



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

PEDRO DE OLIVEIRA CONCEIÇÃO JUNIOR

**SINAIS DE VIBRAÇÃO NO MONITORAMENTO DO PROCESSO DE
RETIFICAÇÃO PLANA DE CERÂMICAS AVANÇADAS**

**Bauru
2016**

PEDRO DE OLIVEIRA CONCEIÇÃO JUNIOR

**SINAIS DE VIBRAÇÃO NO MONITORAMENTO DO PROCESSO DE
RETIFICAÇÃO PLANA DE CERÂMICAS AVANÇADAS**

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
2016**

Conceição Junior, Pedro de Oliveira.

Sinais de vibração no monitoramento do processo de retificação plana de cerâmicas avançadas/ Pedro de Oliveira Conceição Junior, 2016

122 f. : il.

Orientador: Paulo Roberto de Aguiar

Dissertação (Mestrado)-Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru, 2016

1. Cerâmicas avançadas. 2. Monitoramento do processo de retificação. 3. Sinal de vibração. 4. Rugosidade. I. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia. II. Título.




UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Bauru




ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE PEDRO DE OLIVEIRA CONCEIÇÃO JÚNIOR, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA, DA FACULDADE DE ENGENHARIA.

Aos 17 dias do mês de fevereiro do ano de 2016, às 10:00 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 do(a) Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Bauru, Prof. Dr. EDUARDO CARLOS BIANCHI do(a) Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Bauru, Prof. Dr. ALESSANDRO ROGER RODRIGUES do(a) Engenharia Mecânica / USP - São Carlos, sob a presidência do primeiro, a fim de proceder a arguição pública da DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de PEDRO DE OLIVEIRA CONCEIÇÃO JÚNIOR, intitulada **SINAIS DE VIBRAÇÃO NO MONITORAMENTO DA RETIFICAÇÃO PLANA DE CERÂMICAS AVANÇADAS**. 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. EDUARDO CARLOS BIANCHI



Prof. Dr. ALESSANDRO ROGER RODRIGUES

Dedico a minha mãe Maria Aparecida de Carvalho que me apoiou durante todos esses anos de estudo.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente ao que é eterno, pela força superior que nos rege, pois com ela todas as coisas são possíveis.

Expresso profunda gratidão à minha mãe Maria Aparecida de Carvalho pelo apoio incondicional nos estudos, em minhas decisões e pelo seu empenho em proporcionar acesso à educação e ao trabalho. Principalmente por todos os momentos dedicados a mim, pelas palavras, conselhos e honestidade.

Agradeço à minha família por todo apoio.

Ao Professor Titular Paulo Roberto de Aguiar expresso minha gratidão pela confiança, em ter me orientado neste trabalho, pela motivação, reconhecimento e amizade neste período. Sobretudo, por compartilhar suas experiências e ensinamentos, os quais me serviram como exemplo de conduta e caráter e avançaram além do meu âmbito acadêmico.

Ao Professor Titular Eduardo Carlos Bianchi, coordenador do Laboratório de Usinagem por Abrasão, expresso minha gratidão pela inestimável contribuição neste trabalho. Além disso, por ser uma pessoa na qual tenho grande apreço, por sua integridade, conduta exemplar e por ser uma pessoa que nunca economizou em esforços para ajudar.

Ao Professor Dr. César Renato Foschini, ao Professor Dr. Thiago Valle França e ao seu grupo de pesquisa, agradeço pelo auxílio e contribuição nos ensaios com os corpos de prova de cerâmicas.

Ao Professor Dr. José Alfredo Covolan Ulson pelas contribuições agregadas a esse trabalho durante o exame de qualificação.

Ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pela bolsa de estudos concedida.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia de Bauru – UNESP – pela inestimável formação acadêmica.

Aos funcionários da Seção de Pós-Graduação, principalmente ao Gustavo de Oliveira Rodrigues e Célia Cristina do Espírito Santo Graminha por toda ajuda e suporte nesse período.

À Faculdade de Engenharia de Bauru – FEB, ao Departamento de Engenharia Elétrica e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica pelo suporte e oportunidade.

Ao meu amigo e companheiro de laboratório Marcelo Marchi, um grande obrigado por compartilhar sua experiência, pela ajuda nos trabalhos e principalmente pela amizade e conselhos durante essa jornada.

Aos meus amigos do curso de mestrado e colegas de laboratório Danilo Marcus Santos Ribeiro, Luiz Felipe Gilli Fabiano, Fabio Isaac Ferreira e Bruno Albuquerque de Castro pelo companheirismo e pelas contribuições agregadas a este trabalho.

Agradeço a todos que de forma direta ou indireta contribuíram para a consumação desta importante etapa em minha vida.

Descobrir consiste em olhar para o que todo mundo está vendo e pensar uma coisa diferente.

- Roger Von Oech

RESUMO

As cerâmicas estruturais avançadas, tais como o óxido de alumínio, nitreto de silício, alumina e a zircônia estão sendo cada vez mais utilizadas na engenharia e na medicina. No entanto, muitas destas características que fazem a cerâmica tão atrativa também dificultam a sua fabricação por métodos tradicionais de usinagem. Para obter a forma desejada na usinagem de materiais é necessário o uso do processo de retificação. As características da retificação cerâmicas avançadas são muito diferentes das características dos metais. Portanto, é necessário efetuar outros estudos para alcançar uma compreensão mais abrangente e um melhor controle dos parâmetros. Novas alternativas para o monitoramento do processo de retificação de cerâmicas têm sido estudadas. O monitoramento por sinais de vibração é um dos métodos bem-sucedidos utilizados no processo de retificação, pois algumas características que descrevem o comportamento e a influência do processo nas peças retificadas somente são perceptíveis no estudo deste sinal. O presente trabalho tem como objetivo estudar o sinal de vibração, de forma a extrair características relacionadas com o acabamento de cerâmicas avançadas no processo de retificação plana. Foi utilizada uma máquina retificadora tangencial plana com rebolo diamantado e corpos de prova de cerâmica alumina. O sinal de vibração foi medido por um acelerômetro e coletado por um osciloscópio à taxa de amostragem de 2 MHz. Os ensaios foram realizados em diferentes profundidades de corte, adotando duas velocidades da peça (v_w), obtendo condições de usinagem brandas às mais severas. Medições de microscopia confocal foram realizadas após a retificação das peças com objetivo de caracterizá-las. A rugosidade R_a das peças usinadas foi medida em quatro pontos ao longo das mesmas, por meio de um rugosímetro portátil. O processamento digital do sinal de vibração foi realizado, aplicando ferramentas computacionais e estatísticas de análise em cada passada de usinagem, comparando com os valores da rugosidade medidos. A faixa de frequência entre 800 Hz e 2 kHz foi a mais interessante para o estudo, e que melhor se relacionou com a condição da cerâmica após a retificação. Foi encontrada uma correlação entre a vibração e a integridade da peça cerâmica, pois o aumento da vibração é diretamente proporcional à rugosidade em cada profundidade de corte utilizada. Infere-se que a vibração pode ser utilizada para monitorar a retificação de cerâmica, devido à sua relação com a condição das peças.

Palavras chave: cerâmicas avançadas, monitoramento do processo de retificação, sinal de vibração, rugosidade.

ABSTRACT

Advanced structural ceramics such as aluminum oxide, silicon, nitride, alumina and zirconia are increasingly being used in engineering and medicine. However, many of these features that make ceramics so attractive also make them difficult to manufacture by traditional machining methods. To obtain the desired shape in the machining of these materials is necessary to use grinding process. The characteristics of the grinding of advanced ceramics are very different from those of metals. Therefore, it is necessary to perform other studies to gain a broader understanding and better control of the parameters. New alternatives for monitoring of ceramic grinding process have been studied. Monitoring vibration signals is one of the successful methods used in the grinding process, as some characteristics that describe the behavior and influence the process in parts ground only are noticeable in the study of this signal. This research aims to study the vibration signal, searching for the extraction of features that best relate to the characterization of machined parts. A surface grinding machine with diamond grinding wheel and alumina ceramic workpieces was used. The vibration signal was measured by an accelerometer and collected by the oscilloscope, using 2 MHz of sample rate. Tests were conducted at different depths of cut, adopting two different feed speeds (v_w), which ranged from low to severe grinding conditions. Confocal microscopy was performed after the grinded of the workpieces in order to characterized them. The surface roughness R_a of each finished workpiece was measured at four areas along its surface, using a portable roughness measurer. The vibration digital signal processing was performed by applying computational tools on each pass machining. The frequency range between 800 Hz and 2 kHz was the most interesting for the study, and which better was related to the condition of the ceramic after the grinding process. A correlation between the vibration and the integrity of the ceramic workpiece was found, because the increased vibration is directly proportional to the surface roughness at each depth of cut used. It is inferred that the vibration can be used to monitor the grinding process of ceramic because of its relationship with the condition of the workpiece.

Keywords: advanced ceramics, monitoring the grinding process, vibration signal, surface roughness.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	vi
RESUMO.....	x
ABSTRACT	xii
SUMÁRIO	xiii
LISTA DE ILUSTRAÇÕES	xvi
LISTA DE TABELAS	xviii
LISTA DE ABREVIACÕES E SIMBOLOS	Erro! Indicador não definido.
Capítulo 1 - INTRODUÇÃO.....	1
1.1 MOTIVAÇÃO.....	1
1.2 OBJETIVO	3
1.3 ESTRUTURA DO DOCUMENTO.....	3
1.4 PUBLICAÇÕES OBTIDAS.....	4
Capítulo 2 - REVISÃO DA LITERATURA	7
2.1 MATERIAIS CERÂMICOS	7
2.1.1 <i>Características mecânicas das cerâmicas</i>	9
2.1.2 <i>Métodos de fabricação de cerâmicas</i>	11
2.2 MANUFATURA DE CERÂMICAS.....	14
2.2.1 <i>Mecanismos de remoção de material</i>	15
2.2.2 <i>Processos abrasivos</i>	16
2.2.3 <i>O processo de retificação</i>	17
2.2.3.1 Profundidade de corte (a)	18
2.2.3.2 Velocidade de corte (v_s).....	18
2.2.3.3 Velocidade da peça (v_w).....	19
2.2.3.4 Espessura de corte equivalente (h_{eq}).....	19
2.2.3.5 Rebolo.....	19
2.2.3.6 Operação de dressagem	20
2.2.3.7 Forças de corte e potência na retificação.....	21
2.2.4 <i>Retificação de cerâmicas</i>	22
2.2.4.1 Rebolo para retificação de cerâmicas	23

2.2.5	<i>Caracterização de cerâmicas após a usinagem</i>	24
2.2.5.1	Danos subsuperficiais	24
2.2.5.2	Rugosidade	25
2.2.5.3	Microscopia confocal	26
2.3	VIBRAÇÃO NO PROCESSO DE MANUFATURA	27
2.3.1	<i>Classificação e formas de reposta da vibração</i>	28
2.3.1.1	Força de excitação periódica	28
2.3.1.2	Força de excitação por impulso	30
2.3.1.3	Força de excitação na forma de onda aleatória.....	30
2.3.1.4	Vibração autoexcitada	31
2.3.1.5	O movimento oscilatório	32
2.3.2	<i>Vibração no processo de retificação</i>	33
2.3.3	<i>Vibração forçada na retificação</i>	35
2.3.4	<i>Vibração autoexcitada na retificação</i>	35
2.3.5	<i>Influência da vibração na qualidade das peças retificadas</i>	36
2.4	MONITORAMENTO DO PROCESSO DE MANUFATURA	37
2.4.1	<i>Monitoramento do processo de retificação</i>	39
2.4.1.1	Monitoramento da vibração na retificação	41
2.4.1.2	Transdutores para o monitoramento da vibração	42
2.4.1.3	Monitoramento da potência e força de corte	45
2.4.1.4	Monitoramento da retificação de cerâmicas avançadas	46
2.4.2	<i>Estudo dos sinais provenientes do monitoramento</i>	47
2.4.2.1	Valor Médio Quadrático (RMS).....	47
2.4.2.2	Transformada Rápida de Fourier (FFT)	48
2.4.2.3	Densidade Espectral de Potência (PSD).....	48
2.4.2.4	Índices de danos estruturais	49
	Capítulo 3 - MATERIAL E MÉTODOS	51
3.1	MONTAGEM DO BANCO DE ENSAIO	51
3.1.1	<i>Corpos de prova</i>	52
3.1.2	<i>Rebolo</i>	52
3.1.3	<i>Refrigeração e parâmetros dos ensaios</i>	53
3.2	MEDIÇÃO DA RUGOSIDADE E TOPOGRAFIA DAS PEÇAS APÓS A RETIFICAÇÃO	54

3.2.1	<i>Rugosidade</i>	54
3.2.2	<i>Caracterização de possíveis danos subsuperficiais</i>	55
3.3	SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS	56
3.3.1	<i>Medição da vibração</i>	57
3.3.2	<i>Medição da corrente elétrica</i>	58
3.4	PROCESSAMENTO DOS SINAIS DE VIBRAÇÃO E CORRENTE ELÉTRICA	59
3.4.1	<i>Processamento do sinal de vibração</i>	59
3.4.2	<i>Processamento dos sinais de corrente elétrica</i>	62
	Capítulo 4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO	64
4.1	AVALIAÇÃO DA QUALIDADE SUPERFICIAL E SUBSUPERFICIAL DAS CERÂMICAS	64
4.1.1	<i>Resultados de microscopia confocal</i>	64
4.1.1.1	<i>Comparação entre v_w</i>	67
4.1.2	<i>Resultados da rugosidade das peças</i>	75
4.1.3	<i>Considerações sobre a análise confocal e a rugosidade das peças</i>	76
4.2	AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DO SINAL DE VIBRAÇÃO	77
4.3	COMPARAÇÃO ENTRE VIBRAÇÃO E A CARACTERIZAÇÃO DAS CERÂMICAS	82
4.3.1	<i>Comparação entre vibração e rugosidade</i>	82
4.3.2	<i>Relação com a corrente elétrica e potência</i>	86
4.3.2.1	<i>Índices de danos</i>	89
	Capítulo 5 – CONCLUSÕES	91
5.1	SUGESTÃO PARA OS PRÓXIMOS TRABALHOS.	92
	Referências	93
	Anexo I – CALIBRAÇÃO DO ACELERÔMETRO PCB PIEZOTRONICS	101

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1- Grânulos de alumina obtidos por secagem por pulverização, com aumentos de (a) 100x, (b) 500x, (c) 5000x e (d) 20000x	12
Figura 2.2- Fluxograma geral da manufatura de uma peça cerâmica.....	13
Figura 2.3- Topologia de superfícies	15
Figura 2.4 - Elementos envolvidos na retificação plana.....	18
Figura 2.5- Esquema ilustrativo de retificação plana.	21
Figura 2.6- Rugosidade Média Aritmética	26
Figura 2.7- Movimento harmônico de vibração	28
Figura 2.8- Vibração forçada causada por força de excitação harmonica.....	29
Figura 2.9- Vibração livre causada pela força de excitação por impulso.....	30
Figura 2.10- Vibração excitada causada pela forma de onda aleatória	31
Figura 2.11- Vibração autoexcitada.....	32
Figura 2.12- Descrição do movimento harmonico	33
Figura 2.13- Vibração no processo de retificação.	34
Figura 2.14- Resultado da simulação computacional para a velocidade de vibração do rebolo na fase I e fase II.....	35
Figura 2.15- Resultado da vibração na superfície da peça	37
Figura 2.16- Monitoramento de Processos de Manufatura.....	38
Figura 2.17- Cadeia de medição da vibração	41
Figura 2.18- Acelerômetro piezelétrico.....	44
Figura 2.19- Resposta em frequência do acelerômetro piezelétrico.....	44
Figura 3.1- Estrutura esquemática dos ensaios, parâmetros de entrada, variáveis de saída.....	51
Figura 3.2 - Software de operação das medições de microscopia confocal	56
Figura 3.3- Sistema de aquisição de dados.....	57
Figura 3.4- Curva de potência mecânica versus a corrente elétrica do motor de acionamento.....	59
Figura 3.5 – Etapas de processamento do sinal de vibração.	60
Figura 3.6- Sinal puro de vibração	60
Figura 3.7- Primeira etapa do processamento do sinal de vibração	61
Figura 3.8- Sinal puro de corrente elétrica	63

Figura 4.1 - Microscopia Confocal na profundidade 25 μm e $v_w = 58 \text{ mm/s}$	68
Figura 4.2- Microscopia Confocal na profundidade 25 μm e $v_w = 125 \text{ mm/s}$	69
Figura 4.3- Microscopia Confocal na profundidade 105 μm e $v_w = 58 \text{ mm/s}$	70
Figura 4.4- Microscopia Confocal na profundidade 105 μm e $v_w = 125 \text{ mm/s}$	71
Figura 4.5- Microscopia Confocal na profundidade 350 μm e $v_w = 58 \text{ mm/s}$	72
Figura 4.6 - Microscopia Confocal na profundidade 350 μm e $v_w = 125 \text{ mm/s}$	73
Figura 4.7. Rugosidade medida ao longo das profundidades de corte.	75
Figura 4.8 - FFT do sinal de vibração para $v_w=58 \text{ mm/s}$	78
Figura 4.9 - FFT do sinal de vibração para $v_w=125 \text{ mm/s}$	78
Figura 4.10- FFT do sinal de vibração com ampliação na faixa de frequência de 800 Hz a 2.3 KHz; $v_w=125 \text{ mm/s}$ (a); $v_w=58 \text{ mm/s}$ (b).	79
Figura 4.11- PSD do sinal de vibração $v_w=58 \text{ mm/s}$	79
Figura 4.12- PSD do sinal de vibração $v_w=125 \text{ mm/s}$	80
Figura 4.13- PSD do sinal de vibração em três condições. $v_w=58 \text{ mm/s}$ (a) a (c); $v_w=125 \text{ mm/s}$ (b) e (d).	81
Figura 4.14- Escolha da melhor faixa de frequência, FFT (a); PSD (b).....	81
Figura 4.16- Vibração em função das profundidades de corte	82
Figura 4.17- Rugosidade em função das profundidades de corte.....	83
Figura 4.18- Vibração em função do h_{eq}	84
Figura 4.20- Rugosidade em função do h_{eq}	85
Figura 4.21- Rugosidade em função da vibração	85
Figura 4.22- Relação entre vibração e rugosidade	87
Figura 4.23- Relação entre corrente elétrica e rugosidade	87
Figura 4.24 – Potência em função das profundidades de corte.	88
Figura 4.25- Potência em função do h_{eq}	89
Figura 4.26- Índices de danos do sinal de vibração; RMSD $v_w = 58 \text{ mm/s}$ (a); CCDM $v_w = 58 \text{ mm/s}$ (b); RMSD $v_w = 125 \text{ mm/s}$; CCDM $v_w = 125 \text{ mm/s}$ (d).	90
Figura 5.1 – Certificado de calibração do acelerômetro usado nos ensaios.	102

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dimensões e características da ferramenta de corte	52
Tabela 2 - Configuração dos parâmetros	53
Tabela 3 - O cálculo da espessura de corte equivalente (h_{eq})	54
Tabela 4 - Configuração do rugosímetro para medição de rugosidade média (R_a)	55
Tabela 5 - Configuração do módulo de vibração	57
Tabela 6 - Microscopia confocal para $v_w = 58$ mm/s	65
Tabela 7 - Microscopia confocal para $v_w = 125$ mm/s	66

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÃO

Os componentes cerâmicos ganharam importância nos últimos anos, devido seu alto desempenho, suas propriedades satisfatórias, como dureza, resistência à temperatura e ao desgaste. Estes componentes estão sendo cada vez mais aplicados em indústrias de manufatura em geral. A vantagem da cerâmica em relação a outros materiais inclui alta dureza e resistência a temperaturas elevadas, a estabilidade química e resistência ao desgaste (LIN *et al.*, 2008).

No entanto, esses benefícios mencionados são acompanhados de dificuldades associadas com usinagem em geral, por causa dos altos valores de dureza, rigidez das cerâmicas, baixa tenacidade à fratura em comparação com materiais metálicos e ligas (XIU *et al.*, 2005). Dentre os métodos disponíveis de remoção de material a usinagem abrasiva é a mais difundida na indústria por conciliar remoção, correção de forma e qualidade superficial de maneira economicamente viável para produção em larga escala (FIOCCHI, 2014). Destaca-se no processo de usinagem deste tipo de cerâmica a retificação como sendo um dos estágios mais importantes, pois é um processo de elevada complexidade, responsável pelo acabamento da peça, onde a mesma tem alto valor agregado (BIANCHI *et al.*, 2003). A viabilidade econômica do alto desempenho da cerâmica depende de quão eficientemente elas podem ser usinadas pela retificação (MALKIN; HWANG, 1996).

JAHANMIR *et al.* (1999) e CHAND; GUO (2000) citam que a retificação, que é o processo mais utilizado industrialmente na usinagem de cerâmica, pode representar até 90% do custo total do componente cerâmico. A falta de confiabilidade advém da grande dispersão dos valores de resistência mecânica provocada por defeitos, que podem ter origem no processo de retificação. De acordo com BIANCHI *et al.*, (2003), a usinagem permite o controle preciso das geometrias e dimensões da peça de cerâmica, além de um ótimo acabamento, mas requer a habilidade por parte do operador da máquina.

A retificação de cerâmicas avançadas possui características diferentes daquela dos metais e, portanto, é necessário efetuar outros estudos para alcançar uma compreensão mais abrangente e um melhor controle dos parâmetros, a fim de alcançar um acabamento de qualidade. (AGARWAL; RAO, 2005). O processo de retificação é de grande importância na cadeia produtiva, pois influencia diretamente na rugosidade que é um fator essencial, utilizado

para inspeção em várias aplicações industriais, como a produção e processamento de metais, semicondutores, cerâmicas, papel e plástico (DHANASEKAR *et al.*, 2008).

O uso efetivo da cerâmica em aplicações industriais exige a sua usinagem com acabamento satisfatório e a minimização de danos em sua superfície. A fim de avaliar a eficácia de retificação de cerâmicas, um estudo experimental ou teórico da rugosidade é essencial. Mas, os métodos experimentais de avaliação do acabamento, como as medições diretas por métodos ópticos, são caros e demorados (AGARWAL; RAO, 2005). Além da importância da microtopografia da superfície, esta medição “*in-situ*” ainda não foi resolvida adequadamente. Ainda hoje, as medidas de rugosidade são realizadas com hastes de prova e perfilômetros ópticos, conforme DHANASEKAR *et al.*, (2008); WHITEHOUSE (2010), portando sua aquisição constante torna-se inviável em uma linha de produção.

Outro fator importante é a qualidade estrutural da cerâmica. Como as cerâmicas são frágeis, a falha mecânica geralmente ocorre pela propagação de trincas. Trincas iniciais, precursoras da falha, são defeitos normalmente originados de irregularidades adquiridas nas etapas de obtenção da peça e/ou durante o seu processamento pós-sinterização, portanto, no projeto de um produto de cerâmica avançada, é necessária atenção a cada uma das fases do processamento (FIOCCHI, 2014). Uma análise das cerâmicas após a usinagem, por meio de métodos de microscopia, por exemplo, é extremamente importante para qualificar danos superficiais nas peças. Esta qualificação é extremamente necessária, porque a qualidade superficial das cerâmicas avançadas pode ser aprimorada se a configuração do processo de retificação for realizada de maneira correta. Sendo assim, os danos na superfície das peças podem diminuir e conseqüentemente a sua vida útil aumentar.

Uma das formas de aprimorar o processo é estimar a rugosidade e estudar a topografia das cerâmicas após a usinagem, a partir do monitoramento do processo de retificação. A retificação automática e inteligente, a qual utiliza um sistema de monitoramento e supervisão do processo por meio de ferramentas computacionais e sensores, é utilizada por indústrias para a produção com alta qualidade de acabamento e geometria (SAMHOURI; SURGENOR, 2005). Métodos indiretos de monitoramento desse processo são utilizados para avaliar a qualidade superficial e estrutural das peças usinadas. O processo envolve a coleta, processamento e análise de dados relacionados com a peça usinada em várias condições experimentais e interpretação dos resultados para as aplicações em situações reais (ELANGO VAN *et al.*, 2011), e contam com alguns sinais sensoriais, tais como forças, energia, vibração e emissão acústica que se correlacionam com a condição de ferramenta (SUTOWSKI; PLICHTA, 2006; ELANGO VAN *et al.*, 2011; MARTINS *et al.*, 2014).

Algumas variáveis do processo de retificação, tais como a remoção de material emite sinais que podem ser medidos, ou seja, o momento de contato entre o rebolo e a peça gera um atrito, o qual pode ser captado por um sensor se o mesmo estiver acoplado no local. Uma dessas variáveis é a vibração que ocorre devido a esse atrito. A vibração também diz respeito dos movimentos oscilatórios corpos e as suas vantagens que estão associadas com a frequência do movimento. O sinal de vibração medido pode ser estudado utilizando métodos de análise no domínio do tempo, estimação espectral e se correlacionar com as condições do processo (ZENG; FORSSBERG, 1994; TETI *et al.*, 2010). A utilização de um método de análise e estimação como esse em um sistema de monitoramento reflete a otimização do processo e, por isso, a importância da realização desse trabalho.

1.2 OBJETIVO

O objetivo principal do presente trabalho foi estudar o sinal de vibração de forma a extrair as características relacionadas com o acabamento de cerâmicas avançadas no processo de retificação plana. Desse modo, o sinal de vibração foi analisado no domínio do tempo juntamente a seu conteúdo em frequência, onde se buscou extrair uma possível correlação deste sinal com o comportamento mecânico do processo de retificação das cerâmicas. Este trabalho visa contribuir com uma nova ferramenta útil para o processo de retificação de cerâmicas avançadas, que é o monitoramento por meio do sinal de vibração.

1.3 ESTRUTURA DO DOCUMENTO

A estrutura deste trabalho conta com cinco capítulos:

- ❖ O primeiro capítulo é a introdução do trabalho, que apresenta a motivação desta pesquisa, discorrendo sobre a importância da automação no processo de retificação de cerâmicas, destacando a evolução deste material e a necessidade de controlar os parâmetros para se obter peças com qualidade superficial e subsuperficial satisfatórias, em seguida são apresentados os objetivos do trabalho.
- ❖ O segundo capítulo apresenta a revisão da literatura sobre o tema em questão, onde foi realizada uma investigação sobre as principais características e propriedades dos materiais cerâmicos, discorrendo sobre a importância da manufatura desses materiais com ênfase no processo de retificação. No capítulo são apresentados os principais parâmetros do processo de retificação, os quais são de suma importância para o sucesso da operação, com foco no seu monitoramento e controle. Neste capítulo são comentados

ainda os tópicos sobre vibração, bem como o estudo desse sinal no monitoramento do processo de retificação, além da aquisição de dados e processamento de sinais necessários para a fundamentação do presente trabalho.

- ❖ O terceiro capítulo reporta os métodos que foram usados no trabalho, bem como o detalhamento sobre os materiais. Neste capítulo são apresentados os equipamentos utilizados para realização do experimento, o detalhamento sobre as variáveis mecânicas de saída, como rugosidade e as imagens da topografia das peças após os ensaios de retificação. Além de abordar os métodos utilizados no processamento digital do sinal de vibração.
- ❖ O quarto capítulo, apresenta os resultados e discussão, descrevendo a caracterização das peças de cerâmica após a retificação por meio das imagens de microscopia confocal, além o estudo superficial por meio da rugosidade. São apresentados os resultados do desempenho do sinal de vibração durante o experimento, e sua comparação com a rugosidade e caracterização subsuperficial das peças.
- ❖ Finalmente, no quinto capítulo são apresentadas as conclusões obtidas nesse trabalho e a sugestão para os próximos estudos no futuro.
- ❖ Ao final do trabalho encontra-se a bibliografia consultada e referenciada bem como os anexos, finalizando o trabalho.

1.4 PUBLICAÇÕES OBTIDAS

- ❖ OLIVEIRA Jr, C. P., RIBEIRO, D. M. S., MARCHI M., RODRIGUES, A. C., AGUIAR, P. R., BIANCHI, C. E. Monitoramento da Retificação de Cerâmicas Avançadas por Sinais de Vibração e Rugosidade. In: Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, COBEF, 2015, Salvador BA, v. 8, p.1-10.
- ❖ OLIVEIRA Jr, C. P., RIBEIRO, D. M. S., MARCHI, M., RODRIGUES, A. C., AGUIAR, P. R., BIANCHI, C. E. Study Of Surface Roughness of Ground Ceramics By Vibration Signal Analisys. In: ABCM International Congress of Mechanical Engineering, COBEM 2015, Rio de Janeiro- RJ. v. 23, p. 1-10.
- ❖ OLIVEIRA Jr, C. P., MARCHI, M., RIBEIRO, D. M. S. AGUIAR, P. R., BIANCHI, E. C.. Estudo da Qualidade Superficial de Peças de Cerâmicas Retificadas por Sinais

de Vibração e Corrente Elétrica do Motor de Acionamento. In: XXII Simpósio de Engenharia de Produção, SIMPEP 2015, Bauru, SP, v. 22, p.1-10.

- ❖ MIRANDA, H.I., ROCHA, A. CAMILA, OLIVEIRA Jr, P., AGUIAR, P. R., BIANCHI, E. C, Monitoring single-point dressers using fuzzy models. *PROCEDIA CIRP*, 9th CIRP Conference on Intelligent Computation Manufacturing Engineering – CIRP ICME14, 2015. v.33, p 281-286.
- ❖ MARCHI, M., OLIVEIRA Jr, C. P., AGUIAR, P. R., BAPTISTA, F. G., BIANCHI, E. C. Sistema de Monitoramento do Processo de Retificação Plana Baseado em Plataforma de Hardware Livre. In: XXII Simpósio de Engenharia de Produção, SIMPEP 2015, Bauru, SP, v. 22, p.1-10.
- ❖ RIBEIRO, D. M. S., MARCHI, M., OLIVEIRA Jr, C. P., SODÁRIO, R. D., AGUIAR, P. R., BIANCHI, C. E. Low-Cost Piezoelectric Transducer Applied to Workpiece Surface Monitoring in Grinding Process. In: ABCM International Congress of Mechanical Engineering, COBEM 2015, Rio de Janeiro- RJ. v. 23, p. 1-10.
- ❖ FABIANO, L. F. G., MARCHI, M., OLIVEIRA Jr, C. P., SODÁRIO, R. D., AGUIAR, P. R., BIANCHI, C. E. Analisis of Surface Roughness and Burn Occurrence in Grinding by Acoustic Emission and Eletric Current. In: ABCM International Congress of Mechanical Engineering, COBEM 2015, Rio de Janeiro- RJ. v. 23, p. 1-10.

Artigos submetidos:

- ❖ OLIVEIRA Jr, C. P., MARCHI M., AGUIAR, P. R., BIANCHI, C. E. The Correlation of Vibration Signal Features in Grinding of Advanced Ceramics. *Revista IEEE América Latina*. 2015
- ❖ OLIVEIRA Jr, C. P., MARCHI M., MARTINS C. H. R. D'ADDONA D. AGUIAR, P. R., BIANCHI, C. E. Estudo do desgaste do dressador de ponta única CVD

por meio da estimação espectral do sinal de vibração. Revista Matéria. 2015.

CAPITULO 2 - REVISÃO DA LITERATURA

Este capítulo apresenta a revisão da literatura sobre o tema em questão, onde foi realizada uma investigação sobre as principais características e propriedades dos materiais cerâmicos, discorrendo sobre a importância da manufatura desses materiais com ênfase no processo de retificação. No capítulo são apresentados os principais parâmetros do processo de retificação, os quais são de suma importância para o sucesso da operação, com foco no seu monitoramento e controle. Também são comentados ainda os tópicos sobre vibração, bem como o estudo desse sinal no monitoramento do processo de retificação, além da aquisição de dados e processamento de sinais necessários para a fundamentação do presente trabalho.

2.1 MATERIAIS CERÂMICOS

Embora os materiais cerâmicos para aplicações técnicas sejam conhecidos há mais de duzentos anos, as cerâmicas avançadas, cuja composição, microestrutura e propriedades diferem dos materiais cerâmicos tradicionais, começaram a ser desenvolvidas por volta de 1970. Esses materiais foram desenvolvidos para aplicações especiais, onde materiais convencionais como metais ou polímeros não atendiam às solicitações. Devido às suas ligações iônicas e/ou covalentes, as cerâmicas são extremamente duras e rígidas e, por isso, são materiais de excelente resistência ao desgaste à temperatura ambiente ou elevada. Essas propriedades, aliadas à inércia química, as tornam materiais ideais para aplicações de alta tecnologia, como componentes de motores, válvulas, selos mecânicos, sensores de gás, biomateriais, ferramentas de corte, rolamentos, componentes eletrônicos e materiais para aplicações aeroespaciais (ALLOR & JAHANMIR, 1996; CHAND; GUO, 2000; MARINESCU *et al.*, 2004).

De acordo com a Associação Brasileira de Cerâmica (ABC, 2005), o setor cerâmico é amplo e heterogêneo e divide-se em subsetores, classificados por matéria-prima, propriedades e áreas de utilização. Os materiais cerâmicos também se classificam como cerâmica vermelha, materiais de revestimento, cerâmica branca, materiais refratários, isolantes térmicos, abrasivos, vidro, cimento e cal, e cerâmica avançada.

