

ANÁLISE TEMPO-FREQUÊNCIA DE SINAIS DE EMISSÃO ACÚSTICA NO MONITORAMENTO DO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO DE CERÂMICAS AVANÇADAS

Martin Antonio Aulestia Viera, aulestia.martin16@gmail.com¹

Pedro de Oliveira Conceição Junior, pedroliveira@hotmail.com¹

Felipe Aparecido Alexandre, felipeapalexandre@hotmail.com¹

Carine Gonçalves Távora, carine.tavora@feb.unesp.br¹

Paulo Roberto de Aguiar, aguiarpr@feb.unesp.br¹

Eduardo Carlos Bianchi, bianchi@feb.unesp.br²

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

Resumo: O estudo e monitoramento da rugosidade da peça é um dos parâmetros mais importantes do processo de retificação. Alguns sistemas de monitoramento da retificação de cerâmicas avançadas têm sido propostos por meio de sensores, tais como, emissão acústica e vibração. No entanto, a análise em tempo-frequência é uma técnica que ainda não foi relatada na literatura para o monitoramento da qualidade superficial de peças de cerâmicas. O trabalho tem o intuito de monitorar a qualidade superficial de cerâmicas usinadas, a partir do processamento digital de sinais de emissão acústica (EA) e potência, com o propósito de detectar o desgaste da peça e alterações na rugosidade. Ensaios experimentais foram realizados com uma máquina retificadora plana equipada com um rebolo diamantado. Corpos de prova de cerâmica alumina foram usados e sete profundidades de corte diferentes e duas velocidades da peça foram adotadas nos testes, representando condições de retificação leves e agressivas. A rugosidade foi mensurada em diferentes pontos ao longo das peças, após os ensaios, usando um rugosímetro portátil. Um sensor de emissão acústica e um sensor de corrente elétrica foram usados para coleta dos sinais por meio de um sistema de aquisição de dados. A partir da análise dos sinais coletados foi possível obter, por meio da Transformada de Fourier de Tempo Curto (STFT), os instantes de tempo exatos em que se encontravam as frequências características da retificação de cerâmicas avançadas. Uma correlação com as características de cada profundidade de corte também foi obtida a partir da energia específica. Os resultados mostram que existe uma relação entre a rugosidade e a potência consumida durante o processo. Além disso a análise dos sinais de EA por meio da STFT permitiu identificar a qualidade superficial da peça.

Palavras-chave: Retificação, Monitoramento, STFT, Potência, Energia Específica.

1. INTRODUÇÃO

1.1. Processo de Retificação

A retificação é um processo abrasivo de remoção de material utilizado no acabamento de componentes feitos de cerâmica, metais e outros materiais. A precisão e o acabamento superficial obtidos através da retificação podem alcançar resultados dez vezes melhores do que os apresentados no torneamento ou fresagem. A retificação emprega uma ferramenta abrasiva, geralmente um rebolo, o qual remove material durante a rotação, por meio do atrito entre os grão abrasivos e a superfície da peça. O rebolo é composto de partículas abrasivas posicionadas aleatoriamente. Essas partículas abrasivas atuam como ferramentas de corte, removendo pequenas quantidades de material da superfície da peça (Liao *et al*, 2008).

Durante o processo de retificação dois fatores estão presentes, o primeiro consiste na remoção do material da peça enquanto que o segundo consiste no desgaste do rebolo. Estes dois fatores vão depender da profundidade de corte e da força de retificação. Todos os processos de retificação agem de maneira semelhante (King e Hahn, 1986).

De acordo com Agarwal e Rao (2005), apesar dos esforços de pesquisa em retificação, ainda precisam ser realizados novos estudos para padronizar modelos teóricos para prever e monitorar a rugosidade da peça, melhorando assim a

qualidade do produto e o custo de fabricação. Contudo, a medição automatizada da rugosidade durante o processo de retificação ainda é difícil de ser aplicada. Nesse contexto, vários modelos que empregam redes neurais foram estudados em (Kwak e Ha, 2004) e (Nakai *et al*, 2015). No entanto, esses modelos requerem muito tempo de processamento e muitos dados de entrada, embora tenha sido comprovado que são bastante efetivos. Os modelos de monitoramento indireto, apresentados neste trabalho, estão sendo estudados com a finalidade de simplificar os cálculos e reduzir o tempo de processamento.

