



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

FACULDADE DE ENGENHARIA
CAMPUS DE BAURU

**APLICAÇÃO DO MÉTODO DE IMPEDÂNCIA
ELETROMECÂNICA NA DETECÇÃO DA
QUEIMA NO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO
PLANA**

MARCELO MARCHI

BAURU – SP
2015



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

FACULDADE DE ENGENHARIA
CAMPUS DE BAURU

**APLICAÇÃO DO MÉTODO DE IMPEDÂNCIA
ELETROMECÂNICA NA DETECÇÃO DA
QUEIMA NO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO
PLANA**

MARCELO MARCHI

Orientador: Prof. Dr. Paulo Roberto de Aguiar

Coorientador: Prof. Dr. Fabricio Guimarães Baptista

**Tese apresentada à Faculdade de Engenharia da UNESP -
Campus de Bauru, para obtenção do Título de Doutor em
Engenharia Mecânica.**

BAURU – SP
2015

Marchi, Marcelo.

Aplicação do método de impedância eletromecânica na
detecção da queima no processo de retificação plana /
Marcelo Marchi, 2015
80 f. : il.

Orientador: Paulo Roberto de Aguiar

Tese (Doutorado)-Universidade Estadual
Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru, 2011

1. Retificação. 2. Impedância eletromecânica. 3.
Sensor piezelétrico. I. Universidade Estadual
Paulista. Faculdade de Engenharia. II. Título.

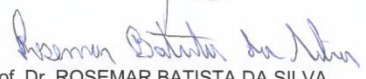
ATA DA DEFESA PÚBLICA DA TESE DE DOUTORADO DE MARCELO MARCHI, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA, DO(A) FACULDADE DE ENGENHARIA DE BAURU.

Aos 16 dias do mês de dezembro do ano de 2015, às 09:00 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) Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Bauru, Prof. Dr. JOSE ALFREDO COVOLAN ULSON do(a) Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Bauru, Prof. Dr. EDUARDO CARLOS BIANCHI do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Bauru, Prof. Dr. ROSEMAR BATISTA DA SILVA do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Universidade Federal de Uberlândia, Prof. Dr. SAMUEL DA SILVA do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, sob a presidência do primeiro, a fim de proceder a arguição pública da TESE DE DOUTORADO de MARCELO MARCHI, intitulado "MONITORAMENTO DO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO BASEADO NO MÉTODO DE IMPEDÂNCIA ELETROMECAÂNICA". 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. JOSE ALFREDO COVOLAN ULSON


Prof. Dr. EDUARDO CARLOS BIANCHI


Prof. Dr. ROSEMAR BATISTA DA SILVA


P/ Prof. Dr. SAMUEL DA SILVA



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Campus de Bauru



PROPOSTA DE ALTERAÇÃO DO TÍTULO

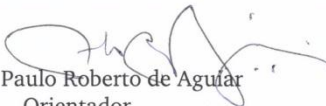
A BANCA EXAMINADORA PROPÕE A ALTERAÇÃO DO TÍTULO DO TRABALHO DO ALUNO:
MARCELO MARCHI

DE: "MONITORAMENTO DO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO BASEADO NO MÉTODO DE
IMPEDÂNCIA ELETROME CÂNICA"

PARA:

*Aplicações do Método de Impedância Eletrome-
cânica na detecção da queima no processo de
retificação plana.*

Bauru, 16 de dezembro de 2015


Prof. Dr. Paulo Roberto de Aguiar
Orientador

Dedico este trabalho à minha querida e amada Mãe Estevani Aurelina Alves Marchi, *in memoriam*, que foi e sempre será meu grande exemplo de luta e amor à vida.

Agradecimentos

Ao meu orientador Prof. Dr. Paulo Roberto de Aguiar pelos seus ensinamentos sobre retificação e processamento de sinais, pelas sugestões no decorrer do desenvolvimento deste trabalho e, principalmente, pelas lições de vida. Ao meu coorientador Prof. Dr. Fabricio Guimarães Baptista pela sua paciência, dedicação e também pelos ensinamentos e sugestões.

A minha noiva Bárbara Alves da Rocha Franco, que sempre esteve ao meu lado e sempre me motivou a seguir em frente.

Aos funcionários da Secção de Pós Graduação, Célia Cristina do Espírito Santo Graminha, Gleison Raphael de Andrade e Gustavo de Oliveira Rodrigues.

A todos os colegas do Laboratório de Aquisição de Dados e Processamento de Sinais – LADAPS da Faculdade de Engenharia Elétrica da UNESP – Bauru, SP.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica pela minha aceitação como pesquisador e pelo apoio com os recursos financeiros que proporcionaram o desenvolvimento desse trabalho.

Meus agradecimentos também, e de forma geral, à UNESP e à CAPES pela concessão da bolsa de pesquisa para o desenvolvimento de meu mestrado.

Sumário

1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1. ELEMENTOS BÁSICOS ENVOLVIDOS NO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO	4
2.2. PARÂMETROS DO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO	6
2.2.1. Operação de Dressagem	8
2.2.2. Espessura Equivalente de Corte (<i>heq</i>).....	9
2.2.3. Profundidade de Corte	10
2.2.4. Velocidade de Corte	11
2.2.5. Velocidade da Peça	11
2.2.6. Rugosidade	12
2.3. A QUEIMA NA RETIFICAÇÃO	13
2.3.1. Monitoramento do processo de retificação	16
2.4. SENSOR PIEZELÉTRICO	18
2.4.1. Fundamentos de Piezeletricidade	18
2.4.2. O Efeito Piez elétrico	18
2.4.3. Materiais e Transdutores Piez elétricos	21
2.5. MÉTODO DA FRATURA DE UMA PONTA DE GRAFITE (PLB)	23
2.6. MONITORAMENTO DA INTEGRIDADE ESTRUTURAL (SHM)	23
2.7. MÉTODO DA IMPEDÂNCIA ELETROME CÂNICA (EMI)	26
2.7.1. Impedância Eletromecânica aplicada a sistemas SHM	29
3. MATERIAL E MÉTODOS	33
3.1. INTRODUÇÃO	33
3.2. BANCO DE ENSAIOS	33
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	37
4.1. AVALIAÇÃO DA RESPOSTA EM FREQUÊNCIA DO TRANSDUTOR PIEZELÉTRICO	37
4.2. DEFINIÇÃO DO TAMANHO DO TRANSDUTOR PIEZELÉTRICO	38
4.3. CARACTERIZAÇÃO DO TRANSDUTOR PIEZELÉTRICO	42
4.4. INSPEÇÃO VISUAL DAS PEÇAS	44
4.5. MÉTODO EMI APLICADO NO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO	45
5. CONCLUSÕES	51
5.1. CONCLUSÕES GERAIS	51
5.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	51
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	52
TRABALHOS PUBLICADOS REFERENTE À TESE	63
TRABALHOS DESENVOLVIDOS NO PERÍODO	65

Lista de Figuras

Figura 1 - Esquema ilustrativo de retificação plana (KING E HAHN, 1986 - adaptado).....	7
Figura 2 - Tipos de acabamento superficial (WHITEHOUSE, 1994).	13
Figura 3 - Microdureza em função da profundidade abaixo da superfície com e sem queima (Malkin, 1989 – Adaptado).....	14
Figura 4 - Representação de um capacitor plano de placas paralelas utilizado para determinar as relações constitutivas de um material piezelétrico.	19
Figura 5 - Processo de fabricação das cerâmicas piezelétricas através do (a) aquecimento em alta temperatura, (b) da aplicação de um campo elétrico intenso e (c) orientação final dos dipolos. Fonte: Batista (2010).....	22
Figura 6 - Exemplos de cerâmicas de PZT produzidas pela Piezo Systems. Imagens retiradas do site http://www.piezo.com	23
Figura 7 - Modelo utilizado para representar um sistema eletromecânico acoplado	30
Figura 8 - Circuito para medição da impedância elétrica.	31
Figura 9 - Aparatos experimentais utilizados pelos pesquisadores citados acima para implementação da técnica EMI, Fonte: (a) Cilindro de concreto (Shin e Oh., 2009); (b) Painel aeronáutico (Gonzalez et al., 2015).....	32
Figura 10 - Posicionamento dos sensores PZT.	33
Figura 11 - Procedimentos realizados nos ensaios.....	34
Figura 12 - Esquema do banco de ensaios e sistema de aquisição de dados baseado na impedância eletromecânica.	35
Figura 13 - Banco de ensaios.	35
Figura 14 - Banco de ensaios para avaliação em frequência do transdutor PZT ..	37
Figura 15 - Gráficos de densidade espectral referente ao sinal dos sensores de emissão acústica, vibração e PZT	38
Figura 16 - Transdutores PZT de 3,4 cm (PZT3), 2cm (PZT2) e 1,5cm (PZT1) .	39
Figura 17- Sinais referente aos sensores PZT	39
Figura 18 - Sinais dos transdutores PZT em função da frequência (FFT)	40

Figura 19 - Densidade espectral dos transdutores PZT1, PZT2 e PZT3.....	41
Figura 20 - Médias dos valores RMS referente aos sinais dos transdutores PZT.	42
Figura 21. Banco de ensaios para a aplicação do método PLB	43
Figura 22 - Sinais no domínio do tempo e da frequência obtidos para os dois transdutores utilizando o método PLB.....	43
Figura 23 - Condição da superfície da peça retificada para diferentes profundidades de corte.	45
Figura 24 - Assinaturas de impedância do transdutor instalado na peça.	46
Figura 25 - Assinaturas de impedância do transdutor instalado no suporte.....	46
Figura 26 - Detalhe da variação das assinaturas para o transdutor instalado diretamente na peça.....	47
Figura 27 - Detalhe da variação das assinaturas para o transdutor instalado no suporte da retificadora.....	47
Figura 28 - Índices RMSD e CCDM para o transdutor instalado na peça.	48
Figura 29 - Índices RMSD e CCDM para o transdutor instalado no suporte.	49

Lista de abreviaturas e símbolos

a	profundidade de corte [μm]
b	largura de retificação [mm]
d_s	diâmetro do rebolo [mm]
d_w	diâmetro da peça [mm]
F_n	força normal de corte [N]
F_t	força tangente de corte [N]
G	relação entre volume de material retificado e volume desgastado do rebolo
h_{eq}	espessura equivalente de corte [μm]
l_c	comprimento de contato [mm]
n	rotação do rebolo [rpm]
Q_w	taxa de remoção por unidade de largura [mm^3/s]
R_a	rugosidade média [μm]
S_d	passo de dressagem [mm]
u	energia específica de retificação [J/mm^3]
V_s	velocidade de corte do rebolo [m/s]
V_w	velocidade da peça [m/s]
Z_w	volume de metal retificado [mm^3]
Z_s	volume de rebolo gasto [mm^3]
\vec{E}, E	campo elétrico e módulo [V / m]
R_s	resistor série [Ω]
U	tensão elétrica [V]
\vec{F}, F	força e módulo [N]
Z_E	impedância elétrica do transdutor [Ω]
$d_{m\beta}$	constante piezelétrica [m /V]
E/M	Eletromecânica
ADC	conversor analógico para digital
EA	emissão acústica
FFT	transformada rápida de Fourier - fast Fourier transform
PZT	titanato zirconato de chumbo - Pb-lead zirconate titanate
RMSD	desvio da raiz media quadrática - root mean square deviation
CCDM	desvio do coeficiente de correlação - correlation coefficient deviation metric
Spark-out	tempo de centelhamento na retificação após a retirada do material pelo rebolo
LabVIEW	ambiente gráfico de desenvolvimento de sistemas - laboratory virtual instrument engineering workbench
FRF	função de resposta em frequência – frequency response function

DFT	transformada de Fourier discreta - discrete Fourier transform
DAQ	dispositivo de aquisição de dados - data acquisition
NDE	avaliação não destrutiva - non-destructive evaluation
PSD	densidade espectral - power spectral density
EMI	impedância eletromecânica - electromechanical impedance

RESUMO

O processo de retificação é considerado um dos últimos na cadeia de produção de peças de precisão, sendo, portanto, essencial ter um sistema de monitoramento confiável para avaliar a condição da superfície da peça. Neste trabalho é proposto o uso do método da impedância eletromecânica (EMI) para monitorar, em tempo real, o processo de retificação plana, especialmente no que diz respeito à condição da peça retificada. O método EMI se destaca por sua simplicidade e por utilizar componentes de baixo custo, tais como os transdutores piezelétricos de PZT (*Pb-Lead Zirconate Titanate*). A fim de avaliar a viabilidade do método EMI no processo de retificação, ensaios experimentais foram realizados numa máquina retificadora plana empregando-se rebolo CBN e peça de aço SAE 1020, com transdutores de PZT instalados na peça e no seu suporte. Durante o processo de retificação, a impedância elétrica do transdutor foi medida e índices de dano foram calculados e comparados com o desgaste da peça. Os resultados experimentais indicam que o método EMI pode ser uma alternativa eficiente e de baixo custo para o monitoramento de peças de precisão no processo de retificação plana.

Palavras-chave: retificação, monitoramento, impedância eletromecânica, sensor piezelétrico

ABSTRACT

Grinding is considered one of the last processes in precision parts manufacturing, which makes it indispensable to have a reliable monitoring system to evaluate workpiece surface integrity. This paper proposes the use of the electromechanical impedance (EMI) method to monitor the surface grinding operation in real time, particularly the surface integrity of the ground workpiece. The EMI method stands out for its simplicity and for using low-cost components such as PZT (lead zirconate titanate) piezoelectric transducers. In order to assess the feasibility of applying the EMI method to the grinding process, experimental tests were performed on a surface grinder using a CBN grinding wheel and a SAE 1020 steel workpiece, with PZT transducers mounted on the workpiece and its holder. During the grinding process, the electrical impedance of the transducers was measured and damage indices were calculated and compared with workpiece wear. The experimental results indicate that the EMI method can be an efficient and cost effective alternative for monitoring precision workpieces during the surface grinding process.

Keywords: grinding, monitoring, electromechanical impedance, piezoelectric transducers.

1. Introdução

A retificação é um processo de fabricação considerado complexo e influenciado por muitos fatores, tais como a peça, máquina retificadora, rebolo, fluido de corte e definição dos parâmetros do processo.

A topografia do rebolo e as condições em que ele é preparado exerce grande influência sobre o desempenho do processo de retificação (NGUEYN & BUTLER, 2008).

De acordo com Liao (2008), a retificação é um dos processos de usinagem mais complexos, principalmente devido ao fato de que a operação de retificação é realizada por uma ferramenta de corte que é composta por pequenos grãos abrasivos de tamanhos irregulares, aleatoriamente orientados e posicionados, os quais são unidos por um ligante.

Uma vez que uma redução dos custos de produção e um aumento da qualidade das peças são esperados, a detecção automática de avarias em processo de usinagem tornou-se de grande interesse dos pesquisadores e das indústrias. Através da utilização de uma grande variedade de sensores, o monitoramento dos processos de usinagem representa um passo importante para a redução da baixa qualidade das peças e, portanto, uma redução de custos (AXINTE *et al.*, 2004).

Um dos problemas mais críticos no processo de retificação é a implementação de um sistema inteligente para detecção automática da queima superficial das peças. A queima ocorre durante o contato do rebolo com a peça, quando a quantidade de energia gerada na zona de contato produz um aumento de temperatura suficiente para a ocorrência da mudança de fase no material. Este fenômeno pode, em geral, ser observado visualmente pela cor azulada na superfície da peça (AGUIAR *et al.*, 2002). A queima na retificação também tem um efeito adverso na resistência do componente e nas propriedades de fadiga. Durante o processo de retificação, a queima é essencialmente uma mudança irreversível na microestrutura de uma camada superficial (LIU *et al.*, 2005). Assim, o controle e monitoramento da queima é de grande interesse para todas as

indústrias dependentes do processo de retificação e, conseqüentemente, reflete na redução de peças descartadas e custos de produção.

Outro aspecto de extrema importância no processo de retificação é a qualidade da superfície na peça retificada. De acordo com Hecker & Liang (2003), essa qualidade determina muitas características da peça, tais como as tolerâncias mínimas, eficácia da lubrificação e a vida útil dos componentes, dentre outras.

Uma superfície típica é caracterizada por caminhos de corte limpo e material arrastado para a lateral. No entanto, outras marcas podem ser encontradas, tais como fissuras produzidas por impacto térmico, material transferido para trás, e crateras resultantes da fratura de grãos, dentre outros fatores. Um parâmetro típico que tem sido utilizado para quantificar a qualidade da topografia da superfície é a rugosidade, o qual é representado pela média aritmética, R_a , pelo valor médio quadrático, R_q , e pela altura máxima da rugosidade, R_t .

Dessa forma esse trabalho tem como objetivo avaliar o uso do método da impedância eletromecânica (EMI) (LIM & SOH, 2014; OLIVEIRA et al.), para monitorar a condição da superfície da peça durante o processo de retificação plana. Especialmente quanto ao surgimento do fenômeno da queima superficial da peça retificada.

A dificuldade em controlar os danos causados no processo de retificação e a falta de um método confiável em fornecer realimentação em tempo real durante o processo são os principais fatores que impulsionaram essa pesquisa.

A implementação de um sistema de monitoramento do processo de retificação pode possibilitar uma melhoria na confiabilidade das operações, aliada a um aumento de qualidade da peça e redução de custos. Porém, ainda são encontradas dificuldades na sua implementação devido a diversos fatores e à falta de critérios bem definidos para a sua perfeita aplicação prática. Este fato caracteriza bem a necessidade de uma ferramenta computacional capaz de suprir esta limitação.

Dessa forma, o uso do método EMI em processos de usinagem, como é o caso da retificação plana, pode ser uma alternativa para a implementação de um sistema de monitoramento. Além disso, o método EMI apresenta uma metodologia mais simples e de baixo custo, comparado aos métodos convencionais usados no processo de retificação. Outro ponto importante é por ser uma aplicação que ainda não foi reportada na literatura, ou seja, ainda não foi usada no processo de retificação ou em outros processos de usinagem.

Para isso, testes foram realizados em uma peça de aço SAE 1020, e os resultados iniciais indicam que o método EMI pode ser uma excelente alternativa para o monitoramento da condição da peça no processo de retificação plana.

