

MONITORAMENTO DA RETIFICAÇÃO DE CERÂMICAS AVANÇADAS USANDO TRANSDUTORES PIEZELÉTRICOS DE BAIXO CUSTO E REDES NEURAIS ARTIFICIAIS

Martin Antonio Aulestia Viera¹, aulestia.martin16@gmail.com
Pedro de Oliveira Conceição Junior¹, pedroliveira@hotmail.com.
Paulo Roberto de Aguiar¹, aguiarpr@feb.unesp.br.
Eduardo Carlos Bianchi², bianchi@feb.unpes.br.

¹Universidade Estadual Paulista - UNESP - Campus de Bauru. Departamento de Engenharia Elétrica, Av. Luiz Edmundo Carrijo Coube, 14-01, Caixa Postal 473, CEP 17033-360, Bauru, SP, Brasil.

²Universidade Estadual Paulista - UNESP - Campus de Bauru. Departamento de Engenharia Mecânica, Av. Luiz Edmundo Carrijo Coube, 14-01, Caixa Postal 473, CEP 17033-360, Bauru, SP, Brasil.

Resumo: Os estudos do desgaste do rebolo e da rugosidade da peça tornaram-se parâmetros importantes no monitoramento do processo de retificação de cerâmicas avançadas. Este trabalho tem o objetivo de analisar o uso de transdutores piezelétricos de baixo custo do tipo PZT (Lead Zirconate Titanate) no monitoramento do processo de retificação de cerâmicas avançadas implementando modelos de redes neurais artificiais (RNA). A fim de comprovar a eficácia dos resultados do PZT um sensor de emissão acústica (EA) comercial e consolidado também foi usado no trabalho, bem como a potência do motor de acionamento do rebolo foi medida para o uso de estatísticas posteriormente. Ensaios foram realizados em laboratório usando uma máquina retificadora plana equipada com um rebolo diamantado com ligante resinóide. Neste sentido, corpos de prova de cerâmica alumina foram usinados em diferentes profundidades de corte, usando velocidades de corte e da peça constantes, representando condições de retificação leves e agressivas. Medições de rugosidade foram realizadas em diferentes pontos ao longo das peças, após a retificação, usando um rugosímetro portátil. Para o monitoramento do processo, os sensores PZT e de EA foram fixados no suporte da peça. Um oscilógrafo fez a aquisição dos sinais puros em uma taxa de amostragem de 2 MHz. Técnicas de processamento digital de sinais foram usadas, tais como, a transformada rápida de Fourier (FFT) e estatísticas derivadas dos sinais de EA e PZT, como o DPO (produto dos desvios padrão de EA pela potência média) e o valor médio, buscando uma correlação com a rugosidade. Foi possível analisar o espectro de frequências dos sinais, bem como as diferentes características de cada profundidade de corte. Foi feita uma análise especial de duas bandas de frequência diferentes usando filtros digitais, demonstrando que o parâmetro DPO tem uma estreita semelhança com a rugosidade. Foi implementada uma RNA de classificação com todos os resultados obtidos. Todas as entradas foram testadas, usando duas entradas por vez, com uma tabela neurônio de três camadas com 75 possibilidades diferentes, tendo assim 1125 testes realizados. Foi escolhido o resultado que apresentou menor erro. Os testes produziram resultados satisfatórios para o monitoramento do processo de retificação de cerâmicas avançadas, refletindo na sua otimização.

Palavras-chave: Retificação, Cerâmicas Avançadas, Monitoramento, PZT, Redes Neurais Artificiais.

1. INTRODUÇÃO

1.1. Retificação de Cerâmicas Avançadas

As cerâmicas avançadas têm sido amplamente utilizadas na fabricação de peças sob grandes e complexas exigências, na qual são necessários materiais de alto desempenho, devido à combinação única de propriedades. Com o desenvolvimento da tecnologia, as cerâmicas foram destacadas por suas propriedades únicas, as vantagens das cerâmicas em relação a outros materiais incluem um desempenho físico, mecânico e químico superior, de alta resistência, baixa taxa de expansão, resistência ao desgaste e estabilidade química (Zhang et al, 2014).

Os componentes cerâmicos de precisão exigem o cumprimento dos estritos valores de tolerâncias e rugosidade da superfície retificada porque o desempenho e a confiabilidade destes componentes são afetados extremamente pela precisão e pelo acabamento da superfície usinada produzido durante o processo de retificação. O processo de retificação é considerado o passo mais importante do processo avançado de usinagem de cerâmicas avançadas, é altamente complexo e envolve o contato entre um grande número de partículas abrasivas com a superfície da peça de trabalho. O processo de retificação permite um controle dimensional preciso e um bom acabamento da superfície usinada, mas requer de uma boa tomada de decisões por parte do operador da máquina (Argawal e Rao, 2005).

O acabamento produzido na superfície da peça é um dos parâmetros mais importantes na retificação final. As características favoráveis das cerâmicas são acompanhadas por dificuldades associadas com a usinagem e,

principalmente, com a retificação por causa da alta rigidez da cerâmica, as quais demandam uma alta precisão de usinagem e qualidade de superfície.

1.2. Parâmetros Envolvidos no Processo de Retificação

1.2.1. Velocidade de Corte (v_s) e Velocidade da Peça (v_w)

Quando a velocidade de corte é elevada, um mesmo grão abrasivo passa a remover um menor volume de cavacos, pelo aumento da sua frequência de contato com a peça. Portanto o número de grãos ativos é maior e a espessura dos cavacos removidos é menor, diminuindo as forças de corte, rugosidade da peça e desgaste do rebolo. Entretanto, pelo aumento da intensidade de contato dos grãos com a peça, ocorre uma elevação da temperatura, a qual pode ocasionar a queima da peça (Bianchi et al, 1996).

