



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA  
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"



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

**FELIPE APARECIDO ALEXANDRE**

**MONITORAMENTO DO FENÔMENO DE QUEIMA NO PROCESSO DE RETIFI-  
CAÇÃO DE AÇOS POR MEIO DE SINAIS DE VIBRAÇÃO E ANÁLISE DE TEMPO  
E FREQUÊNCIA**

**Bauru  
2017**

**FELIPE APARECIDO ALEXANDRE**

**MONITORAMENTO DO FENÔMENO DE QUEIMA NO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO DE AÇOS POR MEIO DE SINAIS DE VIBRAÇÃO E ANÁLISE DE TEMPO E FREQUÊNCIA**

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

**Área de concentração: Automação**

**Linha de pesquisa: Mecatrônica**

**Orientador: Prof. Titular Paulo Roberto de Aguiar**

**Bauru  
2017**

Alexandre, Felipe Aparecido.

Monitoramento do fenômeno de queima no processo de retificação de aços por meio de sinais de vibração e análise de tempo e frequência / Felipe Aparecido Alexandre, 2018

118 f. il.

Orientador: Paulo Roberto de Aguiar

Dissertação (Mestrado)-Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru, 2018

1. Vibração. 2. Retificação. 3. Monitoramento. 4. Danos Térmicos I. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia. II. Título.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Bauru



**ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE FELIPE APARECIDO ALEXANDRE, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.**

Aos 22 dias do mês de janeiro do ano de 2018, às 14:00 horas, no(a) Anfiteatro da Seção Técnica de Pós-graduação da FEB, reuniu-se a Comissão Examinadora da Defesa Pública, composta pelos seguintes membros: Prof. Dr. PAULO ROBERTO DE AGUIAR - Orientador(a) do(a) Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP, Prof. Dr. JOSÉ ALFREDO COVOLAN ULSON do(a) Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP, Prof. Dr. DANILO HERNANE SPATTI do(a) Engenharia de Computação / Universidade Tecnológica Federal do Paraná, sob a presidência do primeiro, a fim de proceder a arguição pública da DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de FELIPE APARECIDO ALEXANDRE, intitulada **MONITORAMENTO DO FENÔMENO DE QUEIMA NO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO DE AÇOS POR MEIO DE SINAIS DE VIBRAÇÃO E ANÁLISE DE TEMPO E FREQUÊNCIA**. Após a exposição, o discente foi arguido oralmente pelos membros da Comissão Examinadora, tendo recebido o conceito final: Aprovado. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelos membros da Comissão Examinadora.

Prof. Dr. PAULO ROBERTO DE AGUIAR

Prof. Dr. JOSÉ ALFREDO COVOLAN ULSON

Prof. Dr. DANILO HERNANE SPATTI



**Dedico a minha família que me apoia em tudo  
que está ao seu alcance para que eu seja feliz.**

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pelo dom da vida.

Agradeço a minha mãe, Giane, que sempre me incentivou a estudar e acreditou em mim, sendo meu alicerce nos momentos difíceis.

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

Agradeço a minha irmã, Lohaine, que é um exemplo para mim de dedicação, inteligência e força.

Agradeço ao meu pai, José, que sempre me apoiou de todas as formas possíveis e pelo vosso exemplo me ensinou muitas coisas.

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

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

Ao meu amigo Wenderson, por compartilhar comigo mais esta etapa. E por sempre me apoiar e me aconselhar quando precisei. Não posso deixar de agradecer pelos momentos de aprendizado.

Ao Hamilton, por toda ajuda dispensada e ao Cláudio, pelo tempo que passou sanando dúvidas.

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

Aos meus amigos de laboratório Pedro Oliveira, Fábio Isaac, Martin Auléstia, Carine Gonçalves, Barbara Guedes, Leonardo Simões, Fábio Dotto e Rogério Tomazella. Além deles, é necessário agradecer aos amigos de outros laboratórios de pesquisa da UNESP – Bauru, Marco Aurélio, Wallace Gabriel, Danilo Budoya, Leandro Campeiro, Guilherme Clerice, Nelson, Bruno Albuquerque, vocês foram simplesmente fantásticos.

Ao meu amigo de mestrado, Danilo Ribeiro, por todo apoio e por participar de várias etapas de ensaios. Sua ajuda foi fundamental.

Ao meu amigo Alexandre Costa pelo companheirismo e preciosos conselhos.

Agradeço a todos que de alguma forma contribuíram e apoiaram essa etapa.

“Já que não nos é dado viver por longo tempo,  
 façamos algo que fique a atestar termos vivido.”

- Memorial da Epopeia do Descobrimento (Porto  
 Seguro, BA)

## RESUMO

Os processos de usinagem são de extrema importância para a fabricação de peças mecânicas, muitas das quais exigem alta precisão dimensional e geométrica. A retificação, dentro dos processos de usinagem, é um processo de acabamento amplamente utilizado na indústria sendo uma das últimas fases na cadeia de usinagem. Devido à sua posição na cadeia de usinagem, é essencial que o processo de retificação seja controlado, visando a detecção e até mesmo a prevenção de falhas, pois a peça neste estágio possui alto valor agregado. O fenômeno de queima é uma das piores falhas que pode ocorrer na retificação de aços. Desta forma, um sistema de monitoramento capaz de identificar a ocorrência deste fenômeno, além de detectar o momento do início do mesmo, é de grande importância. Nesse contexto, esse trabalho propõe um método para detecção do fenômeno de queima e o momento de sua ocorrência no processo de retificação de aços ABNT 1045 e VC131 com rebolo de óxido de alumínio. Para tal, um acelerômetro foi fixado no suporte das peças e um sensor de potência foi instalado no sistema. Ambos sinais foram amostrados por um osciloscópio a uma taxa de 2 MHz. Técnicas de processamento digital de sinais, tais como a transformada rápida de Fourier (*Fast Fourier Transform* - FFT), transformada de Fourier de tempo-curto (*Short Time Fourier Transform* -STFT), densidade espectral de potência – (*Power Density Spectral* - PSD) e índices de danos (RMSD e CCDM) foram aplicadas. Para melhor fundamentar o estudo, testes de dureza, inspeção visual e metalografia foram executados. Os resultados mostram que o método é confiável no que tange a identificação do fenômeno de queima, ou seja, se houve ou não queima na superfície da peça. Em relação a identificação do momento que se inicia a queima na superfície da peça, o método apresenta melhores resultados para o aço ABNT 1045. Assim, estudos complementares devem ser efetuados em trabalhos futuros para que o método possa ser estendido para outros materiais com maior acurácia.

**Palavras chave:** retificação, monitoramento, danos térmicos, vibração, dureza vickers, metalografia

## ABSTRACT

The machining processes are of extreme importance for the manufacture of mechanical parts, many of which require high dimensional and geometric precision. Grinding, within the machining processes, is a finishing process widely used in the industry and it is generally the last stage of manufacture chain. Thus, it is essential to control the grinding process, aiming at the detection and even the prevention of failures, since the part in this stage has high added value. The grinding burn is one of the worst failures that can occur in the grinding of steels. In this way, a monitoring system capable of identifying the occurrence of the workpiece burn in addition to detect the onset moment is of great importance. This work proposes a method to detect the workpiece burn and the moment at which it has occurred in grinding of steels SAE 1045 and VC131 with aluminum oxide grinding wheel. An accelerometer was attached to the parts holder and a power sensor was installed in the system. Both signals were acquired by an oscilloscope at a rate of 2 MHz. Digital signal processing techniques such as Fast Fourier Transform (FFT), Short Time Fourier Transform (STFT), Power Density Spectral (PSD) and damage indices (RMSD – root mean square deviation and CCDM – correlation coefficient deviation metric) were applied. To better support the study, hardness tests, visual inspection and metallography were performed. The results show that the method is reliable to identify the burning phenomenon, that is, whether there was grinding burn on the workpiece surface. Regarding the identification of the grinding burn onset, the method presented better results for the ABNT 1045 steel. Thus, complementary studies should be carried out in future works so that the method can be extended to other materials with greater accuracy.

**Keywords:** Grinding, monitoring, thermal damage, vibration, vickers hardness, metallography

## SUMÁRIO

<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	<b>vii</b>
<b>RESUMO</b> .....	<b>ix</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>x</b>
<b>SUMÁRIO</b> .....	<b>xi</b>
<b>LISTA DE ILUSTRAÇÕES</b> .....	<b>xiii</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	<b>xv</b>
<b>LISTA DE ABREVIACÕES E SÍMBOLOS</b> .....	<b>xvi</b>
<b>Capítulo 1 - INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
1.1 MOTIVAÇÃO E JUSTIFICATIVA .....	1
1.2 OBJETIVO .....	3
1.3 PUBLICAÇÕES OBTIDAS .....	3
<b>Capítulo 2 - REVISÃO DA LITERATURA</b> .....	<b>6</b>
2.1 PROCESSO DE RETIFICAÇÃO .....	6
2.1.1 <i>Rebolo</i> .....	8
2.1.2 <i>Profundidade de corte (a)</i> .....	10
2.1.3 <i>Velocidade de corte (<math>v_s</math>)</i> .....	10
2.1.4 <i>Velocidade da peça (<math>v_w</math>)</i> .....	11
2.1.5 <i>Forças na retificação</i> .....	12
2.1.6 <i>Espessura equivalente de corte (<math>h_{eq}</math>)</i> .....	13
2.1.7 <i>Dressagem</i> .....	14
2.1.8 <i>Ocorrência do fenômeno de queima na retificação</i> .....	15
2.1.9 <i>Dureza Vickers</i> .....	18
2.2 MONITORAMENTO DA VIBRAÇÃO E POTÊNCIA NO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO .....	20
2.2.1 <i>Vibração no processo de retificação</i> .....	20
2.2.2 <i>Monitoramento da vibração</i> .....	22
2.2.3 <i>Acelerômetro Piezelétrico</i> .....	22
2.2.4 <i>Monitoramento da potência</i> .....	24
2.2.5 <i>Sensor de corrente</i> .....	25
2.3 MONITORAMENTO E PROCESSAMENTO DE SINAIS NA MANUFATURA .....	27
2.3.1 <i>Monitoramento dos processos de usinagem</i> .....	27
2.3.2 <i>Monitoramento do processo de retificação</i> .....	29
2.3.3 <i>Processamento de sinais no monitoramento do processo de retificação</i> .....	31

2.3.3.1	Transformada Discreta de Fourier (DFT) e Transformada Rápida de Fourier (FFT) .....	32
2.3.3.2	Densidade Espectral de Potência (PSD) .....	33
2.3.3.3	Transformada de Fourier de Tempo-Curto (STFT) .....	34
2.3.3.4	Índices de danos estruturais .....	35
2.4	MONITORAMENTO DE DANOS TÉRMICOS NA RETIFICAÇÃO .....	36
<b>Capítulo 3 -MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>		<b>43</b>
3.1	PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS E BANCO DE ENSAIOS.....	43
3.2	AVALIAÇÃO SUPERFICIAL DAS PEÇAS ABNT 1045.....	47
3.3	PROCESSAMENTO DIGITAL DE SINAIS .....	48
3.4	VERIFICAÇÃO DO MÉTODO PROPOSTO.....	51
<b>Capítulo 4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>		<b>53</b>
4.1	RESULTADOS DOS ENSAIOS PARA O AÇO ABNT 1045 E REBOLO DE ÓXIDO DE ALUMÍNIO. ....	53
4.1.1	<i>Inspeção visual da superfície da peça .....</i>	53
4.1.2	<i>Metalografia e medição de dureza Vickers .....</i>	55
4.1.3	<i>Seleção de bandas de frequência .....</i>	57
4.1.4	<i>Aplicação da STFT nas condições de retificação estudadas .....</i>	61
4.1.5	<i>Análise da potência RMS das passadas de retificação .....</i>	64
4.1.6	<i>Índices RMSD e Análise conjunta.....</i>	66
4.2	RESULTADOS DOS ENSAIOS PARA O AÇO VC131 E REBOLO ÓXIDO DE ALUMÍNIO .....	68
4.2.1	<i>Inspeção visual da superfície da peça .....</i>	68
4.2.2	<i>Metalografia e medição de dureza vickers.....</i>	69
4.2.3	<i>Seleção de bandas de frequência e processamento do sinal.....</i>	71
4.2.1	<i>Aplicação da STFT nas condições de retificação estudadas .....</i>	75
4.2.2	<i>Análise da potência das passadas de retificação .....</i>	77
4.2.3	<i>Índices RMSD e Análise conjunta.....</i>	80
<b>Capítulo 5 –CONCLUSÕES.....</b>		<b>84</b>
5.1	SUGESTÃO PARA OS PRÓXIMOS TRABALHOS.....	85
<b>Referências .....</b>		<b>86</b>
<b>APÊNDICE I.....</b>		<b>98</b>
<b>APÊNDICE II.....</b>		<b>99</b>
<b>APÊNDICE III.....</b>		<b>100</b>

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 - Elementos da retificação plana (adaptado) (BLACK; KOHSER, 2008).....	7
Figura 2.2- Ampliação do cavaco no processo de retificação (adaptado) (BLACK; KOHSER, 2008).....	9
Figura 2.3- Forças de corte para a retificação tangencial plana (FERREIRA, 2016) .....	13
Figura 2.4- Processo de dressagem com dressador de ponta única .....	15
Figura 2.5- Dano de Reendurecimento – Camada Branca (100x – AISI 52100) (ROWE, 2009) .....	17
Figura 2.6- Indentador Vickers (BLACK; KOHSER, 2008) .....	18
Figura 2.7- Efeito da vibração na retificação (adaptado) (MAGGIONI et al., 2014) .....	21
Figura 2.8- Esquemático acelerômetro piezelétrico (adaptado) (FRADEN, 2010) .....	23
Figura 2.9- Sistema acelerômetro piezelétrico modo carga (WILSON, 2005) .....	23
Figura 2.10- Circuito Equivalente de um TC (adaptado) (ZIEGLER et al., 2009).....	26
Figura 2.11-Tansformador de Corrente de Núcleo dividido. ....	27
Figura 2.12- Sinal contaminado com ruído branco (a) e a respectiva FFT (b).....	33
Figura 3.1- Diagrama esquemático dos procedimentos experimentais. ....	43
Figura 3.2- Representação esquemática dos ensaios e coleta dos sinais. ....	44
Figura 3.3- Acelerômetro modelo 353B03 e o respectivo esquemático.....	45
Figura 3.4- Banco de ensaios para testes experimentais. ....	45
Figura 3.5- Modelo das medições de dureza realizadas na superfície das amostras. ....	48
Figura 3.6- Esquema do processamento de sinais. ....	51
Figura 4.1- Condição superficial das peças usinadas em diferentes profundidades de corte...	54
Figura 4.2- Metalografia para boa condição (a) e queima (b), peças 2 e 8, respectivamente. .	55
Figura 4.3- Dureza vickers para todas as condições de retificação (a) dureza vickers para peças 2 e 8 (b).....	56
Figura 4.4- Espectro do sinal (a) FFT e PSD (b).....	57
Figura 4.5- (a) Sinal do processo de retificação (ruído e passada) do Ensaio 5; (b) PSD do ruído e da passada .....	59
Figura 4.6- (a) FFT ruído do sinal; (b) PSD do ruído do sinal .....	60
Figura 4.7- FFT do sinal durante a passada de retificação em três profundidades de corte: 10 $\mu\text{m}$ , 20 $\mu\text{m}$ e 55 $\mu\text{m}$ .....	61
Figura 4.8 – STFT para todos os testes de retificação.....	63
Figura 4.9- Potência RMS para todas as passadas de retificação .....	65

Figura 4.10- Média da potência RMS das passadas de retificação .....	65
Figura 4.11- RMSD obtido do sinal de vibração na banda 2.3-3.2 kHz. ....	66
Figura 4.12- Análise Conjunta entre Inspeção visual, Dureza Vickers, STFT e Energia. Testes 2, 7 e 8. ....	68
Figura 4.13 - Condição superficial das peças usinadas em diferentes profundidades de corte. ....	69
Figura 4.14- Condições da superfície (a) sem queima – 05 $\mu\text{m}$ (b) queima – 30 $\mu\text{m}$ respectivamente. ....	70
Figura 4.15- Dureza vickers para todas as condições de retificação (a) dureza vickers para peças 1 e 5 (b). ....	71
Figura 4.16- Espectro do sinal (a) FFT e PSD (b). ....	72
Figura 4.17- (a) Ruído e sinal de vibração correspondente a passada de 20 $\mu\text{m}$ ; (b) PSD do ruído e da passada de 20 $\mu\text{m}$ .....	73
Figura 4.18- (a) FFT ruído do sinal; (b) PSD do ruído do sinal .....	74
Figura 4.19- FFT do sinal em três profundidades de corte: 5 $\mu\text{m}$ , 15 $\mu\text{m}$ e 30 $\mu\text{m}$ . ....	75
Figura 4.20- STFT para todos os sinais de retificação. ....	76
Figura 4.21- Potência RMS para todas as passadas de retificação .....	78
Figura 4.22- Média da potência RMS das passadas de retificação. ....	79
Figura 4.23- Média da potência RMS das passadas de retificação para o aço ABNT1045 e VC131. ....	80
Figura 4.24- RMSD obtido do sinal de vibração na banda 3,7 – 4,5 kHz. ....	81
Figura 4.25- Comparação entre dureza Vickers e RMSD do Ensaio 4 – heq = 0,0855 $\mu\text{m}$ . ....	82
Figura 4.26- Análise Conjunta entre Inspeção visual, Dureza Vickers, STFT e RMSD. Ensaios 2, 5 e 6. ....	83
Figura 6.1- STFT para todos os sinais sem filtro. ....	98
Figura 6.2- STFT para todos os sinais sem filtro. ....	99
Figura 6.3- CCDM para aço 1045 na banda de 2.3 kHz a 3.1 kHz .....	100
Figura 6.4- CCDM para aço VC131 na banda de 4.5 kHz a 8 kHz .....	101

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 1: Condições dos ensaios para o aço ABNT 1045 e rebolo óxido de alumínio 47

Tabela 2: Condições dos ensaios para o aço VC131 e rebolo de óxido de alumínio ...52

## LISTA DE ABREVIACÕES E SÍMBOLOS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CBN	Nitreto Cúbico de Boro ( <i>Cubic Boron Nitride</i> )
CCDM	Métrica do desvio do coeficiente de correlação ( <i>Correlation coefficient deviation metric</i> )
DFT	Transformada Discreta de Fourier ( <i>Discret Fourier Transform</i> )
STFT	Transformada de Fourier de Tempo - Curto ( <i>Short Time Fourier Transform</i> )
EA	Sensor de emissão acústica ( <i>Acoustic Emission</i> )
FFT	Transformada Rápida de Fourier ( <i>Fast Fourier Transform</i> )
PSD	Densidade Espectral de Potência ( <i>Power Spectral Density</i> )
PZT	Diafragma piezelétrico ( <i>lead zirconate titanate</i> )
RMS	Valor médio quadrático ( <i>Root Mean Square</i> )
RMSD	Desvio da raiz média quadrática ( <i>Root mean square deviation</i> ).
HV	Dureza Vickers
RNA	Redes Neurais Artificiais
XRD	Difração de Raio-X ( <i>X-ray diffraction</i> )
XPS	Espectroscopia de fotoelétrons excitados por Raio-X ( <i>X-ray photoelectron spectroscopy</i> ).
SAE	Sociedade dos Engenheiros Automotivos ( <i>Society of Automotive Engineers – EUA</i> )
$a$	Profundidade de corte [ $\mu\text{m}$ ]
$h_{eq}$	Espessura equivalente de corte [ $\mu\text{m}$ ]
$R_a$	Rugosidade média aritmética [ $\mu\text{m}$ ]
$R_q$	Rugosidade média quadrática [ $\mu\text{m}$ ]
$R_t$	Rugosidade máxima de pico ou vale [ $\mu\text{m}$ ]
$a_c$	Aceleração ( $\text{m/s}^2$ )
$v_{fn}$	Velocidade normal ( $\text{m/s}$ )
$v_{fa}$	Velocidade axial ( $\text{m/s}$ )
$v_s$	Velocidade do rebolo ( $\text{m/s}$ )
$v_w$	Velocidade da peça ( $\text{m/s}$ )
$F_t$	Força tangencial (N)
$F_n$	Força normal (N)

$F_a$	Força axial (N)
$b_d$	Largura de atuação do dressador (mm)
$S_d$	Passo de dressagem (mm).
$U_d$	Grau de recobrimento



## CAPITULO 1 - INTRODUÇÃO

---

### 1.1 MOTIVAÇÃO E JUSTIFICATIVA

Os sistemas de manufatura são considerados arranjos complexos de elementos físicos caracterizados por parâmetros mensuráveis que utilizam insumos para fabricar produtos para clientes externos. Os processos de manufatura convertem materiais inacabados em produtos finalizados, frequentemente utilizando máquinas ou máquinas-ferramentas. (BLACK; KOHSER, 2008).

A retificação é um processo de manufatura situado na parte final da cadeia de usinagem (LOPES et al., 2017), consistindo em uma operação de remoção de material da superfície da peça usinada, por meio da utilização de uma ferramenta de corte denominada rebolo (ALEXANDRE et al., 2018). O processo de retificação é muito utilizado na fabricação de peças dos mais diversos tipos de materiais exigindo resultados como baixa rugosidade, controle dos erros dimensionais e forma da peça, máxima vida útil da ferramenta e custos mínimos (RIBEIRO et al., 2015).

O principal objetivo desse processo é obter peças com acabamento superficial de alta qualidade. Alguns aspectos de qualidade geralmente identificados são: desempenho, durabilidade, confiabilidade, robustez, disponibilidade, custo, serventia, bem como, estética (KALPAKJIAN; SCHMID, 2014).

Os danos causados nas peças durante o processo de retificação acarretam alto custo e prejuízo a manufatura devido ao valor agregado que as peças possuem. Os danos mais comuns no processo de retificação são a queima, trincas e tensões residuais (RIBEIRO et al., 2015). A principal causa de danos nos metais é o aumento da temperatura de forma acentuada gerada pelo contato entre os grãos abrasivos do rebolo e a superfície da peça, provocando a queima da superfície (MARCHI et al., 2015). A queima é um evento indesejado, devido a induzir, na maioria das vezes, à fragilidade na peça de trabalho. As peças com essa característica são descartadas sem reaproveitamento.

Uma maneira de garantir a qualidade, obter os resultados esperados e evitar danos no processo de manufatura é o monitoramento do processo utilizando métodos diretos e indiretos. Os métodos indiretos têm como característica a utilização de sensores (Emissão Acústica, Vibração, Força) para deduzir o valor real (rugosidade, danos térmicos, trincas, tensões residuais) por meio de correlações empiricamente determinadas (LAURO et al., 2014).

Uma característica essencial de qualquer sistema de monitoramento é que os sensores podem detectar se o processo está ocorrendo normalmente ou se possui alguma anomalia. O

sistema de sensores deve ser capaz de detectar quaisquer falhas no processo com alto grau de confiabilidade para que a produção de peças danificadas seja minimizada. (MARINESCU et al., 2006). Os danos decorrentes do processo de retificação (trinca, alta rugosidade, queima, tensões residuais) podem ser detectadas por meio de sensores aplicados no monitoramento do processo, sendo que, alguns são mais adequados do que outros, no que tange a sensibilidade, características do material e o grau de intrusão no processo. Os sensores mais utilizados para o monitoramento do processo de retificação são os sensores de Emissão Acústica (EA), acelerômetro (vibração), dinamômetro (força) e potência.

A remoção do material da superfície da peça durante processo de retificação provoca inúmeros eventos e variáveis relacionadas ao processo, dentre eles, a vibração. O sinal de vibração advindo do processo pode ser estudado utilizando técnicas de processamento digital de sinais como a estimação espectral, permitindo a correlação entre as condições do processo e os eventos ocorridos na peça. (TETI et al., 2010).

O processo de retificação, dentre os processos de manufatura, pode ser considerado como um dos mais importantes na indústria moderna. Os componentes mecânicos que necessitam de ótimo acabamento e qualidade elevada têm em uma ou mais regiões superficiais locais onde a retificação foi aplicada (DIAS et al., 2016). Assim, considerando a importância que o processo de retificação possui perante a indústria de manufatura e a crescente necessidade de aumento de produtividade aliado ao baixo custo, faz-se necessária a automação do mesmo visando o aumento na competitividade entre as empresas dentro do contexto de globalização.

O presente trabalho diferencia-se dos demais constantes na literatura devido ao monitoramento da ocorrência da queima na superfície da peça, com foco na localização do início desse fenômeno, ou seja, em que instante a queima ocorreu na superfície da peça durante o processo de retificação. Não obstante, o monitoramento é feito através de um acelerômetro e um sensor de potência, apontando o custo mais baixo em relação ao sistema de monitoramento por sinal de emissão acústica (EA). A importância deste trabalho reside na possibilidade de a indústria de manufatura controlar o processo e evitar a ocorrência do dano de queima. A partir da detecção do momento em que a queima ocorre, o processo pode ser interrompido evitando maiores danos e conseqüentemente o descarte da peça. Outrossim, a preocupação com o meio ambiente e o descarte consciente estão presentes neste contexto.

## 1.2 OBJETIVO

O objetivo principal deste trabalho foi propor e avaliar um método para a detecção do início do fenômeno de queima e a condição superficial de peças de aço na retificação, por meio do uso de acelerômetro e sensor de potência. Duas configurações de banco de ensaios foram propostas, a primeira utiliza aço ABNT 1045 como matéria prima e a segunda utiliza aço VC131. O processamento digital dos sinais utilizou ferramentas de análise no domínio da frequência, como a Transformada Rápida de Fourier (*Fast Fourier Transform* – FFT), a Densidade Espectral de Potência (*Power Spectral Density* – PSD) e a Transformada de Fourier de Tempo Curto (*Short Time Fourier Transform* – STFT), além de outras técnicas, no intuito de inferir uma correlação entre as condições das peças e os sinais coletados, e, por conseguinte estabelecer o início do fenômeno de queima.

## 1.3 PUBLICAÇÕES OBTIDAS

A seguir são apresentados os trabalhos desenvolvidos no Laboratório de Análise e Processamento de Sinais (LADAPS) da UNESP – Bauru, em que houve participação do autor dessa dissertação durante seu período de Mestrado.

- ❖ **ALEXANDRE, FELIPE APARECIDO**; LOPES, WENDERSON NASCIMENTO ; LOFRANO DOTTO, FÁBIO R. ; FERREIRA, FÁBIO ISAAC ; AGUIAR, PAULO ROBERTO ; BIANCHI, EDUARDO CARLOS ; LOPES, JOSÉ CLÁUDIO . Tool condition monitoring of aluminum oxide grinding wheel using AE and fuzzy model. INTERNATIONAL JOURNAL OF ADVANCED MANUFACTURING TECHNOLOGY, v. 1, p. 1-13, 2018.
- ❖ NASCIMENTO LOPES, WENDERSON; ISAAC FERREIRA, FABIO; **ALEXANDRE, FELIPE**; SANTOS RIBEIRO, DANILO; CONCEIÇÃO JUNIOR, PEDRO; DE AGUIAR, PAULO; BIANCHI, EDUARDO Digital Signal Processing of Acoustic Emission Signals Using Power Spectral Density and Counts Statistic Applied to Single-Point Dressing Operation. IET Science, Measurement & Technology, v. 11, p. 631-636, 2017.

- ❖ **ALEXANDRE, F. A.; CONCEIÇÃO, P. O.; AULESTIA, M.; AGUIAR, P. R.; BIANCHI, E. C.; CASTRO, B.; RODRIGUES, B. P.** Monitoramento da retificação de cerâmicas avançadas por meio de diafragmas piezelétricos de baixo custo. In: IX Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação COBEF, 2017, Joinville. IX Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação – COBEF.
- ❖ **CASTRO, B.; BAPTISTA, F.; ANDREOLI, A. L.; BRUNINI, D.; ULSON, J. A.; ALEXANDRE, F. A.** Avaliação do desempenho de sensores de emissão acústica para diagnóstico antecipativo de falhas em transformadores por meio de técnicas de processamento computacional de sinais. In: IX Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação COBEF, 2017, Joinville. IX Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação – COBEF.
- ❖ **ALEXANDRE, FELIPE; LOPES, WENDERSON; FERREIRA, FÁBIO; DOTTO, FÁBIO; AGUIAR, PAULO; BIANCHI, EDUARDO.** Chatter vibration monitoring in the surface grinding process through digital signal processing of acceleration signal. In: 4th International Electronic Conference on Sensors and Applications, 2017, Scifo-  
rum.net. Proceedings of 4th International Electronic Conference on Sensors and Applications. Basel: MDPI, 2017. p. 4927.
- ❖ **ALEXANDRE, F. A.; VIEIRA, M. A. A.; CONCEIÇÃO JUNIOR, PEDRO; SIMÕES, L.; LOPES, W. N.; AGUIAR, P. R.; Bianchi, E. C.; SILVA, R. B.** Análise de sinais de emissão acústica e estatística counts na detecção da alteração microestrutural na retificação de aço 1045. In: Sixth Engineering, Science and Technology Conference Tendencies and Challenges in Engineering (ESTEC 2017), 2017, Panamá. Sixth Engineering, Science and Technology Conference Tendencies and Challenges in Engineering, Science and Technology (ESTEC 2017), 2017. v. 1. p. 414-423.
- ❖ **CONCEIÇÃO JUNIOR, PEDRO; RUZZI, R. S.; LOPES, W. N.; ALEXANDRE, F. A.; BAPTISTA, F. G.; AGUIAR, P. R.; Bianchi, E. C.** A New Approach For Dressing Operation Monitoring Using Voltage Signals Via Impedance-Based Structural Health Monitoring. In: Sixth Engineering, Science and Technology Conference Tendencies and Challenges IN n Engineering, Science and Technology (ESTEC 2017) in Engineering, 2017, Panamá. Sixth Engineering, Science and Technology Conference Tendencies and

Challenges in Engineering, Science and Technology (ESTEC 2017), 2017. v. 1. p. 942-952.

- ❖ **ALEXANDRE, F. A.**; TAVORA, C. G.; AGUIAR, P. R.; BIANCHI, E. C.; SILVA, R. B. Monitoramento da condição da peça no processo de retificação por cápsula piezométrica. In: XXI Colóquio de Usinagem, 2017, Ouro Preto - MG. XXI Colóquio de Usinagem, 2017.
- ❖ **ALEXANDRE, FELIPE**; LOPES, W. N.; CONCEIÇÃO JUNIOR, PEDRO; AGUIAR, P. R.; BIANCHI, EDUARDO CARLOS; SILVA, R. B. Análise tempo-frequência dos sinais de emissão acústica na operação de dressagem de rebolo convencional usando dressador de ponta única. In: XXI Colóquio de Usinagem, 2017, Ouro Preto - MG. XXI Colóquio de Usinagem, 2017.
- ❖ **ALEXANDRE, FELIPE**; VIEIRA, M. A. A.; CONCEIÇÃO JUNIOR, PEDRO; AGUIAR, P. R.; BIANCHI, EDUARDO CARLOS; SILVA, R. B. Monitoramento da retificação de cerâmicas avançadas por meio do transdutor piezométrico de baixo custo. In: XXI Colóquio de Usinagem, 2017, Ouro Preto - MG. XXI Colóquio de Usinagem, 2017.
- ❖ **ALEXANDRE, F. A.**; SOUZA, R. V. C. G.; CONCEIÇÃO, P. O.; RUZZI, R. S.; RIBEIRO, D. M. S.; AGUIAR, P. R.; BIANCHI, E. C.; Estudo da resposta em frequência de sinais provenientes de cápsulas piezométricas para o monitoramento do desgaste do dressador. In: IX Congresso Nacional de Engenharia Mecânica - CONEM, 2016, Fortaleza. IX Congresso Nacional de Engenharia Mecânica - CONEM, 2016.

## CAPITULO 2 - REVISÃO DA LITERATURA

---

Este capítulo apresenta a revisão da literatura sobre temas pertinentes ao trabalho. O processo de retificação, bem como, seus principais parâmetros são apresentados. O processamento de sinais e sua importância na indústria de manufatura é discutido em conjunto com as técnicas de processamento digital de sinais. Em adição, os tópicos relativos aos sinais de vibração e seu monitoramento são comentados. Por fim, trabalhos de pesquisa com o foco na ocorrência de queima são apresentados.

### 2.1 PROCESSO DE RETIFICAÇÃO

A retificação é um nome comumente conhecido para processos de manufatura que utilizam partículas abrasivas como ferramenta de corte (MALKIN, S.; GUO, 2008). Localiza-se na maioria das vezes no final da cadeia de usinagem, como último estágio no processo de manufatura para um acabamento de alta qualidade (BATAKO; GOH, 2014). É um processo influenciado por diversos fatores, tais como a peça, a máquina de retificação, o rebolo e os parâmetros do processo (MARCHI et al., 2015).

A retificação é amplamente utilizada para atingir com eficiência uma boa integridade superficial com grande acurácia nas indústrias de manufatura. As aplicações da retificação podem ser encontradas na maioria dos setores industriais, tais como, o automotivo, aeroespacial, marinha, o setor nuclear, dispositivos médicos, óticos, eletrônicos e setores de semicondutores (TIAN et al., 2017).

O processo de retificação quando comparado com outros processos de corte, como o torneamento e o fresamento, possui características únicas muito diferentes em relação a ferramenta de corte e ao processo de remoção de material (KWAK; HA, 2004a). A ferramenta de corte da retificação diferente das ferramentas de corte das operações de torneamento e fresamento possui arestas de corte irregulares. Em relação a energia específica dispensada durante o processo, a retificação possui cerca de uma ordem de magnitude maior do que as operações de torneamento e fresamento (REN; ZHANG; ZHOU, 2009).

A eficiência do processo de retificação depende fortemente da qualidade das ferramentas utilizadas durante o processo, ou seja, os rebolos (KUNDRÁK et al., 2016). A topografia do rebolo é inerentemente de natureza estocástica no que se refere a distribuição, protrusão e orientação dos grãos abrasivos, devido à natureza da fabricação (mistura de abrasivos com a

matriz conglomerante, prensagem e sinterização) (LI; AXINTE, 2016). Tal topografia é constituída de grãos distribuídos de forma aleatória e tem motivado inúmeros estudos focados em modelos empíricos da força na retificação (LI et al., 2017). Um fator preponderante para manter a eficiência do processo e sua qualidade além da topografia do rebolo e a condição de afiação das arestas de corte é a experiência do operador em relação ao processo de retificação (PATNAIK DURGUMAHANTI; SINGH; VENKATESWARA RAO, 2010).

A operação de retificação envolve seis elementos distintos: a máquina de retificação, o rebolo, a peça, o fluido de refrigeração ou fluido de corte, a atmosfera e os cavacos (MARINESCU et al., 2006). O processo de retificação e seus elementos é ilustrado na Figura 2.1.

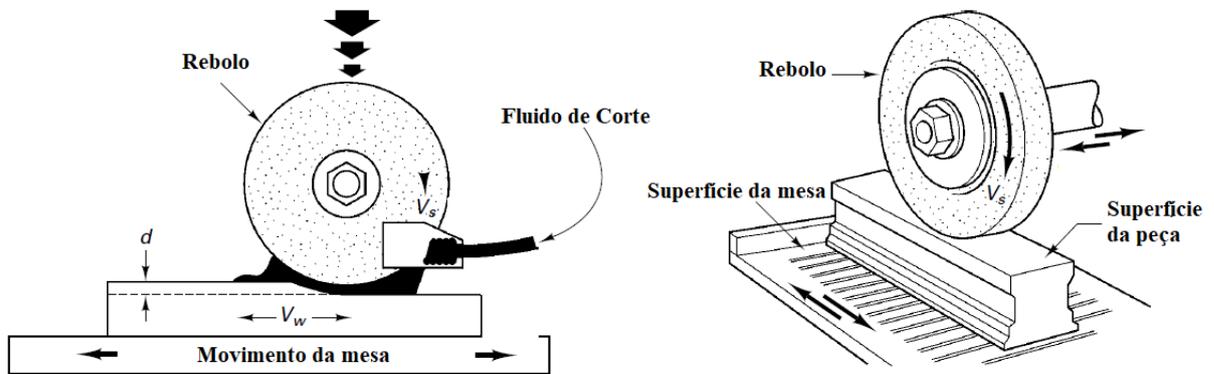


Figura 2.1 - Elementos da retificação plana (adaptado) (BLACK; KOHSER, 2008).

Os cavacos são uma mistura de pequenas partículas de metal, fluídos da remoção do metal, lubrificantes e resíduos dos meios da retificação (CHANG et al., 2006). A principal tarefa do fluido de corte é refrigerar e lubrificar a zona de contato entre a o rebolo e a peça e assim diminuir o desgaste da ferramenta de corte como também alcançar uma boa qualidade superficial (MADANCHI; WINTER; HERRMANN, 2015). A composição do fluido de corte tem uma influência significativa na saída do processo, no consumo de energia e também na poluição ambiental (MANOJKUMAR; GHOSH, 2016). A atmosfera é a interação dos gases ambiente com os elementos de retificação e os resíduos provenientes da operação de retificação.

Existem vários tipos de operações de retificação que variam de acordo com a forma do rebolo, dos movimentos cinemáticos da peça e o cabeçote. Alguns dos tipos mais comuns de retificação são a plana e a cilíndrica (MALKIN, S.; GUO, 2008). A relação entre os parâmetros de entrada e saída nos processos de fabricação tem sido exaustivamente estudado, visando entender a necessidade dos consumidores por produtos com menores custos e melhor qualidade (PEREIRA; DINIZ; HASSUI, 2009).

A redução de custos de produção e o aumento na qualidade das peças usinadas torna a detecção automática dos defeitos do processo de grande interesse entre os cientistas e a indústria de manufatura. O monitoramento do processo de usinagem utilizando sensores representa o primeiro passo para a redução de superfícies de baixa qualidade nas peças e também dos custos acarretados pela produção incorreta (AXINTE et al., 2004).

### 2.1.1 Rebolo

Os rebolos são constituídos de muitos tipos de grãos de diversos tamanhos, em conjunto com ligantes e composições diversas. Além disso, os rebolos são classificados em duas categorias: rebolos convencionais e superabrasivos. Os rebolos convencionais são os que utilizam como abrasivo óxido de alumínio ou carbetto de silício e ligantes vitrificados ou resinóides. Os rebolos superabrasivos possuem o nitreto cúbico de boro (CBN) como abrasivo e são produzidos com ligante vitrificado, resinóide metálico (MALKIN, S.; GUO, 2008).

