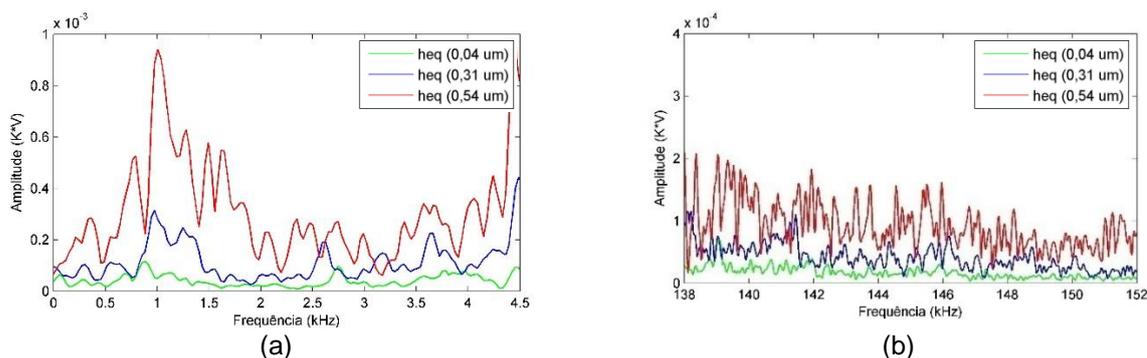
### 6.3.2 Seleção de bandas de frequência aço ABNT 1045

A seleção para o aço ABNT 1045 seguiu o critério de identificar nas janelas de frequência em que as amplitudes do sinal para cada condição apresentavam boas diferenças e sobreposição mínima. Para este aço as bandas de frequência, em kHz, para o sinal EA são: 68-74 e 130-210. E as bandas de frequência selecionadas, em kHz, para o sinal PZT são: 1-4 e 140-150. As figuras 47 e 48 mostram um zoom nas faixas de frequências para a EA e PZT, respectivamente.

Nas figuras 47 e 48, pode-se perceber o comportamento dos sinais em cada uma das bandas, onde: o sinal na coloração verde está representando uma peça sem queima, o sinal na coloração azul está representando uma peça com queima leve e alta rugosidade e o sinal vermelho uma peça com queima severa.



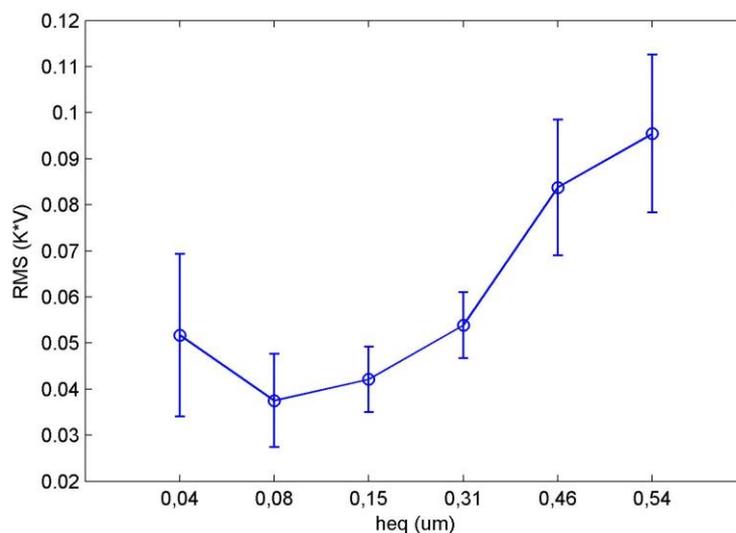
**Figura 47.** Zoom na banda de frequência para EA (a) 68-74 kHz, (b) 130-210 kHz.