Segundo Bianchi, a velocidade da peça coincide com a velocidade da mesa da máquina retificadora. Esta velocidade esta relacionada aos impactos entre os grãos abrasivos e a peça.

1.2.2. Rugosidade (R_a)

Um parâmetro típico que é utilizado para quantificar a qualidade de uma superfície é a rugosidade. Segundo Gong e Wang (2002), a rugosidade da superfície da peça tem relação com o número de grãos da área de contato, a distribuição de grãos, a trilha de corte e assim por diante. Os grãos não são distribuídos sobre uma superfície circunferencial perfeita, de modo que a rugosidade da superfície da peça é gerada. No processo de retificação, alguns grãos têm uma profundidade de corte grande, alguns grãos apresentam uma pequena profundidade de corte, e alguns não atingem a superfície da peça.

A rugosidade da superfície (R_a), é definida como a média aritmética dos valores absolutos dos desvios do perfil de altura da superfície a partir da linha média, dentro do comprimento de amostragem l . Portanto, a rugosidade da superfície pode ser expressa como:

$$R_a = \frac{1}{l} \int_{y_{\min}}^{y_{\max}} |y - y_{cl}| p(y) dy \quad (1)$$

Onde y_{cl} é a posição da linha de centro de modo que as regiões acima e abaixo da linha sejam iguais. A rugosidade representa o somatório das áreas acima e abaixo da linha dividido pelo comprimento total do perfil.

Com o objetivo de manter a rugosidade dentro dos valores aceitáveis, é realizado um monitoramento constante do acabamento da peça. O método mais comum de análise do processo de retificação é a análise cinemática, que consiste no estudo do sinal de emissão acústica (EA). Foi comprovado que o sinal EA contém informação relacionada com os possíveis problemas de retificação e rugosidade (Kwak e Song, 2001).

1.3. Monitoramento do Processo

A retificação resulta em uma alteração da rugosidade da superfície retificada. A constante exigência do mercado demanda uma maior produtividade, qualidade e menor custo do processo de retificação. O monitoramento constante do processo é essencial para garantir um bom acabamento da peça (Irani et al, 2005).

Métodos diretos de medição de rugosidade da superfície estão disponíveis, tais como técnicas ópticas e de contato. No entanto, estes métodos devem ser realizados fora de linha. Estes métodos geralmente são demorados devido à necessidade de parar o processo para realizar a respectiva medição da rugosidade. A peça ou lote é desperdiçado se a rugosidade da superfície encontra-se fora da especificação.

As medições diretas são comumente usadas para realizar uma análise mais próxima da peça após a usinagem. Um dos métodos ópticos mais utilizados é a microscopia confocal, que consiste numa luz monocromática direcionada para a superfície da peça; A luz re-emitida causada pela excitação é coletada. A luz laser é digitalizada através da superfície fornecendo um mapa da luz capturada. A informação do perfil de rugosidade é obtida usando a capacidade do microscópio confocal, onde a luz incidente é focada na superfície ou abaixo dela, coletando apenas a luz do ponto focal; Isto é feito usando uma abertura confocal (Zhou et al, 2011). Outro método direto muito utilizado é a medição direta da rugosidade por meio de um rugosímetro, são realizadas varias medições em diferentes pontos da superfície da peça.

Métodos indiretos, no entanto, baseiam-se em sinal de sensores, que está relacionado com a variável de interesse. Eles são mais desejáveis, já que não há necessidade de parar o processo de usinagem. Os sensores mais utilizados são os de emissão acústica, piezelétricos, vibração e potência. A aplicação de redes neurais pode ser utilizada como um método complementar eficaz na estimação da rugosidade (Nakai et al, 2015). O método indireto mais utilizado baseia-se no sinal de emissão acústica, o qual é utilizado para estimar a rugosidade da peça.

1.3.1. Materiais Piezelétricos e o Efeito Piezelétrico

Atualmente, os transdutores piezelétricos são muito utilizados em dispositivos eletrônicos já que apresentam baixo consumo de energia, baixo custo, tamanho reduzido e alta sensibilidade, o que os tornam ideais para o processo de monitoramento direto de peças. O efeito piezoelétrico, típico do material, proporciona um acoplamento eletromecânico com a peça. Este efeito permite avaliar as condições mecânicas de uma peça a partir da resposta elétrica do transdutor (Baptista, 2010).

Nas últimas décadas, os materiais piezelétricos têm recebido atenção especial no monitoramento da retificação, são sensores de baixo custo e alta acessibilidade que obtêm energia elétrica do ambiente circundante pela sua capacidade de converter as vibrações em energia elétrica (Sarker et al, 2013). Os transdutores piezelétricos mais utilizados são o PZT (Pb-Zirconate Titanate) e o MFC (Macro-Fiber Composite), que têm espessura da ordem de alguns décimos de milímetro.

Elettricidade pode ser gerada diretamente da energia mecânica através de geradores baseados no efeito piezelétrico. Piezoelectricidade é a capacidade de alguns cristais gerarem tensão elétrica quando submetidos a uma força mecânica (Figura 1a). A polarização ou tensão elétrica produzida pela tensão mecânica cria cargas e, portanto, um campo elétrico. Ao mesmo tempo, a aplicação de um campo elétrico num material piezelétrico resulta na deformação física do material (Figura 1b). A piezoelectricidade é adequada para diversas aplicações como os transdutores (Rezende, 2004). A demonstração gráfica do efeito piezelétrico pode ser observada na Figura 1.