2. Revisão Bibliográfica

2.1. Elementos Básicos Envolvidos no Processo de Retificação

A retificação é uma operação de usinagem de alto custo que deveria ser utilizada tão eficientemente quanto possível. Ao contrário dos processos de usinagem com ferramenta de geometria definida, como o fresamento ou torneamento, na retificação a remoção de cavaco é realizada por uma infinidade de arestas de corte geometricamente não definidas. Além disto, têm-se seções e comprimentos de cavaco variáveis e distintos. A pesquisa bibliográfica descrita a seguir objetiva a formação de uma base teórica para aplicação no procedimento experimental desta pesquisa.

Segundo Malkin (1989), retificação é a designação para processos de usinagem que utilizam partículas abrasivas duras como o meio de corte. Isto é, o material é removido por meio da ação de grãos abrasivos que possuem alta dureza e que apresentam arestas que possuem formas e orientação irregulares.

Os métodos de retificação são similares, pois geralmente é um rebolo o qual é pressionado contra uma peça com uma força perpendicular à zona de contato, e assim, o material é removido da interação peça e a ferramenta (LINDSAY, 1995).

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

De uma maneira geral, a intensidade do processo de retificação na superfície usinada induz componentes com diferentes características e propriedades. Por exemplo, propriedades físicas, mecânicas, metalúrgicas e químicas que podem levar a alterações no desempenho funcional do processo (GRIFFITHS, 2001).

A tendência mundial é produzir peças sempre mais sofisticadas com tolerâncias mais apertadas e com acabamento superficial de alta qualidade (MONICI *et al.*, 2006).

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

Ao se comparar a retificação com os processos de geometria definida, uma das principais diferenças que surge tem a ver com a taxa de remoção do cavaco, sendo que, a velocidade de corte pode chegar a ser até 10 vezes maior quando comparada com a velocidade utilizada no processo de torneamento. Igualmente, a energia total requerida para o processo de retificação é da ordem de 2 a 20 vezes maior que para outros processos de usinagem, para o mesmo volume de cavaco removido na unidade de tempo (DINIZ *et al.*, 2008). Este fato aliado às altas forças normais (radiais) empregadas, gera altas temperaturas de corte (1000 a 1600°C), podendo atingir e superar sua temperatura de fusão, porém sem se fundir, pois o tempo de exposição a essa temperatura é curto.

Segundo Diniz *et al.* (2008), a maior parcela do calor gerado no processo de retificação vai para a peça (85%). O rebolo é pouco afetado pelo calor, já que geralmente é feito de material refratário e possui uma área grande para dissipação do calor gerado (10%). A parcela de calor restante (5%) é transmitida para o cavaco. Diante disso, a alta parcela de calor recebida pela peça pode gerar mudanças microestruturais numa camada superficial, erros de forma e dimensão, o qual se soma o estado do material que, geralmente, já foi tratado

termicamente antes da retificação. Para minimizar os efeitos prejudiciais devido ao calor gerado na peça, é utilizado fluido de corte de maneira abundante e contínua durante a remoção de material.

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

2.2. Parâmetros do Processo de Retificação

A retificação é um processo de usinagem usado na indústria metal mecânica em operações de acabamento de componentes de precisão, tais como os virabrequins de motores de combustão interna, que são retificados para atender às rígidas tolerâncias requeridas. Outros exemplos seriam os barramentos e prismas de precisão das próprias máquinas operatrizes, que são acabados em suas medidas finais por retificadoras planas e cilíndricas (SANTOS, 2007). No meio industrial, as peças usinadas geralmente são submetidas à retificação como última operação de acabamento. Dessa forma, o processo requer controle e atenção constantes, pois os danos à peça causariam a perda do valor agregado (oriundo de operações anteriores), sendo impossível recuperar as dimensões anteriores à retificação. A qualidade de peças retificadas, principalmente em operações manuais, depende em grande parte da experiência do operador. A utilização de materiais resistentes ao desgaste abrasivo, máquinas potentes e tecnologias mais adequadas leva a um aumento considerável na eficiência do processo (ARAUJO, 2010).

Segundo Durgumahanti *et al.* (2010), as vantagens relacionadas ao custo, assim como a qualidade final das peças, viabilizam e incentivam o desenvolvimento de novas tecnologias, além da criação de novos métodos de acabamento. Para a melhor produtividade do processo de retificação, é necessário otimizar os parâmetros envolvidos, a fim de que todo o potencial possa ser

aproveitado. Ainda, de acordo com os autores, a retificação é um processo muito complexo, com diversas variáveis dependentes entre si.

Existem vários tipos de operações de retificação, os quais variam conforme a forma do rebolo e os movimentos cinemáticos da peça e cabeçote do rebolo. (MALKIN, 1989).

A Figura 1 ilustra a configuração da retificação tangencial plana representando a força tangencial (F_t), a força normal (F_n), a velocidade periférica de corte (V_s), velocidade da peça (V_w) e a profundidade de corte (a).

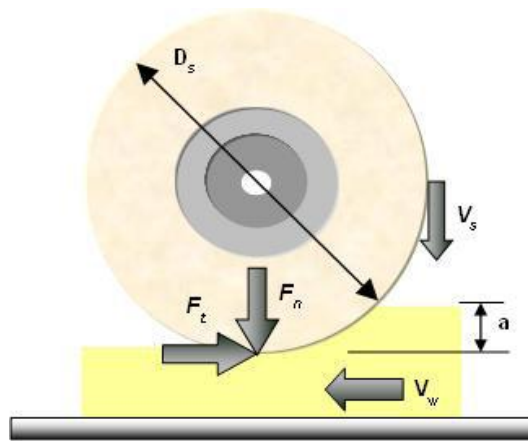


Figura 1 - Esquema ilustrativo de retificação plana (KING E HAHN, 1986 - adaptado).

A seguir, serão apresentados os parâmetros referentes ao processo de retificação.

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

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

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

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

$$Q_w = a.V_w \quad (2)$$

A distância de contato da área de retificação (l_c) é a distância que o grão abrasivo percorrerá na superfície da peça, removendo o material devido ao deslocamento angular (θ). Seu valor pode ser calculado pela Equação (3), onde a é a profundidade de corte [mm] e d_s é o diâmetro do rebolo [mm] (POLINI *et al.*, 2004).

$$l_c = \sqrt{a.d_s} \quad (3)$$

A rotação tem influência sobre o desempenho do rebolo e sobre a rugosidade. Um valor muito elevado pode provocar danos devido à intensidade do calor oriundo do atrito, bem como o surgimento de trincas.

2.2.1. Operação de Dressagem

A dressagem é considerada diretamente responsável pela topografia dos rebolos, um dos fatores de maior importância na formação de cavaco durante as operações de retificação. A vida do rebolo, o tempo do ciclo de retificação e a qualidade final da peça são os itens mais afetados pela operação de dressagem (MARINELLI *et al.*, 1998).

Após o uso do rebolo na retificação, este não se encontra em condições adequadas para nova utilização, pois pode apresentar arestas cegas e não estar numa forma geométrica desejada, e os poros podem estar impregnados de cavaco, de modo que a absorção de novos cavacos com sucessiva remoção de material fica dificultada. Isto resulta em um atrito excessivo e, conseqüentemente, uma geração de calor muito grande para a peça.

Na operação de dressagem são utilizados diversos tipos de ferramentas denominadas dressadores, ou retificadores, que incluem: cortadores metálicos (rosetas), bastões retificadores, rodas retificadoras, ponta única de

diamante, dressadores de diamantes múltiplos e em matriz, roletes estacionários e giratórios de diamante, roletes de esmagamento, dentre outros. Cada tipo apresenta vantagens específicas.

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

2.2.2. Espessura Equivalente de Corte (h_{eq})

Segundo Malkin (1989), a espessura equivalente de corte (h_{eq}) [μm] representa a espessura da camada de metal que é arrancada pelo rebolo numa volta completa. Trata-se de um parâmetro que permite quantificar uma condição de trabalho a partir das variáveis V_s e V_w , sendo, portanto, muito importante no processo de retificação. A espessura equivalente é expressa pela Equação (4):

$$h_{eq} = \frac{V_w}{V_s} a \quad (4)$$

Por se tratar de uma medida relativa à severidade das condições de corte, a espessura equivalente de corte correlaciona muito bem não somente com as forças de retificação e energia, mas também com outras características de desempenho, como a rugosidade e o desgaste do rebolo (MALKIN, 1989).

2.2.3. Profundidade de Corte

Segundo Bianchi *et al.* (1996), a deflexão entre o rebolo e a peça aumenta quando a área de contato e, conseqüentemente, o número de grãos em contato com a peça aumentam. Sendo assim, a temperatura durante o processo também aumenta. Portanto, um aumento na profundidade de corte provoca um aumento no número de grãos ativos e no tempo de contato, fazendo com que cada grão abrasivo remova uma quantidade menor de metal. Os cavacos resultam mais alongados e finos. Há uma maior parcela de atrito e riscamento, desde o início da formação do cavaco até a sua expulsão. Desta forma, o atrito e riscamento entre os cavacos removidos e a peça elevam a temperatura na região de corte, tendo como consequência a elevação de rugosidade, do nível de emissão acústica e da força de corte (normal e tangencial).

No processo de retificação, tem sido observado que a força de retificação é geralmente proporcional à quantidade de material removido, e, se a profundidade de corte é reduzida, a força diminui. Outro fator que influencia a força de retificação são as propriedades do material a ser retificado, a área de contato entre o rebolo e a peça, e a velocidade de corte (HEKMAN & LIANG, 1999).

Srivastava *et al. apud* Hassui (2002) apresentou um modelo teórico para avaliar o empastamento do rebolo, relacionando o mesmo com variáveis de processo. Este modelo baseia-se na adesão que ocorre na interface do grão abrasivo com o cavaco. Os autores concluem que o empastamento aumenta com o aumento da profundidade de corte, mas não é influenciado pela velocidade da peça.

Segundo Lee (1998), com pequenas profundidades de corte, materiais frágeis estão num regime dúctil gerando cavacos mais contínuos. Quando a profundidade de corte é aumentada excedendo esse regime dúctil, começam a surgir danos na estrutura da subsuperfície do material. Esse ponto é conhecido como profundidade de corte crítica, que não é uniforme ao longo do material. Os exatos conceitos físicos da formação do regime dúctil não são ainda claramente explicados.

Uma retificação apresenta menos danos quando o volume de material removido por grão do rebolo é pequeno o bastante, com melhor rendimento da fratura exposta do grão. Na prática, isto significa manter a profundidade de corte de cada grão abaixo da transição dúctil-frágil. A fim de reduzir o tempo de manufatura e seus custos elevados, o processo necessita ser automatizado, visando uma retirada maior de material, acelerando o processo através de profundidades de corte maiores. Para automatizar o regime dúctil, no caso de cerâmicas, a máquina deve ser equipada com sensores de emissão acústica bastante sensíveis à quebra da microestrutura cerâmica (AKBARI *et al.*, 1996).

2.2.4. Velocidade de Corte

Segundo Malkin *apud* Bianchi *et al.* (1996), a velocidade de corte (V_s) exerce uma substancial influência sobre o comportamento das forças de corte, desgaste do rebolo, acabamento e queima superficial da peça, vibrações da máquina, entre outros. Quando a velocidade de corte é elevada, um mesmo grão abrasivo passa a remover um menor volume de cavaco, pelo aumento da sua frequência de contato com a peça. Portanto, o número de grãos ativos é maior e a espessura do cavaco removido é menor, diminuindo as forças de corte, rugosidade da peça e desgaste do rebolo pela menor solicitação de cada grão. Em contrapartida, pelo aumento da intensidade de contato dos grãos com a peça ocorre uma elevação da temperatura, que pode ocasionar um dano térmico na peça.

2.2.5. Velocidade da Peça

Segundo Malkin *apud* Bianchi *et al.* (1996), a velocidade da peça (V_w) é coincidente com a velocidade da mesa da máquina retificadora. Esta velocidade está relacionada aos impactos que os grãos abrasivos provocam na peça. Quando a velocidade da peça é baixa e a penetração é grande, os impactos dos grãos abrasivos do rebolo sobre a peça são pequenos e os cavacos são alongados. O tempo de contato grão/peça e o número de grãos ativos são maiores. Assim, a força em um grão abrasivo é pequena e atua durante um tempo longo. Os

grãos abrasivos tendem a permanecer mais tempo em contato com a peça, o que provoca um desgaste maior. As forças de corte (normal e tangencial) tendem a aumentar com o tempo de retificação, pelo desgaste das arestas cortantes. Com isto, o desgaste do rebolo tende a ser menor, considerando-se que os grãos abrasivos permanecem mais tempo presos ao ligante, o que minimiza a perda de grãos.

Quando a velocidade da peça é alta e a penetração do rebolo é pequena, os impactos dos grãos abrasivos do rebolo sobre a peça são grandes e os cavacos são curtos. O tempo de contato grão/peça e o número de grãos ativos são menores, gerando uma força por grão abrasivo grande e por pouco tempo. Os grãos tendem a se fraturar e a se desprender da superfície de corte do rebolo. Neste caso, as forças totais de corte tendem a uma estabilização pela troca constante de grãos abrasivos. O desgaste do rebolo tende a ser maior que no caso anterior (MALKIN, 1989).

2.2.6. Rugosidade

Rugosidade são imperfeições contidas em uma superfície, podendo ser mensurada com recursos e equipamentos apropriados. A importância do acabamento superficial aumenta quando cresce a precisão de ajuste entre as peças. Uma menor tolerância de ajuste não é suficiente para garantir a funcionalidade do par acoplado (MARTINS, 2008).

Quando as superfícies são observadas com recursos apropriados, revelam irregularidades. As orientações das irregularidades dependem do tipo de processo que deu origem a superfície (OLIVEIRA, 2004). É importante lembrar que as superfícies reais de engenharia são compostas do perfil sem filtragem, ou seja, compostas de forma, ondulações e rugosidade.

A melhor maneira de analisar uma superfície está relacionada às orientações dos sulcos provenientes do processo de fabricação (WHITEHOUSE, 1994). Essas marcas oriundas dos processos de fabricação podem ser exemplificadas na Figura 2.















Paralelo		
Perpendicular		
Cruzado		
Multidirecional		
Particular		
Circular		
Radial		

Figura 2 - Tipos de acabamento superficial (WHITEHOUSE, 1994).

O comprimento, a forma e avanço do apalpador, as características do amplificador, a precisão do raio a ser medido e efeitos de filtragem mecânica são algumas das variáveis que podem afetar os resultados de uma medição de superfície (WHITEHOUSE, 1994).

A retificação também influencia diretamente na rugosidade, sendo este um fator essencial na inspeção em várias aplicações industriais, como a produção e processamento de metais, semicondutores, cerâmicas, papel e plástico (DHANASEKAR *et al.*, 2008).

A retificação automática e inteligente é utilizada por indústrias para a produção com alta qualidade de acabamento e geometria e, neste cenário, destaca-se a rugosidade como um dos fatores mais importantes para se avaliar a condição da peça durante o processo de acabamento (SAMHOURI *et al.*, 2005).

2.3. A Queima na Retificação

A queima na retificação ocorre durante o processo de corte, quando a quantidade de energia gerada na zona de contato produz um aumento na temperatura suficientemente elevada para provocar uma mudança de fase no material usinado. Esse fenômeno tem sido investigado principalmente na retificação de carbono puro e ligas de aço, embora seja também um problema com alguns outros materiais metálicos. A queima superficial visível nos aços é caracterizada pela cor azulada sobre a peça, que é uma consequência da formação de camada de óxido. A coloração da tempera é geralmente removida pelo spark-

out no final do ciclo de retificação, especialmente a cilíndrica, mas este efeito é apenas visual, e a ausência de óxidos na superfície da peça não significa necessariamente que a queima superficial não ocorreu (MALKIN, 1992).

A queima é esperada quando uma temperatura crítica ($\sim 720^{\circ}\text{C}$) é ultrapassada na zona de contato da peça com o rebolo (MALKIN, 1989; NATHAN *et al.*, 1999; KWAK *et al.*, 2001).

A queima superficial da peça influencia na alteração da microestrutura do material retificado. Através da análise da distribuição de microdureza em peças que apresentam queima visível, nota-se que estas apresentam reaustenitização. Um aço endurecido, retificado sem queima, apresenta uma pequena diminuição de dureza na superfície devido ao revenimento. Ocorrendo a queima, há a tendência de um aumento da dureza superficial e queda da dureza subsuperficial, como é mostrado na Figura 3. Este aumento de dureza se deve a reaustenitização, seguida de formação de martensita não revenida (MALKIN, 1989).

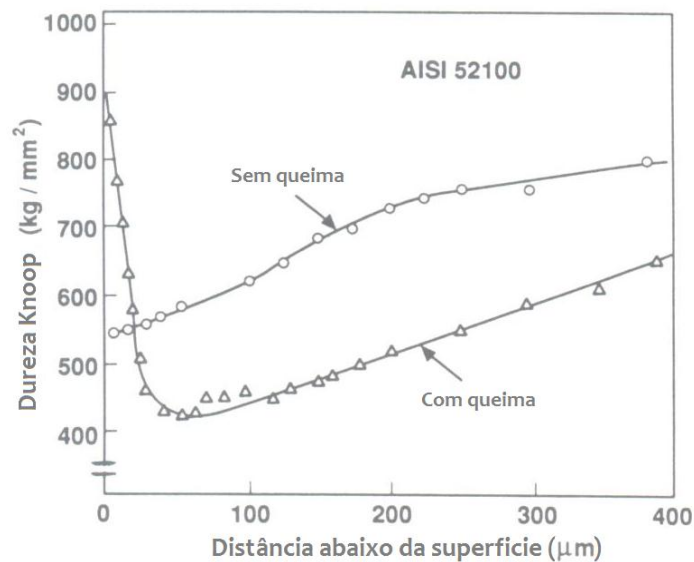


Figura 3 - Microdureza em função da profundidade abaixo da superfície com e sem queima (Malkin, 1989 – Adaptado).