As especificações do rebolo seguem os seguintes parâmetros: o tipo de abrasivo, o tamanho do grão abrasivo, a dureza do rebolo, a estrutura do rebolo e o tipo de ligante (MALKIN, S.; GUO, 2008). Os rebolos superabrasivos tipicamente são de 10 a 100 vezes mais caros do que os rebolos de óxido de alumínio (MARINESCU et al., 2006). No entanto, a vida útil do rebolo superabrasivo é maior quando comparada ao rebolo convencional.

Os grãos abrasivos são elementos de grande importância para o processo de retificação. O rebolo é constituído de grãos abrasivos, ligantes e poros (CAI; ROWE, 2004). Os grãos abrasivos têm como característica a refratabilidade, a dureza e a fragilidade podendo ser classificados de acordo com sua dureza ou composição química (ANJOS et al., 2016). Além de possuírem a função de remover material no processo de retificação os abrasivos influenciam de forma direta no resultado final do processo.

O ligante utilizado nos rebolos tem diversas funções, dentre elas, reter os grãos abrasivos durante o processo de retificação, resistir a forças centrífugas, especialmente em altas velocidades, exposição dos grãos abrasivos e resistência ao desgaste (WEBSTER; TRICARD, 2004). Os quatro tipos de ligantes mais comumente utilizados atualmente em rebolos superabrasivos são: resinóide, vitrificado, metálico e tipos galvanizados (BIANCHI et al., 2003).

A porosidade do rebolo pode ser descrita como um efeito local dentro da estrutura do rebolo, permitindo o transporte de fluido do processo e dando espaço para os cavacos se formarem (MALKIN, S. E GUO, C. *apud* C.WEBSTER; TRICARD, 2004). Os poros no rebolo permitem a formação de cavaco, além de acomodá-los, bem como, auxiliam na troca de calor.

Deve-se ressaltar que o acúmulo demasiado de cavaco nos poros do rebolo leva o mesmo ao estado de empastamento.

O empastamento do rebolo é uma condição que deve ser evitada, pois o mesmo, causa o aumento de forças na retificação, a perda do potencial de corte, aceleração do desgaste do rebolo além de provocar a rugosidade na superfície das peças (OLIVEIRA et al., 2012). O fenômeno de empastamento ocorre devido a remoção de forma incompleta dos cavacos através do fluido de corte (CAMERON; BAUER; WARKENTIN, 2010) causando o aumento de calor na zona de contato entre o rebolo e a peça. O aumento de calor durante o processo intensifica a aderência dos cavacos aos poros do rebolo agravando ainda mais o empastamento e consequentemente a diminuição da afiação do rebolo (DI ILIO; PAOLETTI, 2000). Além das consequências anteriormente explicadas, o aumento de temperatura causado pelo empastamento do rebolo pode acarretar na queima da superfície da peça. O empastamento do rebolo pode ser reduzido otimizando os parâmetros do processo, o fornecimento do fluido refrigerante, o projeto e a condição da ferramenta (HEINZEL; ANTSUPOV, 2012). A visão ampliada da ocorrência de cavacos na superfície do rebolo é exibida na Figura 2.2.

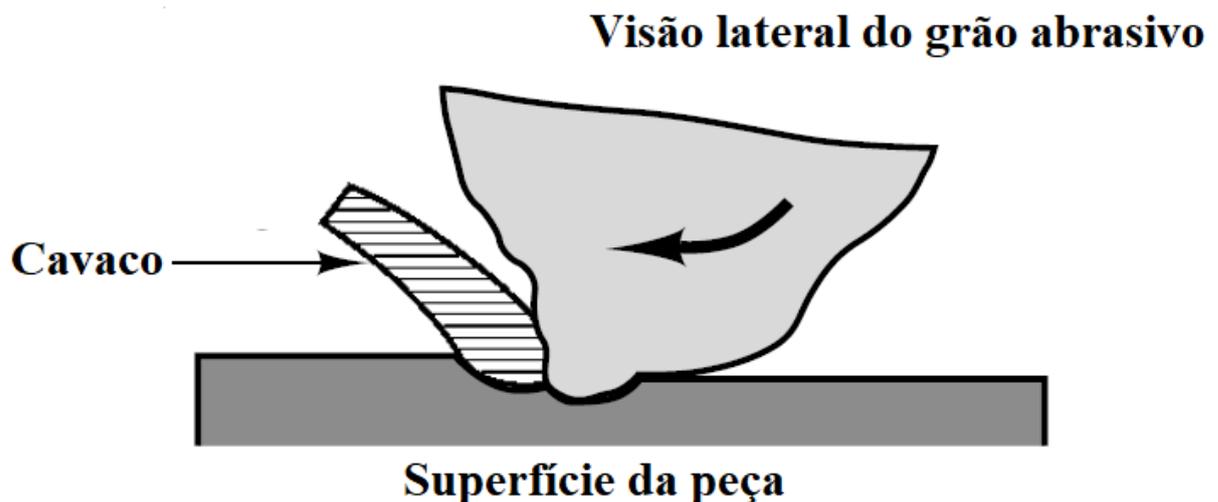


Figura 2.2- Ampliação do cavaco no processo de retificação (adaptado) (BLACK; KOHSER, 2008)

Os rebolos não são verdadeiramente concêntricos em sua forma, o grau de excentricidade influi de forma direta no desempenho da operação de retificação e consequentemente na superfície da peça (BADGER; MURPHY; O'DONNELL, 2011). A topografia do rebolo também é fator determinante para a execução de qualidade da operação de retificação.

Os rebolos de óxido de alumínio dissipam durante o processo de retificação uma quantidade menor de calor quando comparados aos rebolos de CBN. O rebolo de nitreto cúbico de boro possui uma grande condutibilidade térmica, cerca de 20 % do calor gerado devido ao atrito entre os grãos abrasivos e a superfície da peça permanece na zona de contato. Em contrapartida, o rebolo de óxido de alumínio dissipa uma quantidade menor, cerca de 60% a 70% do calor gerado durante o contato entre superfície da peça e o rebolo permanece na zona de contato (BIANCHI et al., 2011).

A afiação do rebolo é definida como a capacidade para remover material sem danificar a peça. As características observadas para definir a afiação do rebolo é a rugosidade aceitável, não aparência ou ocorrência de queima, e pouco stress residual (SINOT; CHEVRIER; PADILLA, 2006).

Atualmente, existem aplicações para ambos os tipos de rebolos. O rebolo superabrasivo é indicado para processos de retificação que envolvem metais ferrosos endurecidos, ferro fundido e superligas de níquel e cobalto. Por outro lado, o rebolo convencional é empregado em operações de retificação de aços carbono, aço liga, ferro fundido maleável e nodular, aço rápido e bronze duro (CATAI, 2004).

### **2.1.2 Profundidade de corte ( $a$ )**

A profundidade de corte,  $a$ , é definida como a profundidade de material removido por revolução do rebolo ou passagem de mesa (MARINESCU et al., 2006). De acordo com (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2010) a profundidade de corte ou penetração de trabalho é a penetração da ferramenta em relação à peça, medida no plano de trabalho e perpendicularmente a direção de avanço. A grandeza da penetração é medida em micrometro [ $\mu\text{m}$ ].

O aumento da profundidade de corte implica em forças tangencias maiores durante o processo de retificação, dessa forma, há um aumento na tensão residual devido ao aumento da energia de corte (BRINKSMEIER et al., 1982). Ademais, o aumento na profundidade de corte pode causar deformações na região de contato entre o rebolo e a peça e assim prejudicar o acabamento final.

### **2.1.3 Velocidade de corte ( $v_s$ )**

A velocidade de corte ( $v_s$ ) é a velocidade instantânea do ponto de referência da aresta cortante da ferramenta, segundo a direção e o sentido do corte (MACHADO et al., 2015). Os

processos com movimento de rotação, como a retificação, têm sua velocidade de corte calculada por meio da Equação 2.1 (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2010):

$$v_s = \frac{\pi * d_s * \eta_s}{1000} \quad (2.1)$$

Sendo:

$v_s$  = velocidade de corte (m/min)

$d_s$  = diâmetro da ferramenta (rebolo) (mm)

$\eta_s$  = rotação da ferramenta (rebolo) (rpm)

A velocidade de corte ( $v_s$ ) interfere de forma substancial no comportamento das forças de corte, desgaste do rebolo, acabamento e queima superficial da peça, vibrações da máquina, dentre outros (BIANCHI et al., 1997). Um aumento na velocidade de corte pode levar a um acréscimo na qualidade final da peça, ou alternadamente, um aumento na produtividade (JACKSON; MILLS, 2004). No entanto, o aumento de velocidade também acarreta em um desgaste maior do rebolo, devido ao aumento de frequência no contato individual dos grãos abrasivos durante a retificação.

#### 2.1.4 Velocidade da peça ( $v_w$ )

A velocidade da peça ( $v_w$ ) na retificação tangencial plana é igual a velocidade da mesa retificadora. De acordo com (BIANCHI et al., 1997) a velocidade da peça está relacionada aos impactos que os grãos abrasivos provocam na peça.

A definição de velocidade de avanço ( $v_f$ ) ou velocidade de corte é a velocidade instantânea do ponto de referência da aresta cortante da ferramenta, segundo a direção e o sentido de avanço. O cálculo referente a velocidade de avanço (MACHADO et al., 2015) é apresentado na Equação 2.2:

$$v_f = f * n \quad (2.2)$$

Sendo:

$v_f$  = velocidade de avanço (mm/min)

$f$  = avanço (mm/revolução)

$n$  = número de rotações por minuto

Segundo (BIANCHI et al., 1997) uma velocidade da peça baixa permite uma penetração maior do rebolo na superfície da peça. Os grãos abrasivos tendem a permanecer mais tempo em contato com a peça o que acarreta em um desgaste maior. Em contrapartida, uma velocidade da peça ( $v_w$ ) maior implica em uma penetração baixa do rebolo. Os grãos abrasivos permanecem por menos tempo em contato com a peça, tendendo a se fraturar ou desprender da superfície do rebolo devido ao aumento de força por grão abrasivo nesta situação.

### 2.1.5 Forças na retificação

O conhecimento de forças na retificação é essencial para estimar as necessidades de potência; projetar em máquinas de retificação dispositivos e acessórios de trabalho e determinar os desvios que a peça, a máquina de retificação e seus componentes poderão sofrer (KALPAKJIAN; SCHMID, 2014).

A potência de retificação ( $P_{retificação}$ ) pode ser identificada através das forças de retificação. As forças de retificação são divididas em três componentes: força tangencial ( $F_t$ ), força normal ( $F_n$ ) e força axial ( $F_a$ ). A relação entre as três componentes e a potência de retificação (ROWE, 2009) está disposta na Equação 2.3:

$$P_{retificação} = F_t * (v_s \pm v_w) + F_n * v_{fn} + F_a * v_{fa} \quad (2.3)$$

Sendo:

$v_{fn}$  = velocidade normal (m/s)

$v_{fa}$  = velocidade axial (m/s)

$v_s$  = velocidade do rebolo (m/s)

$v_w$  = velocidade da peça (m/s)

$F_t$  = Força tangencial (N)

$F_n$  = Força normal (N)

$F_a$  = Força axial (N)

A disposição das forças que ocorrem durante o processo de retificação é exibida na Figura 2.3. A força tangencial ( $F_t$ ) afeta principalmente o consumo de energia e a vida útil do

rebolo. A força normal ( $F_n$ ) é perpendicular à superfície da ferramenta abrasiva, sendo muito maior que a força tangencial e atuando de forma direta para reduzir a profundidade de corte. Além disso, a força normal é a principal responsável pelas deflexões da peça, da ferramenta abrasiva e da máquina em relação a superfície da peça. Por fim, a força axial ( $F_a$ ) surge quando há movimentos laterais das ferramentas abrasivas (MARINESCU et al., 2004).

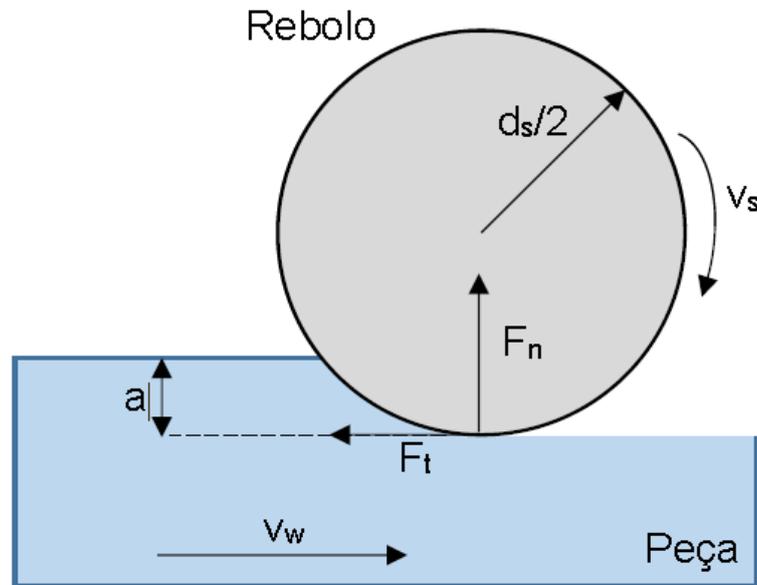


Figura 2.3- Forças de corte para a retificação tangencial plana (FERREIRA, 2016)

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

A espessura equivalente de corte ( $h_{eq}$ ) é a espessura do material removido ao longo de uma revolução do rebolo (PETERS; SNOEYS; DECNEUT, 1976). A Equação 2.4 define a espessura equivalente de corte ( $h_{eq}$ ):

$$h_{eq} = a * \frac{v_w}{v_s} \quad (2.4)$$

Sendo:

$h_{eq}$  = espessura equivalente de corte ( $\mu\text{m}$ )

A espessura equivalente de corte relaciona facilmente as medidas dos parâmetros de retificação com os parâmetros de taxa de remoção. Pode ser observado que o aumento da profundidade de corte e da velocidade da peça tende a aumentar o valor da espessura equivalente de corte enquanto o inverso ocorre quando há o aumento da velocidade de corte (ROWE, 2009).

De acordo com (MARINESCU et al., 2004) a espessura equivalente de corte é um parâmetro amplamente utilizado, devido a sua simplicidade, como uma medida da profundidade da ferramenta. Em trabalhos experimentais, os espaços entre os grãos abrasivos são difíceis de mensurar de forma precisa e a espessura equivalente é uma variável dependente da profundidade de corte e do desgaste do rebolo. A espessura equivalente de corte auxilia no entendimento do processo como uma variável básica em procedimentos experimentais.

### 2.1.7 Dressagem

A superfície do rebolo é composta de numerosos grãos abrasivos, orientados e posicionados de forma aleatória. Durante o processo de retificação, estas arestas de corte são modificadas, sofrem desgaste ou são desprendidas da superfície do rebolo, implicando na perda de capacidade de corte e prejudicando o acabamento final da peça. Isto posto, a operação de dressagem faz-se necessária para resolver este problema.

Dressagem é uma operação de afiação projetada para gerar uma superfície topográfica específica na face de corte do rebolo com o objetivo de melhorar a eficiência da retificação (JACKSON et al., 2007). A eficiência do processo de retificação é muito afetada pelo condicionamento e dressagem do rebolo (LINKE, 2008). A dressagem é composta de uma ferramenta chamada dressador que possui, na maioria das vezes, pontas diamantadas.

O mecanismo cinemático para a operação de dressagem consiste no deslocamento do dressador transversalmente ao rebolo em movimento de rotação (BIANCHI et al., 1997). O dressador geralmente é constituído de diamante (ponta única) ou uma ferramenta de múltiplos diamantes (conglomerado) consistindo de uma ou mais camadas de conjuntos de diamantes (MALKIN, S.; GUO, 2008).

De acordo com (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2010) a ponta de diamante avança e retira uma pequena camada superficial, da ordem de centésimos ou décimos de milímetro, enquanto o rebolo está em revolução (girando). Um importante parâmetro do processo de dressagem é o grau de recobrimento, como mostrado na Equação 2.5 (MOIA et al., 2015):

$$U_d = \frac{b_d}{s_d} \quad (2.5)$$

Sendo:

$b_d$  = largura de atuação do dressador (mm)

$S_d$  = passo de dressagem (mm).

Um alto valor de grau de recobrimento implica em uma superfície do rebolo menos agressiva, porém com um alto valor nas forças de retificação e de energia específica na remoção do material. No entanto, um baixo valor de grau de recobrimento cria uma superfície de corte agressiva e alta rugosidade nas peças usinadas. Geralmente o grau de recobrimento fica entre 2 e 20 (ROWE, 2009). A ilustração do processo de dressagem é apresentada na Figura 2.4.



Figura 2.4- Processo de dressagem com dressador de ponta única

A definição do momento correto da dressagem é importante para evitar desperdícios em relação a vida útil do rebolo. Uma dressagem efetuada antes do momento correto diminui o tempo útil do rebolo. No entanto uma dressagem tardia pode levar a inúmeras ocorrências na superfície da peça, como alta rugosidade, trincas e até mesmo queima. Assim é de suma importância o controle do processo de dressagem.

### 2.1.8 Ocorrência do fenômeno de queima na retificação

A temperatura no processo de retificação é um dos fatores mais importantes no que concerne os danos na superfície da peça. A ocorrência de danos térmicos é difícil de prever pois

não depende somente do balanço de energia no arco de corte mais também dos parâmetros mecânicos da retificação (TORRANCE, 1979). Os efeitos da retificação em materiais ferrosos dependem do conteúdo do carbono de outras ligas (ROWE, 2009).

A maior parte da energia consumida na retificação é convertida em calor e está concentrada na zona de corte, levando a altas temperaturas na superfície de trabalho. A alta temperatura pode causar diversos problemas relacionados a qualidade da peça, tais como, tensão residual e queima superficial reduzindo assim a resistência a fadiga (DEIVA NATHAN; VIJAYARAGHAVAN; KRISHNAMURTHY, 1999). Os danos térmicos são um dos principais fatores que afetam a qualidade superficial da peça e limita as taxas de produção que podem ser alcançadas pela retificação. Assim, é de suma importância compreender os fatores que afetam a temperatura nesse processo (MALKIN; GUO, 2007).

A queima visível nos aços é caracterizada pela cor de têmpera azulada na superfície da peça, que é consequência da formação de uma camada de óxido (MALKIN, S.; GUO, 2008). As cores variam de marrom claro até azul escuro sendo produzidas a temperaturas de 450 °C no processo de retificação convencional (MARINESCU et al., 2004). Ressalta-se que em alguns casos a mudança na coloração pode não ser o indicativo de queima e somente um efeito meramente cosmético (MALKIN, S.; GUO, 2008)

De acordo com (MALKIN, S.; GUO, 2008) no início da queima, há uma tendência de aumento na adesão das partículas do metal nos grãos abrasivos, causando assim, aumento de forças, deterioração da superfície da peça e aumento no desgaste a superfície do rebolo. O atrito entre cada abrasivo e a superfície da peça em conjunto com a deformação plástica associada à produção do cavaco contribuem para a elevação da temperatura na interface rebolo/peça (MACHADO et al., 2015).

Ainda de acordo com Machado et al. (2015), a temperatura de retificação é agravada pelas seguintes situações: o difícil acesso do fluido de corte devido extensão do contato rebolo/peça, a dificuldade na dissipação de calor devido a refratabilidade dos materiais utilizados para confecção do rebolo, a pequena massa e a natureza descontínua do cavaco.

Além dos danos já citados anteriormente, a queima pode provocar o reendurecimento das peças usinadas. Esse fenômeno causa aumento na dureza do material além de torná-lo menos resistente a fadiga. Em alguns casos há o surgimento de uma camada branca como apresentado na Figura 2.5. O reendurecimento ocorre em temperaturas maiores do que as temperaturas que provocam os danos de alteração na coloração da têmpera. Tipicamente, o reendurecimento ocorre quando a temperatura de zona de corte excede 850 °C (ROWE, 2009).

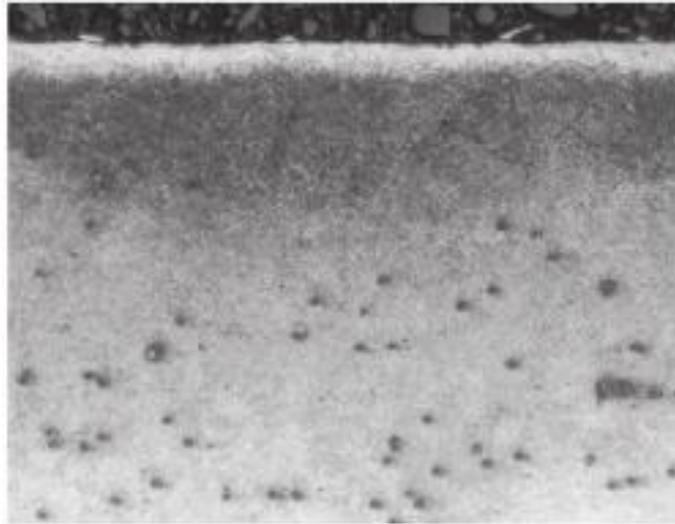


Figura 2.5- Dano de Reendurecimento – Camada Branca (100x – AISI 52100) (ROWE, 2009)

O calor na superfície da peça é acompanhado pela expansão e contração térmica. A superfície da peça expande devido ao calor advindo do contato entre a própria superfície da peça e a face de corte do rebolo durante o passe na retificação. Após o passe do rebolo a superfície esfria rapidamente contraindo o material. Se a expansão térmica é suficiente para causar deformação plástica, a contração do resfriamento subsequente levará a tensões residuais no material. Nos casos severos, isso pode levar a trincas e rachaduras, onde as mesmas estende-se abaixo da superfície (MARINESCU et al., 2004)

Os danos térmicos podem ser evitados através da melhor escolha dos abrasivos ou seleção de melhores condições de retificação para evitar temperaturas muito altas. Para indústrias que necessitem de alta produtividade, o monitoramento do processo pode auxiliar na preservação das condições necessárias de um bom acabamento. Algumas condições de retificação podem evitar danos térmicos se corrigidas, tais como: dressagem do rebolo, utilização de rebolos superabrasivos, a distribuição melhor do fluido de corte ou até mesmo a troca do fluido de corte, redução da taxa de remoção e utilização de rebolos com estruturas porosas mais abertas que permitam uma ação de auto-afiamento (ROWE, 2009).

### 2.1.9 Dureza Vickers

A dureza de um material é geralmente definida como a resistência permanente a indentação. A dureza não é uma propriedade fundamental, devido à resistência a indentação depender da forma do indentador e a carga aplicada. Fornece uma indicação geral da força de um material e sua resistência ao desgaste (KALPAKJIAN; SCHMID, 2014).

Os ensaios de dureza são amplamente aplicados na indústria da manufatura devido a facilidade do método e seu baixo custo. De acordo com Singh (2006) a dureza de um metal pode ser determinada pelos seguintes testes: Teste de dureza Brinell, teste de dureza Rockwell, teste de dureza Vickers, teste de dureza Shore.

O teste de dureza Vickers utiliza uma pirâmide de diamante quadrada de  $136^\circ$  como indentador e carga entre 1 a 120 kg. Um exemplo de um indentador utilizado no teste de dureza Vickers está ilustrado na Figura 2.6. O valor de dureza Vickers (HV) é definido como a carga dividida pela área de superfície da indentação expressa em unidades de quilogramas por milímetro quadrado (BLACK; KOHSER, 2008).

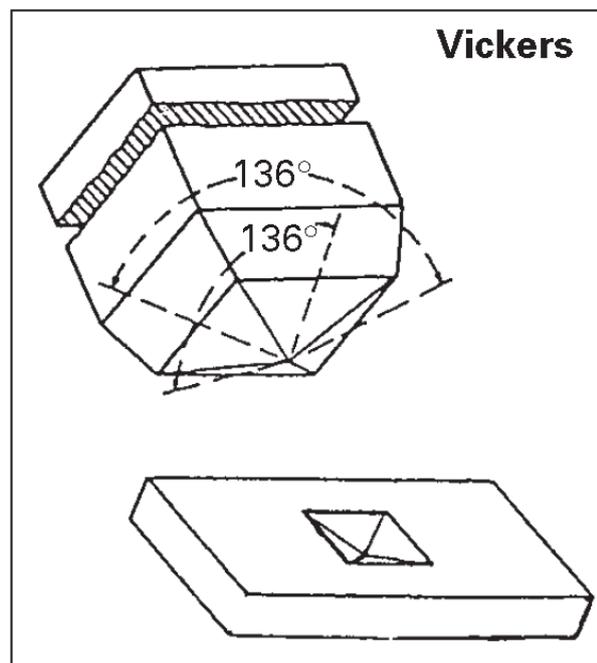


Figura 2.6- Indentador Vickers (BLACK; KOHSER, 2008)

O procedimento convencional do teste de dureza consiste em aplicar uma carga fixa em um indentador de diamante e mensurá-la, com o auxílio de um microscópio, a dimensão da indentação resultante na superfície do material após a carga (GONG; WU; GUAN, 1999). As

impressões obtidas após a carga são tipicamente inferiores a 0,5 mm na diagonal e as profundidades de penetração podem ser baixas, em alguns casos, de 20 nm. O teste de dureza Vickers, fornece essencialmente o mesmo valor de dureza, independentemente da carga. É adequado para utilização em diversos materiais incluindo aços tratados termicamente. Os procedimentos do teste também foram desenvolvidos para serem utilizados em microscópios de força atômica e nanoindentadores (KALPAKJIAN; SCHMID, 2014).

Entre a variedade de indentadores utilizados em testes de dureza, o indentador Vickers é um dos mais utilizados. O número de dureza Vickers (HV), é definido como a proporção de carga aplicada (P), para área de contato piramidal (A) da indentação. A Equação 2.6 define a dureza Vickers (GONG; WU; GUAN, 1999):

$$H_v = \frac{P}{A} = \frac{\alpha * P}{d^2} \quad (2.6)$$

Sendo:

$P$  = carga aplicada (kg)

$A$  = área de indentação (m<sup>2</sup>)

$\alpha$  = 1.8544 para o indentador Vickers.

$d$  = comprimento da diagonal da impressão resultante (m)

O teste de dureza Vickers possui uma série de características atraentes: (1) é simples de conduzir, (2) pouco tempo necessário para executá-lo, (3) é necessária pouca preocupação com a superfície, (4) as marcas são bastante pequenas e são facilmente de ser ocultadas ou removidas, (5) o teste pode ser feito no local, (6) é relativamente barato e (7) fornece resultados que podem ser utilizados para avaliar a força do material ou avaliar a qualidade do produto (BLACK; KOHSER, 2008).

Os testes de microdureza foram desenvolvidos para aplicações onde é necessário determinar a dureza de uma área do material de forma muito precisa. Esses testes são denominados testes de dureza por microindentação devido ao tamanho extremamente pequeno da indentação. A carga utilizada em testes de micro dureza ou micro indentação varia de 25 a 3.600 gramas (BLACK; KOHSER, 2008).

A dureza da superfície de uma peça de aço após a retificação pode apontar a ocorrência de diversos fenômenos, dentre eles a queima. Em alguns casos o revenimento na camada superficial pode levar a dureza a um valor maior do que o material anteriormente possuía.

## 2.2 MONITORAMENTO DA VIBRAÇÃO E POTÊNCIA NO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO

### 2.2.1 Vibração no processo de retificação

Vibração é o termo que descreve as oscilações em um sistema mecânico. É definida pela frequência (ou frequências) e amplitude. O movimento de um objeto ou estrutura física, ou alternativamente, uma força oscilante aplicada a um sistema mecânico consiste no sentido genérico de vibração. Conceitualmente, em relação ao tempo, a vibração pode ser considerada senoidal ou uma forma simplesmente harmônica. A frequência é definida em termos de ciclos por unidade de tempo e a magnitude em termos de amplitude (HARRIS; PIERSOL, 2002).

A vibração pode ser classificada de diversas formas, dentre elas: Vibrações livres e forçadas, Vibrações amortecidas e não amortecidas, Vibrações lineares e não lineares e Vibrações determinísticas e randômicas (RAO, 2009). No entanto, essa classificação não considera as vibrações auto-excitadas que ocorrem principalmente em processos de manufatura como a retificação, o fresamento e o torneamento. A vibração auto-excitada ou *chatter* é a vibração que surge conforme o movimento de atuação da ferramenta de corte sobre a peça usinada.

Existem dois tipos de vibrações envolvidas no processo de retificação: vibrações forçadas e auto-excitadas (MALKIN, S.; GUO, 2008). De acordo com (INAZAKI; YONETSU, 1969) as vibrações forçadas ocorrem durante a retificação devido as não uniformidades na estrutura do rebolo e a alta velocidade de rotação do eixo do rebolo. Embora o rebolo seja balanceado antes da retificação, a estrutura não-uniforme do rebolo causa absorção de forma desigual do fluido de corte e também produz cavacos com espessuras diferentes que produzirão um novo desequilíbrio no rebolo durante as operações de retificação.

O principal problema em relação a vibração forçada consiste na eliminação das fontes de vibração (desbalanceamento do rebolo e excentricidade) pois são relativamente fáceis de identificar através de medidas de frequência. Existem outras fontes de vibrações forçadas, tais como: vibrações induzidas pelos dispositivos hidráulicos integrados a máquina de retificação e as vibrações do piso (chão da fábrica), que são difíceis de localizar e resolver com sucesso (INAZAKI; KARPUSCHEWSKI; LEE, 2001).

A vibração auto-excitada refere-se a vibrações resultantes da resposta do processo de retificação a distúrbios passageiros ou de curta duração. Esses distúrbios podem existir na forma de eventos, como o contato inicial entre o rebolo e a peça, ou sob forma perturbações geométricas, como ondulações ou desvios iniciais na superfície do rebolo ou da própria peça (KING; HAHN, 1987).

O efeito regenerativo é considerado a principal causa de vibrações auto excitadas na retificação (INASAKI; KARPUSCHEWSKI; LEE, 2001). Devido ao movimento de rotação durante o processo de remoção de material, as ondas geradas na superfície da peça, resultam em mudanças de profundidade de corte após uma revolução do rebolo. Os deslocamentos de fase ente as ondas na superfície da peça (modulação externa) e a vibração relativa do rebolo (modulação interna) tornam o processo instável quando uma certa condição é satisfeita (MARINESCU et al., 2007).

A ocorrência da vibração durante a operação de retificação tem grande influência na geometria do rebolo e na superfície da peça. O dano mais comum da vibração na superfície da peça, são marcas características, visíveis a olho nu, que se assemelham a uma estrutura com inúmeras facetas (marcas de *chatter*). Essas marcas onduladas e periódicas podem afetar o comportamento visual e funcional do produto (LIU et al., 2017). Os efeitos das marcas de *chatter* na superfície de um cilindro são apresentados na Figura 2.8.

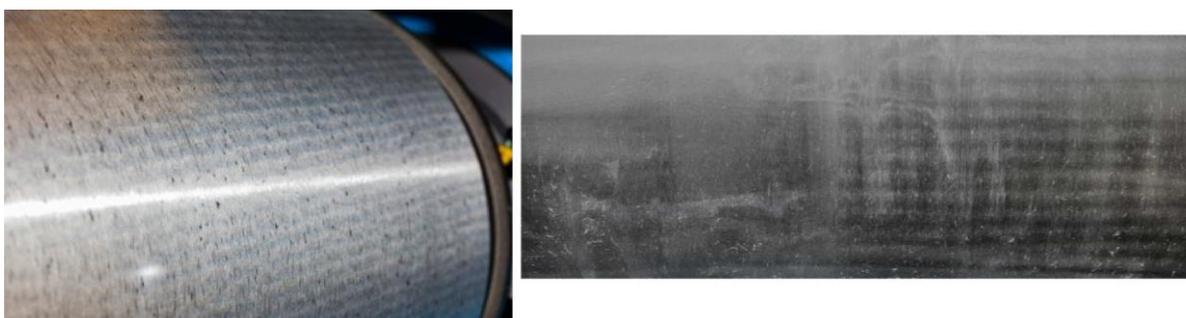


Figura 2.7- Efeito da vibração na retificação (adaptado) (MAGGIONI et al., 2014)

Existem algumas maneiras de diminuir a ocorrência das vibrações na retificação, dentre elas, a mudança de velocidade do rebolo ou da peça podendo levar a condições mais estáveis no processo, a adição de amortecedores para melhorar o desempenho dinâmico do sistema alcançou bons resultados, como também, a adição do elemento de mola entre a peça e o rebolo (MARINESCU et al., 2007; ROWE, 2009).

### 2.2.2 Monitoramento da vibração

De acordo com Liu et al. (2016) os princípios para detecção da vibração no processo de retificação podem ser classificados em dois tipos. O primeiro baseia-se nas mudanças de características dos sinais que são sensíveis a ocorrência de vibração. Os sinais frequentemente utilizados são: Emissão Acústica, aceleração (vibração) e força. O segundo tipo de detecção é baseado nas mudanças da dinâmica de retificação causadas pelo início da vibração. Utiliza-se os indicadores de previsibilidade do processo, como a taxa de entropia, (perda de informação ao longo do tempo) e a taxa de informação, definida em (GRADIŠEK et al., 2003) .

Durante a interação entre rebolo e a superfície da peça, inicia-se a remoção do material e a zona de contato é criada. Somente durante essa operação as variáveis do processo podem ser mensuradas, tais como: forças, potência, aceleração, temperatura e emissão acústica. Em relação a vibração (*chatter*) algumas não são relevantes. O acelerômetro e o sensor de força são os mais adequados para detectar a ocorrência de vibrações (*chatter*) (INASAKI; KARPUSCHEWSKI; LEE, 2001).

Acelerômetros são transdutores sensíveis que fornecem uma saída proporcional a aceleração, vibração e choque (colisão). A classe de acelerômetros mais popular é o acelerômetro piezométrico. Este tipo de sensor é capaz de mensurar uma ampla faixa de eventos dinâmicos. No entanto, existem muitas outras classes de acelerômetros utilizados para medir frequências de aceleração muito baixas ou constantes, tais como, capacitivos e piezoresistivos (WILSON, 2005).

### 2.2.3 Acelerômetro Piezométrico

O efeito piezométrico tem uma aplicação natural na detecção de vibração e aceleração. O efeito é uma conversão direta de energia mecânica em energia elétrica em um material cristalino composto de dipolos elétricos. Esses sensores funcionam a partir de frequências tão baixas quanto 2 Hz e acima de 5 kHz (FRADEN, 2010)

Os elementos ativos do acelerômetro são os elementos piezométricos. Os elementos agem como uma mola, que tem uma rigidez  $k$ , e conectam a base do acelerômetro a massa sísmica. Quando uma entrada está presente na base do acelerômetro, uma força ( $F$ ) é criada no material piezométrico proporcional a aceleração ( $a_c$ ) aplicada e a massa ( $m$ ). A força aplicada ao cristal piezométrico é proporcional a massa e a aceleração de entrada. Quanto mais massa ou aceleração,

maior a força aplicada e conseqüentemente maior o valor de saída elétrica do cristal piezoelétrico. (WILSON, 2005). O esquemático básico do acelerômetro piezelétrico é mostrado na Figura 2.9.

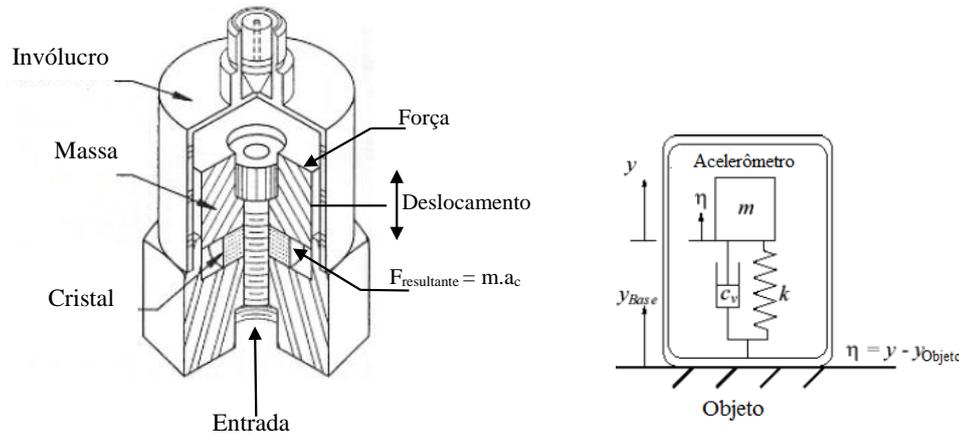


Figura 2.8- Esquemático acelerômetro piezelétrico (adaptado) (FRADEN, 2010)

De acordo com o Wilson (2005) os acelerômetros piezoelétricos podem ser divididos em duas principais categorias que definem seu modo de operação. Acelerômetros amplificados internamente contendo um condicionador microeletrônico de sinal (IEPE – *Internal Electronic Piezoelectric*) e acelerômetros de modo carga que contém apenas um elemento de sensor piezoelétrico e um sinal de saída de alta impedância. Os sensores de modo carga produzem um sinal de carga elétrica de alta impedância que é gerado diretamente pelo elemento de sensor piezoelétrico. Deve ser observado que o sinal é sensível as influências do ambiente e do ruído gerado pelo cabo. Assim este tipo de sensor requer a utilização de um cabo especial de baixo ruído. Além disso, para realizar medidas precisas é necessário condicionar o sinal de alta impedância para baixa impedância antes que ele possa ser coletado em um dispositivo de leitura e gravação. O esquemático do acelerômetro de modo carga está disposto na Figura 2.9.

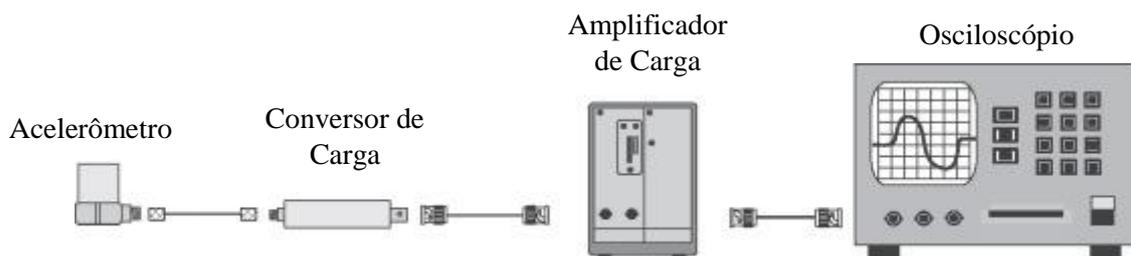


Figura 2.9- Sistema acelerômetro piezoelétrico modo carga (WILSON, 2005)

## 2.2.4 Monitoramento da potência

A potência têm sido utilizada como uma maneira de monitorar o processo de retificação (KWAK; HA, 2004a). O consumo de energia do motor que rotaciona o eixo do rebolo e as forças de retificação são parâmetros característicos para a transferência de energia na área de contato (BRINKSMEIER et al., 1998). Em relação as forças de retificação um sensor equipado próximo à área de contato entre a superfície da peça e do rebolo pode ser utilizado para análise, enquanto que a potência pode ser mensurada através de sensores específicos, como os sensores de efeito hall, shunt e transformador de corrente.