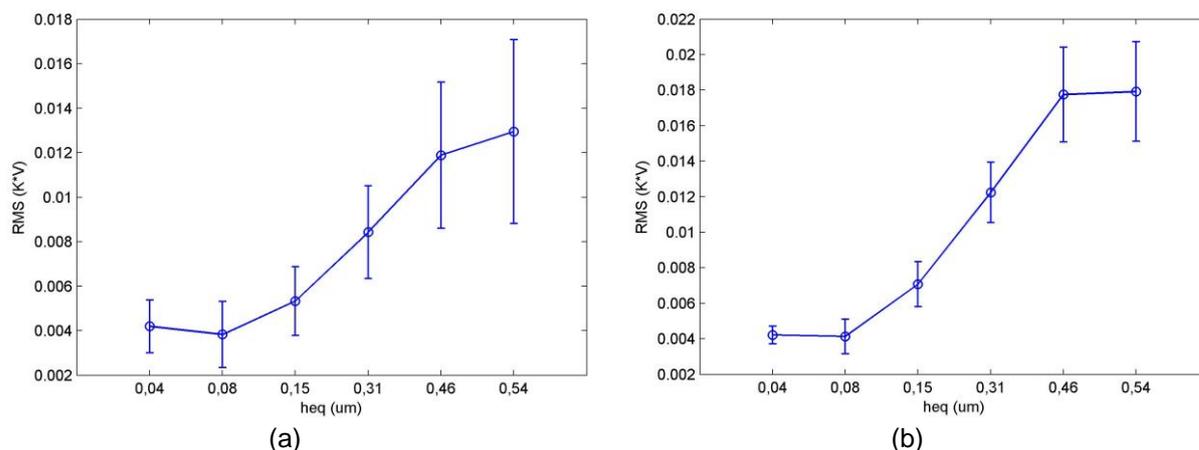
**Figura 48.** Zoom na banda de frequência para PZT (a) 1-4 kHz, (b) 140-150 kHz.

### 6.3.2.1 Análise das bandas com a estatística RMS

O sinal do EA RMS apresenta na figura 49 tendência de crescimento conforme se torna mais severa a retificação no aço ABNT 1045, e com a seleção das bandas torna-se um sinal que diferencia as condições da superfície através do aumento linear do valor RMS para cada uma das condições, como pode ser observado na figura 50.