De acordo com Ali e Zhang (2004) existem modelos térmicos analíticos para a previsão da queima superficial durante a retificação, porem são limitados por causa de sua dependência de parâmetros que não são facilmente

obtidos na prática. Um exemplo de modelo térmico utilizado na retificação é o da teoria do movimento da fonte de calor com diferentes condições de contorno para estimar a distribuição de temperatura no interior da zona de retificação. Esta distribuição é então utilizada para prever a geração de tensões residuais, uma fina película de ebulição, a ocorrência da queima superficial, ou outras características de integridade de superfície. Embora estes modelos contribuam para uma melhor compreensão dos fundamentos da retificação, eles exigem o conhecimento de parâmetros, tais como partição de energia, consumo de energia real da máquina, comprimento de contato real, espaçamento inter-granular, ou desgaste superficial. Muitas destas informações não são obtidas facilmente em um ambiente de chão de fábrica. Além disso, propriedades térmicas de muitos materiais utilizados no processo de retificação como fluidos refrigerantes e grãos abrasivos não são conhecidas. Consequentemente, os engenheiros continuam a contar com a experiência e as habilidades dos operadores de máquina. A dificuldade de controlar os danos térmicos causados durante o processo de retificação é a ausência de um modelo confiável que apoie a prevenção de danos superficiais causados às peças.

Segundo Bell *et al.* (2011), diagramas do limiar de queima são úteis para a previsão de dano induzido termicamente na retificação, e foram originalmente desenvolvidos para descrever o processo de retificação superficial. Com o desenvolvimento de novos processos de retificação com alto nível de remoção de material, como o HEDG (*High Efficiency Deep Grinding*), a prevenção do dano térmico na peça é motivo de grande preocupação. O HEDG é um processo de retificação que atinge altas taxas de remoção de material e permite uma melhora na eficiência do processo em controlar a integridade da superfície da peça; seu princípio é baseado em torno da mudança nas características térmicas do processo de retificação em números de *Pecle* (número adimensional relevante no estudo de fenômenos de transporte em fluxos fluidos), onde menos calor é transferido para a peça. Diagramas de limite de queima são válidos para números de *Peclet* abaixo de 50, sendo este muito abaixo dos valores esperados em HEDG.

2.3.1. Monitoramento do processo de retificação

De acordo com Abu-Mahfouz (2003), a comunidade industrial está sempre se esforçando para reduzir os custos operacionais, enquanto tenta melhorar a qualidade dos produtos e atender ou exceder a satisfação do cliente. Essas metas estão direcionadas à automação e a utilização de equipamentos autômatos de alta produção. Células de manufatura flexíveis com operações de usinagem autônomas exigem o desenvolvimento de métodos confiáveis de monitoramento on-line de suas operações.

Sistemas inteligentes de manufatura podem ser comparados com um operador qualificado, que usa seus conhecimentos para operar uma máquina. Estes sistemas, portanto, requerem sensores de alta precisão, baixos custos de implementação e ferramentas computacionais eficientes, que possam reproduzir o processo decisório do operador. Monitorar e controlar uma operação industrial requer o conhecimento do modelo matemático do processo, que é baseado na física de interações do sistema. No entanto, devido à complexidade das interações que ocorrem no processo, é extremamente difícil a obtenção de modelos altamente precisos. Assim, métodos computacionais, tais como as RNA (redes neurais artificiais), podem ser utilizados para modelar o processo com base em dados relativos ao processo. A vantagem dessa abordagem reside na capacidade de relacionar as entradas e saídas, apesar dos dados serem imprecisos, insuficientes, ou incertos (DAVIM, 2008).

O controle do processo de retificação é vital para aumentar o desempenho da ferramenta em termos de acabamento superficial, tolerâncias requeridas e ciclo de operações (LIANG *et al.*, 2004).

De acordo com Babel *et al.* (2013), em função da sua alta sensibilidade à múltiplas interações dinâmicas entre o rebolo e a peça usinada, a emissão acústica (EA) surgiu como uma ferramenta valiosa para uma série de aplicações de monitoramento do processo de retificação. Exemplos típicos incluem o processo de mapeamento do rebolo e, com uso de um sensor em contato com a peça, é possível captar vibrações e danos térmicos. Ainda assim, relatam que em muitas aplicações, basta examinar a média do sinal de EA em função do

tempo, enquanto outros necessitam de análise do sinal puro de EA no domínio da frequência, contendo informações importantes sobre o processo nos componentes espectrais. Em ambos os casos, devido à natureza complexa do processo de retificação, o desafio na aplicação eficaz e confiável no sinal de EA encontra-se na correta interpretação e identificação de informações relacionadas ao processo.

Além do sinal de EA, várias pesquisas foram realizadas para correlacionar os sinais de vibração com características do processo de usinagem. Por exemplo, Yamamoto *et al.* *apud* Hassui *et al.* (2003) monitoraram a vibração do rebolo (fixando um sensor sobre o rolamento do rebolo) para detectar o entupimento dos poros do rebolo por cavaco. Tendo em vista este objetivo, eles utilizaram filtros digitais adaptativos e criaram um índice com base nos resultados destes filtros, chamado índice de padrão do sinal. Esse índice mostrou ter uma boa relação com o volume de cavaco acumulado no rebolo.

De acordo com Teti (2010), não é confiável utilizar um sistema de monitoramento de processos que funcione com base em uma única característica. Portanto, o cálculo de um número suficiente de característica relacionadas com a ferramenta e/ou condições do processo é fundamental em sistemas de monitoramento de usinagem. Isto é obtido através de métodos de processamento de sinais que compõem o pré-processamento (filtragem, amplificação, conversão A/D, e segmentação), incluindo, em algumas ocasiões, a transformação do sinal para o domínio da frequência (transformada de Fourier, transformada wavelet, etc).

Godoy *et al.* (2014) propuseram um sistema de monitoramento inteligente do processo de retificação plana, utilizando os sinais de emissão acústica (EA) e vibração como parâmetro de análise com objetivo que identificar o fenômeno da queima superficial de peças de aço. Os espectros de frequência destes sinais permitiram determinar bandas de frequência que melhor caracterizavam o fenômeno da queima, sendo utilizadas como entradas para uma rede neural artificial capaz de classificar a condição superficial da peça.

Nakai *et al.* (2015) utilizaram o sinal de EA como entrada para os modelos neurais, juntamente com o sinal de potência de corte e o parâmetro

DPO, para estimar o desgaste da ferramenta de corte durante o processo de retificação de cerâmicas. Concluindo que a utilização de sistemas inteligentes para o monitoramento, notadamente aqueles fundamentados em Redes Neurais Artificiais, agrega melhorias no processo, possibilitando sua automação e, conseqüentemente, sua otimização.

Com relação ao uso do método EMI para o monitoramento de processos de usinagem, como a retificação, o torneamento e fresamento, não foi encontrada nenhuma ocorrência na literatura, tornando o tema desse trabalho inovador na área de manufatura de peças de aço.

2.4. Sensor piezelétrico

2.4.1. Fundamentos de Piezeletricidade

Os transdutores piezelétricos são amplamente utilizados em vários tipos de dispositivos eletrônicos por apresentarem baixo custo, dimensões reduzidas e baixo consumo de energia, o que os tornam ideais para dispositivos sem fio (wireless) e alimentados por baterias. Nas últimas décadas, esses transdutores têm sido usados na detecção de danos estruturais devido ao efeito piezelétrico, que proporciona um acoplamento eletromecânico com a estrutura monitorada e, portanto, permite avaliar as condições mecânicas da estrutura a partir das propriedades elétricas do transdutor. Por se tratar de uma interação entre grandezas elétricas e mecânicas, as definições de deformação mecânica e tensão mecânica são necessárias antes de iniciar o estudo do efeito piezelétrico e dos materiais que apresentam essa propriedade.

2.4.2. O Efeito Piezelétrico

Idealmente, o estudo sobre o efeito piezelétrico deveria ser precedido de um estudo sobre cristalografia. Entretanto, neste trabalho, apresentam-se apenas as características básicas dessa propriedade necessárias para o entendimento da aplicação dos transdutores piezelétricos no monitoramento do processo de retificação plana. Para um estudo mais detalhado, recomenda-se a leitura de (MEITZLER *et al.*, 1987).

O efeito piezoelectrico é o surgimento de um campo elétrico em um material submetido a uma distribuição de tensão mecânica. Também ocorre o efeito reverso, isto é, ao se aplicar uma tensão elétrica entre os dois lados de um material piezoelectrico, surge uma deformação mecânica. Ambos os efeitos foram descobertos por Jacques e Pierre Curie em 1880-1881. O termo piezoelectrico vem do grego “piezein” que significa pressionar. Neste estudo é considerado apenas o efeito piezoelectrico linear, que é válido para um campo elétrico de pequena amplitude.

As relações constitutivas de um material piezoelectrico podem ser determinadas a partir de um capacitor plano de placas paralelas, no qual são aplicadas uma força F e uma diferença de potencial elétrico U [V], como representado na Figura 4.

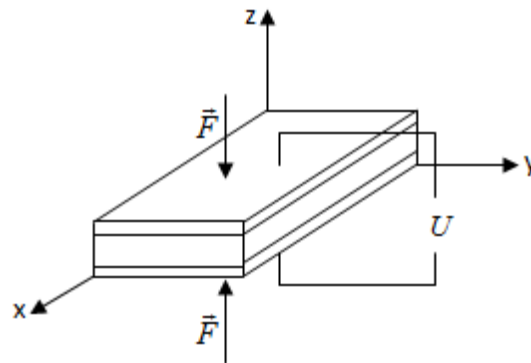


Figura 4 - Representação de um capacitor plano de placas paralelas utilizado para determinar as relações constitutivas de um material piezoelectrico.

Fonte: Batista (2010).

Inicialmente, considera-se que o dielétrico do capacitor seja um material anisotrópico e não piezoelectrico. A aplicação da força F produz uma deformação S e uma tensão T que se relacionam através da lei de Hooke dada pela equação (5) que é reescrita abaixo

$$S_a = S_{\alpha\beta} T_\beta \quad (5)$$

A diferença de potencial cria um campo elétrico \vec{E}_k [V/m], para $k = 1, 2, 3$, e pode-se obter

$$\vec{D}_m = \varepsilon_{mk} \vec{E}_k \quad (6)$$

Sendo \vec{D}_m [C/m²], para $m = 1, 2, 3$, o vetor de deslocamento elétrico e ε_{mk} [F/m] o tensor de segunda ordem que representa as constantes de permissividade dielétrica.

Por outro lado, se o dielétrico é um material piezelétrico, ocorre uma interação entre as grandezas elétricas e mecânicas. A partir da energia livre de Gibbs do material, pode-se determinar que o deslocamento elétrico e a deformação mecânica são dados por (BERLINCOURT; CURRAN; JAFFE, 1964 apud BUSCH-VISHNIAC, 1998).

$$D_m = d_{m\beta}^{H,\theta} T_\beta + \varepsilon_{mk}^{T,H,\theta} E_k + m_{mk}^{T,\theta} H_k + p_m^{T,H} d\theta \quad (7)$$

$$S_\alpha = s_{\alpha\beta}^{E,H,\theta} T_\beta + d_{\beta m}^{E,\theta} E_m + d_{\beta m}^{E,\theta} H_m + \alpha_\alpha^{E,H} d\theta \quad (8)$$

Sendo $d_{m\beta}$ e $d_{\beta m}$ as constantes piezelétricas, m_{mk} as constantes magnetodielétricas, p_m as constantes piroelétricas, α_α os coeficientes de expansão térmica, H_k as componentes de campo magnético e θ a temperatura. Os sobrescritos E , H , θ e T indicam campo elétrico, campo magnético, temperatura e tensão mecânica constantes, respectivamente.

Os efeitos térmicos e magnéticos não são considerados neste estudo e as equações (7) e (8) podem ser simplificadas como:

$$D_m = d_{m\beta} T_\beta + \varepsilon_{mk}^T E_k \quad (9)$$

$$S_\alpha = s_{\alpha\beta}^E T_\beta + d_{\beta m}^E E^m \quad (10)$$

Em (9), o efeito piezelétrico direto, as componentes do tensor $d_{m\beta}$ relacionam o deslocamento elétrico na direção m com a tensão mecânica na direção β . O mesmo raciocínio vale para o tensor $d_{\beta m}$ em (10), o efeito piezelétrico reverso. Portanto, em um material piezelétrico há também uma carga elétrica devido a uma tensão mecânica e uma deformação devido a um campo elétrico, ou seja, há um acoplamento eletromecânico.

As expressões em (9) e (10) podem ser colocadas nas forma matricial, como segue:

$$[D] = [d] [T] + [\varepsilon^T] [E] \quad (11)$$

$$[S] = [S^E] [T] + [d]^T [E] \quad (12)$$

As expressões em (11) e (12) definem as relações constitutivas básicas de um material piezelétrico, e foram utilizadas neste trabalho para o desenvolvimento do circuito eletromecânico equivalente para transdutores de PZT aplicados no monitoramento do processo de retificação plana.

2.4.3. Materiais e Transdutores Piezelétricos

As propriedades piezelétricas estão presentes em 20 das 32 classes cristalográficas, embora somente algumas delas sejam usadas; elas também estão presentes em materiais ferroelétricos amórficos. Entre os materiais piezelétricos, podem ser citados: os cristais de quartzo (SiO_2), niobato de lítio ($LiNbO_3$), tantalato de lítio ($LiTaO_3 - LT$), entre outros; alguns semicondutores, sendo os mais usados o óxido de zinco (ZnO), o sulfeto de cádmio (CdS) e o nitreto de alumínio (AlN); os polímeros, tal como o polyvinylidene fluoride (PVDF ou PVF_2); e as cerâmicas piezelétricas. As cerâmicas piezelétricas são um tipo de multicristal dielétrico com uma elevada constante dielétrica, e são fabricadas por dois processos principais. Primeiro, elas são aquecidas em alta temperatura. Após o aquecimento, as cerâmicas apresentam a estrutura cristalina ilustrada na Figura 5 (a), mas ainda não possuem a propriedade piezelétrica porque os dipolos elétricos têm uma orientação randômica e o momento elétrico

total é cancelado. Para as cerâmicas tornarem-se piezelétricas, elas devem ser polarizadas. Essa polarização é obtida através da aplicação de um campo elétrico DC intenso, na ordem de kV/mm, que orienta os dipolos do material, conforme pode ser visto na Figura 5 (b). Devido a sua forte propriedade dielétrica, os dipolos da cerâmica permanecem orientados, mesmo após o campo elétrico ser retirado, apresentando uma intensa propriedade piezelétrica, como representado na Figura 5 (c).

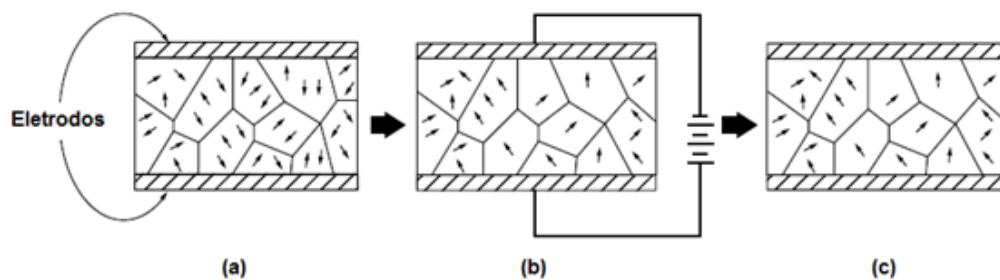


Figura 5 - Processo de fabricação das cerâmicas piezelétricas através do (a) aquecimento em alta temperatura, (b) da aplicação de um campo elétrico intenso e (c) orientação final dos dipolos. Fonte: Batista (2010).

Entre as cerâmicas piezelétricas mais utilizadas, destacam-se o titanato de bário ($BaTiO_3$), que é utilizado em transdutores ultrassônicos e, mais recentemente, o titanato zirconato de chumbo ($PbTiO_3 \cdot PbZrO_3$) que, como foi citado no início deste capítulo, é conhecido como PZT. Quando comparadas com outros materiais piezelétricos, as cerâmicas de PZT apresentam as seguintes vantagens: bom acoplamento eletromecânico, boa estabilidade, alta rigidez, resposta linear para campo elétrico de baixa intensidade, e baixo custo (LIN; GIURGIUTIU, 2006).

Geralmente, os transdutores piezelétricos utilizados na detecção de danos estruturais são constituídos por pequenas placas delgadas de cerâmicas de PZT revestidas, em ambas as faces, por um filme metálico que serve como eletrodo. Exemplos de transdutores desse tipo são as cerâmicas produzidas pela Piezo Systems, comumente utilizadas em aplicações SHM. Essas cerâmicas são fornecidas em vários tamanhos, diversas espessuras e formas, como podem ser conferidas na Figura 6.



Figura 6 - Exemplos de cerâmicas de PZT produzidas pela Piezo Systems. Imagens retiradas do site <http://www.piezo.com>

Esses transdutores são cortados na forma e tamanho desejados e fixados por meio de adesivos na estrutura a ser monitorada. Devido ao seu bom acoplamento eletromecânico, é estabelecida uma relação entre a impedância mecânica da estrutura e a impedância elétrica do transdutor. Esse é o conceito básico da técnica da impedância EMI.

2.5. Método da fratura de uma ponta de grafite (PLB)

O método da fratura de uma ponta de grafite, *pencil lead break* – PLB - é adotado como um procedimento padrão (STANDARD GUIDE, 2010) pela *American Society for Testing and Materials* (ASTM) para caracterizar sensores de emissão acústica, e recentemente foi verificada a sua viabilidade para estimar a sensibilidade de transdutores piezelétricos para detecção de dano baseada no método EMI (ALMEIDA *et al.*, 2014). Consiste basicamente em quebrar um grafite no suporte ou estrutura em que o transdutor está instalado. Quando o grafite é quebrado, é liberado um estresse impulsivo e, conseqüentemente, uma onda elástica de banda larga, permitindo caracterizar o transdutor piezelétrico em uma larga faixa do espectro de frequência.

2.6. Monitoramento da Integridade Estrutural (SHM)

O processo de monitoramento da integridade estrutural *Structural Health Monitoring* (SHM), esta relacionado com o conceito de dano estrutural. Danos podem ser alterações de massa, rigidez ou propriedades de dissipação de energia do sistema (FARRAR; WORDEN, 2007). Podendo ser

entendido como trincas, corrosões, cortes, afrouxamento de parafusos, delaminações, aderência de massas em estruturas, dentre outros.