- (a) Cerâmicas vermelhas são aquelas que apresentam cor avermelhada como tijolos, telhas e argila; Materiais de revestimento são materiais em formas de placas, usados na construção civil, como azulejo, porcelanato, lajota, entre outros;
- (b) Cerâmicas brancas são materiais de corpo branco e recoberto por uma camada vítrea transparente e incolor, necessárias por razões estéticas ou técnicas. São subdivididas

em louça sanitária, louça de mesa, isoladores elétricos, cerâmica artística e cerâmica técnica;

- (c) Materiais refratários são materiais que tem como sua principal característica, envolver e suportar altas temperaturas nas condições específicas de processo e operação de equipamentos industriais, além de esforços mecânicos, químicos e variações bruscas de temperatura;
- (d) Isolantes térmicos são os materiais refratários isolantes, isolantes térmicos não refratários, e fibras ou lãs cerâmicas;
- (e) Fritas e corantes são classes de produtos cerâmicos que requerem acabamento. As fritas, também conhecidas como vidro fritado se dão a partir da fusão da mistura de diferentes vidros moídos. Os corantes são compostos de óxidos puros ou pigmentos inorgânicos sintéticos obtidos a partir da mistura de óxidos ou de seus compósitos;
- (f) Abrasivos são compostos por matéria-prima e processos semelhantes aos da indústria cerâmica, como o óxido de alumínio eletrofundido e o carbetto de silício;
- (g) Vidro, cimento e cal são considerados por alguns autores como integrantes da família das cerâmicas;
- (h) Cerâmicas avançadas são as cerâmicas de qualidade elevada, desenvolvidas com matérias-primas sintéticas de alta pureza e através de processos rigorosos ABC *apud* (GARCIA 2010);

As cerâmicas avançadas, as quais são o foco deste trabalho, de acordo com SMITH, 1996) *apud* GARCIA (2010), podem ser classificadas em quatro áreas, sendo elas:

- 1 Cerâmicas eletrônicas são as que incluem os substratos e suportes para semicondutores, capacitores, piezoelétricos, resistores e termoresistores;
- 2 Cerâmicas estruturais são aquelas desenvolvidas para elevadas solicitações e incluem componentes resistentes ao desgaste, como componentes de bombas e válvulas, 40 componentes de motores automotivos, ferramentas e matrizes de corte e componentes biomédicos;
- 3 Compósitos de matriz cerâmica e matriz metálica são os mais novos itens das famílias dos materiais avançados. Entre as cerâmicas estruturais encontram-se os microcompósitos e os nanocompósitos e o hibridismo entre micro e nano-compósitos tem sido o novo conceito em desenvolvimento de cerâmicas super-resistentes e supertenazes;
- 4 Recobrimentos cerâmicos são aqueles que, apesar de serem aplicadas em grande parte como soluções provisórias para superar as deficiências das cerâmicas monolíticas,

constituem seu próprio segmento de mercado e se destacam nesta década como uma das mais crescentes áreas de aplicação.

Em todos os tipos de cerâmicas, o controle do tamanho e da distribuição granulométrica é de fundamental importância no sucesso e desempenho dos produtos. Em função do método de conformação e do produto selecionado, o tamanho de partículas e o controle da distribuição granulométrica são de grande utilidade, pois partículas pequenas, com tamanho menor que um micrometro (1 μm) são importantes na composição de matérias-primas de cerâmica avançada, pois apresentam alta reatividade, favorecendo a sinterização e garantindo a elevada resistência mecânica do produto final (GARCIA, 2010).

2.1.1 Características mecânicas das cerâmicas

Devido ao seu alto desempenho, suas propriedades satisfatórias, como dureza, resistência à temperatura e ao desgaste, os componentes cerâmicos ganharam importância e passaram ser aplicados em indústrias de manufatura e automobilística (HUANG; LIU, 2003). No entanto, a utilização efetiva da cerâmica avançada é limitada principalmente por causa do custo elevado do processamento destes materiais por retificação, para garantir a qualidade da peça fabricada (MALKIN; GUO, 2008). Segundo ZANOTTO; MIGLIORE (1991), dureza e fragilidade são duas propriedades fundamentais na descrição de uma cerâmica que contribuem para a sua originalidade e sua especificidade, entretanto, são também a causa raiz de suas deficiências. As cerâmicas são duras, geralmente com dureza superior a 1000 HV (Escala Hardness Vickers) e, portanto, de manufatura muito difícil e dispendiosa.

Os materiais cerâmicos normalmente não apresentam deformação plástica apreciável e sua resistência ao impacto é reduzida, ou seja, apresentam baixa tenacidade. A baixa deformabilidade do seu retículo cristalino resulta em elevada rigidez e dureza. Em comparação com os metais, a energia de ativação é tão alta que o limite de resistência à fratura é atingido antes do movimento de discordâncias. Como a estrutura cristalina da cerâmica é menos simétrica que a estrutura dos metais, mesmo o aumento de temperatura, próximo ao ponto de fusão não resulta na ativação de mais do que dois ou três sistemas de deslizamento de discordâncias. Assim, há pouca deformação plástica e a elevada dureza persiste mesmo em altas temperaturas, ao contrário dos metais (MARINESCU; PRUTEANU, 1998).

Segundo TONSHOFF *et al.* (2002), as cerâmicas estruturais têm de suportar cargas externas e serem montadas num conjunto mecanicamente ativo, consistindo geralmente de uma combinação de materiais. Para esta classe de cerâmicas, as propriedades mais relevantes

são: dureza, módulo de elasticidade, tenacidade à fratura, resistência mecânica e resistência ao desgaste. Conforme ASKELAND; PHULÉ (2003), a dureza pode ser definida como a resistência de um material à penetração por uma ponta. Do ponto de vista físico, a dureza está relacionada com a estrutura cristalina do material e assim pode ser derivada somente das forças interatômicas. Contudo, na prática, segundo RICE (2000), a dureza é uma propriedade que depende de características microestruturais como porosidade, tamanho de grão, contornos de grãos, movimentação de discordâncias e de outras propriedades relacionadas à temperatura.

Os testes mais comuns para medidas de dureza em cerâmicas são os testes de microdureza Knoop e Vickers. Estas técnicas são diferenciadas pelo tamanho e geometria do penetrador e consistem na medida da resistência à deformação plástica permanente, causada pela indentação. É obtida pela razão entre a carga aplicada e a área de superfície projetada da indentação criada em consequência do teste (WOBKER *et al.*, 1998).

Segundo ZANOTTO; MAGLIORE (1991), é possível encontrar grandes variações de resistência mecânica entre peças de um mesmo lote, podendo ocorrer que a resistência máxima seja o dobro da mínima. Esta discrepância e a grande variabilidade de valores de resistência mecânica são causadas pela fratura frágil e explicadas pela teoria de Griffith. A energia elástica liberada na fratura pode ser parcialmente convertida em deformação plástica, além de calor e som. Este último tipo de energia vem sendo vastamente estudado pela técnica da emissão acústica (EA) para monitoramento de processos de manufatura de materiais frágeis (OLIVEIRA; DORNFELD, 1994; LEE; STASZEWSK, 2007). O “fator crítico de intensidade de tensão”, K_c , pode ser definido em função da “energia efetiva para iniciar a fratura”, de acordo com a relação:

$$K_c = (2E\gamma_i)^{1/2} \quad (1)$$

Onde: γ_i = energia superficial por unidade de área para iniciar a fratura; E = Módulo de Young. Segundo a teoria de Griffith a resistência dos materiais cerâmicos é controlada principalmente por duas variáveis:

- Energia específica de fratura (γ_i), que é uma propriedade do material sem defeitos e que depende de parâmetros microestruturais (como tamanho de grão);
- Tamanho do defeito crítico (falha), que é uma característica microestrutural relacionada ao processamento do material.

A teoria de Griffith considera que um corpo frágil contém pequenas falhas (microtrincas). Quando um esforço de tensão externo é aplicado, as pontas das microtrincas atuam como concentradores de tensão. Como o corpo não pode liberar estas tensões através de deformação plástica, a tensão local na região próxima à ponta da microtrinca mais severa (crítica) aumenta até atingir a resistência teórica, causando a ruptura do corpo. A equação de Griffith que descreve este processo é:

$$\sigma = \frac{1}{y} \left(\frac{2\gamma_l E}{c} \right)^{1/2} \quad (2)$$

Onde: σ = tensão de ruptura; y = constante que relaciona o tamanho da falha com o tamanho da amostra; e c = comprimento da trinca crítica (ZANOTTO; MAGLIORE 1991).

2.1.2 Métodos de fabricação de cerâmicas

Sabendo que a fragilidade é uma característica inerente das cerâmicas em temperatura ambiente, já que em temperaturas acima de 1000 °C certa plasticidade pode ser observada, além de limitar a aplicação das cerâmicas, a fragilidade também impõe restrição à técnica de produção aplicável às cerâmicas. Essa oposição é bem evidente entre metais e cerâmicas (BOCH; NIÈPCE, 2007).

A produção de uma peça cerâmica, por outro lado, não está desassociada do processamento do material. Um fabricante de artefatos cerâmicos não corta o vaso de uma pré-forma de cerâmica já consolidada. A queima da forma bruta de argila solidifica o objeto em sua forma final por meio de reações físico-químicas que transformam a matéria-prima em fases cerâmicas. Na maioria dos casos, o ceramista cria o objeto enquanto trabalha no material que o constitui (BOCH e NIÈPCE, 2007).

Para dar forma e atingir todos os requisitos de projeto de uma peça cerâmica de engenharia, são necessários vários processos, desde o pó até a finalização do produto (FIOCCHI, 2014). Simplificadamente, na produção de um produto cerâmico, os pós que os constituem são moídos e misturados, depois adicionados aglomerantes e aditivos para melhorar a conformação e sinterização. Os pós são conformados para dar forma às peças compactadas, também chamadas de peças verdes em alusão ao seu estado não sinterizado, que posteriormente devem ser sinterizadas para, então, atingirem a dureza e densidade finais desejadas (SCHELLER, 1994).

De acordo com BAKLOUTI (1996), a operação de granulação consiste em aumentar o diâmetro dos elementos de um pó, a fim de conferir-lhe as propriedades requeridas para o fluxo e enchimento do molde na etapa de compactação. A granulação, por sua vez, tem a intenção de produzir aglomerados esféricos de tamanhos semelhantes, compostos de partículas elementares que têm boas características de fusibilidade/soldabilidade, preservando adequada reatividade de sinterização (BOCH e NIÈPCE, 2007). A Figura 2.1 apresenta grânulos de Al_2O_3 oriundos da granulação e secagem por pulverização.

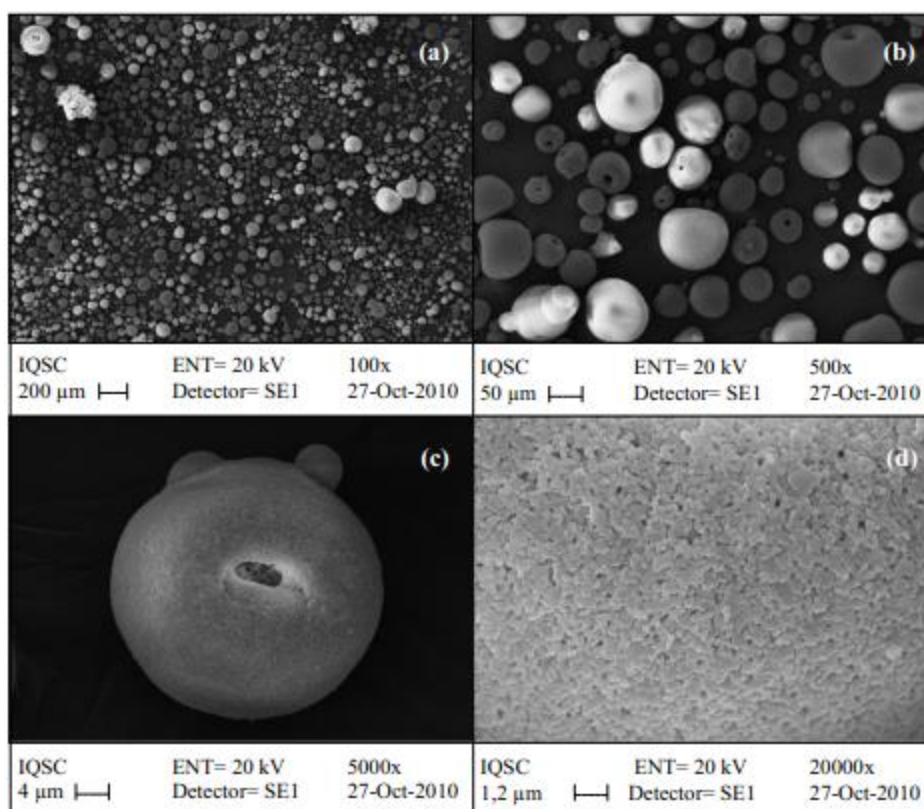


Figura 2.1- Grânulos de alumina obtidos por secagem por pulverização, com aumentos de (a) 100x, (b) 500x, (c) 5000x e (d) 20000x (BUKVIC, 2011).

Vários processos de granulação são utilizados na indústria cerâmica. Simplificadamente, de acordo com BOCH e NIÈPCE (2007), podem ser classificados da seguinte maneira:

- Granulação por prensagem/moagem do pó ou extrusão de grânulos;
- Granulação por agitação/evaporação de suspensão em um misturador e;
- Granulação por secagem de uma suspensão, por exemplo, a liofilização (*freeze-drying*) ou a secagem por pulverização (*spray-drying*).

A consolidação de pós-cerâmicos para produzir um corpo verde é comumente referida como conformação (RAHAMAN, 2003). Os processos cerâmicos mais usados são a colagem de barbotina, a prensagem, a injeção e extrusão em mol, (SATO *et al.*, 1998; BOCH;

NIÈPCE, 2007). BOCH e NIÈPCE (2007) também afirmam que métodos de deposição, por exemplo, a deposição a vapor e a pulverização a plasma, podem ser consideradas como processos cerâmicos de consolidação. De acordo com RAHAMAN (2005) e BUKVIC *et al.* (2012), grandes avanços feitos na área devem-se a atenção dada à microestrutura do corpo verde antes da fase de sinterização.

A presença de gradientes de densidade na peça verde promove heterogeneidade de empacotamento. Em condições convencionais de sinterização, o corpo apresentará uma microestrutura heterogênea e sofrerá distorções, limitando as propriedades de engenharia e, portanto, sua confiabilidade e aplicabilidade. As características físicas e químicas dos pós devem obrigatoriamente ser adaptadas para cada processo de conformação, principalmente no que diz respeito ao seu fluxo durante a moldagem e o arranjo das partículas no corpo verde (BOCH e NIÈPCE, 2007). A Figura 2.2 exemplifica a manufatura de uma peça de cerâmica.

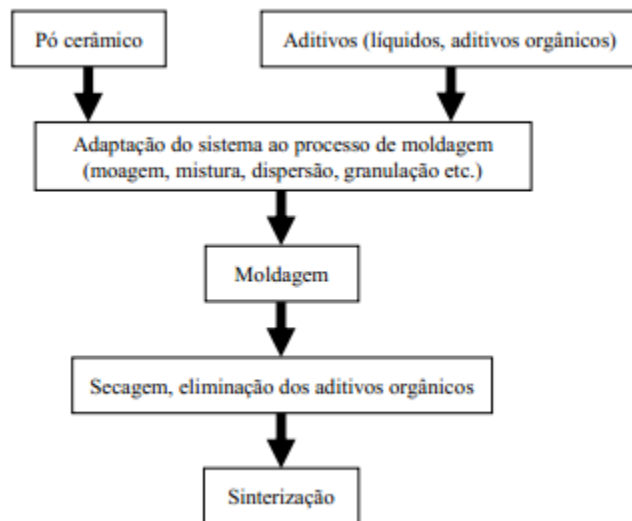


Figura 2.2- Fluxograma geral da manufatura de uma peça cerâmica

(Adaptado de BOCH e NIÈPCE, 2007).

A escolha do processo de moldagem depende de vários parâmetros relacionados com a peça, tais como o tamanho e forma, a qualidade da superfície, as tolerâncias dimensionais e características microestruturais, mas também de razões econômicas, como a produtividade e o custo do equipamento usado para executar o trabalho (LANGE, 2001; YANG *et al.*, 2011). A maioria dos processos de manufatura cerâmica requer uma fase líquida (água, solventes orgânicos) e/ou aditivos orgânicos (dispersantes, ligantes, plastificantes, lubrificantes etc) a fim de conferir ao pó cerâmico as desejadas propriedades e coesão durante a moldagem. Estes com-

ponentes devem necessariamente ser eliminados antes da sinterização durante uma fase crítica de secagem ou remoção do ligante, preservando a integridade e homogeneidade da peça.

2.2 MANUFATURA DE CERÂMICAS

A resistência a altas temperaturas, maior resistência ao desgaste, elevada dureza, baixa condutividade térmica e elétrica, e estabilidade química são fatores característicos na maior parte das cerâmicas. Muitas destas características que fazem a cerâmica tão atrativa também dificultam a sua fabricação por métodos tradicionais de usinagem (SAMANT & DAHOTRE, 2009).

Após a sinterização das peças, são utilizados alguns processos de usinagem de cerâmica com o objetivo de obter superfícies de elevada qualidade e acurácia geométrica como o brunimento, lapidação e retificação. Destes, a retificação é o processo mais utilizado, devido às taxas de remoção maiores que o brunimento e as limitações geométricas do processo de lapidação (JAHANMIR *et al.*, 1999).

Materiais cerâmicos são inerentemente susceptíveis a trincas superficiais e subsuperficiais durante o processo de retificação devido as suas baixas resistências à fratura. Esta característica pode levar a falhas precoces nos componentes e exigir que as taxas de remoção de material sejam suaves. Como consequência, pode-se ter um processo de retificação com vários estágios, ou seja, processo de desbaste, semiacabamento, e acabamento, de forma a se obter o acabamento do produto e boa integridade superficial com minimização dos danos (TSUTSUMI *et al.*, 1993).

As cerâmicas são extremamente difíceis de usinar devido a sua dureza e fragilidade. A retificação se tornou o principal processo usado na retificação cerâmica. No entanto, encontra-se uma série de problemas, como baixa precisão e remoção de material devido à deflexão da máquina e degradação da peça, devido a danos causados no processo (ZHANG; SHIN, 2003).

De acordo com BHUSHAN (2001), independente do processo de manufatura utilizado, a superfície da peça conterà as irregularidades e desvios supracitadas oriundos de sua manufatura. Estas irregularidades podem ser escalonadas em diferentes ordens de imperfeições de forma que vão de desvios macroscópicos até os níveis referentes ao distanciamento dos átomos na cadeia atômica. Em aplicações tecnológicas, ambos os desvios, tanto macro quanto microscópicos têm elevada importância.

Superfícies com texturas determinísticas podem ser estudadas com relativa simplicidade, através de métodos analíticos ou empíricos, que produzem boas caracterizações ao en-

tendimento do processo. Contudo, a superfície de grande parte das peças de engenharia tem características aleatórias, tanto isotrópica quanto anisotrópica, gaussiana como não gaussiana, dependendo mais da natureza do seu processo de fabricação. A Figura 2.3 mostra uma descrição geral da topologia de superfícies sólidas.



Figura 2.3- Topologia de superfícies, segundo Bhushan (2001)

Superfícies formadas por um acúmulo de processos (como peening, eletroerosão e lapidação), nos quais a forma final de cada região resulta do acúmulo de inúmeros processos discretos, aleatórios e de características locais, irá conter um resultado de forma gaussiana, como consequência direta do teorema do Limite Central provindo de teorias estatísticas. Processos de ferramentas de corte com geometria definida em um único ponto de corte (como o torneamento) e com diversas arestas de corte (como a retificação) geralmente, conduzem à formação de superfícies anisotrópicas e não gaussiana. A distribuição Gaussiana ou normal define-se como um dos marcos da classificação das superfícies (BHUSHAN, 2001).

2.2.1 Mecanismos de remoção de material

A usinagem de material no modo dúctil ocorre na retificação com cargas ou profundidades de corte abaixo do limite para induzir a nucleação de trincas. Neste modo de retificação, o processo de remoção de material não é bem caracterizado e fluxo plástico ou cisalhamento parecem ser descrições mais adequadas (TONSHOFF *et al.*, 2002).

A principal característica do modo dúctil é a ausência de trincas residuais na peça. É consenso na literatura, de acordo com CHAND; GUO (2000); MIKIJELJ; ALLOR (2003); QUINN *et al.* (2003) que trincas originadas durante a retificação podem degradar a resistência

à ruptura de um componente de cerâmica estrutural. Assim, a resistência mecânica de componentes cerâmicos retificados no modo frágil é muito sensível tanto ao processo de retificação, como à direção de retificação.

Para impedir a formação de trincas na retificação, ou seja, usinar no modo dúctil, duas estratégias são normalmente usadas: o controle da profundidade de corte e o controle da carga por grão abrasivo durante a retificação (BLAEDEL *et al.*, 1999). BIFANO (1998) apud ZHONG (2003) menciona que a profundidade de corte crítica para a retificação de materiais duros e frágeis no modo dúctil varia de 50 nm a 1 μ m. ZHONG (2003) ainda observa que o modo dúctil e frágil de retificação pode ocorrer no mesmo material frágil e a transição entre eles pode ser controlada pela configuração dos parâmetros de processo (avanço e fluido de corte). Em seu trabalho, ele reporta um modo intermediário entre o frágil e o dúctil, que ele chama de retificação por microtrincamento ou retificação parcialmente dúctil. Geralmente, a retificação de materiais duros e frágeis é baseada na geração de microtrincas laterais que deterioram a qualidade superficial.

Portanto, a transição de mecanismo de remoção de frágil para dúctil é considerada de extrema importância para a retificação de ultraprecisão (BRINKSMEIER *et al.*, 2010). O parâmetro mais importante para a transição do comportamento frágil para dúctil na remoção de cavaco é a condição de tensão no material da peça na vizinhança do contato com a aresta cortante. Da teoria da plasticidade e do mecanismo de fratura sabe-se que o grau de deformação plástica depende da temperatura, taxa de deformação, assim como da tensão de tração e compressão multiaxial (BRINKSMEIER *et al.*, 2010).

2.2.2 Processos abrasivos

Nos processos abrasivos, o início da remoção de material se dá pelo contato mecânico seguido pelo movimento relativo entre ferramenta e a peça. A ferramenta (ou disco) que contém os abrasivos fixos aglutinados por um ou mais tipos de ligantes é chamada rebolo. Este contempla o mecanismo de abrasão dois corpos, encontrado principalmente na retificação, para rápida remoção de material (MALKIN, 1989; MARINESCU *et al.*, 2004, 2007).

Quando os abrasivos não estão ancorados, eles estão livres para rolar entre a peça e a superfície funcional de referência, nesse caso, o mecanismo é chamado de abrasão três corpos. Na lapidação, ambos os mecanismos podem acontecer dependendo da ductilidade e acabamento do disco de lapidação, mas preferencialmente há abrasão três corpos (BLAEDEL *et al.*, 1999; MARINESCU *et al.*, 2007).

A lapidação, seguindo, a abrasão três corpos, produz uma taxa de remoção cerca de três vezes maior que a abrasão dois corpos, para uma mesma pressão. Na retificação, no entanto, a ferramenta de grãos fixos remove mais material, pois exerce maior esforço e velocidade de corte devido ao ancoramento do abrasivo e à maior rigidez da ferramenta. Normalmente, quanto maior a dureza/rigidez, resistência mecânica e adesão do ligante ao abrasivo, maiores serão os esforços admitidos pelo rebolo e remoção (MALKIN, 1989; MARINESCU *et al.*, 2004, 2007).

2.2.3 O processo de retificação

Dentre os processos de usinagem, nome genérico dado ao processo de remoção de material, está o processo de retificação (SALMON, 1992). Este consiste na utilização de um rebolo formado por grãos abrasivos rotacionado a uma alta velocidade de corte para a remoção de material (MARINESCU *et al.*, 2007). Diferente de outros processos, tais como torneamento e fresamento, a retificação utiliza uma ferramenta de corte não definida; isso se deve ao fato dos grãos abrasivos não apresentarem arestas de corte regulares. Dessa forma, vários fatores podem afetar um resultado satisfatório do processo, como os parâmetros e a configuração da retificação (KWAK; HA, 2004; REN *et al.*, 2009). Além disso, o processo de retificação é um dos mais complexos dentre os processos utilizados na usinagem (LIAO, 2007).

Por ser utilizado no acabamento de peças a fim de se obter produtos e superfícies avançadas, normalmente corresponde a uma etapa final da usinagem na linha de produção, não sendo, portanto, toleradas falhas nesse processo. Para garantir os resultados da retificação é necessário uma alta capacitação do operador e um extenso estudo sobre a dinâmica do processo (MALKIN; GUO, 2008; DURGUMAHANTI *et al.*, 2010).

Segundo MARINESCU *et al.*, (2007), o processo de retificação é composto por seis elementos básicos: máquina-ferramenta, neste caso a retificadora; o rebolo; peça a ser retificada; fluido de corte; atmosfera, isto é, a interação dos gases ambiente com os elementos de retificação e os resíduos provenientes da operação de retificação. A Figura 2.4 ilustra todos os elementos básicos de uma operação de retificação plana.

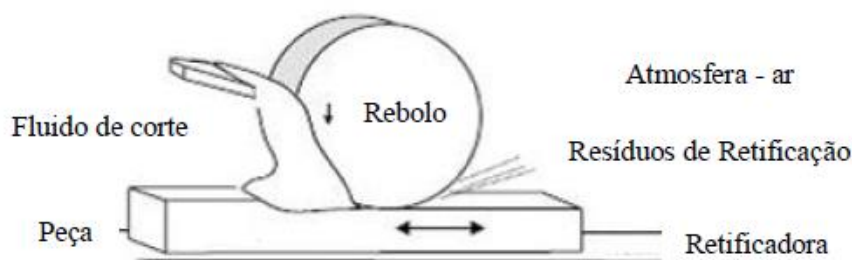


Figura 2.4 - Elementos envolvidos na retificação plana (MARINESCU *et al.*, 2007).

Existem vários tipos de operações de retificação e elas diferem uma das outras as quais variam de acordo com a forma do rebole e da peça a ser retificada, como também pelo movimento cinemático da peça e do cabeçote (MALKIN; GUO, 2008). A interação rebole-peça no processo de retificação tipicamente possui os seguintes parâmetros de entrada: taxa de remoção, velocidade de corte do rebole e da peça, agressividade e tempo de centelhamento (*spark-out*) (KING; HAHN, 1992).

2.2.3.1 Profundidade de corte (a)

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

2.2.3.2 Velocidade de corte (v_s)

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

$$v_s = \frac{\pi \cdot d_s \cdot n_s}{60 \cdot 1000} \text{ [m/s]} \quad (3)$$

Onde:

d_s [mm] é o diâmetro externo do rebolo.

n_s [rpm] a rotação do rebolo.

2.2.3.3 Velocidade da peça (v_w)

Na retificação plana, a velocidade da peça assemelha-se a velocidade da mesa, sendo normalmente expressa em metros por minuto (MARINESCU *et al.*, 2007). Com o aumento da velocidade da peça ocorre uma elevação na taxa de remoção de material, assim, geram-se cavacos com alta espessura e, conseqüentemente, aumenta a força sobre cada grão do rebolo. Dessa forma, os valores de força tangencial de corte são elevados (GRAF, 2004).

2.2.3.4 Espessura de corte equivalente (h_{eq})

Segundo MALKIN (2008), a espessura equivalente de corte (h_{eq}) [μm] representa a espessura da camada de material que é arrancada pelo rebolo numa volta completa. Trata-se de um parâmetro que permite quantificar uma condição de trabalho a partir das variáveis velocidade de corte v_s e velocidade da peça v_w , em determinada profundidade de corte a , sendo, portanto, muito importante no processo de retificação. Por se tratar de uma medida relativa à severidade das condições de corte, a espessura equivalente de corte correlaciona muito bem não somente as forças de retificação e energia, mas também outras características de desempenho, como a rugosidade e o desgaste do rebolo. A espessura equivalente é expressa pela Equação (4):

$$h_{eq} = \frac{v_w}{v_s} \cdot a \quad (4)$$

2.2.3.5 Rebolo

Apesar de a retificação ter sido um tópico de extensa pesquisa pelos últimos 20 anos, o completo entendimento desta ainda tem de ser alcançado. Isso ocorre, particularmente, pelo

fato de que a retificação é um processo estocástico, no qual um grande número de grãos abrasivos de geometria não definida está aleatoriamente atuando na superfície de corte do rebolo (ferramenta de corte utilizada no processo de retificação). A textura final da superfície usinada pode ser considerada como um resultado da somatória da ação individual de cada grão. De fato, a natureza de interação grão/peça é muito complexa e depende de vários fatores que envolvem o rebolo, a peça, a máquina-ferramenta e parâmetros do processo (NGUYEN; BUTLER, 2008).

Pode-se considerar o rebolo como um sistema trifásico, sendo constituído por grãos abrasivos, aglomerante e poros. Desse modo, seu desempenho está relacionado ao tipo e tamanho do grão abrasivo, as propriedades abrasivas do material e porosidade do conjunto (MALKIN; GUO, 2008). As principais características que definem o tipo de um rebolo são: tipo do abrasivo; ligante; dureza; granulometria e estrutura (STEMMER, 1992). Nesse trabalho foram utilizados rebolos convencionais de óxido de alumínio com ligante vitrificado, dureza média e granulometria muito fina.

A propriedade mais importante de um abrasivo é que este seja mais duro que o material a ser retificado. Casualmente define-se essa dureza em termos resistência e endentação estática, obtidos através de um teste de dureza Knoop (MALKIN; GUO, 2008). Os grãos abrasivos podem ser classificados em dois grupos distintos, os grãos naturais e os grãos artificiais, pode-se ainda subdividir estes em mais dois grupos, os abrasivos convencionais e os superabrasivos (SALMON, 1992).

Os ligantes são responsáveis por unir os grãos abrasivos em uma ferramenta abrasiva (SALMON, 1992). Tendo como principais funções: reter o grão durante o processo de usinagem; desgastar-se numa taxa controlada; resistir à força centrífuga em altas velocidades; e a de rapidamente expor o grão ao trabalho (WEBSTER, 2008). Os principais ligantes utilizados são os resinoides, os vitrificados e os metálicos. O uso correto do ligante durante a fabricação dos rebolos tem como objetivo tornar a distribuição dos grãos sobre o rebolo o mais uniforme possível, prejudicando da menor forma possível o processo de retificação (HEINZEL; RICKENS, 2009).

2.2.3.6 Operação de dressagem

Dressagem consiste em uma operação de afiamento concebida para gerar uma topografia particular na superfície de corte do rebolo (JACKSON *et al.*, 2007). Entender a operação de dressagem é um fator crítico para a obtenção de ótimo processo de retificação

(MARINESCU *et al.*, 2007). Inicialmente a topografia e forma macroscópica do rebolo são geradas pela preparação do mesmo por meio da dressagem (MALKIN; GUO, 2008). Segundo LIN *et al.* (2008), a topografia do rebolo é caracterizada pelo número de arestas de corte, de modo que, essa topografia tem influência sobre a geometria do cavaco produzido e no processo de retificação como um todo. Pode-se então considerar que o processo de retificação engloba tanto a dressagem como a própria retificação. Do ponto de vista de remoção do material, as propriedades estáticas mais importantes da topografia do rebolo são os parâmetros relacionados à aresta de corte e sua distribuição.

2.2.3.7 Forças de corte e potência na retificação

Os esforços de corte no processo de retificação são gerados entre a interação do abrasivo e a peça em forma de deformação plástica e elástica, pela formação do cavaco e pelo atrito entre abrasivo, ligante e peça (REN *et al.*, 2009). Geralmente essa força é decomposta em três componentes: normal (F_n) [N]; tangencial (F_t) [N]; e uma componente ao longo da direção de avanço longitudinal (axial - F_a) [N], que não possui muita significância. A Figura 2.5 ilustra a configuração da retificação tangencial plana, representando a força tangencial (F_t), a força normal (F_n), a velocidade periférica de corte (v_s), a velocidade da peça (v_w), a profundidade de corte (a) e o diâmetro do rebolo (d_s).

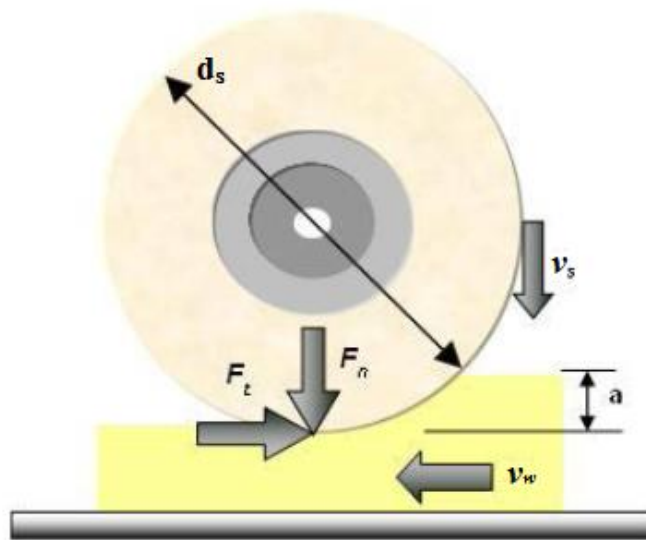


Figura 2.5- Esquema ilustrativo de retificação plana (KING; HAHN, 1992) - adaptado.

A força tangencial afeta principalmente o consumo de energia e o tempo de vida de serviço do rebolo, assim afeta também na temperatura e rugosidade da peça usinada. A força normal atua perpendicularmente à superfície do rebolo e depende da dureza do grão abrasivo e do material a ser usinado. Esta é maior que a tangencial e age diretamente na redução da profundidade de corte, sendo também responsável por deflexões da peça, rebolo e estrutura da máquina. A componente axial só ganhará importância quando houver certo deslocamento lateral do rebolo (MARINESCU *et al.*, 2004). A força tangencial de corte em um grão abrasivo é expressa pela Equação (5):

$$F_t = b \cdot h_{max} \cdot K_s + \mu \cdot b^2 \cdot \pi \cdot \frac{K_n}{4} \quad [N] \quad (5)$$

Onde: b [mm] = largura média no topo dos grãos abrasivos; K_s [N/mm²] = pressão específica de corte; μ = coeficiente de atrito entre grão e peça e K_n [N/mm²] = tensão de escoamento do material.

