

MONITORAMENTO DA RETIFICAÇÃO DE CERÂMICAS AVANÇADAS POR MEIO DE DIAFRAGMAS PIEZELÉTRICOS DE BAIXO CUSTO

Felipe Aparecido Alexandre, felipeapalexandre@hotmail.com¹
Pedro de Oliveira Conceição Junior, pedroliveira931@hotmail.com¹
Martin A. Aulestia Vieira, aulestia.martin16@gmail.com¹
Paulo Roberto de Aguiar, aguiarpr@feb.unesp.br¹
Eduardo Carlos Bianchi, bianchi@feb.unesp.br²
Bruno Albuquerque de Castro, bruno.castro@feb.unesp.br¹
Bento Rodrigues de Pontes Junior, brpontes@feb.unesp.br¹

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

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

Resumo: A retificação é um processo de usinagem que tem como objetivo conferir acabamento superficial de alta qualidade. Tal processo é muito utilizado no acabamento de cerâmicas avançadas, sendo necessário o monitoramento constante para garantir a qualidade do processo. O monitoramento da retificação de cerâmicas por meio do sinal de diafragmas piezelétricos se apresenta como uma alternativa para o diagnóstico da superfície da peça. Resultados de pesquisas recentes demonstraram que esse sinal tem um potencial satisfatório para monitorar o processo de retificação. O presente trabalho tem como objetivo estudar o sinal de diafragmas piezelétricos, buscando a extração de características que melhor se relacionam com a rugosidade nas peças usinadas. Para os ensaios foi utilizada uma máquina retificadora tangencial plana com rebolo diamantado e corpos de prova de cerâmica alumina. O sinal foi medido por um diafragma piezelétrico e coletado por um osciloscópio à taxa de amostragem de 2 MHz. Os ensaios foram realizados em diferentes profundidades de corte, adotando uma velocidade constante da peça (v_w), obtendo condições de usinagem brandas às mais severas. A rugosidade R_a das peças usinadas foi medida em quatro pontos ao longo das mesmas, por meio de um rugosímetro portátil. Os dados de diferentes profundidades de corte foram processados e seu conteúdo harmônico obtido por meio de FFT (Fast Fourier Transform) e PSD (Processing Spectral Density). A partir desses espectros foi escolhida a melhor banda que representasse as diferentes condições de desgaste. Em seguida, foi aplicado filtro digital aos sinais puros para a banda escolhida e, posteriormente, o valor RMS (Root Mean Square) foi obtido para o sinal filtrado e não filtrado e comparado com os valores da rugosidade medidos. Análise através do coeficiente r e R^2 foram efetuadas. Dos resultados obtidos, verificou-se que o sinal do diafragma piezelétrico e rugosidade aumentam seus níveis de amplitude, conforme as condições de usinagem se tornam mais severas. A rugosidade se manteve, em geral, dentro da faixa aceitável de valores. Conclui-se que o sinal do diafragma piezelétrico e rugosidade apresentam uma tendência de crescimento ao longo das profundidades de corte e que ambas têm amplitudes opostas. A partir desse estudo, sistemas de monitoramento de baixo custo poderão ser aprimorados e desenvolvidos em futuros trabalhos.

Palavras-chave: Cerâmica Avançada, Retificação, Diafragma Piezelétrico, Monitoramento, Rugosidade

1. INTRODUÇÃO

Os materiais cerâmicos têm sido amplamente utilizados como materiais estruturais em muitos campos industriais devido a suas excelentes propriedades, tais como: resistência a altas temperaturas, baixo coeficiente de expansão térmica, estabilidade química e resistência ao desgaste (Jiang et al. 2015). As cerâmicas avançadas atualmente estão sendo utilizadas em válvulas, pistões, rolamentos, rotores e outras aplicações em que são necessárias baixas tolerâncias dimensionais e bom acabamento superficial (Agarwal 2015).

A retificação é considerada um dos estágios mais importantes no processo de usinagem em cerâmicas avançadas, pois confere a peça controle dimensional mais preciso e excelente acabamento (Nakai, Aguiar, et al. 2015). Porém, o processo de retificação contém múltiplas variáveis como, por exemplo, o contato de vários grãos abrasivos distribuídos de forma randômica e unidos por um ligante (rebolo) com a superfície da peça, a composição de forças, tais como, força de corte e tangencial, o ambiente de usinagem, a velocidade de avanço, são variáveis que devem ser consideradas para a execução do processo com qualidade.

As cerâmicas avançadas, como óxido de alumínio, nitreto de silício, zircônia (Chang & Kuo 2007) e alumina possuem elevada dureza e friabilidade, sendo difícil sua manipulação no âmbito da manufatura, desta forma, a retificação de um modo geral, causa danos superficiais e subsuperficiais que podem ser prejudiciais à resistência e ao desempenho dos componentes cerâmicos (Shen et al. 2015). Por conseguinte, a utilização de parâmetros para análise da qualidade

superficial da peça é necessária, como rugosidade, inspeção ótica, difração dentre outros. De acordo com (Ma et al. 2014) a avaliação da rugosidade é um dos parâmetros mais importantes na qualidade superficial dos componentes retificados.

A medição da rugosidade por métodos tradicionais como hastes de provas e perfilômetros óticos, na maioria das vezes necessita da parada da máquina, tornando inviável sua utilização, apesar da sua importância no âmbito da avaliação de qualidade do processo. A medição da rugosidade torna-se inviável devido ao fato da necessidade de interrupção do processo de retificação, acarretando no aumento do tempo de produção e consequentemente aumento de custos para a indústria de manufatura. Assim, a estimação da rugosidade através de processamento de sinais advindos do processo de retificação, torna-se uma alternativa que viabiliza a avaliação da superfície.

Vários transdutores foram utilizados nos últimos anos para monitorar diversos processos de manufatura, como sensor de emissão acústica, vibração, potência do motor entre outros. O uso de transdutores piezelétricos para monitoramento da integridade estrutural (SHM) teve um aumento crescente (Ribeiro et al. 2015) nos últimos anos. As principais vantagens de diafragmas piezelétricos são o baixo custo e facilidade na instalação, possibilitando o monitoramento sem a interrupção do processo.

A garantia da qualidade superficial de cerâmicas avançadas no processo de retificação é de suma importância para a indústria de manufatura. Assim, este trabalho tem como objetivo monitorar o processo de retificação através de diafragmas piezelétricos com o intuito de relacionar os sinais advindos do processo com as características de rugosidade das peças usinadas. Para tanto, fez-se uso de técnicas de processamento digital de sinais como a de FFT (*Fast Fourier Transform*), PSD (*Processing Spectral Density*) e filtros digitais.