Ainda, segundo Farrar e Woeden (2007), um processo de reconhecimento de padrões para monitoramento de integridade estrutural consiste de quatro passos sequenciais, são eles:

1. Avaliação Operacional;
2. Aquisição, normalização e seleção de dados;
3. Reconhecimento de padrões e condensação das informações;
4. Desenvolvimento de modelo estatístico.

As avaliações operacionais consistem em uma avaliação prévia, que procura responder questões relacionadas à aptidão da implementação de um sistema de identificação de dados, entre elas:

- I. Qual é a justificativa para a implementação de um sistema *SHM*?
- II. Qual a definição de dano ou múltiplos danos para o sistema a ser investigado?
- III. Quais são as condições (operacional e ambiental) em que o sistema será monitorado?
- IV. Quais são as limitações para aquisição de dados nas condições de operação do sistema *SHM*?

Já a etapa de aquisição, normalização e seleção de dados, consiste em um delicado processo de seleção de cadeia de medição do sistema *SHM*, seleção das técnicas que serão abordadas para distinguir ou eliminar os sinais, as influências geradas devido às condições ambientais e de operação do sistema e, finalmente, a definição de técnicas que são responsáveis pela seleção dos dados que serão destinados ao processo de determinação de padrões. Esta última fase consiste em selecionar, de acordo com critérios de escolhas

relacionados à experiências adquiridas sobre o sistema, os sinais que serão destinados a próxima etapa do processo *SHM*. Técnicas de processamento de sinais, como filtragem e reamostragem, podem fazer parte do processo de seleção dos dados.

Contudo, é possível notar que a etapa de aquisição, normalização e seleção de dados é muito importante, e exige uma dinâmica constante relacionada a implementação de aprendizados e técnicas que vão sendo desenvolvidas ou aprimoradas.

Na etapa de reconhecimento de padrões e condensação das informações são utilizados padrões para correlacionar os sinais, ou as informações extraídas dos sinais, a um diagnóstico da estrutura, como por exemplo, aos padrões: estrutura com dano, sem dano ou estrutura com danos múltiplos. Essa é a área do processamento SHM que mais recebe atenção na literatura técnica.

Por fim, a fase de desenvolvimento de modelo estatístico consiste na implementação de algoritmos que possam dizer se as mudanças nas características selecionadas (para identificar os sistemas danificados) são estatisticamente significativas. Outra finalidade é a implementação dos algoritmos que operam sobre os dados extraídos para quantificar o estado dos danos na estrutura.

O estado do dano de uma estrutura pode ser classificado em uma categoria dentre cinco, discutidas em Rytter (1993), e que podem ser representadas pelas seguintes questões:

1. Existência. O dano existe no sistema?
2. Localização. Onde o dano está no sistema?
3. Tipo. Qual o tipo de dano presente?
4. Severidade. Quão severo é o dano?
5. Prognóstico. Qual é o tempo útil restante da estrutura?

Modelos estatísticos também são utilizados para minimizar a ocorrência de falsos alarmes, que consistem em indicar, equivocadamente, a

presença de dano(s), conhecido como falso-positivo. Ou, por outro lado, de não indicar a presença do(s) dano(s) quando o(s) mesmo(s) existe(m) na estrutura, denominado falso-negativo.

A partir dos estados de danos apresentados acima, um sistema SHM pode ser classificado em níveis, diretamente relacionados à capacidade do mesmo, conforme a clássica referência de Doebling *et al.*, (1998):

- NÍVEL 1 – Detecta o dano;
- NÍVEL 2 – Detecta e localiza o dano;
- NÍVEL 3 – Detecta, localiza e quantifica o dano;
- NÍVEL 4 – Detecta, localiza, quantifica o dano, e estima a vida útil restante.

Incorporando materiais inteligentes ao sistema de detecção, Inman (2001) propôs mais três níveis:

- NÍVEL 5 – Combina o nível 4 com estruturas inteligentes para auto-diagnóstico de danos estruturais;
- NÍVEL 6 – Combina o nível 4 com estruturas inteligentes e controle para formar um sistema de auto-reparo estrutural;
- NÍVEL 7 – Combina o nível 1 com controle ativo e estruturas inteligentes para obtenção de um sistema simultâneo de controle de monitoramento.

2.7. Método da Impedância Eletromecânica (EMI)

Entre os vários métodos possíveis para detecção de dano estrutural (CIANG *et al.*, 2008; STASZEWSKI & LEE, 2007), o método EMI é uma forma de avaliação não destrutiva (NDE) que se destaca por sua simplicidade e por utilizar transdutores piezelétricos de baixo custo. Esses transdutores, geralmente cerâmicas de PZT, são colados na estrutura a ser monitorada por meio de um adesivo de alta rigidez, que pode ser uma cola instantânea a base de cianoacrilato ou uma resina de epóxi. Devido ao efeito piezelétrico, é estabelecida uma relação entre as propriedades mecânicas da estrutura e a impedância elétrica

do transdutor. Logo, é possível monitorar variações dessas propriedades através da medição da impedância elétrica (CAWLEY, 1984).

No método EMI, cada transdutor permite a excitação forçada da estrutura e, simultaneamente, a medição da impedância elétrica. Em vista disso, é comum na literatura atribuir às cerâmicas de PZT as funções de sensor (efeito piezelétrico direto) e de atuador (efeito piezelétrico reverso).

A relação entre a impedância elétrica do transdutor piezelétrico e a impedância mecânica da estrutura a ser monitorada pode ser obtida através de modelos eletromecânicos. Em um dos modelos mais simples para uma pastilha de PZT quadrada (BAPTISTA & FILHO, 2010; BATISTA *et al.*, 2014), a impedância elétrica é dada por:

$$Z_E(\omega) = \frac{1}{j\omega C_0} \parallel jZ_T \left(\frac{s_{11}}{d_{31}\ell} \right)^2 \left[\frac{1}{2} \tan\left(\frac{k\ell}{2}\right) - \frac{1}{\sin(k\ell)} + \frac{Z_S}{j2Z_T} \right] \quad (13)$$

Onde $Z_E(\omega)$ é a impedância elétrica, ω é a frequência angular, C_0 é a capacitância estática para o quadrado de um trecho de ℓ , k é o número da onda, Z_T é a impedância mecânica do transdutor piezelétrico, Z_S é a impedância mecânica da estrutura monitorada, d_{31} é uma constante piezelétrica, S_{11} é a conformidade da constante de um campo elétrico, \parallel indica uma conexão paralela, e j é a unidade de número imaginário.

De acordo com a Equação (13), há uma relação entre a impedância mecânica da estrutura monitorada (Z_S) e a impedância elétrica do transdutor $Z_E(\omega)$. Portanto, qualquer alteração na impedância mecânica da estrutura causada por um dano, tal como trinca, corrosão ou desgaste, implica em uma variação correspondente na impedância elétrica, que é mais simples de ser medida. Assim, a condição da estrutura pode ser monitorada por meio da medição da impedância elétrica do transdutor em uma faixa de frequência apropriada (PEAIRS *et al.*, 2007; BATISTA & FILHO, 2010). O campo de aplicação é vasto e o método EMI tem sido utilizado em uma grande variedade de estruturas, tais

como estruturas de concreto (YANG & DIVSHOLI, 2010; YANG *et al.*, 2010) e estruturas aeronáuticas (BOUKABACHE *et al.*, 2012).

Com o transdutor fixado na estrutura, sua impedância elétrica passa a apresentar picos correspondentes às frequências naturais da estrutura. São as alterações nesses picos que devem ser analisadas para a identificação de um possível dano estrutural. A identificação do dano é feita comparando-se a impedância elétrica do transdutor medida com a estrutura, em uma condição inicial considerada íntegra, com a impedância medida após a estrutura ter sofrido um possível dano. Essa comparação é realizada por meio de índices de dano. Os índices mais usados na literatura são o RMSD (*Root Mean Square Deviation*) e o CCDM (*Correlation Coefficient Deviation Metric*).

O índice RMSD é baseado na norma euclidiana (GIURGIUTIU & ROGERS, 1998). Algumas modificações nesse índice foram sugeridas por vários pesquisadores, sendo um dos mais utilizados dado por:

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

onde os subscritos H e D indicam a condição saudável e com dano, respectivamente, $Z_{E,H}(k)$ e $Z_{E,D}(k)$ são as assinaturas de impedância elétrica, para a estrutura em condições saudáveis e danificadas, respectivamente, e são medidas em frequência k que variam de ω_I (frequência inicial) até ω_F (frequência final).

Já o índice CCDM é baseado no coeficiente de correlação (MARQUI *et al.*, 2008), e é calculado como segue (BAPTISTA *et al.*, 2014):

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

onde $Z_{E,H}(k)$ e $Z_{E,D}(k)$ são as assinaturas como definido acima, e $\bar{Z}_{E,H}$ e $\bar{Z}_{E,D}(k)$ são a media das assinaturas em condições saudável e com dano, respectivamente, que são calculados sobre uma faixa de frequência entre ω_I (a frequência inicial) e ω_F (frequência final).

Nas Equações (14) e (15), $Z_{E,H}(k)$ e $Z_{E,D}(k)$ podem ser tanto o módulo da impedância elétrica do transdutor como a parte real (resistência) ou imaginária (reatância). No entanto, neste trabalho foi utilizada a parte real das assinaturas de impedância, que tem sido reportada na literatura como mais sensível ao dano estrutural e menos sensível às variações de temperatura (NA & LEE, 2013; BHALLA *et al.*, 2003). Os índices RMSD e CCDM devem ser calculados em uma faixa de frequência que contenha as frequências naturais da estrutura mais sensíveis ao dano, e garanta uma boa repetitividade entre as medidas. Além disso, as frequências dessa faixa devem ser altas o suficiente para que estas tenham um comprimento de onda menor do que o tamanho do dano que se deseja detectar (STOKES & CLOUD, 1993). Frequências elevadas, entretanto, limitam a região de sensibilidade do transdutor (PARK *et al.*, 2003), mas podem ser vantajosas para a localização de dano em sistemas que utilizam rede de transdutores.

2.7.1. Impedância Eletromecânica aplicada a sistemas SHM

A técnica de monitoramento estrutural baseada na Impedância Eletromecânica utiliza um ou mais transdutores como sensor ou atuador.

A interação entre um transdutor piezelétrico e a estrutura a ser monitorada pode ser observada a partir de um sistema de 1 grau de liberdade utilizando um transdutor piezelétrico como atuador e sensor, Figura 7, apresentado por Liang *et al.*, (1994, 1997).

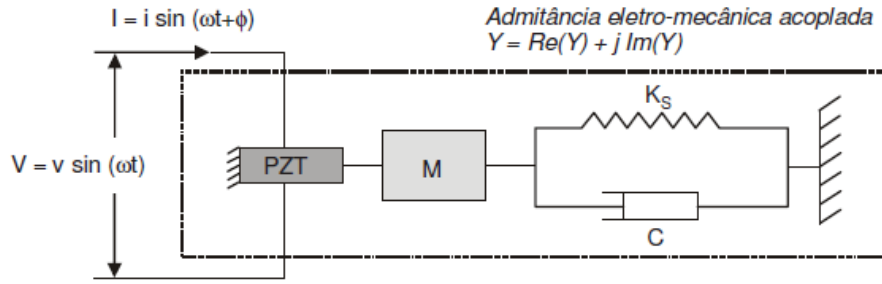


Figura 7 - Modelo utilizado para representar um sistema eletromecânico acoplado
Fonte: Inman et al. (2005).

A partir do modelo apresentado na figura acima é possível encontrar uma equação para representar a Impedância EMI em termos de admitância:

$$Y(\omega) = j\omega\alpha \left(\epsilon_{33}^{-T} (1 - i\delta) - \frac{z_s(\omega)}{z_s(\omega) - z_a(\omega)} d_{3x}^2 \hat{Y}_{xx}^E \right) \quad (16)$$

onde $Y(\omega)$ é a admitância (inverso da impedância), α é a constante geométrica do PZT, ϵ_{33}^{-T} é a constante dielétrica sob campo de tensão nulo, δ é o fator de perda dielétrica do PZT, d_{3x}^2 é a constante de acoplamento piezelétrico na direção x submetido a campo de tensão nulo, \hat{Y}_{xx}^E é o módulo de Young complexo do PZT submetido a um campo elétrico nulo, j representa o número imaginário puro (0,1), $z_s(\omega)$ e $z_a(\omega)$ são, respectivamente, impedância mecânica da estrutura e do PZT.

No modelo de um grau de liberdade apresentado por Liang *et al.* (1994), a influência da camada de adesivo (cola) entre o transdutor e a estrutura base não é considerada.

Uma vantagem na utilização da técnica de impedância Eletromecânica quando comparada a outras técnicas de monitoramento em sistemas SHM é a possibilidade de detectar falhas em estado inicial. Porém, uma desvantagem é que o sinal de impedância elétrica é sensível não só pela presença de danos estruturais, mas também aos níveis de ruído nos sinais e de variações das condições ambientais, como diferenças de pressão e temperatura.

Park *et al.* (1999) apresentam um estudo das influências geradas pelas variações de temperatura nos sinais de impedância elétrica. Os estudos abrangem a faixa de temperatura em 25°C e 75°C. Os autores propõem uma técnica para compensação das influências geradas nos sinais, utilizando apenas a parte real do sinal da impedância.

Trabalhos publicados mostram que a técnica *SHM* baseada na impedância EMI vem sendo implementada experimentalmente em vários tipos de estruturas. Gonzalez *et al.*, (2015), utilizou a técnica de Impedância Eletromecânica por meio da análise de variância para detectar danos estruturais em um painel aeronáutico, utilizando *PZTs* do tipo *buzzer*, modelo 7BB-35-3 do fabricante Murata Manufacturing, acoplados ao painel. Os danos foram simulados na estrutura soltando os parafusos do painel no suporte metálico. O circuito eletrônico utilizado para medir a impedância elétrica é apresentado na Figura 8.

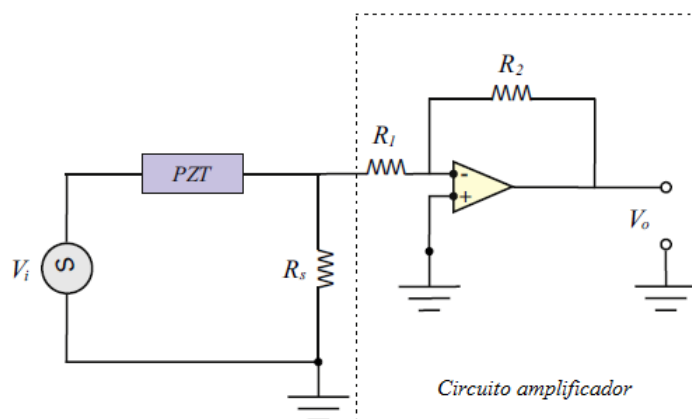


Figura 8 - Circuito para medição da impedância elétrica.
Fonte: Gonzalez *et al.* (2015).

Shin e Oh (2009) aplicaram a técnica da Impedância Eletromecânica para monitorar o aumento de força em estrutura de concreto. Para os experimentos, os autores usaram amostras de concreto cilíndrico com um diâmetro de 100 mm e uma altura de 200 mm, que é normalmente utilizado para a avaliação de resistência à compressão, usando um total de 16 amostras de concreto (1 para aquisição da assinatura EMI e 15 para os testes de resistência à compressão). Para a aquisição das assinaturas EMI, foi utilizado um analisador de

impedância (HP 4294A). De acordo com os resultados experimentais, observou-se que a assinatura EMI é sensível ao aumento da força sobre o concreto. Ainda, Notou-se que o valor RMSD tem uma forte correlação com a quantidade de força aplicada e a resistência do material, por conseguinte, pode ser utilizado como um indicador adequado e sensível para o monitoramento de força e resistência em concreto.

A Figura 9 apresenta as imagens de aparatos utilizados pelos pesquisadores citados anteriormente.

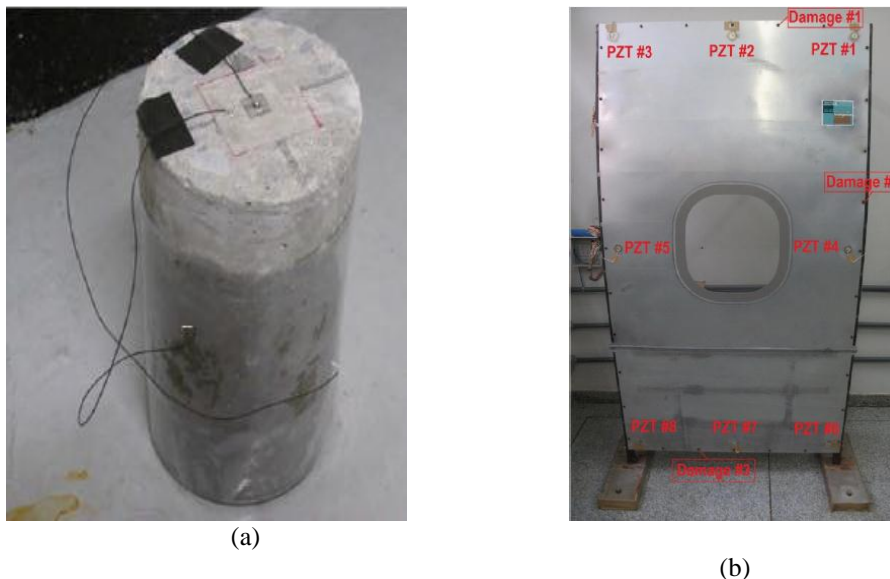


Figura 9 - Aparatos experimentais utilizados pelos pesquisadores citados acima para implementação da técnica EMI, Fonte: (a) Cilindro de concreto (Shin e Oh., 2009); (b) Painel aeronáutico (Gonsalez et al., 2015).

Ai *et al.* (2014) utilizaram a técnica da Impedância Eletromecânica e sensores PZT para monitorar o dano em uma viga de aço, causado pela corrosão em momentos diferentes. Por meio da UMI (*United Mechanical Impedance*), a combinação das impedâncias mecânicas da estrutura e os sensores de PZT que, juntos refletem a mudança nas propriedades estruturais causadas por danos e dos valores calculados a partir do índice RMSD da parte real da UMI, é possível determinar a deterioração da estrutura (danos quantitativos).