O monitoramento da potência é uma maneira fácil, de baixo custo e conveniente para obter informações úteis do processo de retificação. Além dessas qualidades, não exige um design complexo para a fixação ou instalação no sistema máquina ferramenta (motor do eixo árvore) (TIAN et al., 2017).

O efeito das condições de retificação, tais como, força de retificação e potência, estão relacionadas com a espessura do cavaco e também com a operação de dressagem considerando a densidade efetiva das arestas de corte na superfície do rebolo (CHEN et al., 1999). De acordo com Kruszyński e Wójcik (2001) o aumento da potência na retificação acarreta no aumento da temperatura que pode causar sérios danos na camada superficial da peça.

As variáveis relacionadas aos motores elétricos, tais como, a potência e a corrente, são afetadas pela carga do sistema, pelo sistema mecânico (caixa de engrenagem, drivers, etc) e pelo circuito eletrônico utilizado para controlar a velocidade do motor. Assim os sinais elétricos proporcionais a potência ou a corrente durante a usinagem são afetados pelo sistema e também pelas componentes relacionadas ao processo de corte (MANNAN; BROMS; LINDSTRÖM, 1989).

A principal vantagem em utilizar parâmetros obtidos através de variáveis relacionadas ao motor, como a potência e a corrente, com o objetivo de detectar distúrbios nos processos de corte é que os instrumentos de medida não interferem no processo (MANNAN; BROMS, 1992). A identificação de desgaste e quebra da ferramenta no processo de usinagem pode ser efetuada através do monitoramento da corrente de alimentação do motor, constituindo assim, em um método importante para a indústria de manufatura.

### 2.2.5 Sensor de corrente

Os sensores de corrente são importantes pois permitem analisar algumas variáveis relativas ao processo de usinagem, como por exemplo, a corrente de alimentação do motor da máquina retificadora, auxiliando assim na determinação da potência utilizada durante o processo. Atualmente, algumas técnicas são utilizadas para o monitoramento da corrente sendo comumente classificadas de acordo com o princípio de funcionamento, tais como, lei de resistência Ohm; lei de indução de Faraday; sensores de campo magnético e efeito Faraday (ZIEGLER et al., 2009).

O sensor mais comum baseado no efeito da lei de Ohm é o sensor de corrente shunt. A queda de tensão que ocorre por meio do resistor é utilizada como a medida proporcional ao fluxo de corrente. O sensor de corrente shunt possui como vantagem o baixo custo, a robustez e a simplicidade em sua fabricação. As desvantagens do referido sensor consistem na interrupção do circuito, além disso, nos casos de correntes de grandes valores os sensores são volumosos e por fim os sensores dissipam calor (RIPKA, 2010).

Um dos sensores de campo magnético mais populares é o sensor de efeito Hall. No momento em que uma corrente flui através de uma fina camada de material condutor que é penetrado por uma densidade de fluxo magnético, uma tensão é gerada perpendicular tanto a corrente quanto ao campo magnético. Essa tensão é proporcional ao campo magnético no material condutor (ZIEGLER et al., 2009). As principais desvantagens desse sensor são: a dependência que o nível de tensão possui em relação a temperatura, pois a resistência do material condutor é afetada; ruídos que o sensor sofre devido aos campos magnéticos externos e o surgimento de uma tensão na ausência de um campo magnético devido a tensão de deslocamento em relação aos eletrodos. Como vantagens esse sensor apresenta facilidade para mensurar grandes correntes além de não serem afetados por poeira, vibrações e umidade.

O efeito Faraday, também conhecido como efeito magneto-óptico, se caracteriza pela mudança de direção de polarização de um feixe de luz linearmente polarizado quando este se propaga ao longo de um meio transparente na presença de um campo magnético (SANTA BRIGÍDA, 2017; SARAVIA, 2016). O sensor de corrente baseado no efeito Faraday tem como vantagem a redução de massa e do consumo de energia quando comparado a outras tecnologias. No entanto, sua aplicação é recomendada para correntes de grande magnitude, visto que, para magnitudes menores os outros princípios apresentados são mais atraentes (ZIEGLER et al., 2009).

Os sensores baseados na Lei de indução de Faraday são sensores que fornecem isolamento elétrico entre a corrente que queremos mensurar e o sinal de saída. O isolamento elétrico permite a aferição da corrente em um grande potencial de tensão, além disso, algumas aplicações de segurança exigem o isolamento elétrico (ZIEGLER et al., 2009). Atualmente alguns sensores baseados na Lei de Indução Faraday estão disponíveis no mercado, dentre eles, pode-se destacar o transformador de corrente (TC).

Um TC geralmente tem um núcleo em forma de anel feito de material de alta permeabilidade. Para correntes superiores a 50 A, o enrolamento primário é um único condutor através da abertura do núcleo (RIPKA, 2010). O núcleo é enrolado com uma fita de alta permeabilidade (para dispositivos de baixa frequência) ou é feito de ferrite (para pontas de prova de correntes de alta frequência) (WEBSTER; EREN, 2014).

Os TCs são transformadores com corrente de saída padronizada entre 0 a 5A. Os tipos de TC mais comuns são: TC enrolado, TC barra, TC janela, TC bucha e TC de núcleo dividido (THOMAZINI; ALBUQUERQUE, 2010).

Os TCs são dispositivos muito populares devido a sua simplicidade, robustez, não necessitam de alimentação externa, custo baixo e longa vida útil. Alguns TCs são construídos com um núcleo aberto, muito frequentemente utilizados como garras amperimétricas para osciloscópios e multímetros (WEBSTER; EREN, 2014). O circuito equivalente de um transformador de corrente é mostrado na Figura 2.10.

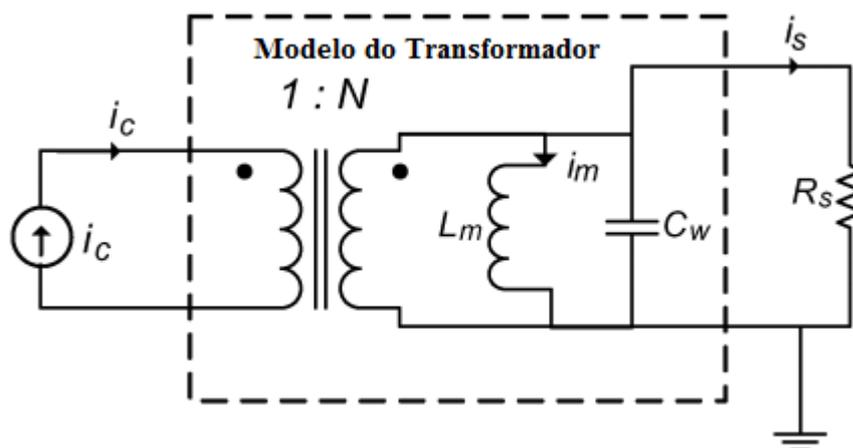


Figura 2.10- Circuito Equivalente de um TC (adaptado) (ZIEGLER et al., 2009)

De acordo com Thomazini e Albuquerque (2010) o TC de núcleo dividido é um tipo especial em que parte do núcleo é separável ou basculante, para facilitar o enlaçamento do condutor primário. A garra amperimétrica nada mais é do que um TC de núcleo dividido que

possibilita mediar a corrente sem a necessidade de abrir o circuito para inseri-lo em série. O transformador de corrente com núcleo dividido é ilustrado na Figura 2.12.

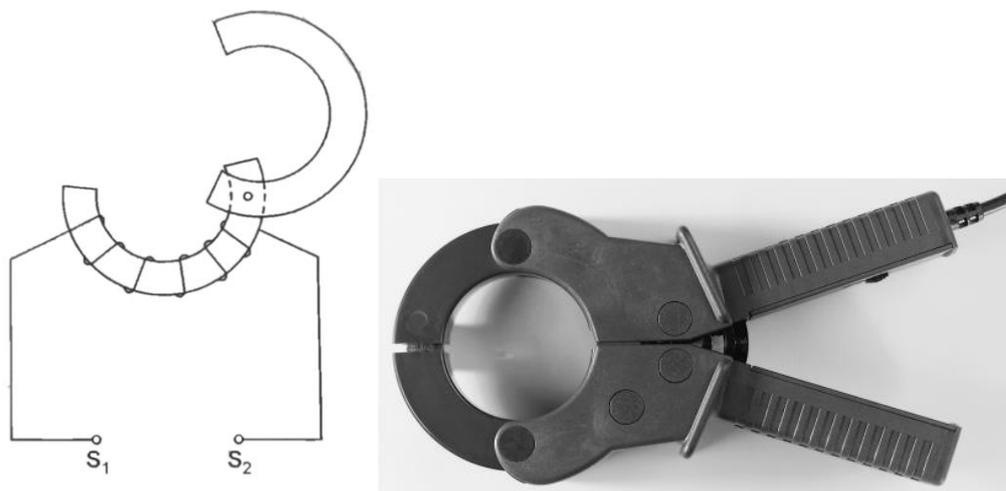


Figura 2.11-Transformador de Corrente de Núcleo dividido.

## 2.3 MONITORAMENTO E PROCESSAMENTO DE SINAIS NA MANUFATURA

### 2.3.1 Monitoramento dos processos de usinagem

Os processos de usinagem são amplamente utilizados para fabricar componentes que exigem alta precisão e acabamento superficial de alta qualidade. Além disso, a usinagem é um processo que pode fornecer baixo custo para um certo número de peças. No entanto, para obter essas vantagens, é necessário garantir que a configuração (máquina, ferramenta, refrigeração, etc.) esteja em perfeita ordem. Nesse contexto, o monitoramento de sinais surge como alternativa para controlar essas variáveis e assim assegurar que o processo ocorra sem erros ou com uma margem de erros muito baixa.

Os problemas de usinagem como a quebra da ferramenta de corte, o desgaste excessivo, a vibração e o choque (colisão), impedem a consistência e a qualidade da produção (KOVÁČ et al., 2011). Tais problemas dificultam o desenvolvimento de sistemas de usinagem autônomos que garantam resultados de monitoramento confiáveis e robustos.

A necessidade de automatização de processos de usinagem desempenhou um papel muito importante no desenvolvimento da tecnologia de monitoramento de processos. A implementação do controle de processo requer uma medição instantânea dos elementos-chaves que ocorrem durante a execução do processo. Assim, um amplo espectro de sensores com essas

características (respostas instantâneas e monitoramento *on-line*) foram desenvolvidos utilizando sistemas de detecção acústica, óptica, elétrica, térmica ou magnética (LIANG; HECKER; LANDERS, 2004).

Os sensores possuem diversas aplicações nos processos de manufatura. O controle de temperatura da máquina é utilizado para reduzir os erros térmicos estruturais. Os *scanners* aliados a softwares específicos podem ser aplicados em engenharia reversa. Os sensores acústicos e acelerômetros monitoram processos de corte (detectam vibração, por exemplo) para reduzir os danos na máquina ou nas peças. Os dinamômetros piezelétricos abriram caminho para um monitoramento mais efetivo da condição da ferramenta na usinagem adaptativa. Pesquisas e aplicações industriais mostraram que a integração de sensores adequados com controle no processo pode reduzir significativamente os danos na ferramenta e na peça, bem como, melhorar a produtividade e a qualidade do produto (YUCHEN ZHOU; ORBAN; NIKUMB, 1995).

As técnicas de medição para o monitoramento de operações de usinagem tradicionalmente foram categorizadas em duas abordagens: direta e indireta. A categoria de abordagem direta consiste em uma medição direta de uma quantidade real variável, por exemplo, o desgaste da ferramenta. Exemplos alternativos de medidas diretas são: o uso de câmeras para inspeção visual, isótopos radioativos, raios laser e resistência elétrica. Muitos métodos diretos somente podem ser aplicados como técnicas de laboratório devido às limitações práticas causadas por problemas de acesso durante a usinagem e o uso de fluido de corte. No entanto a medição direta possui um alto grau de precisão e tem sido amplamente empregada em laboratórios de pesquisa para apoiar investigações de fenômenos mensuráveis fundamentais durante o processo de usinagem. (TETI et al., 2010).

A abordagem por meio de métodos indiretos consiste em deduzir a quantidade real através de correlações determinadas empiricamente. Os métodos indiretos são menos exatos do que os métodos diretos, mas também são menos complexos e mais adequados para aplicações práticas. Assim, os métodos indiretos são sistemas mais econômicos para o monitoramento do processo de usinagem e são baseados em sensores que inferem o estado da usinagem ao detectar forças de corte, vibrações, temperaturas, consumo de corrente, etc. Basicamente, quatro sensores foram amplamente aplicados para monitorar sistemas de usinagem: dinamômetros, acelerômetros, sensores de emissão acústica e sensores de corrente (ABELLAN-NEBOT; ROMERO SUBIRON, 2010).

O monitoramento do processo pode representar economia e praticidade devido a auxiliar a identificar o desgaste da ferramenta, rugosidade na superfície da peça e anomalias durante o

corde que podem causar desperdício, dano e outros fatores prejudiciais no processo (LAURO et al., 2014).

### **2.3.2 Monitoramento do processo de retificação**

A retificação é um processo de fabricação de precisão amplamente utilizado. O aumento das exigências da indústria em relação a alta produtividade, baixo custo, boa qualidade e precisão dos produtos tem impulsionado o monitoramento e o controle das condições e parâmetros do processo de retificação (desgaste do rebolo, vibração, danos térmicos na superfície da peça, verificações da condição da operação de dressagem) (WEBSTER; DONG; LINDSAY, 1996).

O monitoramento da retificação é muito complexo devido ao alto número de parâmetros que influenciam o processo (KARPUSCHEWSKI; WEHMEIER; INASAKI, 2000). Assim, modelar o processo de retificação de forma precisa para prever a qualidade da saída resultante é extremamente difícil (TÖNSHOFF; FRIEMUTH; BECKER, 2002).

De acordo com Tönshoff; Friemuth e Becker (2002) existem em geral três regras para um sistema de monitoramento que podem ser sumarizadas: Primeiro, o sistema deve ser capaz de detectar falhas inesperadas que podem ocorrer no processo. Segundo as informações obtidas sobre os parâmetros do processo com o sistema de monitoramento podem ser utilizadas para otimizar o processo. Por exemplo, se a taxa de desgaste da ferramenta de corte pode ser obtida, a mesma informação pode ser utilizada para minimizar o custo ou o tempo de usinagem, alterando a velocidade de corte e a taxa de alimentação e alcançar assim uma otimização por controle adaptativo. Por fim, em terceiro, o sistema de monitoramento possibilitará obter as causalidades da entrada-saída do processo, que são úteis para estabelecer um banco de dados em relação ao processo monitorado. O banco de dados é necessário para determinar os parâmetros de configurações iniciais do processo.

O sensor é um elemento chave para qualquer sistema de monitoramento do processo ou da ferramenta. Embora muitos sensores diferentes tenham sido inventados e aplicados em laboratórios, somente alguns estão disponíveis para uso comercial (JEMIELNIAK, 1999). Um monitoramento bem-sucedido da condição da ferramenta de corte depende, em grande parte, de sensores confiáveis e robustos utilizados para este fim. Em face da ausência de operadores humanos, os sensores devem ter a capacidade de reconhecer as anomalias do processo e iniciar ações corretivas (LEZANSKI, 2001).

Ao longo das últimas décadas diversos pesquisadores têm se dedicado a encontrar formas de monitoramento que auxiliem no controle do processo de retificação. Um sistema utilizando fusão de sensores (potência e Emissão Acústica) e métodos de Inteligência Artificial com o objetivo de detectar distúrbios no ciclo de retificação foi apresentado por Karpuschewski; Wehmeier e Inasaki (2000). Em adição a essa proposta a influência de diferentes parâmetros de desgagem no sinal de Emissão Acústica foi investigada. O sistema foi aplicado e correspondeu de forma positiva a todos os sinais e análises propostas.

O sinais de Emissão Acústica e de potência também foram utilizados com sucesso no monitoramento da retificação de cerâmicas avançadas (NAKAI et al., 2015). A partir dos sinais, alguns modelos de redes neurais foram aplicados com o objetivo de identificar o desgaste da ferramenta de corte. De acordo com os autores, os resultados computacionais revelaram que os modelos neurais foram bem-sucedidos em estimar a condição da ferramenta de corte.

A proposta de aplicação de ferramentas estatísticas em sinais de Emissão Acústica provenientes do processo de retificação de aços foi apresentada por Aguiar *et al.* (2004). Os autores fizeram uso da raiz quadrática média (RMS), correlação de Emissão Acústica, Razão Constante de Alarme Falso (CFAR), desvio de valor médio (MVD), *kurtosis* entre outros parâmetros estatísticos para identificar a ocorrência de queima no aço. De acordo com os autores as estatísticas *kurtosis*, ROP e CFAR apresentaram sensibilidade maior do que o próprio RMS.

A utilização do sensor de vibração para estimar o desgaste do dressador no processo de dressagem foi apresentada por Junior et al. (2017). Os autores fizeram uso de técnicas de processamento digital de sinais, como o estudo do espectro de frequências e análises de tempo-frequência, além da aplicação de uma rede neural perceptron multicamadas (MLP) para diagnosticar o nível de desgaste do dressador. Os resultados apresentaram um erro médio de apenas 2% do modelo de rede neural apresentado, indicando o sucesso da aplicação do modelo proposto.

Além dos trabalhos apresentados anteriormente, muitos outros pesquisadores têm-se dedicado ao monitoramento da retificação, tais como, Chen; Limchimchol (2006); Hassui *et al.* (1998); Hundt *et al.*, (1994); Karpuschewski; Wehmeier; Inasaki (2000); Lopes *et al.* (2017); Martins *et al.* (2014); Miranda *et al.* (2015); Oliveira; Dornfeld, (2001); Tönshoff; Friemuth; Becker (2002); Webster *et al.* (1994); Wegener *et al.* (2011); Zeng; Forssberg (1994a), dentre outros.

### 2.3.3 Processamento de sinais no monitoramento do processo de retificação

Sistemas em engenharia processam informações que são captadas no mundo real com o objetivo de se obter algum resultado útil sobre o processo estudado. É possível associar a qualquer instante de tempo uma informação relativa ao processo. A variação dessas informações conforme a passagem do tempo recebe o nome de sinal. O processamento digital de sinais estuda como os sinais se relacionam e, principalmente, como manipular os sinais de forma a se obter um resultado desejado (NALON; 2014).

O processamento digital de sinais se distingue de outras áreas na ciência da computação unicamente pelos dados que utiliza (sinais). Na maioria dos casos, esses sinais são originados do mundo real: vibrações sísmicas, imagens visuais, ondas sonoras, etc. O processamento digital de sinais consiste na matemática, nos algoritmos e nas técnicas utilizadas para manipular esses sinais depois de terem sido convertidos no formato de sinais digitais. Os objetivos para tanto, são variados e incluem: aprimoramento de imagens visuais, reconhecimento e geração de fala, compressão de dados para armazenamento e transmissão, etc (SMITH, 1999).

O monitoramento do processo de retificação, na maioria das vezes, implica em algum nível e processamento digital de sinais. Assim, muitos pesquisadores têm utilizado inúmeras técnicas de análise, algoritmos e processamento de sinais com o objetivo de relacionar os sinais com os eventos ocorridos durante o processo. Uma técnica de processamento de sinais muito utilizada é a análise do espectro de frequências dos sinais. A Transformada Rápida de Fourier (FFT), a Densidade Espectral de Potência (PSD) e a Transformada de Fourier de tempo-curto (STFT), são algumas das técnicas utilizadas para analisar as frequências dos sinais. Uma maneira alternativa de análise ao espectro de frequências é utilizar parâmetros ou índice estatísticos para analisar o comportamento do sinal, dentre eles, valor médio quadrático (RMS), o RMSD (*Root Mean Square Deviation*) e o desvio do coeficiente de correlação (CCDM), esses últimos fazem comparações entre o sinal de uma “*baseline*”, ou seja, uma situação próxima a ideal, com o sinal de uma situação com dano.

### 2.3.3.1 Transformada Discreta de Fourier (DFT) e Transformada Rápida de Fourier (FFT)

A transformada discreta de Fourier (DFT) é um procedimento muito comum, encontrado no campo de processamento digital de sinais. A DFT permite analisar, manipular e sintetizar sinais de maneiras que não são possíveis no processamento digital de sinais analógicos (LYONS, 2011).

Ainda de acordo com Lyons (2010) a DFT é um procedimento matemático utilizado para determinar as frequências ou harmônicas de um conteúdo de uma sequência de sinal discreto. A DFT é definida pela equação 2.7:

$$X(m) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)e^{\frac{-j2\pi mn}{N}} \quad (2.7)$$

Sendo:

- $X$  é o valor da DFT;
- $m$  é o índice da componente de saída da DFT no domínio da frequência;
- $x$  a sequência de amostras do sinal discreto;
- $n$  é o índice no domínio do tempo (discreto) das amostras.  $n = 0, 1, 2, 3 \dots N-1$ ;
- $j = \sqrt{-1}$ ;
- $N$  é o número de amostras.

A Transformada Rápida de Fourier (FFT) é um algoritmo numérico que foi desenvolvido para melhorar a eficiência computacional para o cálculo da DFT sendo um dos métodos mais populares utilizados na análise espectral do processamento digital de sinais. No algoritmo da FFT, quando o comprimento da amostra ( $N$ ) é escolhido como uma potência de  $2^R$ , onde  $R$  é um inteiro, o número de multiplicações complexas é da ordem de  $(N/2)/\log_2(N)$  e o número de adições complexas é da ordem de  $N\log_2(N)$  (SHENOI, 2005).

Um sinal senoidal composto por duas frequências, 50 e 120 Hz de amplitudes 0,7 e 1 respectivamente, contaminado por um ruído branco é apresentado na Figura 2.13a. O sinal foi amostrado a uma frequência de 1 kHz e possui duração de 1 segundo. O espectro de frequências do sinal é exibido na Figura 2.13b. Apesar do ruído branco distorcer o sinal observado, é possível com o auxílio da FFT encontrar as frequências principais do sinal.

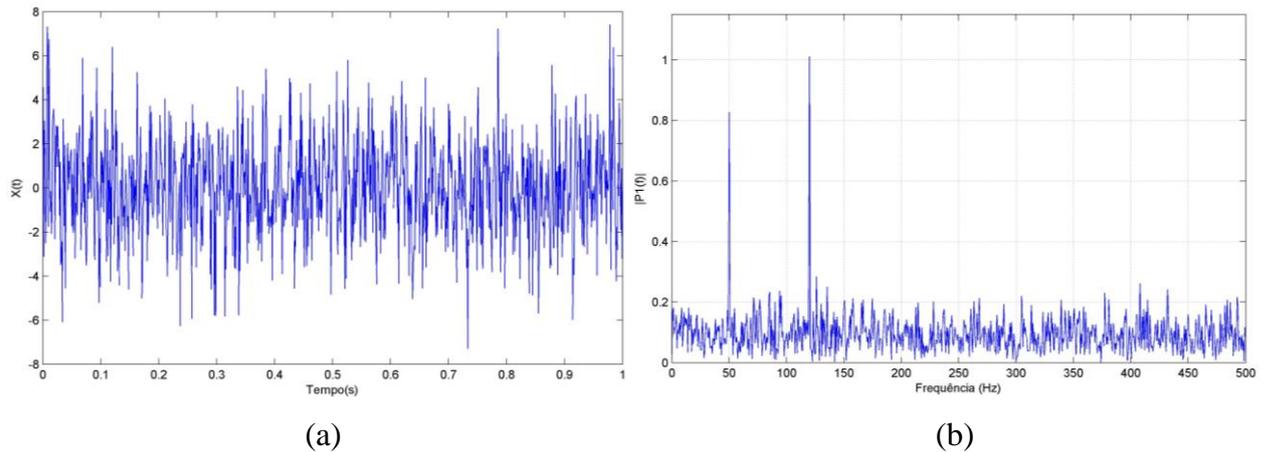


Figura 2.12- Sinal contaminado com ruído branco (a) e a respectiva FFT (b)

### 2.3.3.2 Densidade Espectral de Potência (PSD)

A potência do espectro revela a existência, ou ausência, de padrões repetitivos e estruturas de correlação em um sinal. Esses padrões estruturais são importantes em uma ampla gama de aplicações, tais como, previsão de dados, codificação do sinal, detecção do sinal, radar, reconhecimento de padrões e sistemas de tomada de decisão (VARSEGUI, 2000). Um sinal aleatório geralmente possui potência média finita, portanto, pode ser caracterizado por uma densidade espectral de potência média (MOSES, 2005).

A densidade espectral de potência (PSD – *Power Density Spectral*) de um sinal descreve o conteúdo de potência do sinal como função da frequência. A PSD representa a quantidade que cada potência está presente em cada frequência que constitui o sinal (FREITAS, 2016). A função PSD é um método padrão para extração de características de sinais estocásticos que descreve a distribuição de energia de um sinal no domínio da frequência (DE CASTRO et al., 2017).

Os métodos de estimação da PSD clássicos, apresentam algumas inconsistências na relação entre a quantidade de amostras e o resultado estimado. O método *Welch* tem surgido para resolver esse tipo de problema, sendo um método de periodogramas, ou seja, uma estimação de densidade espectral do sinal, usado para determinar a densidade de potências dos componentes de frequência de um sinal, baseado na FFT que permite a sobreposição dos segmentos de dados (CONCEIÇÃO JUNIOR et al., 2016)

De acordo com (SEMMLOW, 2004) o método *Welch* é um dos procedimentos mais populares para avaliar o periodograma. Nesta abordagem, segmentos sobrepostos são utilizados e a janela é aplicada a cada segmento. Na maioria dos casos é recomendado a utilização de 50%

de sobreposição, porém maiores quantidades foram recomendadas em outras aplicações e, quando o tempo de computação não é fator, a sobreposição máxima é indicada. Maiores informações sobre o método *Welch* são encontradas em (ALKAN; YILMAZ, 2007; PROAKIS et al., 2002; PROAKIS; MANOLAKIS, 2007; WELCH, 1967; ZHANG et al., 2014).

### 2.3.3.3 Transformada de Fourier de Tempo-Curto (STFT)

A Transformada Discreta de Fourier (DFT) é um método para análises de espectros em processamento digital de sinais, geralmente implementados utilizando a Transformada Rápida de Fourier (FFT). No entanto a FFT é inadequada para identificar transientes em sinais não estacionários (YANG; YU, 2012) pois não possui resolução no tempo. Neste contexto, uma abordagem alternativa consiste em segmentar uma sequência em um conjunto de subsequências de janelas curtas, com cada subsequência centralizada em um intervalo uniforme de tempo e sua DFT calculada separadamente. (ZHANG; YU; SHENG, 2006) dessa forma é obtida a Transformada de Fourier de tempo curto (*Short Time Fourier Transform* -STFT). Assim, a STFT é definida por (KIM et al., 2007; KIM; MELHEM, 2003) na Equação 2.8 e 2.9:

$$STFT(t, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} h(u)F(t - u)e^{-j\omega u} du \quad (2.8)$$

Sendo  $t$  é o tempo,  $\omega$  é a frequência e  $h(u)$  é uma função janela no tempo como retangular, Gaussiana, Blackman, Hanning, Hamming, Kaiser dentre outras.

$$X(m, \omega) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} x[n]f[n - m]e^{-j\omega n} \quad (2.9)$$

Sendo  $f[n]$  uma função janela de comprimento limitado  $L$ .

O resultado obtido pela STFT é uma representação bi-dimensional do sinal no tempo e frequência. Todavia, a limitação imposta pelo princípio de incerteza de Heisenberg requer neste tipo de representação uma relação entre as resoluções em cada domínio (LIMA et al., 2016). A precisão no tempo e frequência são principalmente determinadas através do comprimento da janela que é constante para todas as frequências (BACCAR; SÖFFKER, 2015). Dessa forma, uma janela de comprimento maior implica em uma resolução no domínio da frequência mais

precisa, porém com vistas a obter resolução mais acurada no tempo utiliza-se uma janela com comprimento menor.

Assim, é necessário conhecer as necessidades de resolução em tempo e frequência para que as informações relevantes sejam obtidas em ambos os domínios, para tanto, a escolha do tipo e do tamanho da janela é de suma importância para a implementação da STFT.

Além da STFT, existe outra transformada que possui resolução no tempo e na frequência denominada Transformada Wavelet. As técnicas de transformada Wavelet possuem vantagens na extração de características dos sinais sendo capazes de uma visão multi-resolução de componentes e frequência de um sinal em comparação com as técnicas de transformada de Fourier (GAO et al., 2002). A transformada Wavelet representa sinais usando uma combinação linear de funções base chamadas wavelets, cuja característica principal é que estão localizadas no tempo ou no espaço. Ao contrário de uma representação usando funções periódicas como senos e cossenos, a Transformada Wavelet permite que o conteúdo do sinal localizado seja analisado (FLETCHER; SANGWINE, 2017).

#### 2.3.3.4 Índices de danos estruturais

Índices de caracterização de danos, são amplamente utilizados no monitoramento da integridade estrutural (SHM – *Structural Health Monitoring*) em conjunto com técnicas EMI. Os índices mais comuns 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*), que foram usados com a técnica EMI na detecção de queima na retificação (MARCHI et al., 2015).

De acordo com (ALMEIDA; BAPTISTA; AGUIAR, 2015), o índice RMSD é baseado na norma Euclidiana e diversas variações deste índice podem ser encontradas na literatura. A Equação 2.10 apresenta o índice RMSD (RIBEIRO et al., 2017):

$$RMSD = \sum_{k=\omega_I}^{\omega_F} \sqrt{\frac{[X_D(k) - X_H(k)]^2}{X^2_H(k)}} \quad (2.10)$$

Sendo que os índices  $H$  e  $D$  indicam as condições intacta e com dano, respectivamente, enquanto  $X_H(k)$  e  $X_D(k)$  são as assinaturas do espectro em frequência da estrutura intacta e condições de dano, respectivamente, e são determinadas por uma frequência  $k$  que varia de  $\omega_I$  (frequência inicial) até  $\omega_F$  (frequência final).

Outro índice estatístico bastante utilizado em SHM é o CCDM, definido pela Equação 2.11 (ALMEIDA; BAPTISTA; AGUIAR, 2015):

$$CCDM = 1 - \frac{\sum_{k=\omega_l}^{\omega_F} [X_H(k) - \bar{X}_H][X_D(k) - \bar{X}_D]}{\sqrt{\sum_{k=\omega_l}^{\omega_F} [X_H(k) - \bar{X}_H]^2} \sqrt{\sum_{k=\omega_l}^{\omega_F} [X_D(k) - \bar{X}_D]^2}} \quad (2.11)$$

#### 2.4 Monitoramento de danos térmicos na retificação

A retificação é um processo de manufatura complexo influenciado por muitos fatores tal como, a peça, a máquina retificadora, e os parâmetros do processo. Em manufatura, sistemas inteligentes podem ser comparados a operadores qualificados que utilizam seu conhecimento para operar a máquina ferramenta. Assim, esses sistemas devem possuir sensores precisos, baixo custo de implementação e ferramentas computacionais eficientes desenvolvidas para serem capazes de reproduzir a decisão do operador (MOIA et al., 2015)

Ao longo dos anos diversos pesquisadores tem aplicado inúmeras abordagens no monitoramento do processo de retificação, com intuito de monitorar as condições do rebolo, da operação de dressagem, da superfície da peça e do processo retificação de uma forma mais completa (HUNDT et al., 1994; KARPUSCHEWSKI; WEHMEIER; INASAKI, 2000; SUTOWSKI; NADOLNY; KAPLONEK, 2012; TÖNSHOFF; FRIEMUTH; BECKER, 2002; WARREN LIAO, 2010; WEBSTER; MARINESCU, 1994; YANG; YU, 2012; ZENG; FORSSBERG, 1994b).

A ocorrência da queima pode aparecer sob ou sobre a superfície da peça, causando em alguns casos re-endurecimento da camada superficial e em outras situações a perda de dureza na superfície (ROWE et al., 1988).

A detecção da ocorrência do fenômeno de queima no processo de retificação através de um sistema inteligente ou um conjunto de sensores que o façam de forma automática é um problema crítico. As altas temperaturas geradas na zona de contato entre a peça e o rebolo podem causar diversos tipos de danos dentre eles a queima (MIRANDA et al., 2010).

A estimativa da vida útil do rebolo em face da necessidade da operação de dressagem utilizando como critério a ocorrência do fenômeno de queima é apresentado por (DEIVA NATHAN; VIJAYARAGHAVAN; KRISHNAMURTHY, 1999). Os testes foram executados em uma retificadora cilíndrica com peças de aço C60. A temperatura foi mensurada através de um pirômetro fixado a uma distância de 50 cm do fluxo de centelhamento. Além disso, os experimentos foram executados com o rebolo recém dressado. A temperatura de centelhamento e

a potência foram monitoradas simultaneamente para diferentes condições de retificação. Uma rede neural do tipo *back-propagation* foi utilizada para prever o momento da queima. As variáveis de entrada foram a velocidade da mesa (*the in-feed*), a potência da retificação e o diâmetro da peça, como variável de saída o tempo para a queima, ou seja, o parâmetro de vida útil do rebolo. A conclusão dos autores é de que o início da queima é um parâmetro muito útil para a determinação do período de vida útil do rebolo.

O monitoramento on-line do fenômeno de queima utilizando uma abordagem com sensores integrados é proposto por (SARAVANAPRIYAN; VIJAYARAGHAVAN; KRISHNAMURTHY, 2001). Os sensores utilizados foram de Emissão Acústica (EA), Vibração, Temperatura e Força. Os experimentos foram executados em uma máquina retificadora transversal plana com peças de aço rápido. Um suporte para o multi-sensoriamento foi desenvolvido para que os sensores estivessem próximos da peça. Uma rede neural do tipo *back-propagation* (Levenberg – Marquardt) foi utilizada para prever a temperatura de queima. A entrada da rede consistiu dos níveis de RMS dos sinais de emissão acústica e vibração, o número de ciclos de retificação bem como a força de retificação foram utilizados. Os resultados apresentaram maior efetividade na detecção da queima, apesar da estrutura pouco usual de multi-sensoriamento.

O uso de EA aliado a RNA foi apresentado em (WANG et al., 2001) com intuito de detectar a queima. O estudo aborda o uso de parâmetros estatísticos como *kurtosis*, *coeficientes auto-regressivos*, *skewness*, desvio do valor médio (MVD), dentre outros para o mesmo fim. Os experimentos foram executados em uma retificadora tangencial plana equipada com rebolos de óxidos de alumínio, as peças consistiam de aço 52100. A taxa de amostragem do sistema de aquisição de dados foi de 2,56 MHz. Testes de dureza e medidas do perfil da superfície foram efetuadas, com vistas a confirmação da condição de queima. Os resultados demonstram que a rede neural do tipo RBF (*Radial-Basis function*) obteve sucesso na identificação de queima em detrimento das estatísticas utilizadas de forma isolada, demonstrando a eficácia do uso de RNA na detecção de queima das peças no processo de retificação.

O fenômeno de queima na retificação de superligas baseadas em níquel foi estudado por (MING et al., 2001). Este tipo de material é utilizado em turbinas aeroespaciais e possui como característica resistência ao calor e a força. A força de retificação foi mensurada através de dinamômetro e a temperatura de retificação foi mensurada através de um termopar elétrico. Após o processo as peças foram polidas e a metalografia foi efetuada, ademais, testes de dureza e stress residual também foram feitos. Os resultados mostram que existe correspondência entre a temperatura de retificação, a cor e topografia da superfície da peça. A partir de 1.100 °C uma

coloração amarela-preta aparece e as propriedades mecânicas da camada superficial se deterioram rapidamente. Quando ocorre a queima a tensão residual da superfície da peça é relativamente alta. A relação entre a força de retificação normal e tangencial sofre mudanças abruptas na ocorrência do fenômeno de queima, podendo ser utilizada como parâmetro para monitoramento da queima.

A proposta de um parâmetro que agrupasse as características de Emissão Acústica (EA) e a potência no processo de retificação para detecção de queima foi apresentado por (AGUIAR; BIANCHI; OLIVEIRA, 2002). O parâmetro DPO é o produto entre o nível de potência e desvio padrão do sinal de Emissão Acústica (EA). A ocorrência de queima em dois tipos de aços foi estudada, sendo ABNT 1020 e VC131 em uma máquina retificadora equipada com rebolo de óxido de alumínio. Os resultados mostram que o parâmetro DPO proposto é o melhor indicativo de queima se comparado a análise dos sinais de forma individual. Assim a implantação de um sistema relativamente simples para o monitoramento do processo é possível, ressaltando que a calibração do sistema é necessária.

A eficiência da aplicação de ferramentas de processamento digital em sinais de emissão acústica para a detecção de danos térmicos no processo de retificação foi demonstrado por (AGUIAR et al., 2004). Os ensaios foram realizados em uma retificadora tangencial plana equipada com um rebolo de óxido de alumínio. As peças analisadas foram de aço ABNT 1045. Uma taxa de amostragem de 2,5 MHz foi empregada para aquisição dos sinais originais. Várias estatísticas como RMS (*Root Mean Square*), CFAR (*Constant False Alarm*) e MVD (*Mean – Value Deviance*) foram aplicadas aos sinais com o objetivo de encontrar limiares que identificassem a ocorrência de queima. Os resultados mostram que as várias estatísticas empregadas funcionaram de forma satisfatória e algumas superam o desempenho do RMS do sinal original, dessa forma a proposta de estatística alternativas apresentou-se viável.