1.1. Retificação de Cerâmicas

As cerâmicas avançadas estão aumentando suas aplicações na indústria, devido as propriedades inerentes ao material, como a dureza, estabilidade térmica e resistência ao desgaste. Embora, grandes progressos têm sido feitos no desenvolvimento de cerâmicas nos últimos anos, a dificuldade em remoção do material e os altos custos de usinagem restringem a ampliação de utilização destes materiais (Emami et al. 2014).

De acordo com Conceição Jr (2016) o processo de retificação é a etapa mais importante da usinagem de cerâmicas avançadas, possuindo como característica alta complexidade devido as inúmeras partículas abrasivas que encontram-se em contato com a superfície da peça. Este processo, situa-se na parte final da cadeia de usinagem, portanto, no momento em que a peça está situada neste estágio, à mesma, possui alto valor agregado adquiridos nos processos de usinagem anteriores. Assim, a má execução e consequente perda da peça é algo indesejado, pois toda a cadeia de processos é perdida, provocando prejuízo a manufatura.

Os processos abrasivos e entre eles o processo de retificação utilizam ferramentas de corte de alta dureza para a usinagem de cerâmicas avançadas. No entanto, a alta dureza e friabilidade associadas as cerâmicas avançadas produzem forças de extrema amplitude na retificação, baixa remoção de material, alto desgaste da ferramenta de corte, e danos superficiais e subsuperficiais (Emami et al. 2013).

A retificação pode ser dividida em alguns estágios, como desbaste, semi-acabamento e acabamento, onde o desbaste consiste em uma retirada de material de forma mais severa, com o intuito de aproximar as dimensões exigidas para a peça, o semi-acabamento equivale a uma taxa de remoção branda observando a superfície e procurando não a danificar, por fim, o acabamento é o estágio onde as dimensões exigidas são conferidas a peça e a qualidade superficial é alcançada.

1.2. Rugosidade

De acordo com Kalpakjian et al (2014) a rugosidade é definida como desvios irregulares em pequena escala dentro de espaços muito próximos. Expressa-se a rugosidade através dos termos de altura, largura e distância na superfície. A Fig. (1) mostra a superfície de uma peça com a aproximação de seus vales e picos, dessa forma, é possível ilustrar o conceito de rugosidade.

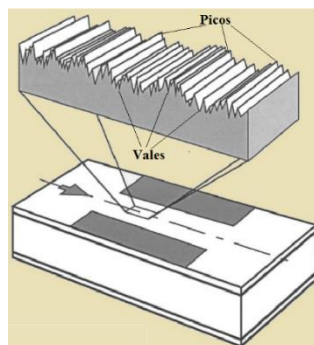


Figura 1. Rugosidade – picos e vales. Adaptado de HALLE (aki-alttech.co.jp)

A rugosidade é um dos fatores mais importantes para avaliar a qualidade superficial da peça (Conceição Jr et al. 2015). Atualmente são utilizados alguns métodos para caracterização da rugosidade, dentre eles, o mais comum é a rugosidade média (R_a). A Eq.(1) define este parâmetro:

$$R_a = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} \quad (1)$$

Onde x_1, x_2, x_n são a média dos valores absolutos de rugosidade aferidos geralmente em μm e n é a quantidade de aferições.

Além da R_a , outros parâmetros de rugosidade são encontrados como o máximo pico ou vale de rugosidade (R_t) e a raiz média quadrática da rugosidade (R_q). O processo de retificação altera de forma direta a rugosidade, a interação entre a ferramenta de corte e a peça, a afiação do rebolo, taxa de remoção entre outras variáveis afetam a qualidade final da superfície.

1.3. Monitoramento do processo de retificação de cerâmicas

O monitoramento do processo de retificação de cerâmicas tem como principal objetivo o aumento de controle em relação à qualidade, pois como mencionado anteriormente esta operação de usinagem confere a peça acabamento e dimensões desejadas. Um dos parâmetros mais utilizados para aferir a qualidade é a rugosidade, porém aferir este método de forma convencional pode consumir tempo e exigir a parada da máquina, de tal forma que o monitoramento deste parâmetro de forma indireta traz benefícios ao processo.

Os transdutores piezelétricos ou diafragmas piezelétricos tem sido utilizado nas últimas décadas com intuito de detectar danos estruturais devido ao efeito piezelétrico. O efeito piezelétrico consiste no surgimento de um campo elétrico em um material submetido a uma tensão mecânica, onde o contrário também se aplica, ou seja, ao aplicar uma tensão elétrica entre os dois lados de um material piezelétrico, surge uma deformação mecânica (Marchi et al. 2015). Esse tipo de transdutor tem grande importância em muitas áreas de monitoramento. Os transdutores piezelétricos mais utilizados são a cerâmica de PZT (*Pb-Lead Zirconate Titanate*) e MFC (Macro-Fiber Composite) que possuem uma espessura de alguns décimos de milímetros (Baptista & Filho 2011).

Os sinais provenientes dos sensores PZT (*Pb-Lead Zirconate Titanate*) trazem inúmeras informações quanto ao processo o qual estão monitorando. Através de análise de sinais e do conteúdo harmônico obtido através de FFT (*Fast Fourier Transform*) e do PSD (*Power Spectral Density*) é possível identificar padrões nos sinais e relacioná-los com o processo analisado. Para a análise de padrões específicos do sinal, conta-se com o auxílio de filtros digitais, além do uso de estatísticas como RMS (*Root Mean Square*).

De acordo com (Saravanan et al. 2015) a técnica de danos baseado em RMS segue a seguinte relação:

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

Onde: N é o número de amostras e f_i consiste no sinal de PZT na janela de N amostras.

Além da média do RMS outros parâmetros estatísticos podem ser utilizados, como o coeficiente de correlação (r) e o coeficiente de determinação (R^2). O coeficiente de correlação determina a relação linear entre duas variáveis quantitativas, ou seja, mensura o quão forte é a relação entre as variáveis, este coeficiente (r) varia entre -1 e 1, quão mais próximo dos extremos maior a correlação. De acordo com (Puth et al. 2014) é apresentada a Eq. (3) para cálculo do coeficiente r :

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N \{(X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})\}}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (3)$$

Onde N é a quantidade de variáveis, X_i e Y_i são os valores mensurados das variáveis, $\bar{X}$ e $\bar{Y}$ são a média aritmética das variáveis X_i e Y_i respectivamente.