3. Material e Métodos

3.1. Introdução

Os ensaios experimentais foram realizados em uma máquina retificadora plana, onde um banco de ensaios foi desenvolvido empregando-se um rebolo de CBN vitrificado e aço ABNT 1020, com objetivo de induzir danos metalúrgicos mais facilmente. Foram utilizados dois diafragmas piezelétricos de baixo custo, modelo 7BB-27-4 da Murata Manufacturing, sendo um fixado no suporte e outro na peça, permitindo, assim, identificar qual configuração oferece melhores resultados, como é apresentado na Figura 10. Quanto ao torque dos parafusos do suporte, não foi necessário medi-los, pois a peça retificada não foi retirada do suporte durante os ensaios.

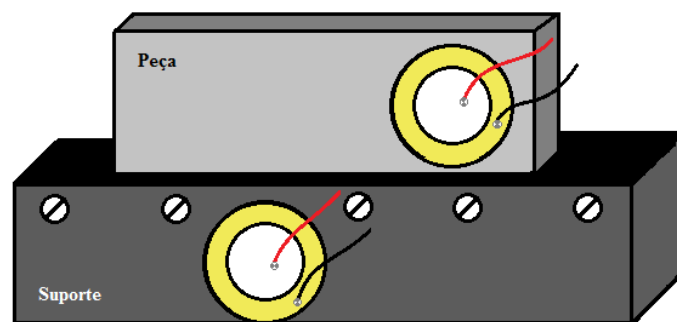


Figura 10 - Posicionamento dos sensores PZT.

3.2. Banco de Ensaio

Cada ensaio consistiu em passar uma única vez o rebolo pelo comprimento do corpo de prova, de maneira que as assinaturas de impedância elétrica dos dois sensores fossem obtidas antes e depois da usinagem da peça. Este procedimento foi repetido para cada profundidade de corte, que variou de 10 μm a 100 μm . A Figura 11 ilustra o procedimento referente aos ensaios realizados e o momento em que as aquisições das assinaturas de impedância eram realizadas.

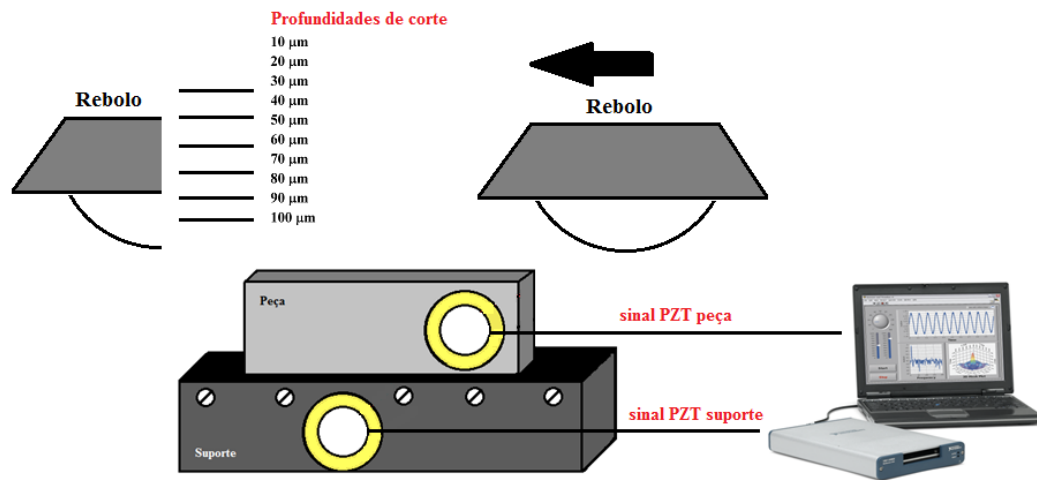


Figura 11 - Procedimentos realizados nos ensaios.

A medição da impedância é normalmente realizada com analisadores de impedância comerciais, que são de alto custo, volumosos e apresentam muitos recursos não necessários para o método EMI. Para contornar esses problemas, pesquisadores têm proposto sistemas de medição alternativos de baixo custo e compactos (NA & LEE, 2013; TAYLOR *et al.*, 2009). Neste trabalho, as assinaturas de impedância foram obtidas utilizando o sistema de medição proposto em (BAPTISTA & FILHO, 2009), que utiliza um *data acquisition* (DAQ) *device* conectado a um microcomputador pessoal (PC) através de uma porta USB (Universal Serial Bus). O princípio básico de operação é apresentado na Figura 12. Este sistema utiliza um dispositivo DAQ multifuncional, que possui, ao menos, um conversor digital-analógico (DAC), que permite gerar o sinal de excitação $x(t)$, e um conversor analógico-digital (ADC), que permite adquirir o sinal de resposta $y(t)$ do transdutor. Além do DAQ e do PC, o sistema utiliza apenas um resistor R_S para a conexão do transdutor. O software de controle e operação foi desenvolvido em LabVIEW. As assinaturas de impedância elétrica são obtidas a partir da função de resposta em frequência (FRF), que é calculada a partir da transformada discreta de Fourier (DFT) dos sinais digitalizados $x[n]$ e $y[n]$, correspondentes aos sinais analógicos de excitação e de resposta do transdutor respectivamente. A DFT é calculada no software LabVIEW utilizando o algoritmo da transformada rápida de Fourier (FFT).

A Figura 12 apresenta o esquema de aquisição de dados proposto, tendo como base o sistema proposto por Batista (2010).

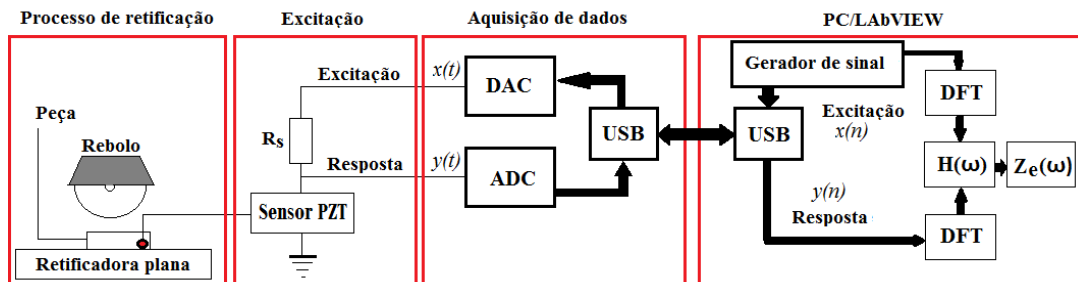


Figura 12 - Esquema do banco de ensaios e sistema de aquisição de dados baseado na impedância eletromecânica.

O dispositivo DAQ utilizado neste estudo foi o modelo USB-6361, da National Instruments, que permite a aquisição das assinaturas de impedância de dois transdutores simultaneamente, como no arranjo apresentado na Figura 10. O dispositivo DAQ foi ajustado com uma taxa de amostragem de 2 MS/s (mega samples/seconds), e os transdutores foram excitados com um sinal chirp com 5 V de amplitude e faixa de frequência de 0 a 200 kHz com passo de 2 Hz, fornecendo assinaturas de impedância nessa mesma faixa e com o mesmo passo de frequência.

Sob a retificadora tangencial plana, o corpo de prova e o suporte de fixação, bem como os transdutores instalados são apresentados na Figura 13.

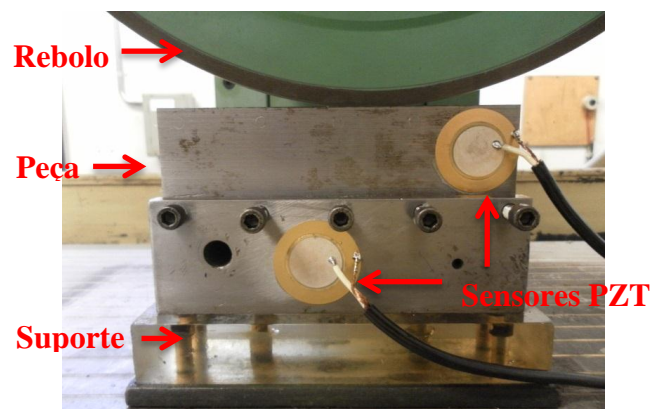


Figura 13 - Banco de ensaios.

Foram utilizados os seguintes parâmetros para o processo de usinagem:

- Velocidade periférica do rebolo: 33 m/s;
- Velocidade da peça: 0,044 m/s;
- Tipo de fluido refrigerante: Emulsão água-óleo 4 %;
- Pressão de 0,4 Mpa e Vazão de 84 l/min
- Tipo do rebolo: CBN – Vitrificado 2684 01-0262 B151;
- Diâmetro externo do rebolo: 344 mm;
- Largura do rebolo: 10 mm;
- Dimensões da peça: 150mm x 48mm x 7mm.

Os resultados experimentais são apresentados e discutidos na próxima seção.

4. Resultados e Discussões

4.1. Avaliação da resposta em frequência do Transdutor Piezelétrico

O objetivo desta etapa é a obtenção da resposta em frequência, pelo método PLB, descrito anteriormente, do transdutor piezelétrico, bem como do sensor de emissão acústica e sensor de vibração (acelerômetro). Esses últimos, muito usados no monitoramento do processo de retificação e, portanto, comparações entre as respostas serão realizadas. Para isso, montou-se um banco de ensaio que consistiu de um bloco de aço ABNT 1020, nas dimensões 110 mm de comprimento, 70 mm de largura, e 9 mm de altura, onde foram fixados os sensores mencionados. O sensor de EA e módulo processador de sinais, modelo DM-42, são do fabricante Sensis. O acelerômetro utilizado foi o de modelo 353B03 e um módulo condicionador de sinais, modelo 482B11, ambos do fabricante PCB Piezotronic..

Uma lapiseira da marca Pentel, 0,5 mm, Grafite 2H, foi posicionada entre os três sensores, onde se realizou a quebra de 3 mm de ponta do grafite. O banco de ensaios é apresentado na Figura 14.

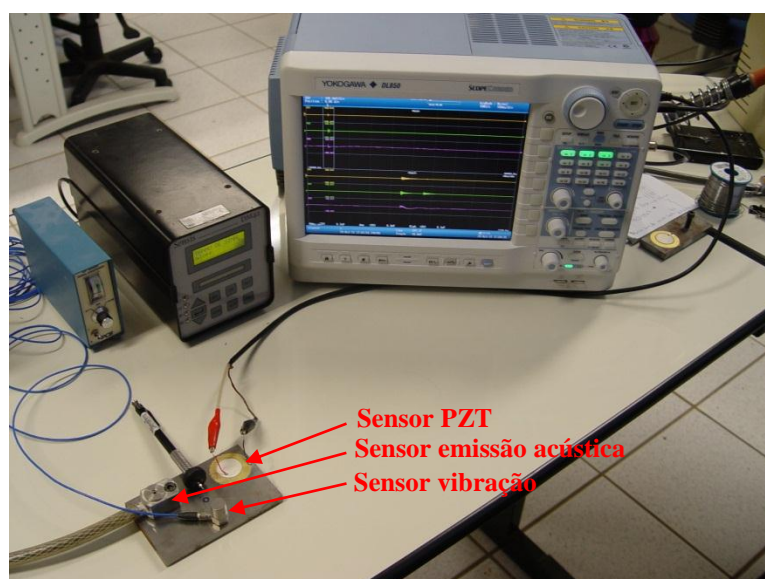


Figura 14 - Banco de ensaios para avaliação em frequência do transdutor PZT

Para a aquisição dos sinais foi utilizado um osciloscópio Yokogawa, modelo DL850, com janela de aquisição de 100 ms e uma taxa de amostragem de 10 milhões de amostras por segundo. Com o objetivo de garantir uma melhor análise dos resultados, o teste foi repetido três vezes.

Para cada um dos ensaios, referentes a cada um dos sensores, foram gerados gráficos de densidade espectral de potência (PSD), permitindo avaliar a resposta em frequência do sensor piezelétrico, comparando-o com sensores comerciais e largamente utilizados em diversos trabalhos científicos, como é apresentado na Figura 15.

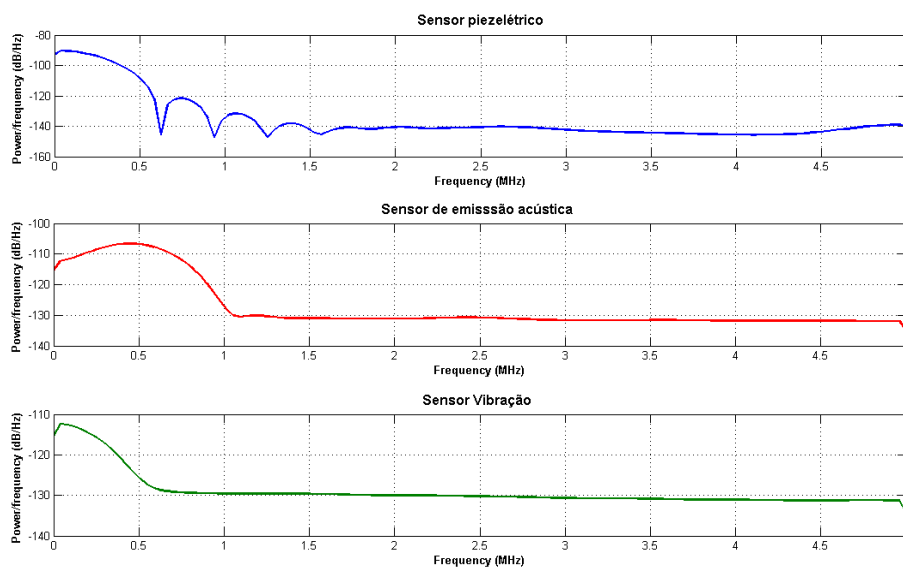


Figura 15 - Gráficos de densidade espectral referente ao sinal dos sensores de emissão acústica, vibração e PZT

Nota-se que o sensor piezelétrico apresenta maiores amplitudes em frequências entre 1 kHz e 500 kHz, mostrando ser possível sua aplicação em situações semelhantes a dos demais sensores utilizados nos ensaios de PLB. A partir dessa frequência, o sensor PZT passa a atenuar significativamente o sinal, impossibilitando a análise de frequências mais altas.

4.2. Definição do tamanho do Transdutor Piezelétrico

Com objetivo de avaliar o transdutor a ser utilizado nos ensaios de retificação, um novo banco de ensaios foi construído, utilizando as mesmas

especificações do item anterior, porém utilizando três transdutores piezelétricos de tamanhos diferentes. A Figura 16 apresenta os transdutores avaliados.

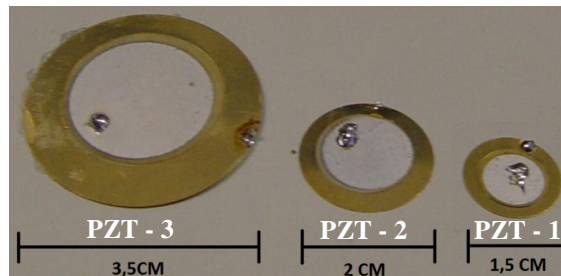


Figura 16 - Transdutores PZT de 3,4 cm (PZT3), 2cm (PZT2) e 1,5cm (PZT1)

Para cada um dos ensaios, referente a cada um dos transdutores PZT, foram gerados gráficos com o sinal puro, sinal em função da frequência (FFT), densidade espectral (PSD) e média do sinal RMS (valor médio quadrático).

A Figura 17 apresenta os sinais referente a cada um dos transdutores, sendo necessário o uso de um filtro passa alta de 2kHz para eliminar ruídos de baixas frequências.

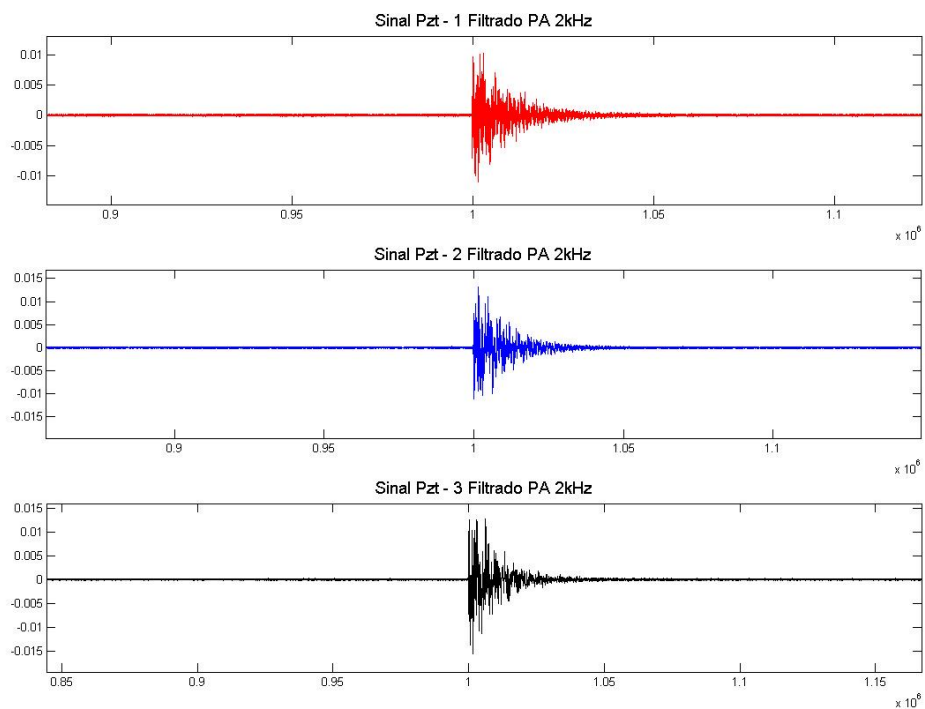


Figura 17- Sinais referente aos sensores PZT

Com base nos gráficos na Figura 18, referente a FFT dos sinais de cada um dos transdutores analisados, é possível notar que todos apresentam comportamento espectral na mesma faixa de frequência, porém apresentam pequena diferença em amplitude.