1.2. Cerâmicas Avançadas

As cerâmicas avançadas estão sendo muito utilizadas sob complexas exigências, nas quais são necessários materiais de alto desempenho, devido à combinação única de suas propriedades (Aguilar *et al*, 2003). As principais vantagens das cerâmicas são o desempenho físico, mecânico e químico superior a outros materiais, a alta resistência, baixa taxa de expansão e estabilidade química (Zhang *et al*, 2014). A presença de fases cristalinas, originadas da queima e posterior esfriamento, é um dos principais motivos das boas propriedades das cerâmicas avançadas (Dutra e Araujo, 2002).

As características favoráveis das cerâmicas são acompanhadas por dificuldades associadas com a sua usinagem, e principalmente com a retificação por causa da alta rigidez do material. As cerâmicas demandam uma alta precisão de usinagem e qualidade na sua superfície. O desenvolvimento de materiais cerâmicos com propriedades aprimoradas está levando a sua ampla consideração em aplicações estruturais. No entanto, a utilização atual de cerâmicas avançadas tem sido bastante limitada, principalmente porque a usinagem desses materiais apresenta um alto custo. O estudo da interação entre os grãos abrasivos do rebolo e a superfície da peça é um parâmetro muito importante na criação de uma base tecnológica mais eficiente para o processo de retificação (Agarwal e Rao, 2005).

1.3. Parâmetros Envolvidos no Processo de Retificação

1.3.1. Rugosidade (R_a)

O parâmetro mais utilizado para quantificar a qualidade de uma superfície é a rugosidade, sendo a microestrutura do rebolo o principal modelo analítico para estimá-la (Hecker e Liang, 2003). A qualidade da superfície da peça gerada pela retificação determina muitas de suas características, tais como as tolerâncias mínimas, a eficácia da lubrificação e a vida do componente. Alguns fatores que caracterizam uma superfície são: fendas produzidas pelo impacto térmico, trincas produzidas pela fratura do grão, ondulações produzidas pela natureza aleatória do processo e pela vibração da máquina. Ao considerar todos esses fatores, uma previsão completa da topografia da superfície é um problema complexo.

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 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 e $p(y)$ é a probabilidade de que a altura do grão tenha um valor particular y . A rugosidade representa o somatório das áreas acima e abaixo da linha dividido pelo comprimento total do perfil.

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

A espessura equivalente de corte (h_{eq}) representa a espessura da camada de cerâmica que é removida pelo rebolo numa volta completa. Este parâmetro é muito importante já que permite quantificar uma condição de trabalho a partir dos parâmetros de entrada. É definida como a relação entre a taxa de remoção específica de material (Q'_w) e a velocidade de corte (v_s) (Bianchi *et al*, 1996).

$$h_{eq} = \frac{Q'_w}{v_s} \text{ ou } h_{eq} = \frac{a \cdot v_w}{v_s} \quad (2)$$

A taxa específica de remoção de material é determinada pelo produto entre a penetração do rebolo na peça (a) e a velocidade da peça (v_w).

1.4. Monitoramento do Processo

A maneira mais eficiente de manter uma boa qualidade de acabamento, obter resultado esperados e evitar danos no processo de usinagem é o monitoramento do processo através de métodos diretos e indiretos. O método direto mais utilizado para mensurar a qualidade superficial da peça é a medição da rugosidade por meio de perfilômetros ópticos. A maioria dos processos de monitoramento direto necessitam da interrupção do processo, tendo como consequência o aumento no tempo de produção e consequentemente o aumento dos custos (Alexandre *et al*, 2017). Métodos indiretos, no

entanto, baseiam-se em sinais de sensores, que estão relacionados a variável de interesse, dessa forma não há necessidade de interromper o processo de usinagem. A detecção de defeitos é realizada por meio de correlações empíricas (Lauro *et al*, 2014). Assim, a estimação da rugosidade através do processamento de sinais advindos do processo de retificação, torna-se uma alternativa que viabiliza a avaliação da superfície da peça de forma menos onerosa para indústria.

1.4.1. Emissão Acústica (EA)

Emissões acústicas são ondas acústicas geradas dentro de um material sob pressão mecânica (Hassui *et al*, 1998). O uso da EA tem sido reconhecido como uma das técnicas mais promissoras para o monitoramento do processo de retificação. A utilização dessa técnica é relatada em diferentes trabalhos, por exemplo, detecção do desgaste do rebolo e da carga (Dolinsek e Kopac, 1999) e (Dornfeld e Cai, 1984), detecção de queima e trincas (Aguiar *et al*, 2012) e (Tonshoff *et al*, 2002), controle do processo (Kluft, 1993) e estimação da rugosidade (Agarwal e Rao, 2005).