A potência de retificação é associada à velocidade de corte (v_s) e a velocidade da peça (v_w), segundo a Equação (6) (MALKIN, 2008). A força tangencial (F_t) é a componente da força de retificação responsável pela dissipação de potência em situações de alta velocidade do rebolo (MARINESCU, *et al.*, 2004).

$$P = F_t \cdot (v_s \pm v_w) \quad [W] \quad (6)$$

2.2.4 Retificação de cerâmicas

O processo de retificação é a etapa mais importante na usinagem de cerâmicas avançadas, é altamente complexo e envolve o contato entre um grande número de partículas abrasivas, com a superfície da peça (BIANCHI *et al.*, 2003). Muitos defeitos como fissuras, alta rugosidade e ranhuras podem ocorrer durante o processo de sinterização da cerâmica, resultando diretamente na redução da qualidade mecânica da sua estrutura. A retificação remove essa camada defeituosa, aprimorando, dessa forma, as propriedades da peça. No entanto, devido à sua alta fragilidade, os componentes cerâmicos invariavelmente sofrem danos, como trincas superficiais ou subsuperficiais durante o processo de remoção de material, resultando em perda de resistência mecânica (MAYER, J. E. JR & FANG, 1993; AYDIN *et al.*, 1997).

TONSHOFF *et al.* (2002) declaram que o custo envolvido na retificação da cerâmica avançada é a principal parcela do custo final e, dessa forma, a viabilidade econômica da cerâmica avançada depende diretamente da eficiência do processo de retificação. Portanto, a redução do custo da retificação pelo aumento da taxa de remoção de material é limitada pelo risco imposto à superfície que, conseqüentemente, pode comprometer o desempenho da peça em sua aplicação.

De todos os processos de usinagem de uso comum, a retificação é o mais caro por unidade de volume de remoção de material. Na fabricação de componentes cerâmicos, a retificação pode compreender até 80% do custo total. A retificação eficiente de alto desempenho da cerâmica requer a seleção dos parâmetros de operação para maximizar taxa de remoção enquanto controla a integridade superficial. Reduzir custos de retificação usando taxas de remoção maiores é um recurso limitado, principalmente por danificar a superfície da peça de cerâmica, levando à sua degradação (VERLEMANN, 1993; MALKIN; HWANG, 1996).

As características da retificação cerâmicas avançadas são muito diferentes das características dos metais. Portanto, é necessário efetuar outros estudos para alcançar uma compreensão mais abrangente, e um melhor controle dos parâmetros, a fim de obter um acabamento satisfatório. Algumas dificuldades encontradas na usinagem são a elevada dureza e rigidez das cerâmicas, por exemplo, (AGARWAL; RAO, 2005)

Como resultado da retificação de peças de cerâmicas avançadas, verificam-se diferentes tipos de danos em consequência de três mecanismos distintos de remoção de material: fratura intergranular e deslocamentos de grãos; micro fratura e formação de fragmentos de grão através de trincas intragranulares; e remoção de grandes porções de grãos, por meio de lascamentos devido à propagação de trincas transgranulares (SWAIN, 1979; XU; JAHANMIR, 1999).

2.2.4.1 Rebolo para retificação de cerâmicas

Segundo JAKOBUSS; FIECOAT (2000), os diamantes friáveis são os mais apropriados para retificar cerâmica, pois ao se micro-fraturarem constantemente, regeneram as arestas de corte, gerando menores forças para a remoção do diamante da liga e limitando o dano à peça. (SHIBATA, 1998) considera que diamantes friáveis são adequados para ligas de menor resistência mecânica (resinóide) e os diamantes com maior resistência ao impacto para ligas com maior poder de retenção, ou seja, o tipo de abrasivo deve ser especificado em função do sistema ligante utilizado. Segundo MARINESCU *et al.* (1998), o comportamento de transição

térmica entre o diamante e a liga, bem como o ancoramento em alguns tipos de liga, pode ser melhorado recobrando os diamantes com um revestimento metálico, que geralmente são ligas de cobre ou níquel.

Este revestimento aumenta a rugosidade e área superficial do diamante e assim a retenção deste na liga. Além disso, atuam como barreiras térmicas, pois devido ao coeficiente de condutividade térmica inferior ao diamante, retém o calor e impede a degradação térmica de ligas resinóides (JAKOBUSS; FIECOAT, 2000). Os diamantes do rebolo também são especificados pelo tamanho do grão e concentração na liga. Geralmente o tamanho do grão é expresso como o valor médio em micrômetros, precedido pela letra D. A concentração de diamante descreve o volume de diamante presente na liga. O valor base é 4,4 quilates, porém, é indicado como C100 e representa uma fração volumétrica de 25%, considerando a densidade do diamante (MARINESCU; PRUTEANU, 1998). XU; JAHANMIR (1994) consideram que a concentração do diamante no rebolo determina a distância entre as trincas laterais e assim, pode influenciar a taxa de remoção e danos subsuperficiais.

2.2.5 Caracterização de cerâmicas após a usinagem

Existe uma gama de técnicas de caracterização superficial e subsuperficial de peças manufaturadas por meio dos finos processos de acabamento, algumas bem estabelecidas e outras que estão começando emergir como ferramentas utilizáveis (KLOPFSTEIN e LUCCA, 2011). A literatura contém uma extensa cobertura das várias técnicas que têm sido utilizadas para a caracterização superficial e subsuperficial, tais como, as ópticas que incluem métodos que medem a transmissão ou reflexão da luz incidente (WU *et al.*, 2008; NEAUPORT, 2009; WANG; VANKERKHOVE, S. SCHREIBER, 2011). A rugosidade destaca-se como um dos mais usados parâmetros de qualificação da topografia de superfícies retificadas, a seguir encontra-se uma explicação sobre a ocorrência de danos subsuperficiais, a rugosidade e algumas técnicas utilizadas para caracterização das cerâmicas após a usinagem (BHUSHAN, 2001).

2.2.5.1 Danos subsuperficiais

Dano subsuperficial pode ser definido como qualquer efeito degradante que se manifeste abaixo da superfície da peça (BLAEDEL *et al.*, 1999). Exemplos são tensões residuais, microtrincas e alterações na dureza próximas à superfície. Durante a retificação ocorre uma grande quantidade de eventos de indentificação que geram um campo radial de tensões com-

pressivas, com tensões tangenciais fora da zona plástica ao redor do campo. A sobreposição dos campos de tensão residuais das posições vizinhas onde foram gerados os danos na superfície retificada forma uma camada de tensão compressiva residual.

BLAEDEL *et al.* (1999) citam que existem vários métodos de medir a extensão do trincamento subsuperficial, porém a maioria deles é destrutiva para a peça. Um dos métodos mais populares é retificar um lote de peças de amostra e medir a variação no módulo de ruptura à flexão.

O dano subsuperficial na forma de tensões residuais pode ser medido através de técnicas de raios-X. Esta técnica é baseada na determinação da deformação do retículo cristalino provocada pelas tensões (TONSHOFF *et al.* 1999). JOHNSON *et al.* (1986) mencionam o método de Twyman, onde a deformação induzida pela retificação de uma peça fina permite o cálculo da tensão residual do processo de retificação executado.

2.2.5.2 Rugosidade

Segundo HECKER; LIANG (2003), a qualidade da superfície gerada pelo processo de retificação determina muitas características da peça, tais como tolerâncias mínimas, a eficiência da lubrificação, a vida útil da peça produzida, dentre outras. Uma superfície típica é caracterizada por caminhos de corte limpos e materiais escoados lateralmente (*plowing*) em algumas ranhuras. Entretanto, muitas outras marcas podem ser encontradas, tais como fraturas produzidas pelo efeito térmico, material transferidos de volta e crateras produzidas pela fratura do grão. Outros fatores que caracterizam uma superfície retificada são as ondulações transversais e longitudinais produzidas pela natureza aleatória do processo de retificação e pela vibração da máquina. Quando se considera todos esses fatores, uma estimativa completa da topografia da superfície se torna um problema complicado.

Ainda, segundo HECKER; LIANG (2003), um parâmetro típico usado para quantificar a qualidade da topografia de uma superfície é a rugosidade, a qual é representada pelo valor médio aritmético, R_a , o valor médio quadrático, R_q , e o valor entre o pico e vale, R_t . Em geral, a rugosidade longitudinal possui um valor menor do que a rugosidade transversal, e, portanto, a última é frequentemente usada na indústria. A Figura 2.6 apresenta um esquema da rugosidade média aritmética.

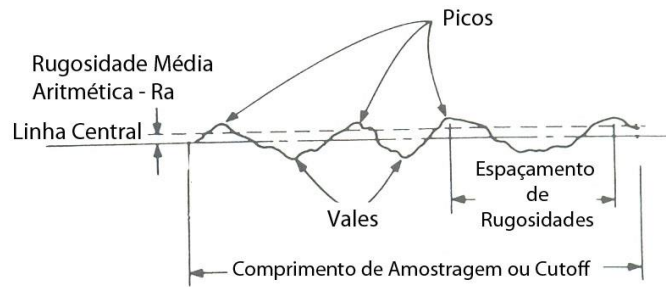


Figura 2.6- Rugosidade Média Aritmética (MALKIN, 1989)

O rugosímetro é um aparelho eletrônico amplamente empregado na indústria para verificação de superfície de peças e ferramentas (rugosidade). Assegura um alto padrão de qualidade nas medições. Os rugosímetros podem ser classificados em dois grandes grupos:

- Aparelhos que fornecem somente a leitura dos parâmetros de rugosidade (que pode ser tanto analógica quanto digital).
- Aparelhos que, além da leitura, permitem o registro, em papel, do perfil efetivo da superfície.

Os primeiros são mais empregados em linhas de produção, enquanto os segundos têm mais uso nos laboratórios, pois também apresentam um gráfico que é importante para uma análise mais profunda da textura superficial. O equipamento é composto por:

- Apalpador - Também chamado de “pick-up”, desliza sobre a superfície que será verificada, levando os sinais da agulha apalpadora, de diamante, até o amplificador.
- Unidade de acionamento - Desloca o apalpador sobre a superfície, numa velocidade constante e por uma distância desejável, mantendo-o na mesma direção.
- Amplificador - Contém a parte eletrônica principal, dotada de um indicador de leitura que recebe os sinais da agulha, amplia-os, e os calcula em função do parâmetro escolhido.

A morfologia das superfícies retificadas pode variar conforme o material e o tipo de ferramenta utilizada, e são em geral ranhuras sobrepostas causadas pela interação entre a ferramenta de corte com a peça (MALKIN, 1989).

2.2.5.3 Microscopia confocal

A microscopia confocal, por exemplo, está emergindo como uma ferramenta de grande utilidade para a caracterização da superfície e subsuperfície de uma variedade de materiais. A luz monocromática é dirigida à superfície e a luz reemitida pela excitação é recolhida. A luz emitida pelo laser é varrida através da superfície fornecendo um mapa bidimensional da luz captada. A informação do perfil de profundidade é obtida usando a capacidade do microscópio confocal, onde a luz incidente é focada na superfície ou abaixo dela e apenas a luz a partir desse ponto focal é recolhida utilizando uma abertura confocal (HASSUI; DINIZ, 2003; CHEN *et al.*, 2013).

Típicas resoluções espaciais laterais e profundidade são limitadas a $1\mu\text{m}$, aproximadamente. Quando usado no modo de reflexão, a intensidade da luz refletida é medida e o método pode proporcionar informação sobre os defeitos ou pontos de espalhamento abaixo da superfície. O modo de fluorescência (microscopia de fluorescência confocal) recolhe o espectro da luz reemitida e usa mudanças na amplitude dos picos ou deslocamentos espectrais para fornecer informações sobre as espécies químicas e tensão residual (KLOPFSTEIN e LUCCA, 2011).

Técnicas como essas são utilizadas para avaliar a qualidade superficial e estrutural das cerâmicas usinadas, encontrar possíveis danos, como fissuras ou trincas.

2.3 VIBRAÇÃO NO PROCESSO DE MANUFATURA

A vibração pode ser definida como a oscilação do centro de massa de um corpo ou a inversão periódica do seu sentido de movimento (BRAND; MATHIAS, 2010). Todas as máquinas apresentam algum tipo de vibração durante o seu funcionamento e, na maioria das vezes, as vibrações não são desejadas e requer esforço para minimizá-las. Em apenas para alguns tipos de máquinas as vibrações estão diretamente relacionadas com o princípio de funcionamento e, portanto, são causadas deliberadamente (por exemplo, esteiras vibratórias). No entanto, este grupo de máquinas não é de interesse para a realização de análise de vibração. (OSTRAVA; BILOS, 2012).

O estudo da vibração diz respeito aos movimentos oscilatórios de corpos e suas forças que são associadas. Todos os corpos dotados de massa e elasticidade são capazes de produzir vibração. Deste modo, a maior parte das máquinas e das estruturas está sujeitas a vibrações, e o seu projeto requer geralmente o exame do seu comportamento oscilatório (VIEIRA, 2011). O modo mais simples de movimento vibratório é o harmônico mostrado na Figura 2.7.

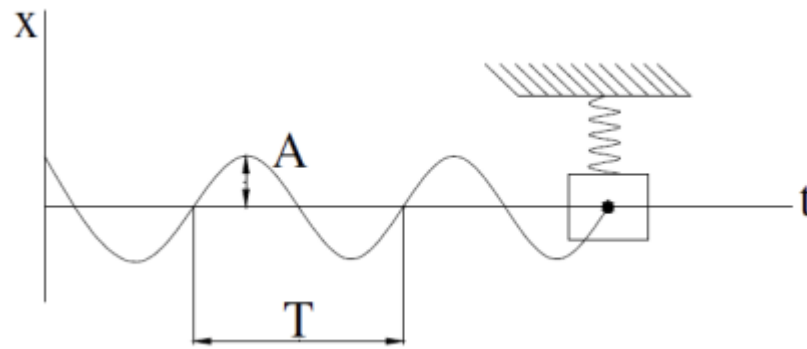


Figura 2.7- Movimento harmônico de vibração- Brand & Mathias (2010)

Para MANUEL; PARREIRA (2009), a vibração ocorre num equipamento rotativo sempre que o centro de massa não coincida com o centro de rotação. Outro exemplo de caracterização do movimento harmônico simples é a resposta de um sistema de um grau de liberdade excitado por uma força senoidal. Além disso, denota-se que qualquer movimento periódico é composto por uma série de movimentos harmônicos simples, cada um deles pode ser descrito por uma função senoidal. Neste sentido, são realizados estudos para diagnosticar vibrações em equipamentos, máquinas e sistemas, analisando desse modo, as formas de vibração e suas causas.

2.3.1 Classificação e formas de resposta da vibração

Há diferentes formas de classificar as vibrações em sistemas mecânicos. Podem ser classificadas quanto à excitação, neste caso as vibrações podem ser livres ou forçadas. Quanto ao amortecimento, onde as vibrações podem ser amortecidas ou não amortecidas. E quanto ao deslocamento, que pode ser retilíneo ou torsional, ou combinação de ambos. O problema comum da aplicação de diagnóstico de vibração é o fato de que as análises são realizadas mediante a resposta às causas que estabelecem métodos de reparação, como falhas, desgastes etc. No caso de diagnóstico de vibração, esta resposta é representada por vibrações que dependem da força aplicada. Os tipos comuns de força de excitação são a periódica, a impulsiva e a casual ou aleatória (BILOŠOVÁ; BILOŠ, 2012).

2.3.1.1 Força de excitação periódica

De acordo com BILOŠOVÁ; BILOŠ (2012), o caso mais simples de força periódica é uma força harmônica. Na prática, uma força harmônica é rara, mas a maioria das forças reais

que ocorrem em máquinas rotativas pode ser expressa como uma soma de forças harmônicas. Portanto, é possível descrever as propriedades das forças periódicas e sua influência sobre a resposta de vibração usando forças harmônicas de resposta. A resposta à força harmônica é definida na Equação (7).

$$f(t) = F \cdot \text{sen}(\omega t + \varphi_F) \tag{7}$$

Onde: F = amplitude da força de excitação [N]; ω = frequência angular da força de excitação; t = tempo [s] e φ_F = mudança de fase inicial da força de excitação.

Se uma força harmônica atua sobre um corpo flexível suportado, o movimento constante do corpo também é harmônico com a mesma frequência angular ω , mas geralmente com amplitude diferente. Esta vibração é chamada de vibração forçada. O deslocamento de tal vibração pode ser expresso na Equação (8) (MEIROVITCH, 2001).

$$X(t) = X \cdot \text{sen}(\omega t + \varphi_F - \varphi) \tag{8}$$

Onde: X = amplitude de vibração forçada; φ = mudança de fase e atraso entre o deslocamento e a força atuante.

A Figura 2.8 apresenta o comportamento da vibração forçada causada por força de excitação harmônica, na prática isso ocorre quando um rotor de um motor é desbalanceado, por exemplo, (BILOŠOVÁ; BILOŠ, 2012).

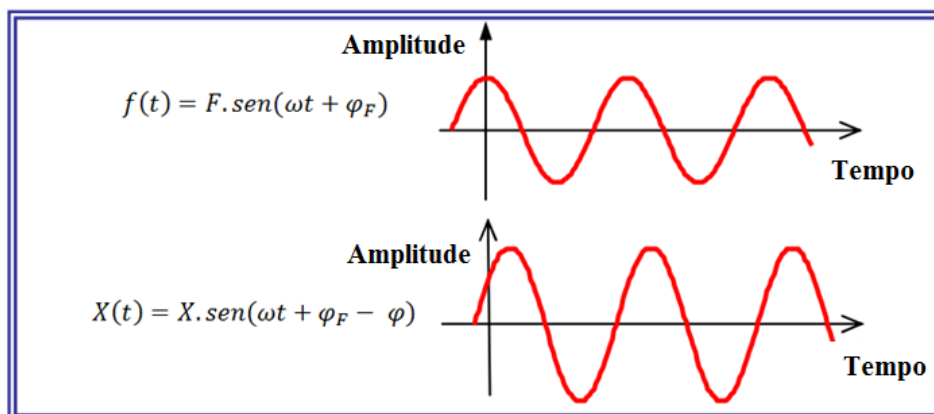


Figura 2.8- Vibração forçada causada por força de excitação harmônica. (BILOŠOVÁ; BILOŠ, 2012) – adaptado.

2.3.1.2 Força de excitação por impulso

Quando uma força de impulso é que atua sobre um corpo, desvia o corpo da posição de equilíbrio, causa uma vibração denominada livre, que é subsequente em uma ou mais das suas frequências naturais (BILOŠOVÁ; BILOŠ, 2012). A Figura 2.9 mostra um exemplo em termos de comportamento.

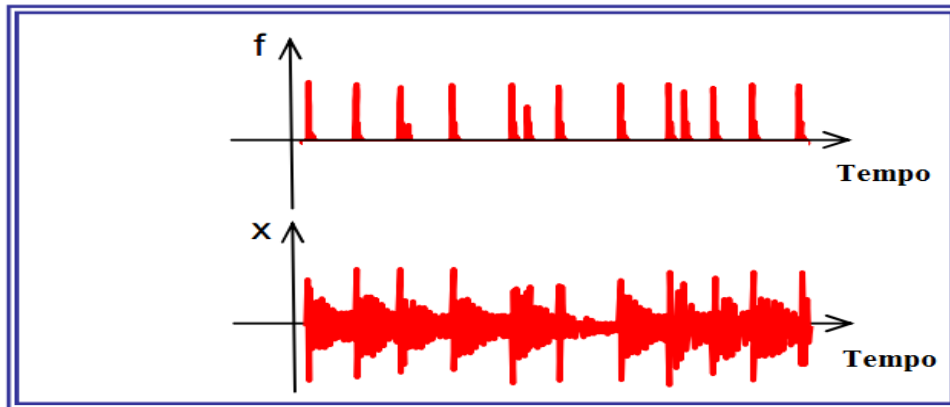


Figura 2.9- Vibração livre causada pela força de excitação por impulso (BILOŠOVÁ; BILOŠ, 2012) – adaptado.

Um exemplo comum é estar batendo em um vidro (vidro intacto soa diferente de um vidro trincado), tocando um sino etc. Na prática, usa-se a excitação por impulso intencional realizando "teste por sensores". A excitação por impulso não intencional está associada com defeitos em rolamentos, por exemplo. Na Figura 2.10 f representa a amplitude da força de excitação por impulso e X a amplitude da vibração livre (MEIROVITCH, 2001).

2.3.1.3 Força de excitação na forma de onda aleatória

Quando a força aleatória atua sobre um corpo, a resposta também é aleatória. Além disso, semelhante à excitação por impulso, às frequências naturais podem ser excitadas (qualquer mudança abrupta pode excitar as frequências naturais na vibração livre). Deve-se compreender que excitação aleatória está sempre presente, como na maior parte apenas ruído, mas, ocasionalmente, ele deve ser considerado mesmo no diagnóstico de vibração padrão, quando um fluxo de turbulência indesejada ocorre, por exemplo (BILOŠOVÁ; BILOŠ, 2012). A Figura 2.10 mostra um exemplo.

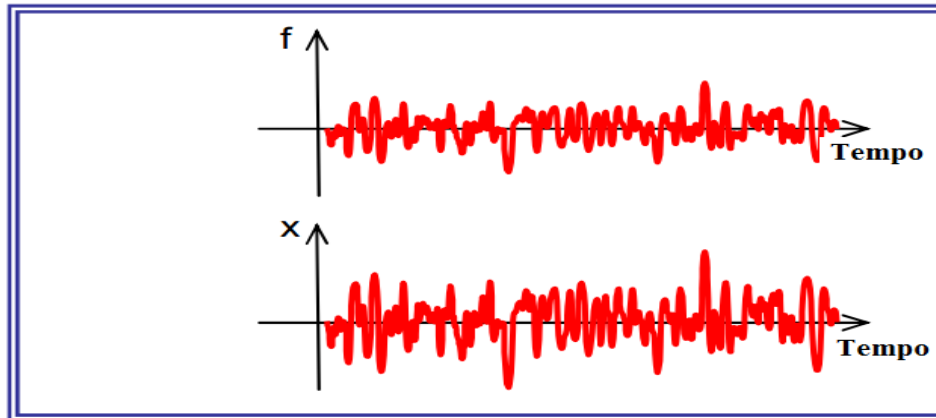


Figura 2.10- Vibração excitada causada pela forma de onda aleatória (BILOŠOVÁ; BILOŠ, 2012) – adaptado.

Na Figura 2.11 f representa a amplitude da forma de onda aleatória e X a amplitude da vibração excitada.

2.3.1.4 Vibração autoexcitada

De acordo com BILOŠOVÁ; BILOŠ (2012), a vibração autoexcitada é potencialmente um fenômeno muito destrutivo quando é da natureza aerodinâmica ou quando envolve as forças hidrodinâmicas que atuam sobre um objeto excitando suas naturais frequências. Este fenômeno é chamado de vibração autoexcitada e, na aviação, por exemplo, deve ser incondicionalmente evitado. Em uma forma não destrutiva, esse fenômeno é bastante comum e faz com que as vibrações sejam causadas por um atuador externo na forma controlada.

Na vibração autoexcitada, o movimento de vibração do objeto aumenta uma carga aerodinâmica, que por sua vez impulsiona o objeto se mover mais. Se a entrada de energia pela excitação aerodinâmica num ciclo é maior do que dissipada pelo amortecimento no sistema, a amplitude da vibração aumenta, resultando numa oscilação autoexcitada, o que pode resultar em amplitude de vibração elevada e potencialmente levar à rápida falha. Matematicamente, pode ser descrito de forma semelhante como uma oscilação amortecida livre, onde o amortecimento é negativo de acordo com a Figura 2.11 (MEIROVITCH, 2001).

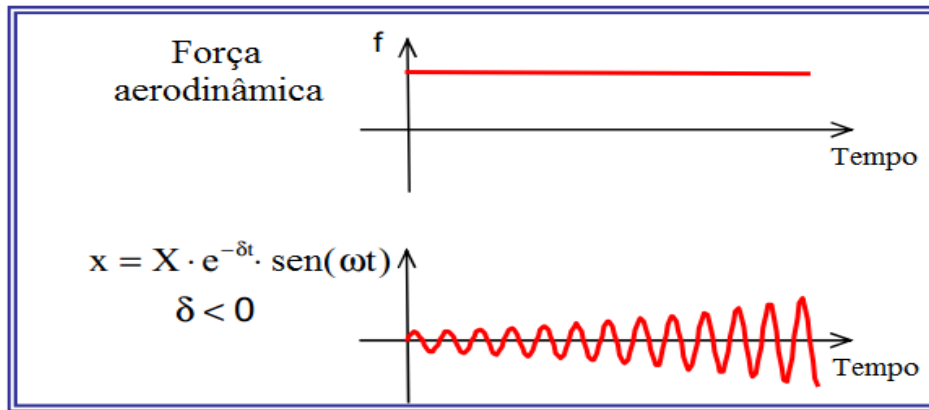


Figura 2.11- Vibração autoexcitada (BILOŠOVÁ; BILOŠ, 2012) – adaptado.

Devido a isso, estruturas expostas a forças aerodinâmicas, tais como asas de aviões, turbinas, compressores, pontes e máquinas mecânicas, são projetados cuidadosamente dentro de parâmetros conhecidos para evitar essa vibração. Em estruturas complexas, em que as propriedades mecânicas da estrutura não são completamente compreendidas, a vibração pode ser avaliada somente por meio de testes detalhados ou por meio de equipamentos que permitem o diagnóstico de vibração ou transdutores de vibração (BILOŠOVÁ; BILOŠ, 2012).

2.3.1.5 O movimento oscilatório

Uma massa m apoiada sobre uma mola de rigidez k , depois de ter sido deslocado da sua posição de equilíbrio, executa um movimento de oscilação harmônica. Se o amortecimento é negligenciado, as oscilações em massa com frequência natural $\Omega = \sqrt{k/m}$ e o curso de deslocamento é uma onda senoidal com amplitude de x_a , de acordo com Equação (9) (MEIROVITCH, 2001).

$$x(t) = x_a \cdot \text{sen}(\Omega t - \varphi) \quad (9)$$

Onde: x_a = amplitude de oscilação harmônica [m]; Ω = frequência natural angular [rad/s] e φ = deslocamento de fase inicial (é determinada pelo deslocamento inicial).

Na prática, a frequência f expressa em Hertz (isto é, do número de ciclos completos por segundo) é usado com mais frequência do que a frequência angular Ω (ou ω) expresso em radianos por segundo, de acordo com a Equação (10) (BILOŠOVÁ; BILOŠ, 2012).

$$f = \frac{\omega}{2\pi} \quad [Hz] \quad (10)$$

O valor inverso de uma frequência f é um período T , de acordo com a Equação (11).

$$T = \frac{1}{f} = \frac{2\pi}{\omega} \quad [s] \quad (11)$$

Outras características, além da amplitude, são muitas vezes utilizadas para descrever o sinal harmônico (onde x neste caso pode significar qualquer quantidade, não apenas o deslocamento), conforme a Figura 2.12, onde é descrito o movimento harmônico.

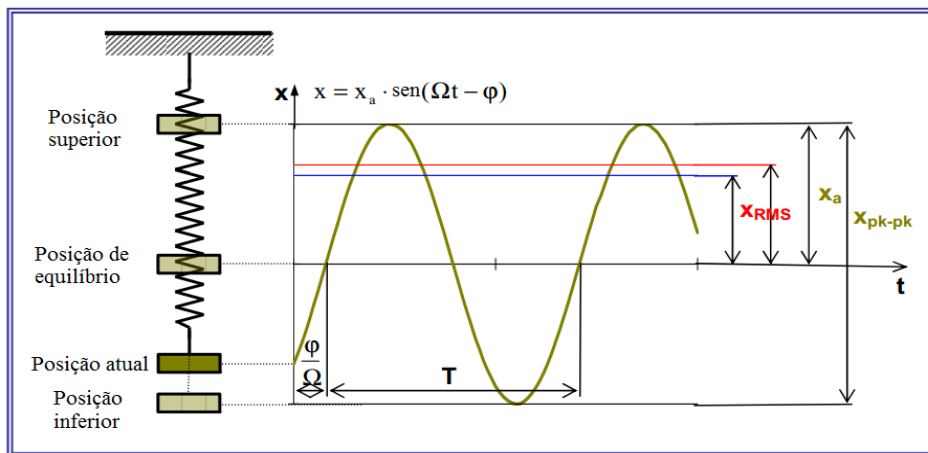


Figura 2.12- Descrição do movimento harmônico. (BILOŠOVÁ; BILOŠ, 2012) – adaptado.

Na Figura 2.12 são apresentadas as variáveis que descrevem o movimento oscilatório como o valor de pico (amplitude de sinal harmônico) x_a , o valor RMS (Valor Médio Quadrático de, *Root Mean Square*) = $0,707 \times$ amplitude, ou seja, $x_{RMS} = 0,707 \cdot x_a$, o valor médio = $0,637 \times$ amplitude, ou seja, $x_{medio} = 0,637 \cdot x_a$ e o valor de pico-a-pico = $2 \times$ amplitude, ou seja, $x_{pk-pk} = 2 \cdot x_a$. Características semelhantes a essas também são usados para sinais não harmônicos. Neste caso, o conceito de amplitude perde seu sentido, mas as expressões para o valor RMS e o valor médio ainda são válidos (BILOŠOVÁ; BILOŠ, 2012).

2.3.2 Vibração no processo de retificação

No processo de retificação ocorre tanto a vibração autoexcitada, ou trepidação, quanto a vibração forçada. Vibrações forçadas são geradas por distúrbios periódicos externos ao pro-

cesso. Podem ter origem em eixos ou rebolos desbalanceados, motores elétricos, rolamentos, atuadores hidráulicos, ou até mesmo por outras máquinas nas adjacências (MALKIN, 1989). A principal dificuldade deste tipo de vibração é sua eliminação, já que a identificação da fonte de vibração é relativamente simples, por meio de medições das frequências (INASAKI *et al.*, 2001). Já as causas da vibração autoexcitada são muito mais complexas, pois estão associadas à vibração natural da estrutura máquina-ferramenta. A instabilidade da retificação é atribuída a aspectos relacionados ao rebolo e à peça (ALTINTAS; WECK, 2004). A Figura 2.13 mostra a vibração no processo de retificação.

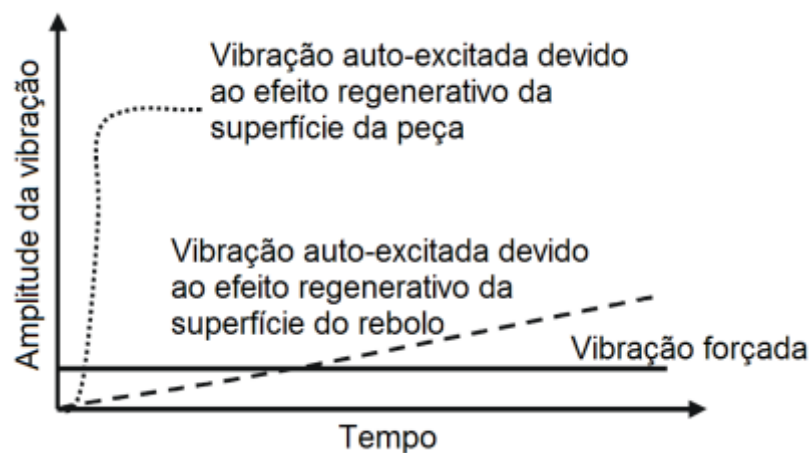


Figura 2.13- Vibração no processo de retificação (INASAKI *et al.*, 2001).

Drew *et al.* (2001) afirmam que a frequência de trepidação está relacionada com a frequência natural fundamental transversal da peça e do rebolo. Deste modo, se a largura de retificação não for muito maior que a largura limite para uma retificação estável, a frequência de trepidação é a próxima harmônica inteira da frequência do rebolo acima da frequência natural transversal da peça. Inicialmente, a topografia do rebolo é gerada pela operação de dressagem e as mudanças ocorrem ao longo da retificação.

O desgaste de rebolos pode ser muito influenciado pelos níveis de vibração existentes no processo. Dessa forma os níveis de vibração também podem influenciar diretamente a qualidade das peças de cerâmicas após a retificação. Apesar de esta influência ser importante, ainda há poucos estudos sobre esse assunto na literatura. Sendo assim, o seu estudo no âmbito deste trabalho será enfatizado.

2.3.3 Vibração forçada na retificação

As fontes de vibração forçada podem ser localizadas pela análise da frequência. Por exemplo, se a vibração for causada pelo desbalanceamento ou excentricidade do rebolo, a frequência medida deve ser equivalente à rotação do rebolo (INASAKI *et al.*, 2001). Em um estudo teórico realizado por (ORYŃSKI; PAWŁOWSKI, 1999), analisou-se a influência do processo de retificação no amortecimento da vibração forçada. O modelo matemático levou em consideração uma máquina retificadora equipada com mancais hidrostáticos, guias hidrostáticas e força de excitação harmônica atuando no cabeçote do rebolo. A Figura 2.14 exibe o resultado qualitativo da simulação.

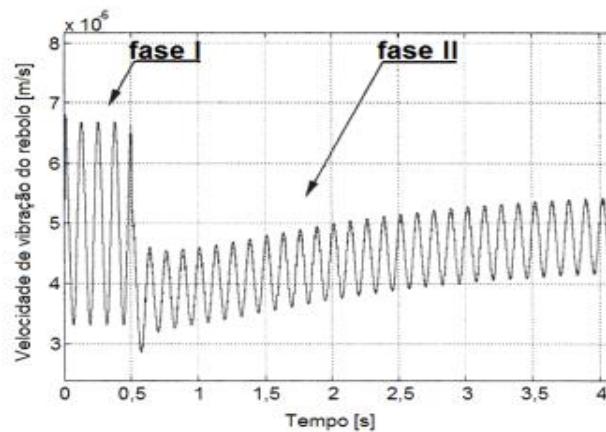


Figura 2.14- Resultado da simulação computacional para a velocidade de vibração do rebolo na fase I e fase II (ORYŃSKI; PAWŁOWSKI, 1999)- Adaptado.

Pelo gráfico da Figura 2.14 fica explícita a diminuição da velocidade de vibração quando o rebolo entra em contato com a peça (fase II) em relação ao período em que o rebolo apenas se aproxima da peça (fase I). De acordo com os autores, a força normal possui um efeito de amortização da vibração forçada.