O coeficiente de determinação indica em porcentagem quanto o modelo possui de capacidade para explicar a relação entre os valores observados. A Eq. (4) apresenta o coeficiente R^2 :

$$R^2 = \sum_{i=1}^N \frac{(\hat{Y}_i - \bar{Y})^2}{[(\hat{Y}_i - \bar{Y})^2 + (\hat{Y}_i - Y_i)^2]} \quad (4)$$

Onde N é a quantidade de variáveis, $\hat{Y}_i$ é o valor estimado (previsão) de Y_i , $\bar{Y}$ é a média das observações e Y_i são os valores estimados.

A partir dos resultados obtidos da Eq. (2), aplicação de processamento de sinais e utilizando parâmetros estatísticos como os apresentados na Eq. (3) e Eq. (4) com o intuito de avaliar os modelos propostos, é possível obter informações

que caracterizem uma relação com a rugosidade e assim auxiliem na criação de um sistema de monitoramento de baixo custo.

2. PROPÓSITOS

Muitos estudos sobre o processo de monitoramento da operação de retificação têm sido publicados, no entanto, estudos sobre a relação entre sinais advindos de diafragmas piezelétricos e a rugosidade são pouco abordados. Um modelo para rugosidade de uma peça de cerâmica foi proposto por (Ma et al. 2014), considerando inclinações com ângulos de flexão e deflexão da ferramenta de corte, o estudo demonstrou que o modelo é efetivo e se assimila de forma satisfatória as condições observadas no experimento. Em relação a retificação UVASG (*Ultrasonic vibration assisted side grinding*) (Xiao et al. 2015) propôs um modelo de força de corte que contempla os mecanismos de remoção dúctil-frágeis, além dos grãos da ferramenta ativos, inserindo um parâmetro K para representar a influência da sobreposição e intersecção entre os grãos de diamante. Os autores concluem que o modelo é consistente em relação aos dados experimentais. A utilização de redes neurais para estimar o desgaste do dressador quando da retificação de cerâmicas avançadas foi proposto por (Nakai, Júnior, et al. 2015), utilizaram-se sinais de emissão acústica (EA) e Potência no momento da operação, aliados a redes neurais perceptron multicamadas, redes neurais de função radial, redes neurais de regressão geral e sistema neuro fuzzy adaptativos, os autores obtiveram como resultadas das redes neurais propostas uma assertividade muito alta.

A utilização do sinal de vibração para monitorar o processo de retificação de cerâmicas e assim estimar a rugosidade foi observado por (Conceicao Junior et al. 2016), os autores apresentaram correlação entre o sinal de vibração e a rugosidade, utilizando para tanto, análises espectrais, filtros digitais e estatísticas como RMSD (*Root Mean Square Deviation*) e CCDM (*Correlation Coefficient Deviation Metric*). Os resultados apresentados indicam que o sinal de vibração é efetivo no monitoramento do processo, havendo uma proporcionalidade com a rugosidade aferida nas peças. O uso de diafragmas piezelétricos no monitoramento de retificação de aço SAE 1045 para estimar a condição superficial da peça foi analisado por (Ribeiro et al. 2015), os autores através de técnicas de processamento digital e utilização de estatísticas como RMS, foram capazes de relacionar os valores com a rugosidade expressando a relação entre os parâmetros, além de configurar o diafragma piezelétrico como um sensor de baixo custo viável para operação de monitoramento.

Assim, devido a importância do monitoramento da retificação em cerâmicas e da necessidade crescente na automação deste processo, o presente trabalho tem como objetivo estudar o processo de retificação através da análise espectral de sinais providos de diafragmas piezelétricos. Para tanto, faz-se análises dos espectros de frequência, além da utilização de filtros digitais e estatísticas para relacionar com os valores de rugosidade. Desta forma, este estudo visa contribuir para automatização do processo permitindo a melhora de sistemas de monitoramento no que a tange a escolha de algumas variáveis do processo, como a profundidade de corte para aumentar a qualidade da superfície.

3. MATERIAL E MÉTODOS

Nesta seção serão apresentados os procedimentos adotados para a experimentação do presente trabalho, os quais estão relacionados com os materiais e métodos empregados em cada etapa, tais como a configuração do banco de ensaios, o sistema de aquisição de dados, o processamento digital dos sinais e a extração de características quando do comportamento da rugosidade na retificação da cerâmica.

3.1. Montagem do banco de ensaios.

Os ensaios foram realizados em uma máquina retificadora plana tangencial da marca Sulmecânica, modelo RAPH 1055, com um rebolo diamantado sintético, código SD126MN50B2, fabricado pela empresa Dinser Ferramentas, com diâmetro de 350 mm e largura de 15,5 mm. Os corpos de provas foram fabricados por prensagem e sinterização resultando em barras retangulares de alumina, composta por 96% de óxido de alumínio e 4% de óxidos como dióxido de silício, óxido de cálcio e o óxido de magnésio. As dimensões dos corpos de prova foram de 20 x 20 x 7 mm entre comprimento, largura e altura. O fluido de corte utilizado foi emulsão água-óleo de 4% de concentração, sendo o óleo do fabricante Shell, tipo DMS 3200 F-1. A medição da concentração do fluido de corte foi feita através de um refratômetro N-1E da Atago. O bocal tinha seção retangular de 49 mm de comprimento por 3 mm de largura sendo utilizada uma vazão de 27,51 l/min e pressão de 02 kgf/cm². A velocidade de corte (v_s) foi de 33 m/s e a velocidade da peça (v_w) foi de 58 m/s. O dressador aplicado neste trabalho para a operação de perfilamento da ferramenta de corte foi do tipo conglomerado. A Fig. (2) apresenta o banco de ensaios:

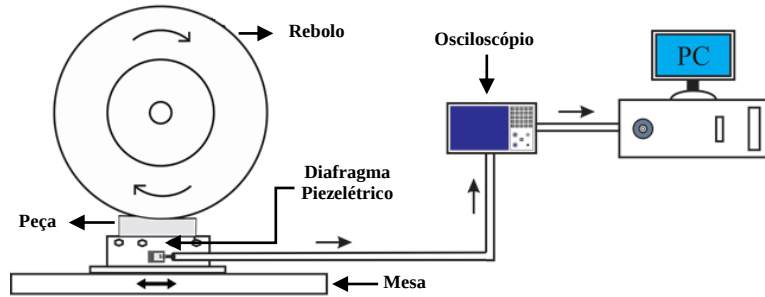


Figura 2. Banco de Ensaio

O avivamento do rebole foi feito com uma peça de óxido de alumínio. Antes de cada ensaio foi realizado a dressagem do rebole diamantado. Os ensaios foram realizados em sete profundidades de corte (a), sendo: 25 μm , 35 μm , 50 μm , 105 μm , 150 μm , 210 μm , 350 μm . Justifica-se a escolha da variação das profundidades de corte baseado no parâmetro de espessura equivalente de corte h_{eq} definido por (Rodrigues et al. 2016) na Equação 5:

$$h_{eq} = \frac{a \cdot V_w}{V_s} \quad (5)$$

Onde h_{eq} espessura de corte equivalente em μm , a profundidade de corte em μm , V_w velocidade de avanço da mesa em m/s e V_s em velocidade de corte em m/s.