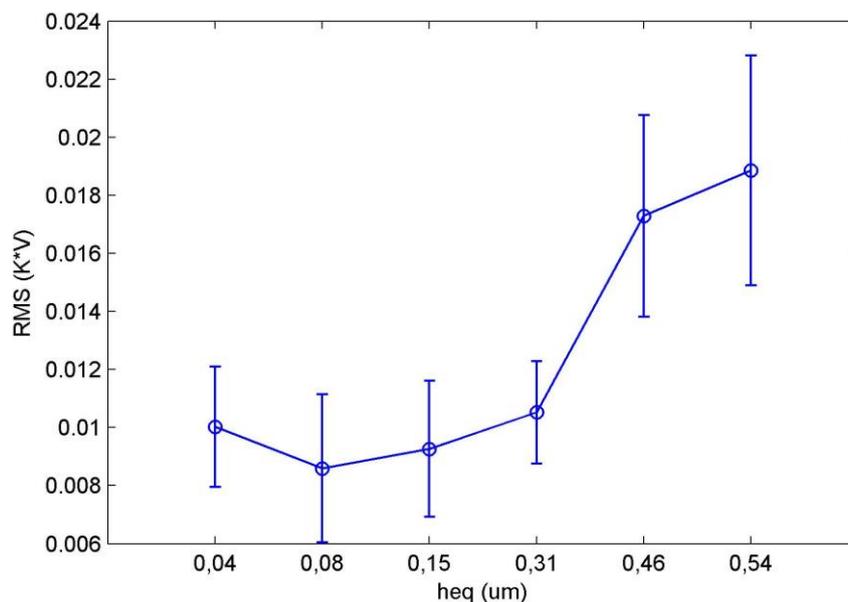


**Figura 49.** Valor médio RMS sensor EA.

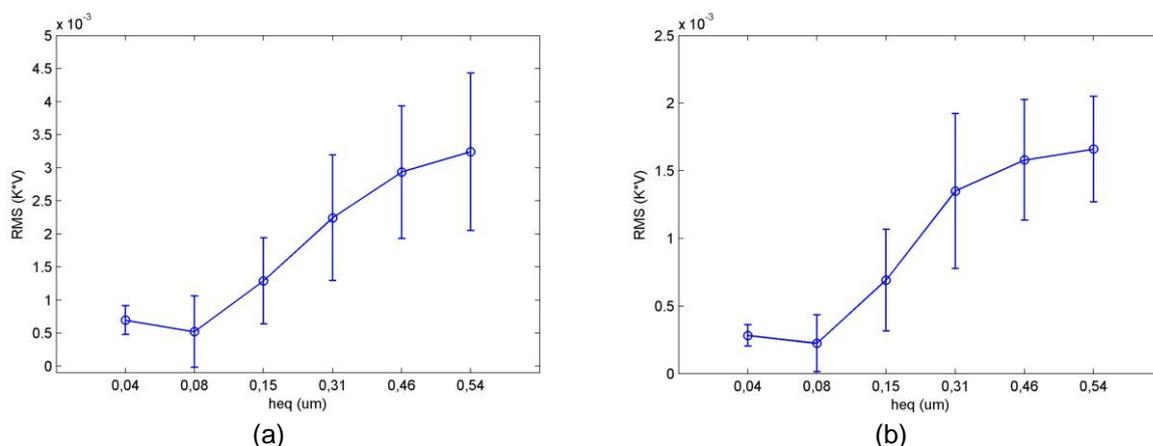


**Figura 50.** Valor médio RMS nas bandas selecionadas sensor EA (a) 68-74 kHz, (b) 130-210 kHz.

O sinal do PZT estudado para o monitoramento também apresenta na figura 51 uma tendência de crescimento conforme se torna mais severa a retificação, e com a seleção das bandas torna-se um sinal com características próximas ao sinal do sensor EA, mostrando na figura 52, um crescimento na amplitude evidenciando as condições antes apontadas das superfícies e seções transversais.



**Figura 51.** Valor médio RMS sensor PZT.

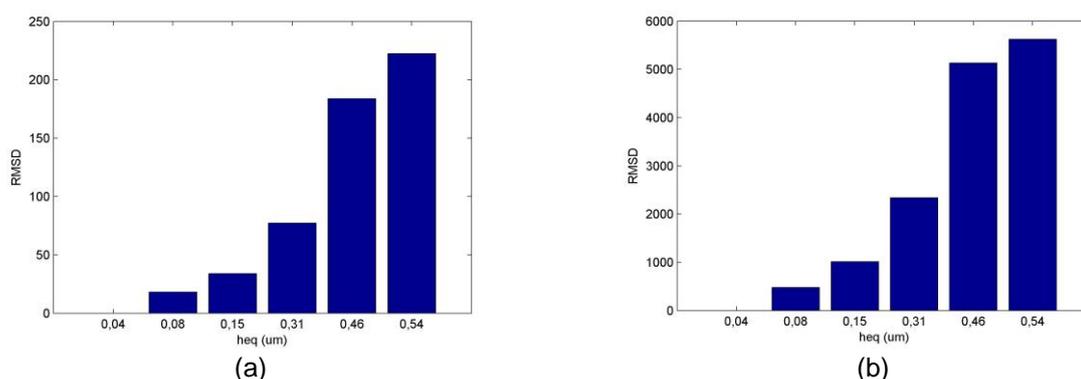


**Figura 52.** Valor médio RMS nas bandas selecionadas sensor PZT (a) 1-4 kHz, (b) 140-150 kHz.

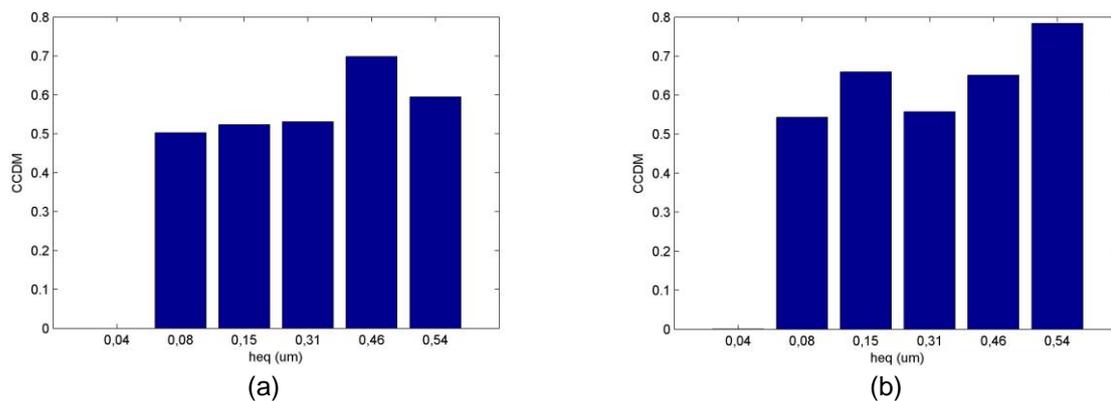
De acordo com a estatística RMS o sinal do diafragma piezelétrico é correspondente com as condições das peças de aço ABNT 1045 retificadas, reproduzindo um comportamento semelhante ao sensor de EA. Os dois sinais conseguem captar as energias que ocorrem durante o processo, podendo ser aplicados neste tipo de monitoramento.