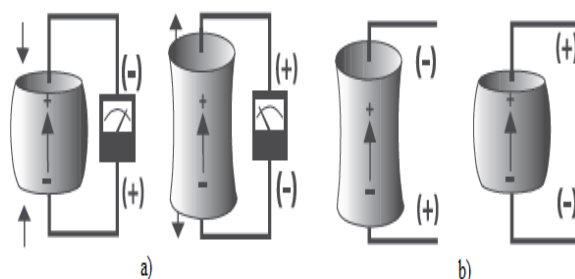


Figura 1. Demonstração gráfica do efeito piezelétrico (Callister, 2006).

1.3.2. Emissão Acústica

Segundo Abellan et al (2010), emissão acústica é a energia liberada em forma de vibração mecânica de um material que sofre uma determinada tensão. A tensão mecânica pode ser produzida por fraturas, quebras, deformações, entre outros.

De acordo com Kim et al (2001), a emissão acústica geralmente é escolhida para ser o sinal mais sensível porque a sua faixa de frequência encontra-se muito afastada das vibrações mecânicas e ruídos elétricos, e, portanto, esses ruídos podem ser facilmente filtrados. Sinais de EA podem ser analisados no domínio da frequência, tempo e tempo-frequência através da transformada de Wavelet, dependendo da finalidade do experimento.

1.4. Processamento de Sinais e Estatísticas

Os sinais puros de emissão acústica, potência e PZT não podem ser empregados para o monitoramento do processo de retificação de cerâmicas. Para a sua utilização, é necessária a aplicação de filtros e estatísticas, de modo a eliminar ruídos e extrair características.

1.4.1. Valor Eficaz de um Sinal

Entre certo intervalo Δt , o valor RMS de um sinal puro, do inglês *root mean square* (raiz da média dos quadrados), pode ser expresso pela equação:

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

Onde N é o número discreto de dados do sinal S no intervalo T e S_{RMS} o valor RMS do sinal.

1.4.2. Estatística DPO

Em sua tese de doutorado, Aguiar (1997) definiu DPO como um parâmetro estatístico que envolve o desvio padrão da EA ou de um sensor alternativo como nesse artigo o PZT e, a potência média ou máxima de cada profundidade de corte. Este parâmetro é largamente utilizado para detectar queimaduras na peça retificada. Apesar da sua simplicidade, esta estatística representa com fidelidade boa parte da ocorrência do fenômeno da queima durante o processo de usinagem. A seguinte equação representa a estatística DPO.

$$DPO(k) = \sigma(ea_{RMS}) * pot = \sigma(pzt_{RMS}) * pot \quad (3)$$

Onde σ representa o desvio padrão do valor RMS do sinal de EA ou PZT e pot é a potência média ou máxima.

1.4.3. Transformada Rápida de Fourier (FFT)

A transformada rápida de Fourier é utilizada no processamento digital de sinais com o objetivo de realizar a análise do sinal no domínio da frequência. A FFT é um logaritmo computacional eficiente para se calcular a transformada discreta de Fourier e a sua inversa. A DFT tem sido muito utilizada em pesquisas e análises de sinais. A FFT surgiu da necessidade de implementar um algoritmo mais rápido no cálculo da DFT.

A transformada discreta de Fourier em muitas aplicações como modelagem de sinais, análise espectral, compressões de sinal, caracterização do sistema, é uma das ferramentas mais importantes para as principais pesquisas de engenharia e ciências (Yang e Chen, 2002). É calculada de acordo com a seguinte equação:

$$X(m) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-j2\pi nm/N} \quad \text{onde } n=0,1,2,\dots,N-1 \quad (4)$$

Onde m é o índice da componente de saída da DFT no domínio da frequência, x a sequência de amostras do sinal discreto, n o índice no domínio do tempo das amostras e N o número total de amostras.

1.5. Redes Neurais Artificiais

A capacidade de uma máquina para executar funções geralmente associada com a inteligência humana é referida como inteligência artificial (IA). No campo da inteligência artificial, redes neurais artificiais têm atraído um especial interesse na investigação do processo de retificação devido às suas funções de ensino, interpolação, reconhecimento de padrões e classificação de padrões (Aguiar et al, 2010).

O modelo de rede neural artificial (RNA) é construído automaticamente através de um procedimento de treino com base nos dados do processo. Os modelos RNA são capazes de processar simultaneamente informações de diferentes sensores e quantidades físicas, que não precisam ser relacionados. Tal processamento de informações de várias fontes é chamado de fusão de sensores. Os modelos RNA podem ser efetivamente combinados com modelos físicos para melhorar ainda mais o desempenho da modelagem (Brinksmeier et al, 2006).

De acordo com Yao (1999), a RNA pode ser descrita como um diagrama em que cada nó i executa a função f . A seguinte expressão explica melhor o processamento matemático de cada nó.

$$y_i = f\left(\sum_{j=1}^n (w_{ij} \cdot x_j - \theta_i)\right) \quad (5)$$

Onde n é o número de entradas, x_j são as entradas do neurônio, w_{ij} são os pesos sinápticos e θ_i é o bias do neurônio.

A RNA utilizada neste trabalho foi a Perceptron de múltiplas camadas (MLP). A MLP é constituída por uma camada de entrada com o mesmo número de neurônios de entrada, pelo menos uma camada interna a qual não interage com o exterior e uma camada de saída com o mesmo número de neurônios e saídas desejadas.