2.3.4 Vibração autoexcitada na retificação

Entre as várias razões concebíveis de instabilidade no processo, o efeito regenerativo é considerado a maior causa de vibrações autoexcitadas na retificação. Devido ao movimento rotacional da peça durante a remoção de material, as ondulações geradas na sua superfície criadas pela vibração relativa entre esta e o rebolo resultam na variação da profundidade de corte após uma revolução da peça. Nas revoluções subsequentes, a diferença de fase entre as ondulações da superfície da peça e a vibração relativa deixa o processo instável quando uma-

determinada condição é atingida. Isto é o que faz a vibração autoexcitada na retificação ser tão complexa.

Devido a este efeito regenerativo, as amplitudes das ondulações geradas na superfície da peça aumentam rapidamente. Este tipo de vibração é um dos fatores limitantes na escolha dos parâmetros de usinagem. Por outro lado, as ondulações geradas na superfície do rebolo aumentam lentamente devido à sua maior resistência ao desgaste. Estas ondulações estão diretamente ligadas à vida do rebolo, já que se adquirirem uma dada amplitude crítica, o rebolo deve ser dressado para a completa remoção das mesmas (INASAKI *et al.*, 2001).

2.3.5 Influência da vibração na qualidade das peças retificadas

A ocorrência da vibração autoexcitada tem uma grande influência na geometria rebolo e da peça. Na peça, as consequências mais óbvias são as marcas visíveis a olho nu da superfície facetada (ORYŃSKI; PAWŁOWSKI, 1999). Embora esta deterioração visível deva ser considerada uma perda de qualidade, é extremamente difícil quantificar angulares entre as faces vizinhas são muito pequenos e difíceis de serem medidos por medidores de contato. Por esta razão, a técnica mais apropriada para a avaliação destas marcas é a medição por sensores ópticos.

A Figura 2.15 mostra uma medição das marcas de um virabrequim retificado com um sensor óptico e também marcas visíveis a olho nu de um corpo-de-prova. Os desvios angulares entre as faces vizinhas são muito pequenos e difíceis de serem medidos por medidores de contato. Por esta razão, a técnica mais apropriada para a avaliação destas marcas é a medição por sensores ópticos (INASAKI *et al.*, 2001). Amplitude da variação da força versus variação da velocidade da peça mostra a amplitude da oscilação da força de retificação com a variação peça.

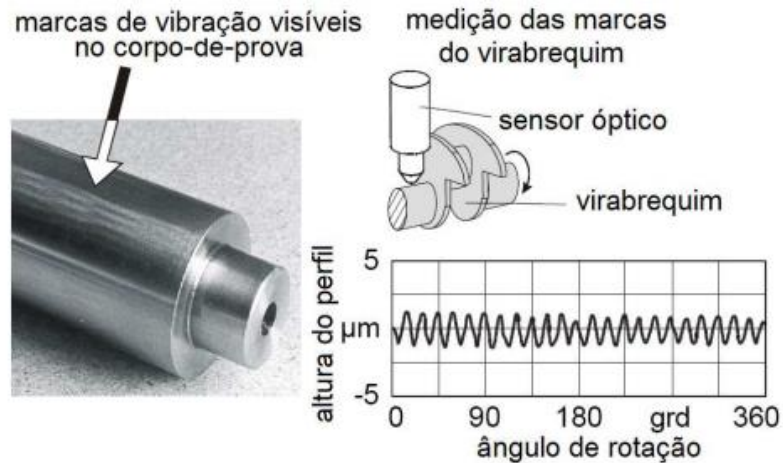


Figura 2.15- Resultado da vibração na superfície da peça (INASAKI et al., 2001) - Adaptada.

O estudo ainda afirma que existe a possibilidade de usar a variação da velocidade da peça a altas frequências como forma de redução da trepidação influência na qualidade superficial da peça. A ocorrência da vibração autoexcitada tem uma grande influência na geometria do rebolo e da peça. Na peça, as conseqüências mais óbvias são as marcas visíveis a olho nu (ORYŃSKI; PAWŁOWSKI, 1999). Embora esta deterioração visível deva ser considerada uma perda de qualidade, é difícil quantificar estas marcas usando qualquer técnica de medição.

2.4 MONITORAMENTO DO PROCESSO DE MANUFATURA

O surgimento de novos materiais de difícil usinagem, e como consequência o surgimento de novos materiais de ferramentas (de alto custo), juntamente às exigências de alta produção, lotes variados, faixas de tolerâncias cada vez mais estreitas e baixo custo de produção, têm extrapolado os limites e habilidades de operadores de máquinas. Máquinas CNC já realizam diversas funções antes executadas pelo homem (aproximação, afastamento e posicionamento da ferramenta, regulagem do avanço e velocidade de corte etc), porém permanecendo ainda algumas sob responsabilidade do operador (troca da ferramenta, inspeção da peça, etc). Assim, sistemas de monitoramento e controle de processos de usinagem buscam atender essa necessidade, minimizando e/ou auxiliando a atuação do homem nas máquinas ferramentas (BLUM *et al.*, 1998; INASAKI *et al.*, 2001; DINIZ *et al.*, 2003).

As avarias e desgastes de ferramentas são os maiores fatores que influem na qualidade e no ritmo de produção, conforme BLUM *et al.* (1988). Além disso, segundo DINIZ & PIGARI (1995), com o emprego de ferramentas de corte de alto custo, sua utilização otimizada

torna-se imprescindível; entretanto, vem-se utilizando, em processos convencionais de usinagem, métodos estatísticos para trocas de ferramentas, que são ineficientes por não garantir a utilização total de sua vida.

Todos esses fatores, entre outros, contribuem para o surgimento de diversos métodos para o monitoramento de condições de ferramentas de corte, podendo estes ser divididos em, segundo BLUM *et al.*, (1988):

- Métodos Diretos (*off-line*): medição direta do desgaste ou detecção da quebra da ferramenta, após a interrupção da usinagem.
- Métodos Indiretos (*on-line*): medição indireta do desgaste ou detecção da quebra da ferramenta, através de sinais que possuem correlações com o processo de corte. Portanto, a medição é realizada durante a usinagem.

Segundo DU *et al.* (1995), as tarefas do monitoramento, conforme esquematizado na Figura 2.16, são principalmente compostas por três partes: aquisição do sinal, processamento do sinal e monitoramento/tomada de decisão.

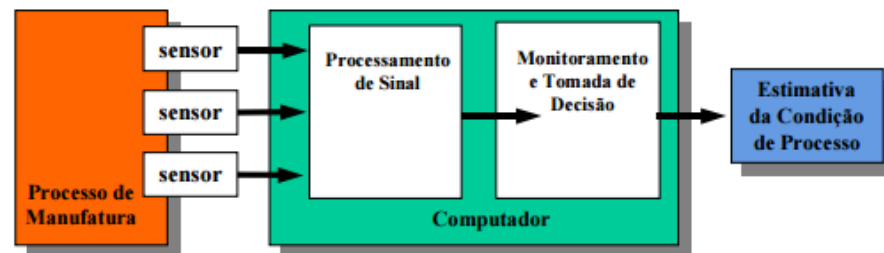


Figura 2.16- Monitoramento de Processos de Manufatura (DU *et al.*, 1995)-adaptado.

Os sensores são os elementos chaves de muitos sistemas de monitoramento de processos e ferramentas. Muitos têm sido inventados e aplicados em laboratórios, mas somente poucos vêm sendo usados comercialmente (JEMIELNIAK, 1999). Segundo DU *et al.* (1995), processamento do sinal e monitoramento/tomada de decisão podem ser chamados de estratégia de monitoramento.

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

2.4.1 Monitoramento do processo de retificação

SAMHOURI; SURGENOR (2005) afirmam que o monitoramento do processo de retificação serve para detectar problemas, fornecer informações para o aprimoramento e controle do processo e, por último, contribuir para o estabelecimento de parâmetros que são necessários para determinar as melhores condições de funcionamento. Além disso, os avanços tecnológicos na produção de materiais cerâmicos tornaram possível aplicar técnicas que foram anteriormente utilizados com metais.

De acordo com AGARWAL *et al.*, (2010), a análise direta da superfície da peça exige que o funcionamento da máquina seja interrompido, e a extração da ferramenta e peça visualmente inspecionadas, o que resulta em tempo de interrupção, custos e intervenção do utilizador operador. Métodos indiretos de análise, no entanto, permitem um monitoramento sem desligar a máquina e interromper o processo. Os métodos indiretos dependem da relação entre as condições de ferramentas e sinais mensuráveis de sensores (tais como forças, energia, vibração e emissão acústica) para detecção de condições da ferramenta e têm sido extensivamente estudados (ZHOU *et al.*, 2011).

O controle do processo de retificação é vital para aumentar o desempenho da ferramenta em termos de acabamento, tolerâncias requeridas e ciclo de operações (LIANG *et al.*, 1994). Tendo em vista uma efetiva redução de custos, juntamente com o aumento da qualidade das peças produzidas, a aplicação de sistemas mais inteligentes em ambientes industriais e, portanto, o controle dos danos causados no processo é crucial e de interesse direto de todos os setores dependentes desse processo.

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

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

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

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

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

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

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

Para captar as informações das grandezas durante o processo são utilizados sensores. Sensores são dispositivos que mudam seu comportamento sob a ação de uma grandeza física, podendo fornecer diretamente ou indiretamente um sinal que indica esta grandeza. Quando operam diretamente, convertendo uma forma de energia em outra, são chamados transdutores. Os sensores de operação indireta alteram suas propriedades, como a resistência, a capacitância ou a indutância, sob ação de uma grandeza física, de forma proporcional (JEMIELNIAK, 1999).

Vários tipos de sensores estão disponíveis para o monitoramento de fenômenos de usinagem. Os principais utilizados no monitoramento de processos de retificação são de força, potência, emissão acústica, temperatura e posição (TETI *et al.*, 2010).

2.4.1.1 Monitoramento da vibração na retificação

É trabalhoso detectar as variações de frequência dos parâmetros da retificação por meio de métodos tradicionais. A remoção de material (devido ao atrito entre rebolo e a peça) emite sinais de vibrações, que podem ser monitorados na forma de onda no domínio de tempo e da frequência (ZENG; FORSSBERG, 1994). O sinal de vibração medido pode ser estudado utilizando métodos de análise no domínio do tempo, estimação espectral e se correlacionar com as condições do processo (WARREN et al., 2007; TETI et al., 2010).

O monitoramento da vibração no processo de retificação é usado principalmente para medir vibrações forçadas para identificar desbalanceamento ou fontes externas de vibração, e encontrar uma correlação com as condições do processo por meio do monitoramento indireto por acelerômetro, estudando, dessa forma, o sinal de vibração (TONSHOFF et al., 2002). A vibração forçada é facilmente detectada, pois sua frequência pode ser mensurada e comparada com os elementos rotativos da própria máquina ou de equipamentos adjacentes a esta. A Figura 2.17 mostra as etapas de medição da vibração para extrair seu sinal.

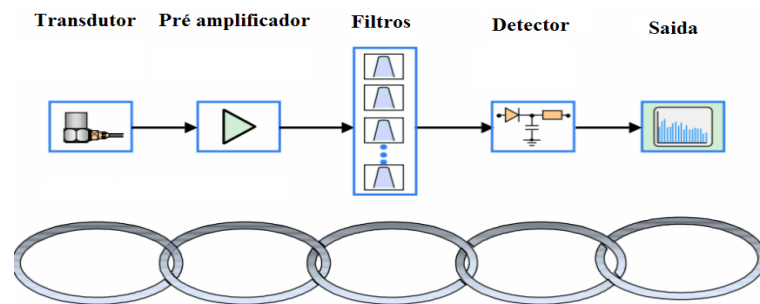


Figura 2.17- Cadeia de medição da vibração (KJÆR, 1998)

Já a vibração autoexcitada possui frequências mais altas, próximas da frequência de ressonância da máquina e sua importância no processo de retificação é maior uma vez que a sua origem é mais difícil de ser determinada, isso ocorre, devido à vibrações que ocorrem por conta do atrito do rebolo com a peça, desse modo, a grande maioria das vibrações são do próprio processo em funcionamento. No entanto, para saber exatamente o efeito dessa vibração é necessário um estudo mais detalhado aplicando ferramentas computacionais no sinal de vibração captado nesse processo.

Pesquisas foram realizadas com o intuito de utilizar os sinais provenientes da retificação para o monitoramento e/ou diagnóstico do processo. Hassui *et al.* (1998) utilizou o sinal de vibração para a avaliação do processo de retificação. O sinal de vibração do processo foi

utilizado com sucesso na determinação indireta do melhor momento para a dressagem do reboło. Foi verificado ainda que a vibração seja capaz de indicar com clareza as três fases da retificação cilíndrica externa de mergulho: deformação elástica inicial, remoção de material e *spark-out*.

Pesquisas foram realizadas para correlacionar os sinais de vibração com características do processo de usinagem. DAVID; WARNECKC (1996) relacionaram o sinal de vibração com as forças dinâmicas da retificação. A pesquisa mostrou que estas forças fazem o sistema (máquina-reboło-peça) vibrar e que é possível captar o aumento de amplitude da vibração em algumas frequências à medida que o reboło perde a afiação. Os autores concluíram que vibrações irregulares de pequenas amplitudes são típicas do processo sem a ocorrência de trepidação, já quando ocorrem, as vibrações autoexcitadas são praticamente harmônicas e de altas amplitudes.

YAMAMOTO *et al.*, apud HASSUI; DINIZ (2003) monitoraram a vibração do reboło (fixando um sensor sobre o rolamento do reboło) para detectar o entupimento dos poros do reboło por cavaco. Tendo em vista este objetivo, eles utilizaram filtros digitais adaptativos e criaram um índice com base nos resultados destes filtros, chamado o índice de o padrão do sinal. Este índice mostrou ter uma boa relação com o volume de cavaco acumulado no reboło.

Os sinais de vibração podem fornecer informações variadas sobre o processo de retificação. Porém, análises mais rigorosas necessitam de processamento desse sinal para obtenção de informações correlacionando o sinal e os fenômenos sob estudo. A aquisição do sinal bruto (sem processamento ou condicionamento) de vibração do processo normalmente é feita através de um acelerômetro preso ao suporte de fixação das peças na máquina, e se pode utilizar filtros para selecionar faixas de frequências e eliminar ruídos (HASSUI; DINIZ, 2003). Contudo, esses sinais ainda são pouco usados no monitoramento de processos. Esse sinal de vibração medido pode ser estudado no domínio do tempo e no domínio da frequência com ferramentas de análise de vibração, tais como processamento digital de sinais, estatísticas de análise temporal e espectral (BILOŠOVÁ; BILOŠ, 2012).

2.4.1.2 Transdutores para o monitoramento da vibração

A medição de vibrações consiste em transformar o sinal mecânico originado pelas vibrações num sinal mensurável (BILOŠOVÁ; BILOŠ, 2012). Os transdutores são instrumentos que traduzem uma grandeza física ou energia em outro formato de análise. Para medição da vibração são utilizados transdutores que captam vibrações mecânicas e convertem em sinais

elétricos característicos da vibração do equipamento, cuja forma de onda está relacionada com o movimento mecânico. Baseando-se na conversão de um fenômeno físico, os transdutores de vibração possuem sensibilidade ao deslocamento, velocidade e aceleração (BRAND & MATHIAS, 2010; SEQUEIRA, 2005).

Conforme BILOŠOVÁ; BILOŠ, (2012), transdutores de velocidade operam com o princípio de indução eletromagnética: quando uma bobina se move num campo magnético, a tensão é gerada nos terminais da bobina. Esta tensão induzida é causada por transferência de energia do campo magnético para a bobina. A quantidade da tensão induzida é diretamente proporcional à velocidade entre a bobina e o campo magnético. A faixa de frequência do transdutor de velocidade é determinada em função de parâmetros mecânicos envolvidos. A rigidez da mola, materiais de amortecimento e o peso da bobina determinam a resposta do transdutor de velocidade em baixas frequências. Normalmente, a frequência ressonante do sensor está abaixo de 10 Hz e a faixa de frequência utilizável é de 10 a 1000 Hz.

Os sensores de deslocamento são sensíveis a um movimento relativo, por exemplo, a distância entre o sensor fixo em um mancal e um eixo vibrando. O princípio de operação pode ser baseado na eletrodinâmica ou na variação da capacitância, e são constituídos por uma bobina imersa num campo magnético e ancorada através de suportes de baixa resiliência. Dentre os vários tipos de sensores de deslocamento podem-se citar os conhecidos “sensores sem contato” que são utilizados, na maioria dos casos, em mancais de deslizamento de máquinas, cujos rotores atuam em altas velocidades e possuem pequena massa relativa, contra uma carcaça de massa considerável (SEQUERIA, 2005; VIEIRA, 2011).

Além do deslocamento e velocidade também é utilizado o acelerômetro para medir vibração. De acordo com BILOŠOVÁ; BILOŠ, (2012), o acelerômetro é um dos sensores de vibração mais utilizados, particularmente para medir partes estacionárias do equipamento. Seu princípio de funcionamento se baseia na deformação de uma placa piezométrica de material cerâmico, resultando em uma carga elétrica, de magnitude diretamente proporcional à deformação. A Figura 2.18 mostra o esquema de funcionamento do acelerômetro.

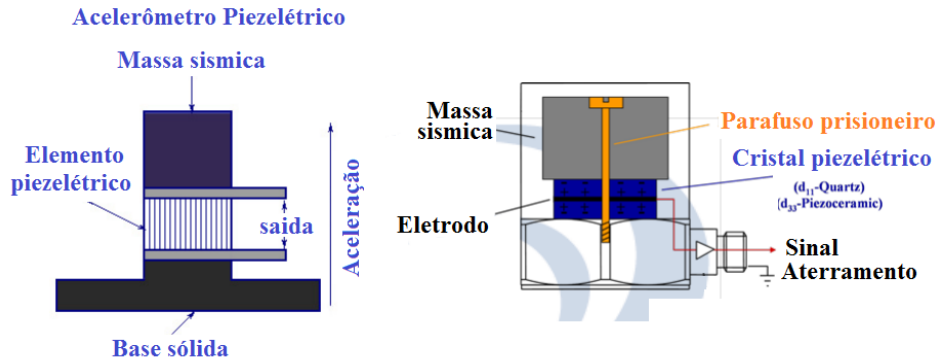


Figura 2.18-Acelerômetro piezométrico. (Instrumentationtoday.com- acesso: novembro/2015)- adaptado.

São compostos por uma massa sísmica fixada sobre um cristal de quartzo ou de material piezométrico cerâmico sintetizado que, por sua vez, é fixado à base do sensor. A sua resposta é proporcional à aceleração e, portanto, devido a sua grande faixa de frequência podem ser empregados para medir vibração senoidal, randômica ou transitória.

Devido ao fato de que os acelerômetros não contêm partes móveis, eles não necessitam de verificação de calibração frequente, podem ser utilizados numa vasta gama de frequências (de 0,1 Hz a 30 kHz). Acelerômetros piezométricos são adequados para medir com precisão a maioria dos tipos de vibração. São ideais para monitoramento de máquinas de vibração e são recomendados para quase todas as aplicações de vibração industrial em máquinas rotativas. São geralmente duráveis, protegidos contra contaminação, impermeáveis às influências de ruídos estranhos, e são fáceis de implementar. A Figura 2.19 mostra a resposta em frequência do acelerômetro.

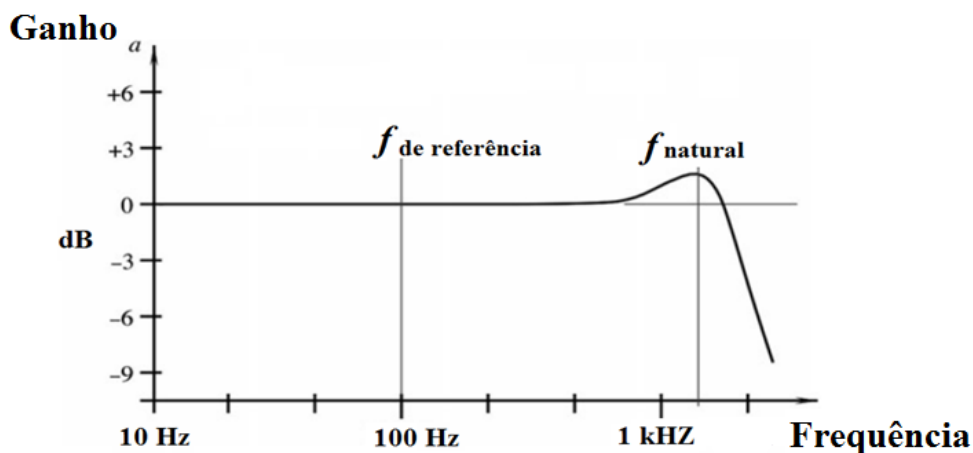


Figura 2.19- Resposta em frequência do acelerômetro piezométrico

Um acelerômetro corretamente projetado, instalado e calibrado deve ter uma ressonância claramente identificável, (frequência natural) e uma resposta de frequência plana, onde a mais precisa edição pode ser feita. Dentro desta região plana, como mudanças de frequência, a saída do sensor de vibração vaicorrectamente refletir a alteração sem multiplicar o sinal por quaisquer variações na característica em frequência do acelerómetro. O amortecimento viscoso é utilizado em muitos acelerómetros para melhorar ofaixa de frequência útil por efeitos da ressonância limitante. Como um amortecimento médio, o óleo de silicone é utilizado com bastante frequência (ZENG; FORSSBERG, 1994; KJÆR, 1998; TETI *et al.*, 2010).

2.4.1.3 Monitoramento da potência e força de corte

O consumo da potência de corte e as forças de retificação são parâmetros característicos da transferência de energia na área de contato (BRINKSMEIER *et al.*, 1998). De acordo com KWAK; HA (2004), a potência de corte tem sido usada como uma forma de monitoramento do processo de retificação. Segundo CHEN *et al.* (2008), os efeitos das condições de retificação, tais como, força e a potência de corte estão relacionados com a espessura do cavaço. Observou-se também que a força e a potência de corte estão relacionadas com a operação de dressagem e com a densidade efetiva das arestas de corte na superfície do rebolo.

A potência de corte é proporcional à taxa de remoção de material no processo de retificação (MALKIN; RITTER, 1989), e é obtido através da medida da corrente elétrica e da tensão do motor responsável pelo movimento do rebolo. Esté método é robusto e de fácil utilização, mas é limitado pela lentidão em seu tempo de resposta (BYRNE, 1995). A potência de corte obtida consiste na soma da potência estática e dinâmica. Normalmente, a potência estática mantém a magnitude do sinal constante com pequenas variações, mas algumas vezes, quando ocorre uma falha, seu nível se modifica. Nos fenômenos de “*Chatter*” (vibração auto-excitada) e da queima da peça, a potência dinâmica e estática têm a sua magnitude alterada significativamente em relação aos valores obtidos na da estabilidade, mencionada inicialmente. Dessa forma é possível detectar os diferentes estados do processo de retificação através do monitoramento dos sinais de potência (KWAK; HA, 2004).

Dentre os parâmetros relacionados com a usinagem, a importância do monitoramento das forças de corte em usinagem é bem reconhecida em toda a comunidade científica e no meio industrial. A força de corte é o indicador mais importante do estado e da qualidade da usinagem (JEONG, 2002). Em particular, a informação da força de corte on-line e em tempo-real é muito útil para predizer o desgaste da ferramenta, detectar quebras, e outros danos.

Muitas empresas desenvolvem diversos dispositivos para medir a força de corte em torneamento, retificação, fresamento, entre outros (XIU *et al.*, 2005).

Segundo DREW *et al.* (2001), os sensores de corrente do motor constituem o método mais adequado, dentre os sensores utilizados no processo de corte, em termos de desgaste da ferramenta, levando-se em conta os custos. A maior vantagem do uso de medidas das variáveis do motor, como corrente e potência, para detectar defeitos no processo de corte é que os instrumentos de medida não interferem no processo de usinagem.

2.4.1.4 Monitoramento da retificação de cerâmicas avançadas

Visando buscar informações para aperfeiçoar o processo de retificação de cerâmicas em termos de tempo e custo do processo, faz-se um monitoramento do mesmo. Levando em consideração as características das cerâmicas avançadas e a importância do processo de retificação para as mesmas, conforme citado no capítulo 2 (item 2.1 e 2.2), algumas pesquisas estão relacionadas com o monitoramento da retificação de cerâmicas. AKBARI *et al.* (1996) propuseram a automação da retificação de cerâmicas por meio do monitoramento por sinais de emissão acústica (EA). Diferentes condições de usinagem foram testadas e os resultados indicaram que o sinal foi capaz de acompanhar em amplitude as mudanças e os efeitos da retificação nas peças de cerâmicas. FENG *et al.* (2009) monitoraram o desgaste de ferramenta durante a retificação de cerâmicas usando o sinal de EA e o sinal de força. Foi constatado que os sinais seguiram a tendência de desgaste da ferramenta, onde foi possível obter um controle do desgaste da ferramenta de forma indireta.

NAKAI *et al.* (2015) realizaram o monitoramento da retificação de cerâmicas utilizando sistemas de inteligência artificial fundamentados em Redes Neurais Artificiais (RNA). Foram testados vários tipos de RNA, tendo como entrada estatísticas derivadas do sinal de EA e do sinal potência. O trabalho agregou melhorias no processo, possibilitando sua automação e, otimização, verificando qual a arquitetura de RNA seria mais viável para ser aplicadas nesses processos. BIANCHI *et al.*, (2001), avaliaram o mecanismo de remoção de material e a qualidade superficial de cerâmicas avançadas durante a retificação plana. Neste trabalho os autores realizaram medições de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), medições de rugosidade e monitoraram o processo por meio de um sensor de emissão acústica (EA). Dos resultados obtidos, verificou-se que à medida que a severidade do processo aumenta juntamente aos parâmetros h_{eq} e v_w , o sinal de EA apresentava uma atividade maior, sendo capaz de acompanhar as mudanças do processo.

Trabalhos como esses serviram de base para fundamentar o presente estudo dando enfoque ao monitoramento da retificação de cerâmicas por sinais de vibração, pois sistemas inteligentes envolvem alto custo computacional em termos de implementação, o sinal de EA possui faixas de frequência acima de 20 kHz, além dos sistemas de microscopia (sistemas ópticos, confocal, MEV) também envolverem alto custo. Desse modo, o presente estudo propõe utilizar o sinal de vibração que trabalha com frequências em grande parte dos casos (para o processo de retificação), abaixo de 10 kHz, quando se utiliza acelerômetros.

2.4.2 Estudo dos sinais provenientes do monitoramento

Processamento do sinal consiste do tratamento do sinal analógico, por exemplo: amplificação, filtragem, transformações matemáticas, integração de sinais, conversão de analógico para digital, processamento do sinal digital.

Além da medição, um sistema de aquisição de dados deve garantir a confiabilidade dos dados coletados, assegurando que o desempenho das medições seja próximo aos dados em análise. Para tanto, além dos sensores e transdutores, um sistema de aquisição de dados deve possuir elementos que analisem e validem os dados coletados. Desta forma, esses sistemas devem apresentar uma arquitetura onde os elementos se comunicam e se entendam mutuamente, interagindo entre si.

Isso significa que um sinal gerado por um sensor ou transdutor pode ser analisado pelo condicionador de sinais que tem por função entregar um novo sinal, que se relaciona com o primeiro e pode ser tratado pelo conversor analógico-digital e assim sucessivamente. Pesquisadores como BERKOVITS; FANG; BIFANO; YI; DOTTO *et al.*, (2004), que utilizaram técnicas de aquisição de dados e processamento de sinais em estudos relacionados ao monitoramento do processo de retificação.

2.4.2.1 Valor Médio Quadrático (RMS)

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

puro ou bruto S pode ser expresso pela Equação (12) e (13), que apresenta as formas contínua e discreta, respectivamente (NILSSON; RIEDEL, 2003).

$$s_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t+T} s^2(t) \cdot dt} \quad (12)$$

$$s_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N s^2(i)} \quad (13)$$

Onde:

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

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

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

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

s_{RMS} : valor RMS.

2.4.2.2 Transformada Rápida de Fourier (FFT)

Quando se deseja obter uma melhor compreensão das ocorrências nos dados, utiliza-se o espectro de frequência, que fornece em muitos casos, a informação detalhada sobre a condição de sinais que não pode ser obtida no domínio tempo. O conteúdo de frequências pode ser obtido pela aplicação de métodos e ferramentas como as transformadas (KJÆR, 1998). Uma análise do espectro de vibração pode ser baseada na seleção de faixas de frequência que caracterizam a variável física que se deseja controlar ou estimar no processo (ZENG; FORSSBERG, 1994).

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

2.4.2.3 Densidade Espectral de Potência (PSD)

Por meio da Transformada de Fourier é possível obter a Densidade Espectral de Potência (PSD - *Power Spectral density*) de um sinal, que mostra justamente como a potência

do mesmo está distribuída ao longo de todas as suas componentes de frequência. A estimação espectral clássica consiste nos métodos de obtenção da estimativa da PSD sem parametrizar o espectro do sinal. O estimador da PSD por um método direto é conhecido como periodograma, tomando-se o valor esperado das Transformadas de Fourier do sinal. Contudo, os métodos de estimação da PSD clássicos, apresentam em alguns casos inconsistência na relação entre a quantidade de amostras e o resultado estimado.

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

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

2.4.2.4 Índices de danos estruturais

O processo de retificação pode causar dano às peças e, em muitos casos, esses danos não poderiam ser detectados através de métodos que utilizam sinais de excitação em baixas frequências. Um dos índices mais empregados em monitoramento de integridade estrutural é o RMSD (*Root Mean Square Deviation*) de acordo com SUN *et al.* (1995), como apresentado na Equação (17):

$$RMSD = \sum_{k=\omega_l}^{\omega_F} \sqrt{\frac{[Z_{E,D}(k) - Z_{E,H}(k)]^2}{Z_{E,H}^2(k)}} \quad (14)$$

Onde $Z_{E,D}$ e $Z_{E,H}$ representam os sinais correspondentes à estrutura danificada e íntegra, para a estrutura sem dano e com dano, medidas na frequência k que varia de ω_l a

frequência inicial) até ω_F (a frequência final), respectivamente. Outro índice estatístico bastante utilizado em SHM (*Structural Health Monitoring*) é o CCDM (*Correlation Coefficient Deviation Metric*) de acordo com MARQUI *et al.* (2008), dado pela Equação (3).

$$CCDM = 1 - \frac{\sum_{k=\omega_l}^{\omega_F} [Z_{E,H}(k) - \bar{Z}_{E,H}] [Z_{E,D}(k) - \bar{Z}_{E,D}]}{\sqrt{\sum_{k=\omega_l}^{\omega_F} [Z_{E,H}(k) - \bar{Z}_{E,H}]^2} \sqrt{\sum_{k=\omega_l}^{\omega_F} [Z_{E,D}(k) - \bar{Z}_{E,D}]^2}} \quad (15)$$

Numa etapa subsequente, métricas estatísticas são determinadas a partir dos sinais de impedância para detecção de danos estruturais.

Capítulo 3 - MATERIAL E MÉTODOS

Neste capítulo serão apresentados os procedimentos para a montagem do banco de ensaios, módulos e sensores, aquisição de dados e informações sobre as medições da rugosidade e topografia da superfície da cerâmica. Em seguida, serão descritos os procedimentos para a realização dos ensaios e o processamento digital dos sinais de vibração e corrente elétrica coletados. A metodologia utilizada consistiu na preparação do rebolo, verificação dos parâmetros de processo, execução dos ensaios e caracterização dos materiais. Os ensaios experimentais deste trabalho foram realizados no Laboratório de Usinagem por Abrasão (LUA), localizado no *campus* de Bauru da Univ. Estadual Paulista.

3.1 MONTAGEM DO BANCO DE ENSAIO

Um banco de ensaios foi projetado de acordo com a experiência do referido laboratório. Utilizou-se para os ensaios a retificadora plana, do fabricante SULMECÂNICA, modelo 1055. O Banco de ensaios seguiu a estrutura esquemática da Figura 3.1.

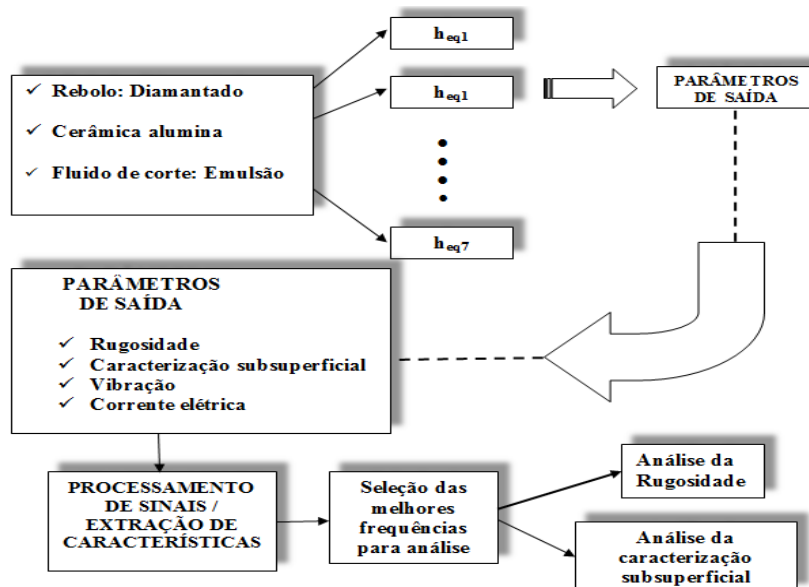


Figura 3.1- Estrutura esquemática dos ensaios, parâmetros de entrada, variáveis de saída

O banco de ensaios consistiu-se de várias etapas de acordo com a Figura 3.1, primeiramente foi definida a configuração dos ensaios de retificação, em seguida os parâmetros de saída e a extração de resultados. As seções seguintes apresentam os detalhes da montagem do

banco de ensaios, quanto ao rebolo usado, corpos de prova de cerâmica, a configuração dos ensaios de retificação e a configuração dos parâmetros de saída.