A velocidade de corte (V_s) e a velocidade de avanço (V_w) foram mantidas constantes, dessa forma, a variação da profundidade de corte (a) é necessária para provocar as variações na espessura equivalente de corte (h_{eq}) e consequentemente na superfície da peça retificada.

Um osciloscópio da marca Yokogawa, modelo DL850 foi usado para leitura do diafragma piezoeletrico. O sinal do diafragma piezoeletrico foi coletado a cada passagem do rebole sobre a peça, sendo o diafragma acoplado ao suporte da peça. O diâmetro do diafragma piezoeletrico foi igual a 35 mm, fabricado pela empresa MURATA. A faixa de frequências que o diafragma piezoeletrico responde é de 0 a 250 kHz, como demonstrado por (Almeida et al. 2015) através do teste PLB (*Pencil Lead Break*). O diafragma piezoeletrico possui como característica a conversão de deformações mecânicas em tensões elétricas (V). Assim, todos os sinais aquisitados pelo osciloscópio, tratam-se de sinais de tensão.

Para a medição de rugosidade foi utilizado um rugosímetro digital, modelo *Surtronic 3+*, fabricado pela Taylor Robson. As medições foram realizadas em quatro pontos ao longo das peças, ou seja, cada uma das peças foi dividida em quatro pontos centrais equidistantes e foi adquirido em cada ponto um valor médio de três medidas. O rugosímetro foi colocado sobre um suporte que permite o nivelamento da superfície retificada com o apalpador do rugosímetro. O rugosímetro foi configurado para medir os valores da rugosidade média (R_a), o comprimento de contato (l_c) foi de 0,8 mm, o ganho horizontal (v_h) foi de 100 e o deslocamento para medição (*Cut-off*) foi de 12,5 mm

3.2. Processamento Digital dos Sinais e Análise dos Dados

Os sinais coletados durante os ensaios foram analisados com o objetivo de encontrar uma relação com a rugosidade dos corpos de prova de cerâmica após a usinagem. Inicialmente considerou-se o conteúdo harmônico dos sinais em diferentes níveis de profundidade. A Fig. (3) apresenta a comparação entre os sinais originais filtrados por um filtro digital *bandpass* 0 a 400 kHz, com profundidade de corte de 25 μm (a), 105 μm (b) e 350 μm (c).

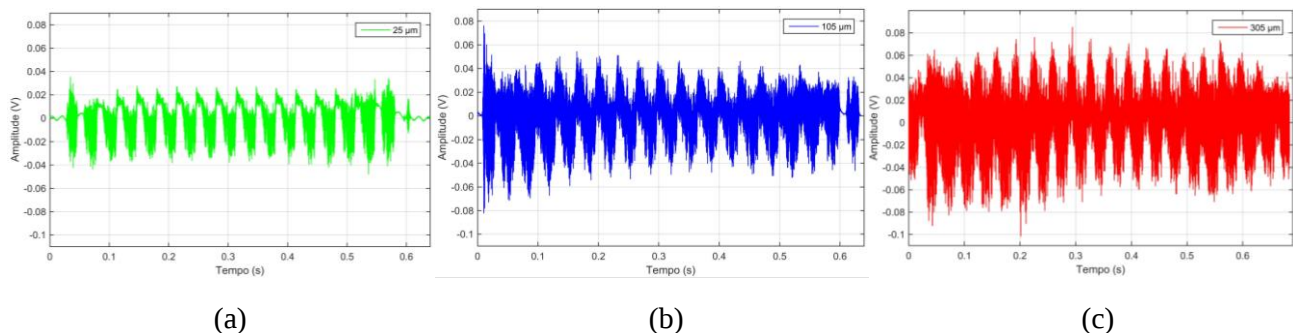


Figura 3. Sinais originais filtrados em 0 a 400 kHz

A partir da Fig. (3) é possível identificar mudanças nos sinais, o primeiro sinal Fig. (3a) possui amplitude mais baixa em relação aos sinais posteriores, a justificativa para esse comportamento está intimamente relacionada a profundidade de corte e consequentemente a força exercida sobre a peça durante o processo. Uma profundidade de corte maior como apresentado em (b) e (c) exige maior força, pois há um aumento considerável no atrito e na taxa de remoção, alterando a amplitude do sinal.

A Fig. 4 apresenta o espectro de frequência dos sinais em todas as profundidades de corte definidas, a visualização é disposta em 2D – Fig. (4a) e 3D – Fig. (4b). O espectro de frequência foi determinado através do algoritmo da FFT janela de *Hanning* média, em três trechos de 8192 amostras de sinal, sendo esses trechos distribuídos de forma equidistante. Através da Fig. (4a) é possível aferir que a amplitude aumenta em proporção a profundidade de corte, porém a Fig. 4b elucida o processo de forma mais clara, visto que a amplitude do espectro em frequência da profundidade de corte de 150 μm é menor que a profundidade de 105 μm e a amplitude do espectro de frequência da profundidade de corte de 50 μm de forma análoga também é menor que a profundidade de 35 μm . A mudança está baseada nas inúmeras variáveis do processo, pois a retificação é um processo com alto comportamento estocástico (Winter et al. 2014) contribuindo para as alterações dos sinais e de seus respectivos espectros de frequência.