O sinal de EA contém informações relacionadas aos possíveis problemas de retificação e rugosidade (Kwak e Song, 2001). De acordo com Kim *et al* (2001), geralmente, o sinal de EA é mais sensível devido a sua faixa de frequência ser superior à faixa de frequência das vibrações e ruídos do ambiente, permitindo assim, que esses ruídos sejam facilmente filtrados. O sinal de EA pode ser analisado no domínio da frequência ou do tempo.

1.4.2. Potência de Retificação (P)

A potência é um dos parâmetros mais utilizados no monitoramento do processo de retificação. Na maioria das vezes, a potência é obtida por meio da corrente mensurada no motor elétrico e da tensão de alimentação. É possível obter uma estimativa da força de corte se o modelo do motor elétrico estiver disponível (Nakai *et al*, 2015). Em altas velocidades, a força tangencial é responsável pela dissipação de potência. Em muitos casos, desconsidera-se a potência associada ao avanço e à velocidade transversal (Marinescu *et al*, 2007).

1.5. Processamento de Sinais

1.5.1. Energia Específica (e_c)

O processo de retificação pode ser caracterizado pela energia específica utilizada no processo, que é a quantidade de trabalho necessária para separar uma unidade de volume de material do substrato, compreendendo a energia de formação do cavaco, energia de fricção entre os grãos abrasivos e a energia dissipada na deformação plástica (Fujita *et al*, 2006). A energia específica pode ser expressa como:

$$e_c = \frac{P}{Q_w} \text{ ou } e_c = \frac{P}{a*b*v_w} \quad (3)$$

Onde Q_w é a taxa de remoção do material e b a largura de retificação. O autor também expressa que a energia específica associada com o processo de remoção dúctil de material é muito maior que a obtida no modo frágil. Portanto, a energia de fratura de superfície de um material cerâmico é muito menor que a energia necessária para realizar uma deformação plástica via cisalhamento e deformação.

1.5.2. Transformada de Fourier de Tempo Curto (STFT)

Uma abordagem alternativa na análise no domínio da frequência é a short time Fourier transform (STFT). Esta alternativa consiste em segmentar uma sequência em subsequências de janelas curtas, espaçadas por um intervalo uniforme de tempo e a sua transformada discreta de Fourier (DFT) calculada separadamente. Com este método é possível realizar uma análise mais detalhada do espectro de frequência (Zhang *et al*, 2006). A STFT é definida pela seguinte equação:

$$X(m, w) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x[n]f[n-m]e^{-jwn} \quad (4)$$

Sendo $f[n]$ uma janela de comprimento L e $x[n]$ o sinal coletado. O resultado obtido é uma representação bidimensional do sinal no tempo e na frequência. A resolução tempo-frequência pode ser ajustada mudando o tamanho da janela.

Algumas pesquisas relacionadas ao monitoramento do processo de retificação de cerâmicas avançadas podem ser estudadas em (Akbari *et al*, 1996), (Bianchi *et al*, 2001), (Feng *et al*, 2009) e (Junior *et al*, 2016). Os trabalhos mencionados estão baseados no estudo do corpo de prova e na análise de estatísticas advindas do processamento digital de sinais.

A medição direta da rugosidade torna-se inviável devido à necessidade de interrupção do processo de retificação, ocasionando o aumento do tempo e do custo de produção. Assim, a estimação da rugosidade através do processamento de sinais advindo do processo, torna-se uma alternativa que possibilita a avaliação do desgaste da superfície da peça de forma menos invasiva para a indústria. Considerando a crescente necessidade de aumentar a produção e manter um estrito

controle de qualidade, o monitoramento se apresenta como uma das melhores alternativas. Nesse sentido, o objetivo deste trabalho é monitorar a superfície da peça por meio de sinais de Emissão Acústica (EA) e potência. Análise tempo-frequência e aplicação da energia específica foram efetuadas de modo a relacionar a rugosidade da peça com os resultados obtidos. Assim, espera-se apresentar uma alternativa ao monitoramento do processo de retificação, baseado no processamento digital de sinais advindos desse processo.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Montagem do Banco de Ensaios

O experimento foi realizado para catorze peças de alumina de 20 mm de largura e 8 mm de espessura. Cada teste consistiu numa única passada do rebolo sobre a peça. Foi utilizado um fluido de corte para lubrificar e refrigerar o processo. Antes de cada teste, o rebolo foi dressado para aumentar a sua capacidade de corte. As peças foram divididas em dois grupos, cada grupo foi retificado a uma velocidade de peça diferente.