3.1.1 Corpos de prova

Os corpos-de-prova foram doados pelo Prof. Carlos Alberto Fortulan, da Escola de Engenharia de São Carlos – EESC da Universidade de São Paulo – USP. Estes foram fabricados por prensagem e sinterização resultando em barras retangulares de alumina, composta por 96% de óxido de alumínio e 4% de óxidos como o dióxido de silício, o óxido de cálcio e o óxido de magnésio.

As medidas dos corpos de prova foram definidas em função das necessidades de avaliar os danos subsuperficiais ocorridos em função da retificação, vale ressaltar que foram adotadas as dimensões também respeitando a largura do rebolo, sendo portanto a do corpo de prova inferior a esta. Assim, foi definida a geometrias de 20 x 20 x 7 mm entre comprimento, largura e altura (C x L x A).

3.1.2 Rebolo

Devido às características mecânicas dos materiais cerâmicos, foi escolhido um rebolo diamantado sintético, código SD126MN50B2, fabricado pela empresa Dinser Ferramentas Diamantadas, as especificações encontram-se na Tabela 1.

Tabela 1- Dimensões e características da ferramenta de corte

	Código/Especificação
Diâmetro	350 mm
Tipo de grão	SD (Diamante Sintético)
Diâmetro do grão	126 µm
Dureza do rebolo	MN (Dureza Média)
Concentração	50 B2
Largura do rebolo	15,5 mm
Espessura do abrasivo	7 mm

Capítulo 3 – Material e Métodos

3.1.3 Refrigeração e parâmetros dos ensaios

O fluido de corte utilizado foi emulsão água-óleo de 4% de concentração, sendo o óleo, do fabricante Shell, tipo DMS 3200 F-1. Para a medição da concentração do fluido de corte foi utilizado o refratômetro N-1E da Atago. O sistema de refrigeração possuía um transmissor de pressão e outro de vazão, permitindo o controle dessas duas variáveis ao longo dos ensaios. O bocal tinha seção retangular de 49 mm de comprimento por 3 mm de largura, vazão utilizada de 27,51 l/min e pressão de 0,2 kgf/cm².

As condições de retificação e dressagem foram configuradas de acordo com as experiências adquiridas pelo grupo de Usinagem por Abrasão. A velocidade de corte (v_s) foi ajustada pelo inversor de frequência em 33m/s e a velocidade da peça (v_w), regulada com 58 mm/s e depois com 125 mm/s para comparação. A vazão do fluido de lubrificação era de 27,51 l/min., com pressão de 0,2 kgf/cm². A Tabela 2 mostra a configuração do sistema.

Tabela 2 - Configuração dos parâmetros

Velocidade do processo		Especificações do fluido	
Velocidade de corte (v_s)	33 m/s	Tipo de fluido	Convencional, Emulsão de água e óleo.
		Vazão do fluido	27,51/min
		Resfriamento	Rocol Ultracut 370
Velocidade da peça/mesa (v_w)	58 mm/s 125 mm/s	Concentração	5 %
		Velocidade do fluido	3 m/s
		Pressão do fluido no sistema	0,2 kgf/cm ²

O dressador aplicado neste trabalho para a operação de perfilamento da ferramenta de corte foi do tipo conglomerado. O avivamento do rebolo foi realizado com uma peça de óxido de alumínio, desgastando o ligante e expondo o grão, aumentando o potencial de corte do rebolo. Antes de cada ensaio foi realizada a dressagem do rebolo diamantado com o dressador conglomerado. Devido ao baixo desgaste do rebolo diamantado, eram necessários somente oito (8) passes de dois micrometros (2 μ m) de profundidade para uniformizar a face de trabalho.

Os ensaios foram realizados em sete profundidades de corte (a). A velocidade de corte (v_s) foi mantida em 33 m/s, obtendo-se sete espessuras de corte equivalente (h_{eq}) para a velocidade da peça (v_w) de 58 mm/s, e sete h_{eq} para v_w de 125 mm/s. O cálculo do h_{eq} está computado na Tabela 3.

Tabela 3 - O cálculo da espessura de corte equivalente (h_{eq})

Ensaio	Profundidades de corte (a)	Velocidade de corte (v_s)	h_{eq}	
			$v_w = 58\text{mm/s}$	$v_w = 125\text{ mm/s}$
Ensaio 1	25 μm	33 m/s	0,0439 μm	0,0947 μm
Ensaio 2	35 μm		0,0615 μm	0,1326 μm
Ensaio 3	50 μm		0,0879 μm	0,1894 μm
Ensaio 4	105 μm		0,1845 μm	0,3977 μm
Ensaio 5	150 μm		0,2636 μm	0,5682 μm
Ensaio 6	210 μm		0,3691 μm	0,7955 μm
Ensaio 7	350 μm		0,6152 μm	1,3258 μm

A medição da vibração foi feita por um acelerômetro consistindo de um sensor fixo ao suporte da peça por meio de um parafuso. As peças foram presas ao suporte com auxílio de um mordente para não danificá-las durante o aperto por meio de parafusos. Cada um dos testes do experimento foi constituído de passadas do rebolo sobre o corpo de prova de cerâmica nas profundidades de corte definidas, sendo uma profundidade para cada corpo de prova.

3.2 MEDIÇÃO DA RUGOSIDADE E TOPOGRAFIA DAS PEÇAS APÓS A RETIFICAÇÃO

A seguir encontra-se o detalhamento das variáveis mecânicas de saídas medidas, como a rugosidade e a topografia da superfície dos corpos de prova de cerâmica após a retificação.

3.2.1 Rugosidade

Para a medição de rugosidade foi utilizado um rugosímetro digital, modelo *Surtronic 3+*, fabricado pela Taylor Robson. As medições foram realizadas em quatro pontos ao longo

Capítulo 3 – Material e Métodos

das peças, ou seja, cada uma das peças foi dividida em quatro pontos centrais equidistantes e foi adquirindo em cada ponto um valor médio de três medidas.

Para facilitar a análise os valores foram interpolados por meio um ajuste polinomial de quinta ordem entre um valor e outro de rugosidade. Os intervalos de confiança foram adicionados ao gráfico para fundamentar o estudo. Para evitar deslocamentos e mudanças das condições dos ensaios, o rugosímetro foi colocado em cima de um suporte que permitia o nivelamento da superfície retificada com o apalpador do rugosímetro. Este suporte foi alocado na base magnética da mesa retificadora. O rugosímetro digital foi configurado para medir os valores da rugosidade média (R_a) na superfície retificada do corpo-de-prova. Os parâmetros ajustados do rugosímetro para as medições estão descritos na Tabela 5.

Tabela 4 - Configuração do rugosímetro para medição de rugosidade média (R_a)

Parâmetro Medido	Rugosidade Média (R_a)
Unidade de Medida	μm
Resolução do Resultado	0,2 μm
Comprimento de contato (l_c)	0,8 mm
Altura máxima (l_n)	4,0 mm
Ganho horizontal (v_h)	x100
Ganho vertical (v_v)	x1000
↔ deslocamento para medição (Cutoff)	12,5mm
Amostragem	100 $\mu\text{m.m/in}$

3.2.2 Caracterização de possíveis danos subsuperficiais

Após a retificação, além da medição da rugosidade, todas as peças foram submetidas a ensaios microscópicos com objetivo de avaliar a integridade subsuperficial dos corpos de prova de cerâmica. Dessa forma, foi realizadas medições de microscopia confocal descrito na Figura 3.2.

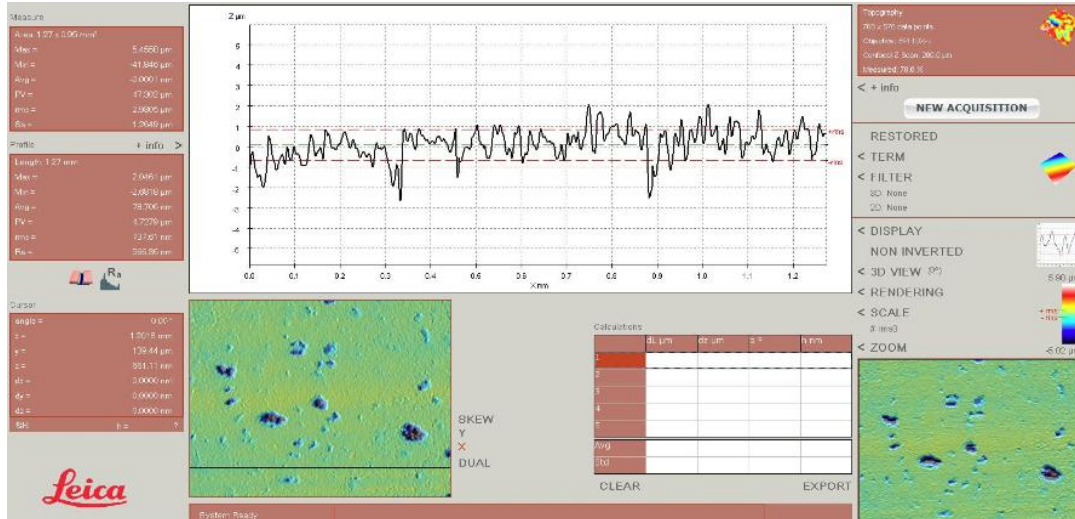


Figura 3.2 - Software de operação das medições de microscopia confocal

A análise superficial sem contato ocorreu no microscópio confocal da marca Leica, modelo DCM 3D, com aplicação de 800x, operado pelo programa Leica Scan. Esta análise visou observar possíveis trincas induzidas durante a retificação.

3.3 SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

Com o objetivo de realizar o monitoramento do experimento de retificação das cerâmicas, um sistema de aquisição de dados foi instalado juntamente ao banco de ensaios configurado. O sistema de aquisição de dados foi projetado para medir vibração através do acelerômetro e adicionalmente a corrente elétrica do motor de acionamento do rebolo, por meio de um sensor de corrente. A Figura 3.3 mostra o sistema projetado.

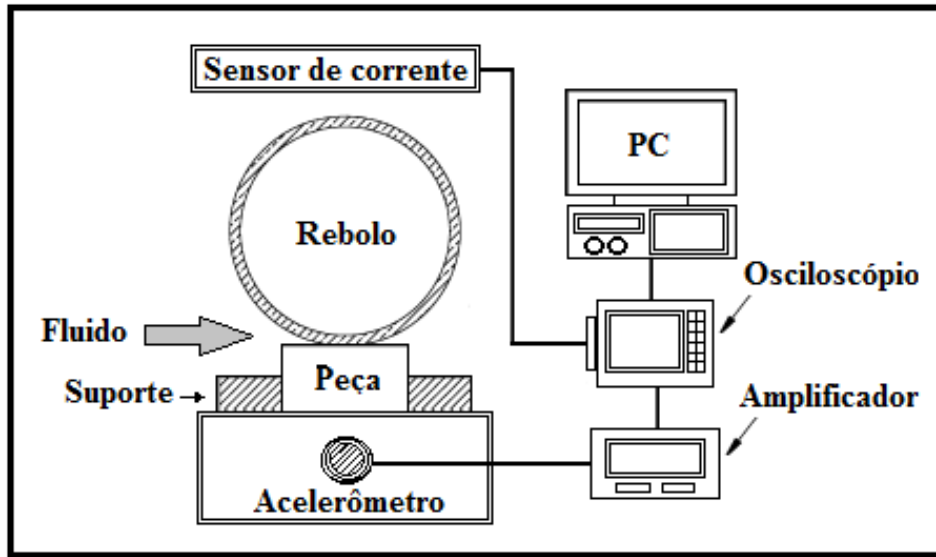


Figura 3.3- Sistema de aquisição de dados

A medição da vibração conta com um módulo que tem como função amplificar, filtrar ruídos, processar e transferir os sinais para o osciloscópio que realiza a aquisição deste sinal, assim como o sinal de corrente elétrica de acordo com a Figura 3.3. Na sequência, os sinais foram transferidos para um computador, com objetivo de processar digitalmente os mesmos.

3.3.1 Medição da vibração

O acelerômetro utilizado para medir a vibração, foi da empresa PCB Piezotronics, com um módulo amplificador com ganho utilizado de 20. Tabela 4 mostra a configuração feita no módulo para aquisição dos sinais no experimento.

Tabela 5 - Configuração do módulo de vibração

Sinal de vibração	
Sinal de saída utilizado	Puro
Ganho	20
Taxa de amostragem	2 MHz

Este sensor foi aparafusado ao suporte que fixava a peça à mesa, melhorando a aquisição das informações de vibração ocorridas durante o processo. A calibração certificada do

acelerômetro encontra-se no Anexo 1. A aquisição do sinal de vibração foi feita por um osciloscópio, modelo DL850, da empresa Yokogawa.

3.3.2 Medição da corrente elétrica

Para a medição da corrente elétrica foi utilizada uma garra amperimétrica fabricada pela tektronics, modelo A621, com faixa de frequência até 3 dB/Hz, cuja mesma foi instalada no cabo de alimentação do motor trifásico do rebolo de 380 V e 7,5 cv, modelo CFW. A medição é correspondente à potência que alimenta o motor de indução trifásico de 7,5 CV, responsável pelo acionamento do eixo árvore da retificadora. A partir da medição da corrente elétrica durante as passadas de usinagem, pode ser inferida a potência mecânica (W), bem como a força de corte (N). Como a garra amperimétrica é um sensor, transforma o que foi lido em tensão elétrica, desse modo, o sinal lido pelo osciloscópio é dado em volts, sendo assim, inicialmente os valores foram convertidos para corrente elétrica (I) em Amperes (A), utilizando o fator de calibração dada pelo fabricante da garra amperimétrica, ou seja, para 0,1 a 10 A: 100 mV/A (AC) e para 10 a 100 A: 10mV/A (AC). Como foi utilizada no experimento a escala de 0,1 a 10 A, por meio de uma regra de três foi obtido a Equação (16).

$$I = v.10 \text{ (Amperes)} \quad (16)$$

Onde:

I: corrente em Amperes

v: sinal em volts adquirido pelo

A potência foi calculada por meio de uma curva de calibração que relaciona os valores de corrente elétrica medidos com os valores de potência mecânica de acordo com os dados cedidos pelo fabricante do motor trifásico. Desso modo, foi realizada a interpolação dos dados utilizando um polinômio de quarto grau mostrado na Figura 3.4, onde *y* é a potência (W) e *x* são os valores de corrente elétrica (A).

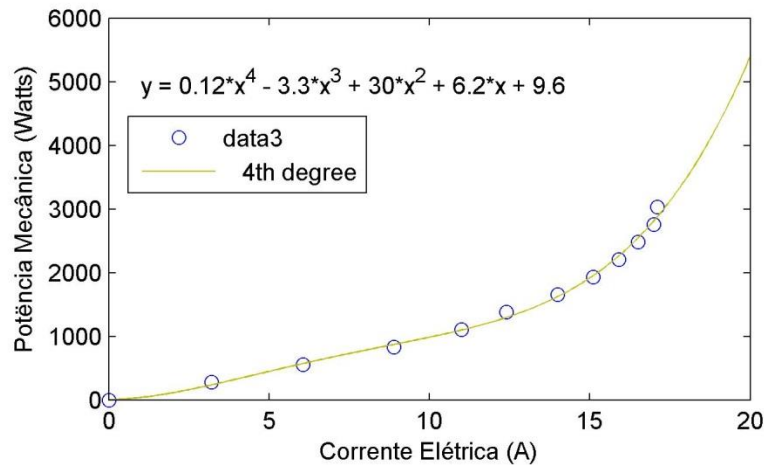


Figura 3.4- Curva de potência mecânica versus a corrente elétrica do motor de acionamento

3.4 PROCESSAMENTO DOS SINAIS DE VIBRAÇÃO E CORRENTE ELÉTRICA

Como para cada passe de retificação foram coletados os sinais de vibração e corrente elétrica, na sequência os sinais foram processados com o uso do software MATLAB, aplicando ferramentas computacionais, como filtragens, estatísticas, análise espectral e índices de danos.

3.4.1 Processamento do sinal de vibração

O processamento do sinal de vibração seguiu as etapas da Figura 3.5. Obtiveram-se 70 passadas para a $v_w = 58$ mm/s e 70 passadas para $v_w = 125$ mm/s, sendo em cada uma das velocidades 10 passadas para cada profundidade de corte. No total foram 140 passadas do sinal de vibração, no entanto foi selecionada uma passada média para cada uma das profundidades de corte, dessa forma, resultou-se em 14 passadas de vibração, sendo 7 para $v_w = 58$ mm/s e 7 para para $v_w = 125$ mm/s.

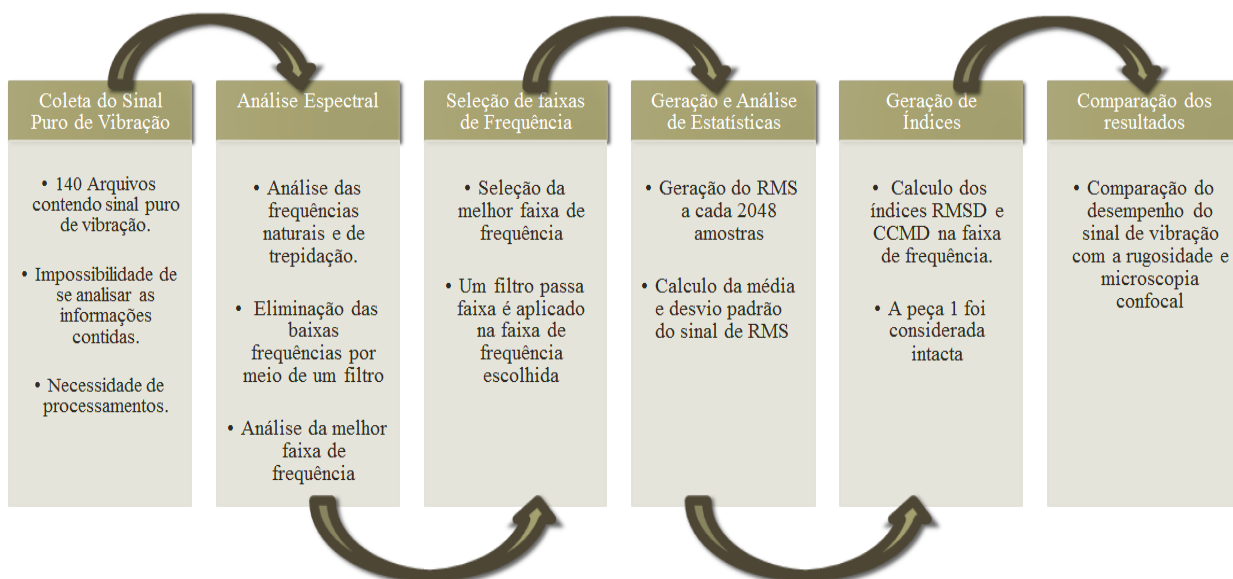


Figura 3.5 – Etapas de processamento do sinal de vibração.

Pode-se ver na Figura 3.6 o sinal puro de vibração sem qualquer processamento, no exemplo foi usado à profundidade de corte de 25 μm .

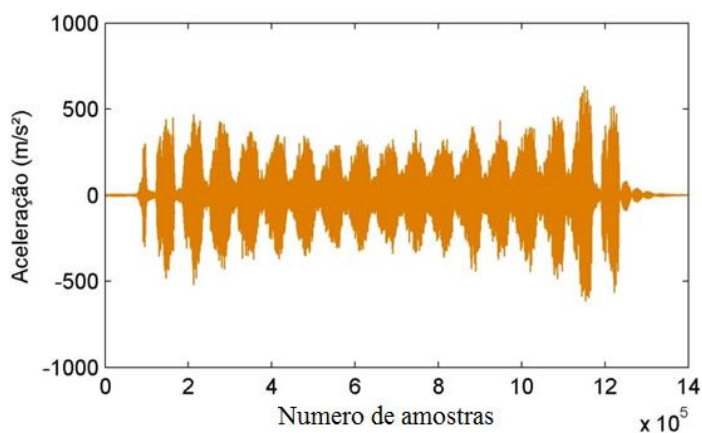


Figura 3.6- Sinal puro de vibração

Inicialmente foi encontrada no sinal de vibração a frequência natural da máquina retificadora plana. Foi estudado o sinal correspondente à primeira profundidade de corte, que naturalmente possui uma condição mais branda, o que permite detectar com mais facilidade, frequências mais baixas no sinal. O estudo detalhado é mostrado no Figura 3.7, onde pode ser observado o sinal puro de vibração com ampliação, apresentando alguns trechos de ruídos. Primeiramente foi calculada a FFT do sinal puro, ainda sem um janelamento definido, pois o objetivo é encontrar a frequência de trepidação da máquina e desconsiderá-la, pois não é o

Capítulo 3 – Material e Métodos

propósito deste trabalho estudar essas frequências. Nesta análise da FFT, foi considerado até 10 kHz em termos de frequência do sinal, o que é recomendado pelo fabricante.

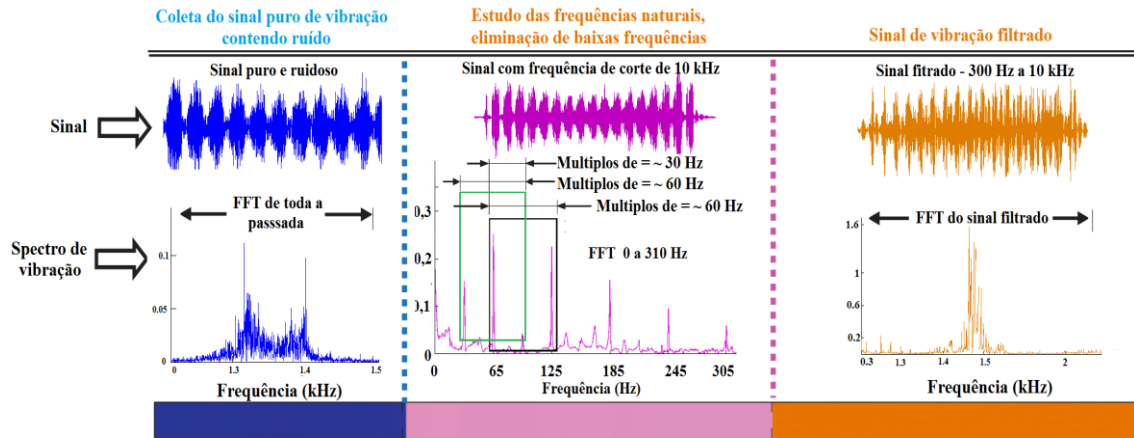


Figura 3.7- Primeira etapa do processamento do sinal de vibração

É importante ressaltar que as características dinâmicas, como a frequência natural e frequência de trepidação da máquina foram determinadas com base nos seguintes afirmações: REDDY *et al.*, (2015) usou uma análise modal para determinar as características de vibração (frequências naturais e formas de vibração) de uma estrutura ou a componente da máquina enquanto ela estiver em operação. De acordo com (REDDY *et al.*, 2015.) a análise modal para o processo de retificação mostra que a frequência aumenta a cada interação. Esta gama de frequência natural varia de 48,977 Hz a 79,968 Hz. Na pesquisa de OLIVEIRA; DORNFELD, (1994) foram realizados experimentos para observar a influência de vibrações no desgaste do rebolo. Foram aplicadas nessas experiências, deliberadamente, algumas formas de vibração.

Estas vibrações senoidais incluídas em frequências naturais, frequência de rotação do rebolo (para simular desequilíbrio) e também ruídos aleatórios. A curva de resposta de frequência foi medida e as frequências naturais de 125 Hz, 205 Hz e 300 Hz foram encontradas. Desse modo, infere-se que, as frequências naturais encontrados em retificadoras planas encontram-se abaixo de 300 Hz, com base no estudo do comportamento dinâmico.

Através de uma ampliação no gráfico da FFT entre 0 e 310 Hz, conforme mostra a Figura 3.7, foi possível encontrar picos de frequência no sinal múltiplos de aproximadamente 30 Hz e 60 Hz, que são respectivamente a frequência do rebolo (30 Hz), já que sua rotação no processo foi de 1800 RPM, e da rede elétrica (60 Hz). De acordo com literatura (OLIVEIRA; DORNFELD, 1994; REDDY, 2015) e estudos já realizados em busca

da frequência de trepidação da máquina e do processo, foi constatado que a mesma deve ser aproximadamente igual à sexta harmônica do rebolo, (6 x 30 Hz), ou seja, essa frequência deve ser, para este caso, aproximadamente 180 Hz.

Para que todas as frequências de trepidação da máquina fossem completamente desconsideradas no estudo, a frequência inicial da faixa foi de 300 Hz e a frequência final foi 10 kHz, que é respectivamente a frequência de corte estipulada pelo fabricante do acelerômetro utilizado nos ensaios. Portanto, foi aplicado nos sinais puros de vibração um filtro passa faixa do tipo *Butterworth*, de quinta ordem, com faixa de frequência de 300 Hz a 10 kHz, desse modo, foram eliminados as baixas frequências provenientes de ruídos e frequências naturais da máquina e trepidação do rebolo.

Depois que se obteve o sinal de vibração filtrado, foi realizado o estudo espectral do sinal. Para a determinação do espectro de frequência, foi empregada inicialmente a Transformada Rápida de Fourier (FFT) com janela de Hanning, considerando-se para efeito de cálculo primeiramente uma janela de 2^{15} amostras e, posteriormente, para uma melhor resolução dos sinais, uma janela de 2^{13} amostras do sinal pertencentes à passada de dressagem. Em seguida, foi calculado o PSD, pelo método Welch, por meio da função Pwelch do software MATLAB, com o mesmo janelamento da FFT, a fim de se comparar os resultados. Assim, obtiveram-se as curvas de amplitude e magnitude em função da frequência dos sinais filtrados de aceleração, para as sete profundidades de corte e ambas v_w utilizadas no experimento. O objetivo foi encontrar a melhor faixa de frequência que pode estar associada ao comportamento mecânico do processo. Foi escolhido uma faixa de frequência que apresentava o comportamento crescente das profundidades de corte, além de ser selecionado um trecho com pouca sobreposição dos sinais.

Em seguida um novo filtro digital foi aplicado no sinal puro, contudo, desta vez na de frequência selecionada. Em seguida foi obtido o valor RMS em blocos de 2048 amostras do sinal, o que equivale 1 ms. No sentido de encontrar um relacionamento entre o sinal de vibração e a integridade estrutural do corpo de prova de cerâmica usinado, foram gerados os índices de danos RMSD e CCDM, tendo como referência a primeira peça. Os gráficos obtidos bem como a discussão dos resultados são mostrados no Capítulo 4 (a partir do item 4.2).

3.4.2 Processamento dos sinais de corrente elétrica

Conforme foi mencionado anteriormente o foco deste trabalho é estudar o sinal de vibração ainda pouco usado no monitoramento do processo de retificação e muito menos na

Capítulo 3 – Material e Métodos

retificação de cerâmicas. Contudo, para fundamentar a análise, adicionalmente foi realizado um estudo dos sinais de corrente elétrica, que por meio dos quais, pode-se inferir a potência, uma grandeza muito utilizada em processos de monitoramento, reforçando esse trabalho, quando é feito a comparação com os sinais de vibração em relação ao comportamento mecânico das cerâmicas.

Assim como o sinal de vibração, a corrente elétrica do motor de acionamento do rebolo foi medida a cada passada de usinagem. A quantidade de passadas e arquivos obtidos foi a mesma do sinal de vibração, já que no experimento as medições dessas duas grandezas foram realizadas simultaneamente, e coletadas pelo osciloscópio de igual modo. O sinal de puro de corrente elétrica da primeira profundidade de corte é mostrada na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

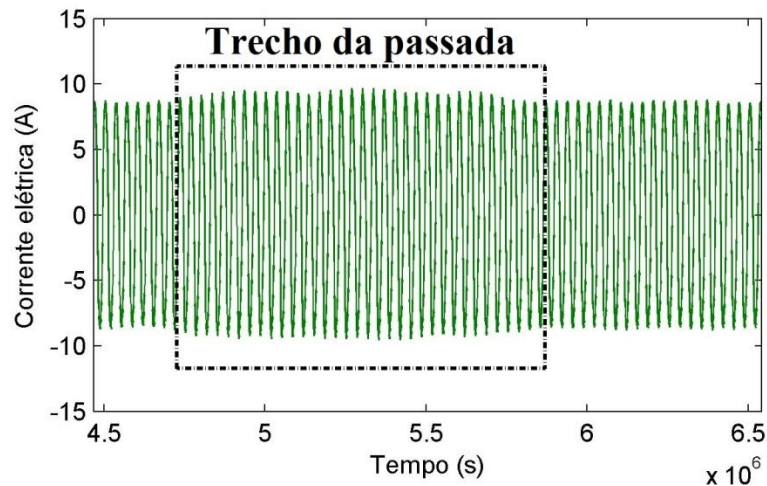


Figura 3.8- Sinal puro de corrente elétrica

Foi realizado o processamento digital do sinal de corrente elétrica de igual modo ao realizado no sinal de vibração, com exceção da aplicação de filtros digitais, desse modo, foi diretamente calculado o valor RMS do sinal puro.

CAPITULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados obtidos no experimento. Primeiramente são apresentados os resultados da caracterização dos corpos de prova de cerâmicas após a retificação por meio das medições ensaios de microscopia confocal. A análise é reforçada com os resultados de rugosidade, apresentados em seguida. Na sequência serão discutidos os resultados do desempenho do sinal de vibração durante o processo, adicionalmente discutindo o comportamento da corrente elétrica. Depois será feita uma comparação entre rugosidade e o sinal de vibração buscando uma possível correlação com o mesmo, em paralelo a isso uma possível inferência desse sinal na qualidade subsuperficial das peças analisadas por microscopia confocal. Esta última análise será reforçada pelos índices de danos RMSD e CCDM, verificando dessa forma a integridade estrutural da cerâmica por meio do sinal de vibração.

4.1 AVALIAÇÃO DA QUALIDADE SUPERFICIAL E SUBSUPERFICIAL DAS CERÂMICAS

A seguir são apresentados os resultados obtidos no experimento, quanto à caracterização das cerâmicas após a retificação. Inicialmente serão apresentados os resultados das medições de microscopia confocal e posteriormente a análise da superfície das peças por meio da rugosidade.

4.1.1 Resultados de microscopia confocal

As Tabelas 6 e 7 apresentam as imagens das medições de microscopia confocal realizado em uma região de interesse da superfície das peças de cerâmica de alumina retificadas. O objetivo deste estudo é detectar microdefeitos na superfície da alumina retificada, como rachaduras ou trincas, e correlacioná-los com o sinal de vibração. Foram geradas imagens da região central da peça, eliminando a luz fora do foco, (imagem com diferentes níveis de cores em 2D e 3D), uma imagem em tons de cinza, e o perfil médio da região central em termos de rugosidade. Por meio da imagem em tons de cinza é possível observar os efeitos da ferramenta de usinagem

Tabela 6 - Microscopia confocal para $v_w = 58$ mm/s

a (μm)	Microscopia confocal para $v_w = 58$ mm/s			
	Região central 2D	Região central 3D	Região central 2D em tons de cinza	Perfil médio da região central
25				
35				
50				
105				
150				
210				
350				

Tabela 7 - Microscopia confocal para $v_w = 125$ mm/s

a μm	Microscopia confocal para $v_w = 125$ mm/s			
	Região central 2D	Região central 3D	Região central 2D em tons de cinza	Perfil médio da região central
25				
35				
50				
105				
150				
210				
350				

Capítulo 4 – Resultados e Discussão

Mediante a análise das imagens de microscopia confocal na região central de cada peça, de acordo com as Tabelas 6 e 7, os resultados para as cerâmicas usinadas em condições de corte mais brandas não demonstraram efeitos significativos da retificação em suas superfícies, ou seja, danos que podem ser causados por consequência da usinagem, como trincas e alta rugosidade. No entanto, nas condições mais agressivas foram constatadas mudanças consideráveis nas imagens.

Desse modo, das sete profundidades de corte, foram escolhidas para discussão dos resultados três condições para cada velocidade da peça, as quais demonstram a evolução do comportamento, sendo elas 25 μm , 105 μm e 350 μm . A escolha se deu mediante a uma classificação, já realizada em vários trabalhos anteriores do grupo, como os trabalhos de (GODOY NETO *et al.*, 2014; MARTINS *et al.*, 2014). Sendo dessa forma, uma condição branda que é a de 25 μm , uma condição intermediária, essa é a de 105 μm e por fim a última condição que é a mais severa, sendo ela 350 μm .

4.1.1.1 Comparação entre v_w

As Figuras de 4.1 a 4.6 mostram o comportamento do processo em três condições comparando as duas v_w utilizadas no experimento. Cada figura possui quatro imagens, sendo cada uma delas um tipo gerado pelo software que comandou as medições de microscopia confocal. Embora as quatro imagens representem um único parâmetro, ou seja, picos, vales e adjacências nas superfícies após a retificação, a análise é muito importante, pois cada uma das imagens traz informações diferentes de uma mesma peça.