### 6.3.2.2 Análise das bandas com o índice de danos RMSD e CCDM

A figura 53 mostra os valores do RMSD nas bandas selecionadas para o sensor EA e a figura 54 mostram os valores do CCDM nas bandas selecionadas para o sensor EA. Pode-se observar que os valores RMSD das bandas aumentam à medida que a condição de retificação torna-se mais severa, provando que a amplitude do aumento da FFT é compatível. Por outro lado, os valores CCDM apresentaram uma tendência a ter uma variação mínima, que mostra que à medida que as condições de retificação tornam-se mais graves os sinais variam pouco a mudança de fase nos espectros para o sensor EA.

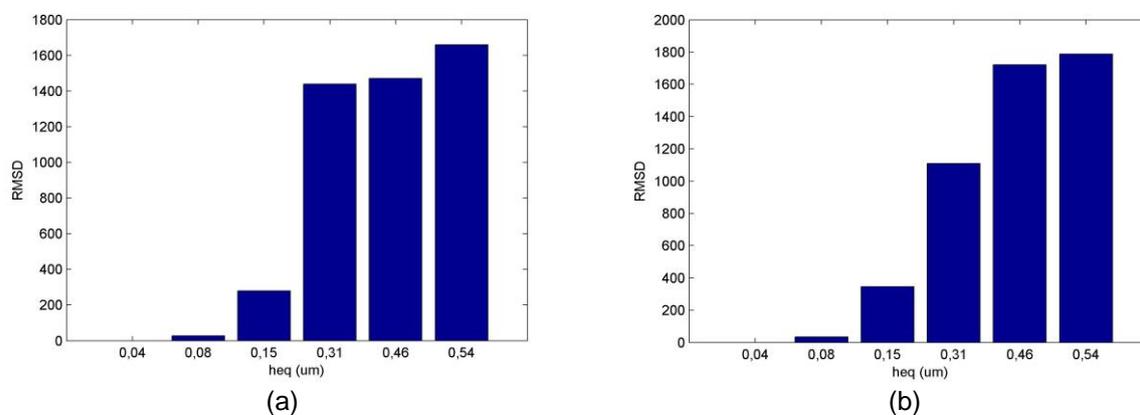


**Figura 53.** RMSD do sinal EA (a) 68-74 kHz, (b) 130-210 kHz.

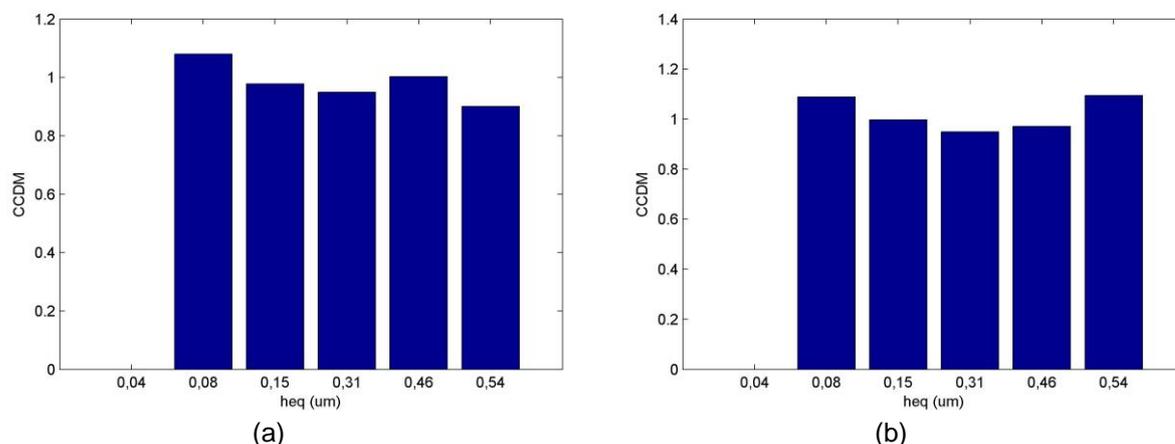


**Figura 54.** CCDM do sinal EA (a) 68-74 kHz, (b) 130-210 kHz.

Aplicado para o sensor PZT, o RMSD apresentou um comportamento semelhante ao sensor EA, porém com uma variação na amplitude mais amena entre algumas condições, de acordo com a figura 55. O índice CCDM continuou apresentando uma variação mínima de acordo com as condições, como pode ser visto na figura 56.