A retificadora utilizada 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 SD 126MN50B2 da marca Dinser. O fluido utilizado é da marca Shell, modelo DMS 3200-F1 com uma concentração de 4%. A rugosidade foi mensurada por meio de um rugosímetro da marca Taylor Hubson, modelo Surtronic 3+. A medição de rugosidade foi realizada perpendicularmente ao sentido de retificação. A Tabela 1 mostra os parâmetros de retificação.

Tabela 1. Parâmetros de Retificação

Velocidades Envolvidas no Processo	
Velocidade de Corte (Vs)	35 m/s
Velocidade da Peça (Vw)	58 e 125 mm/s
Especificações de Corte	
Geometria de Corte	Plana
Profundidade de Corte (μm)	25-35-50-105-150-210-350
Especificações de Refrigeração	
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

2.2. Aquisição de dados

A aquisição da EA foi efetuada por sensor de EA da marca SENSIS, o qual foi parafusado ao suporte da peça. O sensor de emissão acústica possui um envoltório fechado que ajuda a minimizar interferências e um pré-amplificador de entrada de baixo ruído. Uma garra de corrente da marca Tektronik, modelo A621, foi utilizada para medir a corrente e posteriormente a potência do motor. A escala da garra foi de 10-100 A de entrada e 10 mV/A de saída.

Todos os sensores foram testados quanto à boa sensibilidade do sinal antes dos testes e seus sinais foram simultaneamente coletados em cada passagem do rebolo por meio de um oscilógrafo da marca Yokogawa, modelo DL850 a uma taxa de aquisição de 2 MHz. A Figura 1 mostra a disposição do sensor de EA.

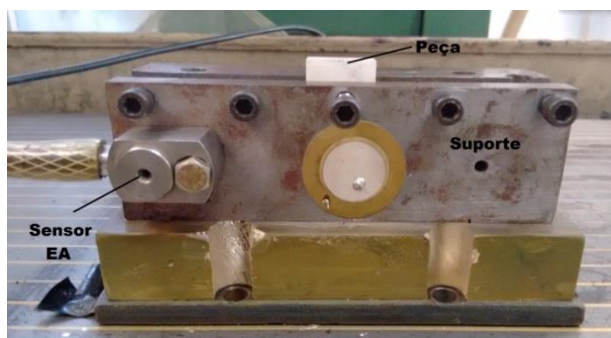


Figura 1. Disposição do sensor de EA

A garra de corrente foi ligada diretamente no oscilógrafo. No caso do sensor de EA, o sinal é primeiramente amplificado pelo módulo SENSIS DM42 que permite a configuração de filtros e ganhos de entrada e saída. O amplificador foi configurado com ganho de entrada e saída igual a 3 e redução de ruído igual a 10.

2.3. Processamento de Sinais

O processamento de sinais foi realizado no programa MATLAB. Primeiramente o sinal de EA correspondente ao trecho da retificação foi selecionado e filtrado por um filtro digital passa banda de 20 kHz a 400 kHz, pois essa é a faixa de frequência de operação do sensor. Posteriormente calculou-se a relação tempo-frequência para os sinais de modo a encontrar a melhor resolução para a STFT, o cálculo resultou em uma relação de tempo de 10 milissegundos para 200 Hz de frequência. A janela escolhida para o cálculo da STFT foi a retangular, com 8.192 pontos para calcular a Transformada Discreta de Fourier. A potência foi posteriormente calculada por meio de uma curva de calibração que relaciona os valores de corrente elétrica com os valores de potência mecânica de acordo com os dados cedidos pelo fabricante do motor. Finalmente, a energia específica foi calculada por meio da relação entre a potência elétrica do motor trifásico e a taxa de remoção do material.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os valores médios de rugosidade em função das profundidades de corte, bem como a energia específica em função da espessura de corte equivalente são apresentados na Figura 2. A Figura 2a mostra a rugosidade média de cada peça para as duas velocidades utilizadas (58 mm/s e 125 mm/s). Foi considerada a média e o desvio padrão dos quatro pontos medidos em cada peça. Pode-se observar que os valores de rugosidade para as duas velocidades da peça seguiram a mesma tendência, se elevando de forma direta e proporcional ao aumento das profundidades de corte. Pode-se inferir que, conforme a profundidade de corte aumenta, a retificação se tornamais severa, em consequência, as peças apresentam rugosidade mais elevadas. Os valores de rugosidade para a velocidade da peça igual a 58 mm/s em geral foram maiores, exceto para a profundidade de corte de 350 μm , quando se considera o valor médio. No entanto, estatisticamente, com o auxílio dos intervalos de confiança, os valores em termos de tendência são semelhantes entre as duas velocidades da peça, para cada profundidade de corte, assim como aconteceu também na pesquisa de (Junior *et al*, 2015). Segundo Hassui e Diniz (2003), os valores de rugosidade para a retificação de cerâmicas não podem ultrapassar os 1,6 μm , portanto, os valores obtidos são aceitáveis para esse trabalho.