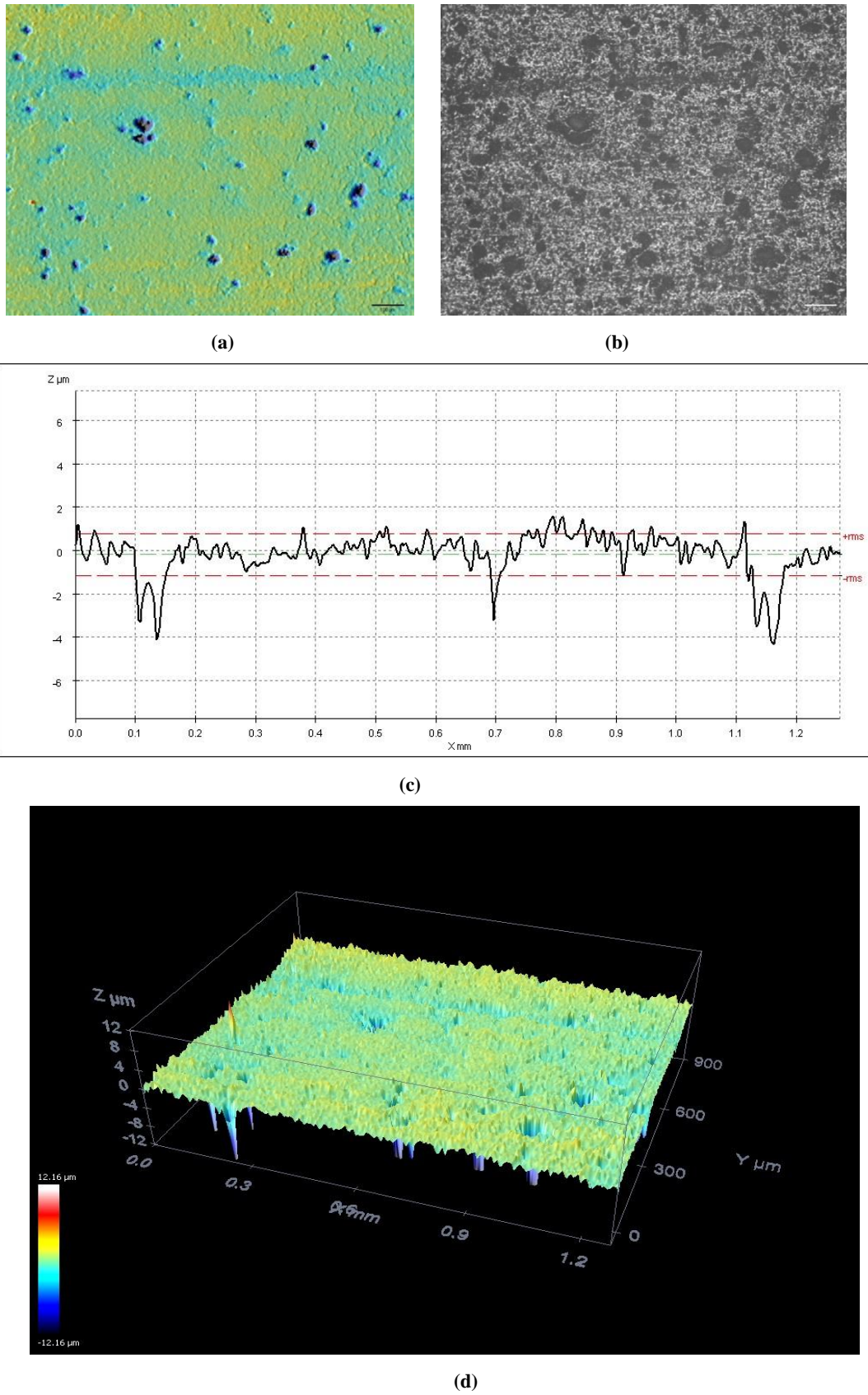


Figura 4.1 - Microscopia Confocal na profundidade $25 \mu\text{m}$ e $v_w = 58 \text{ mm/s}$

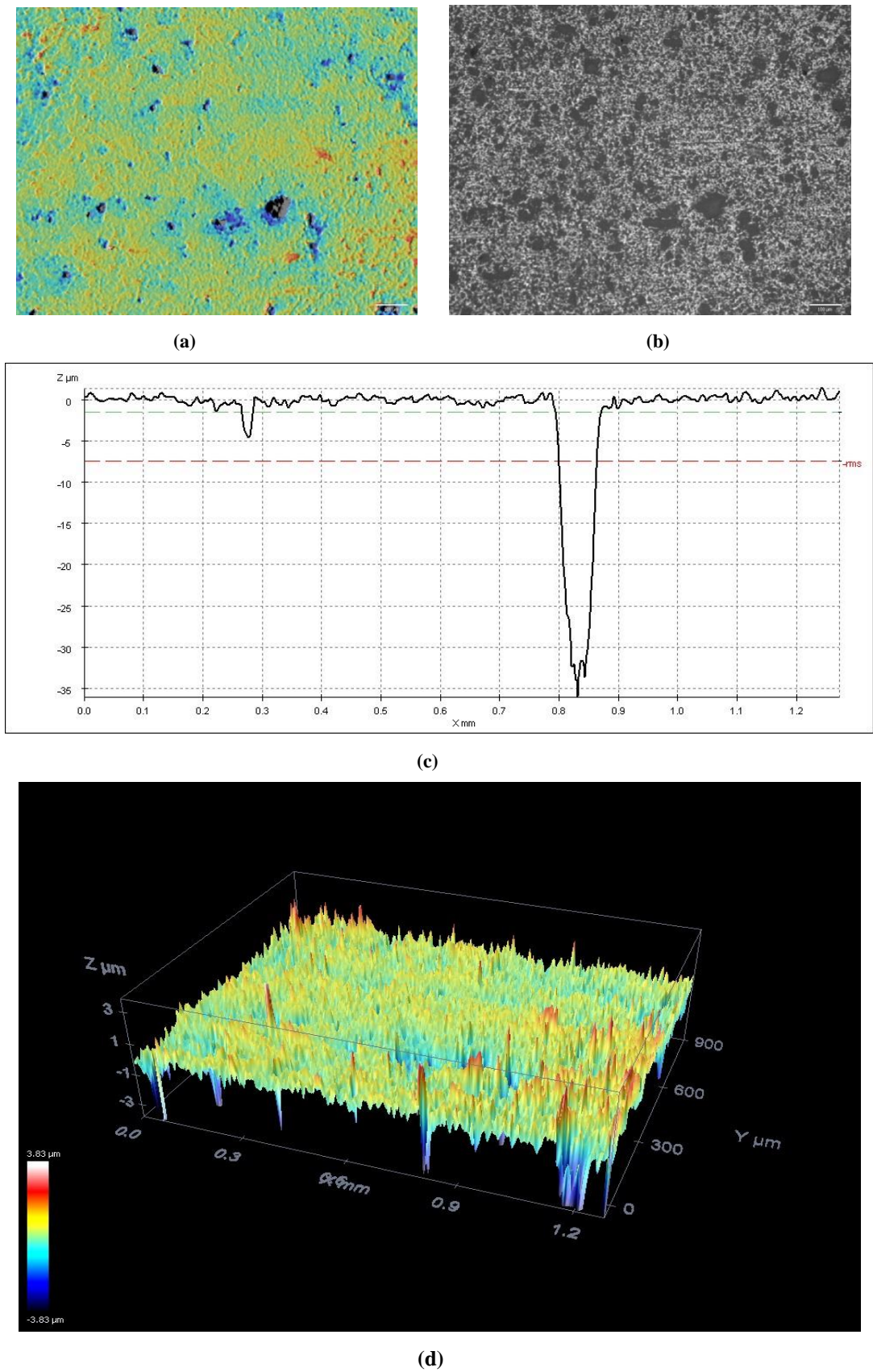
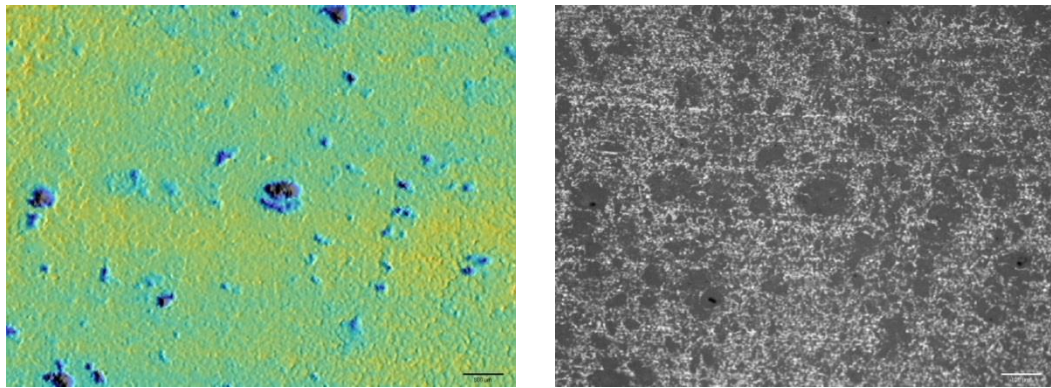
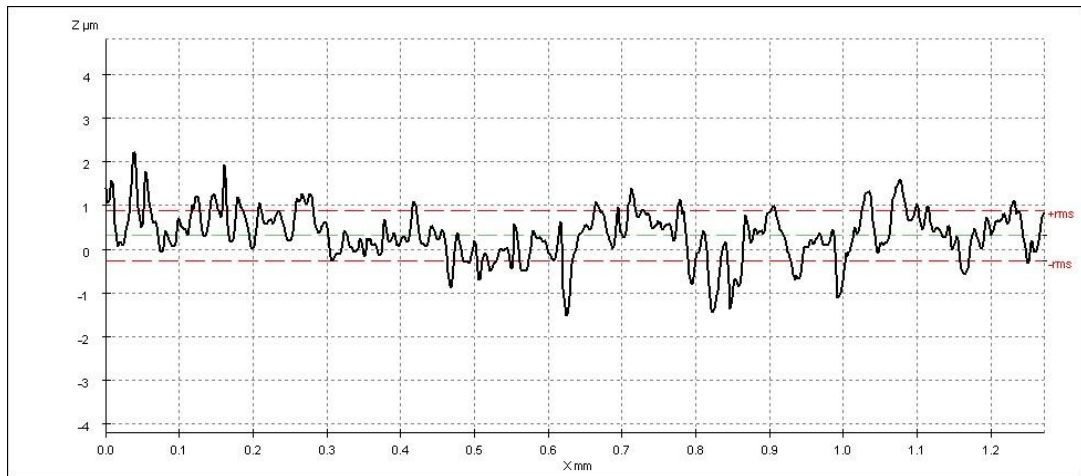
Capítulo 4 – Resultados e Discussão

Figura 4.2- Microscopia Confocal na profundidade 25 μm e $v_w = 125$ mm/s

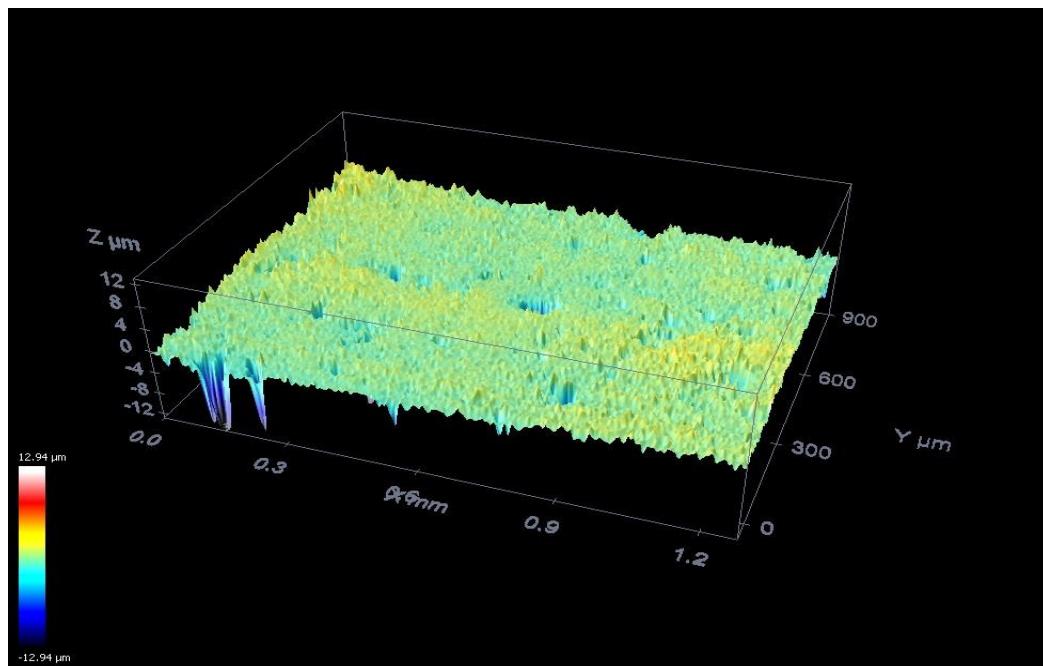


(a)

(b)



(c)



(d)

Figura 4.3- Microscopia Confocal na profundidade 105 μm e $v_w = 58 \text{ mm/s}$

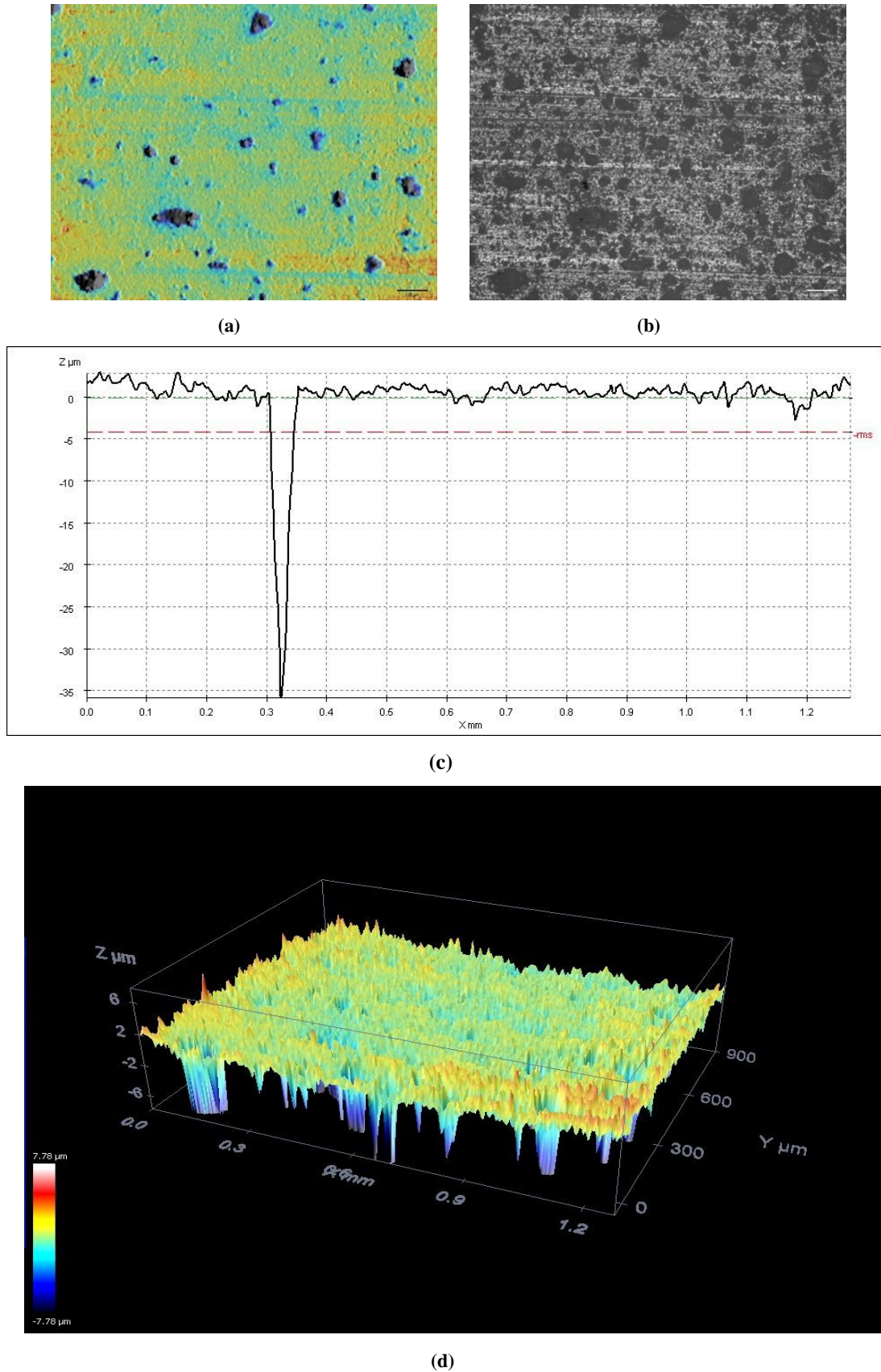
Capítulo 4 – Resultados e Discussão

Figura 4.4- Microscopia Confocal na profundidade 105 μm e $v_w = 125$ mm/s

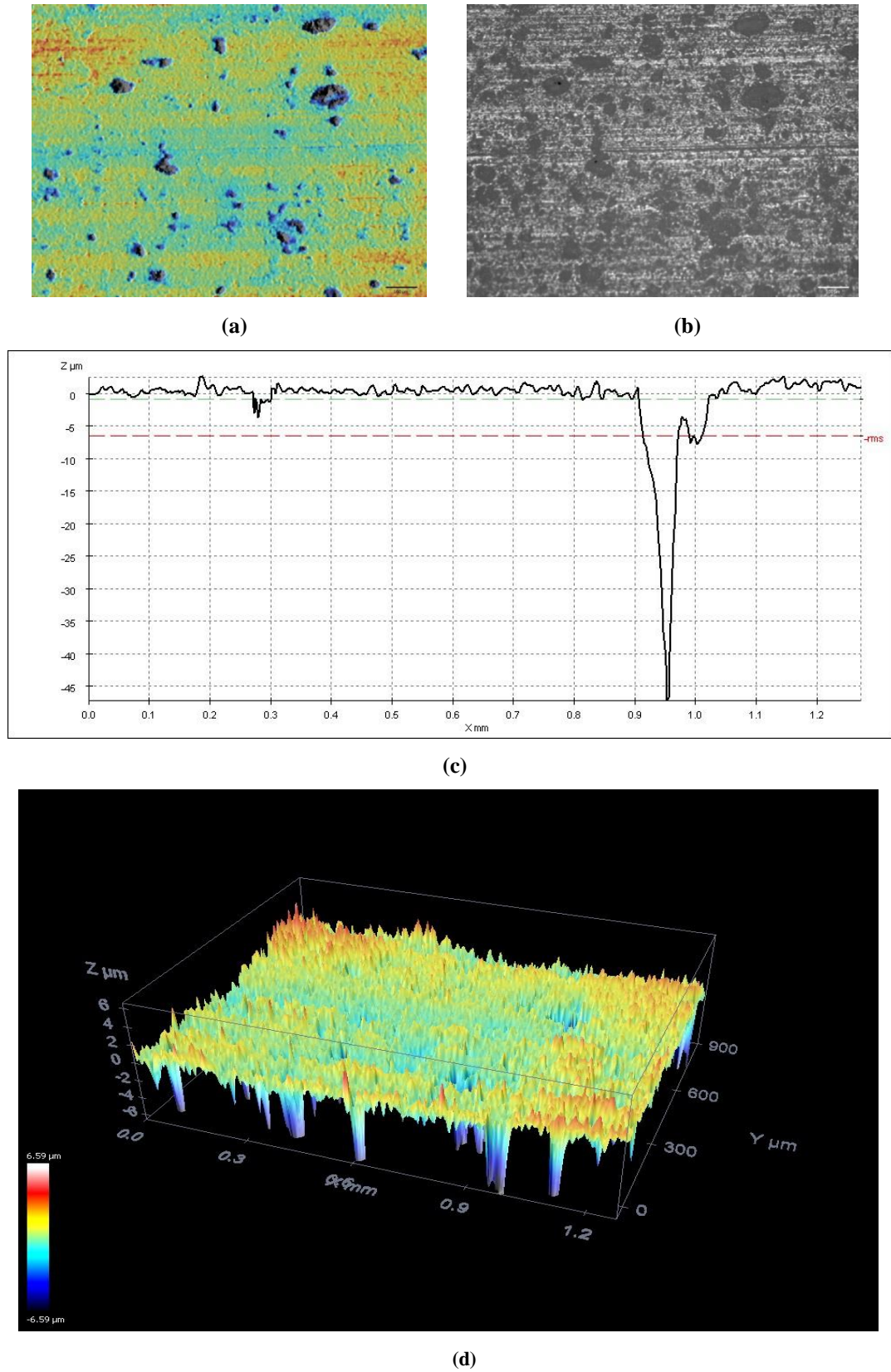


Figura 4.5- Microscopia Confocal na profundidade $350 \mu\text{m}$ e $v_w = 58 \text{ mm/s}$

Capítulo 4 – Resultados e Discussão

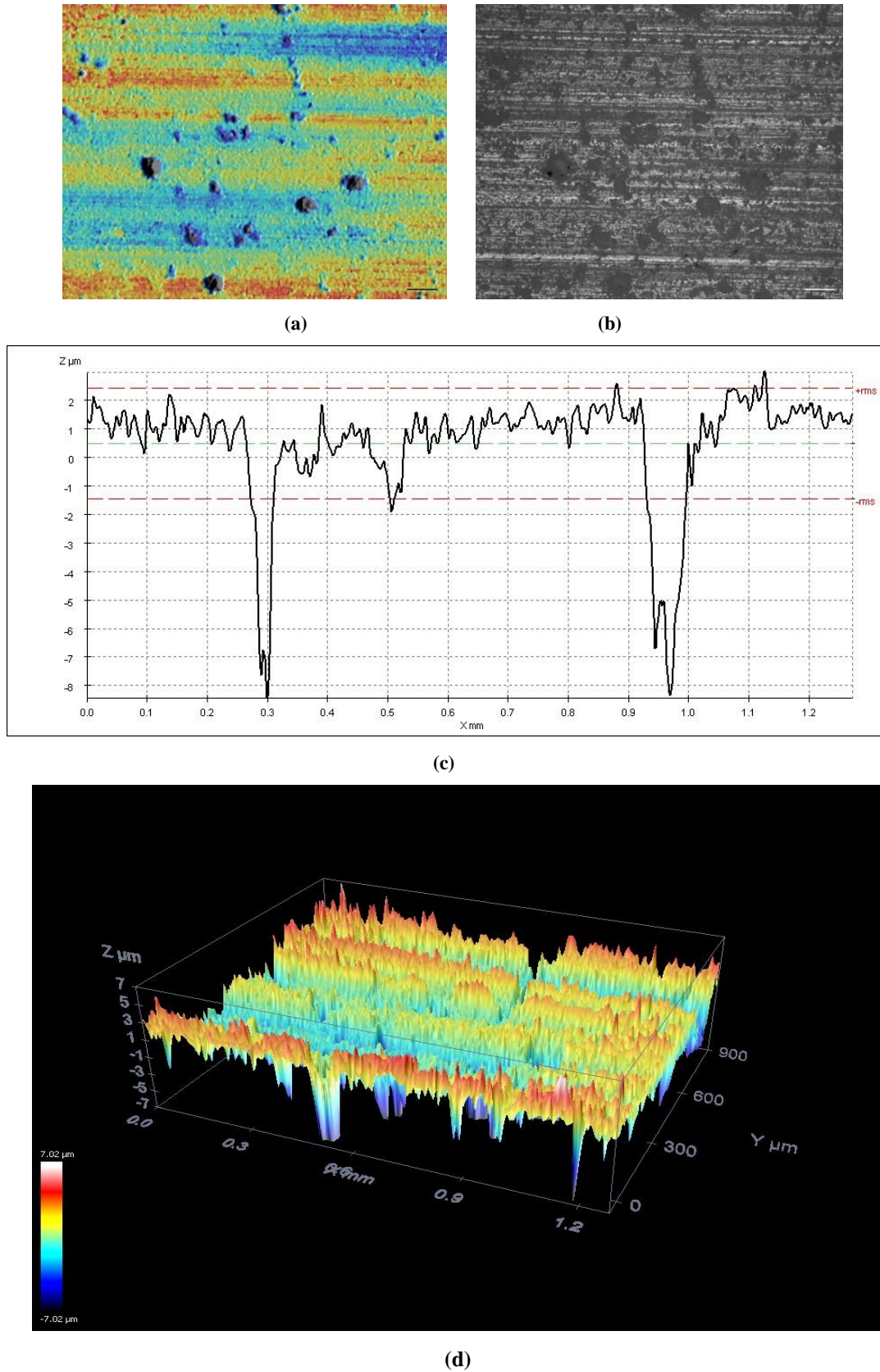


Figura 4.6 - Microscopia Confocal na profundidade 350 μm e $v_w = 125 \text{ mm/s}$

De acordo com a análise das imagens de microscopia confocal das Figuras 4.1 a 4.6, os resultados para as cerâmicas usinadas em condições de corte mais brandas não demonstraram efeitos significativos da retificação em suas superfícies, como por exemplo, nas profundidades de corte de 25 μm e 105 μm , quando foi utilizada a $v_w = 58$ mm/s (Figuras 4.1 e 4.3). Sabe-se que as propriedades mecânicas e a configuração dos parâmetros de retificação tem uma importante influência sobre a qualidade superficial das peças. Contudo, nessas condições citadas, pode-se observar que a retificação não teve uma influência tão significativa na superfície da peça. Notam-se apenas pequenos arranhões característicos do rebolo na superfície. Outras irregularidades observadas são defeitos da cerâmica, tais como a porosidade e fissuras características da sua fabricação ou composição físico-química. Não foi constatado nenhum dano óbvio decorrente da retificação na superfície.

Por outro lado, nas mesmas profundidades de corte (25 μm e 105 μm), quando foi utilizado a $v_w = 125$ mm/s, pode ser notada uma influência maior da retificação na superfície da peça em ordem crescente, ou seja, os arranhões, que são característicos das passadas de retificação, se tornam mais significativos quanto maior a profundidade, de acordo com as imagens b nas Figuras 4.2 e 4.4. Esta análise é apoiada pelo aumento da severidade do processo de retificação, isto é, uma espessura de corte equivalente (h_{eq}) maior. Ainda sim, não há evidências que algum dano de ordem maior tenha ocorrido nessas peças, uma vez que o comportamento irregular, como vales na superfície, observado no gráfico (imagem c) e na imagem em três dimensões (imagem d) das Figuras 4.2 e 4.4, é, em grande parte, proveniente do seu método de fabricação. Assim, infere-se que a retificação, de fato, contribuiu para o resultado superficial das referidas peças.

Por outro lado, notam-se efeitos muito mais significativos da retificação na superfície da peça quando a profundidade de corte de 350 μm foi utilizada. Isso pode ser visto na Figura 4.5 e, principalmente, na Figura 4.6, em que se utiliza a v_w maior (125 mm/s). Infere-se que, com o aumento da taxa de remoção do material (aumentando o parâmetro h_{eq}), há um decréscimo na qualidade superficial, aumentando o número de fissuras. Nesse caso, o aumento foi extremamente significativo de acordo com as imagens em três dimensões e o gráfico do comportamento superficial (imagem c e d), onde se observa vales com profundidades maiores quando comparados com as figuras anteriores.

Além disso, pode-se observar que a superfície da peça está muito mais arranhada, de acordo com a imagem b das Figuras 4.5 e 4.6. Vale salientar que os riscos encontrados nessa imagem (b) estão relacionados com as adjacências de vales formados, os quais podem ser vistos nas imagens a, c e d das Figuras 4.5 e 4.6, que são identificados com a legenda na ima-

Capítulo 4 – Resultados e Discussão

gem d. Adicionalmente, de acordo com MEZARI, (2013), os relevos identificados também são considerados válidos nas análises de microscopia confocal.

4.1.2 Resultados da rugosidade das peças

Visando encontrar uma possível relação com os parâmetros de retificação, foram realizadas medições de rugosidade conforme citado no capítulo 3, onde foi detalhado o material e métodos utilizados no trabalho. A Figura 4.7 mostra os valores de rugosidade médios juntamente aos desvios padrão de cada peça em ambas v_w usadas nos ensaios realizados.

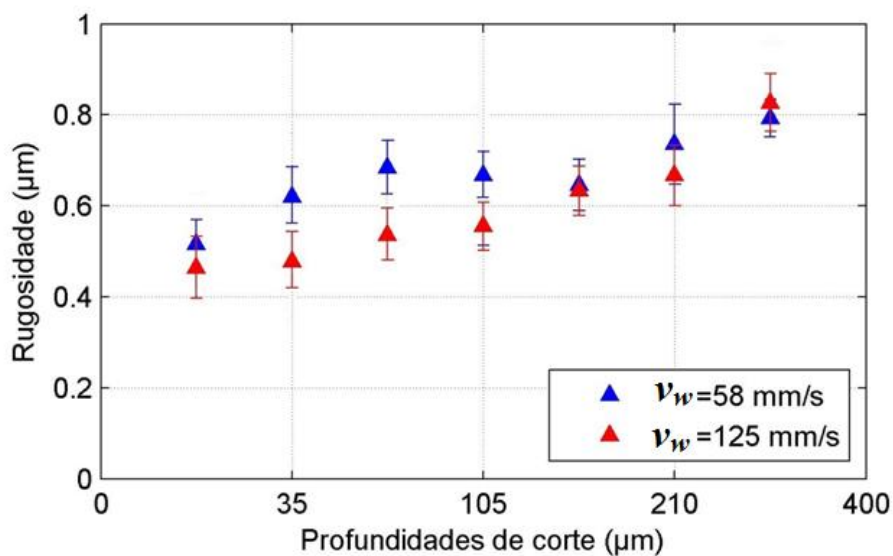


Figura 4.7. Rugosidade medida ao longo das profundidades de corte.

Como pode se observar na Figura 4.7 a rugosidade segue uma tendência de crescimento à medida que profundidade de corte aumenta. Houve um decaimento em algumas condições, como por exemplo, na profundidade de 150 µm para $v_w = 58$ mm/s. Esse fenômeno também pode ser observado na topografia da peça por meio das medições de microscopia confocal, onde a peça de 150 µm para $v_w = 58$ mm/s apresentou níveis de deterioração. A rugosidade é mais elevada para a profundidade de corte para 350 µm tanto para $v_w = 58$ mm/s como para $v_w = 125$ mm/s. Quanto maior a profundidade de corte mais elevada é a rugosidade, o que também é esperado devido a uma condição de usinagem mais agressiva.

Além disso, podem notar-se apenas alguns valores elevados valores de um desvio padrão, que geralmente são usuais para medições da rugosidade. No entanto, todos os valores de rugosidade permaneceram dentro da faixa aceitável para o processo de retificação, que deve ser no máximo 1,6 µm, de acordo com DINIZ *et al.*, (2003). Esta faixa foi estabelecida para

retificação de aços, no presente trabalho, que se trata de cerâmicas retificadas, o valor máximo de rugosidade esteve abaixo de 1 μm . Outro fenômeno que se pode observar na Figura 4.7 é que, apesar da tendência de crescimento da rugosidade diretamente proporcional a aumento da profundidade de corte, quando se usou uma v_w mais alta (125 mm/s) os valores de rugosidade foram menores, e quando uma v_w mais baixa foi usada (58 mm/s) os valores de rugosidade foram mais elevados em termos de amplitude.

Esse fenômeno confirma o que também ocorreu na pesquisa de (BIANCHI et al., 2001), onde foi avaliado o mecanismo de remoção de material e a qualidade superficial de cerâmicas avançadas durante a retificação plana. Neste trabalho, os autores realizaram medições de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), medições de rugosidade e monitoraram o processo por meio de um sensor de emissão acústica (EA). Dos resultados obtidos, verificou-se que à medida que a severidade do processo aumenta juntamente ao parâmetro h_{eq} e a v_w , o sinal de EA apresentava uma atividade maior. No entanto, assim como aqui no presente trabalho, os autores constaram que os valores de rugosidade eram menores à medida que se usava uma v_w mais rápida, ou seja, a qualidade da superfície da peça era melhor mesmo em uma condição mais agressiva. E constataram também que os valores de rugosidade eram maiores à medida que se usava uma v_w mais lenta. Esse fato ocorre devido a uma v_w mais lenta fazer com que o rebolo fique mais tempo em contato com a superfície da peça. Desse modo, a qualidade superficial da peça será inferior a aquela onde uma v_w mais rápida foi usada.

HASSUI; DINIZ, (2003) também constaram em suas pesquisas que a influência da v_w era oposta entre vibração e rugosidade em ensaios de retificação cilíndrica em corpos de prova de aço, ou seja, quando os valores de vibração eram mais elevados fora, obtidas peças ainda com boa qualidade superficial, pois os valores de rugosidade eram mais baixos do que aqueles quando os níveis de vibração eram menores. Essas informações reforçam o presente estudo, onde foi constatado que ocorreu fato semelhante, ou seja, vibração e rugosidade com influências opostas da v_w .

4.1.3 Considerações sobre a análise confocal e a rugosidade das peças

Com base nas análises da caracterização superficial dos corpos de prova de cerâmica alumina após a retificação, por meio da microscopia confocal e da rugosidade, foi possível notar que o aumento das condições de corte no processo de retificação (aumento da severidade e remoção de material) fez a deterioração na superfície da peça evoluir, assim como os valores de rugosidade aumentar. A rugosidade também apresentou uma relação com o proces-

Capítulo 4 – Resultados e Discussão

so de retificação, aumentando proporcionalmente à taxa de remoção de material. Obtiveram-se resultados satisfatórios nas análises das profundidades de corte de 25 μm e 105 μm para ambas v_w , de acordo com o comportamento da rugosidade, bem como a observação das imagens de microscopia confocal nessas condições.

Foi observada deterioração na superfície da peça e um crescimento da rugosidade quando se utilizou a profundidade de corte de 350 μm . As afirmações de BHUSHAN, (2001) e WHITEHOUSE, (2010), de que os processos abrasivos removem preferencialmente os picos, serviram de base para propor a seguinte hipótese: a mudança brusca da taxa de remoção de material fez com que os picos e relevos fossem rapidamente removidos, e a ferramenta alcançasse de fato as irregularidades negativas na superfície, causando o aprofundamento dessas. E ainda, causando também, possíveis micro-lascamentos, devido à agressividade da condição de corte. Com isso, além dos vales, naturalmente novos picos também passaram a existir.

Contudo, apesar do notório comportamento irregular na superfície da peça na profundidade de corte de 350 μm , como mostra as imagens de microscopia confocal (Figura 4.1 a 4.6), os valores de rugosidade permaneceram aceitáveis (Figura 4.7 e 4.8), ou seja, abaixo de 1,6 μm , de acordo com DINIZ *et al.*, (2003).