**Figura 55.** RMSD do sinal PZT (a) 1-4 kHz, (b) 140-150 kHz.



**Figura 56.** CCDM do sinal PZT (a) 1-4 kHz, (b) 140-150 kHz.

## 7. CONCLUSÃO

Em relação aos métodos usados e os resultados obtidos neste trabalho, conclui-se que:

O sinal do diafragma piezelétrico de baixo custo (PZT) apresentou uma correspondência satisfatória com as condições das peças do aço VC 131 e do aço ABNT 1045 após a retificação, de acordo com a análise espectral e o estudo do sinal nas devidas bandas de frequência utilizadas.

O estudo comparativo do sinal de EA pode-se comprovar ainda mais os resultados obtidos para o PZT, pois os mesmos se assemelharam a este sensor que já é utilizado nos monitoramentos de retificação.

O crescimento do valor da rugosidade ( $R_a$ ) é diretamente proporcional ao aumento da severidade do processo de retificação e aos sinais de PZT e EA estudados na estatística RMS, para ambos os aços.

O índice de dano RMSD serviu de base para apoiar as conclusões desse trabalho sobre a relação do sinal do PZT e comprovar a relevância do sinal EA com a integridade estrutural dos corpos de prova usinados.

Os resultados do índice CCDM foram insatisfatórios sob as condições de usinagem usadas nesta pesquisa, pela inexistência de correlação no comportamento dos sinais para os dois aços, concluindo que esse parâmetro não foi adequado para o monitoramento do processo em questão.

Estas análises foram muito importantes para qualificar danos superficiais e microestruturais nas peças em função das condições de corte adotadas, observados pela análise de microdureza Vickers e análise metalográfica e apoiados pelo monitoramento dos ensaios, por meio das variáveis de saída: rugosidade, análise visual e sinal de PZT e EA.

Foi possível observar o comportamento superficial das peças em diferentes profundidades de corte configuradas nos ensaios, a influência de uma condição de corte mais agressiva na superfície da peça, e a qualidade do método de fabricação desses aços, através do diafragma piezelétrico de baixo custo.

Esta qualificação é necessária, porque a qualidade superficial das peças retificadas será monitorada com um menor custo para a indústria. Com isso, os danos na superfície das peças devem diminuir e, conseqüentemente a sua vida útil aumentar.

## **8. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Realizar Difração de Raio-X (DRX) para analisar e quantificar as mudanças na microestrutura da peça retificada.

Utilizar novas bandas de frequência, que não foram abordadas, porém tem grande potencial para futuros estudos, estas são: para sinal de EA: 194-202 kHz, 93-99 kHz e 56-65 kHz, e para sinal de PZT: 184-188 kHz, 48-58 kHz e 1-4 kHz.