Ainda na Figura 2a, os valores observados de desvio padrão mais elevados, especialmente para as profundidades de corte mais severas, resultaram da agressividade do processo. Esses valores de desvio padrão são usuais para medições de rugosidade, devido à variação dos picos e vales da superfície da peça.

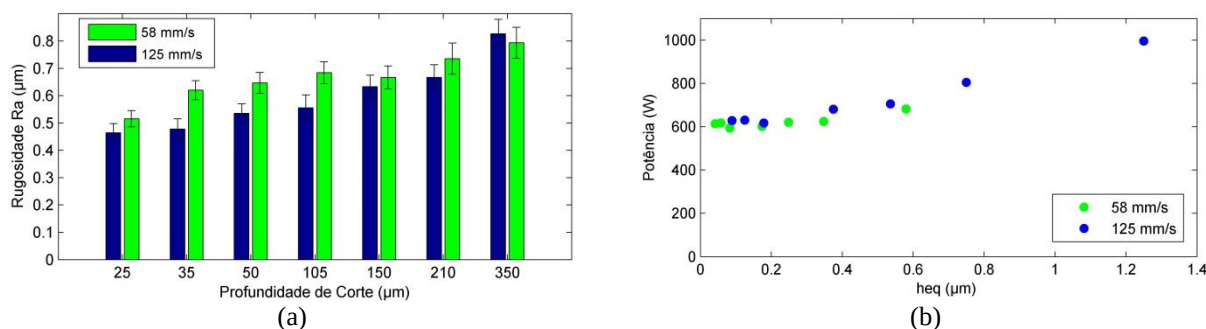


Figura 2. (a) Rugosidade, (b) Potência Mecânica

A Figura 2b mostra a potência mecânica em função da espessura equivalente de corte. Pode-se observar nesse caso que, diferente dos valores de rugosidade mostrados na Figura 2a, os valores de potência para a velocidade da peça de 125 mm/s foram mais elevados, principalmente para as três últimas espessuras equivalentes de corte, que naturalmente foram mais severas. Pode se inferir, em geral que a potência permaneceu praticamente no mesmo nível nos primeiros valores de heq, para ambas velocidades da peça, devido a sua constante de tempo ser mais lenta, assim como ocorreu nos trabalhos de (Junior, 2016) e (Agarwal e Rao, 2013). Os valores de potência e rugosidades apresentaram valores mais elevados na velocidade de 125 mm/s. Assim a espessura equivalente de corte é maior, o nível de potência aumenta, já que o motor de acionamento do rebolo requer uma potência maior para a usinagem da peça a uma profundidade de corte mais alta.

A energia específica é apresentada na Figura 3. Pode ser observado que quando maior a severidade de processo, menor a energia específica necessária para remoção do material, o que significa que devido à fragilidade do material, o mesmo possivelmente tenha sofrido mais fraturas fazendo com que o material seja removido com maior facilidade, ou seja, com menores valores de energia específica.

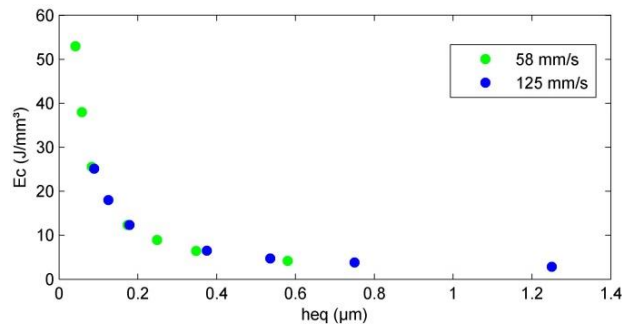


Figura 3. Energia Específica

Os resultados da STFT para duas profundidades de corte distintas nas duas velocidades da peça é apresentado na Tabela 2.