Segundo Gardner e Dorling (1998), ao selecionar um conjunto adequado de pesos de ligação e funções de ativação, tem sido mostrado que um Perceptron multicamada pode aproximar qualquer função suave, mensurável entre os vetores de entrada e de saída. A MLP tem a capacidade de aprender através do treinamento. O treinamento requer um conjunto de dados de treino, o qual consiste numa série de vetores de entrada e de saída associados. Durante o treino a MLP é repetidamente apresentada com os dados de treinamento e os pesos da rede são ajustados até que ocorra o mapeamento de entrada-saída desejada. A MLP aprende de forma supervisionada. Durante o treino, a saída da MLP, para um dado vetor de entrada, não pode ser igual à saída desejada. Um sinal de erro é definido como a diferença entre a saída

desejada e a real. O treinamento usa a amplitude deste sinal de erro para determinar até que ponto os pesos da rede devem ser ajustados de modo a que o erro total da MLP seja reduzido.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Montagem do Banco de Ensaios

O experimento foi realizado para sete peças de alumina de 20 mm de comprimento e 8 mm de espessura. Cada teste consistiu numa única passada do rebolo através da peça. Os ensaios foram realizados com fluido de corte. Antes de cada teste, o rebolo foi afiado utilizando uma ferramenta de óxido de alumínio para aumentar o seu potencial de corte. A Tabela 1 mostra os parâmetros de retificação.

Tabela 1. Parâmetros de Retificação.

Velocidade de Retificação	
Velocidade de Corte (V_s)	35 m/s
Velocidade da Peça (V_w)	125 mm/s
Especificações de Corte	
Geometria de Corte	Plana
Profundidade de Corte (μm)	25-35-50-105-150-210-350
Especificações de Refrigeração	
Fluido	Shell- DMS 3200 F-1
Concentração do Refrigerante	4%
Velocidade do Fluido	3 m/s
Vazão do Fluido no Bocal	27,5 l/min
Pressão do Fluido no sistema	Menor que 0,2 Kg/cm ²

A retificadora utilizada para os ensaios foi do tipo plana tangencial da marca Sulmecânica, modelo 1055E. A retificação foi realizada por um rebolo diamantado resinoide de 350 mm de diâmetro, modelo SD126MN50B2 da marca Dinser. Com a ajuda de um rugosímetro da marca Taylor Hobson, modelo Surtronic 3+, foi medida a rugosidade média de cada corpo de prova. A medição foi feita perpendicularmente ao sentido de retificação.

2.2. Coleta de Dados

A Figura 2a mostra a disposição dos sensores EA e PZT no suporte das peças para realização do banco de ensaios mostrado na Figura 2b.

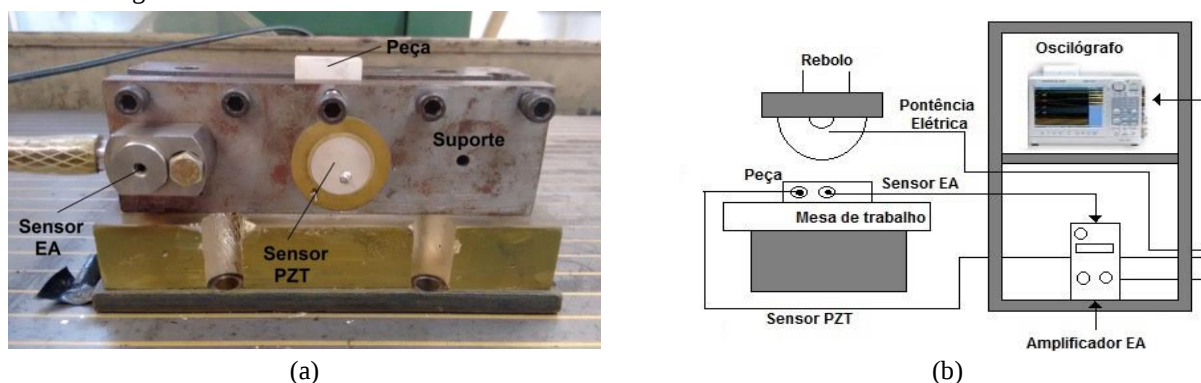


Figura 2.(a)Disposição dos sensores de EA e PZT, (b)Representação esquemática do banco de ensaios.

De acordo com a Figura 2a, foi utilizado o sensor da marca SENSIS, o qual foi parafusado ao suporte da peça. O sensor de EA possui um envoltório metálico fechado que ajuda a minimizar interferências e incorpora um pré-amplificador de entrada de baixo ruído. O sensor piezelétrico foi fixado no suporte com cola super-adesiva. O transdutor piezelétrico adotado para os testes teve um diâmetro igual a 35 mm. Ambos os sensores foram testados quanto à boa sensibilidade do sinal antes dos testes. Os sinais de potência, PZT e de emissão acústica foram coletados em cada passagem do rebolo.

A aquisição simultânea dos três sinais puros foi feita através de um oscilógrafo da marca Yokogawa, modelo DL850 a uma taxa de aquisição de 2 MHz. Como pode ser visto na Figura 2b, cada saída dos sensores está ligada ao

oscilógrafo. No caso da EA, o sinal passa primeiro através de um amplificador, módulo SENSIS DM42 AE que permite a configuração de filtros e ganhos de sinal de entrada e também permite escolher o tipo de sinal gravado: puro. Este amplificado melhora as condições do sinal antes de ser salvo pelo oscilógrafo.

2.3. Processamento de Sinais

O processamento de sinais foi realizado no programa MATLAB. Primeiramente os sinais puros foram cortados deixando o trecho da passada do rebolo. A continuação foi aplicado um filtro passa banda de 20 KHz a 400 KHz com a finalidade de eliminar ruídos. Posteriormente com a ajuda da FFT foram escolhidas duas bandas de frequência com os melhores resultados.