## REFERÊNCIAS

- AGUIAR, P. R., **Monitoramento da queima superficial em processo de usinagem por retificação usando a potência elétrica do motor de acionamento e emissão acústica**, Tese de Doutorado - USP, São Paulo, SP, Brasil, 1997.
- AGUIAR, P. R., SERNI, P. J. A., BIANCHI, E. C., DOTTO, F. R. L., **In process grinding monitoring by acoustic emission**, IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, v.5, n 1, p.118–124, 2004.
- AGUIAR, P. R. et al., **Monitoring the dressing operation in the grinding process**, International Journal of Machining and Machinability of Materials, v.5, p.3–22, 2009.
- ALAGUMURTHI, N., PALANIRADJA, K., SOUNDARARAJAN, V, **Phase Transformation and Residual Stress Analysis in Grinding of Steel Material – A Detailed Experimental Investigation**, Journal for Manufacturing Science and Production, v.7, 2006.
- ALKAN, A., YILMAZ, A. S., **Frequency domain analysis of power system transients using Welch and Yule Walker AR methods**, Energy Conversion and Management, v. 48, n. 1, p. 2129-2135, 2007.
- ALMEIDA, V. A. D., BAPTISTA, F. G., & AGUIAR, P. R., **Piezoelectric Transducers Assessed by the Pencil Lead Break for Impedance-Based Structural Health Monitoring**, IEEE Sensors Journal, v.15, n. 2, p. 693–702, 2015.
- ANTONIOU, A., **Digital Filters: Analysis, Design, and Applications**. Nova Iorque: McGraw Hill, 1993.
- BAPTISTA, F. G. **Uma Contribuição aos Sistemas de Monitoramento de Integridade Estrutural Baseados na Impedância Eletromecânica**. Tese de Doutorado, 2010.
- BYRNE, G., DORNFELD, D., INASAKI, I. et al., **Tool Condition Monitoring (TCM) – The Status of Research and Industrial Application**. CIRP Annals - Manufacturing Technology, v. 44, n. 2, p. 541 – 567, 1995.
- CALLISTER, W. D. **Materials Science and Engineering: An Introduction**. 8. ed. Nova York: Ed. John Wiley & Sons Inc., 2010.
- CHUGANI, MAHESH, SAMANT & CERNA., **Lab View Signal Processing**. New York, USA: Prentice Hall PTR, 1a Ed., p. 634, 1998.

- CONCEIÇÃO JUNIOR, P. O., **Sinais de vibração no monitoramento do processo de retificação plana de cerâmicas avançadas**, Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia, Bauru, 2016.
- COOLEY, J. W., TUKEY, J. W. **An algorithm for the Machine Computation of Complex Fourier Series. Mathematics of Computation**, v. 19, p. 297-301, 1965.
- DANOUIJ, B., TAHAN, S. A., David, E., **Using a new generation of piezoelectric sensors for partial discharge detection**, Measurement, 2012.
- DAVIM, J. P. **Machining: fundamentals and recent advances**. 2nd ed. London: Springer Verlag, 2008.
- DINIZ, A. E., MARCONDES, F. C., COPPINI, N. L., **Tecnologia da usinagem dos Materiais**, Artiber Editora Ltda, Campinas, SP, Brasil, 4ª Edição, p.230-248, 2003.
- DINIZ, A. E., MARCONDES, F. C., LEMOS, N. C., **Tecnologia da usinagem dos materiais**, 6.ed. São Paulo: Editora Artiber Editora Ltda., p. 262, 2008.
- DU, R, ELBESTAWI, M. A., WU, S., **Automated monitoring of manufacturing process, part 1: monitoring methods**, ASME Journal of Engineering of industry, v.117, n.2, p.121-32, 1995.
- FATHALLAH, B. B., FREDJ, N.B., SIDHOM, H., BRAHAM, C., ICHIDA, Y., **Effects of abrasive type cooling mode and peripheral grinding wheel speed on the AISI D2 steel ground surface integrity**, International Journal of Machine Tools & Manufacture: Design, Research and Application, v. 49, p.261-272, 2009.
- FERREIRA, M. C., **Apostila de Preparo de amostras para a realização do teste de microdureza**, UFSC, Florianópolis, 2004.
- GRIFFITHS, B., **Manufacturing surface technology: Surface integrity & functional performance**, London: Penton Press, p.237, 2001.
- GRINKO, S., **Thermo-mechanisches Schädigungs modellfür das (Zahnflanken) Profilschleifen**, Dissetationzur Erlangung des akademischen Grades Doktoringenieur, Ottovon-Guericke-Universität Magdeburg, 2006.
- HASSUI, A. et al., **Experimental evaluation on grinding wheel wear through vibration and acoustic emission**, Wear, v. 217, n. 1, p.7–14, 1998.
- HAYKIN, S, BARRY, V., **Sinais e Sistemas**, Porto Alegre: Bookman, p.668, 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, p.755–761, 2003.
- HUANG, S., **Artificial neural networks in manufacturing: concepts, applications and perspectives**, In: Manufacturing Technology, Part A, v. 17, p. 212-228, 1994.
- INA – (Schaeffler Brasil), **Queima de Retificação – Pré-condições para evitar a queima de retificação**, v.1, 2009.
- INASAKI, I., **Monitoring and optimization of grinding process**, CIRP Annals - Manufacturing Technology, v. 40, 1990.
- INASAKI, I., KARPUSCHEWSKI, B., LEE, H.S., **Grinding and suppression**, Annals of the CIRP, v.50, n.2, p.515-534, 2001.
- JEMIELNIAK, K., **Some aspects of acoustic emission signal pre-processing**, Journal of Materials Processing Technology, v. 109, n. 3, p. 242–247, 2001.
- KJAER, B., **Vibration Measurement and Analysis**, Instrumentation, v. 785, n. 1, p. 1-40, 1998.
- KING, R. I., HAHN, R. S., **Handbook of modern technology**, New York, Chapman and Hall, 1986.
- KINO, G. S., **Acoustic waves: devices, imaging and analog signal processing**, Englewood Cliffs: Prentice-Hall, p.601, 1987.
- KOHLI, S. P., GUO, C., MALKIN, S., **Energy partition for grinding with aluminum oxide and CBN abrasive wheels**, ASME Journal of Engineering for Industry, v.117, p.160-168, 1995.
- KUMAR, S., YADAV, M., AGRAWAL, P., KHAN, M. Z., VASHISTA, M., **Assesment of Microhardness Profile in Grinding Using Barkhausen Noise Technique at Various Analysis Parameters**, ISRN Materials Science, 2011.
- LANDERS, R.G., ULSOY, A.G., FURNESS, **Analysis of mechanical systems**, CRC Press R.J, 1999.
- LASKOVSKI, A. MOHEIMANI, S. O. R., YUCE, M. R., **Piezoelectric strain voltage sensing at ultra-low frequencies**, Review of Scientific Instruments, v. 82, 2011.
- LEE, D. E., HWANG, I., VALENTE, C. M. O., OLIVEIRA, J. F. G., DORNFELD, D. A., **Precision manufacturing process monitoring with acoustic emission**, International Journal of Machine Tools and Manufacture, v.46, n.2, p.176–188, 2006.