Tabela 2. Resultados da STFT

Velocidade da peça	Profundidade de Corte (μm)	
	25	350
58 mm/s		
125 mm/s		

Observa-se uma variação nas amplitudes das frequências do espectro que representa a menor profundidade de corte (25 μm). Essa variação está relacionada com o contato entre a peça e os grãos abrasivos do rebolo, que acontece de forma não uniforme já que muitos dos grãos abrasivos não possuem contato com a peça, gerando baixos níveis de energia. Desta forma, pouca atividade acústica é gerada, refletindo diretamente no conteúdo harmônico do sinal amostrado durante o processo.

Por outro lado, nota-se também que o espectrograma que representa a condição agressiva de retificação, isto é, quando a profundidade de corte é elevada (350 μm), o conteúdo harmônico ao longo do tempo é uniforme. Isto é ocasionado devido ao contato entre os grãos abrasivos do rebolo e a superfície da peça que ocorre de forma regular. Esse atrito acaba produzindo uma atividade acústica maior, gerando um nível de energia e conteúdo harmônico semelhante ao sinal, ou seja, frequências com amplitudes maiores e distribuição uniforme ao longo do tempo.

Nos dois resultados podemos observar que as frequências características da operação de retificação estão distribuídas de forma contínua ao longo do tempo, em outras palavras, o conteúdo harmônico característico da retificação está presente em todos os instantes de tempo, no entanto, para as condições mais agressivas, o conteúdo harmônico assume níveis de amplitude maiores.

Por último, pode ser observado que todos os resultados apresentaram um aumento de energia no começo e no fim do processo de retificação. Esse é um comportamento típico da retificação, já que representa o primeiro contato dos grãos abrasivos do rebolo com a peça, assim como o último contato. A área de contato peça-rebolo foi menor no começo e no fim da usinagem, provocando uma maior concentração de energia acústica e, consequentemente, refletindo no conteúdo harmônico do processo.

4. CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos no presente trabalho, pode-se concluir que os valores de rugosidade da superfície retificada permaneceram dentro de um padrão aceitável, de acordo com a literatura, como pode ser visto nos valores de desvio padrão. Quanto maior a profundidade de corte, maior a rugosidade da peça, considerando apenas o valor médio. Da mesma forma, foi identificado o aumento na potência elétrica. Conclui-se que o aumento da agressividade do processo, acarreta no aumento da rugosidade, potência e no sinal de emissão acústica.

A análise dos sinais de EA via STFT permitiu identificar os estágios de agressividade do processo de retificação em função das diferentes profundidades de corte e velocidades da peça testadas e assim, possibilitou diferenciar os níveis de rugosidade entre as peças. As amplitudes dos espectros dos sinais auxiliam nesta diferenciação.

O resultado da energia específica reflete na alta fragilidade da cerâmica. Conforme a profundidade de corte aumenta, o número de trincas ou rachaduras presentes na peça também aumenta, o que facilita a remoção do material, diminuindo a energia necessária para remoção.

Os resultados obtidos neste trabalho se aplicam a retificação de cerâmica alumina com rebolo diamantado resinóide. Vale ressaltar, que a técnica proposta de análise tempo frequência aliada a energia específica, de modo a relacionar os sinais advindos do monitoramento do processo com as medidas diretas observadas, no caso rugosidade, pode ser estendida a outras configuração de bancos de ensaios. Para isso, novos testes devem ser efetuados de modo a comprovar a eficiência do método.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem aos programas de Pós Graduação de Engenharia Elétrica e Mecânica da Faculdade de Engenharia de Bauru- UNESP, assim como ao Laboratório de Aquisição de Dados e Processamento de Sinais e ao Laboratório de Usinagem por Abrasão da FEB- UNESP.