4.2 AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DO SINAL DE VIBRAÇÃO

A seguir serão apresentados os resultados quanto ao processamento do sinal de vibração, com objetivo de avaliar seu desempenho no experimento. Conforme foi detalhado no capítulo 3, os métodos de processamento do sinal de vibração foram realizados e serão apresentados, primeiramente, o estudo espectral do sinal, bem como a discussão desta análise. Após a avaliação espectral, uma faixa de frequência foi escolhida e foi aplicada no sinal a estatística RMS na faixa de frequência em questão. Esses resultados são apresentados na sequência.

Na figura 4.8 é apresentado o espectro da vibração para $v_w=58$ mm/s, o qual foi determinado inicialmente pela FFT, cada um dos sinais representa uma profundidade de corte. Observa-se que os sinais apresentam um pico mais significativo de amplitude, nas duas v_w , que se encontra na faixa de frequência de 800 a 2000 kHz. Este trecho caracteriza o momento da passada do rebolo sobre o corpo de prova, onde estão definidas nitidamente as sete condições que descrevem o comportamento e a tendência da vibração em todo o ensaio. Fora desta faixa, os três sinais permanecem sobrepostos, em baixas e altas frequências.

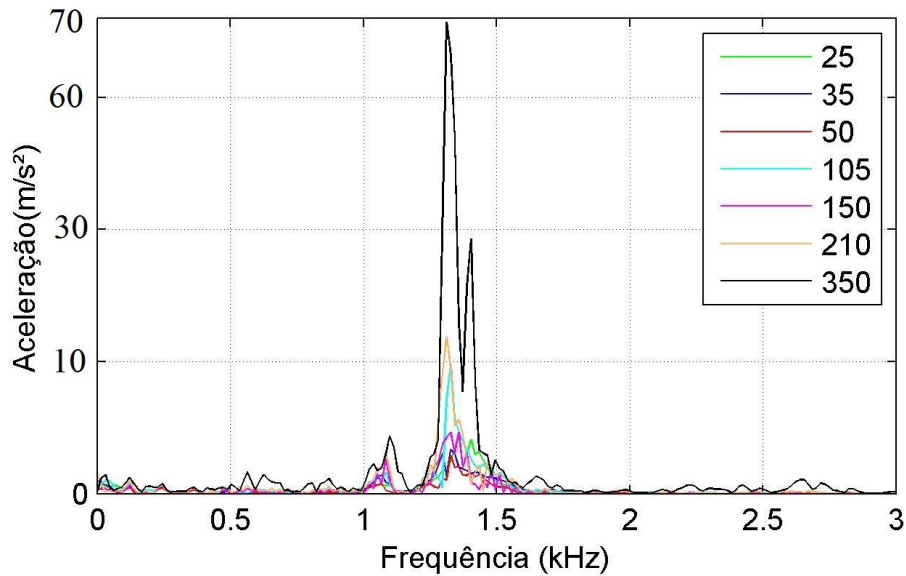


Figura 4.8 - FFT do sinal de vibração para $v_w = 58$ mm/s

O sinal pertencente à condição de 25 μm se manteve com amplitude mais baixa, apresentando um pico de vibração menor. Picos maiores ocorreram nas condições de 150 μm , 210 μm , e 350 μm , esta última, por ser a condição mais severa, apresenta um pico mais elevado em relação às outras condições, caracterizando a maior atividade de vibração. A Figura 4.9 apresenta a FFT na $v_w = 125$ mm/s.

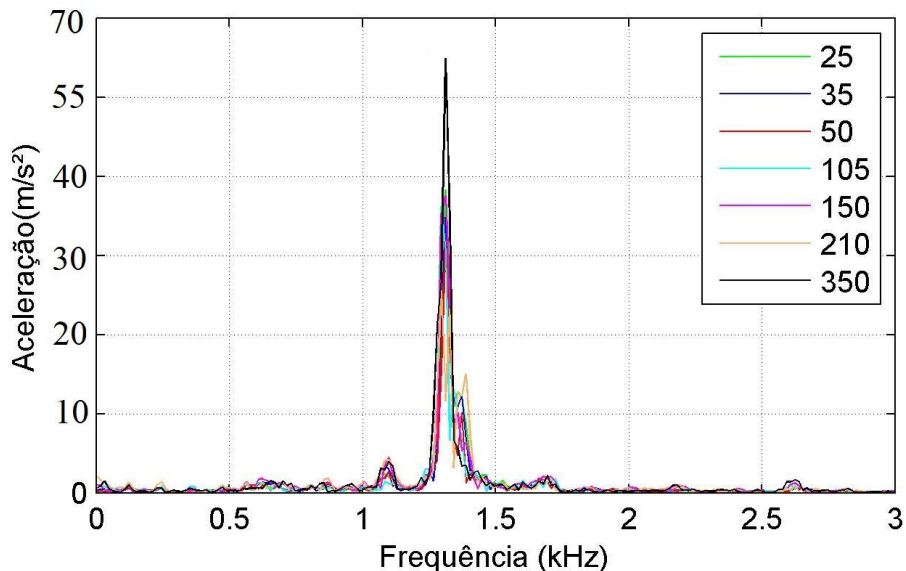


Figura 4.9 - FFT do sinal de vibração para $v_w = 125$ mm/s

Nota-se que nesta análise, para $v_w = 125$ mm/s tem amplitudes do sinal maiores que a $v_w = 58$ mm/s nos três sinais, indicando mais uma vez que na maior v_w , o sinal tem mais atividade

Capítulo 4 – Resultados e Discussão

vibracional. Os sinais apresentam um comportamento interessante para estudo no trecho de 800 Hz a 2 kHz. A Figura 4.10 apresenta o gráfico com ampliação nesta faixa de frequência.

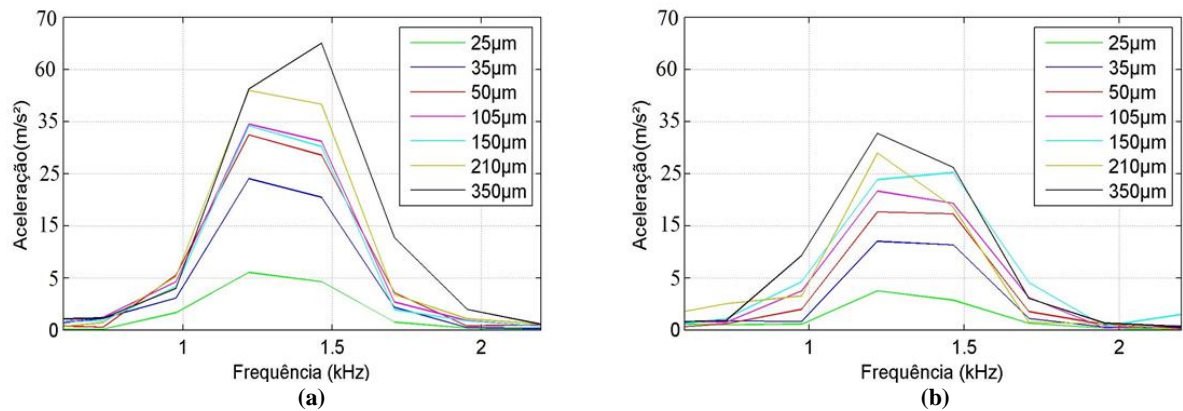


Figura 4.10- FFT do sinal de vibração com ampliação na faixa de frequência de 800 Hz a 2.3 KHz; $v_w=125$ mm/s (a); $v_w=58$ mm/s (b).

A Figura 4.11 mostra o espectro do sinal de vibração obtido pelo PSD para a $v_w=58$ mm/s, o espectro com PSD representa características diferentes para cada ensaio, de acordo com a profundidade de corte.

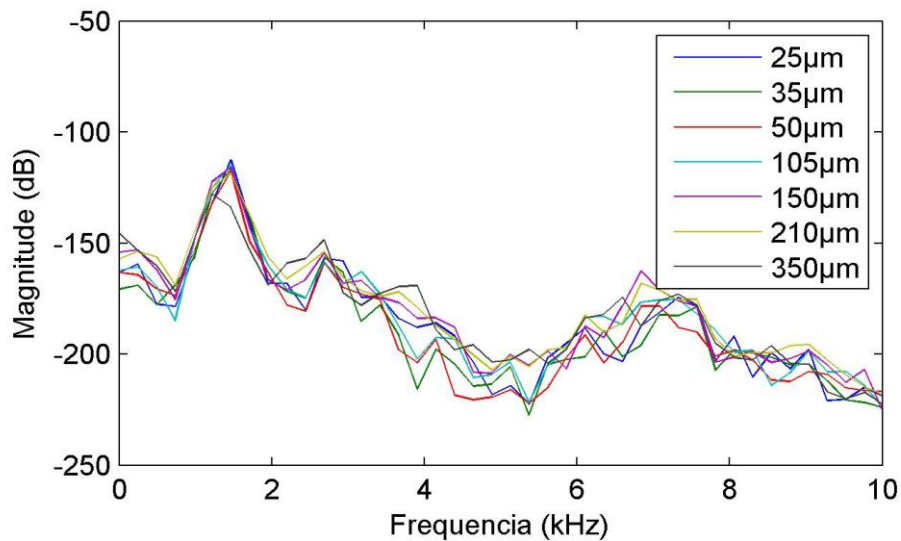


Figura 4.11- PSD do sinal de vibração $v_w=58$ mm/s

A Figura 4.12 mostra o espectro para $v_w=125$ mm/s. O sinal tem menor amplitude em 25 μm , conforme o esperado e segue uma tendência de decaimento conforme a frequência aumenta. Uma explicação para isso é que a faixa de vibração com maior atividade está abaixo de 10 kHz, de acordo com a calibração do fabricante do acelerômetro usado nesta pesquisa para medir a vibração (vide Anexo 1). É possível observar que quando a profundidade de cor-

te é superior, o nível de vibração é em geral é mais intenso para todas as bandas de frequência até 10 kHz.

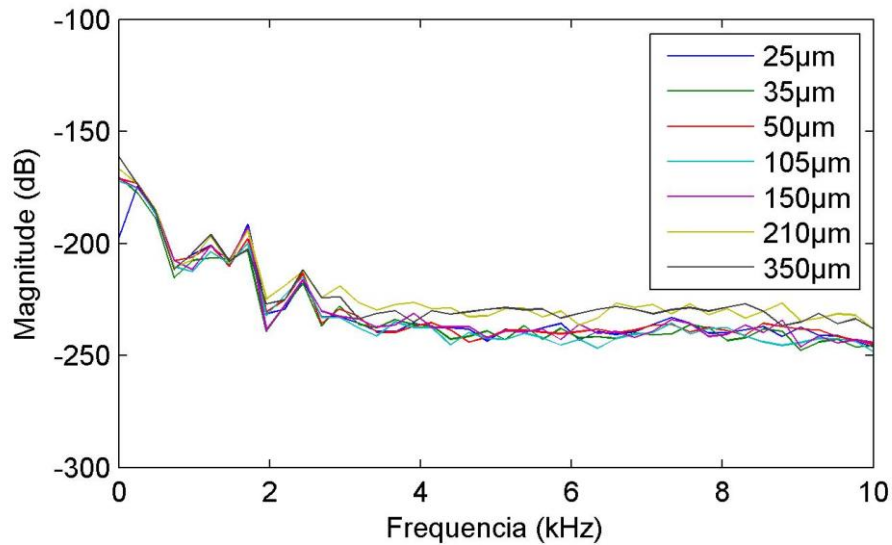


Figura 4.12- PSD do sinal de vibração $v_w=125$ mm/s

Para estudar a evolução do comportamento em frequências, foi realizado em estudo em apenas três condições de corte, sendo essas, as mesmas que foram definidas anteriormente (GODOY NETO et al., 2014), para uma condição branda, uma intermediária e a mais severa do experimento para as duas v_w . A Figura 4.13 apresenta dos gráficos espectrais por meio do PSD

Capítulo 4 – Resultados e Discussão

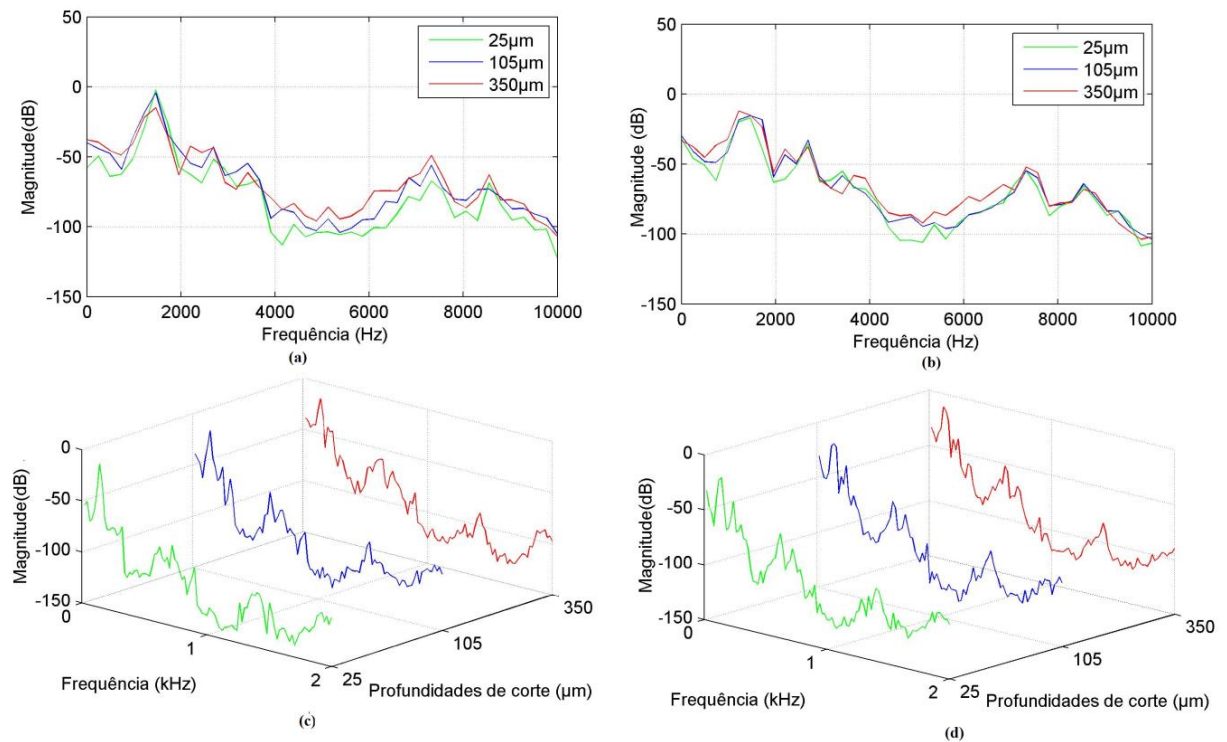


Figura 4.13- PSD do sinal de vibração em três condições. $v_w=58$ mm/s (a) a (c); $v_w=125$ mm/s (b) e (d).

Estudando os sinais em três condições é possível observar melhor o comportamento da vibração em termos de frequência durante o experimento realizado. Conforme o esperado os sinais apresentaram um comportamento crescente à medida que a profundidade de corte é maior, o que leva a crer que aumentando a severidade do processo, a vibração também aumenta. Com base no estudo espectral, foi selecionada a melhor faixa de frequência que representa as condições de corte bem definidas e sem sobreposição, de acordo com a Figura 4.14. A faixa escolhida foi de 800 Hz a 2 kHz.

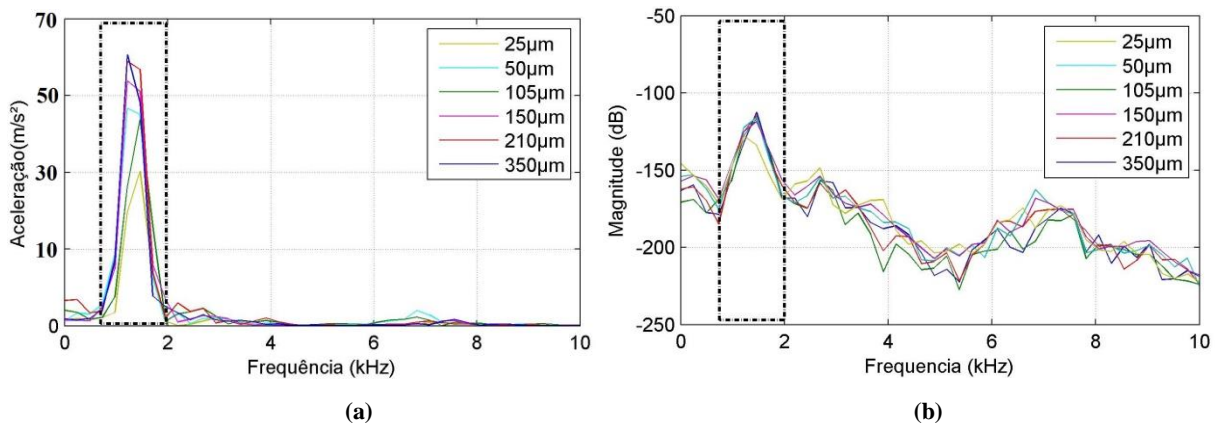


Figura 4.14- Escolha da melhor faixa de frequência, FFT (a); PSD (b)

Com a faixa de frequência escolhida, os sinais foram processados a fim de se obter características nas quais o sinal de vibração se correlaciona com a rugosidade e análise confocal dos corpos de prova de cerâmica após a retificação. Foi realizada a análise no domínio do tempo usando os métodos detalhados no capítulo 3. A partir do sinal filtrado na faixa de frequência de 800 Hz a 2 kHz, foi obtido o valor RMS para cada uma das sete profundidades de corte e para as duas v_w contendo o sinal puro de vibração. Em seguida foram calculados para cada sinal RMS a média e o desvio padrão.

4.3 COMPARAÇÃO ENTRE VIBRAÇÃO E A CARACTERIZAÇÃO DAS CERÂMICAS

Nesta seção serão apresentados os resultados obtidos entre a comparação da caracterização superficial das cerâmicas com o sinal de vibração.

4.3.1 Comparação entre vibração e rugosidade

A Figura 4.16 apresenta o comportamento vibracional ao longo de todo o ensaio, por meio da média e desvio padrão em função das profundidades de corte. Nota-se que a vibração aumenta conforme a profundidade de corte é maior, ou seja, o comportamento segue uma tendência de aumento da aceleração, diretamente relacionada com o aumento da penetração da ferramenta na peça em cada passada de usinagem.

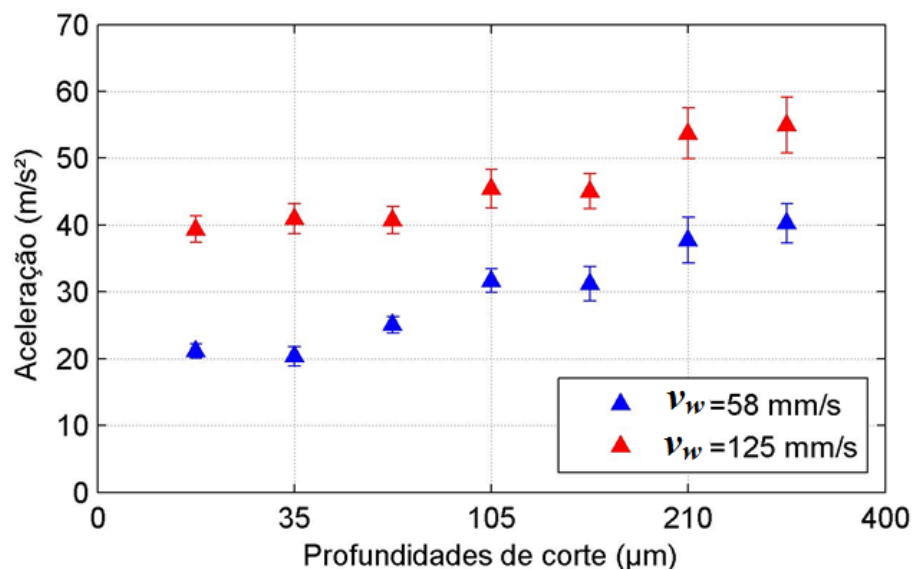


Figura 4.15- Vibração em função das profundidades de corte

Capítulo 4 – Resultados e Discussão

Os desvios padrão são relativamente baixos, praticamente em todas as condições e, por outro lado, em geral, mesmo com diferenças de amplitude entre elas e, em algumas condições com casos de não linearidade na tendência, nota-se um comportamento semelhante nas duas velocidades v_w .

Para comparar a vibração ao longo das passadas, com a qualidade superficial das peças de cerâmicas usinadas, foi plotado novamente o gráfico de rugosidade, contudo, dessa vez comparando as duas v_w . A Figura 4.17 mostra a rugosidade das peças, por meio da média e desvio padrão em cada profundidade de corte. Comparando esses valores com a aceleração, é interessante notar que as influências da v_w na aceleração e na rugosidade são opostas. Pode ser visto nesta figura que, ao contrário dos resultados de aceleração, a $v_w = 58$ mm/s apresentou maiores valores de rugosidade ao longo das profundidades de corte. Esse fenômeno confirma o que também ocorreu na pesquisa de BIANCHI *et al.*, (2001), e na pesquisa de HASSUI; DINIZ, (2003), citadas anteriormente.

Para a $v_w = 125$ mm/s, que se caracterizou com valores médios de vibração mais altos na Figura 4.18, a rugosidade teve valores médios mais baixos. Contudo, pode-se observar que os desvios padrão se sobreporam em alguns pontos do gráfico nas duas v_w , de maneira que não pode ser encontrada uma correlação entre rugosidade e vibração em cada v_w , quando se considera os intervalos de confiança.

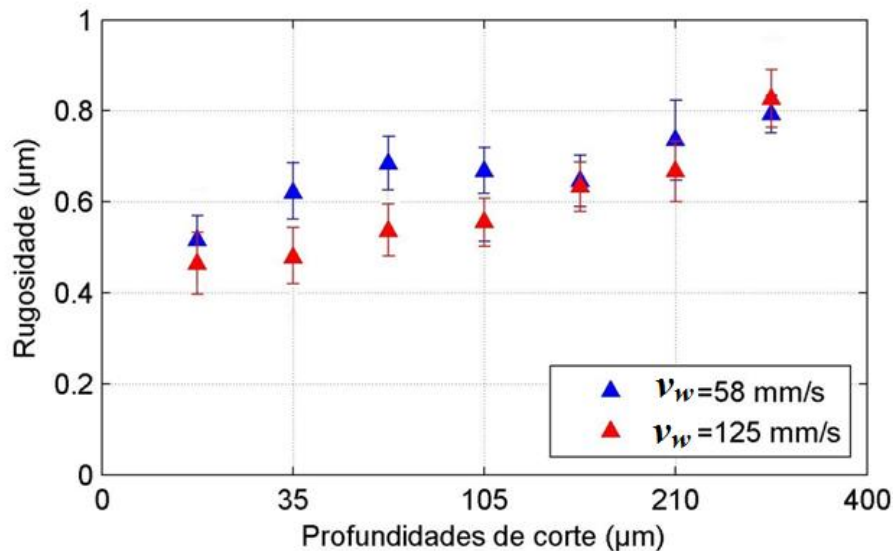


Figura 4.16- Rugosidade em função das profundidades de corte

A Figura 4.18 relaciona dois parâmetros, a qual mostra o comportamento da aceleração média em função dos valores de h_{eq} . Essa análise permite estudar o comportamento da vibração mediante a espessura de material removida do corpo de prova, em cada profundidade

de corte, pelo rebolo. Observa-se que o comportamento do sinal é diferente dos anteriores, devido o parâmetro h_{eq} apresentar uma relação mais próxima com comportamento do processo de retificação de cerâmicas (já que o h_{eq} expressa os parâmetros de usinagem utilizados simultaneamente), incluindo mais informações sobre os fenômenos que eventualmente ocorrem no processo. Nota-se que a v_w maior (marcador vermelho), gera uma condição de corte mais severa, resultando em maiores forças de corte e, conseqüentemente, maior vibração.

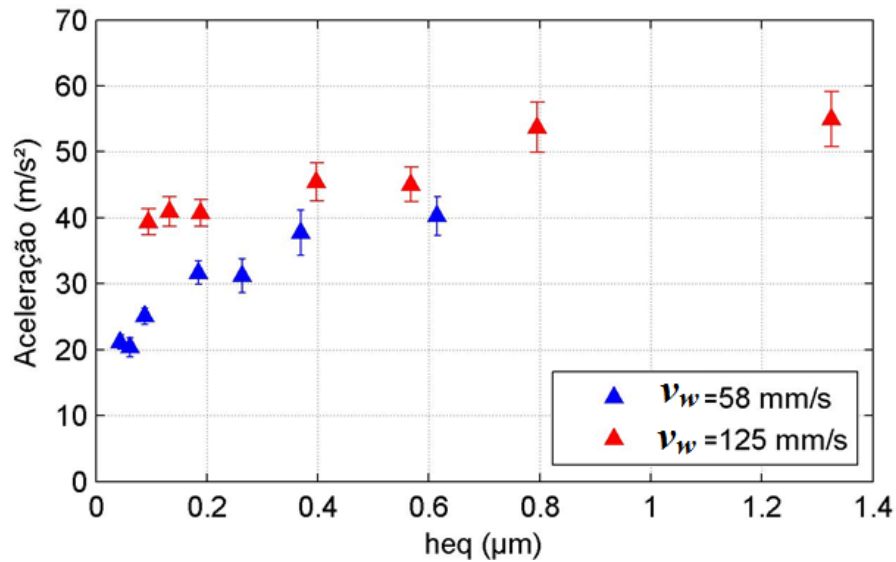


Figura 4.17- Vibração em função do h_{eq}

Portanto, uma v_w maior faz com que o rebolo se desgaste mais rápido, devido ao aumento das forças de corte e da vibração, durante a sua vida útil. Observa-se que a tendência da aceleração é aumentar sua amplitude, ao longo dos valores de h_{eq} , semelhante às figuras anteriores, no entanto, nesse caso o comportamento dos valores em cada v_w é distinto um do outro, e não há sobreposição dos desvios padrão entre as v_w .

A Figura 4.20 apresenta o mesmo procedimento realizado anteriormente, porém, dessa vez com objetivo de verificar o comportamento da rugosidade em função do h_{eq} . Nota-se um comportamento semelhante ao que foi mostrado na Figura 4.19, ou seja, uma tendência de crescimento da amplitude conforme a taxa de remoção de material aumenta. Para o parâmetro h_{eq} , novamente pode-se observar que o comportamento da aceleração e da rugosidade tem influências da v_w opostas e não há correlação, pois, os desvios padrão se sobrepõem nas condições de corte.

Capítulo 4 – Resultados e Discussão

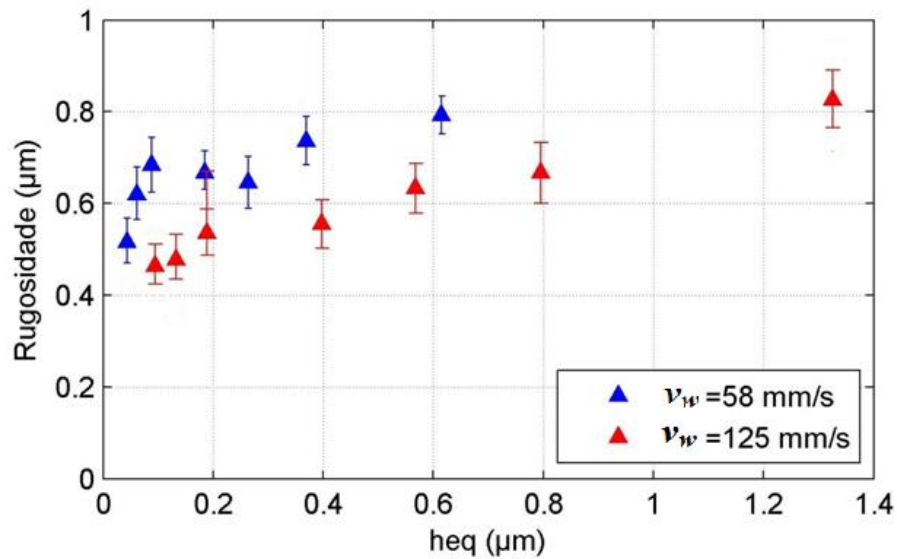


Figura 4.18- Rugosidade em função do h_{eq}

A Figura 4.21 mostra a comparação entre a aceleração e rugosidade das peças retificadas. Pode-se observar que o comportamento da vibração com a rugosidade é bem diferente das análises anteriores. Além de apresentar dois parâmetros, foi constatado anteriormente que ambos não têm uma correlação sob influência da v_w . Pode-se observar na $v_w = 58 \text{ mm/s}$, que a faixa de aceleração está aproximadamente entre 20 e 40 m/s^2 , enquanto na $v_w = 125 \text{ mm/s}$, a faixa está entre 40 e 60 m/s^2 .

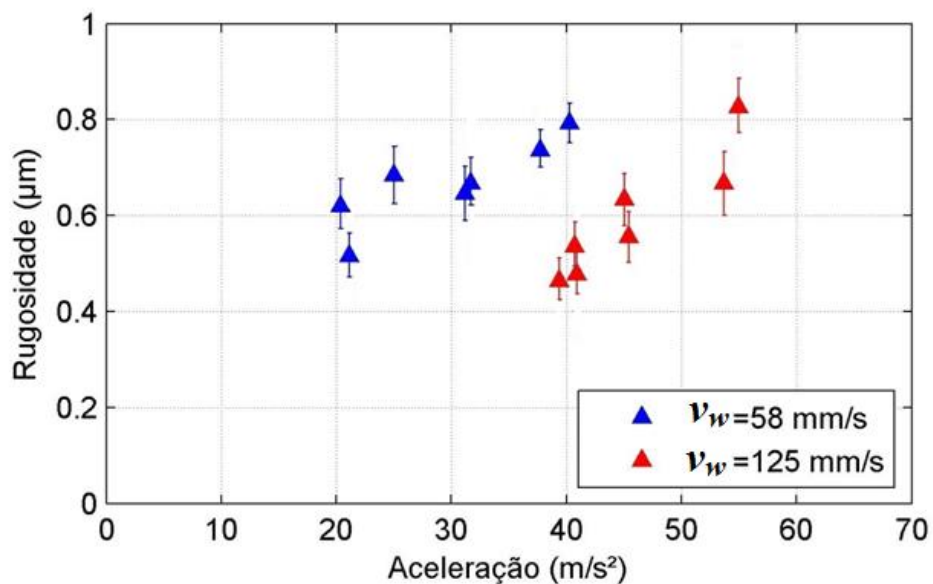


Figura 4.19- Rugosidade em função da vibração

É interessante notar na Figura 4.21, a correlação entre os valores de aceleração e rugosidade, mesmo em alguns casos, para um mesmo valor de aceleração podem ser encontrados

dois ou mais valores de rugosidade, inferindo-se que uma grandeza não está diretamente relacionada com a outra em cada v_w . Contudo o aumento da rugosidade e vibração é diretamente proporcional ao aumento da severidade do processo. Além disso, observa-se a sobreposição e valores mais elevados de desvio padrão.

Portanto, mesmo para as condições que expressam maior atividade vibracional e, conseqüentemente, leva a deterioração dos componentes de forma mais rápida, por ocorrerem as maiores atividades de corte, podem-se obter valores de rugosidade aceitáveis, e dentro da faixa padrão de 0,2 a 1,6 μm .

4.3.2 Relação com a corrente elétrica e potência

Foi realizada a média dos valores de rugosidade, vibração e corrente elétrica para as duas v_w . A Figura 4.22 apresenta a relação entre a vibração e a rugosidade, dessa vez plotados no mesmo gráfico por meio de um ajuste de escala. Nota-se que a vibração aumenta conforme a profundidade de corte é maior, principalmente, após a profundidade de corte de 50 μm , ou seja, o comportamento segue uma tendência de aumento diretamente relacionada com o aumento da penetração da ferramenta na peça em cada passada de usinagem. Por outro lado, pode se observar que também ocorre um aumento da rugosidade das peças de maneira mais sutil comparado à vibração.

Em relação à rugosidade, como era esperado, devido à superfície das peças de cerâmicas, observam-se elevados desvios padrão para essa variável, quando comparados com a aceleração. Infere-se que o valor RMS da vibração (aceleração) pode ser usado para o monitoramento da rugosidade da peça para a retificação de cerâmica empregada neste trabalho, devido à correlação do mesmo com a rugosidade. Para ajustar os sinais por meio da interpolação foi usado uma escala de equivalência por meio do MATLAB, descrita na legenda das Figuras 4.22 e 4.23.

Capítulo 4 – Resultados e Discussão

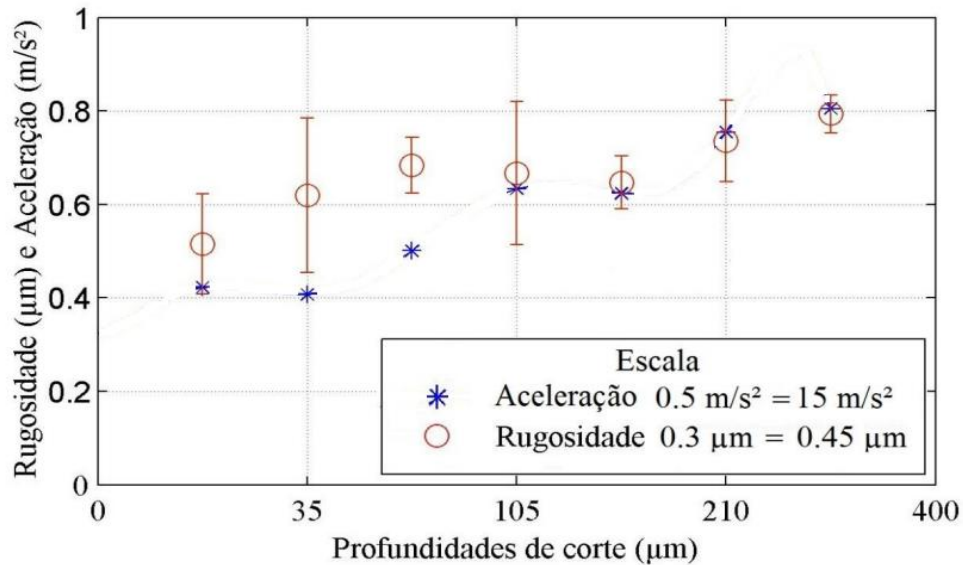


Figura 4.20- Relação entre vibração e rugosidade

Os sinais de corrente elétrica foram processados de igual modo ao sinal de vibração conforme descrito no capítulo 3. A Figura 4.23 mostra o comportamento da corrente elétrica do motor de acionamento do rebolo. Observa-se que, diferente da vibração a corrente elétrica apresenta um comportamento mais estável ao longo das profundidades de corte e de maneira geral o relacionamento com a rugosidade se mantem.