Em seguida foram calculados os valores RMS dos sinais e a potência máxima do processo. Uma vez aplicados os filtros passa banda, foram calculadas as estatísticas DPO e média e desvio padrão. Finalmente todos os resultados foram utilizados como entradas de uma rede neural de classificação. A Figura 3 mostra um fluxograma do processamento de sinais.

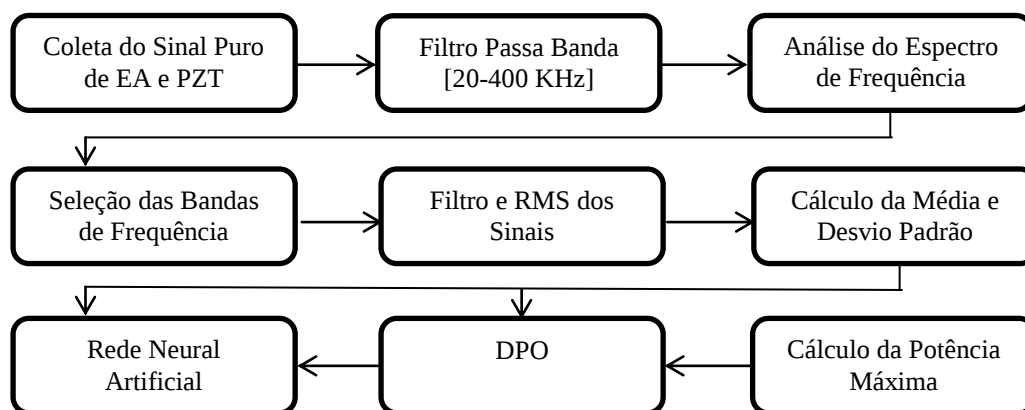


Figura 3. Fluxograma do Processamento de Sinais.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir serão apresentados os valores médios de rugosidade medidos com o rugosímetro. A Figura 4a mostra a rugosidade média da peça. A rugosidade apresenta comportamento exponencial, este comportamento se encontra de acordo com a teoria já que o aumento da profundidade de corte representa um processo agressivo. O estudo deste trabalho será baseado no comportamento da rugosidade. Segundo Hassui e Diniz (2003), os valores de rugosidade não podem ultrapassar os 1,6 μm , portanto, os valores medidos são aceitáveis. A barra de erros representa o intervalo de $(\pm) 1 \times \text{desvio-padrão}$ em relação ao valor médio. Isto corresponde a uma confiança de 68,27% de que os pontos calculados estão dentro deste intervalo.

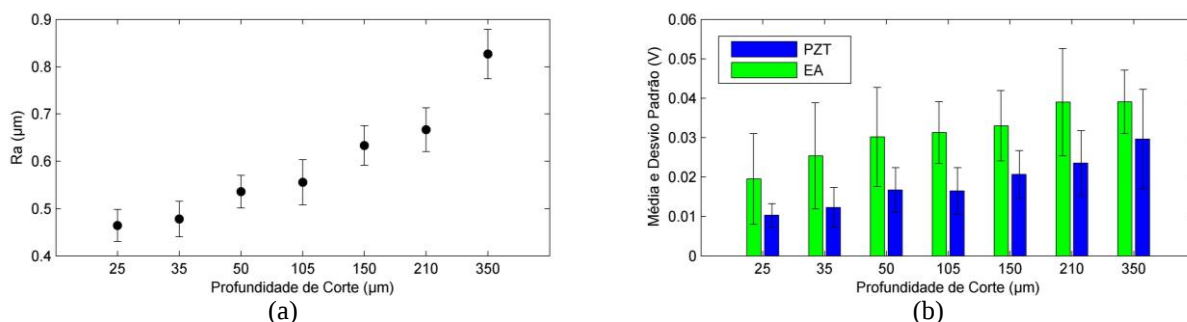


Figura 4. (a) Rugosidade, (b) Média e Desvio Padrão dos valores RMS de EA e PZT.

A figura 4b mostra a média e o desvio padrão dos valores RMS de EA e PZT. Pode-se observar que os dois sensores apresentam comportamento exponencial similar ao da rugosidade. É importante salientar que todos os sinais coletados no processo de retificação seguem as tendências do processo e que têm uma relação direta com a rugosidade da peça, em outras palavras, todas as figuras analisadas neste trabalho deverão se apresentar semelhantes às da Figura 4a. A Figura 5 mostra os espectros de frequência dos sensores de EA e PZT.

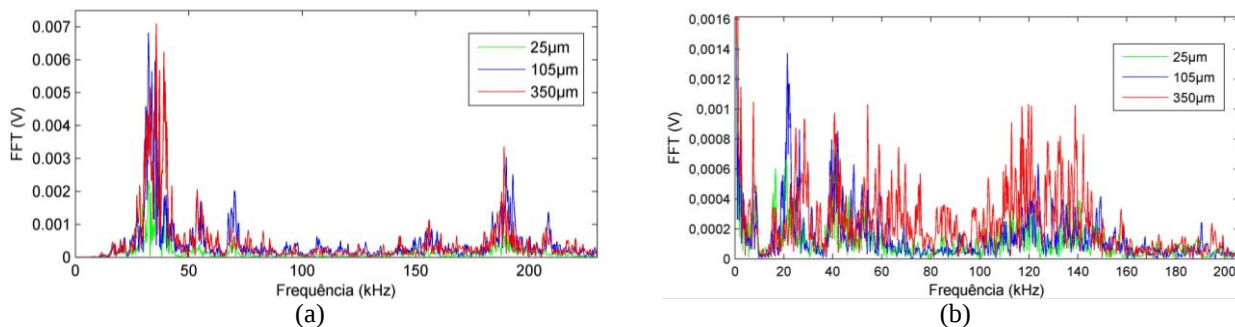


Figura 5. Espectro de Frequência da (a) EA e do (b) PZT.