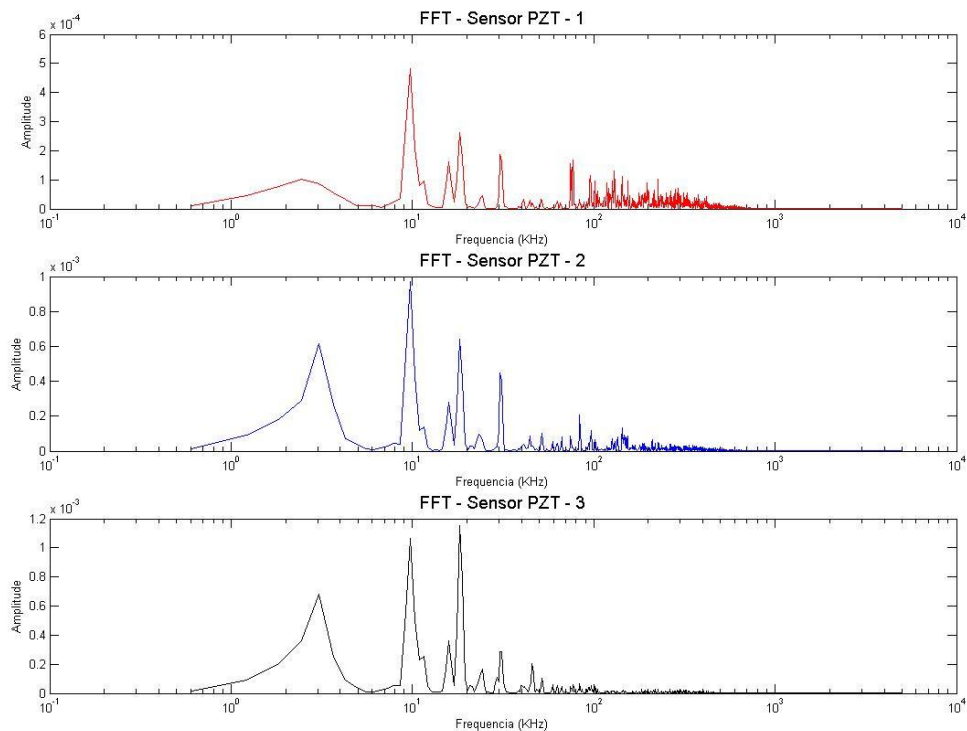


Figura 18 - Sinais dos transdutores PZT em função da frequência (FFT)

Para melhor avaliar o comportamento espectral dos transdutores, também foi gerado um gráfico de densidade espectral, como é apresentado na Figura 19. No gráfico as maiores amplitudes ficaram na faixa de até 500kHz, isso para os três transdutores, apresentando maior amplitude para o PZT3, logo abaixo o PZT 2 e por ultimo o PZT1.

Nota-se um decaimento das curvas do sinal de densidade espectral, para todos os transdutores, a partir de 500kHz passando a atenuar significativamente o sinal, impossibilitando a análise de frequências mais altas.

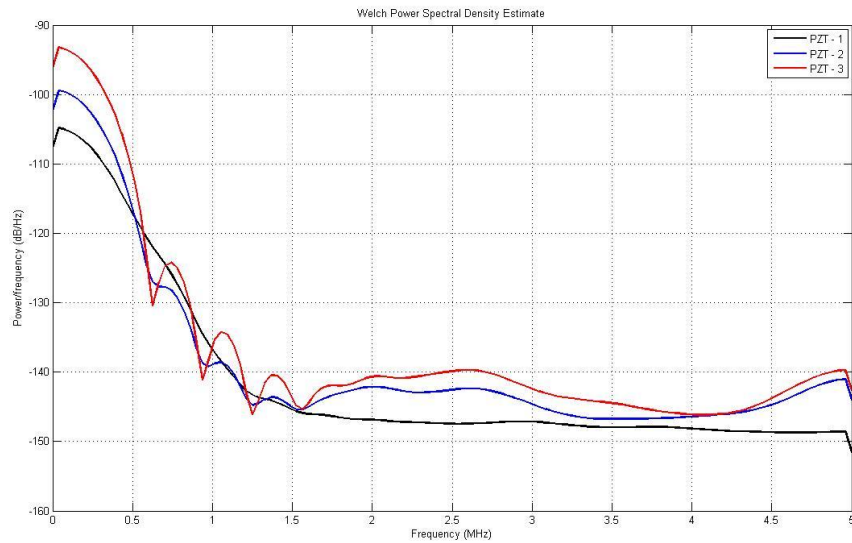


Figura 19 - Densidade espectral dos transdutores PZT1, PZT2 e PZT3

De acordo com a análise dos gráficos da Figura 18 e Figura 19, determinou-se que o transdutor, cujas características melhor apresentaram resultados foi o PZT3, de 3,5cm. Entretanto, análises mais rigorosas podem ser obtidas via tratamento de sinais com o auxílio de parâmetros estatísticos. Com o auxílio de softwares de manipulação matemática, como o MATLAB, Origin, dentre outros, é possível efetuar o tratamento de sinais e obter informações tais como o valor RMS (valor médio quadrático), etc.

Em certo intervalo Δt , o valor RMS do sinal puro de emissão acústica pode ser expresso pela Eq. (17) (Liu, 1991; Webster *et al.*, 1996).

$$AE_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t-T}^t f_{raw}(t)^2 .dt} \quad (17)$$

Onde T corresponde ao tempo de integração, e $f_{raw}(t)$ é o sinal puro ou bruto.

Na Figura 20 são apresentadas as médias dos valores (RMS), aplicado aos sinais puros filtrados em 2kHz (filtro passa alta) de cada um dos transdutores, sendo utilizado um número de cinco repetições (aquisições) para cada transdutor.

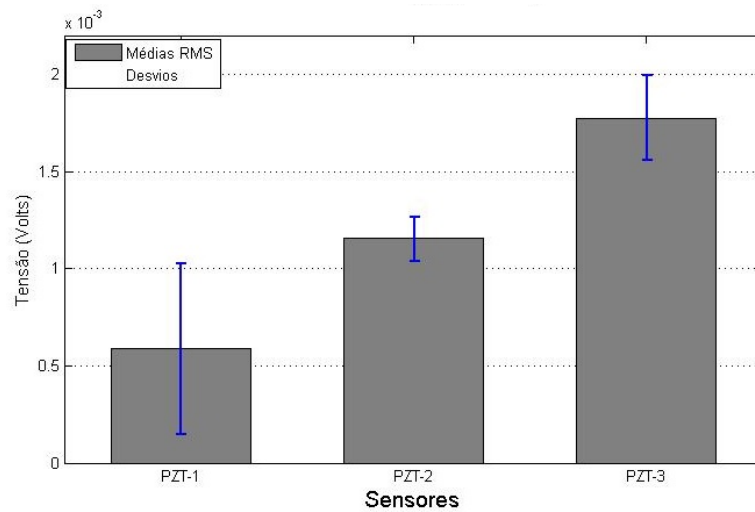


Figura 20 - Médias dos valores RMS referente aos sinais dos transdutores PZT

Com base nos resultados apresentados nos gráficos da Figura 20, foi determinado que o transdutor a ser utilizado nos ensaios de retificação seria o PZT3, pois, mesmo apresentando um desvio padrão maior que o PZT2, ainda assim foi o que apresentou maior sensibilidade, indicando ser a melhor opção.

4.3. Caracterização do Transdutor Piezelétrico

Para a caracterização do transdutor piezelétrico por meio do método PLB, foi desenvolvido um banco de ensaios, que consistiu em uma lapiseira com grafite de 0.5 mm de diâmetro e aproximadamente 3 mm de comprimento, um dispositivo DAQ (o mesmo citado anteriormente), adicionando um filtro passivo de *anti-aliasing* com frequência de corte de 720 kHz.

O grafite foi quebrado no centro da superfície da peça, e o ângulo entre o grafite e peça foi de aproximadamente 45°. Os sinais dos transdutores foram adquiridos no mesmo instante da quebra do grafite, como é apresentado na Figura 21.

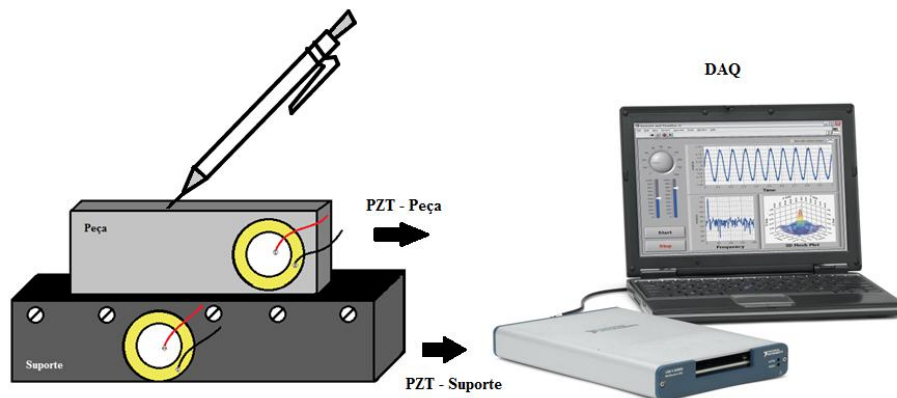


Figura 21. Banco de ensaios para a aplicação do método PLB

Os sinais obtidos foram analisados no domínio da frequência através da *power spectral density* (PSD). A PSD foi calculada utilizando o método de Welch (WELCH, 1967), com janela Hanning de 512 pontos e *overlap* de 50%. Os sinais no domínio do tempo e no domínio da frequência obtidos para os transdutores instalados na peça e no suporte são apresentados na Figura 22.

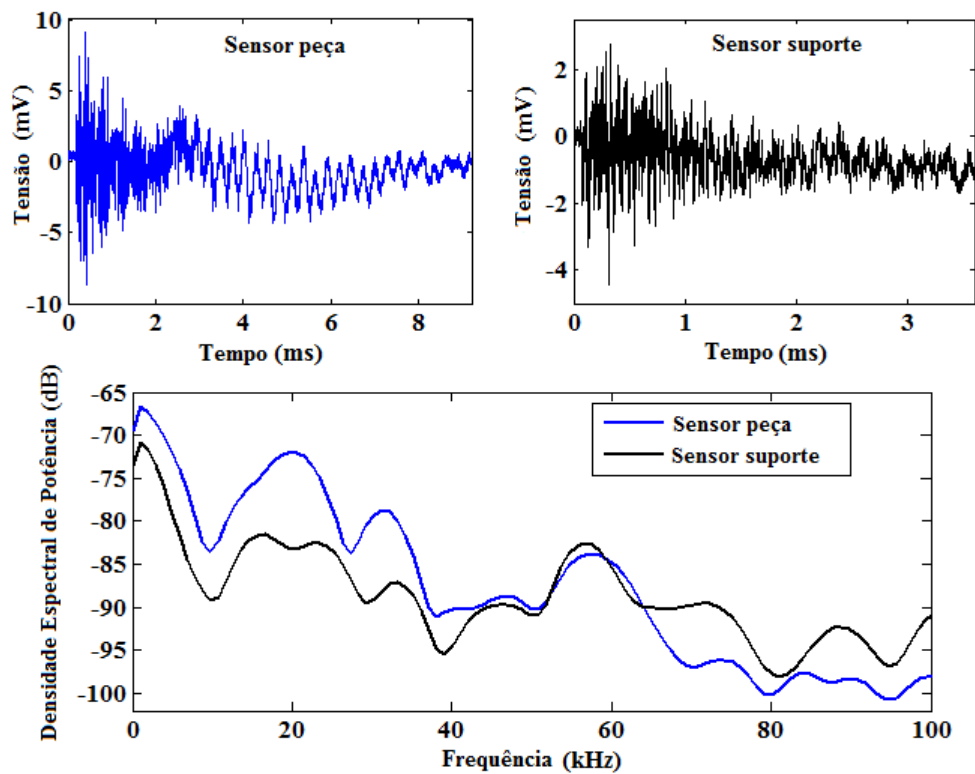


Figura 22 - Sinais no domínio do tempo e da frequência obtidos para os dois transdutores utilizando o método PLB.

De acordo com a Figura 22, a PSD é mais significativa em frequências mais baixas para ambos os transdutores. Além disso, a PSD do transdutor instalado diretamente na peça é maior do que a PSD do transdutor instalado no suporte para frequências abaixo de cerca de 50 kHz. Por exemplo, para uma frequência de 20 kHz, a diferença na PSD é de mais de 10 dB. Assim, de acordo com os resultados apresentados em (ALMEIDA *et al.*, 2014), o transdutor instalado diretamente na peça deve apresentar variações mais significativas das assinaturas de impedância elétrica durante o processo de retificação, sendo este transdutor mais sensível para o monitoramento do processo de retificação. Por outro lado, o transdutor instalado no suporte é mais interessante do ponto de vista industrial, pois é menos invasivo e mais fácil de ser instalado.

Para frequências superiores a cerca de 50 kHz, o transdutor instalado no suporte apresenta uma PSD mais alta do que o transdutor instalado na peça, embora os valores sejam significativamente inferiores aos obtidos para baixas frequências. Portanto, é esperado um desempenho melhor em frequências mais altas para esse transdutor.

Os resultados obtidos com o método EMI e a análise da sua viabilidade para monitorar o processo de retificação são apresentados na próxima seção.

4.4. Inspeção visual das peças

Após os ensaios de retificação, as peças foram submetidas à inspeção visual, sendo que as superfícies foram fotografadas e digitalizadas por scanner, e avaliadas quanto à queima (leve, média, severa e sem queima) como é apresentado na Figura 23. Ensaios com e sem fluido de corte também foram feitos a fim de se avaliar sua influência nos sinais coletados.

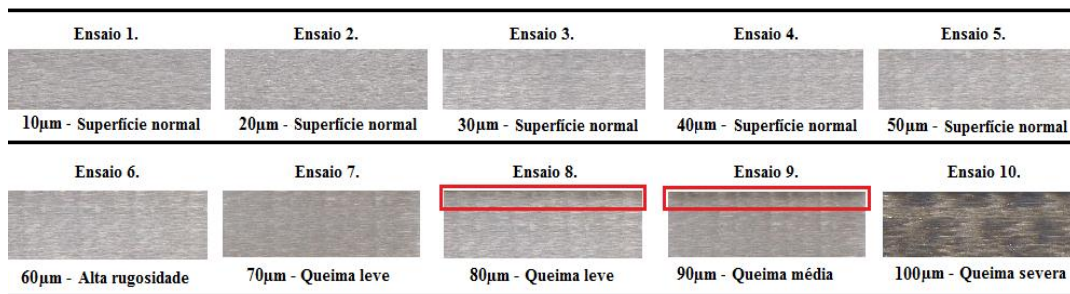


Figura 23 - Condição da superfície da peça retificada para diferentes profundidades de corte.

De acordo com a Figura 23, não é observada queima aparente na peça para uma profundidade de corte variando de 10 μm a 50 μm . Assim, a superfície da peça apresenta as condições desejadas em um processo de retificação. No entanto, para cortes a partir de 60 μm há um aumento na rugosidade da peça. Além da alta rugosidade, observou-se queima leve e queima de média severidade nos cantos da peça para profundidades de corte de 80 μm e 90 μm , respectivamente, conforme indica os círculos vermelhos na Figura 23. Para uma profundidade de corte de 100 μm ocorreu queima severa na peça, que é facilmente observada pela significativa alteração na superfície da peça.

O objetivo de um sistema de monitoramento do processo de retificação é evitar a queima da peça, como observada na Figura 23 para profundidade de corte a partir de 70 μm . Como já mencionado, neste estudo foi proposto aplicar o método EMI para monitorar o processo de retificação, relacionando a condição da superfície da peça com a variação na impedância elétrica do transdutor piezoeletrico.

4.5. Método EMI Aplicado no Processo de Retificação

Na Figura 24 e na Figura 25 são apresentadas as assinaturas de impedância em uma faixa de frequência de 10 kHz a 100 kHz para o transdutor instalado diretamente na peça e no suporte, respectivamente. Todas as assinaturas foram obtidas de uma média de três medições.

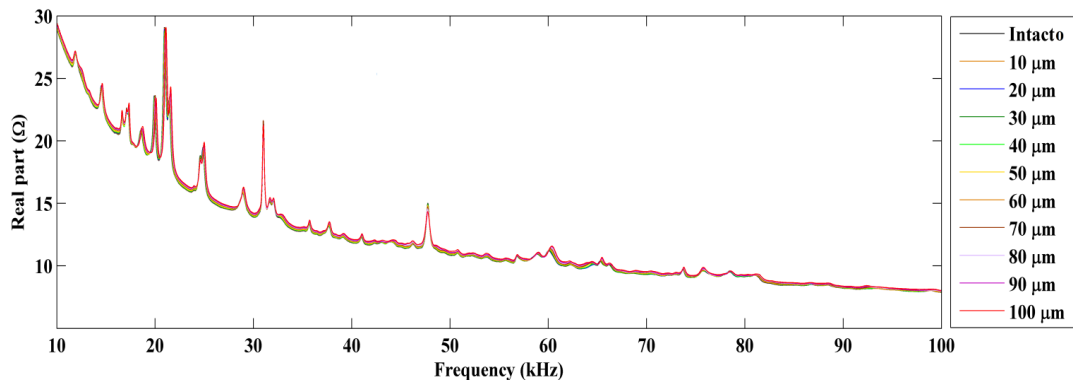


Figura 24 - Assinaturas de impedância do transdutor instalado na peça.