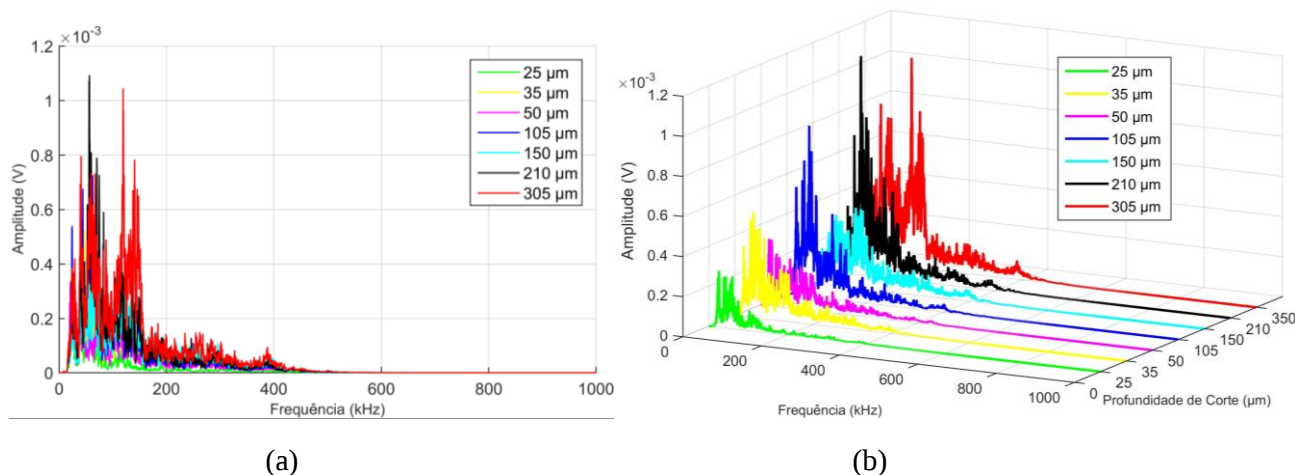


Figura 4. FFT dos sinais de retificação de cerâmica

A Fig. (5) mostra o PSD de todas as profundidades de corte efetuadas. A janela de *Hanning* foi utilizada como apresentado na FFT, além disso não houve sobreposição do sinal (*overlap*). O tamanho considerado para janela foi de 8192 amostras do sinal. A frequência de amostragem permaneceu a mesma, no caso dois milhões de amostras por segundo. A FFT e o PSD são referentes ao domínio da frequência, em ambas as figuras – Fig (5a) e Fig (5b) o aumento de profundidade de corte interfere de forma direta no aumento da Potência Espectral.

A partir dos espectros em frequência, foram selecionados três que melhor caracterizavam o processo, para tanto, os espectros correspondentes as profundidades de corte de 25 μm , 105 μm e 305 μm foram escolhidos. O objetivo deste processo consiste na análise em frequência para posterior utilização de filtros digitais.

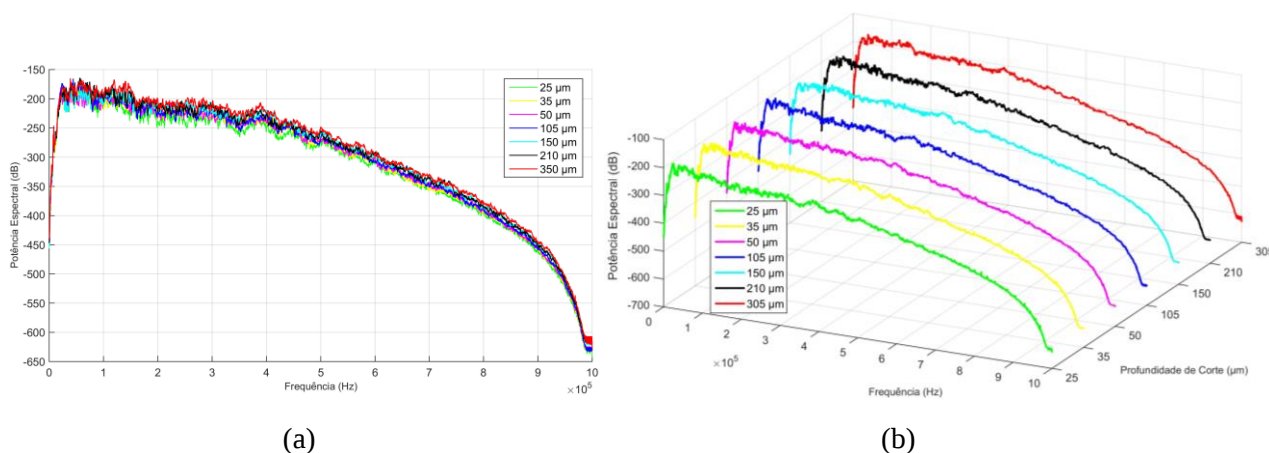


Figura 5. PSD dos sinais de retificação de cerâmica

A análise espectral é um método que baseia-se na seleção de faixas de frequências que irão caracterizar a variável física que é desejável controlar ou estimar, ou seja, as faixas de frequência em que o sinal apresenta correlação com o processo real que está sendo observado mediante o sinal aquisitado (Conceicao Junior et al. 2016). As bandas de

frequência em que os espectros não estão próximos e nem mesmo se cruzam, são bandas apropriadas para serem utilizadas em filtros com objetivo de ressaltar no sinal a natureza do processo. Assim a análise torna-se mais consistente, além de torná-la simples, visto que, muitas bandas de frequências são eliminadas, permanecendo somente as que são importantes para o processo.

A figura 6 apresenta a FFT e o PSD dos sinais selecionados considerando as bandas que caracterizam o processo. A banda escolhida foi de 82 a 94 kHz. Os limites entre as bandas são bem claros, havendo somente um ponto comum em 86 a 88 kHz na Fig. (6a) e um cruzamento entre 88 e 90 kHz na Fig. (6b). A Fig. 6 mostra a equivalência na escolha de bandas para análise espectral, ambos os métodos, FFT e PSD apresentaram um resultado muito similar.