A utilização de transformada *wavelet* para extrair características do sinal de Emissão Acústica (EA) dentre eles a ocorrência de queima e aplicação de reconhecimento de padrões com lógica fuzzy para otimização das características e identificação do estado do processo de retificação foi apresentada por (LIU; CHEN; GINDY, 2005). Os experimentos foram realizados em um centro de usinagem CNC com rebolo de óxido de alumínio e as peças utilizadas foram de Inconel 718. Dois sensores de emissão acústica foram utilizados, um adaptado para altas frequências, da ordem de 751 kHz enquanto outro adaptado para baixas frequências da ordem de 112 kHz. As características dos sinais foram extraídas através de Transformada *Wavelet* e o reconhecimento de padrões fuzzy foi utilizado para distinguir as características predominantes. Os resultados mostram que o sinal de Emissão Acústica (EA) possui muitas informações acerca

do processo de retificação e que a extração de características através de transformada *wavelet* aliado a otimização com clusterização fuzzy permite a identificação da ocorrência de queima.

O desenvolvimento de um sistema inteligente dedicado a detecção de queima no processo de retificação através do constante monitoramento do processo por sinais de emissão acústica e potência foi apresentado por (DOTTO et al., 2006). Um software foi desenvolvido com objetivo de enviar um sinal de controle avisando o operador a ocorrência de queima ou até mesmo atuar no processo via Internet. Os experimentos foram realizados em uma máquina retificadora tangencial plana com rebolos de óxido de alumínio e aço ABNT 1045. Alguns parâmetros estatísticos foram propostos como o DPKS, DAREA e DIFP para avaliar limiares condizentes com os níveis de queima. Após as análises o software foi criado utilizando *Visual Basic*® do *Windows*®. Os resultados mostram que o programa possui uma excelente performance, ressaltando, que tal resultado depende do uso correto dos parâmetros de queima. Além disso, os parâmetros propostos se usados em conjunto aumentam a precisão dos resultados evitando tomada de decisões errôneas.

A simulação em um ambiente controlado do fenômeno de queima sob investigação de sinais de emissão acústica (EA) foi proposta por (LIU; CHEN; GINDY, 2006). Através de um conjunto de experimentos a laser o comportamento térmico da queima foi simulado. Um sensor de emissão acústica foi fixado atrás da peça para monitorar as mudanças no material. Após a aquisição dos sinais fez-se uso da Transformada Wavelet para obter as características do fenômeno de queima presentes no sinal. Os resultados mostram claramente que a distribuição de energia em sinais de emissão acústica sob alta expansão térmica se concentra em bandas de alta frequência. No entanto, o contrário ocorre quando se trata de temperaturas mais baixas, onde observou-se que a distribuição de energia se concentra em baixas frequências.

A identificação do fenômeno de queima e vibrações auto-excitadas (*chatter*) ao mesmo tempo através de algoritmos genéticos é proposta por (GRIFFIN; CHEN, 2009). Os ensaios foram realizados em uma retificadora cilíndrica com rebole de óxido de alumínio e peças de Inconel 718. O processo foi monitorado por sensores de emissão acústica (EA), potência, dinamômetro e acelerômetro. Por meio da *Transformada Rápida de Fourier* (FFT), Transformada Wavelet e Transformada curta de Fourier (STFT) as assinaturas de frequências relativas aos fenômenos foram identificadas. Análises da superfície como a rugosidade foram efetuadas. Após a identificação aplicou-se algoritmos genéticos para classificar os diferentes fenômenos constantes no processo. Os resultados mostram que através da aplicação de algoritmos genéticos foi possível identificar os dois fenômenos (vibrações auto-excitadas e queima) de forma distinta e com precisão.

O monitoramento do processo de retificação baseado em lógica fuzzy a partir de sinais de emissão acústica e potência foi proposto por (MIRANDA et al., 2010). A confecção do sistema fuzzy fez uso do parâmetro estatístico de desvio do valor médio (MVD) aplicados aos sinais adquiridos durante o processo de retificação. Os ensaios foram executados em uma máquina retificadora plana equipada com um rebolo de óxido de alumínio e peças de aço 1020. Após a aquisição e o processamento digital dos sinais alguns modelos fuzzy foram propostos. Os resultados indicam que os modelos são adaptáveis a diferentes circunstâncias devido a quantidade de entradas que possuem, ou seja, a utilização dos mesmos depende da necessidade do monitoramento. Todos os modelos foram validados, porém são limitados a aplicação em aço 1020.

Um sistema de classificação baseado em máquina de vetores de suporte (SVM – *support vectore machine*) para identificar o fenômeno de queima na retificação foi apresentado por (YANG; YU, 2013). Os experimentos foram realizados em uma retificadora tangencial plana equipada com um rebolo de óxido de alumínio em peças de aço AISI 1045. O processo foi monitorado por um sensor de emissão acústica (EA) e um sensor de potência. Após os experimentos as características dos sinais de emissão acústica (EA) foram extraídas através da utilização Transformada Rápida de Fourier e Transformada Discreta Wavelet. O centroide dos espectros de Emissão Acústica, potência e RMS da Emissão Acústica foram utilizados como vetor de entrada para o sistema de classificação. Os resultados mostram que a classificação alcançou cerca de 91,67 % de assertividade, indicando que o sistema é muito bom para a predição da ocorrência de queima.

A utilização do sensor de vibração em conjunto com emissão acústica (EA) como entradas de um sistema inteligente para detecção de queima na retificação é apresentado por (NETO et al., 2014). Os ensaios foram realizados em uma retificadora tangencial plana com rebolo de óxido de alumínio e aço SAE 1020. Algumas profundidades de corte foram empregadas e a rugosidade da superfície das peças foi aferida. A partir das análises dos sinais no domínio da frequência e seleção de bandas que melhor caracterizassem o fenômeno de queima alguns filtros digitais foram projetados. Em seguida, obteve-se o RMS dos sinais filtrados para que um vetor de entradas fosse utilizado em alguns modelos de RNA. Os resultados mostram que o modelo de RNA que utilizou o RMS dos sinais de vibração e emissão acústica filtrados em duas bandas distintas alcançou 98,3% de sucesso na classificação, indicando a robustez e alta assertividade do modelo RNA proposto.

Um sistema de sensores composto de sensores de corrente do motor, sensores de tensão, acelerador e sensor de EA foi apresentado por (YANG et al., 2014) com o objetivo de extrair

características de queima no processo de retificação. A transformada de Hilbert-Huang (HHT) foi aplicada como ferramenta de processamento de sinal para sintetizar as informações dos sinais originais de EA e do acelerômetro. Ademais, um critério de filtragem foi proposto baseado na média de energia dos componentes da IMF (*Intrinsic Mode Function*). Os ensaios foram realizados em uma retificadora tangencial plana com rebolo de óxido de alumínio e peças de aço AISI 1045. Através da amplitude espectral e do centroide a ocorrência de queima ficou evidente. Os resultados indicam que a aplicação de HHT aos sinais de EA para detecção de queima na retificação é de grande potencial.

A utilização de diafragmas piezelétricos para detecção da integridade da superfície e ocorrência de queima na peça dentro do processo de retificação foi apresentada por (RIBEIRO et al., 2015). Os ensaios foram realizados em uma máquina retificadora plana equipada com um rebolo de óxido de alumínio e aços SAE 1045. Os testes consistiram de retificação em diferentes profundidades de corte, mantendo os outros parâmetros como a velocidade da mesa constantes. A rugosidade das peças foi aferida para confrontar os resultados obtidos. A taxa de amostragem do sinal do diafragma piezelétrico foi de 2 MHz. As técnicas de processamento como filtros digitais e RMS foram empregadas com o objetivo de identificar características relacionadas a integridade e a queima na superfície da peça. Os resultados mostraram uma forte correlação entre as características extraídas do sinal e o comportamento da rugosidade das peças, indicando dessa forma a eficiência do diafragma piezelétrico quando comparado a outros métodos de monitoramento.

A utilização do método de impedância eletromecânica (EMI) para monitorar a integridade da superfície e a ocorrência de queima no processo de retificação através de diafragmas piezelétricos de baixo custo é apresentada por (MARCHI et al., 2015). Os testes foram executados em uma retificadora tangencial plana equipada com rebolo CBN e peças de aço SAE 1020. Durante processo de retificação a impedância elétrica dos transdutores foi mensurada e os índices de danos, como o RMSD e o CCDM, convencionalmente utilizados no método EMI foram calculados e comparados com o estado da peça. Os resultados mostram que a variação das condições da superfície da peça está correlacionada com as variações da impedância elétrica, permitindo assim o monitoramento em tempo real para prevenir a queima.

Um estudo comparativo da eficiência de rebolos de carboneto de silício (SiC) e rebolos de óxido de alumínio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) no processo de retificação de superligas de Inconel 718 foi apresentada por (SINHA et al., 2016). O fato do Inconel possuir elevada dureza, alta resistência ao calor, severo endurecimento por deformação e baixa condutividade térmica torna-o um material de difícil usinagem. Após o processo de retificação a integridade da superfície foi avaliada

através de alguns métodos como a difração de raio-X (XRD), a espectroscopia de raio-X (XPS), espectroscopia fotoelétrica de raio-X (XPS), testes de microdureza e medidas de rugosidade da superfície. Os resultados mostram que o coeficiente de fricção do rebolo de óxido de alumínio é mínimo quando comparado ao rebolo de carboneto de silício, indicando maior facilidade na retificação, ou seja, neste estudo o rebolo de óxido de alumínio apresentou maior eficiência.

### Capítulo 3 -MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção são descritos o banco de ensaios para os testes de retificação das peças de aço ABNT 1045 e VC131, o processamento digital de sinais, como a seleção da passada pertencente ao sinal original, a análise via Densidade Espectral de Potência (PSD), a análise dos sinais de potência amostrados durante o processo, a aplicação de filtros digitais e a análise por meio da STFT, com o objetivo de relacionar e identificar nos sinais amostrados os eventos observados nas inspeções visuais após o processo de usinagem, bem como, nas medidas de dureza Vickers e nos testes de metalografia que indicam as mudanças estruturais nas peças retificadas. Assim, por meio dos resultados será possível depreender os eventos ocorridos no processo através do processamento digital de sinais.

#### 3.1 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS E BANCO DE ENSAIOS

Os ensaios foram realizados em uma máquina retificadora tangencial plana Sulmecânica, modelo RAPH 1045 equipada com um rebolo de óxido de alumínio, fabricado pela empresa NORTON, modelo 38A150LVH (Granulometria Fina e Dureza Média). As peças de aço ABNT 1045 foram utilizadas como material para análise da ocorrência de queima. O diagrama esquemático dos procedimentos experimentais está disposto na Figura 3.1.

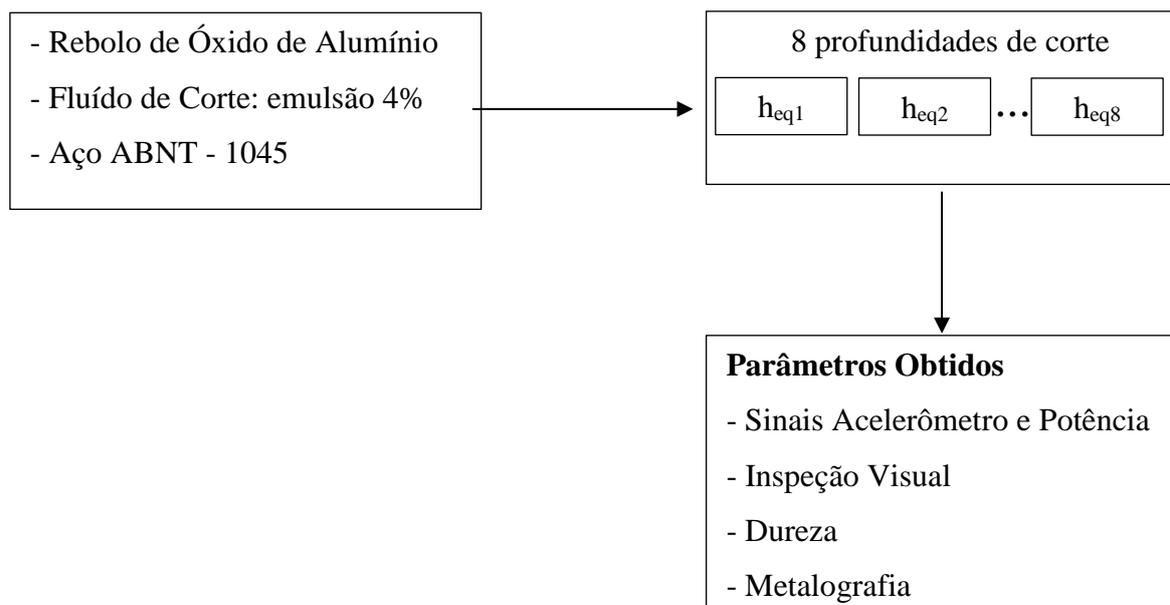


Figura 3.1- Diagrama esquemático dos procedimentos experimentais.

O esquemático do banco de ensaios em conjunto com o acelerômetro (sensor de vibração), seu respectivo amplificador e a coleta do sinal através do osciloscópio e posterior processamento dos sinais adquiridos pode ser conferido na Figura 3.2.

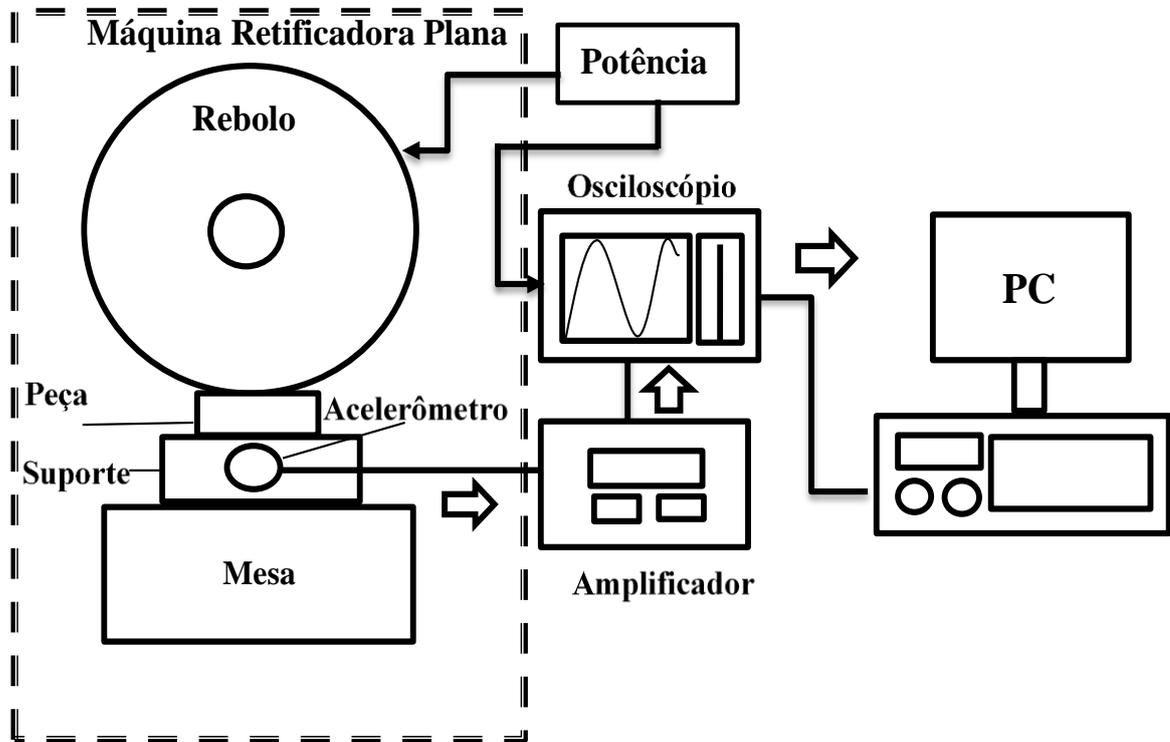


Figura 3.2- Representação esquemática dos ensaios e coleta dos sinais.

A velocidade de corte ( $v_s$ ) foi constante para todo o processo bem como a velocidade de avanço da mesa ( $v_w$ ). Oito profundidades de corte diferentes ( $a$ ) foram escolhidas com objetivo de verificar a ocorrência de queima com o avanço gradual da profundidade de corte. Apenas uma passada de retificação foi efetuada por teste. Antes do início do Ensaio 1 o rebolo foi dressado com um dressador do tipo ponta única.

A aquisição da vibração foi efetuada por um acelerômetro da empresa PCB Piezotronics, modelo 353B03, consistindo de um sensor fixo ao suporte da peça e um módulo amplificador com ganho 20. A sensibilidade do acelerômetro consiste de  $1,02 \text{ mV}/(\text{m/s}^2)$ , frequência de ressonância de 38 kHz e faixa de frequência de 1 até 7 kHz. Os sinais foram amostrados por um osciloscópio, modelo DL850, da empresa Yokogawa, com frequência de amostragem de 2 MHz. Após a aquisição dos sinais, os mesmos foram processados posteriormente em um computador, através do software Matlab®. O aspecto mecânico do acelerômetro pode ser verificado na Figura 3.3.

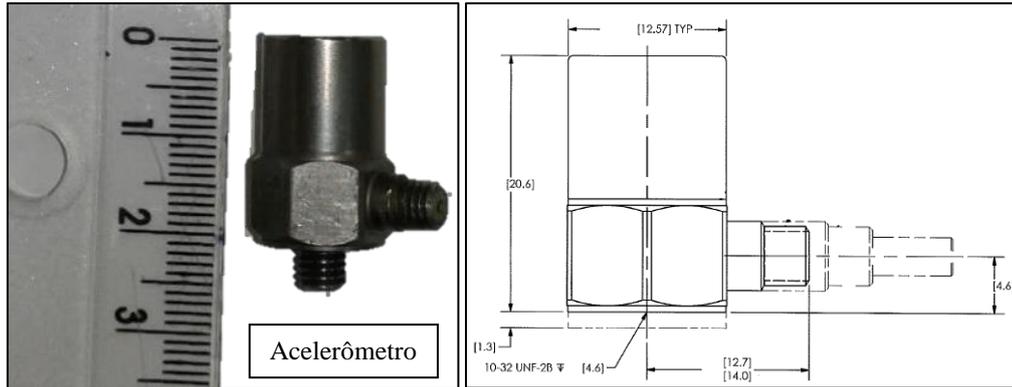


Figura 3.3- Acelerômetro modelo 353B03 e o respectivo esquemático.

O acelerômetro foi fixado na parte inferior do suporte da peça como pode ser observado na Figura 3.4. Os outros sensores alocados, como o PZT da peça, o PZT do suporte e o sensor de EA não foram considerados neste trabalho, portanto seus sinais não são apresentados. O acelerômetro foi testado de acordo com sua sensibilidade para gerar os sinais com boa qualidade e sem saturação.



Figura 3.4- Banco de ensaios para testes experimentais.

A aquisição da potência foi efetuada pela medição da corrente elétrica utilizando uma garra amperimétrica da empresa Tektronics, modelo A621, com faixa de frequência de até 3dB/Hz, sendo instalada no cabo de alimentação do motor trifásico (380 V e 7,5 cv), responsável pelo movimento do eixo do rebolo. A partir da medição da corrente durante as passadas de retificação a potência pode ser inferida. O fator de conversão utilizado pela garra foi de valor 10, ou seja, de 0,1 a 10 A corresponde a 100 mV/A. A potência foi calculada por meio de uma curva de calibração que relaciona os valores da corrente elétrica medidos com os valores da potência mecânica de acordo com os dados cedidos pelo fabricante do motor trifásico. A Equação 3.1 define a relação entre a corrente elétrica (A) e a potência mecânica (W) para o motor que foi monitorado neste trabalho. Por fim, o valor RMS da potência foi calculado com uma janela de 32.000 pontos para cada passada amostrada.

$$P = 0.12 * I^4 - 3.3 * I^3 + 30 * I^2 + 6.2 * I + 9.6 \quad (3.1)$$

Sendo,  $P$  = Potência (Watts);  $I$  = Corrente (A)

As peças utilizadas foram de aço ABNT 1045, temperado e revenido, cuja composição é (peso em %): C: 0,43-0,50; Si: 0,17; Mn: 0,52; S: 0,031; P: 0,032 e Fe balanceado). O fluido de corte foi empregado em todos os ensaios sendo do tipo água/óleo com emulsão 4%, pressão de 0,4 MPa e a taxa de vazão de 84 l/min. A temperatura mensurada próxima dos sensores foi aproximadamente constante e igual a 24 °C.

Referente às peças do aço ABNT 1045 retificadas com rebolo óxido de alumínio, um total de oito peças foram utilizadas, sendo uma peça para cada ensaio, com diferentes profundidades de corte e, conseqüentemente, diferentes espessuras equivalentes de corte ( $h_{eq}$ ), ambos os valores podendo ser conferidos na Tabela 1. Os parâmetros da retificação, usados em todos os oito ensaios, são descritos a seguir:

- velocidade periférica do rebolo: 29,0 m/s;
- velocidade de avanço da mesa: 0,124 m/s;
- diâmetro do rebolo: 307,8 mm;
- largura do rebolo: 25,4 mm;
- dimensões da peça: comprimento= 150,0 mm, largura= 7,0 mm.

Tabela 1: Condições dos ensaios para o aço ABNT 1045 e rebolo óxido de alumínio

Teste n.	Profundidade de Corte ( $a_e$ ), $\mu\text{m}$	$h_{eq}$ ( $\mu\text{m}$ )
1	5	0,0214
2	10	0,0428
3	15	0,0641
4	20	0,0855
5	25	0,1069
6	35	0,1497
7	45	0,1924
8	55	0,2351

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

### 3.2 AVALIAÇÃO SUPERFICIAL DAS PEÇAS ABNT 1045

As inspeções visuais foram realizadas por meio de fotografias de alta resolução para auxiliar na identificação da ocorrência do fenômeno de queima. Após o processo de retificação as peças foram digitalizadas por meio de um *scanner*, modelo ScanJet G4050, da empresa Hewlett-Packard (HP), com uma resolução de 300 dpi.

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

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

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

Após o polimento, foi efetuado um ataque químico nas amostras usando Nital 2%, no intuito de permitir uma melhor análise ao utilizar o microscópio ótico responsável pela análise metalográfica. Por meio desta análise, foi possível visualizar características microestruturais das amostras, além de capturar imagens de regiões que possam caracterizar alterações na sua microestrutura, como o surgimento da camada branca, o que indica a ocorrência do fenômeno de queima. Para essa análise e captura de imagens foi empregado um microscópio Olympus, modelo BX51M.

Os testes de dureza Vickers foram efetuados com um microdurômetro da empresa Mitutoyo, modelo HM211. A dureza, como a metalografia, auxilia na identificação de mudanças que podem ter ocorrido na superfície da peça. A primeira indentação foi feita a partir de 20 mm do início da peça e última foi feita em 130 mm. A carga utilizada para as indentações foi de 500 gramas, consistindo em 11 colunas ao longo do comprimento da peça. Em cada coluna 3 indentações foram executadas com espaçamento de 1 mm. A média e o desvio padrão foram calculados para as três medidas de microdureza. O esquemático de medições de dureza que foram realizadas na superfície de cada peça usinada é apresentada na Figura 3.5.

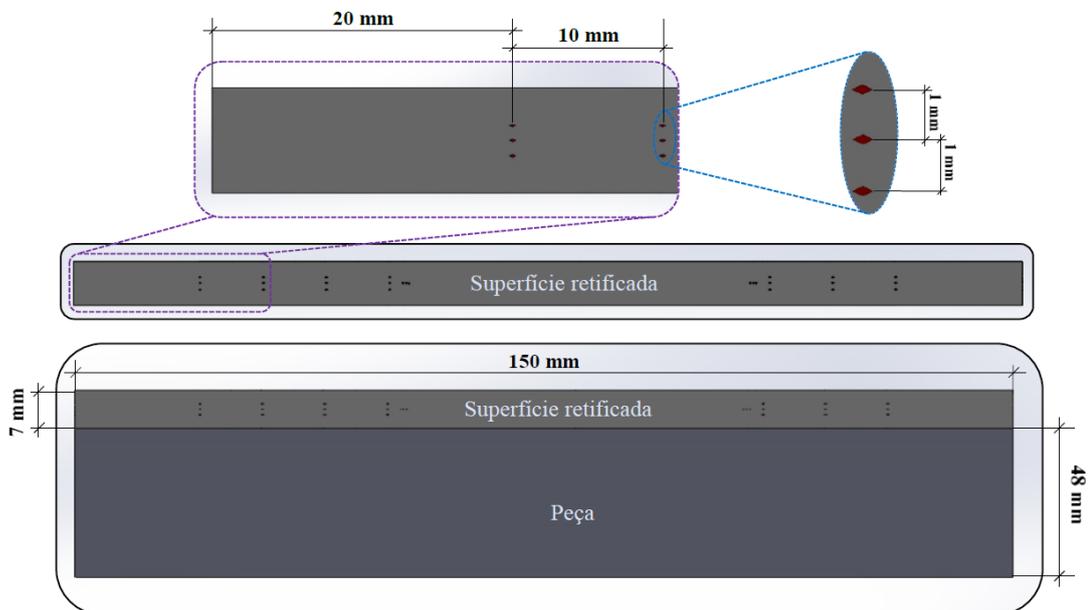


Figura 3.5- Modelo das medições de dureza realizadas na superfície das amostras.

### 3.3 PROCESSAMENTO DIGITAL DE SINAIS

O conjunto de dados dos ensaios foram processados digitalmente no ambiente Matlab®.

Um estudo do sinal de vibração e potência inicialmente amostrados foi efetuado para identificar o conjunto de dados referente a passada na retificação e o conjunto de dados referente ao ruído do processo. O sinal (vibração e potência) no processo de retificação é composto por um período de aproximação entre rebolo e a peça, que corresponde ao ruído, pois há baixa atividade e nenhuma remoção de material e composto também pela própria passada, em que há o contato entre o rebolo e a peça provocando o aumento de amplitude dos sinais amostrados. A partir do sinal de vibração dois vetores de dados foram criados. O primeiro vetor contendo os dados referente a passada de retificação e o segundo vetor contendo os dados referente ao ruído do processo.

Após a separação dos dados referentes a passada de retificação e o ruído do processo, procedeu-se a análise em frequência de ambos os vetores por meio da Densidade Espectral de Potência (PSD) e da Transformada Rápida de Fourier (FFT) com o objetivo de identificar bandas de frequência que melhor se relacionassem com processo além de detectar a interferência do ruído nos sinais analisados.

A FFT do vetor correspondente a passada de retificação foi calculada da seguinte forma:

- (1) Dois pontos equidistantes no vetor foram selecionados.
- (2) A partir dos pontos dois vetores de comprimento igual a  $2^{19}$  pontos foram criados com os dados do vetor original.
- (3) Efetuou-se o cálculo da FFT com janela de *Hamming* de ambos os vetores de  $2^{19}$  pontos.
- (4) A média entre os dois vetores ponto a ponto foi efetuada, gerando um vetor com a FFT média do sinal.

O mesmo procedimento foi aplicado ao vetor referente ao ruído do processo. Em relação a Potência Espectral de Potência (PSD) foi utilizado o método *Welch* e foi aplicado o mesmo procedimento efetuado na FFT no que tange a seleção dos pontos e comprimento dos vetores. Ressalta-se que esse processo (análise em frequência) foi aplicado somente aos vetores correspondentes ao sinal de vibração.

Após a seleção de bandas de frequências foi necessário aplicar uma decimação no sinal de vibração devido à quantidade de dados que o mesmo possuía, o que inviabilizaria a análise do sinal através da Transformada de Fourier de Tempo Curto (STFT). Os sinais de vibração correspondentes as passadas de retificação, continham em média, cerca de dois milhões de pontos. Assim, a aplicação da STFT sem a decimação do sinal de vibração seria inviável devido a quantidade de processamento necessária. Dessa forma, uma decimação foi efetuada e assim

obteve-se uma nova taxa de amostragem ( $F_s'$ ) que é inversamente proporcional a razão entre a taxa de amostragem original ( $F_s$ ) e o fator de decimação ( $M$ ) (PAL; DUBEY; PAL, 2014). Por exemplo, um sinal amostrado a uma taxa de 2 MHz durante dois segundos, possuirá quatro milhões de pontos. No momento que a decimação é aplicada, utilizando um fator  $M$  igual a 100, obtemos como resultado apenas quarenta mil pontos do sinal que antes possuía quatro milhões de pontos.

De acordo com as especificações do sensor de vibração apresentadas, a frequência máxima do sensor é de 7 kHz. Baseado no teorema de Shannon-Nyquist, o fator escolhido para decimação foi de 100, o que resulta em uma frequência de amostragem de 20 kHz.

A decimação do sinal foi efetuada da seguinte forma:

- (1) Selecionou-se o vetor de dados correspondente a passada de retificação.
- (2) Aplicou-se a decimação com um fator de 100.
- (3) Obteve-se um vetor menor do que o original (quantidade de dados), porém mantendo a mesma natureza, pois o Teorema da Amostragem foi respeitado.

Após a decimação do sinal de vibração correspondente a passada de retificação um filtro digital *bandpass*, ordem 10 foi aplicado levando em consideração a escolha das bandas obtidas nas análises de frequências e que melhor caracterizassem o processo e evitassem a presença de ruídos que poderiam ser prejudiciais as análises.

Para aplicação da Transformada de Fourier de Tempo Curto (STFT), foi adotada a janela retangular de 600 pontos, sobreposição de 90% e NFFT de 8192. A Equação 3.1 define a forma para obtenção da resolução de frequência.

$$\Delta F = m * \frac{F_s}{N} \quad (3.1)$$

Onde  $\Delta F$  é a resolução em frequências em Hz,  $m$  é o coeficiente de resolução da janela,  $F_s$  é a frequência de amostragem e  $N$  é o comprimento da janela.

A resolução no tempo ( $\Delta t$ ) é o produto do comprimento da janela ( $N$ ) pelo período de amostragem ( $T_s$ ). Onde o período de amostragem ( $T_s$ ) é igual ao inverso da taxa de amostragem ( $F_s$ ).

A STFT foi aplicada da seguinte maneira:

- (1) Selecionou-se o vetor de dados do sinal de vibração referente a passada de retificação

filtrado na banda de frequência escolhida.

- (2) Aplicou-se a STFT com a janela do tipo retangular de 600 pontos.
- (3) Efetuou-se a análise.

Por fim, o cálculo do RMSD foi efetuado através de uma janela de 16.384 pontos, o que equivale a aproximadamente 7 ms, ou seja, próximo a distância de 1 mm percorrida pelo rebolo sobre a peça.

Conforme citado, o processamento digital de sinais foi feito para todos os sinais coletados. Na Figura 3.6, pode-se conferir um esquema de como esse processamento foi feito.

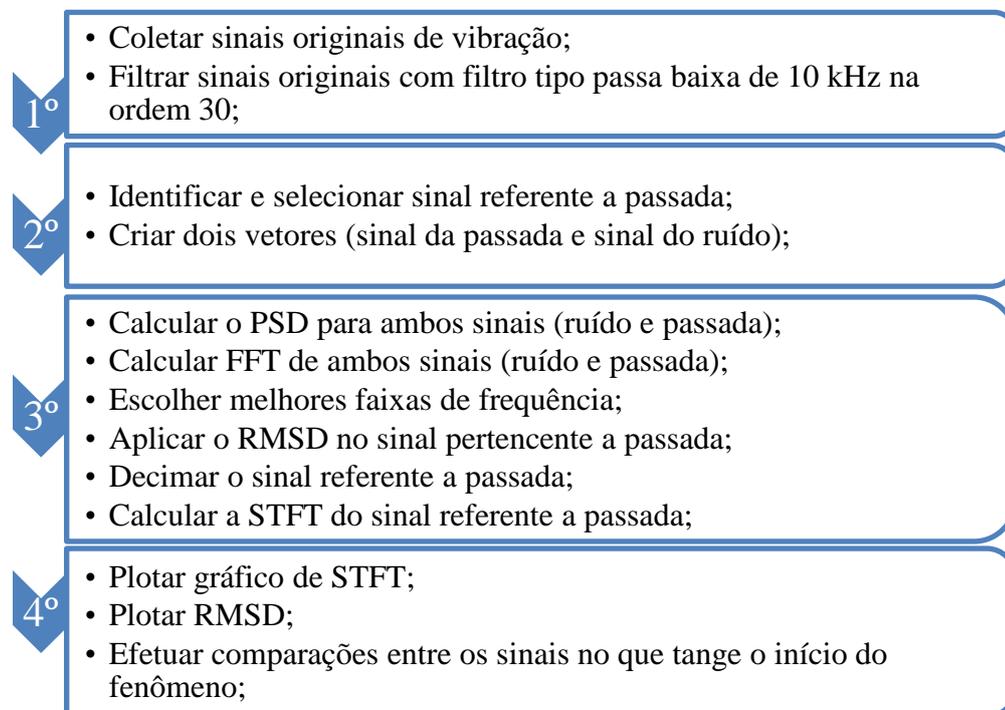


Figura 3.6- Esquema do processamento de sinais.

### 3.4 VERIFICAÇÃO DO MÉTODO PROPOSTO

Os ensaios realizados com o rebolo de óxido de alumínio e as oito peças de aço ABNT 1045 foram definidos como o método para a avaliação do conjunto de técnicas propostas para detecção do fenômeno de queima em peças de aço a partir de sinais de vibração. Contudo, visando verificar o método proposto, novos ensaios foram realizados, utilizando desta vez um material diferente, a saber, o aço VC131, no total de seis peças, mantendo o rebolo de óxido de alumínio.

Os parâmetros da retificação, usados em todos os seis ensaios foram idênticos aos ensaios com o aço ABNT 1045, visto que, o objetivo da verificação é somente alterar o parâmetro principal, no caso, o material a ser retificado e assim verificar a eficácia ou não do método proposto:

Todos os procedimentos e medições realizados previamente também foram aplicados para as novas peças usinadas, bem como todo o processamento digital, seleção de bandas e aplicação de índices de dano. A sumarização de como se deu a realização dos testes é apresentado na Tabela 2. A quantidade de ensaios foi menor em relação ao aço ABNT 1045 devido ao fato das condições necessárias ao estudo proposto serem observadas antes do esperado, ou seja, a ocorrência da queima foi constatada com uma menor quantidade de ensaios do que o inicialmente proposto.

Tabela 2: Condições dos ensaios para o aço VC131 e rebolo de óxido de alumínio

<b>Teste n</b>	<b>Profundidade de Corte (<math>a</math>) <math>\mu\text{m}</math></b>	<b><math>h_{eq}</math> <math>\mu\text{m}</math></b>
<b>1</b>	5	0,0214
<b>2</b>	10	0,0428
<b>3</b>	15	0,0641
<b>4</b>	20	0,0855
<b>5</b>	25	0,1069
<b>6</b>	30	0,1283

Os resultados iniciais obtidos para os ensaios referentes ao método, assim como os novos ensaios utilizados para a verificação do método de identificação proposto são descritos e explicados no Capítulo 4, por meio da comparação dos resultados de ambos os ensaios de aço ABNT 1045 e VC131.

## CAPITULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

---

Este capítulo aborda os resultados obtidos a partir dos procedimentos experimentais, sendo consideradas duas etapas, isto é, dois conjuntos de ensaios. Inicialmente, são apresentados e discutidos os ensaios realizados com aço ABNT 1045 e rebolo óxido de alumínio, representando o método proposto. Em seguida apresentam-se os resultados e discussão sobre os ensaios de verificação onde foi utilizado um rebolo de óxido de alumínio e novas peças de aço VC131. Para ambos os resultados, são mostrados gráficos obtidos do processamento digital, resultados da STFT, metalografia, dureza Vickers, além do índice de dano RMSD. À medida que os resultados são exibidos, há uma comparação entre as aferições de dureza e metalografia com os sinais adquiridos durante o processo. Finalmente os resultados do segundo banco de ensaios proposto para verificação do método são apresentados e as mesmas comparações são efetuadas.

### **4.1 RESULTADOS DOS ENSAIOS PARA O AÇO ABNT 1045 E REBOLO DE ÓXIDO DE ALUMÍNIO.**

Nesta seção serão apresentados os resultados das análises do aço ABNT 1045 com rebolo de óxido de alumínio com o intuito de avaliar o método proposto e sua aplicabilidade no processo de retificação.

#### **4.1.1 Inspeção visual da superfície da peça**

As superfícies das peças foram fotografadas e digitalizadas após o processo de retificação para permitir a identificação de indícios da ocorrência de queima através de mudanças de coloração na superfície e marcas características. Os resultados da inspeção visual podem ser conferidos na Figura 4.1.

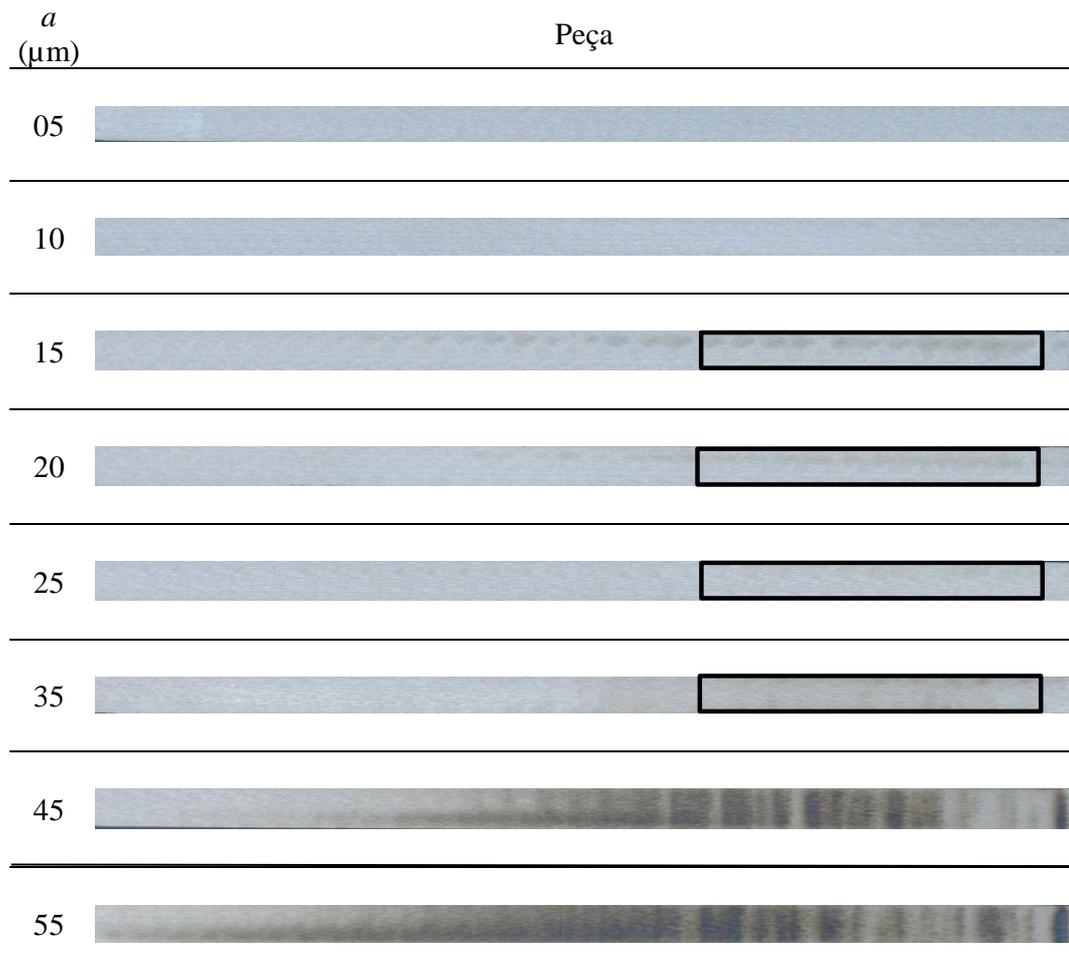


Figura 4.1- Condição superficial das peças usinadas em diferentes profundidades de corte.