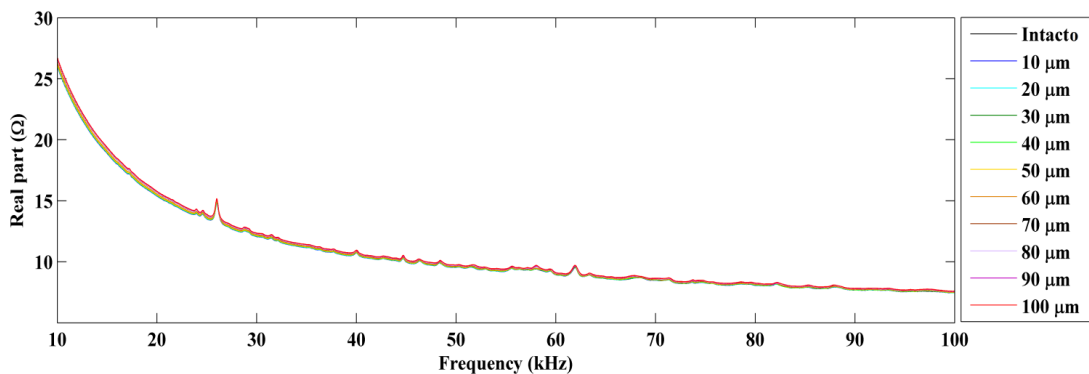


Figura 25 - Assinaturas de impedância do transdutor instalado no suporte.

Observa-se que os picos de ressonância são significativamente maiores para o transdutor instalado diretamente na peça, de acordo com a Figura 24, principalmente para frequências abaixo de 50 kHz. Essa maior variação nas assinaturas de impedância do transdutor instalado diretamente na peça foi prevista anteriormente através da caracterização pelo método PLB.

Embora as assinaturas de impedância elétrica tenham sido obtidas na faixa de frequência de 0 a 200 kHz, uma faixa mais estreita é apresentada nas Figura 26 e Figura 27 para permitir uma melhor visualização.

A Figura 26 mostra as assinaturas de impedância obtidas para o transdutor instalado diretamente na peça em uma faixa estreita de frequência de 16.5 a 17.5 kHz, permitindo observar com mais detalhes as variações conforme se varia a profundidade de corte.

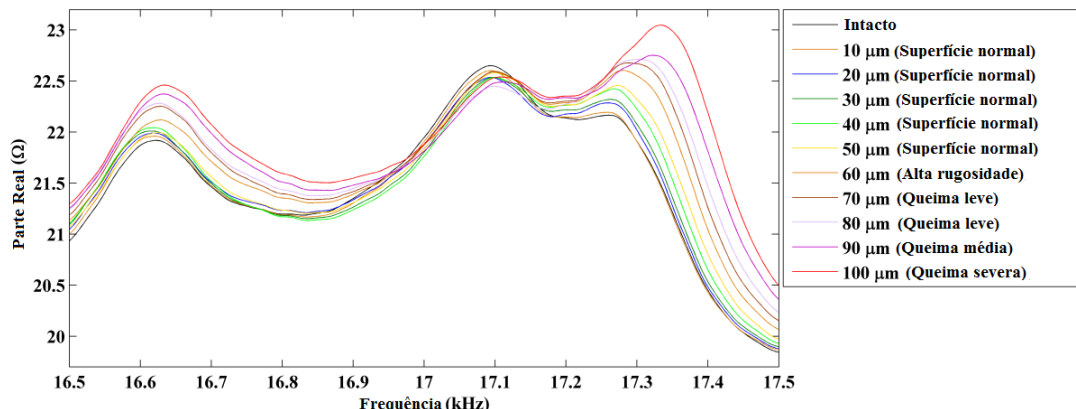


Figura 26 - Detalhe da variação das assinaturas para o transdutor instalado diretamente na peça.

Uma análise semelhante foi realizada para o transdutor instalado no suporte da retificadora. A Figura 27 mostra as assinaturas de impedância obtidas para o transdutor instalado no suporte em uma faixa estreita de frequência de 55 a 59 kHz.

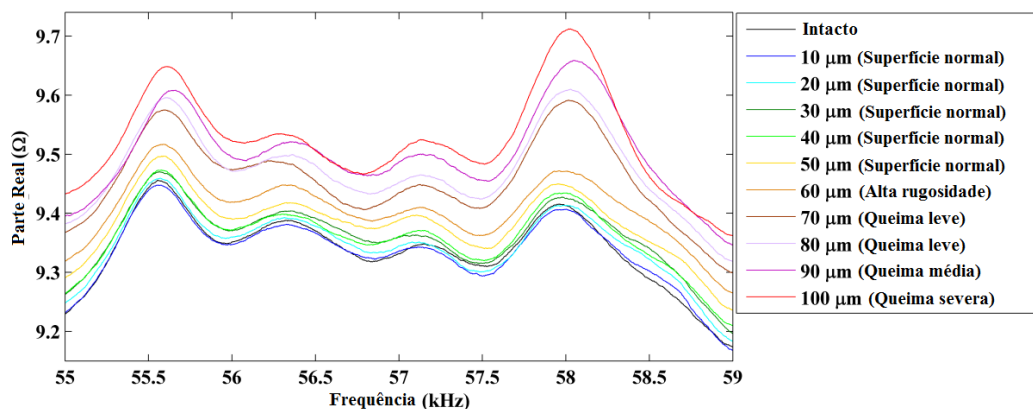


Figura 27 - Detalhe da variação das assinaturas para o transdutor instalado no suporte da retificadora.

Como as assinaturas de impedância são diferentes, cada transdutor tem uma faixa de frequência mais apropriada para o cálculo dos índices de dano RMSD e CCDM. A seleção da faixa de frequência foi determinada experimentalmente com base nas assinaturas de impedância e nos valores obtidos com os índices calculados usando as Equações (14) e (15).

Para o transdutor instalado diretamente na peça, foi determinada a faixa de frequência de 14 a 30 kHz para ambos os índices. Os índices foram

calculados considerando a assinatura de impedância obtida para a peça intacta (antes do processo de retificação) como uma referência, isto é, $Z_{E,H}^{(k)}$ nas Equações (14) e (15). Os valores obtidos para os índices RMSD e CCDM são apresentados na Figura 28.

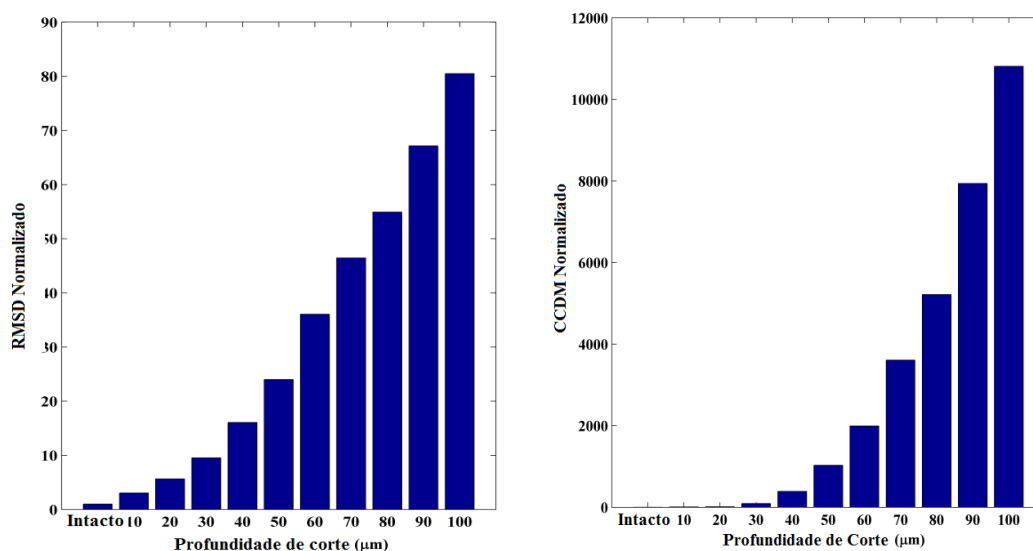


Figura 28 - Índices RMSD e CCDM para o transdutor instalado na peça.

Os índices da Figura 28 são normalizados, fazendo $RMSD = 1$ e $CCDM = 1$ para peça íntegra (antes do processo de retificação), valores que foram calculados usando duas medições consecutivas de impedância. Por exemplo, para uma profundidade de corte de 100 μm, os índices RMSD e CCDM são, respectivamente, aproximadamente 80 e 11000 vezes maior do que os valores obtidos com a peça intacta. Observa-se que ambos os índices têm uma tendência clara de aumento conforme a profundidade de corte aumenta de 10 μm para 100 μm, sendo que o índice CCDM fornece valores significativamente maiores.

Já para o transdutor instalado no suporte da retificadora, a resposta foi melhor para frequências mais altas. Foi selecionada uma faixa de frequência de 54 a 70 kHz para o cálculo dos índices. Os resultados são apresentados na Figura 29. Como mencionado anteriormente, os índices estão normalizados.

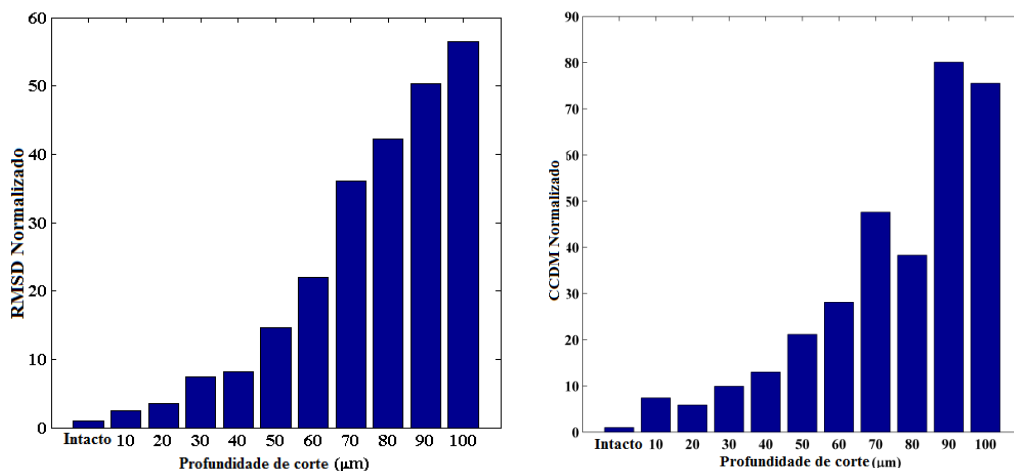


Figura 29 - Índices RMSD e CCDM para o transdutor instalado no suporte.

Observa-se na Figura 29, que os índices obtidos, a partir do transdutor instalado no suporte, apresentam valores menores do que aqueles obtidos para o transdutor instalado diretamente na peça. Além disso, não há uma tendência de crescimento bem definida como observada anteriormente, principalmente se for considerado o índice CCDM. Isso acontece porque o índice CCDM é baseado no coeficiente de correlação, e as assinaturas do transdutor instalado no suporte apresentam variações principalmente na amplitude, sendo pouca a variação na forma.

De acordo com a Figura 26, há variações em amplitude e deslocamentos em frequência das assinaturas de impedância conforme a profundidade de corte aumenta. Isso explica os bons resultados obtidos para os dois índices de dano apresentados na Figura 28. É importante observar que tanto as variações em amplitude como os deslocamentos em frequência são mais significativos para uma profundidade de corte a partir de 60 μm, que é quando a superfície da peça começa a apresentar alta rugosidade. Para maiores profundidades de corte ocorre a queima da peça, como mostrado na Figura 23.

Observa-se na Figura 27 que as variações nas assinaturas de impedância são principalmente em amplitude, ocorrendo pouco deslocamento em frequência. Esse resultado explica a correlação irregular entre o índice CCDM e a

profundidade de corte apresentada na Figura 29. Também observa-se que a variação em amplitude é mais significativa para uma profundidade de corte a partir de 70 μm , que corresponde à condição de queima leve da superfície, como mostrado na Figura 23.

Portanto, de acordo com os resultados apresentados na Figura 26 e na Figura 27, há uma relação entre a variação da assinatura da impedância elétrica do transdutor e a condição da peça retificada, permitindo identificar a ocorrência do aumento da rugosidade ou o início da queima, evitando que a peça seja danificada e todo o processo de retificação seja perdido. Um resultado importante é que o transdutor instalado no suporte da retificadora permitiu monitorar a condição da peça, embora o transdutor instalado diretamente na peça tenha apresentado resultado de maior sensibilidade. Como mencionado anteriormente, a instalação do transdutor no suporte da retificadora é mais interessante do ponto de vista industrial, pois é menos invasivo e mais fácil de ser instalado. Por sua metodologia simples e por utilizar transdutores piezelétricos de baixo custo, o método EMI pode representar um avanço na pesquisa do monitoramento em tempo real do processo de retificação.

Embora os resultados apresentados neste estudo sejam promissores, estudos adicionais são necessários para avaliar a efetividade do método EMI no processo de retificação. Índices de dano mais apropriados ou ferramentas mais avançadas para a extração de característica das assinaturas de impedância devem ser investigados. Os transdutores piezelétricos são significativamente sensíveis à variação de temperatura (BAPTISTA *et al.*, 2010). Portanto, um sistema eficiente e confiável de monitoramento baseado na impedância deve empregar algum método de compensação para os efeitos da temperatura.

5. Conclusões

5.1. Conclusões gerais

Este trabalho apresentou uma nova abordagem para o monitoramento do processo de retificação plana utilizando o método da impedância eletromecânica (EMI), o qual consiste de uma metodologia simples e utiliza transdutores de PZT de baixo custo. A quantificação de desgaste da peça durante o processo de retificação baseou-se nos índices RMSD e CCDD comumente utilizados no método EMI. Os resultados experimentais indicam que há uma relação entre a condição da peça retificada e a variação da impedância elétrica do transdutor, permitindo monitorar a condição da peça em tempo real e evitando a sua queima. No entanto, é importante ressaltar que este trabalho apresenta um estudo inicial sobre a viabilidade do método EMI no processo de retificação. Novos estudos ainda são necessários para comprovar a sua efetividade e confiabilidade.

5.2. Sugestões para Trabalhos Futuros

- Aplicação do método EMI para a detecção de queima no Processo de retificação cilíndrica;
- Aplicação do método EMI no controle da dressagem e desgaste do dressador;
- Desenvolvimento e implementação de hardware com base no método EMI, que permita atuar no controle da mesa retificadora de maneira que possa interromper o processo ou alterá-lo, a fim de impedir erros durante a retificação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABU-MAHFOUZ, I., **“Drilling wear detection and classification using vibration signals and artificial neural network”** Int. J. Mach. Tools Manuf., vol. 43, no. 7, pp. 707–720, 2003.

AGUIAR, P. R., BIANCHI, C. E. & OLIVEIRA, J. F. G., **“A method for burning detection in grinding process using acoustic emission and effective electric power signals,”** Manuf. Syst., vol. 3, pp. 253–257, 2002.

AI, D., ZHU, H., LUO, H., YANG, J., **“An effective electromechanical impedance technique for steel structural health monitoring,”** Construction and Building Materials, 2014.

AKBARI, J., SAITOB, Y., HANAOKAB, T., **“Effect of Grinding Parameters on Acoustic Emission Signals while Grinding Ceramics,”** Materials Processing Technology, Tehran/Iran, 1996.

ALI, Y. M. & ZHANG, L. C., **“A fuzzy Model for Predicting Burns in Surface Grinding of Steel,”** International Journal of Machine Tools & Manufacture, v. 44, p. 563-571, 2004.

ALMEIDA, V. A. D., BAPTISTA, F. G. & AGUIAR, P. R., **“Piezoelectric Transducers Assessed by the Pencil Lead Break for Impedance-Based Structural Health Monitoring,”** IEEE Sensors Journal, Online version, 2014.

ARAUJO, J. B., **“Desenvolvimento de método de avaliação de desempenho de processos de manufatura considerando parâmetros de sustentabilidade,”** Tese apresentada para a obtenção do título de Doutor em Engenharia de Produção, USP São Carlos, 2010.

AXINTE, D., GINDY, N., FOX, K. & UNANUE, I., “**Process monitoring to assist the workpiece surface quality in machining**,” *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 44, pp. 1091–1108, 2004.

BABEL, P., KOSHY, R. & WEISS, M., “**Acoustic emission spikes at workpiece edges in grinding**,” *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 64, pp. 96–101, 2013.

BAPTISTA, F. G. & FILHO J. V., “**Optimal frequency range selection for PZT transducers in impedance-based SHM systems**,” *IEEE Sensors J*, pp. 1297–1303, 2010.

BATISTA, F. G., “**Uma contribuição aos sistemas de monitoramento de integridade estrutural baseada na impedância eletromecânica**,” 2010. 91f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista ‘Julio de Mesquita Filho’, Ilha Solteira, 2010.

BAPTISTA, F. G. & FILHO, J. V., “**Transducer loading effect on the performance of PZT-based SHM systems**,” *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelect. Freq. Contr*, vol. 57, pp. 933–941, 2010.

BAPTISTA, F. G. & VIEIRA, FILHO J., “**A new impedance measurement system for PZT based structural health monitoring**,” *IEEE Trans. Instrum*, vol. 58, pp. 3602–3608., 2009.

BAPTISTA, F. G., BUDOYA, D. E., ALMEIDA, V. A. D. & ULSON, J. A. C., “**An experimental study on the effect of temperature on piezoelectric sensors for impedance-based structural health monitoring**,” *Sensors*, pp. 1208–1227, 2014.

BELL, A.; JIN, T., STEPHENSON, D. J., “**Burn threshold prediction for High Efficiency Deep Grinding,**” Bedford MK43 0AL, UK: International Journal of Machine Tools & Manufacture. , 2011.

BERLINCOURT, D. A., CURRAN, D. R., JAFFE, H., “**Piezoelectric and piezomagnetic material and their function in transducers,**” In: MASON, W. P. (Ed.). Physical acoustics: principles and methods. New York: Academic Press, 1964. v. 1, p. 169-270.

BHALLA, C. K., NAIDU S., SOH A. S. K., “**Influence of structure-actuator interactions and temperature on piezoelectric mechatronic signatures for NDE,**” Int. Conf. SMART Mater. Struct. Syst., vol. 5062, pp. 263–269, 2003.

BIANCHI, E. C., SANCHES, L. E. A., FERNANDES, O. C., MOGAMI, O., SILVA JR, C. E. & AGUIAR, P. R., “**Análise do Comportamento de Rebolos Convencionais na Retificação de Aços Frágeis,**” Congresso Norte Nordeste de Engenharia Mecânica, IV, Recife/PE, pp. 335-340, 1996.

BOUKABACHE, H., ESCRIBA, C., ZEDEK S., MEDALE D., ROLET S., & FOURNIOLS, “**System-on-Chip Integration of a New Electromechanical Impedance Calculation Method for Aircraft Structure Health Monitoring,**” Sensors, vol. 12, pp. 13617–13635, 2012.