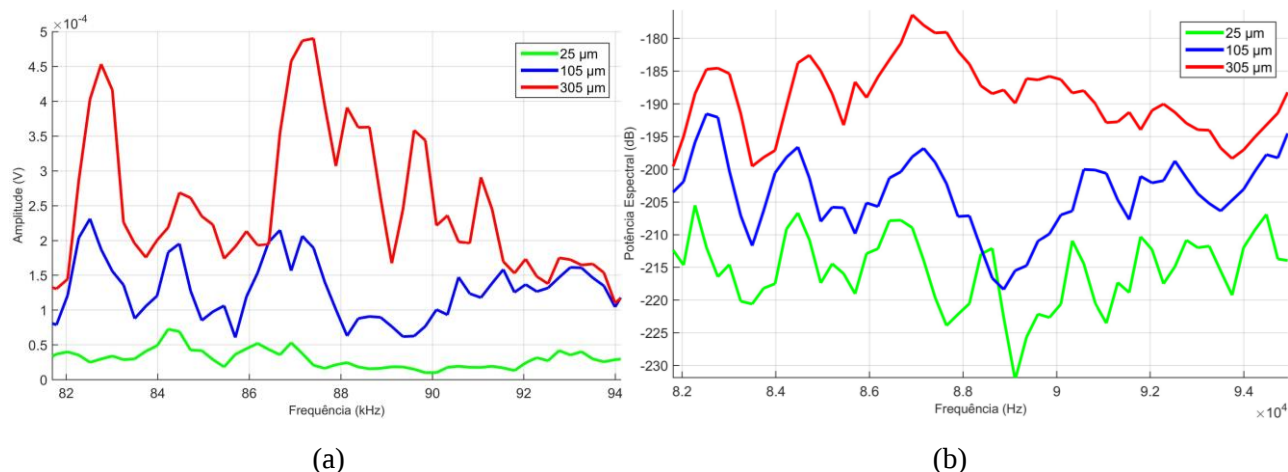


Figura 6. FFT e PSD banda de 82 a 94 kHz

A partir da escolha das bandas um filtro digital foi utilizado com limite entre 82 a 94 kHz do tipo *bandpass*, com ordem cinco. O processamento seguinte aos sinais filtrados foi efetuar o cálculo RMS, utilizando uma janela de 2048 pontos, equivalente a 1 ms. A Fig. (7) apresenta os sinais RMS das profundidades de corte selecionadas (originais e filtrados). As amplitudes dos sinais seguem a mesma tendência apresentada anteriormente, ou seja, crescimento de amplitude com aumento de profundidade de corte, porém com o RMS é possível identificar picos característicos nos sinais da Fig. (7e) e Fig. (7f). Esses picos podem ser relacionados com a superfície da peça, eventos como trincas e aumento de rugosidade podem alterar o sinal.

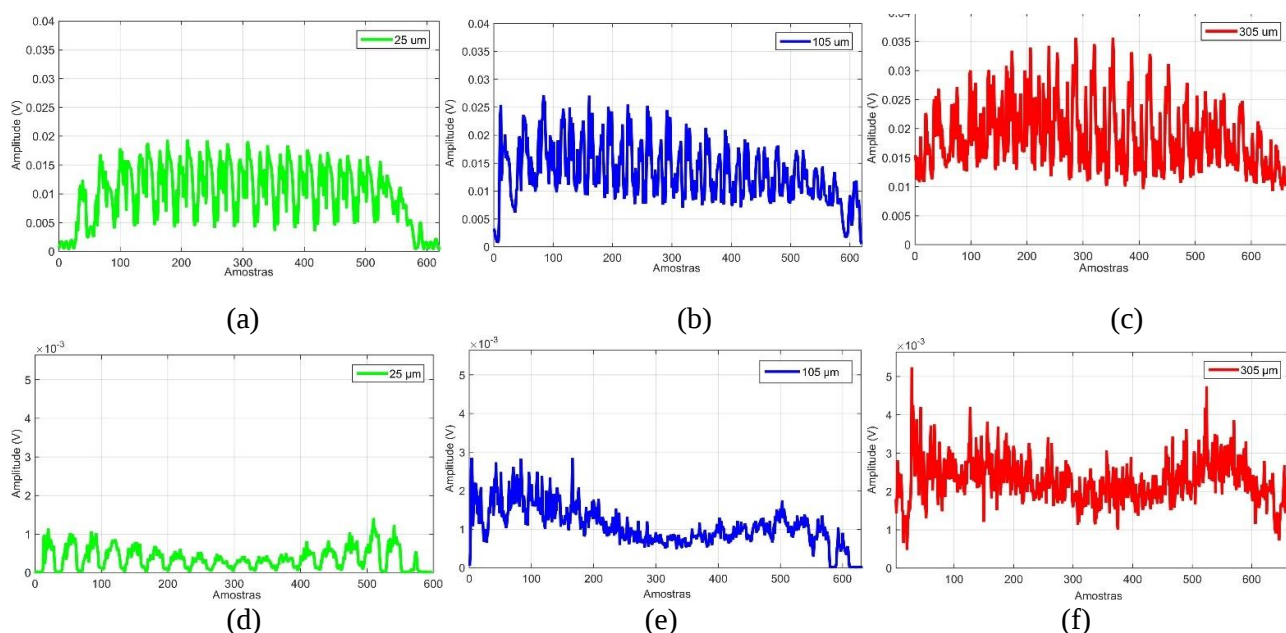


Figura 7. RMS do sinal original (a), (b), (c) e filtrado em 82 a 94 kHz (d), (e), (f)

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Fig. (8) apresenta a média de rugosidade *versus* profundidade de corte. O parâmetro de Rugosidade média (R_a) indica a média dos desvios irregulares no espaço analisado da peça. Observa-se que o aumento do nível de rugosidade

deu-se próximo da linearidade. Exceto pela profundidade de 150 μm , que apresentou níveis de amplitude menores. O mesmo ocorreu dentro dos espectros de frequência (Fig. (4) e Fig. (5)) reproduzindo assim o mesmo comportamento na Fig. (8). Essas pequenas variações do processo são justificadas através das inúmeras variáveis que o compõem, a cerâmica por ser um material de elevada dureza, pode ter sofrido eventos que não ocorreram em outras profundidades induzindo alterações no sinal.