6. REFERÊNCIAS

- Agarwal, S., Rao, P. V., 2005. "A probabilistic approach to predict surface roughness in ceramic grinding", *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 45(6), pp. 609–616.
- Agarwal, S., Rao, P. V., 2013. "Predictive modeling of force and power based on a new analytical undeformed chip thickness model in ceramic grinding", *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 65, pp. 68–678.
- Agarwal, S., Rao, V., 2005. "A probabilistic approach to predict surface roughness in ceramic grinding". *Machine tools & manufacture*, vol. 45, pp. 609-616.
- Aguiar, P.R., Bianchi, E.C., Canarim, R.C., 2012. "Monitoring of Grinding Burn by Acoustic Emission". *Acoustic Emission- intechopen*, pp. 341-364
- Aguiar, P.R., Bianchi, E.C., Silva, E.J., Silva, Jr., Fortulan, C.A., 2003. "Advances ceramics evaluation of ground surface", *Cerâmica* 49, pp. 174-177.
- Akbari, J., Saitob, Y., Tadaaki, H., Shizuichi, H., Shinzo, E., 1996. "Effect of grinding parameters on acoustic emission signals while grinding ceramics", *J. Mater. Process. Technol. 2nd Int. Conf. Prod. Eng.*, vol. 62, pp. 403–407.
- Alexandre, F. A., Oliveira, P.C.J., Viera, M.A.A., Junior, B.R.P., Aguiar, P.R., Bianchi, C.E., Castro, B.A., 2017. "Monitoramento da retificação de cerâmicas avançadas por meio de diagramas piezelétricos de baixo custo", 9 Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação.
- Bianchi, E. C., Aguiar, P. R., Silva, E. J., Silva Jr, C. E., Valarelli, I. D., Monici, R., 2001. "Advanced Ceramics: Evaluation of the Mechanism of Stock Removal and Ground Surface Quality", *J. Brazilian Soc. Mech. Sci.*, vol. 23(1).
- Bianchi, E.C., Sanches, L.E.A., Fernandes, O.C., Mogami, O., Silva JR, C.E. & Aguiar, P.R., 1996. "Análise do Comportamento de Rebolos Convencionais na 50 Retificação de Aços Dúcteis". In: IV Congresso norte nordeste de engenharia mecânica, Recife-PE, pp. 387-392.
- Dolinsek, S., Kopac, J., 1999. "Acoustic emission signals for tool wear identification". *Wear*, vol. 225-229, pp. 295-303.
- Dornfeld, D. and Cai, H.G., 1984, An Investigation of Grinding and Wheel Loading Using Acoustic Emission, *Trans. ASME, J. of Eng. for Ind.*, Vol. 106, No.1, 28.33.
- Dutra, R. P. S., Araujo Pontes, L. R., 2002. "Obtenção da análise de cerâmicas porosas com a incorporação de produtos orgânicos ao corpo cerâmico", *Cerâmica*, vol. 48(308), pp. 223-230.
- Feng, J., Kim, B. S., Shih, A., Ni, J., 2009. "Tool wear monitoring for micro-end grinding of ceramic materials", *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 209(11), pp. 5110–5116.
- Fiocchi, A. A., Sanches, L. E., Lisboa-filho, P. N., Fortulan, C. A., 2016. "The ultra-precision U d -lap grinding of flat advanced ceramics", *J. Mater. Process. Tech.*, vol. 231, pp. 336–356.
- Fujita, H., Bianchi, E. C., Aguiar, P. R., Sanchez, L. E., da S. Jr., C. E., 2006. "Contribuição ao estudo da retificação abrasiva de materiais cerâmicos", *Cerâmica*, vol. 52, pp. 269–275.
- Hassui, A., Diniz, A. E., 2003. "Correlating surface roughness and vibration on plunge cylindrical grinding of steel", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 43(8), 855–862.
- Hassui, A., Diniz, A.E., Oliveira, J.F.G., Felipe, J., Gomes, J.J.F., 1998." Experimental evaluation on grinding wheel wear through vibration and acoustic emission". *Wear*, Vol. 217(1), pp. 7-14