Os espectros de frequência da Figura 5 apresentam comportamentos e amplitudes diferentes já que cada sensor possui uma sensibilidade e composição diferente. A análise da frequência foi realizada considerando uma profundidade de corte baixa, média e alta. Posteriormente, com a ajuda do MATLAB, foi realizada uma inspeção visual detalhada de todo o espectro com a finalidade de determinar duas bandas de frequência que apresentem o comportamento esperado, ou seja, crescente conforme aumenta a profundidade de corte. A Tabela 2 mostra as bandas de Frequência escolhidas para cada sensor.

Tabela 2. Bandas de Frequência.

Sensor	Banda de Frequência (KHz)
EA B1	185-189
EA B2	223-228
PZT B1	59-65
PZT B2	130-135

A Tabela 3 mostra os valores de potência máxima para cada profundidade de corte. A potência apresentou o comportamento crescente esperado, já que uma profundidade de corte maior requer de uma maior potência por parte do motor elétrico.

Tabela 3. Potência Máxima.

Profundidade de Corte (μm)	25	35	50	105	150	210	350
Potência Máxima (W)	627,83	630,54	616,81	680,23	705,62	804,34	995,26

A Figura 6 mostra a estatística DPO considerando todo o espectro de frequência.

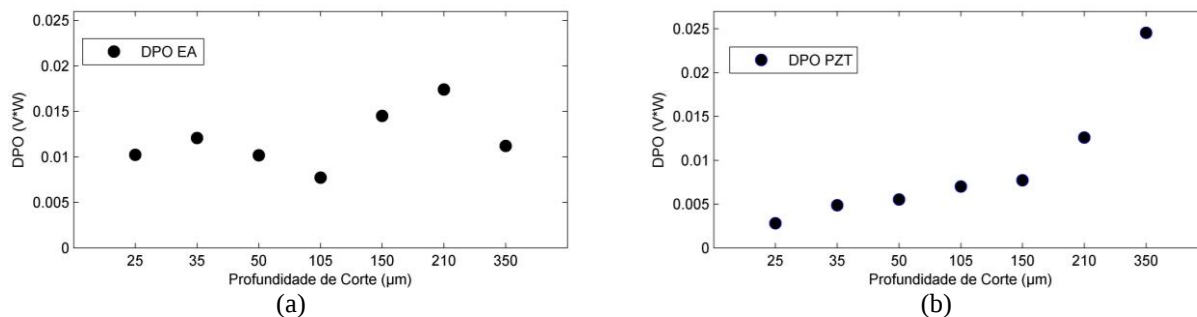


Figura 6. DPO da (a) EA e (b) PZT sem Bandas de Frequência.

Como pode ser observado na Figura 6, a estatística DPO da EA não apresentou o comportamento esperado, isto pode ter sido ocasionado pela quantidade de ruído no sinal puro, já a DPO do PZT apresentou um comportamento crescente similar à rugosidade. A Figura 7 mostra a estatística DPO normalizada com as respectivas bandas de frequência.

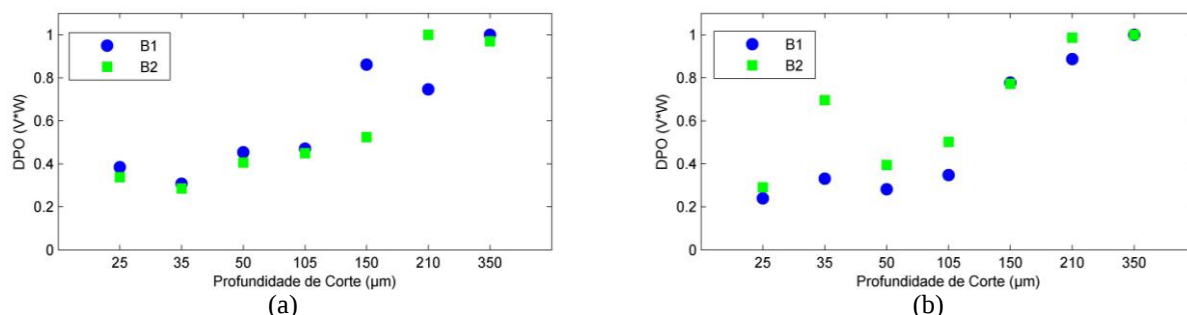


Figura 7. DPO normalizada com as Bandas de Frequência da (a) EA e (b) PZT.

Como pode ser observado na Figura 7, o uso das bandas de frequência corrigiu o comportamento da Figura 6. As duas figuras apresentam um comportamento crescente. Os melhores resultados foram a banda 2 (EA B2) para a emissão acústica e a banda 1 (PZT B1) para o PZT.

3.1. Rede Neural

Foi adotado 0,6 μm como sendo o valor máximo de rugosidade num processo de retificação standard. O processo de retificação de cerâmicas, o qual deixe o valor de rugosidade acima do valor máximo, será considerado agressivo. Retificações agressivas podem ocasionar trincas ou queima durante a usinagem.

A rede neural de classificação teve como objetivo classificar o processo de retificação em dois tipos: rugosidade maior e menor de 0,6 μm, em outras palavras, um processo standard e um agressivo. É importante relembrar que a rugosidade da peça vai depender da profundidade de corte e do estado do rebolo. Um desgaste grande do rebolo, mesmo com a uma profundidade de corte pequena, poderia resultar em uma rugosidade da peça acima do valor máximo.

A rede neural teve as seguintes entradas:

Tabela 4. Entradas da RNA.