Os ensaios 1 e 2 apresentam superfícies sem danos aparentes causados pelo processo de retificação. Não há nenhuma marca característica ou mudança de coloração. O fato da profundidade de corte ser a menor entre as demais, caracteriza uma retificação branda além do rebolo estar dressado, acarretando em mudanças pouco significativas na superfície da peça. Os ensaios 3, 4, 5 e 6 apresentam uma mudança gradual, como pode ser observado pelas marcações na superfície da peça, porém não é possível afirmar a ocorrência de queima, necessitando de outros métodos para avaliação. Os ensaios 7 e 8 mostram coloração mais escura. Os eventos (alteração de coloração) observados por meio da inspeção visual estão em consonância com parâmetros do processo de retificação, no que tange a sua profundidade. A profundidade de corte e o empastamento do rebolo, acarretam no aumento brusco da força de corte e no aumento do desgaste do rebolo, o que de fato, causa danos na superfície e mudança de fase nas peças retificadas (KWAK; SONG, 2001).

#### 4.1.2 Metalografia e medição de dureza Vickers

A análise metalográfica para dois testes de retificação em condições distintas é apresentado na Figura 4.2. A Figura 4.2a refere-se à retificação com profundidade de 10  $\mu\text{m}$  e a Figura 4.2b com a profundidade de 55  $\mu\text{m}$ . Pode ser observado que a estrutura da peça na Figura 4.2a não sofre alteração, ou seja, não há mudanças significativas na composição do material e disposição da martensita. No entanto, ao observar a estrutura da peça na Figura 4.2b é possível observar o aparecimento de uma camada branca e assim a consequente mudança da estrutura martensítica do material. Devido à baixa condutibilidade térmica no processo de retificação, grande parte do calor não é dissipado, sendo dessa forma, a zona de corte o local com a maior incidência de calor causando assim o surgimento de camada branca e mudanças na estrutura martensítica do material (BOSHEH; MATIVENGA, 2006). Esse fenômeno (camada branca e mudança martensítica) são causados pela alta temperatura na zona de corte, causando elevada dureza na superfície e perda de propriedades quanto a resistência do material, indicando dessa forma, a ocorrência de queima.

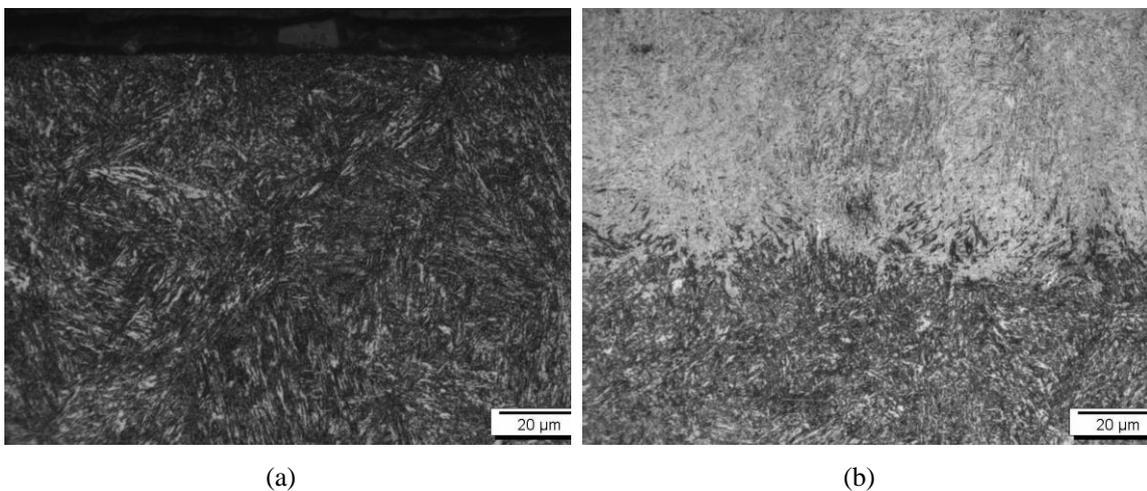
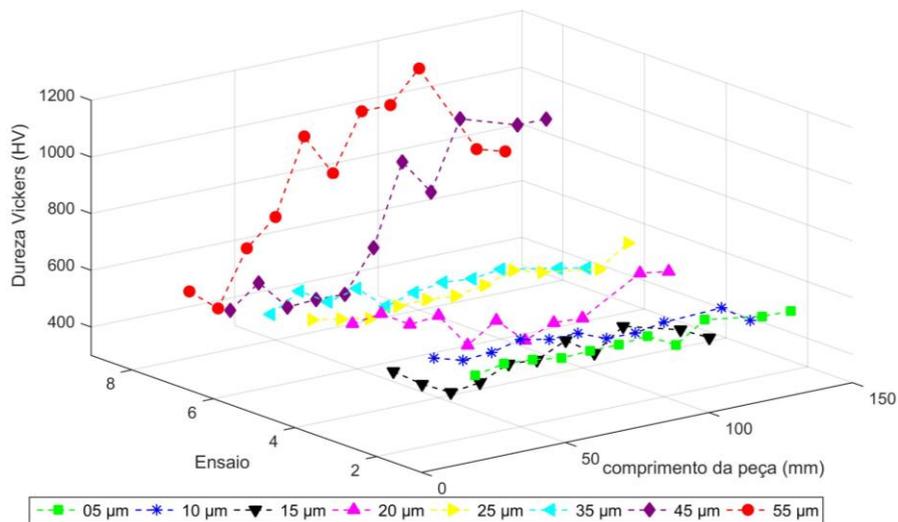


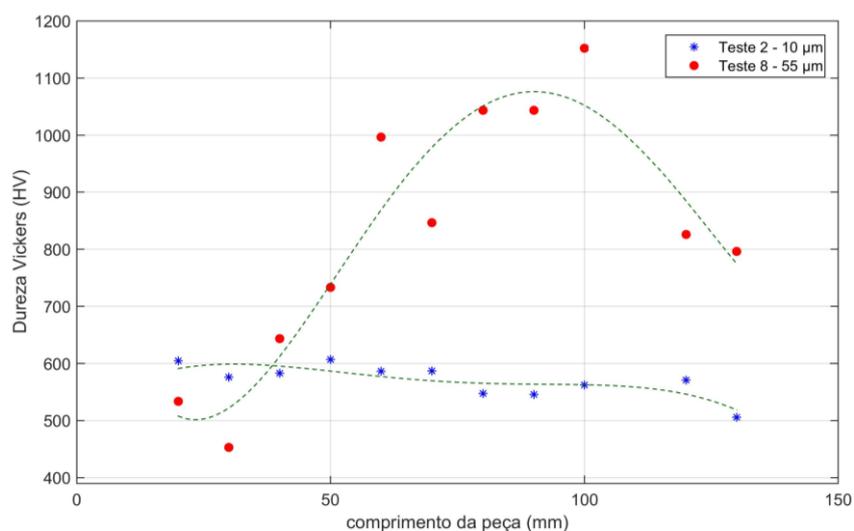
Figura 4.2- Metalografia para boa condição (a) e queima (b), peças 2 e 8, respectivamente.

A dureza Vickers para todas as condições de retificação é apresentada na Figura 4.3a. É possível observar que não há mudanças significativas no valor de dureza Vickers entre o primeiro e o sexto teste, visto que, a dureza do aço temperado ABNT 1045 está em torno de 500 HV a 600 HV (PRASAD; ROHATGI; KOSEL, 1986; TAGHIZADEH et al., 2013). No entanto, os ensaios 7 e 8 da Figura 4.3a mostram mudanças significativas no valor de dureza Vickers.

Em consequência da ocorrência de danos como a queima, uma camada branca surge na superfície, aumentando de forma significativa a dureza alcançando valores de até 1100 HV, o aumento da dureza na superfície após a detecção de camada branca também é encontrado em (HIROSHI; KISHI; HASHIMOTO, 1981; TOMLINSON; BLUNT; SPRAGGETT, 1991) . A dureza Vickers tende no início a decrescer devido ao processo de retificação como observado na Figura 4.3b para a peça do ensaio 2. A peça do ensaio 8 com dano de queima, inicia com valor de dureza Vickers de 500 HV. Contudo, no decorrer do processo de retificação o fenômeno de queima ocorre e a dureza aumenta de forma gradativa indicando o surgimento da camada branca.



(a)

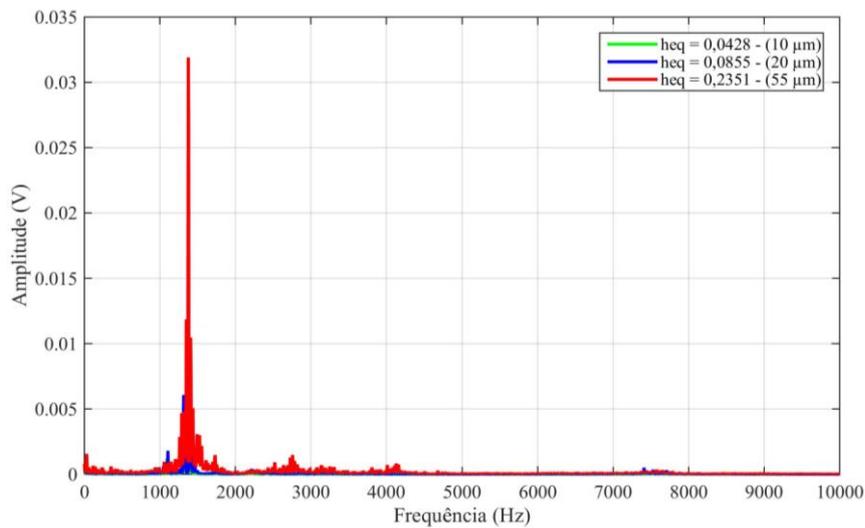


(b)

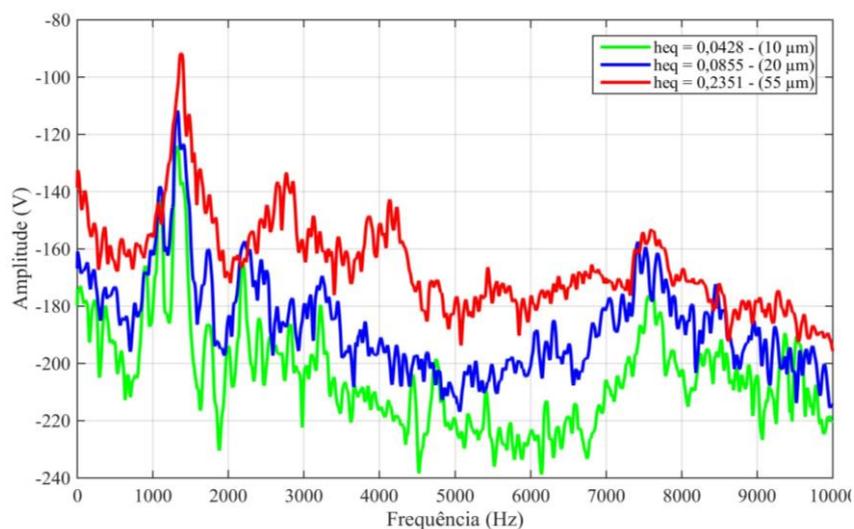
Figura 4.3- Dureza vickers para todas as condições de retificação (a) dureza vickers para peças 2 e 8 (b).

### 4.1.3 Seleção de bandas de frequência

O espectro de frequências do sinal de vibração para três ensaios (Ensaio 2, 4 e 8) com condições de retificação diferentes é apresentado na Figura. 4.4a. A Potência Espectral de Frequências (PSD) do sinal de vibração para as mesmas condições é apresentada na Figura 4.4a. Pode-se observar que as amplitudes dos espectros são maiores à medida que as condições de retificação se tornam mais severas. Contudo, observa-se que o oposto é válido, ou seja, condições de retificação brandas possuem menor atividade no espectro de frequência, como observado em (NETO et al., 2014).



(a)



(b)

Figura 4.4- Espectro do sinal (a) FFT e PSD (b).

O sinal de vibração referente ao Ensaio 4 com profundidade de corte de 20  $\mu\text{m}$  é apresentado na Figura 4.5a. O ruído do sinal consiste de dados de vibração amostrados antes do início do processo de retificação, ou seja, o rebolo não possui contato com a superfície da peça e assim não há remoção de material. O sinal referente a passada de retificação é constituído pelos dados amostrados durante o período que o rebolo está em contato com a superfície da peça. A densidade espectral de potência para ambos sinais (ruído e passada) é apresentada na Figura 4.5b. Observa-se duas regiões distintas na Figura 4.5a, a primeira região é formada pelo conjunto de dados correspondente ao período que o rebolo não remove o material da superfície da peça, enquanto que, a segunda região é formada pelo conjunto de dados correspondente ao período da passada de retificação. O nível de amplitude do ruído em comparação com o nível de amplitude da passada é menor, devido ao fato de não existir o conjunto de forças que caracteriza a retificação, assim o sensor detecta apenas o sistema (máquina-retificação) sem atividade de remoção de material.

A análise no domínio da frequência de ambos os sinais (passada e ruído) pode ser efetuada por meio densidade espectral de potência como apresentado na Figura 4.5b. O ruído e a passada de retificação possuem frequências comuns até 600 Hz. No entanto ao observar a região de 600 Hz a 2 kHz, existe uma diferença entre amplitudes das frequências dos sinais correspondentes ao ruído e a passada, ressalta-se que nesta região o mesmo padrão do espectro (pico em 1,5 kHz) é observado. Esse comportamento (atividade no espectro de frequências do ruído até 2 kHz) foi observado em todos os ensaios. Assim, com o objetivo de eliminar tal atividade ruidosa que poderia atrapalhar as análises resultantes do processamento de sinais, um filtro digital passa banda de 2 kHz até 7 kHz foi aplicado aos sinais referentes aos ensaios de retificação. O limite em 7 kHz foi escolhido, com o objetivo de restringir a análise em frequências, no entanto o fabricante do sensor de vibração (acelerômetro) garante a sensibilidade até 7 kHz.

Para alguns tipos de análises são necessários a utilização de bandas com intervalos menores, em que os sinais possuam características bem distintas e pouca sobreposição, permitindo análises mais acuradas dos fenômenos que ocorreram no processo, como observado por (MARTINS et al., 2014) em seus estudos de operação de dressagem. A utilização de bandas de frequências menores de 2 kHz como, por exemplo, 500 Hz a 1,9 kHz, não apresentaram bons resultados quando aplicadas aos sinais de vibração (devido a influência da atividade ruidosa). Os espectros de frequências desses sinais podem ser conferidos no Apêndice 1. Assim, pode-se inferir que apesar da atividade ruidosa possuir um nível de amplitude baixo, a mesma interfere no espectro prejudicando a análise dos sinais em busca do fenômeno de queima.

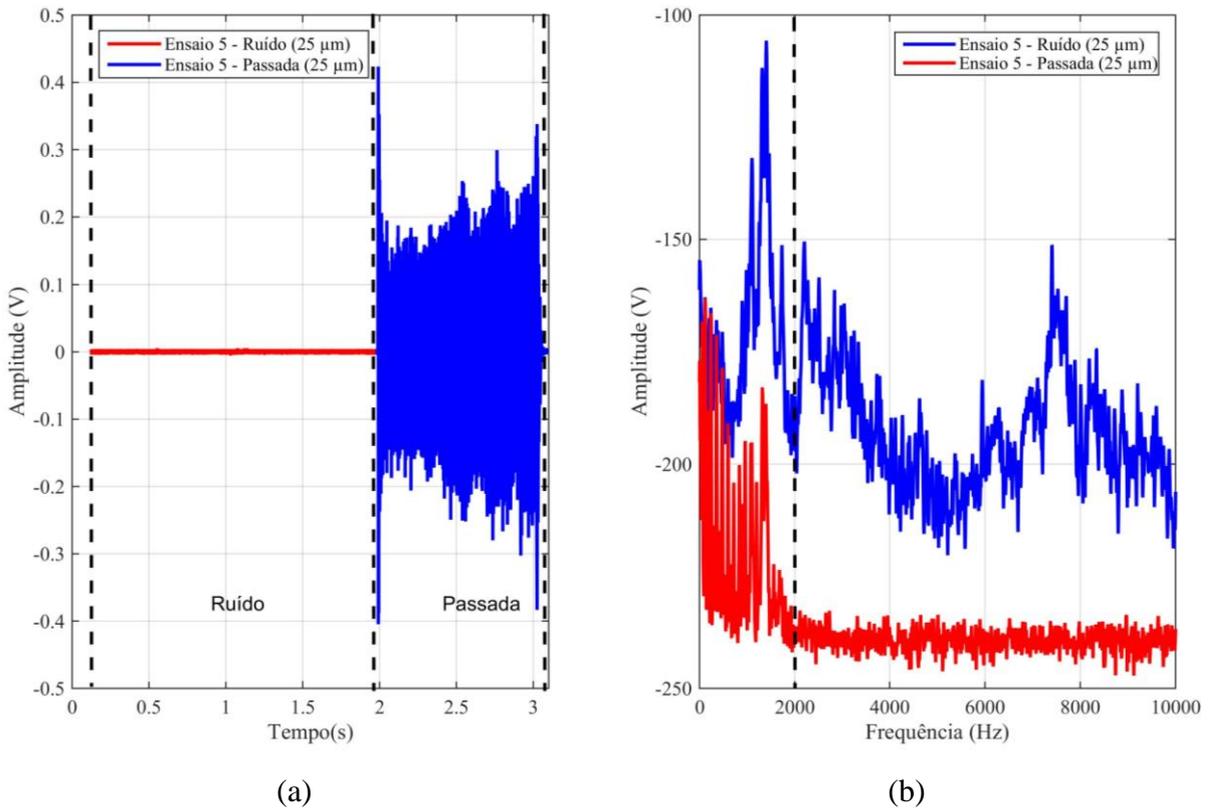
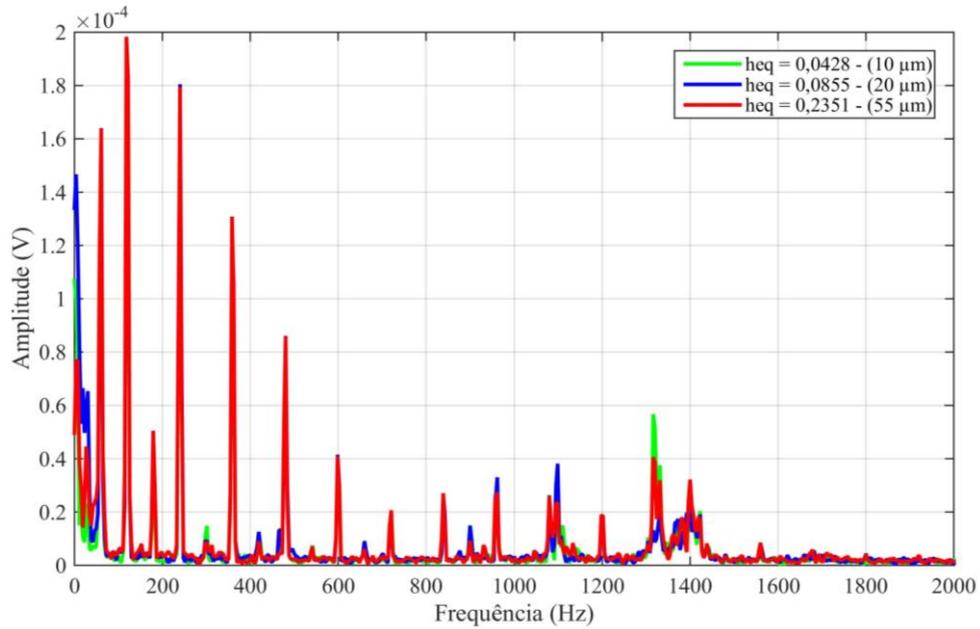
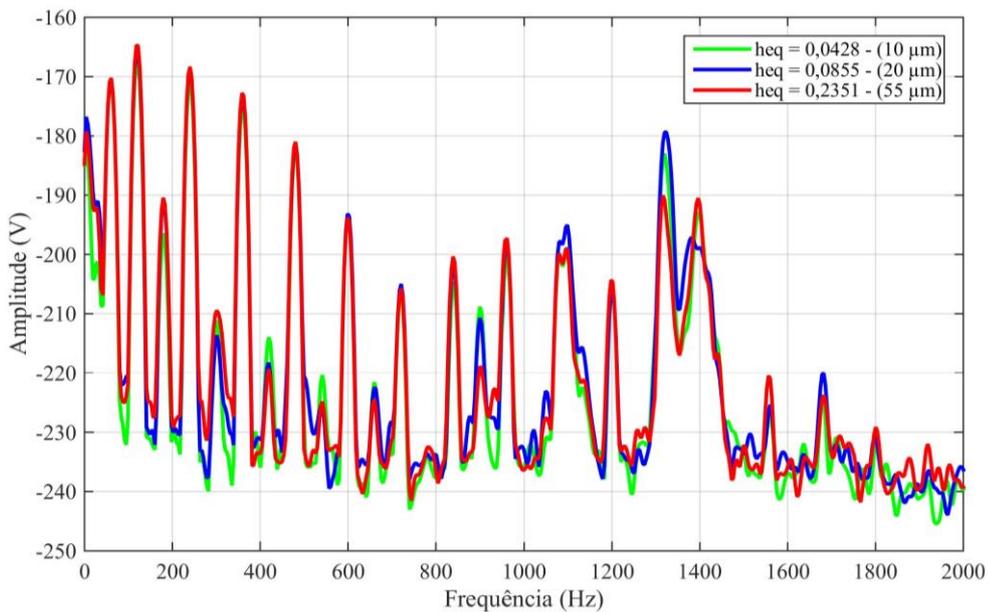


Figura 4.5- (a) Sinal do processo de retificação (ruído e passada) do Ensaio 5; (b) PSD do ruído e da passada

A análise do sinal de vibração correspondente ao ruído do processo de retificação (máquina de retificação em vazio) utilizando a FFT e a PSD na banda de 0 a 2 kHz em três condições de usinagem diferentes ( $10\ \mu\text{m}$ ,  $20\ \mu\text{m}$ ,  $55\ \mu\text{m}$ ) é apresentada na Figura 4.6a e 4.6b. Em ambos espectros é possível observar a ocorrência de harmônicas. Essas harmônicas estão relacionadas as frequências naturais da máquina retificadora, bem como, dos rolamentos dos motores, buchas, correias, bomba hidráulica e outros elementos que constituem a máquina retificadora.



(a)



(b)

Figura 4.6- (a) FFT ruído do sinal; (b) PSD do ruído do sinal

O espectro de frequências até 200 Hz para três condições de profundidade de corte distintas de retificação, a saber, 10  $\mu\text{m}$ , 20  $\mu\text{m}$  e 55  $\mu\text{m}$ , está disposto na Figura 4.7. Nesse período o rebolo está removendo material da superfície da peça. De acordo com (CONCEIÇÃO JUNIOR et al., 2016) é possível identificar os picos de frequências no sinal múltiplos de 30 Hz e 60 Hz que são frequências do rebolo e da rede elétrica respectivamente. Assim, as frequências

naturais da máquina e do ambiente estão presentes durante o processo de retificação sendo necessário a aplicação de filtros para evitar análises errôneas nos sinais.

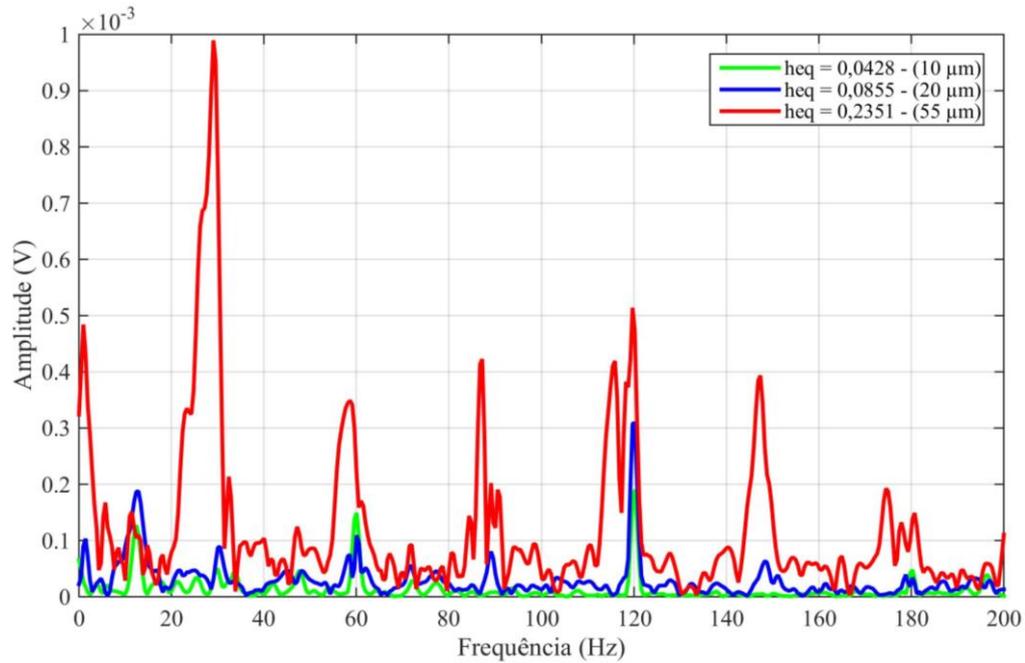


Figura 4.7- FFT do sinal durante a passada de retificação em três profundidades de corte: 10  $\mu\text{m}$ , 20  $\mu\text{m}$  e 55  $\mu\text{m}$

#### 4.1.4 Aplicação da STFT nas condições de retificação estudadas

Após os sinais serem filtrados, a re-amostragem do sinal foi realizada através da decimação, em seguida, a STFT foi calculada. Os resultados da aplicação da STFT aos sinais de vibração filtrados na banda de 2 a 7 kHz são apresentados na Figura 4.8, a abcissa representa o período de duração da passada de retificação enquanto a ordenada representa as frequências e por fim as cores representam a amplitude das frequências. É possível observar o aumento da amplitude do sinal conforme as condições de retificação se tornam mais severas, como observado por (DAVID; WARNECKE, 1996) *apud* (HASSUI et al., 1998). A STFT correspondente aos sinais reproduz o mesmo comportamento, a atividade (amplitude das frequências) aumenta de acordo com as condições de retificação. Em relação a resolução no tempo, obtida através da divisão entre o comprimento da janela (600 pontos) e a frequência de amostragem após a decimação (20 kHz), obteve-se um valor aproximado de 30 ms. A partir da equação 3, apresentada no Capítulo 3, a resolução em frequência obtida para a configuração de janela adotada foi de aproximadamente 67 Hz, adotando 2 como o valor do coeficiente da resolução da janela retangular.

A amplitude das frequências em todos os testes apresentarem aumento significativo no final da passada, entre 0,8 e 1,2 segundos. Isto ocorre, devido a característica de remoção de material pelo rebolo no processo de retificação. O rebolo no momento da retificação empurra o material no sentido do corte, gerando maior atrito e aumentando a resistência nesse processo (devido ao acúmulo do cavaco), dessa forma uma força de corte maior é necessária para a remoção do material, influenciando de forma direta no sinal.

Assim, a partir da análise através da STFT é possível detectar a ocorrência de queima da seguinte maneira:

- 1) Observação das amplitudes das frequências: os espectros que apresentaram maior incidência de amplitudes em torno de 0,8 a 1 indicam que a queima pode ter ocorrido na superfície da peça. Um exemplo que pode ser apresentado é o do Ensaio 8 –  $heq = 0,2351 \mu\text{m}$ . De acordo com a metalografia deste ensaio apresentada na Figura 4.2 é possível afirmar que houve alteração microestrutural e conseqüentemente houve queima. O espectro deste ensaio é apresentado na Figura 4.10, observa-se que muitas frequências apresentam amplitudes maiores que 0,8 indicando assim o fenômeno de queima. O oposto é válido, no caso de tomar-se como exemplo o Ensaio 2 –  $heq = 0,0428 \mu\text{m}$ , a metalografia apresentada na Figura 4.2 não apresenta alteração microestrutural, portanto não houve queima. O espectro correspondente a esse ensaio é apresentado na Figura 4.8. Tal espectro apresenta baixa incidência de frequências com amplitudes maiores que 0,8 e alta incidência de frequências com amplitudes entre 0,3 e 0,7 indicando assim a não ocorrência do fenômeno de queima.
- 2) Análise do momento em que a atividade no espectro é alterada: Os espectros apresentam frequências com alterações nas amplitudes durante um período determinado de tempo. Assim, uma faixa de frequências pode iniciar com baixas amplitudes e durante o decorrer do período possuir alterações significativas. Um exemplo desse fenômeno pode ser observado na Figura 4.8 em relação a faixa de frequências de 3 kHz a 4 kHz do espectro referente ao Ensaio 7 –  $heq = 0,1924 \mu\text{m}$ . As amplitudes nessa faixa de frequência (3 a 4 kHz) no período de 0 a 0,45 segundos estão entre 0,5 e 0,7. No entanto, a partir do período de 0,45 até 1 segundo, observa-se alterações nas amplitudes dessa faixa de frequências, os valores das amplitudes estão entre 0,8 e 1. Assim, esse fenômeno é um indicativo da região em que a queima se iniciou. A partir da velocidade da mesa de retificação (0,124 m/s) e o momento em que é detectado a alteração é possível apontar a região de início do fenômeno de queima.

No caso do Ensaio 7, a região da peça correspondente é de 55 mm, o que é corroborado pela análise da dureza vickers apresentado na Figura 4.3a.

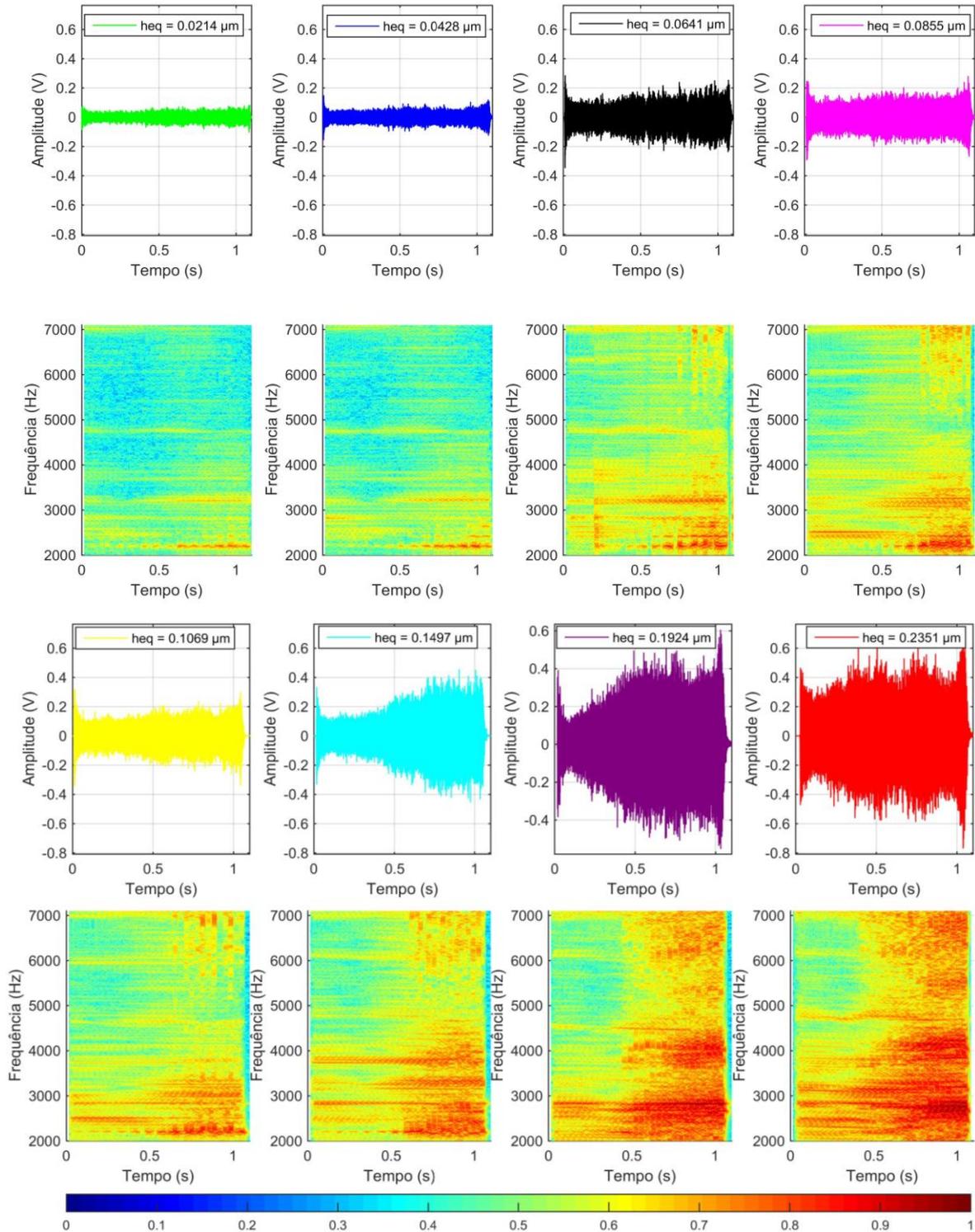


Figura 4.8 – STFT para todos os testes de retificação.

No entanto, o momento de início do fenômeno de queima necessita ser observado com mais detalhes a partir de uma análise conjunta entre a STFT e outros parâmetros estatísticos como o RMSD do sinal, pois somente uma região pode ser apontada até o momento. Além da detecção da região em que ocorreu a queima, é interessante analisar o nível de potência dispensada pelo motor durante a passada de retificação, pois o nível de potência é um parâmetro muito utilizado na literatura.

#### **4.1.5 Análise da potência RMS das passadas de retificação**

A potência para todas as passadas da retificação é apresentada na Figura 4.9. As peças do ensaio 7 ( $heq = 0,1924 \mu\text{m}$ ) e ensaio 8 ( $heq = 0,2351 \mu\text{m}$ ) apresentaram nível de potência elevado. O fenômeno de queima que ocorreu nessas peças influenciou na potência. O aumento de temperatura na zona de corte devido ao maior contato entre as arestas de corte da superfície do rebolo e a peça acarreta no aumento da força para remoção do material. Dessa forma a potência exigida é maior alterando o comportamento do sinal. Esse fenômeno de aumento de potência durante a ocorrência da queima, pode ser observado nos trabalhos de (AGUIAR; BIANCHI; OLIVEIRA, 2002; KWAK; HA, 2004b). A queda brusca de potência observada no Ensaio 8 –  $heq = 0,2351$  é baseada no efeito de amolecimento da superfície da peça durante a remoção do material exigindo menor potência do eixo. Esse amolecimento ocorreu devido a condição de retificação severa a que a peça foi submetida, pois nessas condições o aumento de temperatura na zona de corte é muito rápido. O aumento da potência após a queda brusca é devido ao revenimento da superfície da peça após o amolecimento do material, indicando a ocorrência da queima. A análise da potência auxilia no entendimento do espectro de frequências dos sinais de vibração apresentados na Figura 4.8. O nível de potência como o nível do sinal de vibração, são alterados em consonância com os parâmetros dos ensaios, bem como, com os eventos que ocorrem no processo. Assim, ao observar os níveis de potência do Ensaio 7 –  $heq = 0,1924$  e do Ensaio 8 –  $heq = 0,2351$ , é possível apontar a ocorrência da queima, pois tais ensaios possuem níveis de potência muito maiores que os outros ensaios efetuados (Ensaio 1 a 6). Assim, em consonância com o espectro de frequência do sinal de vibração, apresentado na Figura 4.10, o nível do sinal de potência é um bom indicativo da ocorrência ou não do fenômeno de queima. Os ensaios que apresentaram espectros de frequências do sinal de vibração com amplitudes baixas repetiram o comportamento em relação ao nível da potência, ou seja, as peças que não apresentaram queima possuem sinais de potência com amplitude baixa e espectros de frequências de sinais de vibração que não indicam a ocorrência de queima.