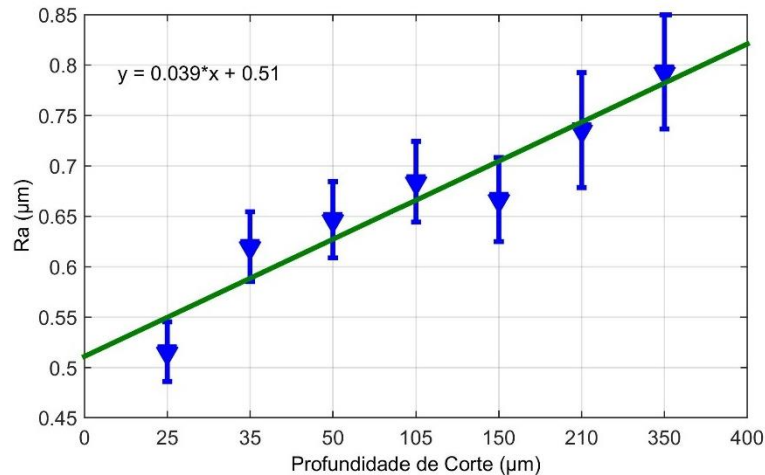


Figura 8. Rugosidade versus Profundidade de Corte

A última análise consiste na média RMS entre sinais não filtrados e sinais filtrados. A Fig. (9) apresenta a média RMS do sinal original (Fig. (9a)) e a média RMS do sinal filtrado (Fig. (9b)), bem como, os valores dos coeficientes de correlação (r) e determinação (R^2). Através da Fig. (9a) a análise em relação a rugosidade torna-se prejudicada, apesar de haver uma relação de linearidade, o modelo proposto possui baixo coeficiente de determinação, cerca de 70 %, ou seja, caso este modelo tenha sido adotado, pode-se haver 30 % de erro na assertividade do diagnóstico. Em contrapartida, a Fig. (9b) apresenta um modelo com alto coeficiente de correlação e de determinação, aproximadamente 94 % sendo assim, um modelo melhor se adotado em relação ao modelo do sinal não filtrado. Em uma operação em que não haja necessidade de assertividade e segurança altas, o modelo referente ao sinal não filtrado pode ser adotado, porém inúmeras operações necessitam de diagnósticos rápidos e precisos, portanto o modelo do sinal filtrado melhor se adequaria.

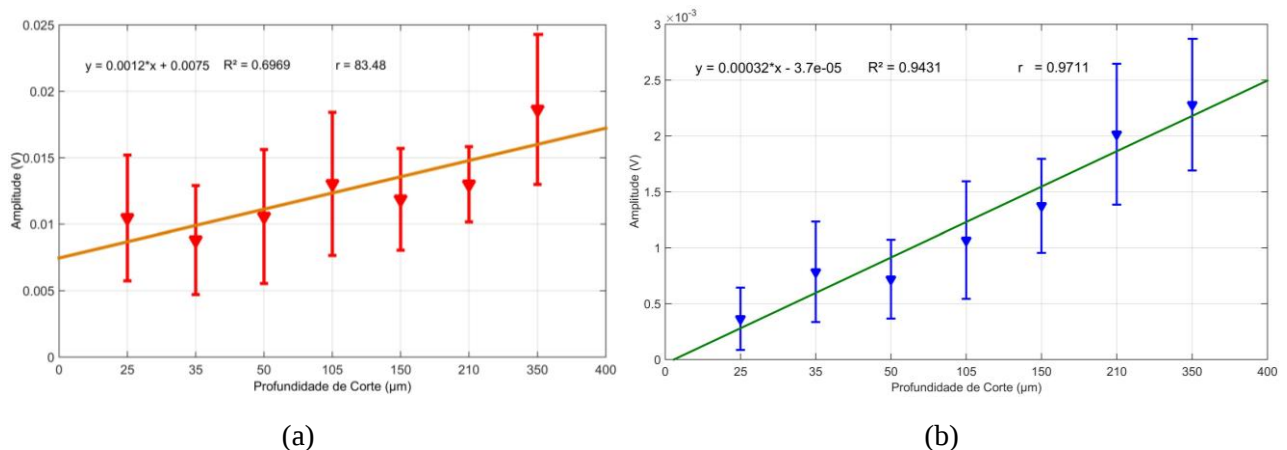


Figura 9. Média e Desvio RMS de sinal não filtrado e sinal filtrado

5. CONCLUSÕES

Por meio da análise do espectro de frequência para diferentes condições de profundidade de corte, verificou-se que o sinal apresenta amplitudes diferentes em faixas de frequência que caracterizam a condição do processo. Ambas análises, entre FFT e PSD apresentaram semelhanças em seus resultados. Tais faixas foram utilizadas como parâmetros para filtros digitais “bandpass” sendo possível obter sinais RMS e suas respectivas médias e desvio padrão, enfatizando a importância da seleção de bandas de frequência para análise dos sinais.

O estudo comparativo entre as médias dos sinais RMS filtrados e não filtrados dos diafragmas piezelétricos, apresentou resultados satisfatórios no que tange a utilização do filtro digital para melhor caracterização do nível de rugosidade das peças de cerâmica. Esse fato foi constatado, devido ao sinal não filtrado ter apresentado um comportamento pouco previsível para conclusões sobre o comportamento do processo, diferindo da natureza do sinal filtrado, que apresentou um comportamento mais satisfatório, corroborado pelos índices de correlação e determinação. Assim, a utilização de sinais filtrados através de parâmetros baseados em investigação do espectro de frequência em conjunto com as médias e desvios de sinal RMS possuem maior eficácia para diagnóstico da qualidade superficial da peça do que a utilização de sinais não filtrados em conjunto com suas respectivas médias e desvios. Além disso, deve-se ressaltar que o modelo proposto se aplica somente a configuração proposta neste trabalho, ou seja, rebolos de óxido de alumínio e peças de cerâmica alumina.

Dessa forma, esse trabalho mostra que a seleção, estudo de uma faixa de frequência isoladamente e a combinação com as estatísticas, pode contribuir para o monitoramento da retificação de cerâmicas. Apontando uma significativa melhora de sistemas de monitoramento de baixo custo, baseados na utilização de diafragmas piezelétricos.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a CAPES (Comissão de Aperfeiçoamento de Pessoal do Ensino Superior) pelo suporte financeiro a pesquisa e a UNESP – Universidade Estadual Júlio Mesquita Filho – Campus Bauru, onde a pesquisa foi conduzida.