- LI, Z., DING, W., SHEN, L., XI, X., FU, Y., **Comparative investigation on high speed grinding of TiCp/Ti-6Al-4V particulate reinforced titanium matrix composites with single-layer electroplated and brazed CBN wheels.** Chinese Journal of Aeronautics, 2016.
- LIU, Q., CHEN, X., & GINDY, N., **Investigation of acoustic emission signals under a simulative environment of grinding burn,** International Journal of Machine Tools and Manufacture, v.46, p.284–292, 2006.
- LYONS, RICHARD G., **Understanding Digital Signal Processing,** USA: Pearson Education, Inc, 2a Ed. 2001.
- MAGNANI, E. G., **Retificação cilíndrica externa do aço ABNT 1045 temperado e revenido utilizando diferentes rebolos e condições operacionais,** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2013.
- MARINESCU, I. D., ROWE, W.B., DIMITROV, B., INASAKI, I., **Tribology of abrasive machining processes,** 1.ed., Norwich, William Andrew Inc, 2004.
- MARINESCU, I., HITCHINER, M., UHLMANN, E., **Handbook of machining with grinding wheels,** p.632, 2006.
- MARINESCU, I., HITCHINER, M., UHLMANN, E., ROWE, W. B., INASAKI, I., **Handbook of Machining with Grinding Wheels,** CRC Press, Taylor & Francis Group, 2007.
- MALKIN, S., **Current trends in CBN grinding technology,** Annals of the CIRP, v.34, n.1, p.557-560, 1985.
- MALKIN, S., Guo, C., **Thermal Analysis of Grinding,** CIRP Annals - Manufacturing Technology, v.56, n.1, p.760–782, 2007.
- MALKIN, S., **Grinding Technology: Theory and Applications of Machining with Abrasives,** 2<sup>a</sup> ed., Industrial Press Inc., New York, 2008.
- MAO, C., ZHOU, Z. X., REN, Y. H., ZHANG, B., **Analysis and FEM Simulation of Temperature Field in Wet Surface Grinding, Materials and Manufacturing Processes,** v.25, n.6, p.399-406, 2010.
- MARCHI, M., **Monitoramento da queima da peça no processo de retificação plana baseado no estudo espectral do sinal de emissão acústica com implementação por hardware,** Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia, Bauru, São Paulo, Brasil, 2012.