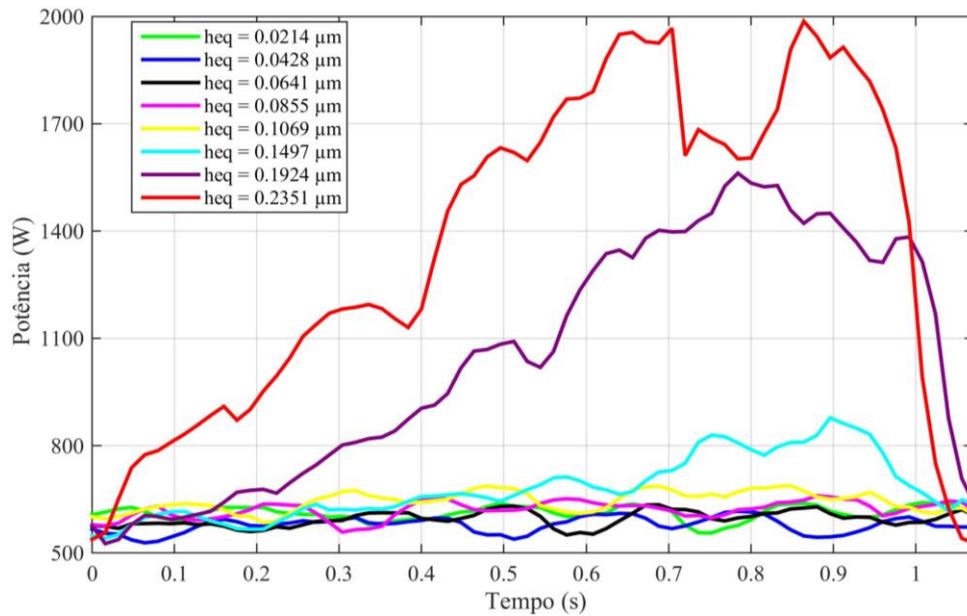


Figura 4.9- Potência RMS para todas as passadas de retificação

A média da potência RMS para todas as passadas da retificação é exibida na Figura 4.10. Como explicado anteriormente os níveis de potência aumentam conforme a profundidade de corte devido ao aumento de força para a remoção do material, como demonstrado por (YANG; YU, 2013). A potência se mantém em um nível baixo até a profundidade de 35  $\mu\text{m}$  onde não houve detecção de queima. A partir de 45  $\mu\text{m}$  há uma alteração brusca em comparação com as passadas anteriores. Por fim, a profundidade de 55  $\mu\text{m}$  que possui o maior nível de queima também possui o maior nível de potência.

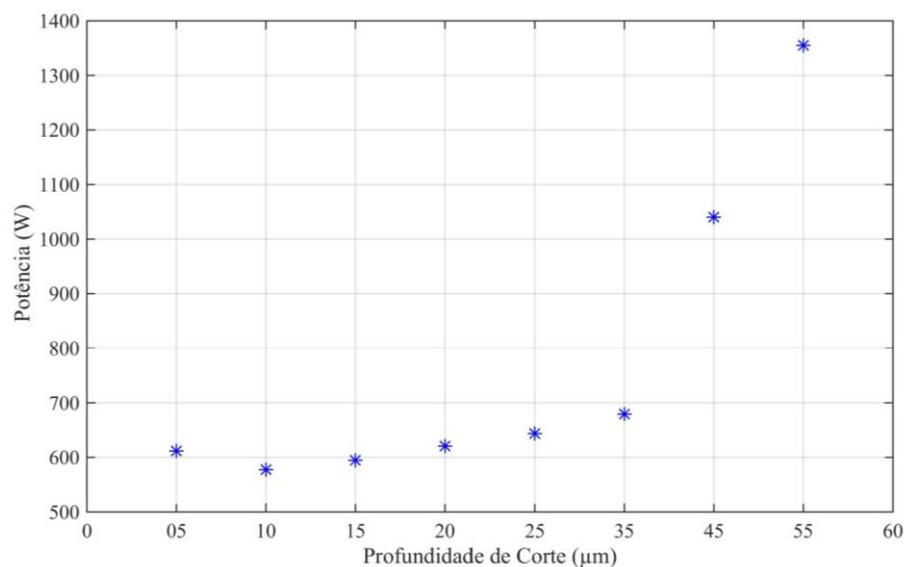


Figura 4.10- Média da potência RMS das passadas de retificação

#### 4.1.6 Índices RMSD e Análise conjunta

A partir dos sinais filtrados foi efetuado o cálculo do índice RMSD em uma janela de tempo constante do sinal. A janela de tempo adotada foi de 8,2 ms de resolução, aproximadamente o período necessário para o rebolo percorrer 1 mm na superfície da peça. Um estudo de bandas mais aprofundado foi efetuado e a banda de 2,3 kHz a 3,1 kHz foi escolhida para o cálculo do RMSD. O RMSD do sinal para todos os testes é apresentado na Figura 4.11. De acordo com as análises efetuadas as peças que apresentaram a ocorrência de queima continuam a exibir comportamentos diferentes das demais peças em que não houve queima. O nível do RMSD pertencente ao ensaio 7 ( $heq = 0,1924 \mu\text{m}$ ) e ao ensaio 8 ( $heq = 0,2351 \mu\text{m}$ ) apresenta uma variação de amplitude alta e um crescimento constante. O índice CCDM está disposto no Apêndice III devido o mesmo não apresentar boa relação com os eventos observados durante o processo, assim o mesmo foi descartado.

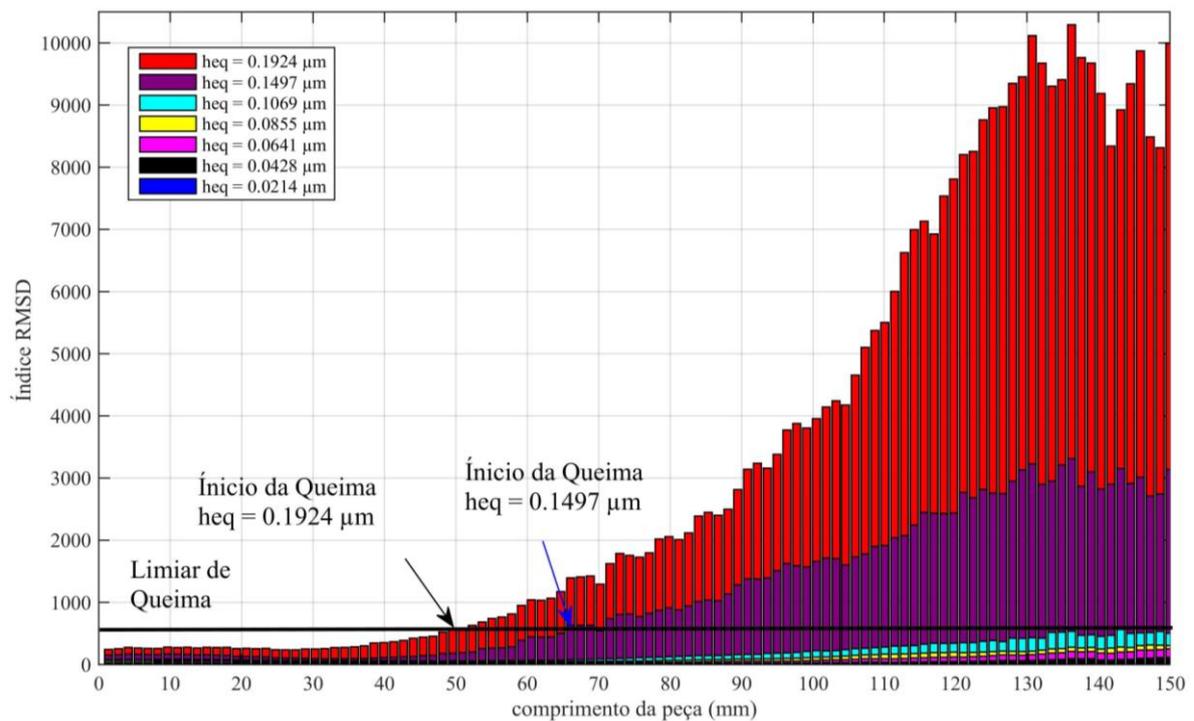


Figura 4.11- RMSD obtido do sinal de vibração na banda 2.3-3.2 kHz.

A análise conjunta entre a inspeção visual, a dureza vickers mensurada na superfície da peça, a STFT dos sinais de vibração adquiridos durante o processo de retificação e por fim o RMSD para o sinal de vibração é apresentada na Figura 4.12. Os ensaios 2 ( $heq = 0,0428 \mu\text{m}$ ),

7 ( $heq = 0,1924 \mu\text{m}$ ) e 8 ( $heq = 0,2351 \mu\text{m}$ ) são apresentados respectivamente. A linha pontilhada representa o início da queima de acordo com as análises da dureza vickers e inspeção visual. Observa-se na imagem referente a superfície da peça do Ensaio 7 o surgimento de uma coloração mais escura indicando o início da queima. De forma análoga a análise efetuada na imagem da superfície da peça, é possível identificar uma alteração brusca na dureza vickers para a peça do Ensaio 7, próxima da região de 70 mm de comprimento da peça, indicando o surgimento de camada branca e conseqüentemente aumento de dureza, caracterizando dessa forma a ocorrência da queima. Essas análises (Inspeção Visual e Dureza Vickers) são análises de medidas diretas, demandando tempo e muitas vezes aumentando o custo de produção. Analisando a região correspondente no tempo (0,56 s) o aumento da amplitude das frequências na STFT é perceptível, indicando o início do fenômeno de queima. Por fim, no RMSD do sinal correspondente ao Ensaio 7 é observado um aumento gradativo iniciado no mesmo período de tempo correspondente a STFT. Essas análises (STFT do sinal de vibração e RMSD do sinal de vibração) permitem concluir a ocorrência de queima e estimar o local da superfície da peça que o fenômeno se iniciou. Ao contrário das medidas diretas essas medidas são indiretas e não demandam muito tempo para serem executadas, não prejudicando assim a produtividade em uma eventual aplicação na indústria de manufatura. Análise similar – comparação entre as medidas diretas e indiretas - pode ser efetuada no Ensaio 8 onde a mudança de coloração na inspeção visual é observada próximo do início da peça. Da mesma forma, a dureza vickers apresenta mudança abrupta em torno de 40 mm atingindo um patamar crítico em 60 mm. A região no tempo correspondente a essa mudança está situada em torno de 0,40 segundos, da mesma forma que ocorreu no Ensaio 7 um aumento nas amplitudes de frequências na STFT pode ser observado. Finalmente, o RMSD do sinal apresenta um aumento significativo na mesma posição que foi observado o aumento de amplitudes na STFT reiterando assim o início da ocorrência da queima nesta região. O Ensaio 2 apenas indica uma situação de não ocorrência de queima, onde a inspeção visual da peça não apresenta grandes alterações no que tange a mudança de cor. A dureza vickers é relativamente estável possuindo alterações mínimas, na STFT é observado alguns picos em algumas frequências, porém não indicam aumento de atividade significativa e pôr fim no RMSD não se observou grandes variações quando comparado com os outros ensaios de retificação.

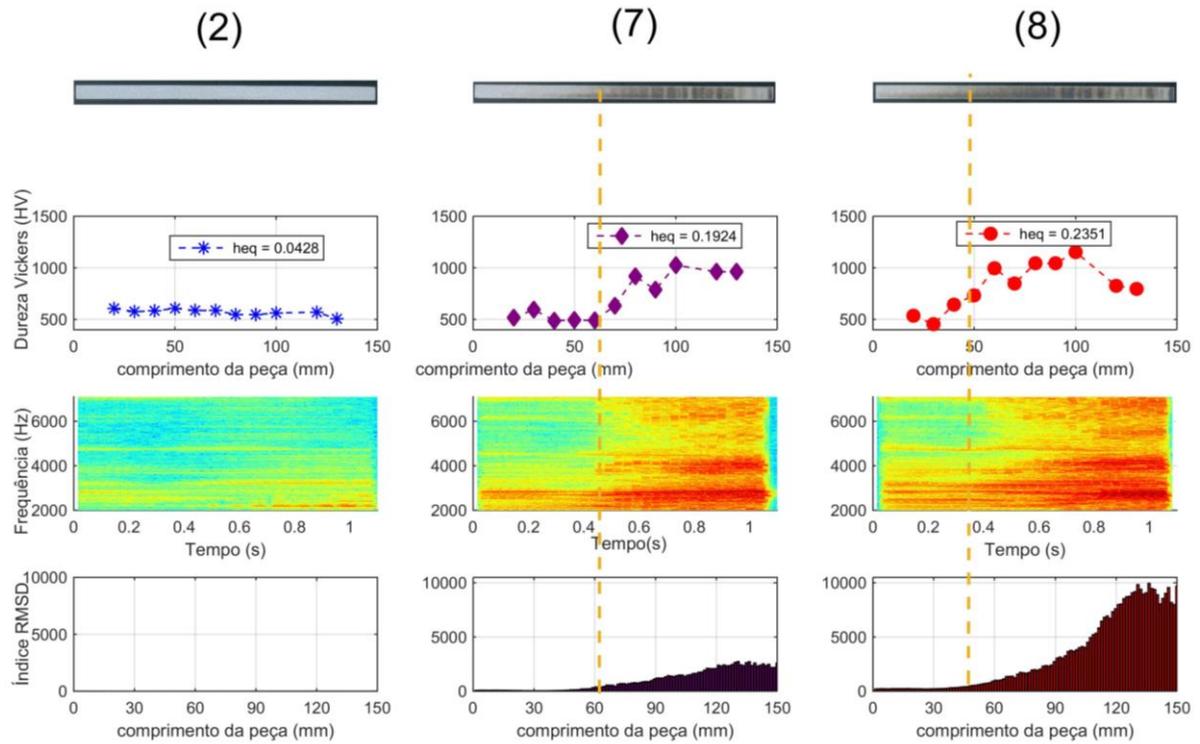


Figura 4.12- Análise Conjunta entre Inspeção visual, Dureza Vickers, STFT e Energia. Testes 2, 7 e 8.

## 4.2 RESULTADOS DOS ENSAIOS PARA O AÇO VC131 E REBOLO ÓXIDO DE ALUMÍNIO

Nesta seção são apresentados os resultados referentes as análises de sinais do processo de retificação em peças de aço VC131 com objetivo de verificar o método proposto como explicado na seção de metodologia. As condições de retificação foram semelhantes aos do aço ABNT 1045, alterando somente a quantidade de testes.

### 4.2.1 Inspeção visual da superfície da peça

A superfícies das peças também foram fotografadas e digitalizadas após o processo de retificação. A partir da Figura 4.13 é possível identificar diferentes condições baseado nas mudanças de colorações na superfície da peça.

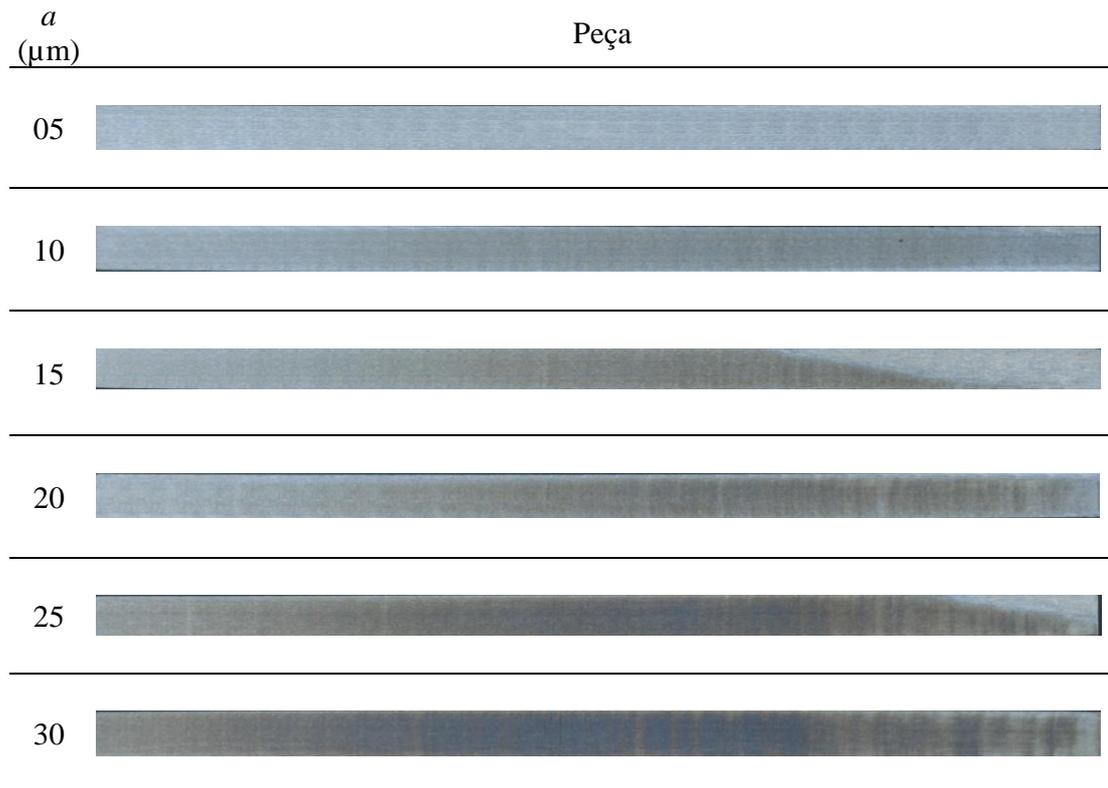


Figura 4.13 - Condição superficial das peças usinadas em diferentes profundidades de corte.

No Ensaio 1 não é possível observar alterações de cores na superfície da peça indicando uma boa condição de sua estrutura, em relação ao Ensaio 2 e 3, identifica-se uma leve alteração na tonalidade de cores da superfície dessas peças indicando queima de menor gravidade ou somente mudança na coloração da superfície sem o material perder suas propriedades de dureza. Por fim, nos Ensaio 4, 5 e 6 é possível identificar alterações significativas nas cores da superfície das peças, indicando assim a ocorrência do fenômeno de queima.

#### 4.2.2 Metalografia e medição de dureza vickers

As análises metalográficas foram executadas para todos os ensaios, porém somente dois deles foram selecionados por apresentar os principais resultados, no caso, não ocorrência de queima (Ensaio 2 –  $heq = 0,0214 \mu\text{m}$ ) e ocorrência de queima (Ensaio 6 –  $heq = 0,1283 \mu\text{m}$ ). Os resultados da metalografia são apresentados na Figura 4.14.

Pode ser observado na Figura 4.14a que a estrutura do material não sofre alterações significativas, ou seja, não há ocorrência de dano. Contudo ao observar a Figura 4.14b é possível identificar o surgimento de uma camada branca, conseqüentemente existe alteração na estrutura e nas propriedades do material. Isto ocorre, devido ao aumento de temperatura na zona

de corte, o empastamento do rebolo, a não afiação dos grãos abrasivos dentre outros fatores, caracterizando dessa forma a ocorrência de queima.

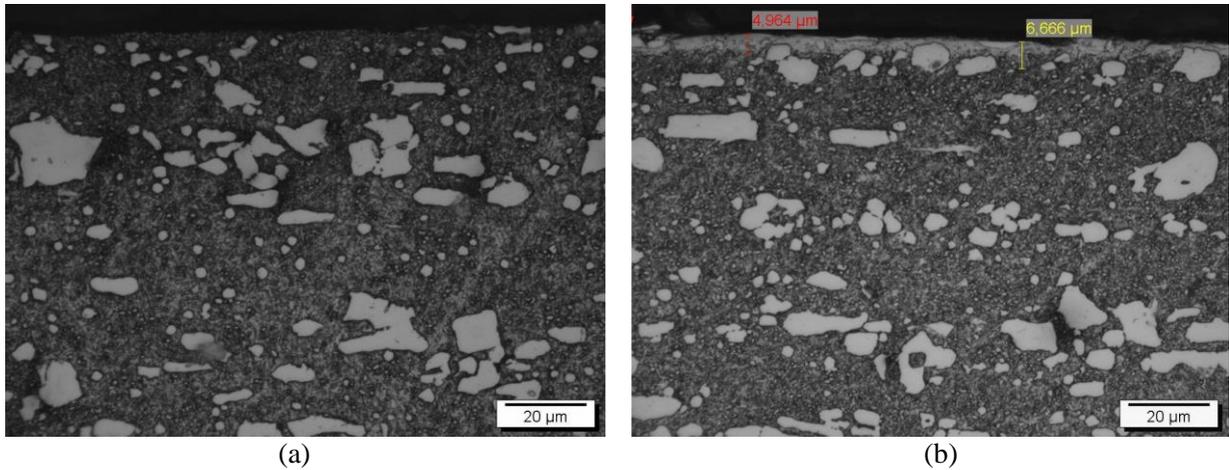
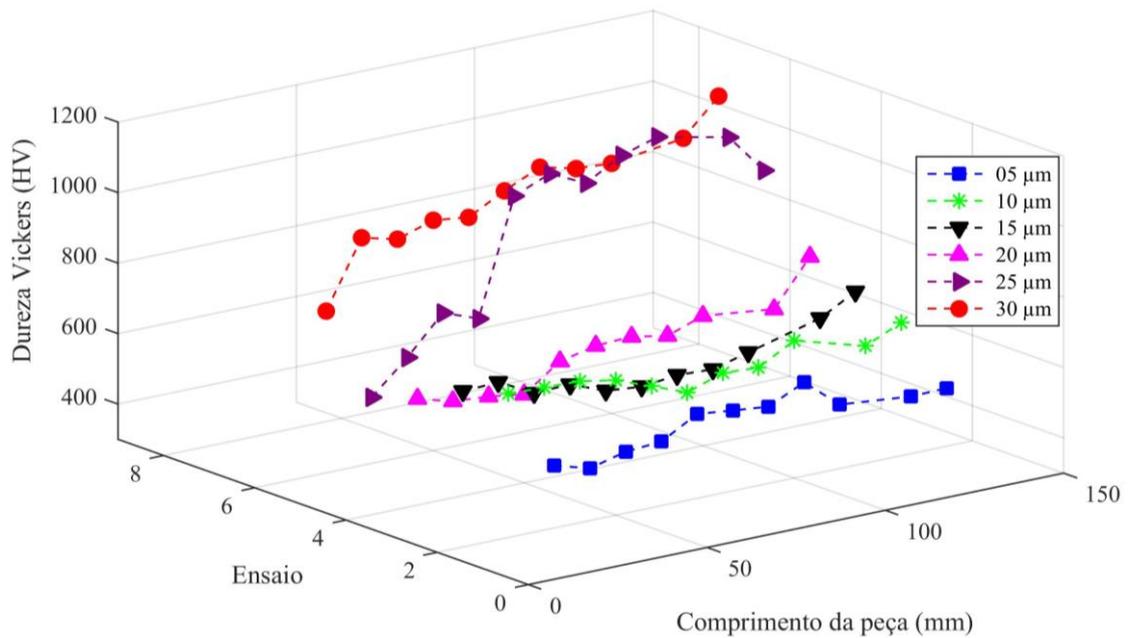


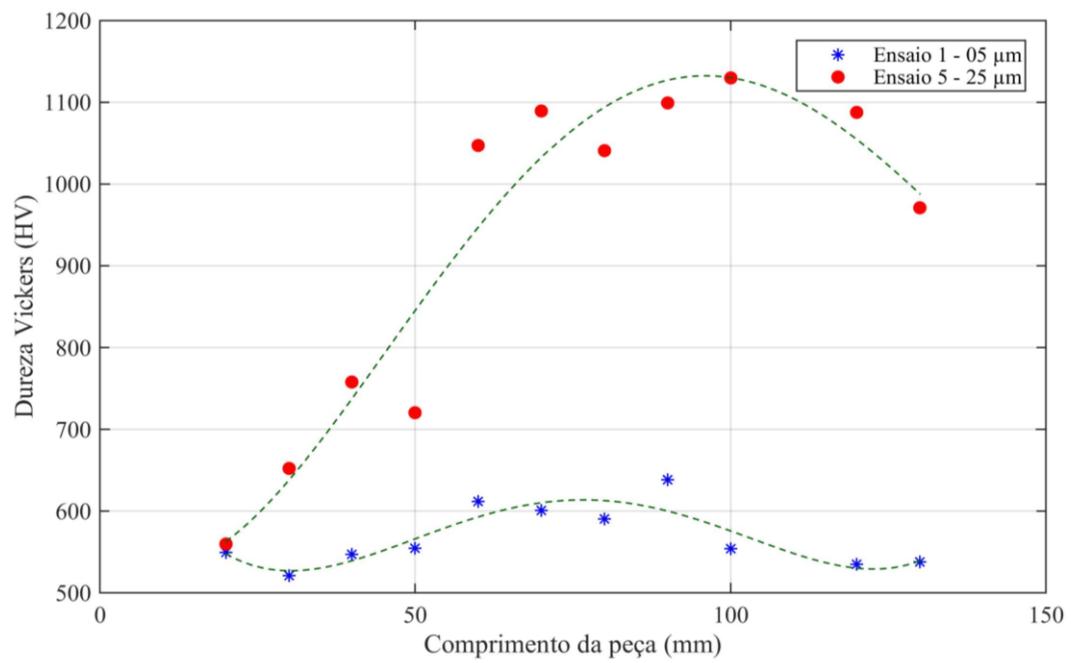
Figura 4.14- Condições da superfície (a) sem queima – 05 µm (b) queima – 30 µm respectivamente.

A dureza Vickers para todas as condições de retificação é apresentada na Figura 4.15a. É possível observar que não há mudanças significativas no valor de dureza Vickers entre o primeiro e o quarto ensaio, visto que, a dureza do aço VC 131 está em torno de 500 HV a 600 HV (CAMARGO et al., 2014). No entanto, é observado mudanças significativas no valor de dureza Vickers dos ensaios 5 e 6. Em consequência da ocorrência de danos como a queima, uma camada branca surge na superfície, aumentando de forma significativa a dureza alcançando valores de até 1.100 HV. Esse mesmo comportamento foi observado nos ensaios de retificação com o aço ABNT 1045, ou seja, condições severas de retificação provocam danos como a queima na superfície das peças.

A dureza Vickers tende a decrescer devido ao processo de retificação como observado na Figura 4.15b para a peça do Ensaio 1. A peça do Ensaio 5 com dano de queima, inicia com valor de dureza Vickers de 500 HV, no entanto, no decorrer do processo de retificação o fenômeno de queima ocorre e a dureza na superfície da peça aumenta de forma gradativa indicando o surgimento da camada branca e consequentemente do fenômeno de queima. Assim as mesmas condições que foram observadas no ensaio de retificação do aço ABNT 1045 são observadas neste ensaio, ou seja, há peças em que não há ocorrência de queima e peças que indicam por meio de sua dureza Vickers a ocorrência do fenômeno de queima.



(a)



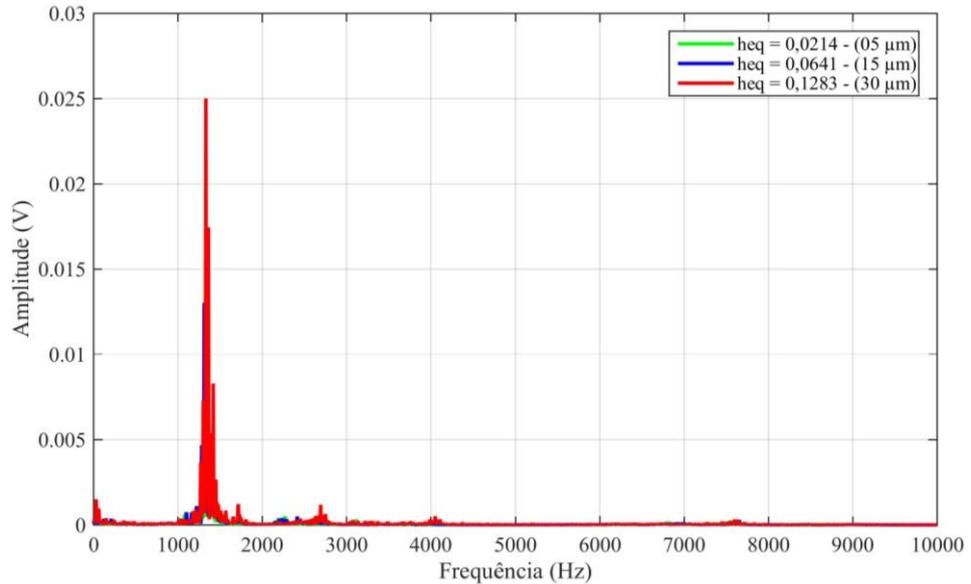
(b)

Figura 4.15- Dureza vickers para todas as condições de retificação (a) dureza vickers para peças 1 e 5 (b).

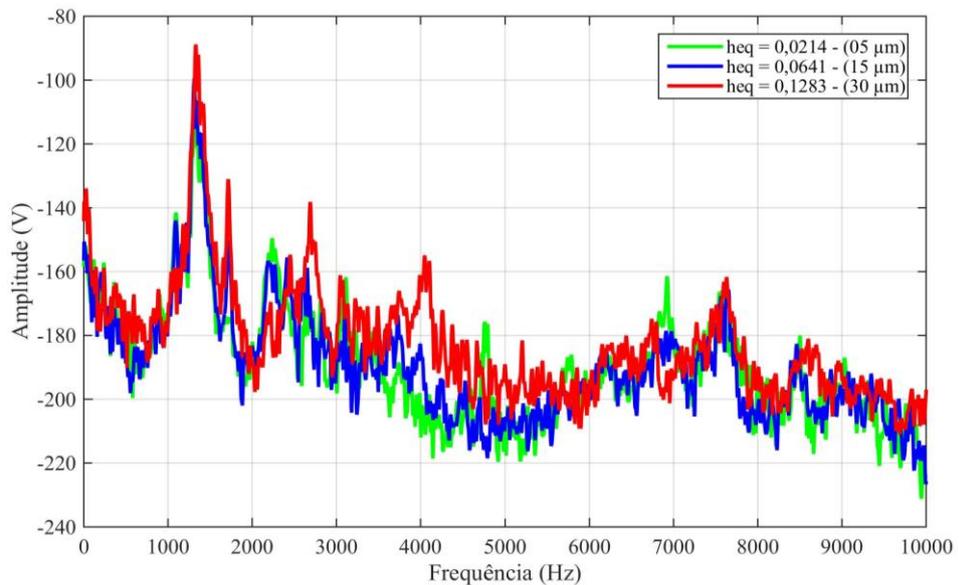
#### 4.2.3 Seleção de bandas de frequência e processamento do sinal

O espectro de frequências para três ensaios com condições de retificação diferentes ( $heq = 0,0214 \mu\text{m}$ ,  $heq = 0,0855 \mu\text{m}$ ,  $heq = 0,1283 \mu\text{m}$ ) é apresentado na Figura. 4.16a. A Potência

Espectral de Frequências para as mesmas condições apresentadas na Figura 4.16a é apresentada na Figura 4.16b. Pode-se observar que as amplitudes dos espectros são maiores à medida que as condições de retificação se tornam mais severas. Observa-se que o oposto é válido, ou seja, condições de retificação brandas, sem queima, possuem menor atividade no espectro de frequência, como observado em (YANG; YU, 2013).



(a)



(b)

Figura 4.16- Espectro do sinal (a) FFT e PSD (b).

O ruído e o sinal de vibração referente a passada de retificação do Teste 4 com profundidade de corte de 20  $\mu\text{m}$  é apresentado na Figura 4.17a. A densidade espectral de potência para

ambos sinais (ruído e passada) é apresentada na Figura 4.17b. Em conformidade com os resultados apresentados pelo aço ABNT 1045, é possível observar a atividade ruidosa de mesma natureza, ou seja, o ruído (máquina de retificação em vazio) apesar de possuir uma amplitude mais baixa, pode influenciar nas análises do espectro, visto que o mesmo apresenta atividade até 2 kHz. Assim o filtro digital passa banda de 2 kHz a 7 kHz foi aplicado aos sinais para remoção do ruído.

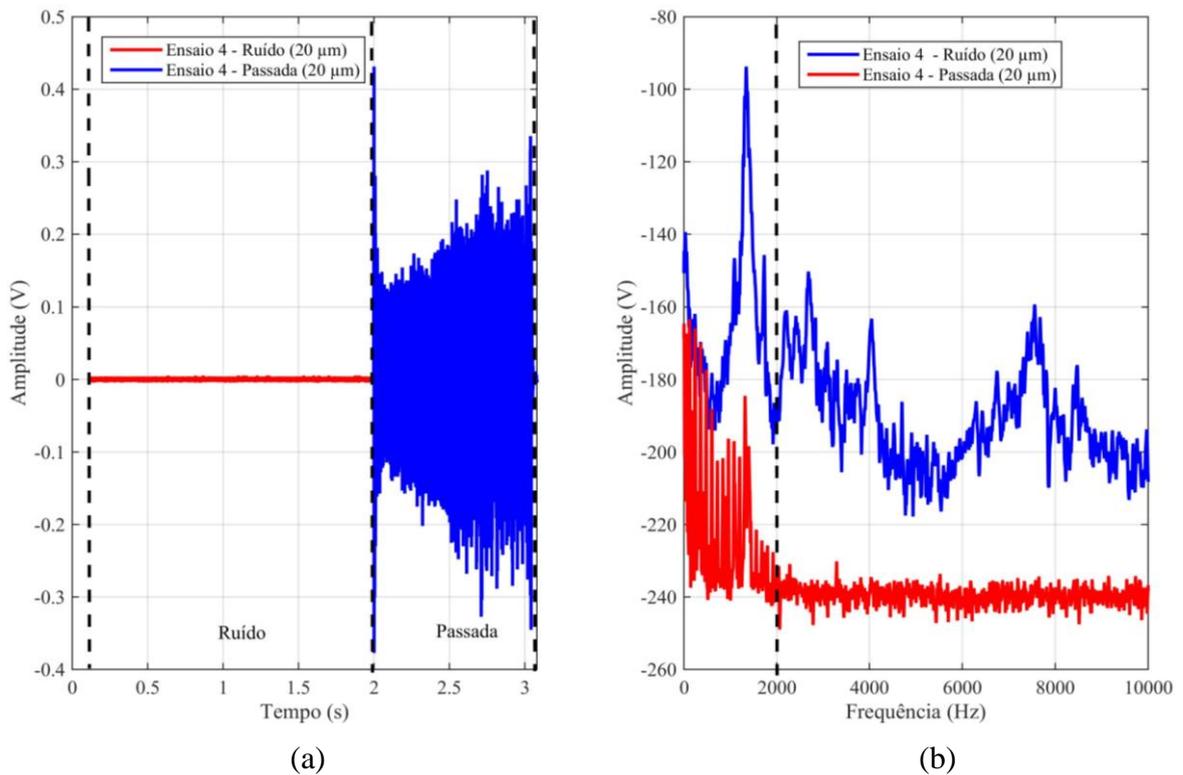
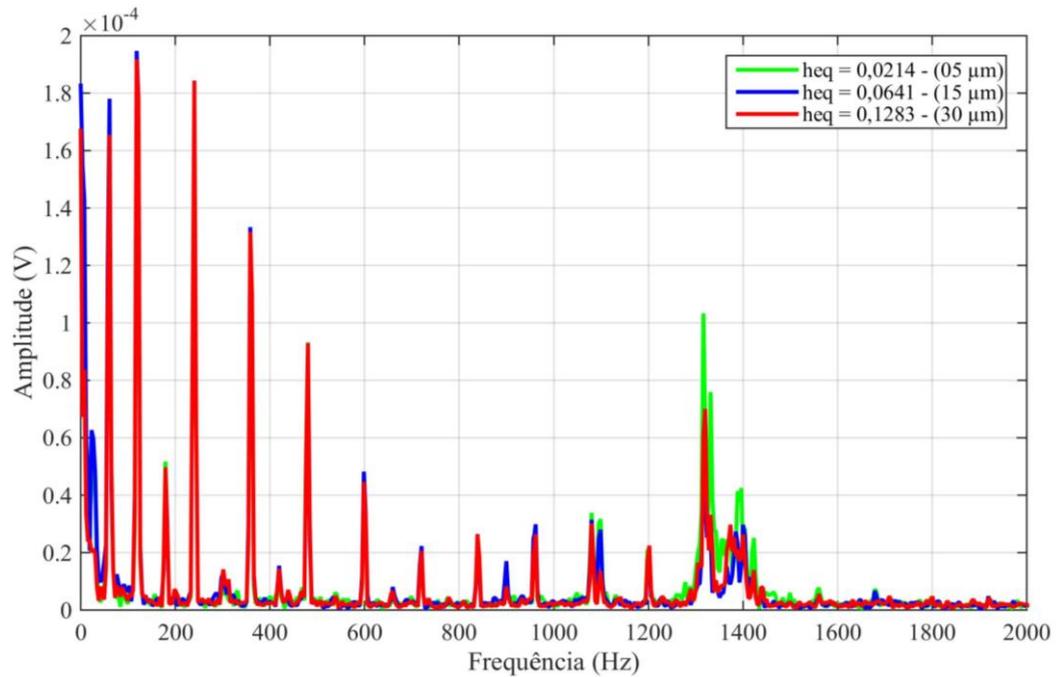
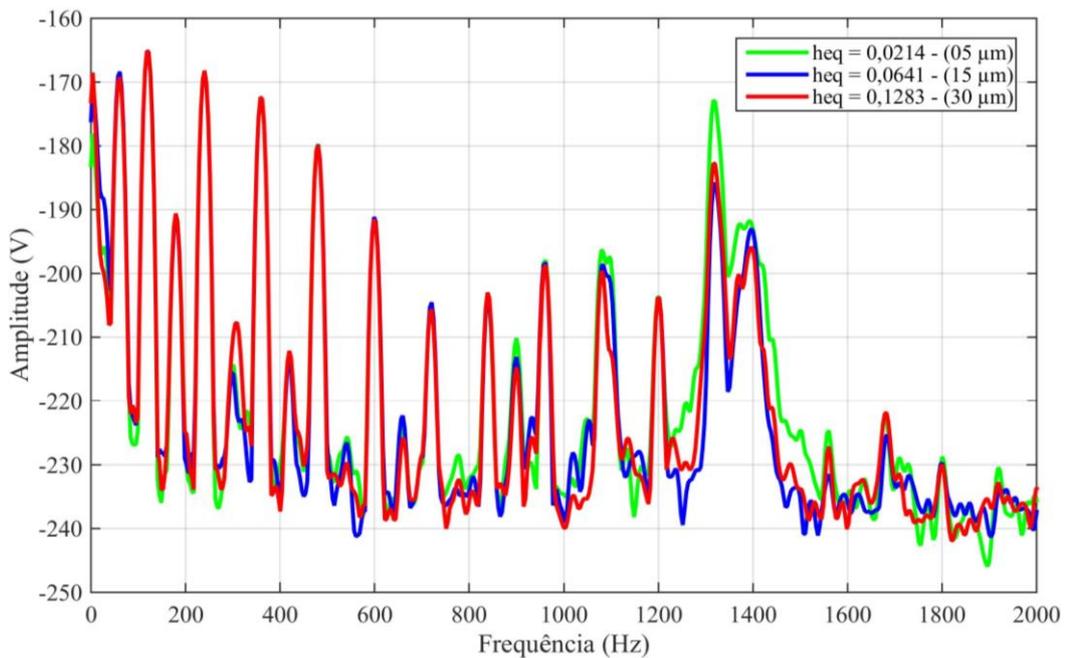


Figura 4.17- (a) Ruído e sinal de vibração correspondente a passada de 20  $\mu\text{m}$ ; (b) PSD do ruído e da passada de 20  $\mu\text{m}$  .