EA	PZT
Média	Média
DPO B1	DPO B1
DPO B2	DPO B2

Com a finalidade de aumentar a quantidade de dados, cada peça foi dividida em 20 partes iguais. Cada uma das entradas da rede neural possui os dados das sete peças retificadas (cada entrada possui 140 valores). O total de dados foi dividido em 70% para treinamento, 15% para teste e 15% para validação. A rede neural consistiu de seis camadas de entrada, três camadas ocultas e duas de saída. Foi criada uma tabela com o objetivo de testar diferentes combinações de neurônios nas três camadas ocultas, em total 75 combinações diferentes. As entradas foram testadas de duas em duas para cada combinação de camadas ocultas, sendo em total 1125 testes realizados pela RNA.

Uma vez obtidos todos os resultados, foi escolhido a combinação que apresentou o menor erro. O melhor resultado foi o teste realizado com o valor médio PZT e a estatística DPO com a banda 1 PZT como entradas, junto com a seguinte combinação de neurônios nas camadas ocultas: 10 neurônios na primeira camada, 20 na segunda e 5 na terceira.

A Figura 8 mostra o resultado da RNA de classificação.

Matriz de Confusão

Classe Actual	1	12 57.1%	0 0.0%	100% 0.0%
	2	0 0.0%	9 42.9%	100% 0.0%
		100% 0.0%	100% 0.0%	100% 0.0%
		1	2	
		Classe Predita		

Figura 8. Matriz de Confusão da RNA.

Na matriz confusão, o elemento 1 representa uma retificação standard e o elemento 2 uma retificação agressiva. As colunas representam o resultado esperado, enquanto que as linhas representam os resultados obtidos. Os 21 dados analisados representam o 15% de validação. Pode ser observado que não foram obtidos falsos positivos, assim, a rede neural teve 100% de acerto.

4. CONCLUSÕES

Neste trabalho, propõe-se um modelo analítico simples para estimar a rugosidade da superfície retificada e o desgaste do rebolo. Com base em pesquisas anteriores e nos resultados obtidos nestes testes, pode-se concluir que a análise da rugosidade da superfície retificada pode ser utilizada para monitorar o desgaste do rebolo. Os sinais de EA e PZT podem ser comparados com a rugosidade para detectar erros no processo de retificação. Além disso, o uso de bandas de frequência é crucial na análise dos testes, é sempre melhor escolher uma banda que esteja de acordo com a teoria.

De acordo com a literatura, os resultados destes testes permaneceram dentro de um padrão aceitável. Como pode ser visto nos valores, o baixo desvio padrão e a similaridade dos números confirmaram as execuções bem-sucedidas dos testes. A facilidade de ser implementada sem a necessidade de conduzir experimentações laboriosas faz do parâmetro DPO uma importante ferramenta na análise da rugosidade da superfície da peça.

Os resultados da estatística DPO para a EA e PZT são consistentes de acordo com a literatura. Pode-se concluir que quanto maior a profundidade do corte, maior é a rugosidade da superfície e a possibilidade de apresentar queimaduras e fissuras na peça de trabalho. Uma profunda profundidade de corte representa uma retificação agressiva.

O sensor PZT respondeu com êxito aos estímulos causados pelo processo de retificação. Todos os valores PZT encontram-se dentro da faixa aceitável. Como pode ser observado nas figuras, existe uma grande similaridade nos resultados de EA e PZT. A rede neural classificou com êxito os valores de rugosidade. Em um estudo futuro poderão ser implementadas redes neurais mais complexas capazes de realizar uma classificação mais detalhada ou até uma estimativa do valor de rugosidade. Os valores PZT foram as melhores entradas para a rede neural.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a CAPES e CNPq.

6. REFERÊNCIAS

- Abellan-Nebot, J., e Subirón, F., 2010. "A review of machining monitoring systems based on artificial intelligence process models," Int. J. Adv., vol. 47, pp. 1–21.
- Aguiar, P. R., de Paula, W.C. F., Bianchi, E.C., Ulson, J.A.C, e Cruz, C. E. D., 2010. "Analysis of forecasting capabilities of ground surfaces valuation using artificial neural networks". Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 32(2), pp. 146-153.
- Aguiar, P.R., 1997. "Monitoramento da queima superficial em processo de usinagem por retificação usando a potência elétrica do motor de acionamento e emissão acústica". Tese de Doutorado - USP, São Paulo, SP, Brasil.
- Argawal, P., Rao, V., 2005. "A probabilistic approach to predict surface roughness in ceramic grinding". International Journal of Machine Tools e Manufacture, 45, pp. 609-616.
- Baptista, F.G., 2010. "Uma contribuição aos sistemas de monitoramento de integridade estrutural baseados na impedância eletromecânica. 91 f". Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica. Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista. Ilha Solteira, Brasil.
- Bianchi, E.C., Sanches, L.E.A., Fernandes, O.C., Mogami, O., Silva JR, C.E. e Aguiar, P.R., 1996. "Análise do Comportamento de Rebolos Convencionais na Retificação de Aços Dúcteis". In: IV CONGRESSO NORTE NORDESTE DE ENGENHARIA MECÂNICA, Recife-PE, pp. 387-392.
- Brinksmeier, E., Aurich, J.C., Govekar, E., Heinzl, C., Hoffmeister, H. W., Klocke, F., Peters, J., Rentsch, R., Stephenson, D.J., Uhlmann, E., Weinert, K., Wittmann, M., 2006, "Advances in modeling and simulation of grinding processes", Annals of the CIRP, 55(2), pp. 667-696.
- Callister, W. D., 2006. "Fundamentos da ciência e engenharia de materiais: uma abordagem integrada". Rio de Janeiro: Ltc, 2 edição, pp. 702.
- Gardner, M., e Dorling, S., 1998. "Artificial neural networks (the multilayer perceptron)—a review of applications in the atmospheric sciences," Atmos. Environ., 32(14–15), pp. 2627–2636.
- Gong, Y.D., Wang, W.S., 2002. "The simulation of grinding wheels and ground surface roughness based on virtual reality technology", Journal of Materials Processing Technology, 129 (1-3), pp. 123-126.
- Hassui, a., Diniz, a. E., 2003. Correlating surface roughness and vibration on plunge cylindrical grinding of steel. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 43(8), 855–862.
- Irani, R. A., Bauer, R.J. e Warkentin, A., 2005. "A review of cutting fluid application in the grinding process". International Journal of Machine Tools and Manufacture, 45(15), pp.1696–1705.