- MOIA, D. F. G., **Aplicação de redes neurais artificiais no monitoramento da operação de dressagem**, Dissertação de mestrado, Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia, Bauru, 2012.
- NA, S., LEE, H. K., **Steel wire electromechanical impedance method using a piezoelectric material for composite structures with complex surfaces**, *Composite Structures*, v.98, p.79–84, 2013.
- NAKAI, M. E., AGUIAR, P. R., GUILLARDI, H., BIANCHI, E. C., SPATTI, D. H., D'Addona, D. M., **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, p.7026–7035, 2015.
- NILSSON, J. W., RIEDEL, S. A., **Circuitos Elétricos**, 10<sup>a</sup> ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, p.816, 2016.
- OIKAWA, M. H., BIANCHI, E. C., DESTRO, R. S., SOUSA, R. M., CANARIM, R. C., AGUIAR, P. R., **Cerâmicas avançadas no processo de retificação cilíndrica externa de mergulho com rebolos diamantados com a técnica da mínima quantidade de lubrificação e refrigeração otimizada**, *Advanced ceramics in the external cylindrical plunge grinding using*, v.57, p.263–273, 2011.
- OLIVEIRA, J. F. G., SILVA, E. J., BIFFI, M., **New architecture control system for an intelligent high speed grinder**, *Abrasives Magazine*, 2002.
- OPPENHEIM, A. V., WILLSKY, A., **Signals and Systems**, Boston: Prentice Hall, 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*, v. 17, p. 87–92, 2001.
- RAVINDRA, H.V., SRINIVASSA, Y.G., KRISHNAMURTHY, R., **Acoustic emission for tool condition monitoring in metal cutting**, *Wear*, v. 212, n. 1, pp. 78-84, 1997.
- ROWE, W. B., MORGAN, M. N., **The effect of deformation on the contact area in Grinding**, In: *Annals of the CIRP*, v.42, n.1, 1993.
- SEMMLOW, J., **Biosignal and biomedical image processing MATLAB based applications**, 1 ed., Marcel Dekker Inc., 2004.
- SHAW, M. C., **Principles of abrasives processing**, Oxford Science on Advanced Manufacturing, New York, USA, 1996.

- SILVA, K. L. O., **Monitoramento das condições da superfície da peça retificada por meio de cápsula piezelétrica**, Iniciação Científica, FAPESP, Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia, Bauru, 2016.
- SMITH, S. W., **The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing**, Second Edition, California Technical Publishing, San Diego, California, 1999.
- SOUZA, A. G. O., **Monitoramento da dressagem no processo de retificação**, Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru, 2009.
- STEPHENSON D. J., SUN X., ZERVOS C., **A study on ELID ultra precision grinding of optical glass with acoustic emission**, International Journal of Machine Tools & Manufacture, v.46, p. 1053–1063, 2006.
- TÖNSHOFF, H. K., GRABNER, T., **Cylindrical and Profile Grinding with Boron Nitride Wheels**, Proceedings of the 5th International Conference on Production Engineering, Tokyo, p. 326-343, 1984.
- VANSEVENANT, I. R. E., **An Improved Mathematical Model to Predict Residual Stresses in Surface Plunge Grinding**, Annals of the CIRP, v.36, p. 413-416, 1989.
- VILLARES METALS, acesso em: 06/05/2016.  
<http://www.villaresmetals.com.br/villares/pt/Produtos/Acos-Ferramenta/Trabalho-a-frio/VC131>.
- PHYSIK INSTRUMENTE, **Fundamentals of piezoelectricity and piezoactuators**, acesso em: 27/12/2016, <http://www.physikinstrumente.de/products/prdetail.php?secid=4-15>
- WELCH, P. D., **The use of fast Fourier transform for the estimation of power spectra: a method based on time averaging over short, modified periodograms**, IEEE Transactions Audio Electroacoust, v.1, n.1, p. 932-945, 1967.
- XUE L., NAGHDY F., **Monitoring of wheel dressing operation for precision grinding**, IEEE ICIT'02, p.1296-1299, 2002.
- ZENG, Y., FORSSBERG, E., **Monitoring Grinding Parameters By Vibration Signal**, Measurement, v.7, p.495–501, 1994.
- ZHANG, J., YUAN, Z., HUANG, J., et al., **Quantification of the power changes in BOLD signals using Welch spectrum method during different single-hand motor imageries**, Magnetic Resonance, v. 1, n. 1, p. 3-14, 2014.