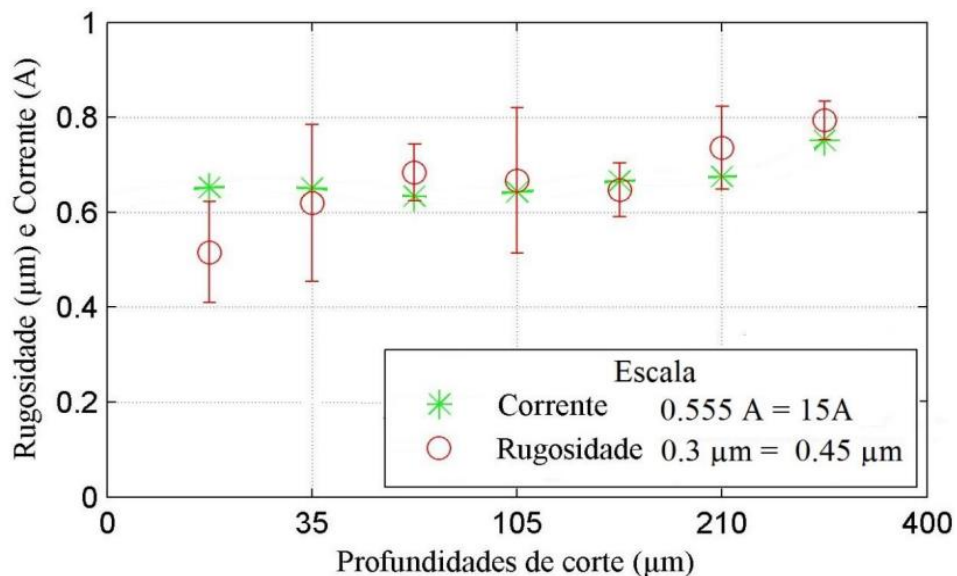


Figura 4.21- Relação entre corrente elétrica e rugosidade

Infer-se devido a correspondência entre essas grandezas que as forças de corte, potência foram proporcionais, de acordo com os limites estudados para esse processo, devido ao com-

portamento da corrente elétrica. Desta forma, pode-se inferir que o monitoramento da corrente elétrica fornece informação importante da rugosidade das peças de cerâmicas retificadas. Portanto, esse monitoramento possibilita conhecer se a peça permanece ou não dentro das especificações de tolerância desejada.

A Figura 4.24 mostra a potência em Watts, em função das profundidades de corte, novamente agora os gráficos comparam as duas v_w , separadamente. A partir da observação desse gráfico, pode se inferir que a potência permanece praticamente no mesmo nível nas primeiras profundidades de corte, principalmente para a $v_w = 58$ mm/s. Assim como os valores de rugosidade e vibração a potência possui valores mais elevados quando a $v_w = 125$ mm/s foi utilizada. É possível perceber que a potência começa aumentar a partir da profundidade de corte de $150 \mu\text{m}$.

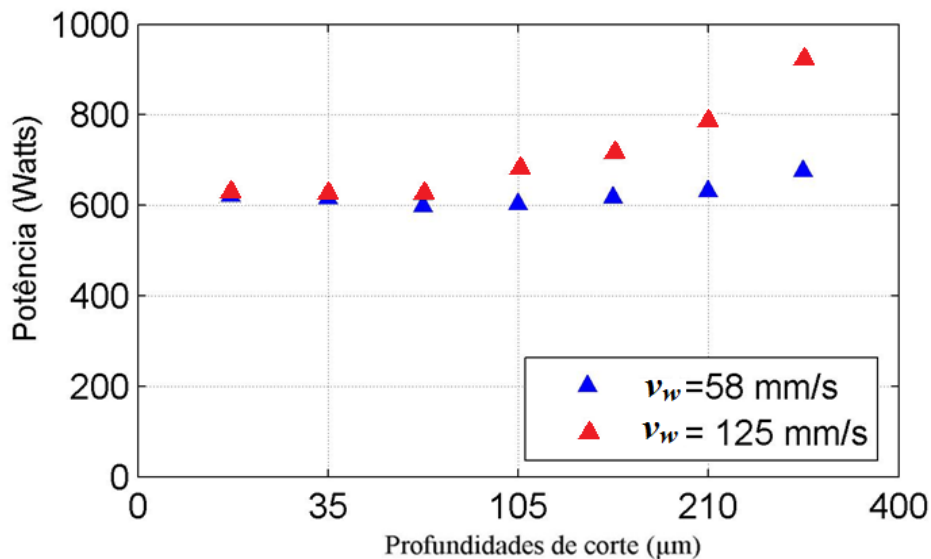


Figura 4.22 – Potência em função das profundidades de corte.

A potência apresentou uma dinâmica com constante de tempo muito maior (mais lenta) do que a do sinal de vibração. É possível notar a permanência praticamente no mesmo nível e até um decaimento em algumas condições como na profundidade de corte de $50 \mu\text{m}$. Contudo, o sinal não deixa de seguir a tendência de crescimento à medida que a severidade do processo aumenta. A Figura 4.25 mostra a potência em função do h_{eq} .

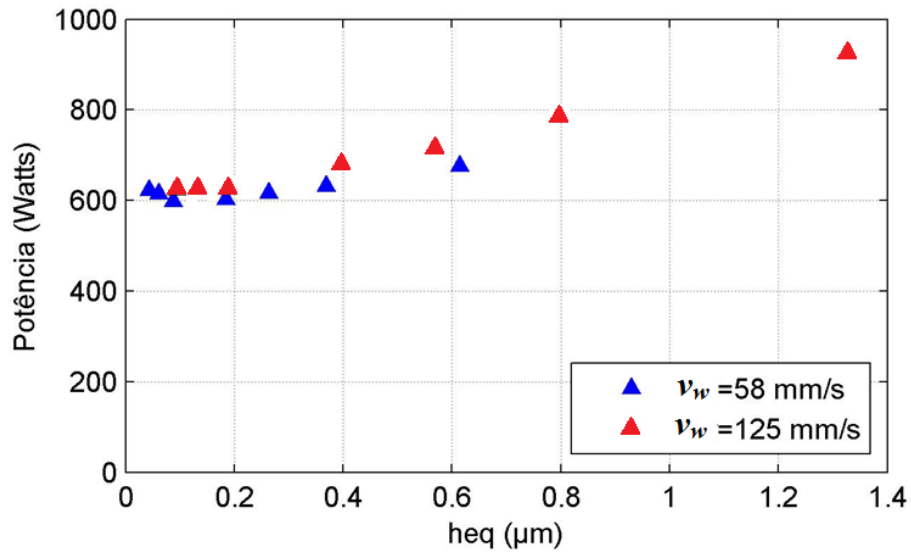


Figura 4.23- Potência em função do h_{eq} .

Observa-se que a tendência da potência é aumentar sua amplitude, ao longo dos valores de h_{eq} , semelhante à rugosidade e vibração, no entanto, nesse caso o comportamento é distinto devido a essa tendência ser mais lenta. Para o parâmetro h_{eq} , novamente pode-se observar que o comportamento igual ao da vibração em termos amplitude em relação à v_w , ou seja, quando uma v_w mais elevada foi utilizada, os níveis de potência são maiores. Dessa forma, infere-se que à medida que a quantidade de material removido da peça aumenta, o nível de potência é maior, isso ocorreu principalmente na profundidade de corte de 350 µm, já que, consequentemente, se exige um esforço maior para remover esse volume de material, o que, naturalmente, requer maior potência para a passada de retificação.

4.3.2.1 Índices de danos

Na Figura 4.26 foram obtidos os índices de danos RMSD e CCDM do sinal de vibração, a faixa de frequência de 800 Hz a 2 kHz, selecionada anteriormente, também foi a mais adequada para o cálculo desses índices, que neste estudo estão relacionados com a condição da superfície da peça. Os índices RMSD e CCDM foram normalizados para o cálculo, adotando o sinal de vibração da primeira peça como intacta e valor de amplitude igual a zero

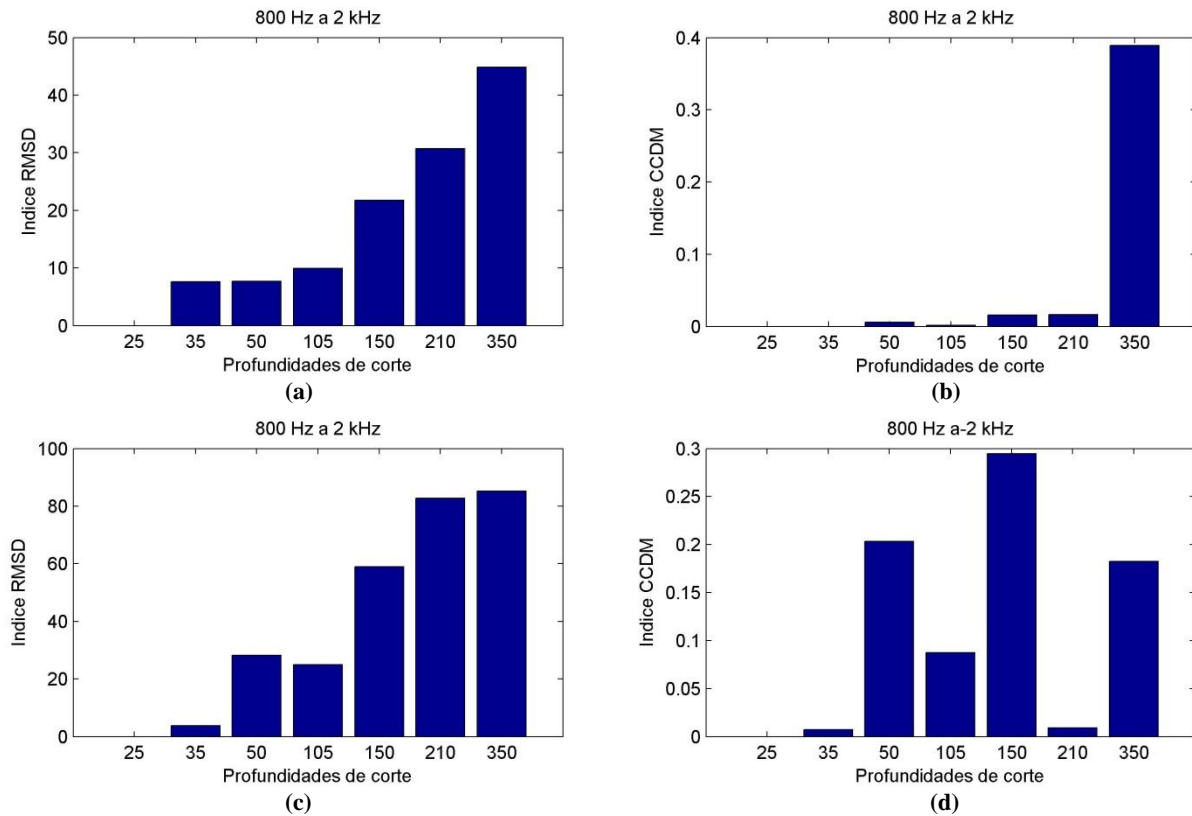


Figura 4.24- Índices de danos do sinal de vibração; RMSD $v_w = 58$ mm/s (a); CCDM $v_w = 58$ mm/s (b); RMSD $v_w = 125$ mm/s; CCDM $v_w = 125$ mm/s (d).

O índice RMSD é um parâmetro muito preciso utilizado em análises para indentificar um modelo diferente entre aqueles estudados, no caso deste trabalho foi em relação à amplitude do sinal para as diferentes profundidades utilizadas. Pode observar na Figura 4.26 que o RMSD apresenta de maneira satisfatória a correlação do sinal de vibração com a severidade do processo, tanto para $v_w = 58$ mm/s como para $v_w = 125$ mm/s e, naturalmente, com a rugosidade.

Por outro lado, já no índice CCDM, utilizado para encontrar correlação entre uma peça e outra em termos de frequência, com base na peça intacta, não foi obtido um padrão de comportamento que pudesse demonstrar uma correlação com o sinal de vibração e as condições das peças de cerâmicas, pois o mesmo mostrou alteração repentina de comportamento em relação a uma peça e outra comparando com a primeira, conforme as imagens (b) e (d) da Figura 4.26. Dessa forma, o índice CCDM não apresentou comportamento satisfatório nesta análise.

Capítulo 5 – CONCLUSÕES

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

O sinal de vibração apresentou uma correspondência satisfatória com a condição das cerâmicas após a retificação, de acordo com a análise espectral e o estudo do sinal na faixa de frequência de 800 Hz a 2 kHz. Os valores de rugosidade das peças mantiveram-se dentro de um padrão aceitável, de acordo com a literatura, ou seja, abaixo de 1.6 μm , de acordo com DINIZ *et al.* (2003). Quanto maior a profundidade de corte, maior foi a rugosidade, considerando e o mesmo aconteceu com o sinal de vibração. Concluindo que o crescimento da rugosidade e vibração é diretamente proporcional ao aumento da severidade do processo de retificação. O comportamento da corrente elétrica e potência (quando comparada com a vibração) apresentou correlação com o processo, ou seja, à medida que a severidade aumentava a corrente elétrica e a potência elevavam suas amplitudes, fato que reforçou o estudo por meio do sinal de vibração. O índice de dano RMSD serviu de base para apoiar as conclusões desse trabalho sobre a relação do sinal de vibração com a integridade estrutural dos corpos de prova usinados. Os resultados do índice CCDM foram insatisfatórios sob as condições de usinagem usadas nesta pesquisa, pela inexistência de clareza no comportamento do sinal de vibração, concluindo que esse parâmetro não foi adequado para o monitoramento do processo em questão. Estas análises foram muito importantes para qualificar danos superficiais nas peças em função das condições de corte adotadas, observados pelas imagens de microscopia confocal e apoiados pelo monitoramento dos ensaios, por meio das variáveis de saída: rugosidade e sinal de vibração. Foi possível observar o comportamento superficial das peças em diferentes profundidades de corte configuradas nos ensaios, a influência de uma condição de corte mais agressiva na superfície da peça, e a qualidade do método de fabricação desse tipo cerâmica alumina. Esta qualificação é extremamente necessária, porque a qualidade superficial das cerâmicas avançadas pode ser aprimorada se a configuração das condições de corte for realizada de maneira correta. Sendo assim, os danos na superfície das peças podem diminuir e, conseqüentemente a sua vida útil aumentar.

5.1 Sugestão para os próximos trabalhos.

- ❖ Um sistema de monitoramento de baixo custo em tempo real pode ser proposto, uma vez que as faixas de frequências disponíveis de vibração estão abaixo de 10 kHz;
- ❖ Estudo da força de corte para o processo de retificação de cerâmicas e comparando com o sinal de vibração, incluindo o estudo espectral e índices de danos.
- ❖ Avaliação de microscopia eletrônica de varredura (MEV) nas peças de cerâmicas após a retificação.
- ❖ Proposta de um sistema de inteligência artificial para estudar o comportamento mecânico das cerâmicas após a retificação, tendo como entrada o sinal de vibração.

REFERÊNCIAS

- AGARWAL, S.; RAO, P. V. **A probabilistic approach to predict surface roughness in ceramic grinding.** International Journal of Machine Tools and Manufacture, v. 45, n. 6, p. 609–616, 2005.
- AGUIAR, P. R.; BIANCHI, E. C.; OLIVEIRA, J. F. G. **A method for burning detection in grinding process using acoustic emission and effective electrical power signal.** CIRP Journal of Manufacturing Systems, v. 31, n. 3, 2002.
- AGUIAR, P. R.; DOTTO, F. R. L.; BIANCHI, E. C. **Study of thresholds to burning in surface grinding process.** Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, v. 27, n. 2, p. 150–156, 2005.
- AGUIAR, P. R.; SOUZA, A. G. O.; BIANCHI, E. C.; LEITE, R. R.; DOTTO, F. R. L. **Monitoring the dressing operation in the grinding process.** International Journal of Machining and Machinability of Materials, v. 5, n. 1, p. 3–22, 2009.
- ALLOR, R. L.; JAHANMIR, S. **Current problems and future directions for ceramic machining.** American Ceramic Society Bulletin, v. 75, n. 7, 1996.
- AYDIN, I.; BRISCOE, B. J.; SANLITURK, K. Y. **Dimensional variation of die-pressed ceramic green compacts: Comparison of a finite element modelling with experiment.** Journal of the European Ceramic Society, v. 17, n. 10, p. 1201 – 1212, 1997.
- BERKOVITS, A.; FANG, D. **Study of fatigue crack characteristics by acoustic emission.** Engineering Fracture Mechanics, v. 51, n. 3, p. 401 – 416, 1995.
- BIANCHI, E. C.; AGUIAR, P.; SILVA, E. J.; SILVA JR, C. E.; FORTULAN, C. **Advanced ceramics: evaluation of the ground surface.** Cerâmica, v. 49, n. 311, p. 174–177, 2003.
- BIFANO, T. G.; YI, Y. **Acoustic emission as an indicator of material-removal regime in glass micro-machining.** Precision Engineering, v. 14, n. 4, p. 219 – 228, 1992.
- BRINKSMEIER, E.; WERNER, F. **Monitoring of Grinding Wheel Wear.** CIRP Annals - Manufacturing Technology, v. 41, n. 1, p. 373 – 376, 1992.
- BURRASCANO, P. **Learning vector quantization for the probabilistic neural network.** Neural Networks, IEEE Transactions on, p. 458 – 461, 1991.
- BYRNE, G.; DORNFELD, D.; INASAKI, I. et al. **Tool Condition Monitoring (TCM) — The Status of Research and Industrial Application.** CIRP Annals - Manufacturing Technology, v. 44, n. 2, p. 541 – 567, 1995.

- CHANG, C.-W.; KUO, C.-P. **An investigation of laser-assisted machining of Al₂O₃ ceramics planing.** International Journal of Machine Tools and Manufacture, v. 47, n. 3–4, p. 452 – 461, 2007.
- CHEN, X.; ROWE, W. B. **Analysis and simulation of the grinding process. Part I: Generation of the grinding wheel surface.** International Journal of Machine Tools and Manufacture, v. 36, n. 8, p. 871 – 882, 1996.
- DANG, X.; TAN, Y. **RBF neural networks hysteresis modelling for piezoceramic actuator using hybrid model.** Mechanical Systems and Signal Processing, v. 21, n. 1, p. 430 – 440, 2007.
- DHANASEKAR, B.; MOHAN, N. K.; BHADURI, B.; RAMAMOORTHY, B. **Evaluation of surface roughness based on monochromatic speckle correlation using image processing.** Precision Engineering, v. 32, n. 3, p. 196 – 206, 2008.
- DING, S.; JIA, W.; SU, C.; CHEN, J. **Research of neural network algorithm based on FA and RBF.** Computer Engineering and Technology (ICCET), 2010 2nd International Conference on, v. 7, p. V7–228, 2010.
- DINIZ, A. E.; LIU, J. J.; DORNFELD, D. A. **Correlating tool life, tool wear and surface roughness by monitoring acoustic emission in finish turning.** Wear, v. 152, n. 2, p. 395 – 407, 1992.
- DORNFELD, D.; HE, G. C. **An Investigation of Grinding and Wheel Loading Using Acoustic Emission.** J. Eng. Ind. (Trans. ASME)., v. Vol. 106, p. 28–33, 1984.
- DOTTO, F. R. L.; AGUIAR, P. R.; BIANCHI, E. C.; SERNI, P. J. A.; THOMAZELLA, R. **Automatic system for thermal damage detection in manufacturing process with internet monitoring.** Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, v. 28, n. 2, p. 153–160, 2006.
- FATHIMA, K.; KUMAR, A. S.; RAHMAN, M.; LIM, H. S. **A study on wear mechanism and wear reduction strategies in grinding wheels used for ELID grinding.** Wear, v. 254, n. 12, p. 1247 – 1255, 2003.
- FAUSETT, L. V. **Fundamentals of Neural Networks: Architectures, Algorithms, and Applications.** Prentice-Hall, 1994.
- FISCHER, H.; WEISS, R.; TELLE, R. **Crack healing in alumina bioceramics.** Dental materials : official publication of the Academy of Dental Materials, v. 24, n. 3, p. 328–32, 2008.

- GADELMAWLA, E. S.; KOURA, M. M.; MAKSOUD, T. M. A.; ELEWA, I. M.; SOLIMAN, H. H. **Roughness parameters**. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 123, p. 133–145, 2002.
- GARG, S.; PATRA, K.; KHETRAPAL, V.; PAL, S. K.; CHAKRABORTY, D. **Genetically evolved radial basis function network based prediction of drill flank wear**. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, v. 23, n. 7, p. 1112 – 1120, 2010.
- GILL, S. S.; SINGH, J. **An Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System modeling for material removal rate in stationary ultrasonic drilling of sillimanite ceramic**. *Expert Systems with Applications*, v. 37, n. 8, p. 5590 – 5598, 2010.
- GIRIDHAR, D.; VIJAYARAGHAVAN, L.; KRISHNAMURTHY, R. **Acoustic emission response of sintered alumina zirconia composite during grooving process**. *NDT & E International*, v. 46, n. 0, p. 55 – 62, 2012.
- HAGAN, M. T.; MENHAJ, M. B. **Training feedforward networks with the Marquardt algorithm**. *Neural Networks, IEEE Transactions on*, v. 5, n. 6, p. 989–993, 1994.
- HECKER, R. L.; LIANG, S. Y. **Predictive modeling of surface roughness in grinding**. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, v. 43, n. 8, p. 755 – 761, 2003.
- HEUER, N.; TRAN, T. **Radial basis functions for the solution of hypersingular operators on open surfaces**. *Computers & Mathematics with Applications*, v. 63, n. 11, p. 1504 – 1518, 2012.
- HU, G.-N.; LIU, C.-C.; CHUANG, K.-W.; YU, S.-S.; TSUI, T.-S. **General Regression Neural Network utilized for color transformation between images on RGB color space**. *Machine Learning and Cybernetics (ICMLC), 2011 International Conference on*, v. 4, p. 1793 – 1799, 2011.
- HU, Y. H.; HWANG, J. N. **Handbook of Neural Network Signal Processing**. Taylor & Francis, 2001.
- HUANG, S. **Artificial neural networks in manufacturing: concepts, applications, and perspectives**. *and Manufacturing Technology, Part A*, v. 17, n. 2, p. 212–228, 1994.
- HUNDT, W.; LEUENBERGER, D.; REHSTEINER, F.; GYGAX, P. **An Approach to Monitoring of the Grinding Process Using Acoustic Emission (AE) Technique**. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, v. 43, n. 1, p. 295 – 298, 1994.
- HYUN, B. G.; NAM, K. **Faults Diagnoses of Rotating Machines by Using Neural Networks: GRNN and BPN**. *IEEE IECON*, p. p1456–1461., 1995.
- JANG, J. S. R.; SUN, C. T. **Neuro-fuzzy modeling and control**. *Proceedings of the IEEE*, v. 83, n. 3, p. 378 – 406, 1995.

- JEMIELNIAK, K. **Some aspects of acoustic emission signal pre-processing.** Journal of Materials Processing Technology, v. 109, n. 3, p. 242–247, 2001.
- 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, 2000.
- KOHONEN, T. **An introduction to neural computing.** Neural networks, v. 1, n. 1, p. 3–16, 1988.
- KONIG, W. **Machining of New Materials.** CIRP Annals - Manufacturing Technology, v. 39, n. 2, p. 673–681, 1990.
- 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, 2004.
- 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. 297–310, 2004.
- LIANG, Z.; WANG, X.; WU, Y. et al. **An investigation on wear mechanism of resin-bonded diamond wheel in Elliptical Ultrasonic Assisted Grinding (EUAG) of monocrystal sapphire.** Journal of Materials Processing Technology, v. 212, n. 4, p. 868 – 876, 2012.
- LIAO, T. W. **Feature extraction and selection from acoustic emission signals with an application in grinding wheel condition monitoring.** Engineering Applications of Artificial Intelligence, v. 23, n. 1, p. 74 – 84, 2010.
- MALKIN, S. **Grinding technology: theory and applications of machining with abrasives.** Society of Manufacturing Engineers, 1989.
- MALKIN, STEPHEN; KOREN, Y.; BER, A. **Off-Line Grinding Optimization with a Micro-Computer.** CIRP Annals - Manufacturing Technology, v. 29, n. 1, p. 213 – 216, 1980.
- MARINESCU, I. D.; HITCHINER, M.; UHLMANN, E.; INASAKI, I. **Handbook of machining with grinding wheels.** CRC, 2006.
- MARQUEZ, L.; HILL, T. **Function approximation using backpropagation and general regression neural networks.** System Sciences, 1993, Proceeding of the Twenty-Sixth Hawaii International Conference on, v. 4, p. 607 – 615, 1993.
- MASTERS, T. **Advanced algorithms for neural networks: a C++ sourcebook.** Wiley, 1995.

- MAYER JR, J.; FANG, G. P. **Effect of grinding parameters on surface finish of ground ceramics.** *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, v. 44, n. 1, p. 279–282, 1995.
- MEHROTRA, K.; MOHAN, C. K.; RANKA, S. **Elements of artificial neural networks.** MIT Press, 1997.
- MIN, S.; LIDDE, J.; RAUE, N.; DORNFELD, D. **Acoustic emission based tool contact detection for ultra-precision machining.** *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, v. 60, n. 1, p. 141 – 144, 2011.
- MORDJAOUI, M.; CHABANE, M.; BOUDJEMA, B.; ZAIER, H. **Neuro-fuzzy modeling for dynamic ferromagnetic hysteresis.** 4th International Conference on Computer Integrated Manufacturing CIP 2007.
- MORETTIN, L. G. **Estatística Básica - Probabilidade e Inferencia: Volume Unico.** MAKRON, 1999.
- MUKHERJEE, I.; ROUTROY, S. **Comparing the performance of neural networks developed by using Levenberg–Marquardt and Quasi-Newton with the gradient descent algorithm for modelling a multiple response grinding process.** *Expert Systems with Applications*, v. 39, n. 3, p. 2397 – 2407, 2012.
- MUÑOZ, L. A. B. **Learning in Feed-Forward Artificial Neural Networks I.** *Encyclopedia of Artificial Intelligence.* IGI Global, 2009.. p.1004–1011.
- NAVARRO, F. F.; MARTÍNEZ, C. H.; GUTIÉRREZ, P. A.; BARRAGÁN, J. M. P.; GRANADOS, F. L. **Parameter estimation of q-Gaussian Radial Basis Functions Neural Networks with a Hybrid Algorithm for binary classification.** *Neurocomputing*, v. 75, n. 1, p. 123 – 134, 2012.
- NAZARI, A. **Application of ANFIS for analytical modeling of tensile strength of functionally graded steels.** *Materials Research*, p. 0 – 0, 2012.
- NILSSON, J. W.; RIEDEL, S. A. **Circuitos Eléctricos.** LTC, 2003.
- OLIVEIRA, J. F. G.; VALENTE, C. M. O. **Fast Grinding Process Control with AE Modulated Power Signals.** *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, v. 53, n. 1, p. 267–270, 2004.
- PARZER, E. **On Estimation of a Probability Density Function and Mode.** *The Annals of Mathematical Statistics*, v. Vol. 33, p. 1065–1076, 1962.
- PATTON, J. B.; ILIC, J. **Identification of static distribution load parameters using general regression neural networks.** *Circuits and Systems*, 1993., Proceedings of the 36th Midwest Symposium on, p. 1023 – 1026, 1993.

- PRAGA-ALEJO, R. J.; TORRES-TREVIÑO, L. M.; GONZÁLEZ-GONZÁLEZ, D. S.; ACEVEDO-DÁVILA, J.; CEPEDA-RODRÍGUEZ, F. **Analysis and evaluation in a welding process applying a Redesigned Radial Basis Function.** Expert Systems with Applications, v. 39, n. 10, p. 9669 – 9675, 2012.
- RAHAMAN, M. N. **Ceramic Processing and Sintering.** M. Dekker, 2003.
- REDDY, P. V. B.; KUMAR, C. H. R. V.; REDDY, K. H. **Modeling of wire EDM process using back propagation (BPN) and General Regression Neural Networks (GRNN).** 2010. Anais... 2010.
- ROBBEN, L.; RAHMAN, S.; BUHL, J.-C.; DENKENA, B.; KONOPATZKI, B. **Airborne sound emission as a process monitoring tool in the cut-off grinding of concrete.** Applied Acoustics, v. 71, n. 1, p. 52 – 60, 2010.
- RUMELHART, D. E.; HINTON, G. E.; WILLIAMS, R. J. **Learning internal representations by error propagation.** Parallel Distributed Processing, p. 318–362, 1986.
- SALMASNIA, A.; KAZEMZADEH, R. B.; TABRIZI, M. M. **A novel approach for optimization of correlated multiple responses based on desirability function and fuzzy logics.** Neurocomputing, v. 91, n. 0, p. 56 – 66, 2012.
- SAMANT, A. N.; DAHOTRE, N. B. **Laser machining of structural ceramics—A review.** Journal of the European Ceramic Society, v. 29, n. 6, p. 969–993, 2009.
- SAMHOURI, M. S.; SURGENOR, B. W. **Surface roughness in grinding: on-line prediction with adaptive neuro-fuzzy inference system.** Transactions of NAMRI/SME, v. 33, p. 57–64, 2005.
- SENG, T. L.; KHALID, M.; YUSOF, R. **Adaptive GRNN for the modelling of dynamic plants.,** p. 217 – 222, 2002.
- SHAO, S.-C.; CHEN, W.-H.; CHEN, J.-H. **A noisy data regression model based on general regression neural networks.** 2011. Anais... 2011.
- SPECHT, D. F. **A general regression neural network.** Neural Networks, IEEE Transactions on, v. 2, n. 6, p. 568–576, 1991.
- SPECHT, D. F. **Chapter 3 - Probabilistic and General Regression Neural Networks.** Fuzzy Logic and Neural Network Handbook. McGraw-Hill Companies, 1996.
- STRAKNA, T. J.; JAHANMIR, S.; ALLOR, R. L.; KUMAR, K. V. **Influence of Grinding Direction on Fracture Strength of Silicon Nitride.** Journal of Engineering Materials and Technology, v. 118, n. 3, p. 335–342, 1996.

- SWAIN, M. V. **Microfracture About Scratches in Brittle Solids**. Proceedings of the Royal Society of London. A. Mathematical and Physical Sciences, v. 366, n. 1727, p. 575–597, 1979.
- TAJDARI, M.; MEHRABAN, A. G.; KHOOGAR, A. R. **Shear strength prediction of Ni-Ti alloys manufactured by powder metallurgy using fuzzy rule-based model**. Materials & Design, v. 31, n. 3, p. 1180 – 1185, 2010.
- TÖNSHOFF, H. K.; FRIEMUTH, T.; BECKER, J. C. **Process Monitoring in Grinding**. CIRP Annals - Manufacturing Technology, v. 51, n. 2, p. 551 – 571, 2002.
- TONSHOFF, H.; KARPUSCHEWSKI, B.; MANDRYSCH, T.; INASAKI, I. **Grinding Process Achievements and their Consequences on Machine Tools Challenges and Opportunities**. CIRP Annals - Manufacturing Technology, v. 47, n. 2, p. 651–668, 1998.
- TRAVEN, H. G. C. **A neural network approach to statistical pattern classification by 'semiparametric' estimation of probability density functions**. Neural Networks, IEEE Transactions on, p. 366 – 377, 1991.
- WEBSTER, J.; DONG, W.; LINDSAY, R. **Raw acoustic emission signal analysis of grinding process**. CIRP Annals-Manufacturing Technology, v. 45, n. 1, p. 335–340, 1996.
- WHITEHOUSE, D. J. **Handbook of Surface and Nanometrology, Second Edition**. Taylor and Francis, 2010.
- XIANG, Y.; TIAN, J.; ZHANG, Z.; DAI, Y. **Diagnosis of endometrial cancer based on near infrared spectroscopy and general regression neural network**. 2010. Anais... 2010.
- XIAO, G.; MALKIN, S. **On-Line Optimization for Internal Plunge Grinding**. Cycle, v. 45, n. 1, 1996.
- XU, H. H. K.; JAHANMIR, S. **Microfracture and material removal in scratching of alumina**. Journal of Materials Science, v. 30, n. 9, p. 2235–2247, 1995.
- ZHANG, B.; YANG, F.; WANG, J.; ZHU, Z.; MONAHAN, R. **Stock removal rate and workpiece strength in multi-pass grinding of ceramics**. Journal of Materials Processing Technology, v. 104, p. 178–184, 2000.
- ZHANG, K.; LI, Y.; SCARF, P.; BALL, A. **Feature selection for high-dimensional machinery fault diagnosis data using multiple models and Radial Basis Function networks**. Neurocomputing, v. 74, n. 17, p. 2941 – 2952, 2011.

ZHENG, Y. **Relationship between flexural strength and surface roughness for hot-pressed Si₃N₄ self-reinforced ceramics.** Journal of the European Ceramic Society, v. 20, n. 9, p. 1345–1353, 2000.

ZHOU, J.; YANG, K. **General regression neural network forecasting model based on PSO algorithm in water demand.** 2010. Anais... 2010.

~Certificate of Calibration~

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

PASS

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

As Received: N/A

As Left: New unit in tolerance.

Special Notes:

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

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

Calibration Station 21 3331633148.72



PCB PIEZOTRONICS™

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

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

Figura 5.1 – Certificado de calibração do acelerômetro usado nos ensaios.