- Kim, H.Y., Kim, S.R. e Ahn, J.H., 2001. "Process monitoring of centerless grinding using acoustic emission.," J. Mater. Process. Technol., 111(1-3), pp. 273-278.
- Kwak, J., Song, J., 2001. Trouble diagnosis of the grinding process by using acoustic emission signals. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 41(6), pp. 899-913.
- Nakai, M.E., Aguiar, P.R., Junior, H.G., Bianchi E.C., Spatti, D.H. e D'Addona, D.M., 2015. "Evaluation of neural models applied to the estimation of tool wear in the grinding of advanced ceramics," Expert Syst. Appl., 42(20), pp. 7026-7035.
- Rezende, S. M., 2004. "Materiais e dispositivos eletrônicos". Editora Livraria da Física, 2 edição, pp. 547.
- Sarker, M. R., Ali, S. H. M., Othman, M., e Islam, S. (2013). Designing a Battery-Less Piezoelectric based Energy Harvesting Interface Circuit with 300 mV Startup Voltage. Journal of Physics: Conference Series, Vol 431, conference 1.
- Yang, J.F. e Chen, F.K., 2002. "Recursive discrete Fourier transform with unified IIR filter structures," Signal Processing, vol. 82, pp. 31-41.
- Yao, X., 1999. "Evolving artificial neural networks," Proc. IEEE, 87(9), pp. 1423-1447.
- Zhang, D., Li, C., Jia, D., Zhang, Y., 2014. "Investigation into Engineering Grinding Mechanism and the Influential Factors of the Grinding Force". International Journal of Control and Automation, 7(4), pp. 19-34.
- Zhou, J., Pang, C.K., Zhong, Z. e Lewis, F.L., 2011. Tool Wear Monitoring Using Acoustic Emissions by Dominant-Feature Identification, IEEE Transactions on Instrumentations and Measurements, 60(2), pp. 547- 559.

7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluídos neste trabalho.

PIEZOELECTRIC TRANSDUCER APPLIED TO MONITORING SURFACE ROUGHNESS AND GRINDING WHEEL WEAR IN GRINDING OF ADVANCED CERAMICS

Martin Antonio Aulestia Viera¹, aulestia.martin16@gmail.com
Pedro de Oliveira Conceição Junior¹, pedroliveira@hotmail.com.
Paulo Roberto de Aguiar¹, aguiarpr@feb.unesp.br.
Eduardo Carlos Bianchi², bianchi@feb.unesp.br.

¹Universidade Estadual Paulista - UNESP - Campus de Bauru. Departamento de Engenharia Elétrica, Av. Luiz Edmundo Carrijo Coube, 14-01, Caixa Postal 473, CEP 17033-360, Bauru, SP, Brasil.

²Universidade Estadual Paulista - UNESP - Campus de Bauru. Departamento de Engenharia Mecânica, Av. Luiz Edmundo Carrijo Coube, 14-01, Caixa Postal 473, CEP 17033-360, Bauru, SP, Brasil.

Abstract: Studies of the grinding wheel wear and the workpiece roughness have become important parameters in monitoring the grinding process of advanced ceramics. The objective of this work is to analyze the use of low cost PZT (Lead Zirconate Titanate) piezoelectric transducers in the monitoring of the grinding process of advanced ceramics by implementing artificial neural network (ANN) models. In order to prove the effectiveness of the PZT results, a commercial and consolidated acoustic emission sensor (AE) was also used at work, as well as the power of the grinding wheel motor was measured for the implementation of statistics. Tests were performed in the laboratory using a flat grinding machine equipped with a diamond grinding wheel with resinoid binder. Alumina ceramic workpieces were machined at different cutting depths, using constants workpiece and cutting speeds, representing light and aggressive grinding conditions. Roughness measurements were performed at different points along the workpieces, after grinding, using a portable rugosimeter. For the process monitoring, a PZT sensor and an EA sensor were used, both fixed in the support of the workpiece. An oscilloscope made the acquisition of the raw signals at a sampling rate of 2 million samples per second. Digital signal processing techniques were used, such as the Fast Fourier Transform (FFT) and statistics derived from the EA and PZT signals, such as the DPO (the product of the EA standard deviation by the mean power) and the mean value, seeking for a correlation with the surface roughness. It was possible to analyze the frequency spectrum of the signals, as well as the different characteristics of each depth of cut. A special analysis was performed of two different frequency bands using digital filters, demonstrating that the DPO parameter has a close resemblance to roughness. A classification ANN was implemented with all the results obtained. All inputs were tested, using two inputs at a time, with a three-layer neuron table with 75 different possibilities, thus taking 1125 tests performed. We chose the result that presented the smallest error. The tests produced satisfactory results for the monitoring of the grinding process of advanced ceramics, reflecting in its optimization.

Palavras-chave: Grinding, Advanced Ceramics, Monitoring, PZT, Artificial Neural Network.