A análise do ruído utilizando a FFT e a PSD na banda de 0 a 2 kHz em três condições de usinagem diferentes ( $heq = 0,0214 \mu\text{m}$ ;  $heq = 0,0641 \mu\text{m}$ ,  $heq = 0,1283 \mu\text{m}$ ) é apresentada na Figura 4.18a e 4.18b. Novamente como observado no aço ABNT 1045 em ambos espectros é possível observar a ocorrência de harmônicas devido as frequências naturais da máquina e de seus componentes.



(a)



(b)

Figura 4.18- (a) FFT ruído do sinal; (b) PSD do ruído do sinal

O espectro de frequências para três condições de profundidade de corte distintas de retificação, a saber, 5  $\mu\text{m}$ , 15  $\mu\text{m}$  e 30  $\mu\text{m}$  é apresentado na Figura 4.19. Os picos de frequência no sinal múltiplos de 30 Hz e 60 Hz podem ser facilmente identificados de forma análoga aos picos que constam nos ensaios referentes ao aço ABNT 1045. Em suma, os sinais de vibração

obtidos para o aço VC131, até o momento, apresentam comportamento similar quando analisados da mesma forma que os sinais de vibração do aço ABNT 1045.

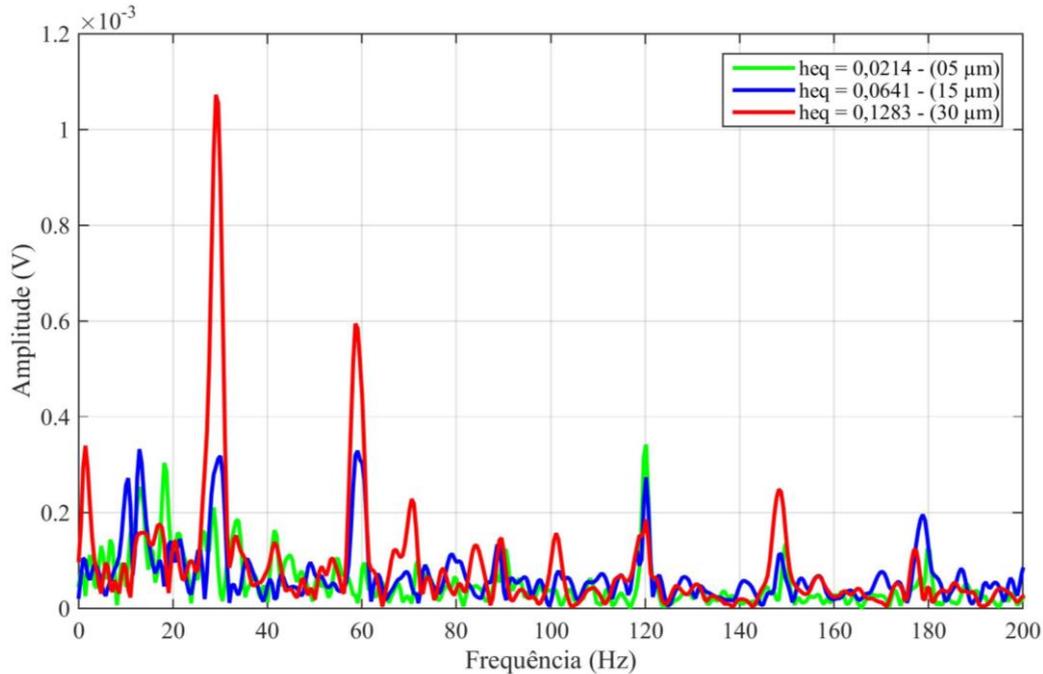


Figura 4.19- FFT do sinal em três profundidades de corte: 5 µm, 15 µm e 30µm

#### 4.2.1 Aplicação da STFT nas condições de retificação estudadas

A aplicação da STFT nos sinais de vibração, filtrados na banda de 2 kHz a 7 kHz e reamostrados a uma taxa de 20 kHz, referentes as passadas de retificação do aço VC131 é apresentada na Figura 4.20. Em relação aos resultados apresentados na seção correspondente ao aço ABNT 1045 é possível observar alterações significativas na natureza dos espectros da STFT. As amplitudes dos sinais de vibração referentes as passadas durante o processo de retificação do aço VC131 são maiores do que as amplitudes dos sinais de vibração referentes ao aço ABNT 1045. Esse fenômeno influencia de forma direta no resultado do espectro no tempo e frequência. A maior amplitude dos sinais de vibração provenientes da retificação do aço VC131 é justificada pela dureza do material e sua composição, o que acarreta em um maior esforço para remoção de material da superfície da peça na zona de corte, este fato é corroborado pelas análises de potência que apresentam níveis maiores para as profundidades de corte pertencentes ao aço VC131 e que serão apresentadas na seção 4.2.2.

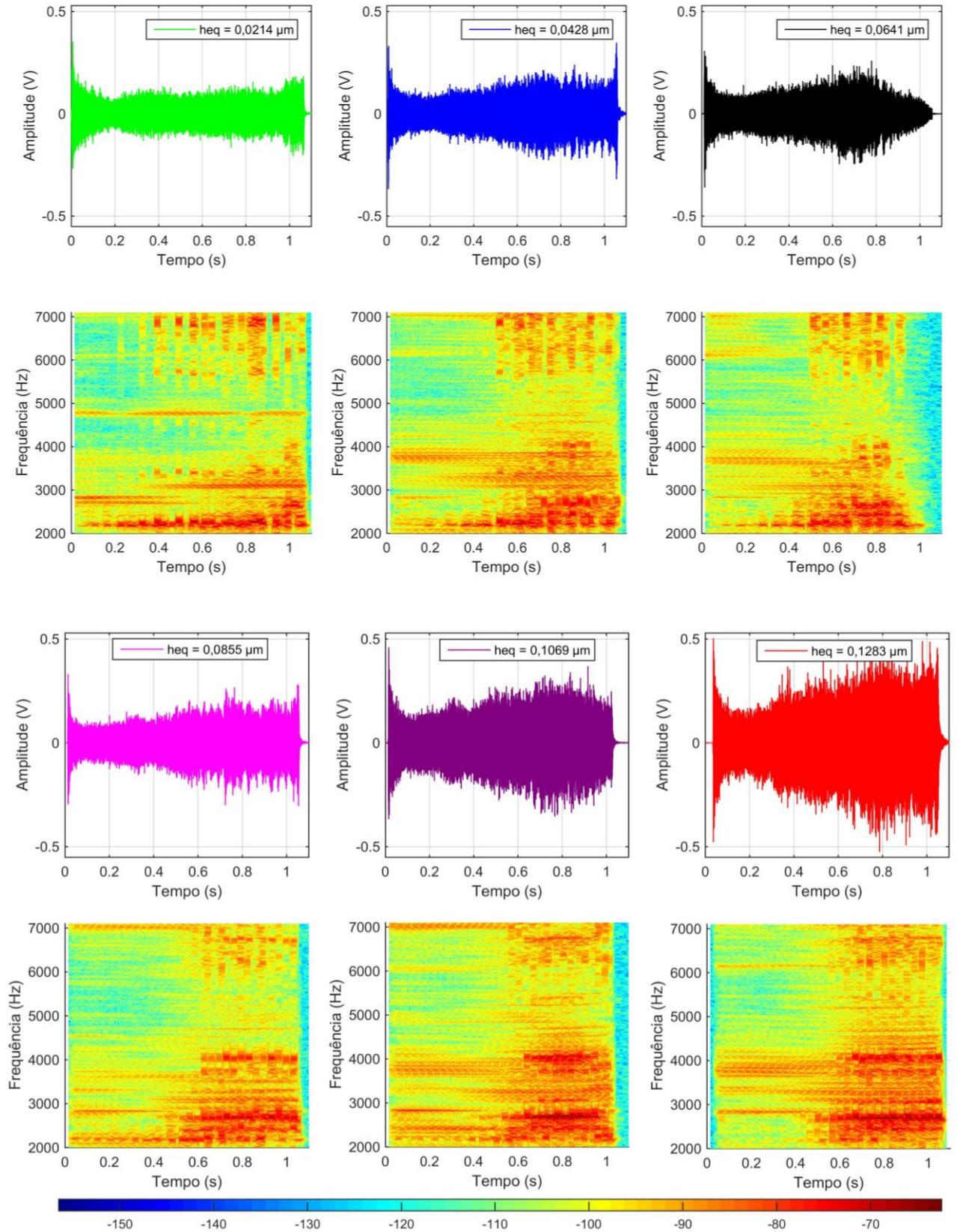


Figura 4.20- STFT para todos os sinais de retificação.

Apesar das diferenças encontradas entre os espectros pertencentes ao aço ABNT 1045 e VC131, análise similar pode ser efetuada. Ao compararmos a STFT do sinal de vibração da passada de retificação correspondente ao Ensaio 1 -  $heq = 0,0214 \mu\text{m}$ , onde não houve queima com a STFT do sinal de vibração da passada de retificação correspondente ao Ensaio 6 -  $heq = 0,1283 \mu\text{m}$ , onde houve queima, há diferenças perceptíveis nas amplitudes das frequências. A região entre 3 kHz a 4 kHz apresenta frequências com amplitudes entre -120 e -110 para  $heq = 0,0214 \mu\text{m}$ , enquanto que situação oposta ocorre com  $heq = 0,1283 \mu\text{m}$ , onde observa-se amplitudes da ordem de -90 a -70. Por meio dessa análise é possível identificar as peças com maior potencial de queima (Ensaio 5 e 6), porém, somente por meio dessa análise é difícil determinar o momento em que o fenômeno de queima se inicia, portanto, a análise conjunta entre STFT dos sinais de vibração, inspeção visual, dureza vickers e RMSD do sinal de vibração se faz necessária.

#### **4.2.2 Análise da potência das passadas de retificação**

A potência para todas as passadas da retificação do aço VC131 é apresentada na Figura 4.21. As amplitudes das potências referentes as passadas do processo de retificação do aço VC131 possuem grandes diferenças em relação a potência dos ensaios de retificação efetuados com aço ABNT 1045. Enquanto que nos ensaios do aço ABNT 1045 as potências de retificação das peças que não apresentaram queima mantiveram níveis constantes e pouco aleatórios, as potências das peças que não apresentaram queima referentes ao ensaio com VC131 possuem pouca estabilidade, ou seja, apresentaram um perfil aleatório. Essa aleatoriedade nos sinais de potência é baseada na composição do aço VC131, pois o mesmo, possui dureza elevada quando comparado ao aço ABNT 1045. A dureza elevada acarreta em maiores esforços para a penetração dos grãos abrasivos da superfície de corte do rebolo na superfície da peça que está sendo usinada, essa dificuldade de penetração tem como principal consequência, esforço maior para remoção de material da superfície da peça acarretando dessa forma no aumento da potência do sistema, o que por sua vez, reflete nos sinais de potência amostrados durante os ensaios. Os ensaios 5 e 6 possuem o maior nível de potência quando comparados aos outros ensaios, sendo um indicativo da ocorrência de queima nessas peças, corroborando as análises efetuadas por meio da STFT dos sinais de vibração descritas na seção anterior. Da mesma forma que observado no aço ABNT 1045, o aumento da potência está relacionado a profundidade de corte e aos eventos de ocorrência do fenômeno de queima.

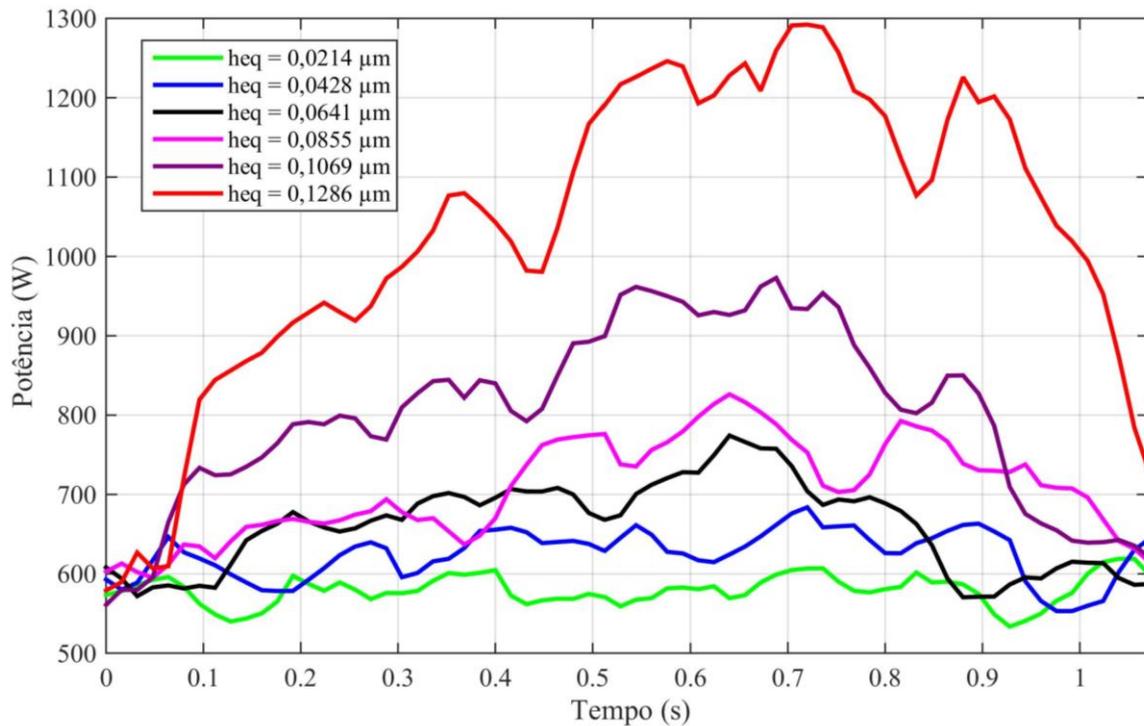


Figura 4.21- Potência RMS para todas as passadas de retificação

A média da potência RMS para todas as passadas de retificação do aço VC131 é apresentada na Figura 4.22. Novamente os níveis de potência são influenciados pelos parâmetros e eventos do processo. No entanto, o comportamento da potência no decorrer dos ensaios no aço VC131 apresenta crescimento constante quando comparado ao comportamento da potência média do aço ABNT 1045, onde um comportamento estável até a passada imediatamente anterior a detecção de queima (Ensaio 6 - Figura 4.10) foi observado. A partir da Figura 4.22 é possível identificar a queima na peça do Ensaio 6 de profundidade de corte de 30 μm devido ao elevado nível de potência média (1100 W). Em relação a peça do Ensaio 5 é observado um aumento na potência em relação a taxa de crescimento da mesma apresentada até o Ensaio 4 de profundidade de corte de 20 μm. No decorrer das passadas o crescimento da potência média estava na faixa de 50 W a cada 5 μm de profundidade de corte, o que foi alterado na passada do Ensaio 5, onde o crescimento em relação ao ensaio 4 foi de aproximadamente 100 W, ou seja, o dobro. Esse crescimento brusco, pode ser um indicativo da queima, que de fato ocorreu na superfície da peça do ensaio 5. Assim, essa análise de potência dos ensaios de retificação do aço VC131, permitiria estabelecer um limiar para detecção da queima, contudo, a região que o fenômeno de queima se inicia na superfície da peça não seria identificada, visto que, a resposta da potência para eventos como a queima é lenta quando comparada a outros tipos de sinais, como a emissão acústica e a vibração.

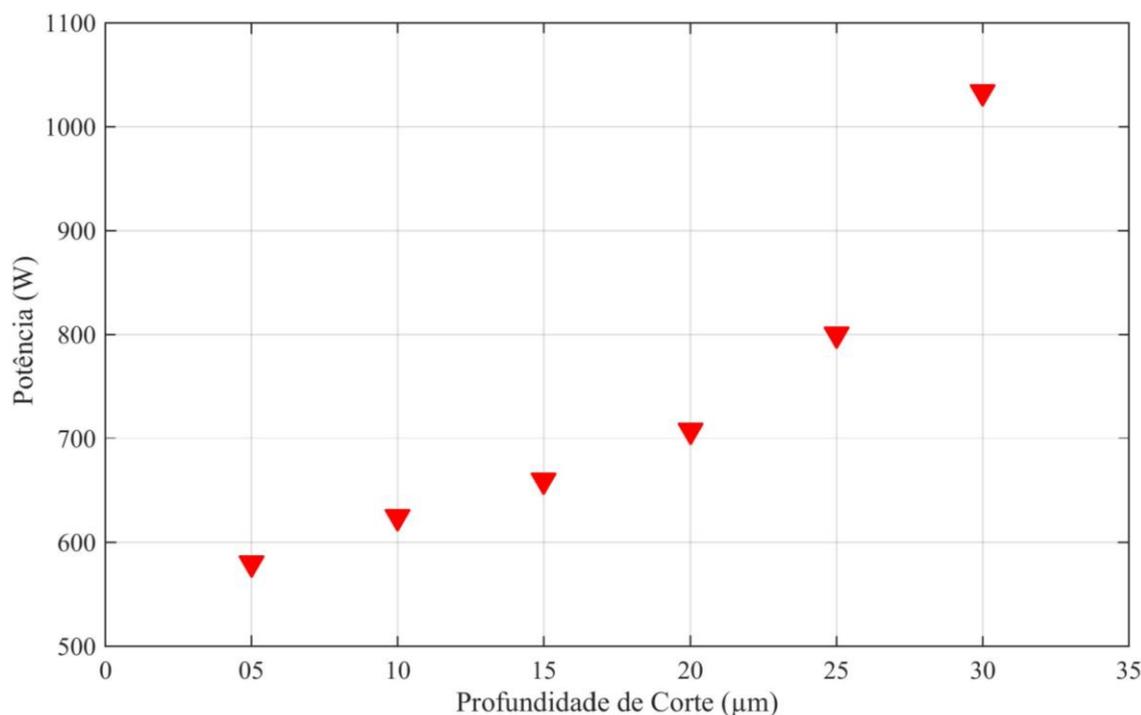


Figura 4.22- Média da potência RMS das passadas de retificação.

Um comparativo entre a potência média de todos os ensaios do aço ABNT 1045 e do aço VC131 é apresentado na Figura 4.23. É possível observar que apenas na profundidade de 5  $\mu\text{m}$  o aço ABNT 1045 possui uma potência ligeiramente maior do que o aço VC131. A partir da profundidade de 10  $\mu\text{m}$  as potências das passadas do aço VC131 apresentam valor médio maior que os valores médios das potências das passadas do aço ABNT 1045. Por exemplo, o valor da potência média da passada do aço VC131 na profundidade de 20  $\mu\text{m}$  é maior do que o valor da potência média de aço ABNT 1045 para a mesma profundidade, além disso, a amplitude da potência do aço VC131 nessa profundidade, cerca de 700 W, é muito próxima da amplitude da potência do aço ABNT 1045 na profundidade corte de 35  $\mu\text{m}$  (690 W), ou seja, o aço VC131 demanda a mesma potência na remoção de material em relação ao aço ABNT 1045 com uma diferença de 15  $\mu\text{m}$ . Esse fato pode ser observado na relação entre a amplitude da potência na passada de 10  $\mu\text{m}$  para o aço VC131 e a amplitude da potência da passada de 25  $\mu\text{m}$  para o aço ABNT 1045, sendo 630 W e 640 W, respectivamente. O aço VC131 possui uma dureza maior que o aço ABNT 1045, justificando assim o aumento da potência, devido a maior dificuldade que as arestas de corte da superfície do rebolo sofrem para remover material. Em adição a esse fenômeno, a friabilidade dos grãos abrasivos auxilia na elevação da potência, visto que, a quebra das arestas de corte ou até mesmo a perda das mesmas acarretam no aumento da força,

pois há menos grãos abrasivos em contato com a superfície do rebolo. Todos esses fatores contribuem de forma significativa para o aumento do nível da potência. Além disso, essas diferenças nos valores de potência entre os aços VC131 e ABNT 1045 auxiliam na compreensão dos espectros de frequência dos sinais de vibração. As composições dos materiais, os esforços necessários para remoção de material, bem como, as condições do processo de retificação justificam as diferenças constantes nos espectros de frequência, visto que, os sinais amostrados reproduzem os eventos que ocorreram no processo.

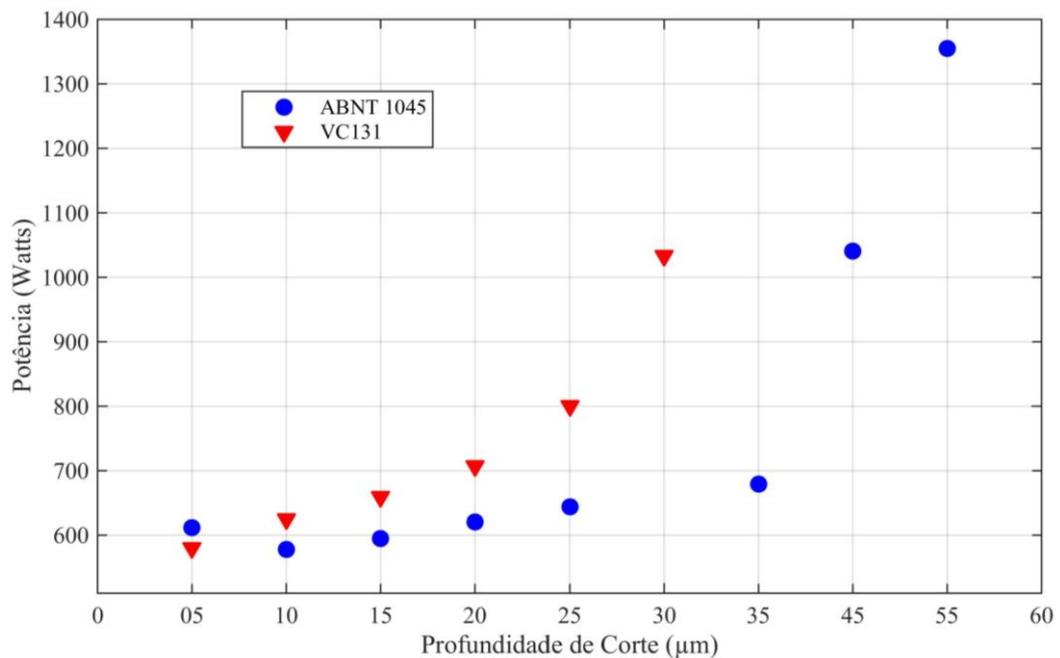


Figura 4.23- Média da potência RMS das passadas de retificação para o aço ABNT1045 e VC131.

### 4.2.3 Índices RMSD e Análise conjunta

A partir dos sinais filtrados e decimados foi efetuado o cálculo do índice RMSD do sinal de vibração referente as passadas de retificação. O índice RMSD para todos os ensaios no intervalo de frequências de 3,7 kHz a 4,5 kHz é apresentado na Figura 4.24. O RMSD do ensaio 5 ( $h_{eq} = 0,1069 \mu\text{m}$ ) e do ensaio 6 ( $h_{eq} = 0,1283 \mu\text{m}$ ) apresentam os maiores níveis de amplitude, sendo um indicativo do fenômeno de queima. O limiar de queima foi estabelecido de acordo com o crescimento observado na análise de dureza vickers apresentada na Figura 4.15a. Essa análise indica que o início da queima para o ensaio 5 está localizado na região de 60 a 70

mm, enquanto que, o início da queima para o ensaio 6 está localizado, na região de 20 a 30 mm, essas regiões são indicadas na Figura 4.24.

O índice CCDM está disposto no Apêndice III devido ao mesmo não apresentar boa relação com os eventos observados durante o processo, assim o mesmo foi descartado.

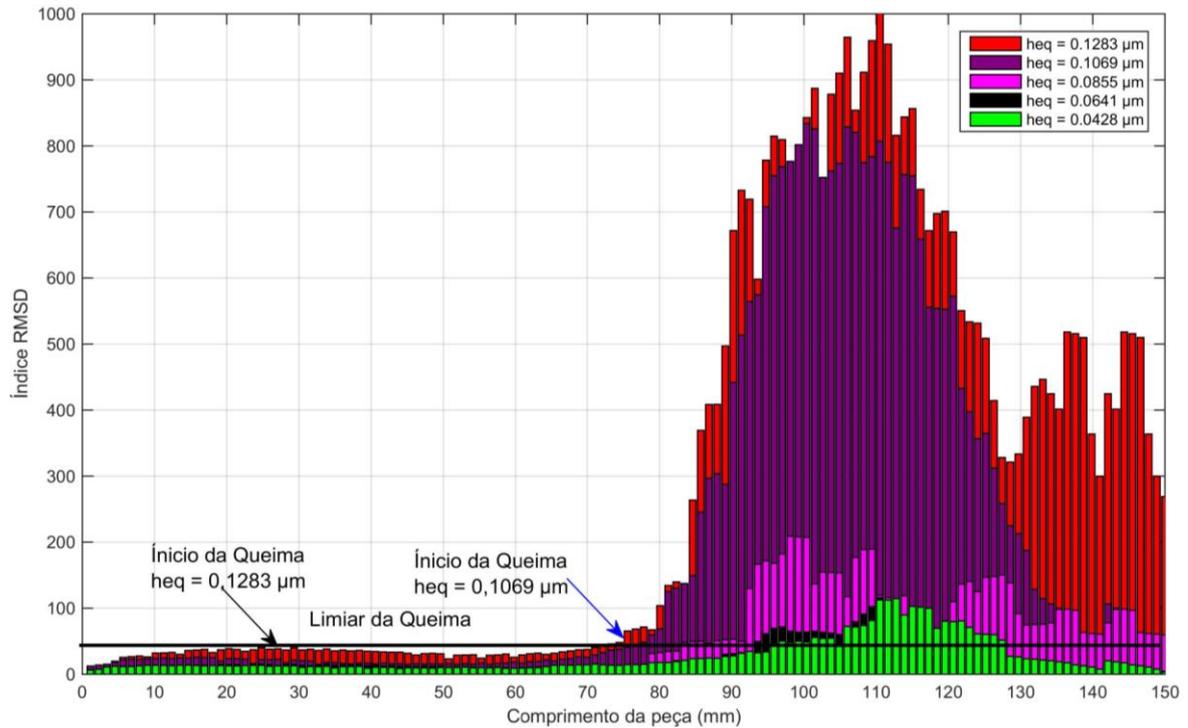


Figura 4.24- RMSD obtido do sinal de vibração na banda 3,7 – 4,5 kHz.

Os ensaios 2 – heq = 0,0428 µm; 3 – heq = 0,0641 µm e 4 - heq = 0,0855 µm possuem regiões acima do limiar de queima. No entanto, as análises metalográficas e a dureza Vickers na superfície da peça não indicaram a ocorrência de mudança estrutural, ou seja, não houve ocorrência de queima nesses ensaios. A comparação entre a dureza Vickers, apresentada na Figura 4.15a e o índice RMSD para o sinal de vibração apresentado na Figura 4.24 é exibida na Figura 4.25. Observa-se que houve um aumento significativo na dureza Vickers do ensaio 4 entre 60 e 130 mm da superfície da peça. Esse aumento de dureza Vickers, não caracteriza a queima, visto que, o nível de dureza das peças que apresentaram queima está entre 1000 a 1100 HV. No entanto, o índice RMSD detectou essa variação e indicou a ocorrência de queima, caracterizando um falso-positivo pois não houve ocorrência de queima, somente uma variação no valor de dureza Vickers.

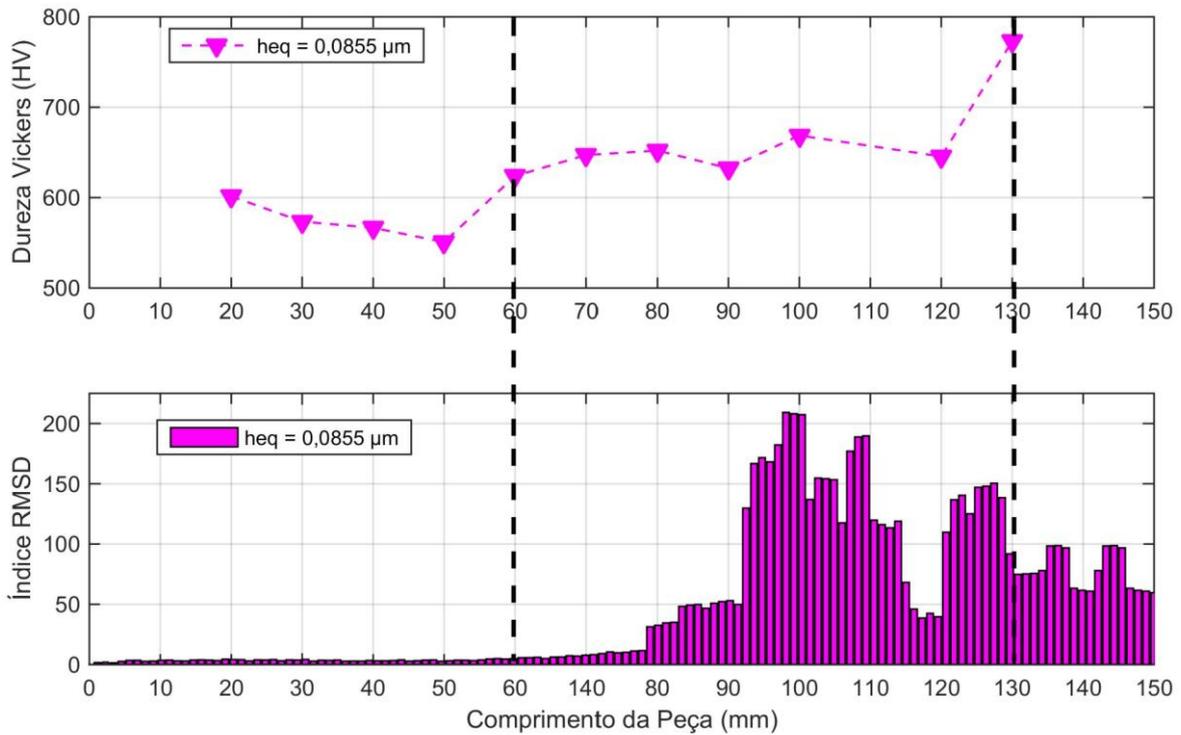


Figura 4.25- Comparação entre dureza Vickers e RMSD do Ensaio 4 –  $heq = 0,0855 \mu\text{m}$

A análise conjunta entre a inspeção visual, a dureza vickers mensurada na superfície da peça, a STFT dos sinais de vibração amostrados durante o processo de retificação e por fim o RMSD desses sinais é apresentada na Figura 4.26. Os ensaios 2 ( $heq = 0,0428 \mu\text{m}$ ), 5 ( $heq = 0,1069 \mu\text{m}$ ) e 6 ( $heq = 0,1283 \mu\text{m}$ ) são apresentados respectivamente. É possível observar no ensaio 5 a alteração brusca na dureza vickers, próximo da região de 60 mm de comprimento da peça, indicando o surgimento de camada branca e consequentemente aumento de dureza. Analisando a região correspondente no tempo (0,40 a 0,50 s) é perceptível o aumento da amplitude das frequências na STFT, indicando a ocorrência do fenômeno de queima, porém, esse aumento de amplitude de frequências no espectro também ocorre em outros períodos indicando que eventos relacionados a mudança de fase e aumento de dureza estão ocorrendo ao longo do processo e influenciando o sinal de vibração. Observa-se um crescimento na amplitude do RMSD do ensaio 5 próximo a região de 70 a 80 mm. Assim, a partir da análise da STFT e do índice RMSD do ensaio 5 é possível inferir o início do fenômeno de queima entre 60 a 80 mm, corroborando os indicativos de dureza Vickers para esse ensaio. A última análise é referente ao ensaio 6. A partir da dureza Vickers é observado um nível de dureza muito alto próximo do início da peça (30 mm), demonstrando que o processo de retificação foi muito agressivo e severo. A STFT do ensaio 6 de forma semelhante a STFT do ensaio 5 apresenta a ocorrência de variações

nas amplitudes de frequências desde o início do processo, tornando difícil determinar com precisão a região de início do fenômeno de queima. Por fim, observa-se um pequeno aumento no índice RMSD correspondente ao Ensaio 6 a partir de 30 mm e um aumento considerável desse índice na região de 80 mm. Considerando a região de 80 mm, o valor de dureza Vickers é de 1100 HV, indicando a ocorrência de queima. Nessa região o índice apresentou comportamento satisfatório pois permitiu identificar a queima. No entanto na região de 30 mm que possui valor de dureza Vickers de 1000 HV, considerado um valor de ocorrência de queima, o índice RMSD do sinal de vibração não apresentou crescimento considerável. Dessa forma é necessário, considerar o limiar de queima apresentado na Seção 4.2.3, o que acarreta em um falso positivo para as peças dos ensaios 2, 3 e 4. Dessa forma, a análise conjunta permite identificar as peças que tiveram a ocorrência de queima, porém a região de início do fenômeno na superfície da peça é prejudicada, visto que, a STFT e o índice RMSD indicam regiões diferentes das obtidas pela dureza Vickers.

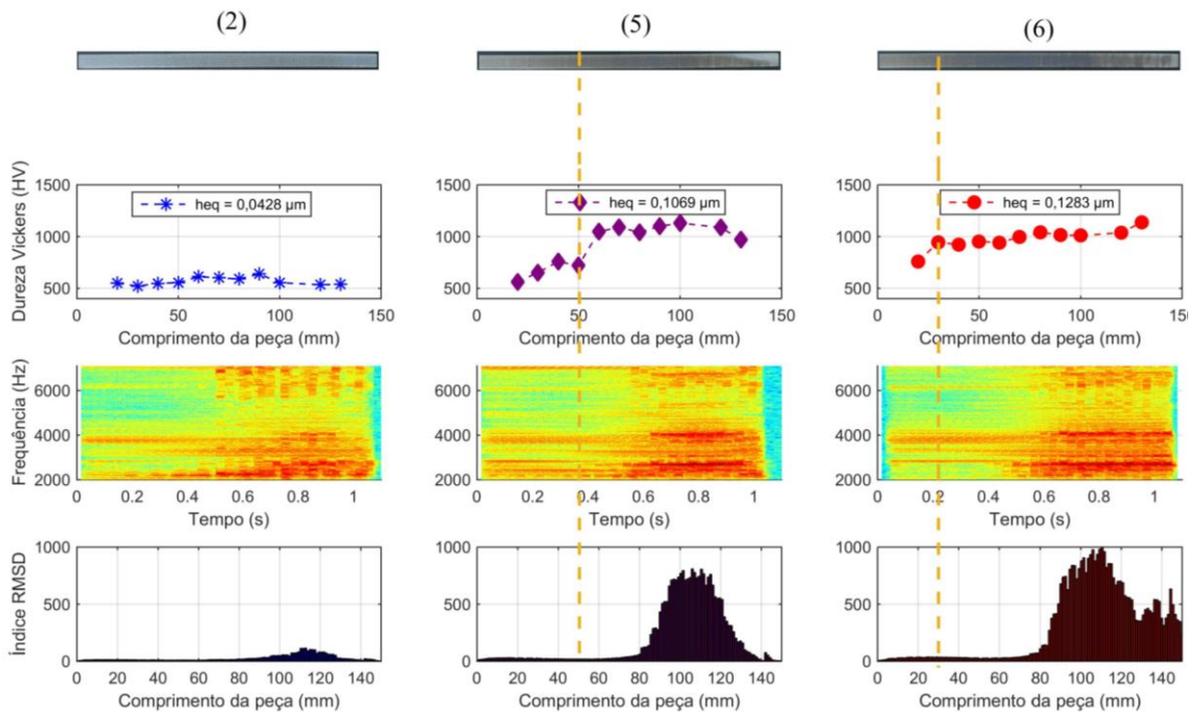


Figura 4.26- Análise Conjunta entre Inspeção visual, Dureza Vickers, STFT e RMSD. Ensaios 2, 5 e 6.

## Capítulo 5 – CONCLUSÕES

---

Neste trabalho um sensor de vibração e de potência foram utilizados para monitorar o processo de retificação, com objetivo de auxiliar na identificação do fenômeno de queima, bem como, do momento em que o mesmo ocorre. Para tanto, fez-se uso de processamento digital de sinais, tais como: Transformada Rápida de Fourier (FFT), Densidade Espectral de Potência (PSD), seleção de bandas de frequências que caracterizam o processo, Transformada de Fourier de Tempo Curto (STFT) e RMSD do sinal. Além do processamento de sinais de vibração e potência, a dureza superficial da peça, testes de metalografia e inspeção visual da superfície das peças foram efetuadas para melhor fundamentar as conclusões deste estudo.

A metalografia e dureza da peça são processos invasivos e não usuais na indústria, visto que, existe a necessidade de interrupção do processo para auferir a condição da mesma. A partir de dados de vibração no monitoramento da retificação foi proposto uma metodologia para identificar o momento da ocorrência do fenômeno de queima.

Os resultados apontam que as condições de retificação influenciam de forma direta nos sinais, alterando os espectros de frequência. É possível identificar bandas que caracterizem o processo observando a não sobreposição das mesmas. Além disso deve-se observar a influência do ruído nos sinais amostrados. Após o tratamento digital de sinais, a aplicação da STFT, observando a melhor resolução tempo-frequência é possível identificar a região do início da ocorrência do fenômeno de queima. Por fim, a aplicação do índice RMSD no sinal de vibração apresentou bons resultados, intensificando os resultados da análise conjunta entre todos os resultados observados.

O método proposto apresentou resultados confiáveis no que tange a identificação do fenômeno de queima, ou seja, se houve ou não queima na superfície da peça. No entanto, quando se busca a identificação do momento que se inicia a queima, o método apresenta melhores resultados para o aço ABNT 1045 em detrimento do aço VC131. Assim, estudos complementares devem ser efetuados em trabalhos futuros para que o método possa ser estendido para outros materiais com maior acurácia.

Finalmente, ressalta-se a utilização do acelerômetro (sensor de vibração) para o monitoramento do processo de retificação, visto que, muitos trabalhos adotam para o mesmo fim, o sensor de emissão acústica. Assim, espera-se ampliar as opções de monitoramento do processo de retificação observando o custo – benefício para as empresas e em acréscimo contribuindo com o estudo na ampliação do conhecimento da comunidade científica.

### **5.1 Sugestão para os próximos trabalhos.**

- ❖ Ampliar as investigações no intuito de encontrar bandas de frequência que permitam alcançar melhores resultados e uma possível combinação com outros parâmetros;
- ❖ Analisar mais regiões da superfície da peça usinada mapeando a condição da peça por meio da metalografia e medições de dureza superficial e transversal à peça.
- ❖ Avaliação de microscopia eletrônica de varredura (MEV) nas peças de aço.