BUSCH-VISHNIAC, I. J., **Electromechanical sensors and actuators:** mechanical engineering series. Berlin: Springer, 1998. 341 p.

CAWLEY, P., “**The impedance method of non-destructive inspection,**” NDT Int. Ann Arbor, vol. 17, no. 2, pp. 59–65, 1984.

CIANG, C. C., LEE J. R. & BANG H. J, “**Structural health monitoring for a wind turbine system: a review of damage detection methods,**” Meas. Sci. Technol., vol. 19, no. 122001, 2008.

DAVIM, J. P., Machining: **Fundamentals and Recent Advances**, 2nd ed. London, U.K.: Springer-Verlag, 2008.

DHANASEKAR, B., MOHAN, N.K., BHADURI, B., RAMAMOORTHY, B., “**Evaluation of surface roughness based on monochromatic speckle correlation using image processing,**” Precision Engineering 32, 196 – 206, 2008.

DINIZ, A.E.; MARCONDES, F.C.; LEMOS, N.C., “**Tecnologia da usinagem dos materiais,**” 6.ed. São Paulo: Editora Artiber Editora Ltda., 2008. 262p.

DOEBLING, S. W., FARRAR, C. R., PRIME, M. B., “**A summary review of vibration-based damage identification methods.**” Shock and Vibration Digest, Thousand Oaks, v. 30, n. 2, p. 91-105.

DURGUMAHANTI, U. S. P., SINGH, P.V., RAO, V., “**A New Model for Grinding Force Prediction and Analysis. International Journal of Machine Tools & Manufacture,**” Is 50, p 231–24, 2010.

FARRAR, C. R., WORDEN, K., “**An introduction to structural health monitoring.**” Philosophical Transactions of Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, London, v. 365, n.1851, p. 3003-315, 2007. doi: 10.1098/rsta.2006.1928.

FATHALLAH, B. B., FREDJ, N.B., SIDHOM, H., BRAHAM, C., ICHIDA, Y., “**Effects of abrasive type cooling mode and peripheral grinding wheel speed on the AISI D2 steel ground surface integrity,**” International Journal of

Machine Tools & Manufacture: Design, Research and Application. Vol. 49, pp.261-272, 2009.

GIURGIUTIU, V. & ROGERS, C. A., “**Recent advancements in the electro-mechanical (E/M) impedance method for structural health monitoring and NDE,**” Annu. Int. Symp. SMART Struct. Mater., vol. 3329, no. March, pp. 536–547, 19998.

GODOY, N. R. F., MARCHI, M., MARTINS, C. H. R., AGUIAR, P. R., Eduardo Carlos Bianchi. “**Monitoring of grinding burn by AE and vibration signals**”. In: International Conference on Agents and Artificial Intelligence. Proceedings of the 6th International Conference on Agents and Artificial Intelligence. p. 272-279, 2014.

GONSALEZ, C. G., SILVA, S., BRENNAN, S. M., JUNIOR, V. L., “**Structural damage detection in an aeronautical panel using analysis of variance,**” Mechanical Systems and Signal Processing. 2015.

GRIFFITHS, B. Manufacturing surface technology: “**Surface integrity & functional performance,**” London: Penton Press, 237p, 2001.

HASSUI, A. & DINIZ, A. E., “**Correlating surface roughness and vibration on plunge cylindrical grinding of steel,**” Int. J. Mach. Tools Manuf., vol. 43, pp. 855–862, 2003.

HASSUI, A., “**Estudo de Vibração Durante o Corte e Centelhamento na Retificação Cilíndrica de Mergulho,**” Tese de Doutorado, Unicamp, Campinas/SP, 2002.

HECKER, R. L. & LIANG, S. Y., “**Predictive modeling of surface roughness in grinding,**” Int. J. Mach. Tools Manuf., vol. 43, no. 8, pp. 755–761, 2003.

HEKMAN, K. A.; LIANG, S. Y., “**Compliance Feedback Control for Part Parallelism in Grinding,**” Advanced Manufacturing Technology, Georgia Institute of Technology, Atlanta/USA, 1999.

INMAN, D. J. “**Smart structures: examples and new problems.**” In: Brazilian congress of mechanical engineering – COBEM, Uberlândia ABCM, 2001.

INMAN, D. J. et al. “**Damage prognosis for aerospace, civil and mechanical systems.**” Hodoken: John Wiley & Sons, 0. 449, 2005.

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

LEE, Y., **Probabilistic Analysis of Ductile/Brittle Transition in Diamond Turning of Brittle Materials,** Research Reports, 1998.

LIANG, C., SUN, F. P., ROGERS, C. A., “**Coupled electromechanical analysis of adaptive material system – determination of actuator power consumption and system energy transfer,**” Journal of Intelligent Material Systems and Structures, London, v. 5, p. 21-20, 1004.

LIANG, C., SUN, F. P., ROGERS, C. A., “**Electro-mechanical impedance modeling of active material system,**” Smart Materials and Structures, Bristol, v. 5, p. 171-186, 1996.

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 126, 297–310, 2004.

LIAO, T., “**Grinding wheel condition monitoring with boosted minimum distance classifiers,**” *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 22, pp. 217–232, 2008.

LIU, J. B., “**Monitoring the precision machining process: sensors, signal processing and information analysis**”. 1991. Thesis (Ph.D. Thesis) - University of California at Berkeley, USA, 1991.

LIM, Y. Y. & SOH, C. K., “**Electro-Mechanical Impedance (EMI)-Based Incipient Crack Monitoring and Critical Crack Identification of Beam Structures,**” *Res. Nondestruct. Eval.*, vol. 25, no. 2, pp. 82–98, 2014.

LIN, B.; GIURGIUTIU, V., “**Modeling and testing of PZT and PVDF piezoelectric wafer active sensors,**” *Smart Materials and Structures*, Bristol, v. 15, n. 4, p. 1085-1093, 2006.

LINDSAY, R. P., “**Principles of grinding,**” *Metals handbook: machining*. 9.ed. Nova York; ASM International, 1995.

LIU, Q., CHEN X. & GIINDY N., “**Fuzzy pattern recognition of AE signals for grinding burn,**” *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 45, no. 7–8, pp. 811–818, 2005.

MALKIN, S., “**Grinding Mechanisms e Grinding Temperatures and Thermal Damage,**” In: MALKIN, S. *Grinding Technology: theory and applications of machining with abrasives*. 1.ed. Chichester, Ellis Horwood Limited, 1989.

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

MARINESCU, I. D., HITCHINER, M., UHLMANN, E., ROWE, W.B., INASAKI, I., **“Handbook of Machining with Grinding Wheels,”** CRC Press. New York, 2007.

MARQUI, R. B., BUENO, D. D., BAPTISTA F. G., VIEIRA FLHO J., SANTOS & LOPES JUNIOR V., **“External disturbance effect in damage detection using electrical impedance,”** Int. MODAL Anal. Conf., vol. 26, 2008.

MARTINS, P. S., **“Avaliação dos sistemas de fixação hidráulica e térmica de brocas de metal duro em furação do cabeçote do motor Fire,”** Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Tese de Mestrado, 2008.

MEITZLER, A. H. et al., **IEEE standard on piezoelectricity:** an american national standard. New York: IEEE-ANSI, 1987. 66 p. (Std, 176.).

MONICI, R. D.; BIANCHI, E. C.; CATAI, R. E.; AGUIAR, P. R., **“Analysis of the different forms of application and types of cutting fluid used in plunge cylindrical grinding using conventional and superabrasives CBN grinding wheels,”** International Journal of Machine Tools & Manufacture: Design, Research and Application. Vol. 46, pp.122-131, 2006.

NA, S. & LEE H. K. **“A multi-sensing electromechanical impedance method for non-destructive evaluation of metallic structures,”** Smart Mater. Struct., vol. 22, pp. 1–8, 2013.

NAKAI, M. E. ; GUILARDI, J. H ; AGUIAR P. R. ; BIANCHI E. C. ; SPATTI D. H. **“Neural Tool Condition Estimation in The Grinding of Advanced Ceramics,”** Revista IEEE América Latina, v. 13, p. 62-68, 2015.

NATHAN, D. R., VIJAYARAGHAVAN, L., KRISHNAMURTHY R., **“In-process monitoring of grinding burn in the cylindrical grinding of steel,”** Journal of Materials Processing Technology, 91, 1999, 37–42.

NGUEYN, A. T. & BUTLER, D. L., **“Correlation of grinding wheel topography and grinding performance: A study from a viewpoint of three-dimensional surface characterisation,”** J. Mater. Process. Technol., vol. 208, pp. 14–23, 2008.

OLIVEIRA, J.F.G., VALENTE, C.M.O, 2004. **“Fast Grinding Process Control with AE Modulated Power Signals,”** CIRP Annals: Manufacturing Technology. v. 53, Issue 1, 267-270.

OLIVEIRA, M. A., FILHO, J. V., LOPES V. J. & INMAN D. J., **“Damage Detection Based on Electromechanical Impedance Principle and Principal Components,”** Conf. Proc. Soc. Exp. Mech. Ser., vol. 7, pp. 207–315, 2014.

PARK, D. J., SOHN G., FARRAR, H., INMAN C., **“Overview of piezoelectric impedancebased health monitoring and path forward,”** Shock Vib. Dig. Thousands Oaks, vol. 35, pp. 451–463, 2003.

PARK, G. et al., **“Impedance-based structural health monitoring for temperature varying applications.”** JSME International Journal, Series A: Solid Mechanics and Material Engineering, Tokyo, v. 42, n. 2, p. 249-258, 1999.

PEAIRS, D. M., TARAZAGA, P. A. & INMAN D. J., **“Frequency range selection for impedance-based structural health monitoring,”** J. Vibr. Acoust., vol. 129, pp. 701–719, 2007.

POLINI, W; TURCHETTA, S., “**Force and specific energy in stone cutting by diamond mill,**” In: International Journal of machine Tools and Manufacture v. 44, p. 1189-1196, 2004.

RYTTER, A., “**Vibration based inspection of civil engineering structures.**” Thesis (Ph.D.) – Department of Building Technology and Structural Engineering, Alborg University Denmark, 1993.

SAMHOURI, M.S., SURGENOR, B.W., “**Surface roughness in grinding: online prediction with adaptive neuro-fuzzy inference system**”. Transactions of NAMRI/SME 33, 57–64, 2005.

SANTOS, M., CARVALHO, E. L. M., MACHADO, M. F. PICCIININI, M. S. “**A indústria Brasileira de máquinas-ferramenta,**” BNDES Setorial, Rio de Janeiro, n. 26, p. 81-100, 2007.

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

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

SHIN, S. W., OH, T. K., “**Application of electro-mechanical impedance sensing technique for online monitoring of strength development in concrete using smart PZT patches**” Construction and Building Materials, 2009.

STASZEWSKI, W. J., LEE B. C. & TRAYNOR R., “**Fatigue crack detection in metallic structures with Lamb waves and 3D laser Vibrometry,**” Meas. Sci. Technol., vol. 18, pp. 727–739, 2007.

STOKES, G. L., CLOUD J. P., **“The application of interferometric techniques to the nondestructive inspection of fiber-reinforced materials,”** Exp. Mech. Heidelb., vol. 33, pp. 314–319, 1993.

“Standard Guide for Determining the Reproducibility of Acoustic Emission Sensor Response,” ASTM Stand. E976-10, 2010.

TETI, R., **“Advanced monitoring of machining operations,”** CIRP Ann. - Manuf. Technol., vol. 59, pp. 717–739, 2010.

WELCH, P. D., **“The use of fast Fourier transform for the estimation of power spectra: a method based on time averaging over short, modified periodograms,”** IEEE Trans. Audio Electroacoust., vol. 15, pp. 70–73, 1967.

WHITEHOUSE, D.J. Surface texture. In: **Handbook of surface metrology**. v.18. p. 184-190, 1994.

YANG, Y. & DIVSHOLI B. S., **“Sub-Frequency Interval Approach in Electromechanical Impedance Technique for Concrete Structure Health Monitoring,”** Sensors, vol. 10, pp. 11644–11661, 2010.

YANG, Y., DIVSHOLI, B. S. & SOH C. K., **“A Reusable PZT Transducer for Monitoring Initial Hydration and Structural Health of Concrete,”** Sensors, vol. 10, pp. 5193–5208., 2010.

WEBSTER, J.; MARINESCU, I.; BENNET, R., 1994, **“Acoustic emission for process control and monitoring of surface integrity during grinding”**. Annals of the CIRP, v. 43, n. 1, p. 299-304.

TRABALHOS PUBLICADOS REFERENTE À TESE

MARCHI, M. ; BAPTISTA, FABRICIO ; AGUIAR, P. R. ; BIANCHI, E. C. **Grinding process monitoring based on electromechanical impedance measurements.** Measurement Science & Technology (Print), v. 26, p. 045601, 2015.

MARCHI, M. ; AGUIAR, P. R. ; Baptista, F. G. ; BIANCHI, E. C. **Proposta de um sistema de monitoramento do processo de retificação plana baseado em plataforma de hardware livre e sensor de baixo custo.** Revista SODEBRAS, v. 10, p. 19-23, 2015.

MARCHI, M. ; GODOY NETO, R. F ; AGUIAR, P. R. ; BIANCHI, E. C. **Análise do sinal puro de emissão acústica e aplicação de filtros digitais no monitoramento da queima no processo de retificação tangencial plana com implementação por hardware.** In: CONEM 2014 - Congresso nacional de engenharia mecânica, 2014, Uberlândia. CONEM 2014, 2014.

MARCHI, M. ; AGUIAR, P. R. ; JUGEND, D. **Desenvolvimento de protótipo de produto para monitoramento do processo de fabricação de peças de aço.** In: XXI Simpósio de Engenharia de Produção, 2014, Bauru. XXI Anais (2014), 2014.

MARCHI, M. ; GODOY NETO, R. F ; AGUIAR, P. R. ; Eduardo Carlos Bianchi. **Análise do sinal puro de emissão acústica e aplicação de filtros digitais no monitoramento da queima no processo de retificação tangencial plana.** In: 11° Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica (CIBIM), 2013, Ciudad de La Plata. 11° Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica (CIBIM), 2013. v. 2. p. 575-582.

GODOY NETO, R. F ; MARTINS, C. H. R. ; MARCHI, M. ; AGUIAR, P. R. ; Eduardo Carlos Bianchi . **Monitoramento da queima no processo de retificação por emissão acústica e vibração.** In: Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente (SBAI), 2013, Fortaleza-CE. XI SBAI Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente, 2013. v. 5679.

TRABALHOS DESENVOLVIDOS NO PERÍODO

MOIA, D. F. G. ; THOMAZELLA, I. H. ; AGUIAR, P. R. ; BIANCHI, E. C. ; MARTINS, C. H. R. ; MARCHI, M. **Tool condition monitoring of aluminum oxide grinding wheel in dressing operation using acoustic emission and neural networks.** Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, v. 1, p. 1806-3691, 2014.

SOUZA, R. V. C. G. P. ; ROCHA, C. A. ; MARCHI, M. ; AGUIAR, P. R. ; MARTINS, C. H. R. ; BIANCHI, E. C. **Monitoramento da condição da ferramenta de dressagem usando sinais de vibração e modelos neurais.** In: Congresso Brasileiro de Automática, 2014, Belo Horizonte. Anais do XX Congresso Brasileiro de Automática Belo Horizonte, MG, 20 a 24 de Setembro de 2014, 2014.

BIANCHI, E. C. ; AGUIAR, P. R. ; MELLO, H. J. ; FRECH JUNIOR, A. ; MARCHI, M. ; HILDEBRANDT, R. A. ; MARCELINO, L. . **Determinação do custo relacionado ao desgaste de dressadores de ponta única fabricados com diamantes CVD nacionais.** In: CONEM 2014 - Congresso nacional de engenharia mecânica, 2014, Uberlândia. CONEM 2014, 2014.

BIANCHI, E. C. ; FRECH JUNIOR, A. ; MELLO, H. J. ; Paulo Roberto de Aguiar ; SAKAMOTO, A. H. ; MARCHI, M. **Análise do comportamento do desgaste e vida útil de dressadores de ponta única.** In: CONEM 2014 - Congresso nacional de engenharia mecânica, 2014, Uberlândia. CONEM 2014, 2014.

CASTANHO, J. E. ; THOMAZELLA, R. ; MARCHI, M. ; Dotto, F. R. L. . **Sistema de monitoramento baseado em veículo submersível remotamente operado para manutenção preventiva de usinas hidrelétricas.** In: XXI Simpósio de Engenharia de Produção, 2014, Bauru. XXI Anais (2014), 2014.

CONCEIÇÃO P.O ; RIBEIRO D.M.S ; MARCHI, M. ; AGUIAR, P. R. ; FRANÇA T.V ; BIANCHI, E. C. **Monitoramento da retificação de cerâmicas avançadas por sinais de vibração e rugosidade.** In: VIII Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação - COBEF, 2015, Salvador. VIII Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação - COBEF, 2015.

FERREIRA, F. I. ; AGUIAR, P. R. ; SODARIO, R. D. ; Eduardo Carlos Bianchi ; MARCHI, M. ; MARTINS, C. H. R. . **Monitoramento da condição da superfície de peças retificadas por meio de sinais de emissão acústica.** In: VIII Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação - COBEF,, 2015, Salvador. VIII Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação - COBEF, 2015.

FABIANO, L. F. G. ; AGUIAR, P. R. ; BIANCHI, E. C. ; SODARIO, R. D. ; MARCHI, M. . **Estudo de condições da superfície de peças retificadas por emissão acústica e corrente elétrica.** In: VIII Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação - COBEF, 2015, Salvador. VIII Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação - COBEF, 2015.

MARCHI, M. ; Luciano Donizeti Varanda ; Manoel Cleber de Sampaio ; AGUIAR, P. R. **Análise dos sinais de emissão acústica, vibração e potência elétrica no processo de lixamento perpendicular às fibras de eucalyptus grandis.** In: XIV EBRAMEM - Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira, 2014, Natal, RN, Brasil. XIV EBRAMEM - Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira. João Pessoa: Moura Ramos, 2014. p. 94.