- Hecker, R. L.; Liang S. Y., 2003. "Predictive modeling of surface roughness in grinding I", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 43, pp. 755–761.
- Junior, P. O. C., 2016. "Sinais de vibração no monitoramento do processo de retificação plana de cerâmicas avançadas", *Dissertação de mestrado, Faculdade de Engenharia de Bauru- FEB- UNESP*.
- Junior, P. O. C., Marchi, M., Aguiar, P. R., Bianchi, E. C., Valle Franca, T., 2016. "The Correlation of Vibration Signal Features in Grinding of Advanced Ceramics", *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 14(9), pp. 4006–4012.
- Junior, P.O.C., Ribeiro, D.M.S., Rodrigues, A.C., França, T.V., Aguiar, P.R., Bianchi, E.C., 2015. "Study of surface roughness of ground ceramics by vibration signals analysis", *ABCM International Congress of mechanical engineering*.
- Kim, H. Y., Kim, S. R., Ahn, J. H., 2001. "Process monitoring of centerless grinding using acoustic emission", *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 111(1-3), pp. 273–278.
- King, R.I., Hahn, R.S., 1986. "Handbook of modern technology", Chapman and Hall, pp. 1-360.
- Kluft, W., 1993, *Monitoring the Grinding and Dressing Operations Increases Output and Quality and Reduces Cost and Waste*, *Proc of 5th Int. Grind Conf.* MR93.371.
- Kwak, J. S., HA, M. K., 2004. "Neural network approach for diagnosis of grinding operation by acoustic emission and power signals", *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 147(1), pp. 65–71.
- Kwak, J., Song, J., 2001. "Trouble diagnosis of the grinding process by using acoustic emission signals", *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 41(6), pp. 899–913.
- Lauro, C.H., Brandao, L.C., Baldo, D., Reis, R.A., Davim, J.P., 2014. "Monitoring and processing signal applied in machining processes", *Measurement*, vol. 58, pp. 73-86.
- Liao, T.W., Tang, F., Qu, J., Blau, P.J., 2008. "Grinding wheel condition monitoring with boosted minimum distance classifiers", *Mechanical systems and signal processing*, vol. 22(1), pp. 217-232.
- Marinescu, I.D., Hitchner M., Uhlmann E., Rowe, W.B., Inasaki, I., 2007. "Handbook of Machining with Grinding Wheels", *CRC Press, Taylor & Francis Group*.
- Nakai, M. E., Júnior, H. G., Aguiar, P. R., Bianchi, E. C., Silva, P. S., 2015. "Evaluation of neural models to estimate the roughness of advanced ceramics in surface grinding", *Int. J. Mach. Mach. Mater.*, vol. 17(5), pp. 454–479.
- Nakai, M.E., Aguiar, P.R., Junior, H.G., Bianchi E.C., Spatti, D.H. & 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.
- Tonshoff, H.K., Friemuth, T., Becker, J.C., 2002. "Process Monitoring in Grinding". *CIRP Annals*, vol. 51(2), pp. 551-571.
- 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*, vol. 7(4), pp. 19-34.
- Zhang, S., Yu D., Sheng, S., 2006. "A discrete STFT processor for real-time spectrum analysis", *IEEE Asia-Pacific Conf. Circuits Syst. Proceedings*, no. 3, pp. 1943–1946.

7. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

TIME-FREQUENCY ANALYSIS OF ACOUSTIC EMISSION SIGNALS IN THE MONITORING OF THE GRINDING PROCESS OF ADVANCED CERAMICS

Martin Antonio Aulestia Viera, aulestia.martin16@gmail.com¹
Pedro de Oliveira Conceição Junior, pedroliveira@hotmail.com¹
Felipe Aparecido Alexandre, felipeapalexandre@hotmail.com¹
Carine Gonçalves Távora, carine.tavora@feb.unesp.br¹
Paulo Roberto de Aguiar, aguiarpr@feb.unesp.br¹
Eduardo Carlos Bianchi, bianchi@feb.unesp.br²

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

Abstract. *The study and monitoring of the surface roughness is one of the most important parameters of the grinding process. Some advanced ceramic grinding monitoring systems have been proposed through acoustic emission and vibration sensors signals. However, the time-frequency analysis is a technique that has not yet been reported in the literature for monitoring the surface quality of ceramic workpieces. The aim of this work is to monitor the surface quality of machined ceramics workpieces by means of her surface roughness, from the digital processing of acoustic emission (EA) and power signals, in order to detect the wear of the workpiece. Experimental tests were performed with a flat grinding machine equipped with a diamond grinding wheel. Ceramic alumina were used and seven different cutting depths and two workpiece velocities were adopted in the tests, representing light and aggressive grinding conditions. The roughness was measured at different points along the pieces, after the tests, using a portable rugosimeter. An acoustic emission sensor and an electric current sensor were used to collect the signals by means of a data acquisition system. From the analysis of the collected signals, it was possible to obtain the exact time instants in which the characteristic frequencies of the rectification of advanced ceramics process were found, thanks to the Short Time Fourier Transform (STFT). A correlation with the characteristics of each depth of cut was also obtained from the specific energy. The results showed that there is a relation between the roughness and the surface of the workpiece, as well as the power consumed during the process. In addition, the analysis of the EA signals through STFT allowed the identification of the surface quality of the workpiece.*

Keywords: Grinding, Monitoring, STFT, Power, Specific Energy.