## REFERÊNCIAS

- ABELLAN-NEBOT, J. V.; ROMERO SUBIRON, F. A review of machining monitoring systems based on artificial intelligence process models. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 47, n. 1–4, p. 237–257, 29 mar. 2010.
- AGUIAR, P. R. P.; BIANCHI, E. C. E.; OLIVEIRA, J. J. F. G. A method for burning detection in grinding process using acoustic emission and effective electrical power. **CIRP Journal of Manufacturing Systems**, v. 31, n. 3, p. 253–257, 2002.
- AGUIAR, P. R. R. et al. In-process grinding monitoring by acoustic emission. **2004 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing**, v. 5, p. 1–4, 2004.
- ALEXANDRE, F. A. et al. Tool condition monitoring of aluminum oxide grinding wheel using AE and fuzzy model. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 1, p. 1–13, 17 jan. 2018.
- 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. 7, p. 2129–2135, jul. 2007.
- ALMEIDA, V. A. D. DE; BAPTISTA, F. G.; AGUIAR, P. R. DE. 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.
- ANJOS, M. A. DOS et al. Experimental study of the use of conventional wheels on steel processing VP-50 used in the cylindrical grinding by means of different methods of lubrication and cooling. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 21, n. 1, p. 169–184, mar. 2016.
- AXINTE, D. A. et al. Process monitoring to assist the workpiece surface quality in machining. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 44, n. 10, p. 1091–1108, ago. 2004.
- BACCAR, D.; SÖFFKER, D. Wear detection by means of wavelet-based acoustic emission analysis. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 60, p. 198–207, 2015.
- BADGER, J.; MURPHY, S.; O'DONNELL, G. The effect of wheel eccentricity and run-out on grinding forces, waviness, wheel wear and chatter. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 51, n. 10–11, p. 766–774, out. 2011.
- BATAKO, A. D. L.; GOH, S. Y. Workpiece roundness profile in the frequency domain: An application in cylindrical plunge grinding. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 72, n. 1–4, p. 277–288, 2014.

BIANCHI, E. C. et al. Behavior Analysis of Conventional Grinding Wheel in Brittle and Ductile Steels Machining. **J. of the Braz. Soc. of Mech. Sci. & Eng.**, v. XIX, n. 3, p. 410–425, 1997.

BIANCHI, E. C. et al. Analysis of the performance of superabrasive and alumina grinding wheels with different bonds and machining conditions. **Materials Research**, v. 6, n. 2, p. 239–246, jun. 2003.

BIANCHI, E. C. et al. The evaluation of the bond resin and vitrified and abrasive grain CBN and alumina influence in the grinding wheel topography characteristics, by the study of the grinding wheel sharpness. **Cerâmica**, v. 57, n. 344, p. 431–437, dez. 2011.

BLACK, J. T.; KOHSER, R. A. **DeGarmo's Materials and Processes in Manufacturing**. 10. ed. River Street, Hoboken: John Wiley & Sons, Inc, 2008.

BOSHEH, S. S. S.; MATIVENGA, P. T. T. White layer formation in hard turning of H13 tool steel at high cutting speeds using CBN tooling. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 46, n. 2, p. 225–233, 2006.

BRINKSMEIER, E. et al. Residual Stresses — Measurement and Causes in Machining Processes. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 31, n. 2, p. 491–510, 1982.

BRINKSMEIER, E. et al. Modelling and optimization of grinding processes. **Journal of Intelligent Manufacturing**, v. 9, n. 4, p. 303–314, 1998.

CAI, R.; ROWE, W. B. Assessment of vitrified CBN wheels for precision grinding. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 44, n. 12–13, p. 1391–1402, out. 2004.

CAMARGO, J. C. et al. Wear model in turning of hardened steel with PCBN tool. **International Journal of Refractory Metals and Hard Materials**, v. 47, p. 61–70, 2014.

CAMERON, A.; BAUER, R.; WARKENTIN, A. An investigation of the effects of wheel-cleaning parameters in creep-feed grinding. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 50, n. 1, p. 126–130, jan. 2010.

CATAI, R. E. **Optimization of the coolant/lubrication conditions in the cylindrical plunge grinding process**Bauru, 2004.

CHANG, J. I. et al. Recycling oil and steel from grinding swarf. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 49, n. 2, p. 191–201, dez. 2006.

CHEN, X. et al. A Grinding Power Model for Selection of Dressing and Grinding Conditions. **Journal of Manufacturing Science and Engineering**, v. 121, n. 4, p. 632, 1999.

CHEN, X.; LIMCHIMCHOL, T. Monitoring grinding wheel redress-life using support vector machines. **International Journal of Automation and Computing**, v. 3, n. 1, p. 56–62,

jan. 2006.

CONCEIÇÃO JUNIOR, P. DE O. et al. Estimação espectral do sinal de vibração para o monitoramento do desgaste do dressador de ponta única. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 21, n. 4, p. 827–840, dez. 2016.

DAVID, C.; WARNECKE, G. A correlation between cutting process and dynamics of the machine-tool-system in grinding. **Trans. NAMRI/SME**, v. 24, p. 51–56, 1996.

DE CASTRO, B. A. et al. Assessment of Macro Fiber Composite Sensors for Measurement of Acoustic Partial Discharge Signals in Power Transformers. **IEEE Sensors Journal**, v. 17, n. 18, p. 6090–6099, 15 set. 2017.

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

DI ILIO, A.; PAOLETTI, A. A comparison between conventional abrasives and superabrasives in grinding of SiC-aluminium composites. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 40, n. 2, p. 173–184, jan. 2000.

DIAS, E. A. et al. Monitoring of through-feed centreless grinding processes with acoustic emission signals. **Measurement**, v. 94, p. 71–79, 2016.

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**. 7. ed. São Paulo, SP: Artiliber Editora Ltda, 2010.

DOTTO, F. R. L. et al. Automatic system for thermal damage detection in manufacturing process with internet monitoring. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 28, n. 2, p. 153–160, 2006.

FERREIRA, F. I. **Predição da Largura Útil de Dressadores de Ponta Única Utilizando Emissão Acústica e Redes Neurais**, Bauru, 2016.

FLETCHER, P.; SANGWINE, S. J. The development of the quaternion wavelet transform. **Signal Processing**, v. 136, p. 2–15, jul. 2017.

FRADEN, J. **Handbook of Modern Sensors**. New York, NY: Springer New York, 2010.

FREITAS, E. S. DE. **Análise Experimental de Diafragmas Piezelétricos Comerciais para Detecção de Dano Estrutural Baseada na Impedância Eletromecânica**, Bauru, 2016.

GAO, Y. et al. A wavelet approach to determine the switching frequency for composite control during surface grinding. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 129, n. 1–3, p. 480–484, out. 2002.

GONG, J.; WU, J.; GUAN, Z. Examination of the indentation size effect in low-load

vickers hardness testing of ceramics. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 19, n. 15, p. 2625–2631, nov. 1999.

GRADIŠEK, J. et al. Automatic chatter detection in grinding. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 43, n. 14, p. 1397–1403, nov. 2003.

GRIFFIN, J. M.; CHEN, X. Multiple classification of the acoustic emission signals extracted during burn and chatter anomalies using genetic programming. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 45, n. 11–12, p. 1152–1168, 2009.

HARRIS, C. M.; PIERSOL, A. G. **Harris' Shock and Vibration Handbook**. 5. ed. New York: McGraw-Hill, 2002.

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

HEINZEL, C.; ANTSUPOV, G. Prevention of wheel clogging in creep feed grinding by efficient tool cleaning. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 61, n. 1, p. 323–326, 2012.

HIROSHI, E.; KISHI, K.; HASHIMOTO, S. The Formation Mechanism of Ground White Layers. **Bulletin of JSME**, v. 24, n. 190, p. 743–747, 1981.

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

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

INAZAKI, I.; YONETSU, S. Forced Vibrations during Surface Grinding. **Bulletin of JSME**, v. 12, n. 50, p. 385–391, 1969.

JACKSON, M. J. et al. Laser cleaning and dressing of vitrified grinding wheels. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 185, n. 1–3, p. 17–23, abr. 2007.

JACKSON, M. J.; MILLS, B. Microscale wear of vitrified abrasive materials. **Journal of Materials Science**, v. 39, n. 6, p. 2131–2143, mar. 2004.

JEMIELNIAK, K. Commercial Tool Condition Monitoring Systems. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 15, n. 10, p. 711–721, 5 set. 1999.

JUNIOR, P. O. C. C. et al. Wear Monitoring of Single-Point Dresser in Dry Dressing Operation Based on Neural Models. **Modelling, Identification and Control**, n. Mic, p. 178–185, 2017.

KALPAKJIAN, S.; SCHMID, S. R. **Manufacturing Engineering and Technology**. 7. ed. Singapore: Pearson Education South Asia Pte Ltd, 2014.

KARPUSCHEWSKI, B.; WEHMEIER, M.; INASAKI, I. Grinding Monitoring System Based on Power and Acoustic Emission Sensors. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 49, n. 1, p. 235–240, jan. 2000.

KIM, B. S. et al. A comparative study on damage detection in speed-up and coast-down process of grinding spindle-typed rotor-bearing system. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 187–188, p. 30–36, 2007.

KIM, H.; MELHEM, H. Fourier and wavelet analyses for fatigue assessment of concrete beams. **Experimental Mechanics**, v. 43, n. 2, p. 131–140, jun. 2003.

KING, R. I.; HAHN, R. S. **Handbook of Modern Grinding Technology**. 3<sup>a</sup> ed. Boston, MA: Springer US, 1987.

KOVAČ, P. et al. A review of machining monitoring systems. **Journal of Production Engineering**, v. 14, n. 1, p. 1–6, 2011.

KRUSZYŃSKI, B. W.; WÓJCIK, R. Residual stress in grinding. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 109, n. 3, p. 254–257, fev. 2001.

KUNDRÁK, J. et al. Diamond grinding wheels production study with the use of the finite element method. **Journal of Advanced Research**, v. 7, n. 6, p. 1057–1064, nov. 2016.

KWAK, J. S.; HA, M. K. Neural network approach for diagnosis of grinding operation by acoustic emission and power signals. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 147, n. 1, p. 65–71, 2004a.

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

KWAK, J.; SONG, J. Trouble diagnosis of the grinding process by using acoustic emission signals. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 41, n. 6, p. 899–913, 2001.

LAURO, C. H. et al. Monitoring and processing signal applied in machining processes - A review. **Measurement: Journal of the International Measurement Confederation**, v. 58, p. 73–86, 2014.

LEZANSKI, P. An intelligent system for grinding wheel condition monitoring. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 109, n. 3, p. 258–263, fev. 2001.

LI, H. N. et al. Detailed modeling of cutting forces in grinding process considering variable stages of grain-workpiece micro interactions. **International Journal of Mechanical Sciences**, v. 126, p. 319–339, jun. 2017.

LI, H. N.; AXINTE, D. Textured grinding wheels: A review. **International Journal of**

**Machine Tools and Manufacture**, v. 109, p. 8–35, out. 2016.

LIANG, S. Y.; HECKER, R. L.; LANDERS, R. G. Machining Process Monitoring and Control: The State-of-the-Art. **Journal of Manufacturing Science and Engineering**, v. 126, n. 2, p. 297, 2004.

LIMA, E. M. et al. **Analysis of the influence of the window used in the Short-Time Fourier Transform for High Impedance Fault detection**. 17th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP). Belo Horizonte, MG: IEEE, out. 2016

LINKE, B. Dressing process model for vitrified bonded grinding wheels. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 57, n. 1, p. 345–348, 2008.

LIU, Q.; CHEN, X.; GINDY, N. Fuzzy pattern recognition of AE signals for grinding burn. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 45, n. 7–8, p. 811–818, 2005.

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, n. 3–4, p. 284–292, 2006.

LIU, Y. et al. Early chatter detection in gear grinding process using servo feed motor current. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 83, n. 9–12, p. 1801–1810, 18 abr. 2016.

LIU, Y. et al. Experimental investigation into the effect of chatter on surface microtopography of gears in grinding. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science**, v. 231, n. 2, p. 294–308, jan. 2017.

LOPES, W. N. et al. Digital Signal Processing of Acoustic Emission Signals Using Power Spectral Density and Counts Statistic Applied to Single-Point Dressing Operation. **IET Science, Measurement & Technology**, p. 15, 2017.

LYONS, R. G. **Understanding Digital Signal Processing**. 3. ed. Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall, 2011.

MACHADO, Á. R. et al. **Teoria da Usinagem dos Materiais**. 3. ed. São Paulo: Bluncher, 2015.

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

MAGGIONI, M. et al. **In-Process Quality Characterization of Grinding Processes: A Sensor-Fusion Based Approach**. Volume 1: Applied Mechanics; Automotive Systems; Biomedical Biotechnology Engineering; Computational Mechanics; Design; Digital

Manufacturing; Education; Marine and Aerospace Applications. **Anais...ASME**, 25 jul. 2014

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

MALKIN, S.; GUO, C. Thermal Analysis of Grinding. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 56, n. 2, p. 760–782, 2007.

MANNAN, M. A. A.; BROMS, S. Investigation into Temperature Dependence of Motor Current Measurements Applied to Monitoring and Adaptive Control. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 41, n. 1, p. 451–454, 1992.

MANNAN, M. A. A.; BROMS, S.; LINDSTRÖM, B. Monitoring and Adaptive Control of Cutting Process by Means of Motor Power and Current Measurements. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 38, n. 1, p. 347–350, jan. 1989.

MANOJKUMAR, K.; GHOSH, A. Assessment of cooling-lubrication and wettability characteristics of nano-engineered sunflower oil as cutting fluid and its impact on SQCL grinding performance. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 237, p. 55–64, nov. 2016.

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

MARINESCU, I. et al. **Handbook of machining with grinding wheels**. Boca Raton, FL: [s.n.].

MARINESCU, I. D. et al. **Tribology of abrasives machining process**. 1. ed. Norwich: William Andrew, 2004.

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

MARTINS, C. H. R. et al. Tool Condition Monitoring of Single-Point Dresser Using Acoustic Emission and Neural Networks Models. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. 63, n. 3, p. 667–679, mar. 2014.

MING, C. et al. Studies on the grinding characteristics of directionally solidified nickel-based superalloy. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 116, n. 2–3, p. 165–169, 2001.

MIRANDA, H. I. et al. Monitoring single-point dressers using fuzzy models. **Procedia CIRP**, v. 33, p. 281–286, 2015.

MIRANDA, H. I. C. et al. **Fuzzy Logic to Predict Thermal Damages of Ground Parts**. Artificial Intelligence and Applications. **Anais...Calgary,AB,Canada: ACTAPRESS**, 2010Disponível em: <<http://www.actapress.com/PaperInfo.aspx?paperId=37738>>. Acesso em:

26 jul. 2016

MOIA, D. F. G. et al. Tool condition monitoring of aluminum oxide grinding wheel in dressing operation using acoustic emission and neural networks. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 37, n. 2, p. 627–640, 21 mar. 2015.

MOSES, P. S. AND R. **Spectral Analysis of Signals**. 1. ed. Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall, 2005.

NAKAI, M. E. et al. Neural tool condition estimation in the grinding of advanced ceramics. **IEEE Latin America Transactions**, v. 13, n. 1, p. 62–68, 2015.

NALON, J. A. **Introdução ao processamento digital de sinais**. 1. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014.

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

OLIVEIRA, D. DE J. et al. Improving minimum quantity lubrication in CBN grinding using compressed air wheel cleaning. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 212, n. 12, p. 2559–2568, dez. 2012.

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

PAL, G. P.; DUBEY, N.; PAL, S. **Multichannel data acquisition system using multirate signal processing**. 2014 International Conference on Issues and Challenges in Intelligent Computing Techniques (ICICT). **Anais...IEEE**, fev. 2014

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

PEREIRA, W. X.; DINIZ, A. E.; HASSUI, A. Comparing different plunge cylindrical grinding cycles based on workpiece roughness and process vibration. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 31, n. 2, jun. 2009.

PETERS, J.; SNOEYS, R.; DECNEUT, A. The Proper Selection of Grinding Conditions in Cylindrical Plunge Grinding. In: **Proceedings of the Sixteenth International Machine Tool Design and Research Conference**. London: Macmillan Education UK, 1976. p. 387–394.

PRASAD, S. V.; ROHATGI, P. K.; KOSEL, T. H. Mechanisms of material removal during low stress and high stress abrasion of aluminum alloy-zircon particle composites.

**Materials Science and Engineering**, v. 80, n. 2, p. 213–220, 1986.

PROAKIS, J. G. et al. **Algorithms for statistical signal processing**. 1. ed. New York: Prentice Hall, 2002.

PROAKIS, J. G.; MANOLAKIS, D. G. **Digital signal processing**. 4. ed. New York, NY: Pearson Prentice Hall, 2007.

RAO, S. S. **Mechanical Vibrations**. 5. ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2009.

REN, Y. H.; ZHANG, B.; ZHOU, Z. X. Specific energy in grinding of tungsten carbides of various grain sizes. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 58, n. 1, p. 299–302, 2009.

RIBEIRO, D. M. S. et al. Low-Cost Piezoelectric Transducer Applied To Workpiece Surface Monitoring in Grinding Process. **ABCM International Congress of Mechanical Engineering - COBEM**, v. 23, n. 1–10, 2015.

RIBEIRO, D. M. S. et al. Spectra Measurements Using Piezoelectric Diaphragms to Detect Burn in Grinding Process. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. 66, n. 11, p. 3052–3063, nov. 2017.

RIPKA, P. Electric current sensors: a review. **Measurement Science and Technology**, v. 21, n. 11, p. 112001, 1 nov. 2010.

ROWE, W. B. et al. Avoidance of Thermal Damage in Grinding and Prediction of the Damage Threshold. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 37, n. 1, p. 327–330, 1988.

ROWE, W. B. **Principles of modern grinding technology**. 1. ed. Burlington: William Andrew, 2009.

SANTA BRIGÍDA, A. C. **Caracterização e desenvolvimento de sensores ópticos de corrente elétrica para aplicações em linhas de alta tensão**. [s.l.] Universidade Federal do Pará, 2017.

SARAVANAPRIYAN, S. N. A.; VIJAYARAGHAVAN, L.; KRISHNAMURTHY, R. On-line detection of grinding burn by integrated sensing. **SIcon 2001 - Proceedings of the 1st ISA/IEEE Sensors for Industry Conference**, n. November, p. 89–94, 2001.

SARAVIA, D. C. A. **Desenvolvimento de um sensor magneto-óptico à base de ferrofluidos para medição de corrente elétrica**. [s.l.] Universidade Estadual de Campinas, 2016.

SEMMLOW, J. L. **Biosignal and Biomedical Image Processing**. New York, NY: Marcel Dekker, Inc., 2004.

SHENOI, B. A. **Introduction to digital signal processing and filter design**. 1. ed. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2005.

SINGH, R. **Introduction to Basic Manufacturing Processes and Workshop Technology**. 1. ed. New Delhi: New Age International, 2006.

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

SINOT, O.; CHEVRIER, P.; PADILLA, P. Experimental simulation of the efficiency of high speed grinding wheel cleaning. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 46, n. 2, p. 170–175, fev. 2006.

SMITH, S. W. The Breadth and Depth of DSP. In: **The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing**. 2. ed. San Diego, USA: California Technical Publishing, 1999. p. 643.

SUTOWSKI, P.; NADOLNY, K.; KAPLONEK, W. Monitoring of cylindrical grinding processes by use of a non-contact AE system. **International Journal of Precision Engineering and Manufacturing**, v. 13, n. 10, p. 1737–1743, 30 out. 2012.

TAGHIZADEH, S. et al. Developing a model for hardness prediction in water-quenched and tempered AISI 1045 steel through an artificial neural network. **Materials and Design**, v. 51, p. 530–535, 2013.

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

THOMAZINI, D.; ALBUQUERQUE, U. B. DE. **Sensores Industriais: fundamentos e aplicações**. 7. ed. São Paulo: Érica, 2010.

TIAN, Y. B. et al. Development of portable power monitoring system and grinding analytical tool. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 27, p. 188–197, jun. 2017.

TOMLINSON, W. J.; BLUNT, L. A.; SPRAGGETT, S. The effect of workpiece speed and grinding-wheel condition on the thickness of white layers formed on EN. 24 ground surfaces. **Journal of Materials Processing Tech.**, v. 25, n. 1, p. 105–110, 1991.

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

TORRANCE, A. A. Metallurgical Effects Associated with Grinding. In: **Proceedings of the Nineteenth International Machine Tool Design and Research Conference**. London: Macmillan Education UK, 1979. p. 637–644.

VARSEGUI, S. V. **Advanced digital signal processing and noise reduction**. 2. ed. New York, NY: John Wiley & Sons, Ltd, 2000.

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

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

WEBSTER, J. et al. Acoustic Emission for Process Control and Monitoring of Surface Integrity during Grinding. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 43, n. 1, p. 299–304, 1994.

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

WEBSTER, J. G.; EREN, H. **Measurement, Instrumentation, and Sensors Handbook**. 2. ed. Boca Raton, FL: Taylor & Francis Group, 2014.

WEBSTER, J.; MARINESCU, I. Acoustic Emission for Process Control and Monitoring of Surface Integrity during Grinding. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 43, n. 1, p. 299–304, 1994.

WEBSTER, J.; TRICARD, M. Innovations in Abrasive Products for Precision Grinding. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 53, n. 2, p. 597–617, 2004.

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

WELCH, P. The use of fast Fourier transform for the estimation of power spectra: A method based on time averaging over short, modified periodograms. **IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics**, v. 15, n. 2, p. 70–73, jun. 1967.

WILSON, J. S. **Sensor Technology Handbook**. 1. ed. Burlington: Elsevier, 2005.

YANG, Z. et al. Application of Hilbert-Huang Transform to acoustic emission signal for burn feature extraction in surface grinding process. **Measurement: Journal of the International Measurement Confederation**, v. 47, n. 1, p. 14–21, 2014.

YANG, Z.; YU, Z. Grinding wheel wear monitoring based on wavelet analysis and support vector machine. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 62, n. 1–4, p. 107–121, 4 set. 2012.

YANG, Z.; YU, Z. Experimental study of burn classification and prediction using indirect method in surface grinding of AISI 1045 steel. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 68, n. 9–12, p. 2439–2449, 2013.

YUCHEN ZHOU; ORBAN, P.; NIKUMB, S. **Sensors for intelligent machining-a research and application survey**. 1995 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. Intelligent Systems for the 21st Century. **Anais...IEEE**, 1995

ZENG, Y.; FORSSBERG, E. Application of Vibration Signal Measurement For Monitoring Grinding Parameters. **Mechanical Systems and Signal Processing**, p. 11, 1994a.

ZENG, Y.; FORSSBERG, E. Monitoring grinding parameters by vibration signal measurement - a primary application. **Minerals Engineering**, v. 7, n. 4, p. 495–501, 1994b.

ZHANG, J. et al. Quantification of the power changes in BOLD signals using Welch spectrum method during different single-hand motor imageries. **Magnetic Resonance Imaging**, v. 32, n. 10, p. 1307–1313, dez. 2014.

ZHANG, S.; YU, D.; SHENG, S. A discrete STFT processor for real-time spectrum analysis. **IEEE Asia-Pacific Conference on Circuits and Systems, Proceedings, APCCAS**, n. 3, p. 1943–1946, 2006.

ZIEGLER, S. et al. Current Sensing Techniques: A Review. **IEEE Sensors Journal**, v. 9, n. 4, p. 354–376, abr. 2009.

## APÊNDICE I

A seguir é apresentado a STFT para os sinais de retificação de aço ABNT 1045 com rebolo de óxido de alumínio sem aplicar o filtro passa banda de 2 a 8 kHz.

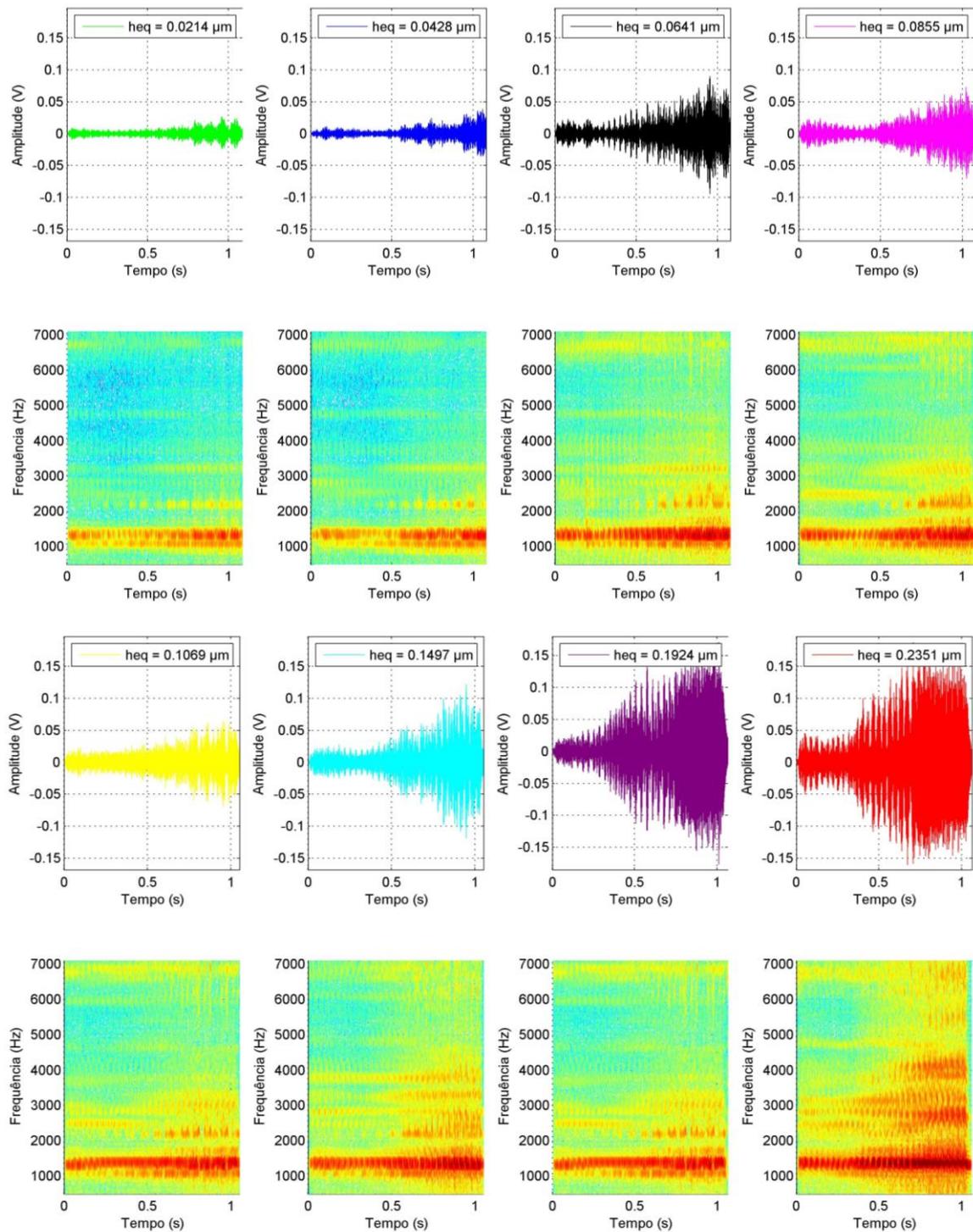


Figura 6.1- STFT para todos os sinais sem filtro.

## APÊNDICE II

A seguir é apresentado a STFT para os sinais de retificação de aço VC131 com rebolo de óxido de alumínio sem aplicar o filtro passa banda de 2 a 8 kHz.

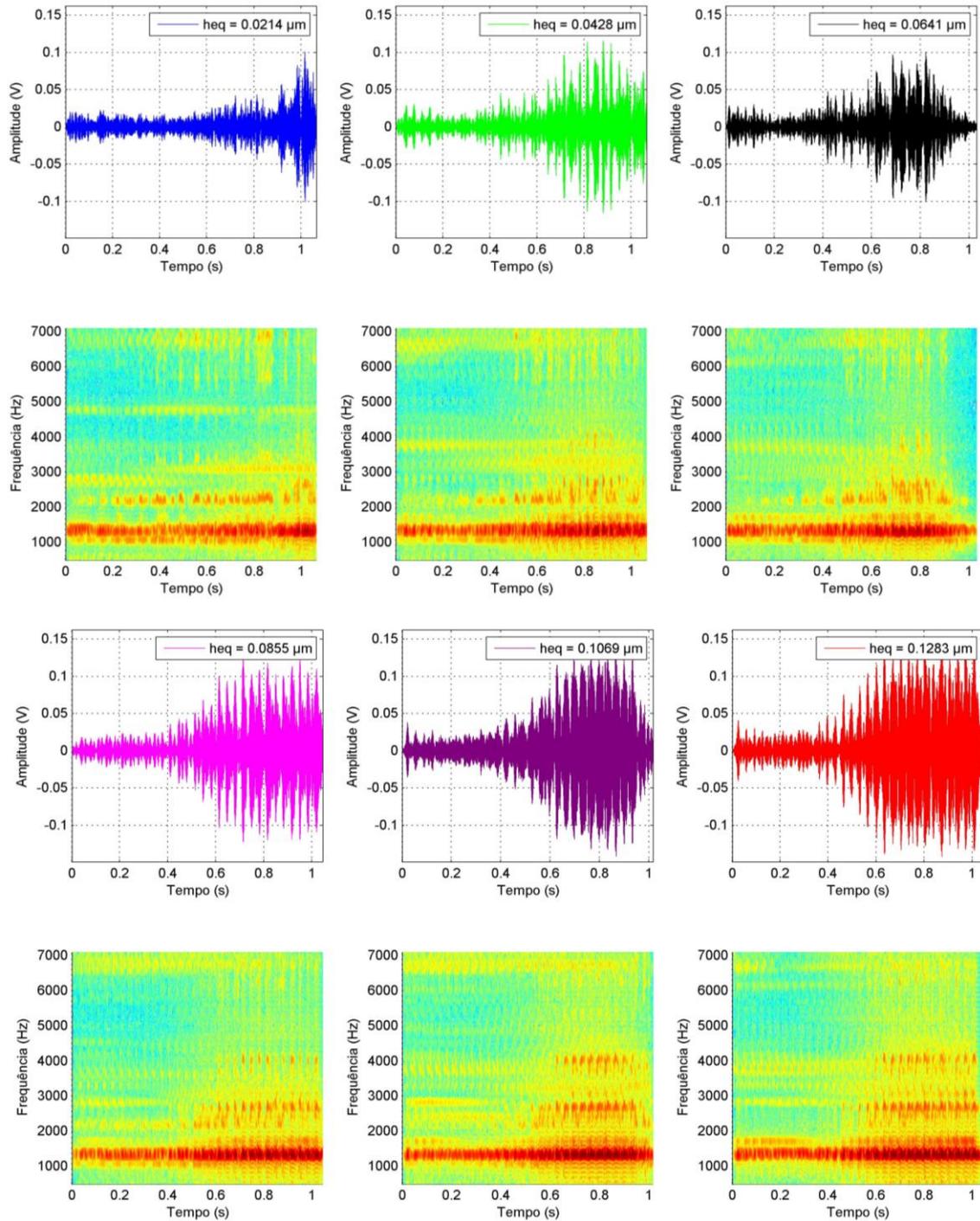


Figura 6.2- STFT para todos os sinais sem filtro.

### APÊNDICE III

A Figura 6.3 apresenta o índice CCDM para os sinais adquiridos da retificação do aço ABNT 1045. Ao contrário do resultado obtido pelo índice RMSD o CCDM apresentou instabilidade muito alta e pouca representatividade com o fenômeno do processo.

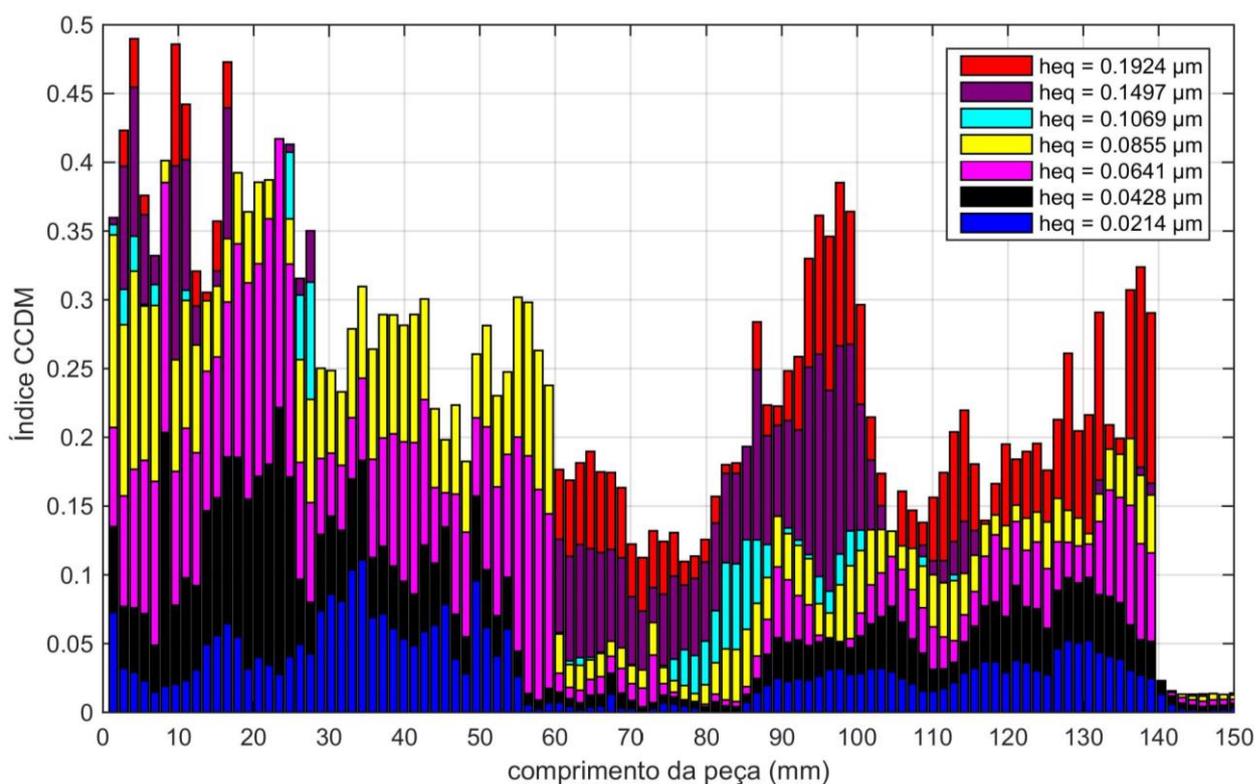


Figura 6.3- CCDM para aço 1045 na banda de 2.3 kHz a 3.1 kHz

A Figura 6.4 apresenta o índice CCDM para os sinais adquiridos da retificação do aço VC131. O CCDM do aço VC131 apresenta uma estabilidade maior do que o resultado obtido para o aço ABNT 1045, porém o resultado não está de acordo com as observações efetuadas pela dureza vickers, assim o resultado também não foi considerado.

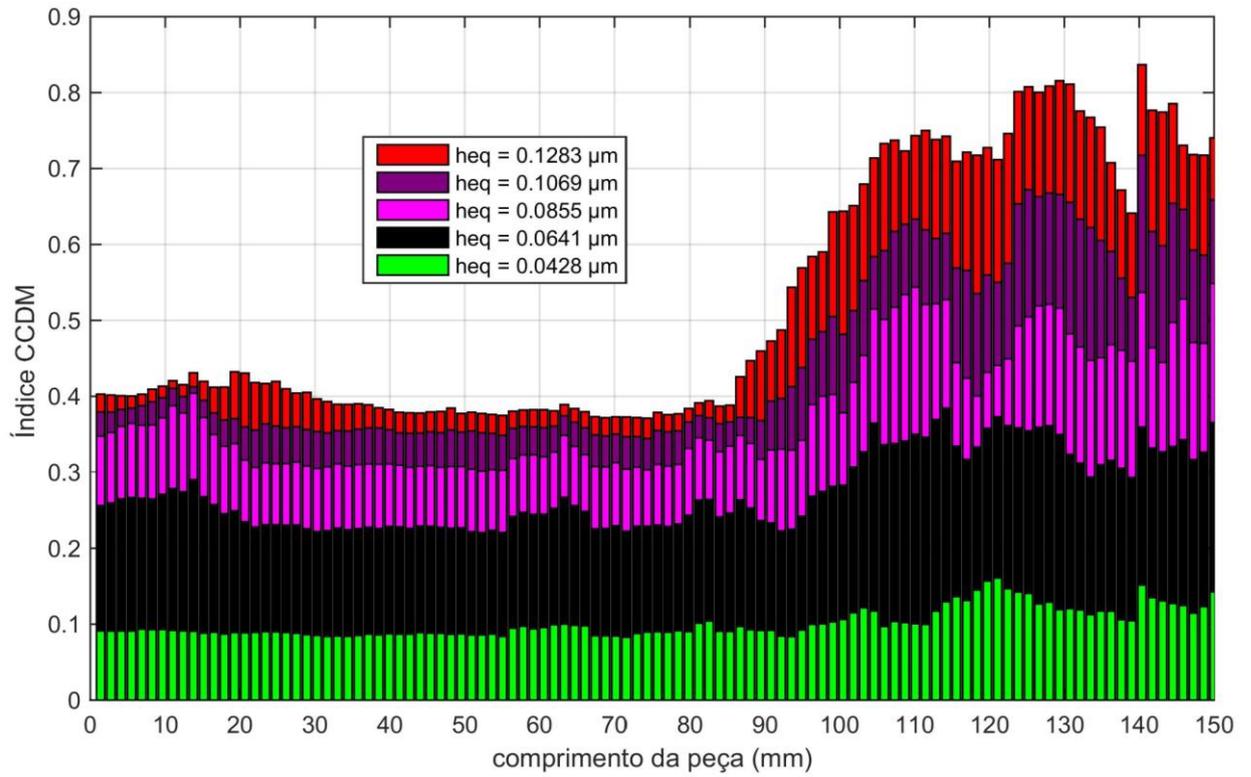


Figura 6.4- CCDM para aço VC131 na banda de 4.5 kHz a 8 kHz