7. REFERÊNCIAS

- Agarwal, S., 2015. Optimizing machining parameters to combine high productivity with high surface integrity in grinding silicon carbide ceramics. *Ceramics International*, 42(5), pp.6244–6262. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.01.008>.
- Almeida, V.A.D. De, Baptista, F.G. & Aguiar, P.R. De, 2015. Piezoelectric transducers assessed by the pencil lead break for impedance-based structural health monitoring. *IEEE Sensors Journal*, 15(2), pp.693–702.
- Baptista, F.G. & Filho, J.V., 2011. Piezoelectric Transducers Applied in Structural Health Monitoring: Data Acquisition and Virtual Instrumentation for Electromechanical Impedance Technique. *Farzad Ebrahimi. (Org.). Advances in Piezoelectric Transducers.*, 1, pp.105–128.
- Chang, C.W. & Kuo, C.P., 2007. An investigation of laser-assisted machining of Al₂O₃ ceramics planing. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 47(3–4), pp.452–461.
- Conceição Jr, P.O. et al., 2015. Study of Surface Roughness of Ground Ceramics By Vibration Signal Analysis. *ABCM International Congress of Mechanical Engineering*, 23, pp.1–10.
- Conceicao Junior, P.O. et al., 2016. The Correlation of Vibration Signal Features in Grinding of Advanced Ceramics. *IEEE Latin America Transactions*, 14(9), pp.4006–4012. Available at: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7785926/>.
- Emami, M. et al., 2014. Investigating the Minimum Quantity Lubrication in grinding of Al₂O₃ engineering ceramic. *Journal of Cleaner Production*, 66, pp.632–643. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.11.018>.
- Emami, M., Sadeghi, M.H. & Sarhan, A.A.D., 2013. Investigating the effects of liquid atomization and delivery parameters of minimum quantity lubrication on the grinding process of Al₂O₃ engineering ceramics. *Journal of Manufacturing Processes*, 15(3), pp.374–388. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmapro.2013.02.004>.
- Jiang, S., Li, T. & Tan, Y., 2015. A DEM methodology for simulating the grinding process of SiC ceramics. *Procedia Engineering*, 102, pp.1803–1810. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2015.01.317>.
- Kalpakkian, S., Schmid, S.R. & Sekar, K.S.V., 2014. Summary for Policymakers. In *Intergovernmental Panel on Climate Change, ed. Climate Change 2013 - The Physical Science Basis*. Cambridge: Cambridge University Press, pp. 1–30. Available at: <http://ebooks.cambridge.org/ref/id/CBO9781107415324A009>.
- Ma, L., Gong, Y. & Chen, X., 2014. Study on surface roughness model and surface forming mechanism of ceramics in quick point grinding. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 77, pp.82–92. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2013.11.001>.
- Marchi, M. et al., 2015. Grinding process monitoring based on electromechanical impedance measurements. *Measurement Science and Technology*, 26(4), p.45601. Available at: <http://stacks.iop.org/0957-0233/26/i=4/a=045601>.
- Nakai, M.E., Aguiar, P.R., et al., 2015. Evaluation of neural models applied to the estimation of tool wear in the grinding of advanced ceramics. *Expert Systems with Applications*, 42(20), pp.7026–7035.
- Nakai, M.E., Júnior, H.G., et al., 2015. Evaluation of neural models to estimate the roughness of advanced ceramics in surface grinding. *International Journal of Machining and Machinability of Materials*, 17(5), pp.454–479.
- Puth, M.T., Neuhäuser, M. & Ruxton, G.D., 2014. Effective use of Pearson's product-moment correlation coefficient. *Animal Behaviour*, 93, pp.183–189.
- Ribeiro, D.M.S. et al., 2015. Low-Cost Piezoelectric Transducer Applied To Workpiece Surface Monitoring in Grinding

- Process. *ABCM International Congress of Mechanical Engineering - COBEM*, 23(1–10).
- Rodrigues, A.C. et al., 2016. Effect of Grinding Parameters on Surface Finishing of Advanced Ceramics. , pp.1012–1020.
- Saravanan, T.J., Gopalakrishnan, N. & Rao, N.P., 2015. Damage detection in structural element through propagating waves using radially weighted and factored RMS. , pp.520–538.
- Shen, J.Y. et al., 2015. Study on wear of diamond wheel in ultrasonic vibration-assisted grinding ceramic. *Wear*, 332–333, pp.788–793. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043164815001568>.
- Winter, M. et al., 2014. Determining optimal process parameters to increase the eco-efficiency of grinding processes. *Journal of Cleaner Production*, 66, pp.644–654.
- Xiao, X. et al., 2015. Study on cutting force model in ultrasonic vibration assisted side grinding of zirconia ceramics. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 104, pp.58–67. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2016.01.004>.

8. DIREITOS AUTORAIS

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

MONITORING THE GRINDING OF ADVANCED CERAMICS BY LOW - COST PIEZOELECTRIC DIAPHRAGM

Felipe Aparecido Alexandre, felipeapalexandre@hotmail.com¹
Pedro de Oliveira Conceição Junior, pedroliveira931@hotmail.com¹
Martin A. Aulestia Vieira, aulestia.martin16@gmail.com¹
Paulo Roberto de Aguiar, aguiarpr@feb.unesp.br¹
Eduardo Carlos Bianchi, bianchi@feb.unesp.br²
Bruno Albuquerque de Castro, bruno.castro@feb.unesp.br¹
Bento Rodrigues de Pontes Junior, brpontes@feb.unesp.br¹

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

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

Resume: The grinding is a machining process that aims to confer high quality surface finish. Such a process is widely used in the finishing of advanced ceramics. The monitoring of ceramic grinding through the piezoelectric diaphragm signal is presented as an alternative for the diagnosis of the surface of the piece. Recent research results have shown that this signal has a satisfactory potential to monitor the grinding process. The present work aims to study the signal of piezoelectric diaphragms, seeking the extraction of characteristics that best relate to the roughness in the machined parts. A flat tangential grinding machine with diamond grinding wheel and ceramic alumina test bodies was used. The signal was measured by a piezoelectric diaphragm and collected by an oscilloscope at the sampling rate of 2 MHz. The tests were performed at different cutting depths, adopting a constant speed of the part (v_w), obtaining soft machining conditions to the most severe ones. The roughness R_a of the machined parts was measured at four points along the same, by means of a portable rugosimeter. The data of different depths of cut were processed and its harmonic content obtained by means of FFT (Fast Fourier Transform) and PSD (Processing Spectral Density). From these spectra was chosen the best band that represented the different conditions of wear. Then, a digital filter was applied to the pure signals for the chosen band and, later, the RMS (Root Mean Square) value was obtained for the filtered and unfiltered signal, compared to the measured roughness values. Analysis by the coefficient r and R^2 were performed. From the obtained results, it was verified that the piezoelectric diaphragm signal and roughness increase their amplitude levels, as the machining conditions become more severe. The roughness remained, in general, within the acceptable range of values. It is concluded that the piezoelectric diaphragm signal and roughness have a tendency to grow along the cut depths and that both have opposite amplitudes. From this study, low-cost monitoring systems can be improved and developed in future work.

Keywords: Advanced Ceramics, Rectification, Piezoelectric Diaphragm, Monitoring, Roughness